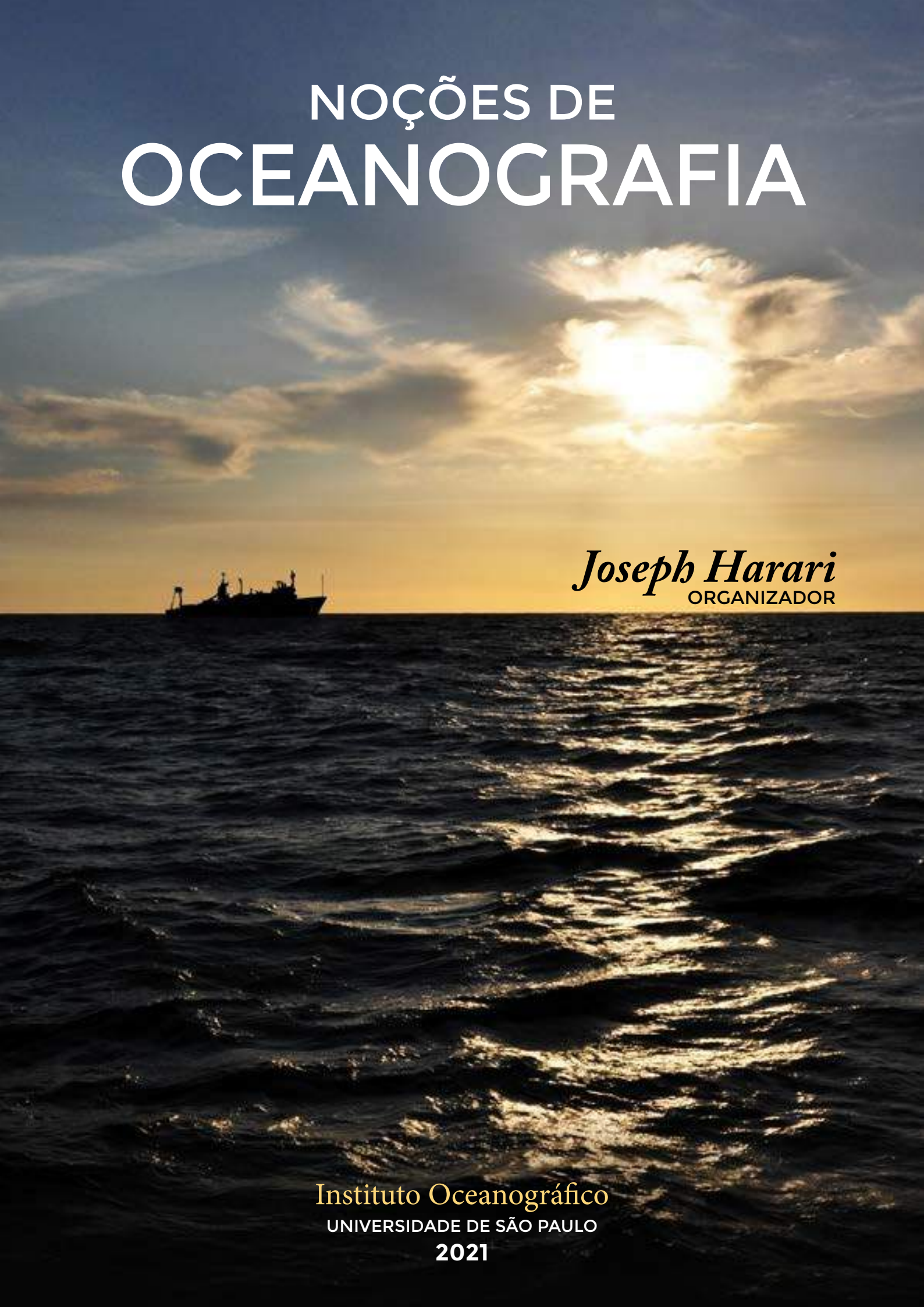
# NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA



*Joseph Harari*
ORGANIZADOR

Instituto Oceanográfico
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
2021

# NOÇÕES DE
# OCEANOGRAFIA

REALIZAÇÃO

APOIO

## UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**Reitor**
Vahan Agopyan

**Vice-Reitor**
Antonio Carlos Hernandes

## PRÓ-REITORIA DE CULTURA E EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA

**Pró-Reitora**
Maria Aparecida de Andrade Moreira Machado

**Pró-Reitora Adjunta**
Margarida Maria Krohling Kunsch

## INSTITUTO OCEANOGRÁFICO

**Diretora**
Elisabete de Santis Braga

**Vice-Diretor**
Paulo Yukio Gomes Sumida

**Presidente da Comissão de Cultura e Extensão**
Camila Negrão Signori

**Vice-Presidente da Comissão de Cultura e Extensão**
Sueli Susana de Godoi

**Chefe do Departamento de Oceanografia Biológica**
Daniel Eduardo Lavanholi de Lemos

**Chefe do Departamento de Oceanografia Física, Química e Geológica**
Eduardo Siegle

# NOÇÕES DE
# OCEANOGRAFIA

Joseph Harari
(ORGANIZADOR)

1° EDIÇÃO

SÃO PAULO
IOUSP
2021

© 2021 - Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo

Este livro foi um dos projetos contemplados no 6º Edital Santander/USP/FUSP de Fomento às Iniciativas de Cultura e Extensão (2021), contando com o apoio da Pró-Reitoria de Cultura e Extensão Universitária da USP em parceria com a Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo e com o Banco Santander.

## ORGANIZADOR

Joseph Harari

## EDITORES ASSOCIADOS

Alexander Turra
Camila Negrão Signori
Flavia Saldanha-Corrêa
Luigi Jovane
Luiz Vianna Nonnato
Marcos César de Oliveira Santos
Rosalinda Carmela Montone
Sergio Teixeira de Castro
Sueli Susana de Godoi
Vicente Gomes

## EDITORAÇÃO E DIAGRAMAÇÃO

#entremarés

## CAPA

Navio Oceanográfico Alpha Crucis (IOUSP)
Foto: Leandro Inoe Coelho

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**
**(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

Noções de oceanografia [livro eletrônico] /
organização Joseph Harari. -- São Paulo :
Instituto Oceanográfico, 2021
PDF

Vários autores.
Bibliografia.
ISBN 978-65-995854-0-1

1. Oceanografia I. Harari, Joseph.

21-77928 CDD-551.46

**Índices para catálogo sistemático:**

1. Oceanografia 551.46

Aline Graziele Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129

# APRESENTAÇÃO

*por Joseph Harari (organizador)*

*Prezados leitores,*

*Este livro foi concebido a partir do Curso de Difusão Cultural Noções de Oceanografia, ministrado semestralmente desde 1993, por docentes, pós-graduandos, pós-doutorandos e técnicos do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP), de forma voluntária, nas manhãs de domingo. Mesmo durante a pandemia o curso foi mantido e ministrado por via remota de modo que, em 2021, foi ultrapassada a marca de 10.000 alunos participantes, com um público abrangendo desde alunos do ensino médio até profissionais de diversas áreas, relacionadas ou não às ciências marinhas.*

*O curso visa a divulgação da Oceanografia, contemplando suas grandes áreas: Física, Química, Geológica e Biológica, além de tratar sobre Instrumentação Oceanográfica e as atividades do Museu do IOUSP; o propósito do curso tem sido muito bem cumprido ao longo de todos esses anos. Contudo, havia a necessidade crescente de fornecer aos alunos um material com conteúdo mais amplo e detalhado, do que o oferecido nas aulas e apostilas do curso.*

*Após esforços consideráveis ao longo de vários anos e a participação de mais de 70 profissionais do IOUSP, que se empenharam com esforço e entusiasmo, a composição deste e-book foi finalizada, e ele poderá ser acessado gratuitamente no site do IOUSP.*

*O livro contempla 37 capítulos, totalizando mais de 900 páginas, distribuídos em: Histórico da Oceanografia, Oceanografia Geológica, Oceanografia Física, Oceanografia Química, Oceanografia Biológica, Oceanografia na Prática e o Profissional Oceanógrafo. Portanto, o livro aborda praticamente todos os temas mais importantes da Oceanografia moderna, com a finalidade de possibilitar a apreciação de um grande número de áreas de atuação desta ciência. Os leitores encontrarão textos muito bem elaborados e ilustrados sobre o início e o desenvolvimento da Ciência Oceanográfica, a composição do interior da Terra, o relevo oceânico, sedimentos no assoalho marinho, Geofísica marinha, a dinâmica de fluidos e a circulação marinha, ondas e marés, características físicas do Oceano Austral, a composição da água do mar, a poluição orgânica e por metais, a bioluminescência marinha, a vida no mar, seus habitantes e ecossistemas, o perfil e a atuação do oceanógrafo, dentre outros.*

*Neste ano de lançamento do livro, o IOUSP está completando 75 anos – "Jubileu de Brilhante". Outro marco importante é a "Década das Nações Unidas de Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável", também conhecida como Década do Oceano, declarada pelas Nações Unidas em 2017, que está em curso entre 2021 e 2030. O lançamento deste livro, durante essas comemorações de suma relevância, há de contribuir para difundir e complementar o conhecimento acadêmico / científico / social em Oceanografia.*

*Os autores dos capítulos, editores e o Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo se sentem extremamente honrados por vosso interesse na Oceanografia e neste livro. Em nome de todos, recebam os nossos melhores votos da mais elevada estima e consideração.*

***Joseph Harari***
(Organizador)

# PREFÁCIO

*por Moysés Gonsalez Tessler*

*Os oceanos, em função das suas dimensões geográficas, da complexidade dos seus subambientes e da grande diversidade de aspectos ambientais relacionados às ciências da Terra e da Vida, ainda representam um grande desafio ao conhecimento humano.*

*Um oceanógrafo, o profissional que se dedica aos estudos do meio marinho, não corresponde a um pesquisador conhecedor de todos os aspectos relacionados à composição e movimentos da matriz água, das características geológicas e geomorfológica dos fundos dos atuais oceanos, matriz rocha, ou das interações da atmosfera, matriz ar, com a superfície líquida da superfície dos oceanos. Porém, na impossibilidade de abranger todo o conhecimento relativo a essas matrizes, e a eles agregar o conhecimento da matriz vida, o oceanógrafo se estabelece como um pesquisador que acrescenta uma parte significativa dos conhecimentos do meio marinho, mas tem seu foco centrado na descrição e compreensão dos processos de interação do meio.*

*O entendimento destes mecanismos de interação entre o substrato, a água, o ar, que suportam a estratificação de uma vida muito específica, é que diferencia o profissional deste ambiente dos demais profissionais dedicados a compreender os processos ambientais dominantes da superfície do planeta. As dinâmicas dos processos do meio marinho, com especificidades distintas de todos os demais ambientes da superfície terrestre, se constituem no objeto de estudo do profissional oceanógrafo.*

*Quando relacionamos a idade do nosso planeta, de aproximadamente 4,6 bilhões de anos, com a idade de formação dos atuais oceanos, de cerca de 200 milhões de anos, nos damos conta das amplitudes das escalas espaciais e temporais que ao longo do tempo geológico vêm moldando as configurações entre os continentes e os antigos e o atual oceano.*

*A formação dos atuais oceanos, que em suas bacias contém a quase totalidade das águas marinhas, associados a todos os processos de preenchimento sedimentar destas áreas rebaixadas da superfície do planeta, preservam não apenas a história evolutiva da vida ao longo deste período, mas também se constituem em elemento-chave para compreensão de toda a variação climática ocorrida ao longo das últimas centenas de milhares de anos do planeta.Desta forma, a parte do conhecimento dos oceanos designada como Oceanografia Geológica engloba o conhecimento dos processos de formação e evolução dos atuais oceanos, as inter-relações do solo marinho com os continentes, com as águas marinhas e com a vida que, juntos, se constituem no maior ambiente da superfície do planeta Terra.*

*O conteúdo de Oceanografia Geológica apresentado neste livro está individualizado em duas vertentes que se complementam. A primeira abrange os conhecimentos básicos sobre a estrutura interna do planeta e a configuração geográfica dos atuais fundos marinhos (Relevo Oceânico). A partir desta introdução estão descritas as formas e as composições dos sedimentos que preenchem as bacias oceânicas desde sua base, assoalho oceânico, até a superfície dos atuais fundos marinhos (Sedimentos do Assoalho Oceânico).*

*Uma segunda abordagem apresenta os procedimentos de investigação dos fundos marinhos, metodologias de investigação direta e indireta, que objetivam descrever as composições e as estruturas dos sedimentos que recobrem a crosta oceânica, e os da superfície dos atuais fundos, cujo acesso direto é bastante limitado ao contato humano.*

*A investigação direta dos materiais (areias, lamas, sais, etc.) que compõem as extensas colunas de sedimentos empilhados que recobrem os oceanos (Metodologia de Testemunhos Marinhos), tem evoluído ao longo do tempo através de perfurações pontuais do solo marinho que, principalmente, com os avanços de capacidade tecnológica desenvolvida para a busca do petróleo, tem atingido alguns milhares de metros de perfuração do solo marinho.*

*Porém, mesmo esses avanços ainda representam um conhecimento bastante limitado no que se refere à distribuição espacial dos sedimentos que recobrem todas as extensas bacias oceânicas. O conhecimento mais detalhado da distribuição espacial e temporal destes sedimentos (Metodologia em Geofísica Marinha), é obtida através do emprego das investigações indiretas que, a partir do conhecimento do padrão de respostas do meio ao emprego de ondas induzidas, métodos geofísicos, possibilitam a caracterização da distribuição vertical das colunas sedimentares dos fundos marinhos.*

*Por fim, compreender os conceitos básicos de um ambiente amplo e multidisciplinar, abordado como um todo, ou segmentado em um dos seus muitos campos do conhecimento, permite visualizar os caminhos da evolução do nosso planeta e, principalmente, o significado da vida em relação a todos os ambientes terrestres. Este e-book, que aborda os principais subtemas da Oceanografia, abrangendo das suas origens ao estágio atual, permitirá ao leitor entender os ciclos dos oceanos nas suas diferentes configurações geográficas, assumidas ao longo da história do planeta Terra.*

*O leitor, seja um iniciante no tema, ou alguém que busca respostas para dúvidas mais específicas, encontrará neste texto, indicativos seguros, baseado nos conhecimentos científicos mais recentes, do papel e da importância dos oceanos para a compreensão das questões ambientais que a humanidade enfrenta neste século.*

***Moysés Gonsalez Tessler***

# PREFÁCIO

*por Luiz Bruner de Miranda*

*Os oceanos e mares cobrem 71% da superfície do planeta, um dado que, por si só, demonstra a importância da Oceanografia. O desenvolvimento da Oceanografia como ciência tem possibilitado a obtenção de alimentos, a partir da pesca e da maricultura, a extração de recursos minerais e energia, o controle da poluição marítima, a manutenção da estabilidade de áreas costeiras, o monitoramento e a previsão de ressacas e eventos extremos, entre outros.*

*Dentre os estudos da Oceanografia Física, Química, Geológica e Biológica, a área de Oceanografia Física tem particular importância, pois constitui a base para as outras áreas. Os dados e estudos de Oceanografia Física, especialmente sobre as propriedades físico-químicas da água do mar e as correntes marinhas, fornecem informações para que os geólogos, biólogos e químicos desenvolvam suas pesquisas e aprimorem seus conhecimentos sobre o oceano.*

*O livro "Noções de Oceanografia" tem expressiva importância no contexto do ensino e na divulgação da Oceanografia. Os diversos temas abordados abrangem uma gama de interessados nos estudos das ciências do mar, desde profissionais que atuam no setor até estudantes do ensino médio.*

*Na área de Oceanografia Física, o livro aborda os conceitos básicos de caracterização das massas de água no oceano, a descrição dos sistemas de circulação, a dinâmica oceânica enfocando o oceano como fluido geofísico, a análise de ondas e marés – até a descrição de processos físicos e hidrodinâmicos nas divisões clássicas consideradas, quais sejam: as regiões costeiras e estuarinas, a plataforma continental, o oceano profundo e a Antártica.*

*Recomendo a leitura do livro a todos os interessados em Oceanografia e assuntos relacionados ao mar – navegantes, pescadores, maricultores, mergulhadores, esportistas, meteorologistas, engenheiros de pesca, engenheiros de obras costeiras, Corpo da Marinha, a todos os amantes do mar, e especialmente aos oceanógrafos. Esta leitura certamente irá aumentar seus conhecimentos sobre a Oceanografia e seu amor pelo mar.*

***Luiz Bruner de Miranda***

# PREFÁCIO

*por Rosane Golçalves Ito*

*A Oceanografia Química estuda os constituintes químicos presentes no ambiente marinho, com objetivo de entender suas fontes naturais ou introduzidas pela atividade humana e suas interações neste ambiente. Neste sentido, é uma ciência experimental, que tem como base o conhecimento das distribuições e dinâmicas destes constituintes no oceano, tanto em escalas espaciais como temporais, através do estudo de suas propriedades físico-químicas e de suas interações com processos físicos, biológicos e geológicos. Além disso, estes estudos incluem importantes interações de constituintes químicos nas interfaces oceano-atmosfera e oceano-continente.*

*O conteúdo de Oceanografia Química, apresentado neste livro, proporciona uma introdução ao conhecimento deste tema, dirigido a estudantes de graduação ou ao público interessado em ciências ambientais, sem necessidade de experiência prévia em Oceanografia. Desta forma, no capítulo introdutório desta temática do livro, os fundamentos da Oceanografia Química se baseiam num exame didático e compreensivo da origem e composição química da água do mar. Nesta discussão é dada ênfase às propriedades físicas da água pura e, com base nas propriedades desse solvente, discute a composição química da água do mar, a classificação, especiação e o papel de seus constituintes em processos oceânicos. Entre estes processos, apresenta o ciclo biogeoquímico da matéria orgânica com o envolvimento de gases dissolvidos, nutrientes principais (C, N, P e Si) e micronutrientes durante a produção primária marinha.*

*A partir desta introdução, são desenvolvidos alguns tópicos relevantes desta área de estudo, apresentando tanto processos químicos oceânicos naturais (Carbono Orgânico e Matéria Orgânica na Coluna de Água nos Oceanos e Bioluminescência Marinha), como aqueles relativos a interação do oceano com atividades antropogênicas (Poluição Orgânica Marinha e Poluição por Metais e Elementos Radioativos).*

*O segundo capítulo foca na composição da matéria orgânica e nos reservatórios e estoques de carbono na Terra, apresentando especial destaque na origem, composição, formas particuladas e dissolvidas e na estocagem e transporte de carbono orgânico na coluna d'água oceânica.*

*Nos dois capítulos subsequentes, são abordados efeitos conhecidos da interferência humana no planeta e nos oceanos, através da discussão de poluentes orgânicos (esgotos domésticos, petróleo e derivados, poluentes orgânicos persistentes e plásticos), metais e elementos radioativos. Estes poluentes marinhos são tratados sob a perspectiva de suas composições, fontes, transportes e de seus efeitos deletérios no ambiente marinho. Por diferentes mecanismos atuam nas alterações da composição química da coluna d'água, dos sedimentos marinhos e no crescimento, reprodução e sobrevivência de diversos organismos, entre eles, de espécies de importância econômica e social, comprometendo os serviços ambientais, a saúde e o modo de vida das comunidades litorâneas.*

*Finalmente, o último capítulo trata da bioluminescência de organismos marinhos, desenvolvendo um detalhado histórico sobre o tema, os mecanismos químicos conhecidos de emissão de luz por estes organismos e a capacidade de alguns deles atuarem como indicadores de poluentes no ambiente marinho pela diferença na emissão de luz. O capítulo finaliza com as funções ecológicas da bioluminescência para distração de predadores, atração de presas, alarme de roubo, comunicação intraespecífica e contrailuminação.*

*Rosane Golçalves Ito*

# PREFÁCIO

*por Ana Maria Setubal Pires-Vanin*

*Em tempos de distanciamento social como este em que vivemos, o livro se torna cada vez mais companheiro do cotidiano, especialmente o livro digital, que é inclusivo e abrangente, ao aliar público diverso em uma multiplicidade de ocasiões e situações particulares. E se o tema descortina um mundo complexo, dinâmico, interativo e surpreendente, melhor ainda!*

*Se você está aqui é porque gosta do oceano e vai, então, se encantar com o conhecimento que irá adquirir ao ler este "Noções de Oceanografia". Por que Noções, você se perguntará, e eu lhe respondo que a Oceanografia é uma ciência tão ampla e interdisciplinar, que precisamos de um curso inteiro, de vários anos, para nos aprofundarmos nesse conhecimento. Em "Noções de Oceanografia", são apresentados os fundamentos dessa ciência dentro dos vários ramos principais que a compõem, de uma forma interessante e didática, de modo que você se sentirá levado para dentro do oceano, entendendo quando, onde, como e porquê as coisas aí acontecem.*

*A interação entre o oceano e a atmosfera permitiu o aparecimento de um ambiente propício ao desenvolvimento da vida marinha, de tal forma que representantes de todos os grupos viventes na Terra encontram seu habitat no mar, de bactérias a mamíferos, passando por algas e gramíneas, uma multitude de invertebrados, peixes, tartarugas e aves. A vida surgiu no mar e nele evoluiu. E esse foco no desenvolvimento, diversidade e sustentabilidade da vida é apresentado nos 12 capítulos que compõem esta obra na área de Oceanografia Biológica. Este ramo da ciência oceanográfica, sendo essencialmente interdisciplinar, necessita dos conhecimentos das demais áreas para a compreensão dos processos físicos, químicos e geológicos que regem determinado ambiente, e que o torna propício ao desenvolvimento das espécies.*

*O encadeamento dos capítulos permite o entendimento gradual e evolutivo da ocorrência da vida no mar, começando pela fonte primária de suprimento alimentar em ambientes luminosos e oxigenados, que é o plâncton, base da cadeia alimentar, e que sustenta os demais elos dessa cadeia. Tais elos são apresentados nos capítulos sucessivos. Da coluna de água, o conhecimento passa para a vida que existe no fundo dos oceanos, associada aos sedimentos marinhos, a vegetais e a outros animais, a imensa maioria destes últimos composta por invertebrados. E aqui entra mais uma vez o papel multidisciplinar da Oceanografia para responder, por exemplo, como os vários ecossistemas são formados e mantidos ao longo do tempo, porque os sedimentos se depositam em determinadas áreas e, de acordo com suas características, se mais grossos ou mais finos, sustentam conjuntos diferenciados de espécies.*

*O primeiro é um assunto tratado ao longo do livro, e o segundo com ênfase no capítulo sobre Ecologia do Bentos, onde são usadas a física, a química e a sedimentologia para explicar o porquê da existência de diferentes áreas de deposição de sedimentos e como são colonizados os diversos ecossistemas bentônicos tratados, tais como praias, estuários e recifes de coral.*

*O capítulo final é dedicado ao ecossistema antártico marinho, devido à sua peculiaridade em ser coberto pelo gelo durante grande parte do ano. Nele, plantas e animais estão submetidos às consequências metabólicas das baixas temperaturas e, com isso, a estrutura e funcionamento desse sistema polar, em muitos aspectos, se diferencia dos tropicais e subtropicais, dominantes nos oceanos.*

*O conhecimento oferecido pelo conjunto de capítulos do livro compreende os princípios básicos da Oceanografia e é o ponto de partida para estudos mais avançados e profundos. Tenho a certeza de que este e-book, de fácil acesso, com conteúdo científico sólido, atraente e bem ilustrado, despertará muitas vocações para os estudos oceanográficos.*

*Em pleno século XXI, cada vez mais precisamos de, ao invés de dar o peixe, ensinarmos a pescar. Esse procedimento confere autonomia para a resolução de problemas, dentre os quais se destacam os ambientais no oceano, que não são e não serão poucos, começando pelo aquecimento global e passando pela poluição crescente dos nossos mares.*

*Vejo o livro Noções de Oceanografia como* um incentivo ao despertar do saber. *Sendo fonte sólida e atualizada, será um importante meio de difusão da Ciência para a sociedade em geral, contribuindo para o alcance da meta de que tenhamos a "Ciência que precisamos para o oceano que queremos", tema da Década das Nações Unidas da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável (2021-2030), e também para que cresça a conscientização da sociedade sobre o papel que cada um desempenha neste nosso mundo globalizado.*

***Ana Maria Setubal Pires-Vanin***

# SUMÁRIO


## INTRODUÇÃO

**1. Histórico da Oceanografia** 21
*Elisabete de Santis Braga, Joseph Harari, Leandro Inoe Coelho & Flávia Saldanha-Corrêa*

## OCEANOGRAFIA GEOLÓGICA

**2. Investigando o Planeta Terra** 55
*Luigi Jovane*

**3. O Relevo Oceânico** 71
*Gabriel Tagliaro & Luigi Jovane*

**4. Sedimentos do Assoalho Oceânico** 87
*Cintia Yamashita, Ana Cláudia Santarosa, Fabiane Sayuri Iwai & Silvia Helena de Mello e Sousa*

**5. Metodologias em Geofísica Marinha** 107
*Daniel Pavani Vicente Alves & Luigi Jovane*

**6. Metodologias em Testemunhos Marinhos** 127
*Luigi Jovane*

## OCEANOGRAFIA FÍSICA

**7. Circulação e Massas d'Água** 147
*Joseph Harari*

**8. Dinâmica Oceânica: o Oceano como Fluido Geofísico** 169
*Sueli Susana de Godoi, Ilson Carlos Almeida da Silveira & Luiz Bruner de Miranda*

**9. Oceanografia Física Costeira e Estuarina** 205
*Joseph Harari & Sueli Susana de Godoi*

**10. Circulação na Plataforma Continental** 227
*Marcelo Dottori & Belmiro Mendes de Castro Filho*

**11. Circulação Oceânica em Grande Escala e as Mudanças Climáticas** 239
*Edmo José Dias Campos*

**12. Ondas no Mar** 255
*Sueli Susana de Godoi & Joseph Harari*

**13. Marés e Nível Médio do Mar** 277
*Joseph Harari, Afrânio Rubens de Mesquita & Ricardo de Camargo*

**14. O Oceano Austral e o Clima** 299
*Marcos Tonelli, Ilana Wainer & Natália Silva*

## OCEANOGRAFIA QUÍMICA

**15. Composição Química da Água do Mar** 313
*Elisabete de Santis Braga*

**16. Carbono Orgânico e Matéria Orgânica na Coluna de Água nos Oceanos** 345
*Rafael André Lourenço & Márcia Caruso Bícego*

**17. Poluição Orgânica Marinha** 357
*Rosalinda Carmela Montone, Márcia Caruso Bícego & Rafael André Lourenço*

**18. Poluição por Metais e Elementos Radioativos** 381
*Bianca Sung Mi Kim, Tailisi Hoppe Trevizani, Paulo Alves de Lima Ferreira & Rubens Cesar Lopes Figueira*

**19. Bioluminescência Marinha** 403
*Gabriela Verruck de Moraes & Anderson Garbuglio de Oliveira*

## OCEANOGRAFIA BIOLÓGICA

**20. A Vida no Mar** 427
*Vicente Gomes & Flávia Saldanha-Corrêa*

**21. Plâncton Marinho** 449
*Flávia Sandanha-Corrêa & Sônia Maria Flores Gianesella*

**22. Oceanografia Microbiana** 473
*Camila Negrão Signori & Vivian Helena Pellizari*

**23. Biologia e Ecologia do Ictioplâncton Marinho** 491
*Mario Katsuragawa, Cláudia Namiki, Maria de Lourdes Zani-Teixeira & Tulia Martinez*

**24. Diversidade de Peixes Marinhos** 521
*Marcelo Roberto Souto de Melo & Amanda Alves Gomes*

**25. Ecologia de Peixes Marinhos** 545
*June Ferraz Dias, Francesco Silveira Machado Chioatto, Giovana de Assis Garcia, Leandro Fernandes Patrício, Maria Luiza Flaquer da Rocha, Maria Luiza Leal-de-Paula, Natasha Travenisk Hoff, Renata Ramos Gomes & Thamíris Christina Karlovic de Abreu*

**26. Tartarugas Marinhas** 573
*Marcos César de Oliveira Santos*

**27. Aves Marinhas** 601
*Marcos César de Oliveira Santos*

**28. Mamíferos Marinhos** 627
*Marcos César de Oliveira Santos*

**29. Ecologia do Bentos Marinho** 649
*Thaïs Navajas Corbisier, Márcia Regina Denadai, Tito Monteiro da Cruz Lotufo & Alexander Turra*

**30. Manguezal: Ecossistema entre a Terra e o Mar** 683
*Yara Schaeffer-Novelli, Guilherme Moraes de Oliveira Abuchahla & Clemente Coelho-Jr.*

**31. Ecossistema Marinho Antártico** 705
*Paulo Yukio Gomes Sumida, Karin Lütke Elbers, Arthur Ziggiatti Güth, Angelo Fraga Bernardino & Phan Van Ngan*

## MUSEU OCEANOGRÁFICO

**32. Educação Ambiental para o Mar: Museu Oceanográfico como Espaço Educativo** **733**
*Elisabete de Santis Braga*

**33. Atividades de Campo do Museu Oceanográfico no Curso "Noções sobre Oceanografia"** **747**
*Sérgio Teixeira de Castro, Fabiano da Silva Attolini & Luciano Pereira de Souza*

## OCEANOGRAFIA APLICADA

**34. Instrumentação Oceanográfica** **763**
*Luiz Vianna Nonnato*

**35. Campanhas Costeiras e Cruzeiros Oceanográficos** **791**
*Elisabete de Santis Braga & Luiz Vianna Nonnato*

## ATUAÇÃO DO OCEANÓGRAFO

**36. Uso e Conservação do Oceano: Para Além do que se Vê** **819**
*Briana Bombana, Natalia de Miranda Grilli, Luciana Yokoyama Xavier, Leandra Regina Gonçalves, Marcus Polette & Alexander Turra*

**37. O Perfil e a Atuação do Oceanógrafo** **849**
*Alexander Turra, Sueli Susana de Godoi, Marcos Tonelli, Vicente Gomes, Joseph Harari, Elisabete de Santis Braga & Leandro Inoe Coelho*

**LEITURA SUGERIDA** **891**

**SOBRE OS AUTORES** **903**

# INTRODUÇÃO

*Foto: Bruno Coelho*

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 1*

# HISTÓRICO DA OCEANOGRAFIA

*Elisabete de Santis Braga, Joseph Harari, Leandro Inoe Coelho & Flávia Saldanha-Corrêa*

REVISÃO: MARCOS CÉSAR DE OLIVEIRA SANTOS

CITAÇÃO SUGERIDA: BRAGA, Elisabete de Santis et al. O histórico da Oceanografia. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 1: p. 21-50.

# Histórico da Oceanografia

*Elisabete de Santis Braga, Joseph Harari, Leandro Inoe Coelho & Flávia Saldanha-Corrêa*

## 1. Introdução

A imensidão azul do oceano sempre fascinou a humanidade e suscitou a importância de se conhecer e explorar esse ambiente. Diversas civilizações se lançaram aos mares, impelidos pela necessidade de recursos e alimentos para sua subsistência ou motivados pela curiosidade, admiração e pelo espírito aventureiro. No imaginário popular de tempos remotos, os mares eram povoados por monstros e criaturas imensas e perigosas (Fig. 1), relatadas em contos e narrativas, muitas das quais, até hoje reproduzidas. A verdade é que as inúmeras experiências que os humanos acumularam com a exploração desse ambiente geraram conhecimento e cultura, que foram transmitidos de geração em geração. Com o tempo, esse conhecimento foi organizado e compilado, ao passo que estudos dedicados e focados no conhecimento sobre o oceano constituíram os primórdios da ciência conhecida como **Oceanografia**. Neste capítulo será apresentado um breve relato de como foi essa história.

**FIGURA 1.** Ilustração publicada no século XVI, durante o período Renascentista, por Sebastian Münster (cartógrafo e autor da obra *Cosmographia*). *Fonte: Wikimedia Commons.*

O oceano recobre 71% da superfície do planeta Terra. É natural que, desde os primórdios das civilizações, a espécie humana tenha se lançado em embarcações para conhecê-lo e explorá-lo. Estima-se que atualmente mais de 2,4 bilhões de pessoas, 40% da população mundial, habitem as zonas costeiras.

A história da Oceanografia é composta por registros que mostram a evolução de muitos esforços no sentido de descrever a geografia do oceano e das terras adjacentes, seguidos por uma exploração mais sistemática, com muitas semelhanças às da verdadeira investigação científica. Os avanços gerados por esses estudos pioneiros, pelo desenvolvimento científico e tecnológico e pela colaboração internacional entre cientistas, foram as bases do que hoje se conhece por **Oceanografia Moderna.**

## 2. Os primeiros registros: histórico das navegações

É muito provável que o homem primitivo tenha desenvolvido métodos rudimentares para explorar o ambiente marinho. No entanto, os registros mais antigos datam de aproximadamente 4.000 a.C., no Egito, associados ao desenvolvimento da civilização ao longo do Rio Nilo e, posteriormente, avançando para o Mar Mediterrâneo, por volta dos anos 3.000 a.C. Apesar desses e outros importantes registros, entende-se que o primeiro povo verdadeiramente marítimo tenha sido os polinésios.

Os polinésios possuiam uma grande vocação para desbravar os mares, colonizando mais de dez mil ilhas do Pacífico, usando canoas e sem a ajuda de instrumentos de navegação. Para isso, se orientavam pela posição das estrelas e pela observação da direção e intensidade das correntes marítimas, dos ventos e outras características do ambiente, como os padrões das ondas, o voo de aves migratórias, as cores das nuvens e da água. Eventualmente, até a fumaça de vulcões podia ser usada como referência geográfica. Essas observações e conhecimentos eram transmitidos entre as gerações e foram organizados em mapas rústicos, que eram feitos com conchas, cordas e gravetos. Os polinésios navegaram pelo Pacífico desde 4.000 a.C. até 1.000 d.C., alcançando inicialmente as ilhas Salomão e Samoa, e chegando a locais longínquos, como as ilhas do Taiti, de Páscoa e do Havaí, que ficam a mais de 2.500 milhas náuticas (cerca de 4.600 km) de distância de sua origem (Fig. 2).

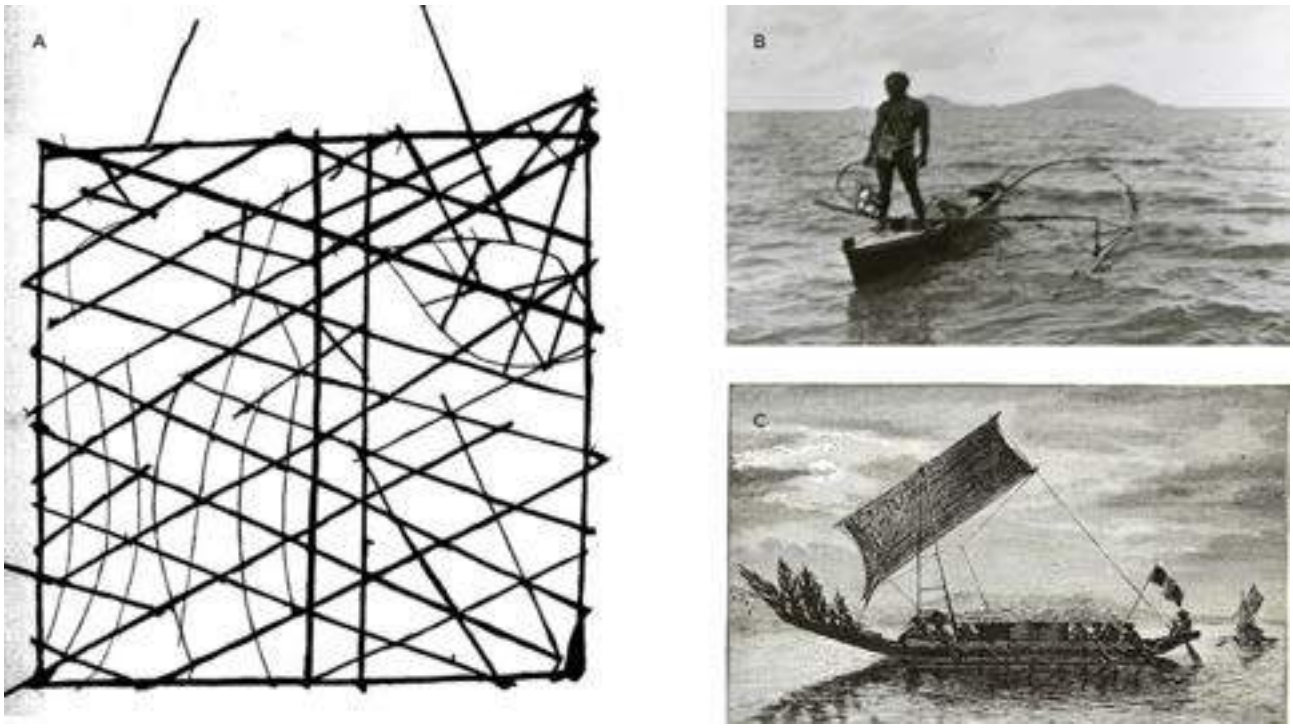



**FIGURA 2.** Navegação polinésia: A) reconstrução de mapa rudimentar indicando correntes, ventos e ilhas; B) canoa típica polinésia, com estabilizadores laterais; e C) embarcações tipo catamarã (casco duplo), utilizado para viagens longas. *Fonte: Wikimedia Commons.*

Os fenícios, uma civilização que ocupava a região litorânea onde hoje é a Síria, o Líbano e o norte de Israel, revelaram-se também exímios navegadores. Eles desenvolveram algumas das primeiras tecnologias de construção naval, com suas galés e birremes, além de serem os primeiros a estabelecer rotas comerciais marítimas de longa distância pelo mar Mediterrâneo, entre 1.500 e 300 a.C, com entrepostos estabelecidos até na Espanha. Há referências que indicam que os fenícios chegaram até a Irlanda, e que possam ter circunavegado o continente africano por volta de 700-600 a.C. Embora fizessem a navegação a partir de referências em terra, os fenícios provavelmente foram os primeiros a efetuar travessias do Mediterrâneo utilizando uma navegação verdadeiramente marítima, sendo também os primeiros a utilizar a Estrela Polar (*Polaris,* estrela mais brilhante da constelação da Ursa Menor) para a orientação na navegação.

Durante a Antiguidade Clássica, na Grécia, vários filósofos contribuíram decisivamente para o entendimento do nosso planeta. Parmênides de Eléa (500 a.C.), um filósofo pré-socrático, acreditava que a Terra era esférica, e a dividiu em zonas paralelas, nas quais o dia tinha certa quantidade de horas de iluminação natural. Essas zonas foram chamadas de *Klima* (palavra grega que significa inclinação, pois essas horas de iluminação eram relacionadas com a inclinação do Sol). Heródoto, em 450 a.C., concebeu um mapa no qual a civilização grega e o mar Mediterrâneo apareciam no centro, dispondo ao redor os três "continentes" conhecidos na época, Europa, Ásia e Líbia (África).

## As cinco zonas terrestres

Estudiosos antigos, como Pitágoras e Parmêmides, deduziram a forma esférica do planeta a partir de considerações teóricas e observações do ângulo entre a incidência solar e a superfície da Terra (que só se justificaria pela sua curvatura).

Parmêmides dividiu então a Terra em zonas paralelas, sendo: uma "Zona Fria" ao norte; uma "Zona Mediterrânea" temperada; e uma "Zona Queimada", mais quente. As zonas fria e queimada seriam inabitáveis, por conta das adversidades climáticas. Por simetria, deduziu que abaixo da zona queimada deveria haver outra zona temperada e fria, completando as cinco zonas.

Posteriormente, essas zonas foram subdivididas, baseadas em novas observações e estudos de Aristóteles, Políbio e Poseidonios. Estrabão e outros pensadores da época também se dedicaram a discutir sobre as características e os critérios de delimitação dessas zonas.

A imagem ao lado mostra trecho do trabalho de Macrobius Ambrosius Theodosius (*Commentarii in Somnium Scipionis*), mostrando as divisões das zonas terrestres. *Fonte: Biblioteca Real de Copenhague (Wikimedia Commons).*

Por volta de 400 a.C. já se fazia relação entre as fases da Lua e as marés. Heródoto, por sua vez, descreveu a regularidade das marés no Golfo Pérsico, observou a deposição de sedimentos finos do Delta do Nilo e foi o primeiro autor a utilizar o termo "Atlântico", para descrever o oceano ocidental.

Aristóteles (cerca de 350 a.C.) foi o primeiro a estudar o oceano a partir de uma fundamentação científica e deu importantes contribuições para o seu conhecimento. No seu modelo, a Terra era um corpo esférico e o Sol promovia a evaporação da água marinha superficial, que voltava na forma de chuva após a condensação, estabelecendo assim as bases da concepção do Ciclo da Água.

Na Era Helênica, muitos foram os avanços do conhecimento sobre o meio marinho. O matemático grego Eratóstenes, em 250 a.C., determinou a circunferência da Terra, com notável precisão para os conhecimentos da época, e fez um acurado *Mapa-Múndi* (Fig. 3), que compilava conhecimentos da Era Helênica. Por seus estudos, é considerado o "Pai da Geografia Sistemática".

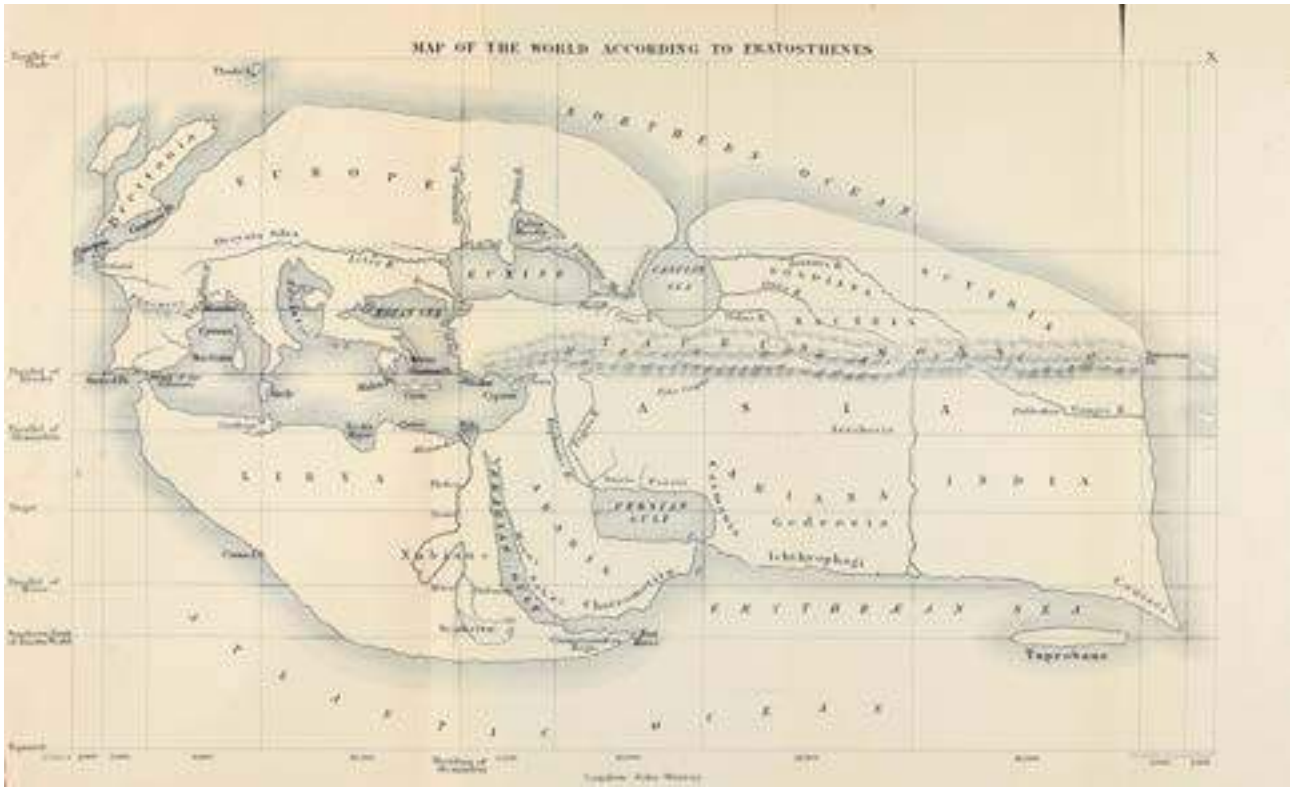



**FIGURA 3. Reconstrução (séc. 19) do mapa do mundo de acordo com Eratóstenes.** *Fonte: Wikimedia Commons.*

Um dos mais notáveis protagonistas da Era Helênica foi Píteas, que relatou suas viagens no documento "*Sobre o Oceano*". Partindo de sua cidade natal (a atual Marselha, na França), em 325 a.C., rumou para o Atlântico e navegou para Norte até a Escócia. Relatou o encontro da Ilha de Thule, que pesquisadores acreditam ser a Noruega ou Islândia, e é possível que tenha alcançado o Mar Báltico, descrevendo os gelos polares, o Sol da meia-noite e a aurora boreal. Píteas utilizou a navegação astronômica (baseada no Sol e nas estrelas), obtendo determinações de posição a partir da Estrela Polar. Suas observações também apontavam a relação entre os estados da maré e as fases da Lua.

Arquimedes, que viveu na Sicília por volta de 250 a.C., foi um dos maiores matemáticos de todos os tempos e também trouxe valiosas contribuições ao estudo do oceano. Seus métodos de cálculo integral precederam, em 2.000 anos, os de Newton e de Leibniz, com trabalhos notáveis sobre mecânica e hidrostática, que foram absolutamente essenciais para o posterior desenvolvimento das Ciências Marinhas.

Após as Guerras Púnicas, os romanos passaram a dominar o Mar Mediterrâneo, período em que promoveram grandes avanços para a navegação e exploração marítima. Herdaram os conhecimentos e os métodos científicos da civilização helênica e prosseguiram com sua ampliação e aperfeiçoamento. Dotados de espírito prático, optaram pela Ciência Aplicada, dedicando-se ao aperfeiçoamento das embarcações e das técnicas de navegação, além de introduzirem novos métodos de captura e conservação de pescado.

Dada a importância de se conhecer o ambiente marinho, por onde se realizavam as rotas de comércio e exploração, novas tecnologias e estudos foram surgindo. Essa evolução culmina com a contribuição de Ptolomeu, por volta do ano 150 d.C., que influenciou toda a sociedade ocidental, com enorme impacto na Geografia e na Cartografia.

## O mundo de Ptolomeu

Ptolomeu foi um geógrafo e astrônomo grego que viveu grande parte da sua vida em Alexandria. Ele refinou a proposta de Parmênides de Eléa, dividindo o globo em latitudes e longitudes, coordenadas usadas até os dias de hoje. Sua obra "*Geographia*" foi referência para esta ciência durante mais de 1.400 anos. Seus mapas introduziram a prática de orientação com o Norte na parte superior e o Leste do lado direito do mapa, também utilizadas até hoje, bem como os seus sistemas de projeção (cônica, esférica modificada, ortográfica e estereográfica).

O mapa de Ptolomeu, resume grande quantidade de informações acumuladas até então, mostrando ricos detalhes sobre o mundo conhecido. Além das divisões em latitudes e longitudes, também é possível observar as localizações dos principais centros urbanos, as linhas imaginárias (Equador, Trópico de Câncer e Trópico de Capricórnio), mantidas até hoje, e os contornos dos mares e continentes, além dos padrões de ventos, representados por "sopros" ao redor do mapa. *Fonte: Wikimedia Commons*.

Após a queda do Império Romano, iniciou-se um período adverso da história europeia, a Idade Média, onde grande parte do conhecimento existente na Antiguidade Clássica foi perdida. Os trabalhos de Ptolomeu foram "esquecidos", mas felizmente preservados nos estados islâmicos, nas versões grega e árabe, que serviram de fonte para as traduções para o latim, já na Alta Idade Média. Dessa maneira, puderam ser recuperadas e reintroduzidas na Europa, por volta do século XIII. Foi um período conturbado também para as relações comerciais europeias, que definharam, e a navegação no Mediterrâneo e adjacências passou a ser dominada pelos povos árabes. Até o Renascimento, poucos estudos originais viriam a ser desenvolvidos na Europa e o interesse pelas Ciências Naturais praticamente desapareceu.

Entre 500 e 1450 d.C., os navegantes escandinavos, os Vikings, se destacaram nas navegações. Entre os séculos IX e XII, estenderam sua influência na Europa e no Oceano Atlântico, alcançando também a Groenlândia e estabelecendo colônias temporárias em Terra Nova (*Newfoundland*), no Canadá. Eles usavam como referência para o posicionamento a altura da Estrela do Norte e cálculos cuidadosos da posição do Sol, relativos à época do ano.

Ao final da Idade Média, iniciaram-se as "grandes navegações", expedições motivadas por fins políticos, econômicos e religiosos. Os habitantes da Europa ocidental vieram a se tornar excelentes exploradores, aventurando-ser a cruzar o Atlântico e atingindo o Oceano Pacífico nos séc. XV e XVI.

O explorador italiano Cristóvão Colombo, financiado pelos reis da Espanha, chegou à América em 1492. Os navegadores portugueses tiveram muito sucesso em suas explorações (Fig. 4): Bartolomeu Dias cruzou o Cabo da Boa Esperança (1498); Vasco da Gama também contornou este cabo e prosseguiu em direção à Índia (1497-1499); Pedro Álvares Cabral chegou ao Brasil em 1500; e Fernão de Magalhães liderou a primeira expedição de circunavegação do globo. Magalhães partiu da Espanha em 1519, com uma flotilha de cinco embarcações, passou pelo Brasil e chegou ao Oceano Pacífico cruzando o Estreito de Magalhães (batizado em sua homenagem), de onde seguiu para as Filipinas, onde faleceu em 1521. Após a morte de Magalhães, Juan Sebastián Elcano assumiu o comando da expedição e terminou a circunavegação, retornando à Espanha em 1522. A partir dos registros de seu diário de bordo, o italiano Antonio Pigafetta escreveu o relato "*A primeira viagem ao redor do mundo*", no qual descreve a fauna, a flora e os habitantes das regiões por onde passou essa expedição.

**FIGURA 4. O Planisfério de Cantino (1502). Cantino foi um cartógrafo português que registrou o mundo conhecido no final do séc. XV e início do séc. XVI, após as grandes viagens de exploração europeias. O mapa faz parte do acervo da Biblioteca Universitária de Módena (Itália).** *Fonte: Wikimedia Commons.*

## 3. As investigações científicas nos oceanos

Ao longo dos séculos XVIII e XIX ocorreram as primeiras expedições científicas com o objetivo de desvendar os segredos do oceano. Os ingleses, com o apoio do governo e da *Royal Society of London*, realizaram várias expedições e expandiram significativamente os conhecimentos geográficos e científicos sobre o oceano e seus habitantes.

James Cook, velejador, astrônomo e matemático inglês, foi um dos pioneiros nessa exploração. Entre 1768 e 1771, viajou pelo Pacífico Sul no *HMS Endeavour*, da Marinha Real Britânica, realizando estudos astronômicos, sondagens de profundidades, medição de correntes marinhas e ventos. Reuniu um importante conjunto de informações sobre geologia e biologia e relatou a existência de diversas populações nativas. Mapeou ilhas, avistou a costa da Nova Zelândia e demonstrou que ela não fazia parte da *Terra Australis* (o grande continente da região polar Sul). Já no fim de sua viagem, ao contornar a Oceania, passou pela Grande Barreira de Corais, na Austrália, antes de retornar à Inglaterra.

Cook também comandou os navios *HMS Adventure* e o *HMS Resolution,* entre 1772 e 1775. Acompanhando os ventos de Oeste, atravessou o Cabo da Boa Esperança e seguiu pelo Atlântico Sul até avistar *icebergs* do continente ao sul. Em 1779, Cook atingiu o Oceano Pacífico e visitou diversas ilhas, incluindo as do Havaí. Seguindo para o Norte, atingiu o Mar de Bering, chegando à latitude 70°44'N, tornando-se assim o primeiro explorador a navegar em mares polares dos dois hemisférios.

O naturalista inglês Edward Forbes (1815-1854), por sua vez, foi o pioneiro nos estudos de biogeografia da região costeira, com base especialmente em suas observações nas Ilhas Britânicas. Publicou ensaios sobre estrelas-do-mar e moluscos e participou de várias expedições marítimas, incluindo aquela realizada no Mar Egeu, base para a formulação da hipótese de que não haveria vida (ou ela seria rarefeita), em profundidades abaixo dos 550 m, devido à alta pressão e ausência de luz e oxigênio, que ficou conhecida por *Teoria Azoica*. Essa teoria foi refutada, posteriormente, por coletas de amostras em regiões profundas, que traziam uma grande variedade de organismos.

Em 1825 o navio *HMS Beagle* foi amplamente adaptado para as grandes viagens que viria a realizar. A primeira, acompanhando o *HMS Adventure*, tinha a missão de efetuar levantamentos hidrográficos nas águas costeiras da Patagônia e da Terra do Fogo. Não havendo concluído o objetivo da primeira viagem, o *Beagle* passou por novas reformas, que o deixaram mais seguro e equipado. Assim, em 1831, partiu para sua segunda viagem, contando com o jovem Charles Darwin a bordo, na função de naturalista. A expedição passou pelo arquipélago de Abrolhos, dentre outros pontos da costa brasileira, e realizou um extenso levantamento hidrográfico da costa atlântica da América do Sul. Alcançou o Oceano Pacífico, contornando o Cabo Horn, e concluiu o levantamento de parte da costa ocidental sul-americana. Sempre coletando informações, passou pela Austrália e Nova Zelândia antes de retornar à Inglaterra, pelo Atlântico, com escalas no Rio de Janeiro e nos Açores. A circunavegação foi concluída em 1836, notabilizando-se por ser uma das maiores viagens de exploração até então realizadas.

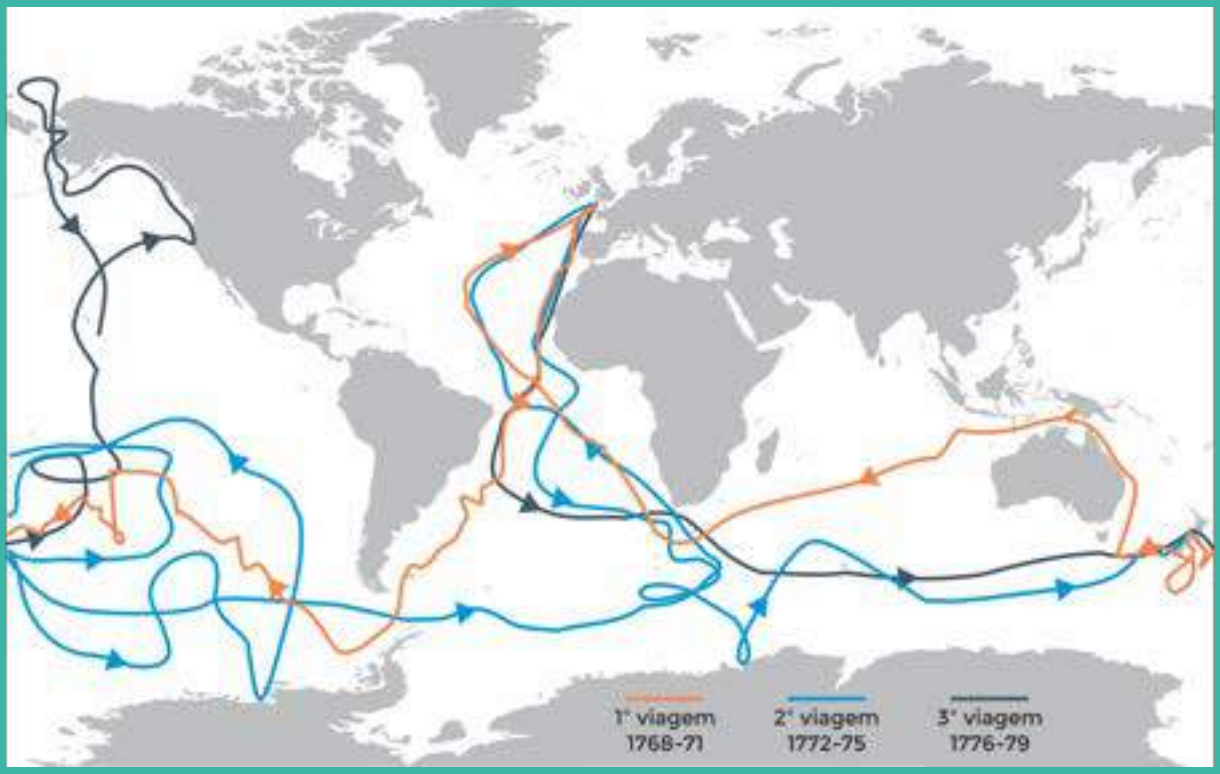
Darwin fez muitas observações da geologia e biologia marinha, observando como as mudanças latitudinais ao longo do percurso se relacionavam com a biota (conjunto de seres vivos). Nas ilhas Galápagos, verificou modificações entre as populações de animais nas diferentes ilhas, relacionando-as ao isolamento geográfico. Darwin levou anos analisando e compreendendo o enorme volume de dados que havia obtido. Tais informações lhe permitiu formular a *Teoria da Evolução*, publicada em 1859 no revolucionário trabalho "*On the Origin of Species*". O *HMS Beagle* ainda participou de uma terceira grande expedição, pela costa da Austrália e Mar de Timor, que durou quase seis anos.

## As viagens de James Cook

**Primeira viagem (1768-71):** com o *HMS Endeavour*, cruzou o Atlântico e contornou a América do Sul, navegando até o Pacífico, onde mapeou a região da Nova Zelândia. Passou pela Grande Barreira de Corais, cruzou o Índico e contornou a África no retorno à Inglaterra.

**Segunda viagem (1772-75):** comandando o *HMS Resolution* e acompanhado pelo *HMS Adventure*, tinha por objetivo investigar as terras ao Sul e testar novos métodos de navegação. Não conseguiu avançar, por conta do gelo e condições meteorologicas desfavoráveis, mas encontrou e visitou uma grande quantidades de ilhas no Pacífico.

**Terceira viagem (1776-79):** Em sua última grande viagem, James Cook tentava encontrar uma rota que ligasse o Pacífico ao Atlântico, ao norte do Canadá. Comandando novamente o *HMS Resolution* e acompanhado pelo *HMS Discovery*, foram os primeiros europeus a chegar às ilhas havaianas. Após retornar das águas do Mar de Bering, fizeram uma nova parada no arquipélago havaiano, onde faleceu durante conflito com nativos (1779). Após sua morte, a expedição retornou para a Inglaterra (1780), já sob comando do capitão John Gore.



*Pinturas: Samuel Atkins (Wikimedia Commons).*

Os americanos empreenderam sua primeira expedição marítima de caráter científico entre os anos de 1838 e 1842, na chamada *U.S. Exploring Expedition*, com o objetivo de coletar informações sobre continentes e mares no Pacífico Sul. A Dinamarca também patrocinou uma importante expedição, a *Galathea*, entre 1845 e 1847, com objetivos políticos e científicos. Com uma tripulação de 231 marinheiros e cientistas, a rota seguiu pelo Oceano Atlântico em direção ao Oceano Índico, onde visitaram a Índia, o sudeste asiático e a China. Após cruzar o Pacífico e visitar as ilhas do Havaí e o Taiti, chegaram à América do Sul e retornaram à Dinamarca pelo Atlântico. No entanto, no retorno da viagem, a Dinamarca se encontrava em guerra. Por conta disso, grande parte das amostras coletadas nessa grande circunavegação permaneceu estocada de maneira precária por longo período e acabou deteriorada, impossibilitando sua análise.

Como Superintendente do Observatório Naval dos EUA, o oficial da marinha norte-americana Matthew Fontaine Maury viabilizou a obtenção de grande quantidade de informações sobre ventos e correntes marítimas, que eram coletadas por comandantes dos navios da marinha americana e de outras embarcações, seguindo um protocolo criado por ele. Com essa base de dados, Maury elaborou mapas dos principais campos de ventos e correntes da Terra, que foram publicados em 1848, inspirando a realização da primeira *Conferência Marítima Internacional*, em Bruxelas (1853), que buscava uma uniformização dos métodos náuticos e das observações meteorológicas no mar. Essa conferência levou à criação do *Bureau Hidrográfico Internacional* e, com a cooperação internacional que se estabeleceu a partir desta organização, foi possível a obtenção de informações provenientes de todos os mares e oceanos. Assim, pôde compilar os dados e publicar mapas das correntes marinhas do Atlântico, Pacífico e Índico, que permitiram diminuir significativamente o tempo de viagem das embarcações, pois estas passaram a aproveitar as correntes e ventos nas rotas conhecidas. Em 1854, Maury publicou a primeira Carta Batimétrica do Atlântico Norte, demonstrando a possibilidade de assentamento de cabos telegráficos submarinos. Em 1855, publicou o livro "*Physical Geography of the Sea*" (Fig. 5), um Atlas das condições do mar e direção dos ventos. Por tais feitos, Matthew Fontaine Maury é considerado o "*Pai da Oceanografia Moderna e da Meteorologia Naval*".

**FIGURA 5. Mapa de correntes (*Physical Geography of the Sea*, M.F. Maury).** *Fonte: Wikimedia Commons.*

## 4. A Oceanografia Moderna

A primeira expedição científica de cunho estritamente oceanográfico foi realizada pela corveta *HMS Challenger* (Fig. 6), no período de 1872 a 1876, quando navegou cerca de 70 mil milhas náuticas (equivalente a cerca de 130 mil km) por todos os oceanos. O *Challenger* foi modificado e equipado com instrumentos e laboratórios de química e história natural. A equipe contava com 243 tripulantes e 6 cientistas, sob direção de Sir C. Wyville Thompson[1]. A equipe realizou 492 medições de profundidade, 133 dragagens e 362 estações oceanográficas. Foram feitas observações de correntes oceânicas e costeiras, análises dos sedimentos do fundo oceânico e da composição química da água do mar. Com o material coletado, os naturalistas descreveram 4.417 novas espécies, um resultado absolutamente fantástico. A *Teoria Azoica* foi definitivamente refutada, pois coletas em grandes profundidades trouxeram para bordo um número expressivo de organismos.

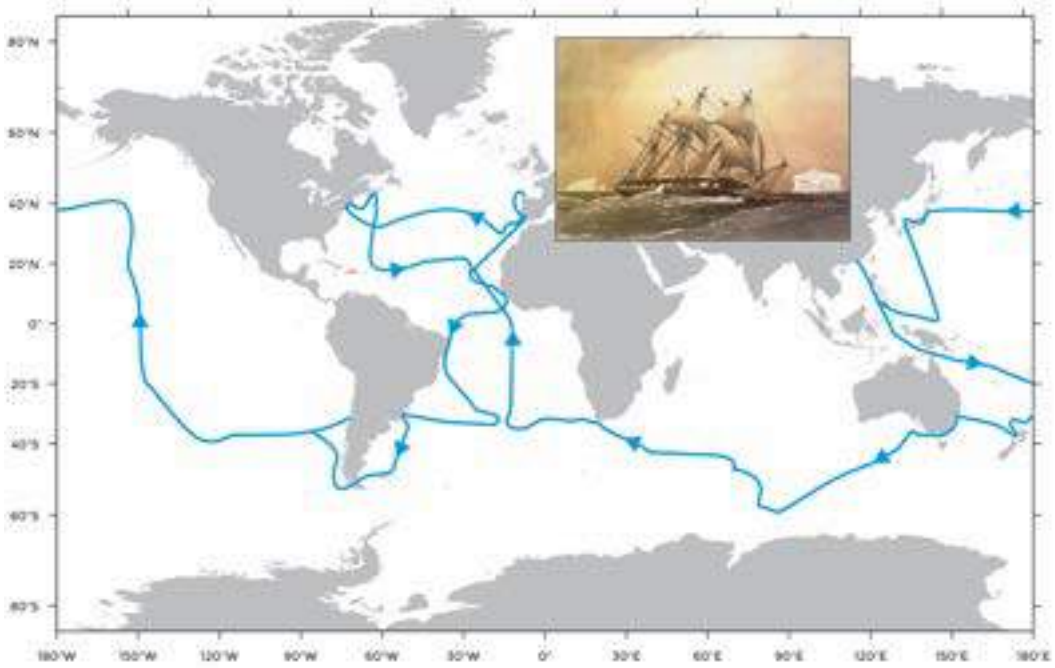


**FIGURA 6.** **Rota percorrida pela expedição, com o navio da Marinha Real Britânica** *HMS Challenger*. *Pintura de W.F. Mitchell (Wikimedia Commons).*

A imensa quantidade de dados, observações e material resultante dessa expedição foi publicada em 50 volumes, com 29.500 páginas e cerca de 3.000 ilustrações, sob o título "*Challenger Deep-Sea Exploring Expedition*" (Expedição de Exploração do Mar Profundo da Challenger). Consequentemente, essa expedição tornou-se o marco do início da **Oceanografia Moderna**.

Posteriormente, diversos outros países promoveram expedições oceanográficas, com destaque para as seguintes: a *S.M.S. Gazelle Expedition* (1874 – 1876), expedição alemã que realizou circunavegação; a *Vitiaz Expedition* (1886 – 1889), expedição russa que também realizou circunavegação; a *Albatross Expedition* (1887 – 1888), expedição americana que explorou os Oceanos Atlântico, Pacífico e o Índico, passando por águas brasileiras, desde a Paraíba até o Rio de Janeiro; a *Plankton Expedition* (1889), expedição alemã no Atlântico, quando o naturalista Victor Hansen propôs a utilização do termo Plâncton, no sentido em que se usa atualmente; a *S.M.S Pola Expedition* (1890 – 1898), expedição austríaca que fez pesquisas nos mares Adriático, Vermelho e no Mar Mediterrâneo oriental; a *Fram*

[1] C. Wyville Thompson é considerado o pioneiro em pesquisas de mar profundo com suas expedições nos navios *HMS Lightning* (1868) e *Porcupine* (1869-1870), quando realizou coletas em grandes profundidades e descobriu os corais de mar profundo.

*Expedition* (1893 – 1896), expedição norueguesa cujo objetivo era atingir o polo Norte e na qual foram realizadas valiosas observações em Oceanografia, Astronomia e Meteorologia; a *Belgian Antartic Expedition* (1897 – 1899), a bordo do *R.V. Belgica*, considerada a primeira expedição do Período Heróico de Exploração da Antártica; a *Siboga Expedition* (1899 – 1900), expedição holandesa com a finalidade de estudar a biologia e a hidrologia das águas do leste da Índia e da Malásia.

No início do século XX (1903), foi fundada nos EUA a "*The Scripps Institution of Biological Research*", a atual "*The Scripps Institution of Oceanography*", da Universidade da Califórnia, em La Jolla, um importante centro de pesquisa oceanográfica. Em 1906, a expedição alemã *S.M.S. Planet Expedition*, navegando pelos oceanos Atlântico e Índico, descobriu duas novas fossas submarinas ao sul do Arquipélago de Java, com profundidades superiores a 7.000 m. Em 1910, a *British Antarctic Expedition* seguiu rumo à Antártica, para coleta de organismos planctônicos e bentônicos.

No ano de 1912, Alfred Wegener propôs a *Teoria da Deriva Continental*, com base no encaixe das formas dos continentes de cada lado do Oceano Atlântico. A publicação de seu o livro "A origem dos Continentes e dos Oceanos" (Fig. 7), em 1915, revolucionou o entendimento da formação e dinâmica dos fundos marinhos.

Muitos cientistas forneceram contribuições importantíssimas para estabelecer as bases da Oceanografia, ainda que tenham atuado em áreas distintas como Física, Química, Geografia e Meteorologia, por exemplo. Além do espírito científico, muitos possuíam um lado desbravador e aventureiro pois, muitas vezes, as expedições envolviam grandes riscos, apesar dos meticulosos planejamentos.

O zoólogo norueguês Fridtjof Nansen (1861-1930) foi o primeiro homem a chegar mais próximo do polo Norte, a 84° de latitude Norte. Seu navio, o *Fram*, especialmente construído para a expedição, ficou preso no gelo e derivou por quase três anos. Nansen e sua tripulação fizeram importantes observações, que contribuíram para o entendimento da circulação oceânica polar e verificaram indícios da inexistência de uma massa continental no Ártico. O *Fram* saiu ileso e ainda realizou outras expedições no Oceano Ártico.

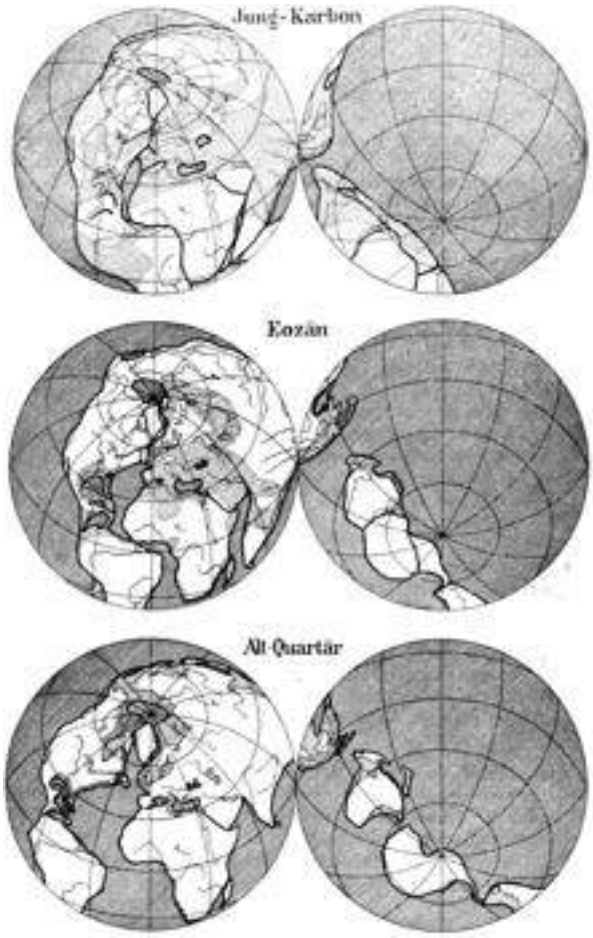



FIGURA 7. **Figuras do livro"A origem dos Continentes e dos Oceanos" (***Die Entstehung der Kontinente und Ozeane***), de Alfred Wegener.** *Fonte: Wikimedia Commons*.

A Garrafa de Nansen, projetada por ele para a coleta de água, foi amplamente usada como instrumento básico de coleta oceanográfica por muitas décadas (vide capítulo **Instrumentação Oceanográfica**), permitindo o acoplamento de dois termômetros de modo que, no mesmo lançamento, fazia-se a coleta da água e a medida da temperatura naquela profundidade. Atualmente esse modelo de garrafa é pouco utilizado, mas o mecanismo de funcionamento foi reproduzido em outros modelos de coletores de água.

Entre 1925 e 1927, a expedição alemã no navio *Meteor* mapeou o Atlântico Sul desde o Equador até a Antártica (Fig. 8), utilizando pela primeira vez uma ecossonda eletrônica, realizando seções entre a América do Sul e África. Além das sondagens, foram realizadas coletas de água, estudos hidrográficos, atmosféricos e de organismos marinhos. Esse navio também realizou uma expedição semelhante no Atlântico Norte (1937-1938), cujos dados permitiram o conhecimento detalhado da topografia do Oceano Atlântico.

Dois grandes bancos submarinos foram descobertos nessas expedições de pesquisa, e receberam os nomes em sua homenagem, o Banco Meteor e Grande Banco Meteor, respectivamente no Atlântico Sul e Norte. O *Meteor* realizou ainda expedições à Islândia, Groenlândia e região da Corrente do Golfo.

**FIGURA 8. Plano original da expedição alemã *Meteor* ao Atlântico, realizado entre 1925 a 1927 (*Deutschen Atlantische Expeditio*).** *Fonte: A. Merz (Wikimedia Commons).*

Em 1942, Haral Sverdrup, Richard Fleming e Martin Johnson publicaram o clássico livro "*The Oceans: their Physics, Chemistry and General Biology*", um marco para a ciência oceanográfica, com uma síntese de todo o conhecimento que se tinha até então sobre o oceano.

A Segunda Guerra Mundial (1939-1945), a despeito de todas as atrocidades que aconteceram, trouxe um grande desenvolvimento para a Oceanografia, uma vez que os conhecimentos sobre o mar eram fundamentais para os deslocamentos de submarinos, porta-aviões, navios, etc.

Diversos equipamentos foram desenvolvidos e aperfeiçoados com finalidades bélicas, para uso no ar, no mar e em terra. Como curiosidade, esse período impulsionou o desenvolvimento dos sonares, dos radares e descobertas, como a possibilidade de um submarino se "esconder" do radar inimigo, ficando abaixo da termoclina (camada de transição entre massas de água superficiais, mais quentes, e águas profundas, mais frias).

No período pós-guerra, muitos investimentos surgiram para a área de pesquisa marinha e foram criadas muitas instituições científicas e centros de formação de pessoal, impulsionando o desenvolvimento tecnológico aplicado às embarcações e equipamentos.

A obtenção de recursos marinhos vivos ou não vivos sempre foi necessária à sociedade, mas, ao mesmo tempo, um alvo de preocupação para os cientistas. Sem dúvida, ao se explotar[2] os recursos marinhos, muitos conhecimentos foram adquiridos, entretanto, foi tornando-se crescente a necessidade de se regular essa explotação.

[2] Entende-se por "explotação" o aproveitamento econômico de recursos naturais ao passo que "exploração" é o processo de busca de novos recursos.

## 5. As organizações científicas

Em dezembro de 1946 a *International Whaling Commission* (IWC - ou Comissão Internacional de Caça à Baleia) foi criada, com o objetivo de garantir a conservação das baleias e regulamentar a captura desses animais. A IWC conta com 88 países membros, permanecendo ativa até os dias de hoje[3]. Era uma ação direcionada à exploração sustentável, termo que ainda não havia sido proposto.

Em comemoração aos cem anos da primeira expedição *Galathea*, uma segunda foi organizada, entre 1950 e 1952. Nessa circunavegação, a expedição cruzou o Canal do Panamá, um canal artificial que conecta os oceanos Atlântico e Pacífico, que foi inaugurado em 1914. Um dos marcos dessa expedição foi o êxito em coletar organismos na Trincheira das Filipinas, em profundidade de 10.190 m, um recorde para a época. O cientista Claude ZoBell, considerado "*Pai da Microbiologia Marinha*", foi um dos pesquisadores que participou dessa expedição, que permitiu a descrição de muitas espécies até então desconhecidas, especialmente aquelas encontradas em mar profundo.

Um importante marco para a consolidação de uma comunidade científica cooperativa, multidisciplinar e internacional foi a realização do *Ano Geofísico Internacional* (o AGI, de junho de 1957 a dezembro de 1958). Esse evento reuniu mais de 20 mil pesquisadores, de 66 países, com o objetivo de congregar esforços e conhecimentos para o entendimento de fenômenos físicos do planeta Terra.

O AGI estabeleceu caminhos para a criação de várias organizações e ações de cooperação científica em âmbito internacional. Um dos legados foi a criação, ainda em 1957, do *Scientific Committee on Ocean Research*, SCOR (Comitê Científico de Pesquisa Oceânica), de caráter permanente, vinculado ao atual *International Science Council* (ISC). O SCOR promoveu uma série de congressos que reuniram cientistas de diversas áreas da Oceanografia e de diversas partes do mundo, de 1959 até 1988, quando outras sociedades profissionais surgiram e passaram a cumprir esse papel. Contudo, o SCOR continua ativo, promovendo projetos e mantendo grupos de trabalho em temas específicos[4].

Como resultado de muitas pesquisas e avanços tecnológicos, o primeiro submarino movido por propulsão nuclear, o *Nautilus*, foi lançado ao mar em 1954 e, em 1958, realizou a travessia submersa do polo Norte. Tais feitos só foram possíveis graças ao esforço conjunto de muitos cientistas, engenheiros e técnicos, que abriram novos caminhos para a Oceanografia e outras ciências.

Outra importantíssima organização que foi criada em decorrência do AGI foi a *Comissão Oceanográfica Intergovernamental* (COI) no âmbito da UNESCO (Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura).

### Criação da COI

*"Em julho de 1960, a UNESCO convocou uma conferência oceanográfica em Copenhague, na Dinamarca. Delegações de 35 países se reuniram com representantes de outras agências das Nações Unidas e de organizações internacionais, recomendando que a UNESCO estabelecesse um novo organismo intergovernamental para promover a investigação científica do oceano. A proposta foi aceita pela Conferência Geral, em dezembro de 1960. Não havia precedentes: as ciências oceânicas nunca estiveram em uma posição tão alta na agenda política internacional". Fonte: UNESCO.*

[3] Para saber mais, acesse: <https://iwc.int/home>.

[4] Para saber mais, acesse: <https://scor-int.org/scor/history/>.

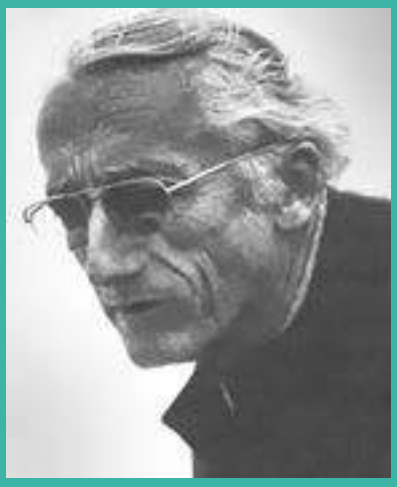
Uma das primeiras e mais importantes ações da COI foi assumir a organização e coordenação das *Expedições Internacionais ao Oceano Índico*, que ocorreram de 1959 até 1965, das quais participaram 45 embarcações de 14 países. Os dados adquiridos nesse esforço conjunto permitiram a construção de mapas e expandiram grandemente o conhecimento sobre a Geologia, a Geofísica e a Biologia daquele oceano. Foi possível também o entendimento do fenômeno das monções e sua dinâmica, bem como a avaliação de recursos vivos e não vivos (ex. depósitos minerais). Outro importante legado dessas expedições foi a criação e o aprimoramento de infraestrutura para o desenvolvimento das ciências marinhas em países como Índia, Indonésia, Paquistão e Tailândia.

Com sessenta anos de existência, a COI conta com 150 Estados-Membros, dos quais o Brasil faz parte, e tem apoiado importantes projetos e ações em âmbito mundial, como o *Sistema de Alerta e Mitigação de Tsunamis do Pacífico*, criado em 1965. Outro protagonismo importante foi a participação na Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (UNCLOS, em inglês), o marco de ação legal mundial para o oceano[5].

As expedições *Equalant I* e *Equalant II,* entre 1961 e 1963, também coordenadas pela COI, tiveram a participação do Brasil, Argentina, Alemanha, Nigéria, Congo, Costa do Marfim, Espanha, EUA e a então União Soviética. Nessas iniciativas foram utilizados vários navios oceanográficos, que fizeram observações de parâmetros hidrológicos, químicos, biológicos e meteorológicos do Oceano Atlântico. Na costa brasileira, fez levantamentos entre o Oiapoque e a Bahia.

### Jacques-Yves Cousteau

A popularização da Oceanografia, sem dúvida, deve-se em grande parte a Jacques-Yves Cousteau, que foi oficial da marinha francesa e um grande entusiasta do mundo submarino e da cinegrafia. Ele conseguiu arrendar e reformar o icônico navio *Calypso*, com o qual fez inúmeras viagens a partir de 1955.



Cousteau escreveu livros, produziu documentários e filmes de viagens, trazendo a Oceanografia para muito próximo do público leigo. Foi também um dos inventores do Aqualung, que substituiu os pesados escafandros, facilitando o mergulho autônomo. Colaborou no desenvolvimento de aparelhos de ultrassom para estudo do relevo submarino e de equipamentos para fotos e vídeos subaquáticos.

Muitas das bandeiras sobre a preservação dos mares, que hoje são fortemente defendidas, foram levantadas por ele em seus trabalhos. Embora não fosse um oceanógrafo de formação, ele contribuiu significativamente para o avanço da ciência e está no imaginário de muitas pessoas como a figura do oceanógrafo. *Foto: NASA (Wikimedia Commons).*

A década de 1970 foi designada pelas Nações Unidas como a **Década Internacional de Exploração dos Oceanos**, objetivando o incentivo aos estudos científicos no ambiente marinho. No início daquela década foi realizado um grande levantamento da química da água do mar, por meio do projeto *Geochemical Ocean Sections Study* (GEOSECS), focando os principais elementos

[5] O texto completo da UNCLOS pode ser encontrado em: <https://www.un.org/Depts/los/convention_agreements/texts/unclos/unclos_e.pdf>.

químicos presentes no oceano e alguns isótopos ($^{13}C$, $^{14}C$ e $^{3}H$), com a finalidade de se entender os ciclos biogeoquímicos dos elementos e a circulação marinha profunda. Foram também utilizados traçadores radioativos para entender as vias de circulação dos elementos. As expedições cobriram os oceanos Atlântico (julho de 1972 a maio de 1973), Pacífico (agosto de 1973 a junho de 1974) e Índico (dezembro de 1977 a março de 1978), gerando um imenso e valioso conjunto de dados que alavancou o entendimento da biogeoquímica marinha.

Em agosto de 1964 ocorreu a primeira conferência "*Oceanography from Space*" (Oceanografia a partir do Espaço), dando início às discussões sobre o uso e as potencialidades da aplicação das ferramentas de sensoriamento remoto na Oceanografia. Ao final da década de 1970, após inúmeros trabalhos realizados com imagens de satélites meteorológicos, para fins de monitoramento de feições oceânicas, o uso de dados de satélites na Oceanografia estava consolidado, sendo conhecida hoje como *Oceanografia por Satélites* ou *Oceanografia Espacial*. O primeiro satélite oceanográfico, o *Sea-Sat*, foi lançado em 1978 com a finalidade de realizar medidas de altimetria do mar. Essas medidas fornecem importantes subsídios para o estudo da circulação oceânica em nível global.

Em 1992 a NASA lançou um potente satélite altimétrico, o *TOPEX/POSEIDON* (1992-2006), cujos dados permitiram entender eventos como o ***El Niño*** e ***La Niña*** no Oceano Pacífico. Os satélites *Janson-1* (2001-2013), *OSTM/Jason-2* (2008-2019) *e Jason-3* (em operação desde 2016) deram continuidade ao programa de monitoramento (Fig. 9). Posteriormente, vários outros satélites foram lançados com sensores destinados à avaliação da cor do mar como: *CZCS*, *OCTS*, *SeaWifs*, *OCM*, *MODIS* e *MERIS*, que são utilizados para medidas de temperatura da superfície do mar e de indicadores biológicos, como por exemplo a concentração de clorofila.

A grande vantagem do uso dos satélites na Oceanografia é a imensa quantidade de dados que podem ser coletados, com cobertura ampla e em um curto intervalo de tempo. O uso dessas ferramentas propiciou o entendimento de fenômenos em escala global e tem sido fundamental para estudos do clima da Terra e das mudanças climáticas.

**FIGURA 9.** **Renderização artística do satélite** *TOPEX/Poseidon* **e sua sequência de satélites** *Jason*. *Fonte: NASA (Wikimedia Commons).*

O Programa *Joint Global Ocean Flux Study* (JGOFS, Estudo Conjunto dos Fluxos Oceânicos Globais) foi um programa internacional patrocinado pela SCOR, entre 1987 e 2003, e que contou com a participação de diversos pesquisadores brasileiros, com o objetivo de estudar os fluxos de carbono entre a atmosfera, a superfície do oceano e o interior dos oceanos. Posteriormente, esse programa veio a se tornar um dos pilares do *Programa Internacional Geosfera-Biosfera*, conduzido entre 1987 e 2015, para o estudo das mudanças globais.

Diversos outros programas e projetos internacionais foram conduzidos por várias agências ou órgãos de pesquisa de diversos países, com objetivos e durações variadas, como por exemplo: o *The Coordinated Ocean Research and Exploration Section Program* (CORES)" (1980-1990); o TOGA-*Tropical Ocean and Global Atmosphere* (1984-1995), organizado pelo *World Climate Research Programme,* com o objetivo de entender e fazer previsão de fenômenos climáticos; o *WOCE- Experimento da Circulação Oceânica Mundial* (1988-1998), que englobou vários projetos no Atlântico, incluindo alguns no Atlântico Equatorial e Sul como *Romanche-1*, *Cither 1 e 2*, *Etambot-1 e 2*, *Equalant*; e o *GLOBEC* (*Global Ocean Ecosystem Dynamics*), criado em 1991, para avaliar como as mudanças globais afetam a abundância, a diversidade e a produtividade da biota marinha.

A Assembleia Geral da ONU declarou 1998 como o **Ano Internacional dos Oceanos**, visando colocar em foco a questão dos limites dos recursos marinhos, uma vez que muitos ecossistemas já apresentavam sinais de estresse e degradação, por conta das atividades antrópicas. Era incontestável a percepção de que a capacidade de autodepuração do oceano não é ilimitada, como se pensava no passado, e de que era necessário estabelecer um uso sustentável dos recursos marinhos, e medidas educacionais e de sensibilização precisavam ser estimuladas em escala global.

A partir de então diversas instuições e pesquisadores se empenharam em estudar a capacidade de resiliência e a conectividade dos ecossistemas marinhos, visando compreender a correlação entre fenômenos e processos locais e suas possíveis respostas ou efeitos globais. Tais linhas de pesquisa desencadearam e incentivaram uma grande quantidade de projetos e iniciativas, que contribuíram não só para o melhor entendimento sobre essas questões, mas também para o conhecimento do ambiente marinho como um todo, sua geomorfologia, composição química, dinâmica e sobre os organismos.

Importante ressaltar que estamos na *Década das Nações Unidas para a Ciência Oceânica e Desenvolvimento Sustentável*, ou **Década do Oceano (2021-2030)**, também declarada pela ONU, com o objetivo de disseminar a cultura oceânica para todas as pessoas e estimular o intercâmbio de conhecimento, tecnologia e expertise entre a comunidade científica ligada aos oceanos. Apesar dos grandes avanços da ciência oceanográfica, ainda há muito o que se descobrir e entender. O uso sustentável do oceano somente será viável por meio da educação e da conscientização da sociedade, e do pleno entendimento da importância do oceano para a manutenção da vida na Terra.

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

Intergovernmental Oceanographic Commission

2021 2030 United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Develop

## 6. A conquista da Antártica, o continente gelado

Pitágoras (séc. VI a.C.) já propunha que a Terra era esférica e os gregos supunham que deveriam existir massas continentais na porção sul do planeta, para contrabalançar os continentes da porção norte. Um mapa desenhado por Ptolomeu (séc. II d.C.) propunha uma "*Terra Incógnita*" que ligava a África e a Península da Malásia, fechando o Oceano Índico.

Os polinésios, por sua vez, mantinham lendas sobre uma grande massa de terra ao sul, fria e circundada por blocos de gelo que bloqueavam suas canoas. Mercator encontrou um mapa de autoria de Orontus Finaeus, que indicava uma "*Terra Australis*" (austral quer dizer do/ao sul), centrada no polo Sul, que realmente remetia ao continente Antártico, depois descoberto. Um fragmento de um mapa de 1513, guardado em um museu de Istambul, feito pelo geógrafo e almirante otomano Piri Reis, também indicava um continente ao sul.

O capitão James Cook foi, oficialmente, o primeiro a se aproximar da Antártica, ao cruzar o círculo polar Antártico (66°33´ de latitude Sul), em 1733, apesar de não conseguir se aproximar do continente, devido às banquisas e aos *icebergs*. Ele concluiu que a *Terra Australis* realmente existia e que seria fria e inóspita.

O capitão inglês Edward Bransfield foi o primeiro a avistar o continente antártico, em 30 de janeiro de 1820. No entanto, ele e sua tripulação pensaram que seria uma ilha e não um continente. Seu nome foi dado posteriormente ao estreito entre as Ilhas Shetland do Sul e a Península Antártica.

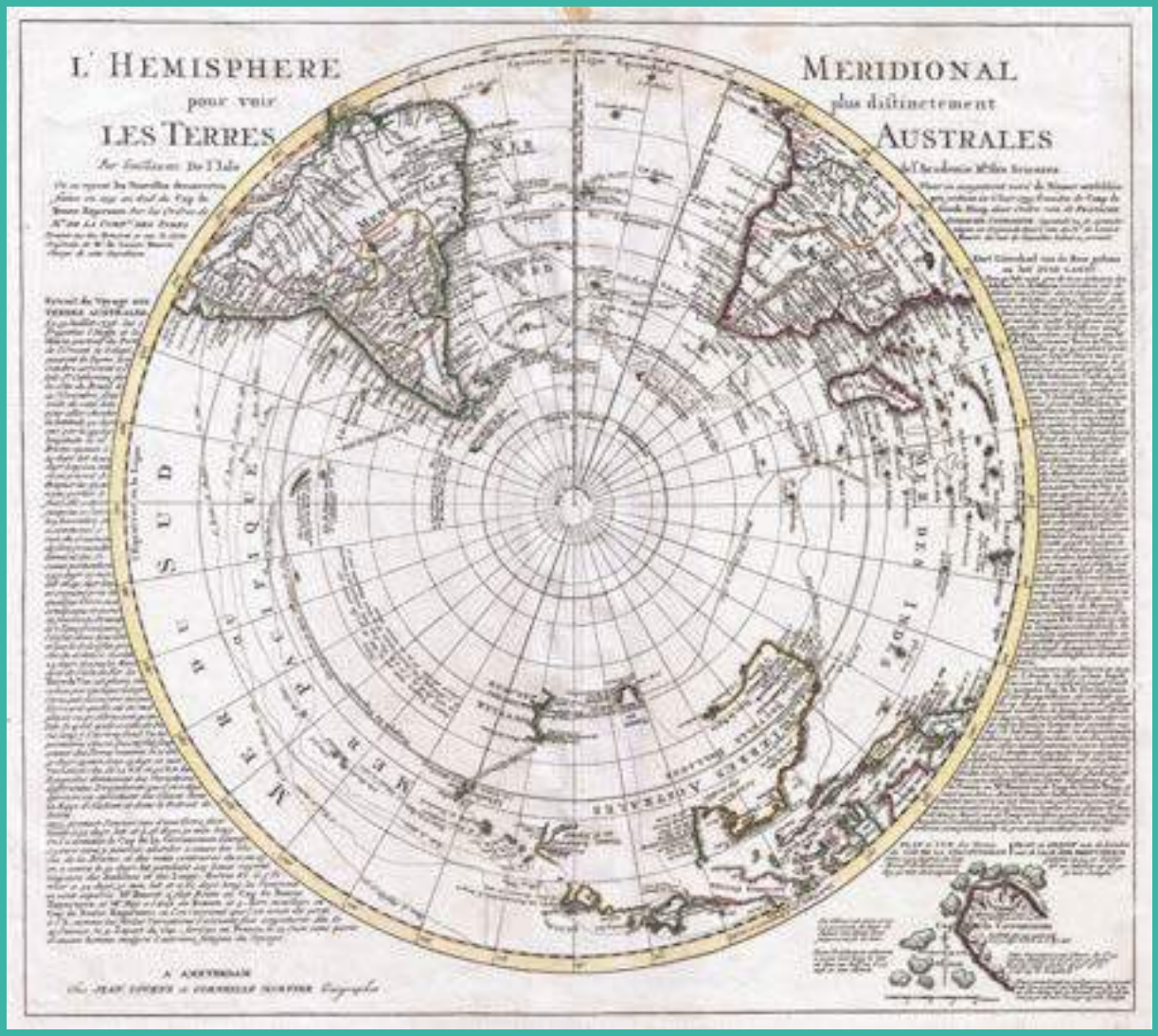
Na mesma época o Czar Alexandre I enviou navios com a missão de fazer uma circunavegação e atingir a região mais próxima do polo Sul. As corvetas "*Vostok*" e "*Mirny*", comandadas pelo Barão von Bellingshausen, navegaram em torno da Antártica e talvez tenham sido, realmente, os primeiros a visualizar o continente. No entanto, a descoberta "oficial" da Antártica é creditada ao capitão baleeiro estadunidense Nathaniel Palmer, em 17 de novembro de 1820.

Historicamente, a procura por focas e baleias levava vários navios à região antártica. Com a descoberta do polo magnético Norte, em 1831, pelo inglês James Clarke Ross, o matemático Karl Gauss previu a existência de um polo homólogo ao Sul, perto das coordenadas 66°S e 146°E (localização prevista para aquela época, pois os polos magnéticos sofrem deslocamento com o tempo). Assim, em 1840, foram realizadas várias expedições para localizar o polo magnético Sul, mas sem sucesso. Em uma dessas viagens, a *Terra de Adélia* foi descoberta pelo comandante francês Dumont d'Urville, em 20 de janeiro de 1840, local onde localiza-se a base francesa de pesquisa na Antártica, que recebeu o nome de seu descobridor.

O inglês James Clarke Ross foi o primeiro a forçar a travessia do gelo com sua flotilha. Navegou para Leste e descobriu a *Terra de Vitória* (nome dado em homenagem à rainha da Inglaterra), onde localiza-se a *Cordilheira Transantártica*, com 4.800 km de extensão e composta por altas montanhas. Em 1841 foi descoberto o vulcão *Erebus*, localizado na Ilha de Ross (batizada com seu nome), que atualmente é o vulcão mais ativo na Antártica. A expedição se encerrou em uma grande barreira de gelo, batizada de *Plataforma de Gelo Ross*, a maior do mundo, com uma área semelhante à da França.

As expedições científicas à Antártica ficaram suspensas por cerca de meio século, até que o continente voltou a ser foco das atenções, com o *Congresso Geográfico* de 1895, que designou a exploração da Antártica como um dos maiores projetos a se desenvolver. Havia o interesse científico, mas também o comercial, relacionado à caça de focas e baleias.

## O mundo antes do continente Antártico




Este mapa, desenhado por Guillaume de L'Isle e atualizado em 1739 por Covens e Mortier, mostra o Hemisfério Sul do planeta, indicando a "*Terra Australis*" (*Terres Australes*). No mapa estão detalhadas as rotas de diversos exploradores, como Magalhães, Vespucci, Mendana, Dampier, L'Aigle, S. Louis, Halley, Maury, entre outros. Muitas das informações que constam no mapa são baseadas nas explorações de Lozier Bouvet (registradas em francês e em holandês nas laterais da carta).

Durante séculos, geógrafos especulavam sobre a possibilidade de existência de uma grande massa continental ao Sul, baseados na Teoria do Equilíbrio. Como os continentes no Hemisfério Norte são grandes e massivos, a hipótese era de que deveria haver também uma grande massa de terra semelhante, no extremo Sul do planeta.

Um dos grandes defensores dessa teoria, no século 18, foi Philippe Buache de la Neuville, geógrafo francês e membro da Academia Francesa de Ciências. Além das "Considerações geográficas das terras austrais e da Antártica" (*Considerations geographiques sur les terres australes et antarctiques*), Buache também estabeleceu a divisão do globo em bacias oceânicas e foi pioneiro no uso de curvas de nível para expressar relevos em mapas. *Mapa: Wikimedia commons*.

O período entre os anos 1897 e 1922 ficou conhecido posteriormente como *Idade Heroica da Exploração Antártica*. Cerca de dezessete expedições foram organizadas para explorar o continente, com uma corrida entre as nações pelas conquistas do polo Sul geográfico e do polo Sul magnético. Liderados por Gerlache, Borchgrevink, Scott, Drygalski, Nordenskiöld, Bruce, Charcot, Shackleton, Shirase, Amundsen, Filchner, Mawson e Mackintosh, muitos homens cheios de ideais e espírito aventureiro se lançaram às condições adversas de sobrevivência no continente gelado.

A expedição de Adrien de Gerlache foi a primeira a passar o inverno na Antártica. O norueguês Borhgrevink instalou a primeira base sobre o continente, no *Cabo Adare*, onde seus homens resistiram ao terrível inverno do continente. O médico e cientista polar Dr. Jean Charcot fotografou algumas regiões e construiu mapas cartográficos de grande parte do oeste Antártico, durante as duas expedições que liderou, entre 1903-1905 e 1908-1910.

Quatro expedições foram as mais importantes para encontrar o polo Sul geográfico, sendo três britânicas e uma norueguesa: as de Scott (1901-1904 e 1910-1913); a de Shackleton (1907-1909) e a do norueguês Amundsen (1910-1912), que foi o primeiro a atingir o polo em 14 de dezembro de 1911, quase um mês antes de Scott chegar ao mesmo ponto (Fig. 10). Fatalmente, Scott e sua equipe perderam não só a corrida pela conquista do polo Sul, mas também suas vidas, devido ao frio e à fome.

A conquista do polo Sul magnético foi realizada pelo navegador britânico Ernest Shackleton, em 1909. Após esse feito, o explorador retornou à Antártica em 1914, com seu navio *Endurance,* tendo como objetivo cruzar o continente. Nessa expedição a embarcação ficou presa no gelo e foi danificada, devido à pressão dos blocos congelados sobre sua estrutura. Mesmo em condições adversas, a tripulação foi resgatada e os relatos foram contados em livros e filme.

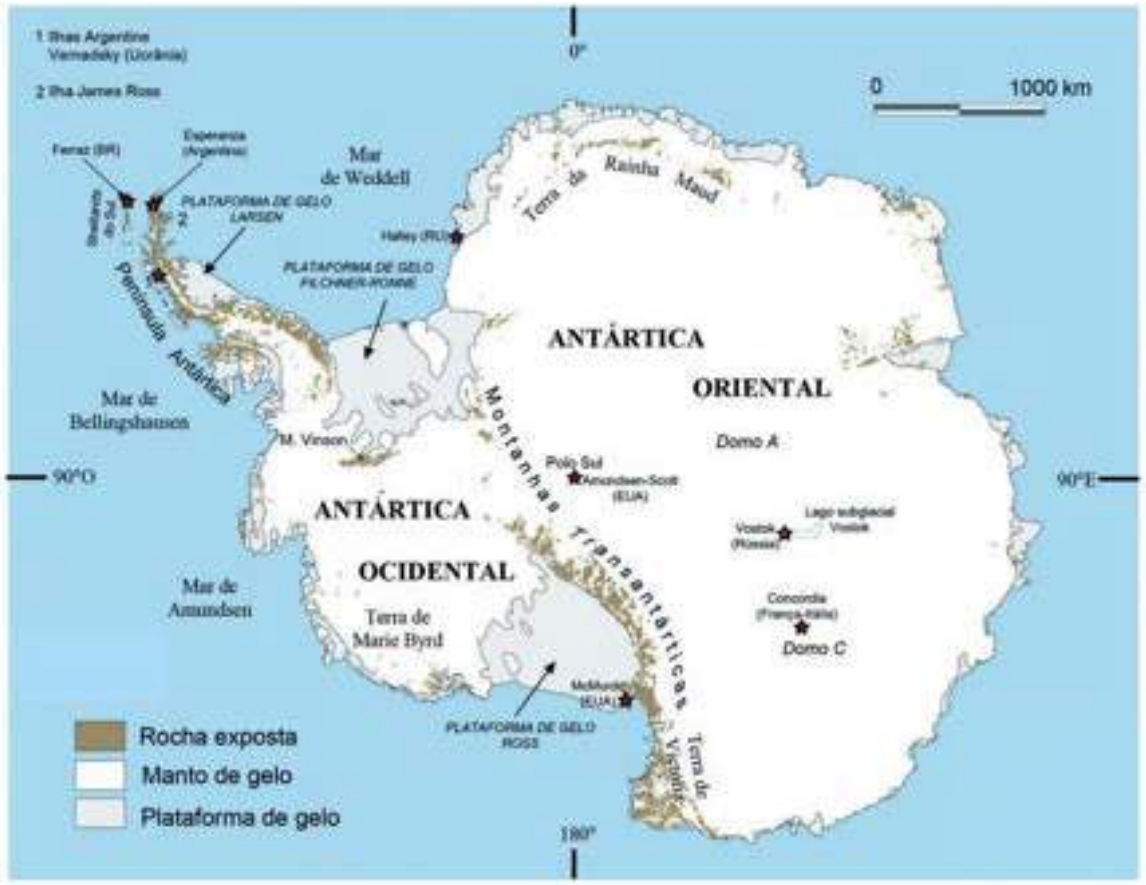



**FIGURA 10. O continente Antártico.** *Fonte <https://www.marinha.mil.br/secirm/proantar/a-antartica>.*

Após o início das pesquisas, o continente mais frio, inóspito, seco e com maior altitude média (cerca de 2.000 m) se tornou mais conhecido. Na Antártica, as condições climáticas mudam repentinamente, com ventos de até 100 km/h, que podem durar dias. Não há moradores na Antártica, apenas uma população sazonal de cientistas, militares e equipes de apoio que passam períodos determinados em Bases de Pesquisa.

O turismo, em pequena escala, existe há muitos anos, e é atualmente regulado pela *Associação Internacional das Operadoras de Turismo Antártico* (IAATO, em inglês), da qual fazem parte dezenas de companhias de turismo, de vários países. Visitar um local tão particular e especial como a Antártica é uma experiência singular e desejo de muitas pessoas. Para isso, no entanto, deve-se considerar a prioridade em se preservar esse ambiente, insubstituível e único no planeta.

## 6.1 O Tratado Antártico

A região Antártica, considerada a área ao Sul de 60°S de latitude, foi alvo de disputa entre vários países por posses territoriais e exploração econômica. Após muitas reuniões e tratativas, em 1º de dezembro de 1959, o *Tratado Antártico* foi firmado, com a assinatura dos doze países interessados em explorar ou pesquisar a região (África do Sul, Argentina, Austrália, Bélgica, Chile, Estados Unidos da América, França, Japão, Nova Zelândia, Noruega, Reino Unido e Rússia), que se tornaram os membros signatários originais.

Em 23 junho de 1961 o Tratado Antártico entrou em vigor. Com isso, o continente passou a ser considerado uma reserva natural, livre para pesquisa científica em cooperação internacional, respeitando os códigos de bioética, conservação e preservação do ecossistema e consagrada à paz. O Brasil, tornou-se signatário em 1975, por reconhecer a relevância e a amplitude da influência Antártica para o desenvolvimento nacional. O Protocolo ao Tratado da Antártica sobre Proteção ao Meio Ambiente, também conhecido como *Protocolo de Madri*, concedeu à Antártica o *status* de "Reserva Natural Internacional dedicada à Ciência e à Paz", sendo assinado no dia 4 de outubro de 1991 e entrando em vigor em 14 de janeiro de 1998, propondo a proteção integral do continente por 50 anos.

O Protocolo de Madri só poderá ser modificado em 2048, desde que haja acordo unânime dos membros consultivos do Tratado da Antártica. Nele, são estabelecidas normas de conduta para visitantes da região (pesquisadores, turistas e pessoal de apoio logístico), visando a minimização dos impactos negativos sobre o meio ambiente. Recomendações como: evitar perturbar os animais, procurar não caminhar sobre a vegetação (em geral rasteira composta por líquens e musgos), não coletar animais ou plantas sem fins científicos, não levar organismos estranhos ao ecossistema, não usar armas e armazenar todos os resíduos produzidos, recuperando ou retornando ao país de origem responsável pela expedição, são algumas das normativas preconizadas nesse acordo.

Atualmente, o Tratado Antártico conta com 53 países signatários e prevê, ainda, a adesão de qualquer país membro das Nações Unidas. Dos países signatários, 29 são considerados membros consultivos, por serem signatários originais ou por conduzirem pesquisas científicas substanciais naquele continente, com direito a voto nas decisões sobre o continente (que é o caso do Brasil). Os demais 24 países são considerados membros não consultivos, convidados a participar das reuniões, porém, sem direito a voto nas decisões sobre o futuro da Antártica. A premissa é que os países dialoguem sobre o uso do continente, com o propósito de preservá-lo e de não permitir que se torne objeto de discórdia internacional.

## 6.2 O Programa Antártico Brasileiro

Dentre os vários programas oceanográficos nacionais, que serão apresentados mais adiante, um dos mais popularmente conhecidos é o Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR). Em dezembro de 1982, o *Navio de Apoio Oceanográfico Barão de Teffé*, (H42) o primeiro navio polar brasileiro, pertencente à Marinha do Brasil, e o *Navio Oceanográfico Prof. W. Besnard*, do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, deixaram o Brasil rumo à Antártica, iniciando a Operação Antártica com o cruzeiro PROANTAR I (Fig. 11).

**FIGURA 11. Os pioneiros brasileiros na Antártica: NApOc H42 Barão de Teffé e N/Oc. Prof. W. Besnard juntos (à esquerda) e o N/Oc. Prof. Besnard (à direita).** *Fotos: Acervo IOUSP.*

O Brasil tornou-se membro consultivo do Tratado Antártico em 1984, após a realização do PROANTAR-I, sendo então aceito como membro do Comitê Científico sobre Pesquisa Antártica (SCAR – sigla em inglês). O PROANTAR foi criado em 1982, com a finalidade de promover a pesquisa científica brasileira na Antártica, por meio de um planejamento integrado de longo prazo e uma coordenação articulada das atividades.

No PROANTAR II foi iniciada a construção da base Antártica Brasileira "Comandante Ferraz", que leva o nome do hidrógrafo e oceanógrafo que visitou a Antártica por duas vezes com os britânicos e que participou da concepção do Programa Antártico. A Estação Antártica Brasileira Comandante Ferraz, foi inaugurada em 6 de fevereiro de 1984, na Ilha Rei George, a maior das Ilhas Shetland do Sul, na Península Keller (nas coordenadas 62°05'S e 58°24'W). A estação Ferraz, que tem como vizinhos as estações antárticas da Argentina, Chile, China, Equador, Coreia do Sul, Peru e Polônia, teve um papel fundamental no desenvolvimento e consolidação do PROANTAR. Em 25 de fevereiro de 2012 a base foi destruída por um incêndio, que infelizmente vitimou dois militares (o Suboficial Carlos Alberto Vieira Figueiredo e o Primeiro-Sargento Roberto Lopes dos Santos) e destruiu a maior parte das instalações, dando inicio a novos esforços do Governo Federal para a construção de uma nova e moderna base de pesquisa, inaugurada em 15 de janeiro de 2020.

O PROANTAR nasceu da necessidade de se planejar e executar as atividades logísticas e científicas relacionadas ao continente antártico, mantendo o foco nas questões ambientais. O Programa é mantido pelo Governo por meio de uma parceria entre os Ministérios das Relações Exteriores, da Defesa (Marinha e Aeronáutica), da Ciência e Tecnologia, do Meio Ambiente e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). A condução do PROANTAR é de responsabilidade da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM), coordenada pela Marinha do Brasil, que possui uma secretaria, a SECIRM, para a execução das atividades administrativas de gerência do programa.

Completando o esforço brasileiro na Antártica, a Força Aérea Brasileira participa com o apoio logístico, possibilitando o transporte de pesquisadores, equipamentos e suprimentos entre o Brasil e a estação Comandante Ferraz. O Ministério de Minas e Energia, por meio da Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras), fornece o combustível necessário à condução das Operações Antárticas.

O *N/Oc. Prof. Besnard* realizou as expedições OPERANTAR de I a VI. A partir desta operação, somente participaram os navios da Marinha do Brasil *NApOc Barão de Teffé*, que operou até 1994, quando foi substituído pelo o *NApOc. Ary Rongel*, atualmente em operação. Em fevereiro de 2009 o *Navio Polar (NPo) Almirante Maximiano* foi incorporado à Marinha do Brasil para dar continuidade às pesquisas.

O Programa Antártico Brasileiro envolve, atualmente, muitas universidades brasileiras e centros de pesquisa em áreas multidisciplinares, seguindo a prerrogativa de preservação do continente antártico, devido ao seu papel na manutenção global do clima e por representar provavelmente o último refúgio prístino[6] no planeta.

## 7. A Oceanografia no Brasil

No período do Brasil colonial, os levantamentos hidrográficos na costa brasileira eram realizados pelos portugueses, especialmente por meio das expedições de reconhecimento e guarda-costas. Já na primeira metade do século XIX, as campanhas hidrográficas no litoral brasileiro foram lideradas pelos capitães franceses Roussin, Barral e Montravel. Roussin navegou do Maranhão à Santa Catarina e gerou mapas da costa que foram publicados entre 1822 e 1827, com destaque para a *Carta Geral da Costa Brasileira*. Barral complementou esse levantamento, indo de Santa Catarina ao Chuí, publicando as cartas em 1833, enquanto Montravel completou a parte norte, do Maranhão ao Cabo Orange, no Amapá, em 1842. Sendo assim, a costa brasileira foi toda mapeada, incluindo trechos de águas interiores, como dos rios Amazonas, Pará e Tapajós, além da Baía de São Marcos.

No período entre 1856 e 1868, o capitão Mouchez realizou vários levantamentos hidrográficos e cartográficos, com destaque para o do Arquipélago de Abrolhos, gerando cartas mais detalhadas de muitos trechos da costa brasileira, publicadas em 1866, apresentando também uma primeira tentativa de delimitação da plataforma continental brasileira.

O primeiro brasileiro a realizar um levantamento hidrográfico foi o Capitão-de-Fragata Manoel Antônio Vital de Oliveira que, em 1857, mapeou a região desde a foz do rio Mossoró à foz do rio São Francisco. Por sua dedicação e trabalho extenso e minucioso, ele é considerado o Patrono da Hidrografia Brasileira.

O Decreto Imperial nº 6113, de 02 de fevereiro de 1876, instituiu a *Repartição da Carta Marítima*, como parte dos esforços do Imperador D. Pedro II ao desenvolvimento da navegação de cabotagem e defesa da extensa costa brasileira. O nome da Repartição foi alterado em 1923 para Diretoria de Navegação da Marinha e, em 1946, assumiu o nome que mantém até hoje, Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Vinculada à Marinha do Brasil, a DHN empenhou grandes esforços para a nacionalização e modernização das cartas hidrográficas costeiras do Brasil.

[6] Um ambiente prístino é aquele que mantém sua condição original, sem alterações ou modificações antrópicas.

Atualmente a DHN, além das cartas náuticas de excelente qualidade e das tábuas de previsões de marés, oferece vários outros serviços, com destaque para o Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO)[7], criado em 1994, como um Centro Depositário da Comissão Oceanográfica Intergovernamental (COI). Dentre as atribuições do BNDO estão as de obter, receber, analisar e verificar a coerência dos dados recebidos, organizar, controlar, arquivar e disseminar dados oceanográficos oriundos de instituições brasileiras e estrangeiras. A DHN é a instituição nacional que tem por função promover e coordenar a participação do Brasil nas atividades relacionadas com os serviços oceânicos e o mapeamento oceânico no âmbito da COI.

Em 1946 o Governo do Estado de São Paulo criou o Instituto Paulista de Oceanografia (IPO), inicialmente vinculado à Secretaria da Agricultura. O Professor Wladimir Besnard, um naturalista russo, com ampla experiência em vários países e instituições de pesquisa, especialmente na França, foi contratado para liderar a entidade. Em 1948 o IPO iniciou suas atividades, mantendo um vínculo de trabalho com a Universidade de São Paulo, o que culminou com sua incorporação à USP em 1951, contando com os esforços do Dr. Ingvar Emilsson e da Dra. Marta Vanucci, recebendo o nome de Instituto Oceanográfico da USP (IOUSP). Portanto, o IOUSP é a primeira e mais antiga instituição do país dedicada à Oceanografia.

## Prof. Wladimir Besnard - o "Pai da Oceanografia Brasileira"

*Prof. W. Besnard (acima) e o navio que leva seu nome em foto de Francisco L. Vicentini (acervo IOUSP).*

O Prof. Besnard se empenhou em consolidar a pesquisa oceanográfica no Estado de São Paulo, que era focada inicialmente no apoio científico à pesca e exploração dos recursos marinhos da costa do Estado. Ele viabilizou a criação de infraestrutura adequada para as pesquisas do IPO/IOUSP, como o estabelecimento de bases de pesquisa no Litoral Sul (Cananéia, em 1951) e no Litoral Norte (Ubatuba, em 1955), aquisição de embarcações e convênios para financiamento de expedições de pesquisa.

Atuou também na divulgação científica, criando o *Boletim do Instituto Paulista de Oceanografia* (Fig.13), cujo primeiro volume foi lançado em 1950, representando assim a primeira publicação periódica brasileira dedicada à pesquisa oceanográfica. Ele atuou também como colunista eventual do jornal *O Estado de São Paulo*, divulgando a ciência para o público leigo.

O primeiro Navio Oceanográfico brasileiro, construído em Bergen (Noruega), chegou ao Brasil em 1967, tendo sido batizado com o nome do Professor Besnard (N/Oc. Prof. W. Besnard), em homenagem ao "Pai da Oceanografia Brasileira", que empreendeu esforços em todos os sentidos para a construção de um navio apropriado para a pesquisa. Infelizmente, ele não conheceu a embarcação, pois veio a falecer em 1960, catorze anos depois de ter assumido o desafio de implementar a Oceanografia no Brasil.

[7] Para saber mais, acesse: <https://www.marinha.mil.br/chm/chm/bndo>.

## Linha do tempo - IOUSP

1946 CRIAÇÃO DO INSTITUTO PAULISTA DE OCEANOGRAFIA

1948 PRIMEIROS TRABALHOS DE PESQUISA NO LITORAL SUL DO ESTADO DE SP

1949 CONSTRUÇÃO DO LABORATÓRIO FLUTUANTE PARA APOIO ÀS PESQUISAS

1949 PRIMEIROS TRABALHOS DE PESQUISA NO LITORAL NORTE DO ESTADO DE SP

1950 PRIMEIRA EXPEDIÇÃO OCEANOGRÁFICA - TRINDADE E MARTIM VAZ

1950 PRIMEIRA EDIÇÃO DO BOLETIM DO INSTITUTO PAULISTA DE OCEANOGRAFIA

1951 INCORPORAÇÃO À USP E ALTERAÇÃO DO NOME (INSTITUTO OCEANOGRÁFICO)

1952 MUDANÇA DA SEDE (BARRA FUNDA)

1952 CONSTRUÇÃO DE LABORATÓRIOS NA BASE DE CANANÉIA

1955 CONSTRUÇÃO DE INFRAESTRUTURA NA BASE DE UBATUBA

1954 AQUISIÇÃO DA EMBARCAÇÃO JUVA-CAMBURIÚ

1955 AQUISIÇÃO DA EMBARCAÇÃO UNGAVA

1959 AQUISIÇÃO DA EMBARCAÇÃO EMÍLIA

1961 AQUISIÇÃO DA EMBARCAÇÃO JOÃO DE PAIVA CARVALHO

1966 INÍCIO DOS CURSOS DE PÓS-GRADUAÇÃO

1967 EXPEDIÇÃO VIKINDIO E CHEGADA DO NAVIO PROF. W. BESNARD

1970 MUDANÇA DA SEDE PARA O CAMPUS DA CIDADE UNIVERSITÁRIA DA USP

1972 O INSTITUTO É ELEVADO À UNIDADE UNIVERSITÁRIA DA USP

1973 AQUISIÇÃO DAS EMBARCAÇÕES VELIGER II (UBATUBA) E ALBACORA (CANANÉIA)

1982 1ª EXPEDIÇÃO PROANTAR

1988 IMPLANTAÇÃO DO MUSEU E AQUÁRIO DO IOUSP

2002 INGRESSO DA PRIMEIRA TURMA DE GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

2009 INAUGURAÇÃO DO BLOCO DIDÁTICO

2012 INAUGURAÇÃO DA FERRAMENTA SCIENCE ON A SPHERE

2012 INAUGURAÇÃO DO N/OC. ALPHA CRUCIS E B/PQ. ALPHA DELPHINI

Para saber mais sobre a história do IOUSP, acesse:
https://www.io.usp.br/index.php/institucional/historico

Com a incorporação do IPO à USP, o *Boletim do Instituto Paulista de Oceanografia* mudou de nome para *Boletim do Instituto Oceanográfico* e, em 1995, para *Revista Brasileira de Oceanografia*, título que permaneceu até 2004, quando passou a chamar-se *Brazilian Journal of Oceanography*. Essas publicações foram distribuídas em muitas instituições nacionais e internacionais e ajudaram a disseminar o conhecimento de Oceanografia no país. A mais recente mudança do periódico, ocorreu em 2020, quando passou a se chamar *Ocean and Coastal Research*. As mudanças no nome refletem os esforços do Comitê Editorial para conseguir maior abrangência e internacionalização da pesquisa publicada no periódico, atendendo a rigorosos critérios de avaliação dos manuscritos submetidos. São 70 anos ininterruptos dedicados à divulgação da pesquisa oceanográfica no Brasil e no mundo.

O primeiro Navio Oceanográfico brasileiro, o N/Oc. Prof. W. Besnard, cumpriu uma longeva e corajosa jornada de expedições desde 1967. Em sua viagem inaugural, da Noruega para o Brasil, realizou sua primeira expedição cientifica, a *Vikindio*. Dentre as várias expedições realizadas, seis delas foram à Antártica (PROANTAR I-VI). O navio foi desativado em 2008, depois de ter viabilizado muitas pesquisas na costa brasileira e em águas internacionais[8], e com importante atuação na formação de recursos humanos qualificados, além de contribuir à expansão territorial do Brasil, com a participação nas pesquisas antárticas, subsidiando o ingresso do país no Tratado Antártico.

A iniciativa do Governo de São Paulo para os estudos oceanográficos logo foi se replicando em outros Estados da União. Em 1995 foi criado o primeiro centro oceanográfico da região nordeste, o Instituto de Biologia Marinha e Oceanografia, que posteriormente passou a ser o Departamento de Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco. Em 1960, foi criada a Estação de Biologia Marinha, como Instituto da Universidade Federal do Ceará, que em 1969, passou a se chamar Laboratório de Ciências do Mar (LABOMAR) e, em 1998, Instituto de Ciências do Mar, desenvolvendo pesquisas nas áreas de Oceanografia (Geológica, Biológica, Química e Física), Pesca e Prospecção, Microbiologia Ambiental e do Pescado e Análises de Impactos Ambientais e de Contaminação do Ambiente Marinho e Costeiro.

O primeiro centro de estudos oceanográficos na região sul foi a Sociedade de Estudos Oceanográficos do Rio Grande – SEORG, criada em 20 de março de 1953, por um grupo de entusiastas que já há algum tempo pensavam em implantar na região um centro para estudos ligados ao oceano, dadas as necessidades locais e estudos que já vinham sendo desenvolvidos. A prefeitura de Rio Grande cedeu o prédio onde foi instalado o Museu Oceanográfico que, de 1953 a 1972, passou a desenvolver pesquisas e a criar um acervo para exposição, que colaborou para a popularização e interesse pelas ciências do mar. A Universidade Federal do Rio Grande (FURG) conta com o Instituto de Oceanografia (criado em 2008) e outras instalações de apoio como o *N/Oc. Atlântico Sul*, incorporado em 1976, junto com a *Lancha Oceanográfica Larus*, que deram autonomia para os estudos oceanográficos na plataforma do sul do Brasil e Lagoa dos Patos. Também em 1976, foi lançada a revista "*Atlântica*", o primeiro periódico científico editado pela instituição, que pode ser encontrado nas bibliotecas das principais instituições de pesquisa em todo o mundo. Em 1971 a FURG criou o primeiro curso de Oceanologia do país.

Posteriormente foram criados centros de estudos nas regiões nordeste e sul, respectivamente, o da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, em Natal (1962-63) e o Centro de Estudos Costeiros, Limnológicos e Marinhos (Ceclimar) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em 1978.

A criação de  centros de pesquisa se mescla com o oferecimento de cursos de graduação e pós-graduação em Oceanografia/Oceanologia, e serão tratados de maneira conjunta na próxima seção.

[8] A lista com os principais cruzeiros oceanográficos realizados pelo N/Oc. Prof. W. Besnard pode ser acessada em: <https://www.io.usp.br/images/Embarcacoes/cruzeiros_oceanograficos.pdf>.

## 7.1 O ensino de Oceanografia no Brasil

Na década de 1970 foram criados os dois primeiros cursos de graduação em Oceanografia no Brasil: o primeiro, em 1971, pela Universidade Federal do Rio Grande (FURG), em Oceanologia, e o segundo, na Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), em 1977. Em 1992 a Universidade do Vale do Itajaí (UNIVALI) também passou a oferecer o curso de graduação em Oceanografia.

O interesse pela ciência e a demanda pelo profissional oceanógrafo expandiram-se para outras regiões e estados do Brasil, estimulando a criação de novos cursos.

A regulamentação da profissão só ocorreu em 31 de julho de 2008, com a sanção da Lei nº 11.760, após dezessete anos de trâmites. A regulamentação da profissão, sem dúvida, foi um incentivo para a criação de novos cursos de graduação e pós-graduação, visando a formação de recursos humanos especializados na área. Atualmente existem treze instituições que oferecem cursos de graduação em Oceanografia no Brasil (Tab. 1).

**TABELA 1.** Universidades que oferecem curso de graduação em Oceanografia ou Oceanologia.

| Universidades públicas | Ano de criação |
|---|---|
| Universidade Federal do Rio Grande (FURG) | 1971 |
| Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) | 1977 |
| Universidade Federal do Paraná (UFPR), *até 2004 Ciências do Mar | 1999*/2004 |
| Universidade Federal do Pará (UFPA) | 2000 |
| Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) | 2000 |
| Universidade de São Paulo (USP) | 2002 |
| Universidade Federal da Bahia (UFBA) | 2004 |
| Universidade Federal do Ceará (UFC) | 2008 |
| Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) | 2008 |
| Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) | 2009 |
| Universidade Federal do Maranhão (UFMA), até 2010 era o curso de Ciências Aquáticas | 2002*/2010 |
| Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB) | 2016 |
| **Universidade particulares** | |
| Universidade do Vale do Itajaí (UNIVALI) | 1992 |
| Centro Universitário Monte Serrat (UNIMONTE), atualmente desativado | 1998 |

Alguns cursos de pós-graduação em Oceanografia foram criados muito antes dos de graduação em seus respectivos institutos, como é o caso do Instituto Oceanográfico da USP, que iniciou sua pós-graduação em 1966 e a graduação só foi iniciada em 2002. Atualmente existem nove programas de pós-graduação em Oceanografia cadastrados na CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), todos em universidades públicas: na USP e nas universidades federais do Rio Grande (FURG), Santa Catarina (UFSC), Rio de Janeiro (UERJ), Espírito Santo (UFES), Pernambuco (UFPE), Maranhão (UFMA) e Pará (UFPA).

Paralelamente à criação dos cursos de graduação e de pós-graduação, foram criados vários laboratórios de pesquisa, muitos deles associados a projetos nacionais e regionais. Em 1970, foi fundado o LABOHIDRO, na Universidade Federal do Maranhão, que mais tarde transformou-se no Departamento de Oceanografia e Limnologia. Desde 1977 a instituição mantém o periódico *Boletim do Laboratório de Hidrobiologia*. Em 1972 criou-se o LABMAR (atual Laboratórios Integrados de Ciências do Mar e Naturais), vinculado à Universidade Federal de Alagoas.

Em 1973 foi criado o Projeto Camarão, pelo governo do Rio Grande do Norte, junto com a Empresa de Pesquisas Agropecuárias do Rio Grande do Norte (EMPARN), na margem do rio Potengi, destinada à larvicultura e criação de camarões em viveiros. Em 1975, criou-se o Departamento de Pesca e Aquicultura da Universidade Federal Rural de Pernambuco, que desenvolve trabalhos em Oceanografia Pesqueira e Biologia, e também o NEPREMAR - Núcleo de Estudos e Pesquisas dos Recursos do Mar, em João Pessoa (PB), constituído de diversos laboratórios, que tem como finalidade elaborar projetos e executar pesquisas de assuntos relacionados com o mar. Em 1982 foi criado o Núcleo de Pós-Graduação em Estuários e Manguezais da Universidade Federal de Sergipe, com atuação em Ciências Biológicas e Ecologia e também foi formalizada a criação do Centro de Estudos do Mar (CEM) da Universidade Federal do Paraná (em Pontal do Sul, PR), organizado em 1980 como unidade de pesquisa vinculada ao Setor de Ciências Biológicas.

Em 1983 foi criado o Centro de Pesquisa e Gestão de Recursos Pesqueiros do Litoral Nordeste (CEPENE), um dos Centros Especializados do IBAMA voltados para o estudo, a pesquisa e a gestão dos recursos pesqueiros. Situado na praia de Tamandaré, litoral sul do Estado do Pernambuco, desenvolve trabalhos sobre Estatística Pesqueira, Biologia e o potencial de camarão marinho, lagosta e peixes.

Ao longo dos anos, com o aprimoramento do controle e da fiscalização da explotação e uso de áreas marinhas, muitas empresas de consultoria na área de Oceanografia foram sendo criadas por todo o Brasil, oferecendo novas oportunidades de trabalho aos profissionais formados nesses cursos. O capítulo **O Perfil e a Atuação do Oceanógrafo** aborda as múltiplas possibilidades de atuação do profissional ocenógrafo.

Diversas instituições no Brasil atuam em estudos, pesquisas e serviços na área da Oceanografia, por terem atividades correlatas. Dentre as unidades da USP, podemos destacar: os programas de Engenharia Ambiental e Engenharia Oceânica da Escola Politécnica (EP-USP), do Centro de Biologia Marinha (CEBIMar, em São Sebastião), o programa de Meteorologia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP), os Institutos de Biociências (IB-USP), Química (IQ-USP), Geociências (IGc-USP), dentre outros, que desenvolvem pesquisas relacionados à multifacetada Oceanografia.

Destaque deve ser dado também às instituições como: o Instituto Alberto Luiz Coimbra, de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE – UFRJ), o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, com os programas de Meteorologia e Sensoriamento Remoto), o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (INPE / CPTEC), institutos de pesquisa da Marinha do Brasil, como o Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM) e o Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM). Devem ser considerados também os cursos de graduação e/ou pós-graduação em Ciências Biológicas, Ciências Marinhas, Ecologia, Biologia Marinha, Engenharia do Petróleo e Gás, Gestão ou Engenharia Ambiental, dentre outros, de diversas instituições, como: UNESP (Campus do Litoral Paulista), UNIFESP (bacharelado Interdisciplinar em Ciências e Tecnologia do Mar), PUC-Rio, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Universidade Santa Úrsula (RJ), Universidade Estadual de Santa Cruz (BA), dentre outras.

## 7.2 As campanhas oceanográficas brasileiras

Um dos primeiros estudos oceanográficos brasileiro de grande relevância foi o levantamento hidrográfico entre a foz do rio Mossoró (RN) e a foz do rio São Francisco, liderado pelo comandante Vital de Oliveira, da Marinha do Brasil, em 1857. A pesquisa oceanográfica acadêmica originou-se com a chegada do Prof. Wladimir Besnard ao Brasil e a criação do Instituto Paulista de Oceanografia, que foi a primeira instituição nacional dedicada à investigação dos recursos vivos, minerais e energéticos do mar brasileiro. Considera-se que a primeira expedição oceanográfica brasileira foi realizada em maio de 1950, no arquipélago de Trindade e Martin Vaz (Fig. 14), que constitui o ponto mais a leste do território nacional (a cerca de 600 milhas náuticas ou 1.180 km, em frente à cidade de Vitória, ES).

A expedição, apoiada pelo Governo Federal e chefiada pelo Cel. João Alberto, tinha como cientistas responsáveis o Prof. Besnard e João Capistrano Raja Gabaglia. O objetivo era planejar a colonização e a construção de uma base aeronaval no arquipélago, além de outros interesses políticos e econômicos. A Ilha da Trindade foi definitivamente ocupada por militares da Marinha do Brasil apenas em 1957, com a criação do posto Oceanográfico da Ilha da Trindade (POIT), que até hoje segue em operação.

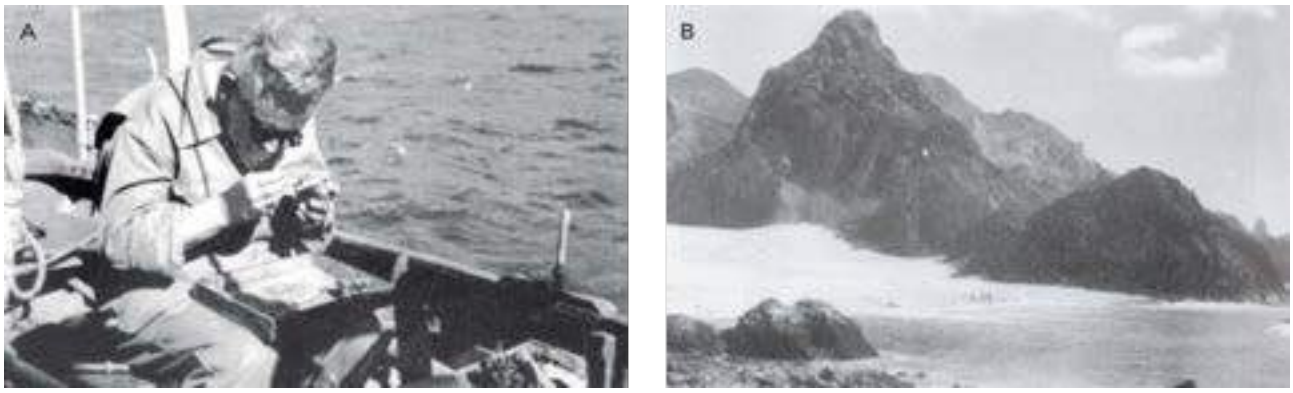



**FIGURA 14. Expedição ao Arquipélago de Trindade e Martim Vaz: A) Prof. W. Besnard analisando amostras coletadas; e B) Foto da Ilha de Trindade, tirada pelo próprio Prof. Besnard, durante a expedição.** *Fotos: Acervo IOUSP.*

O Almirante Paulo Moreira da Silva foi o responsável pela transformação do *Navio-Escola Almirante Saldanha* no primeiro navio oceanográfico da Marinha do Brasil, em 1964, que realizou diversas campanhas de pesquisa por toda costa brasileira. Ambos, o Almirante e o navio que leva seu nome, tiveram papéis muito importantes para a Oceanografia nacional.

As características oceanográficas e geomorfológicas, os ambientes, os ecossistemas e a biota da costa brasileira e do Atlântico Sul passaram a ser conhecidos, descritos e inventariados com o desenvolvimento de programas e projetos como: o Programa Grupo Executivo para o Desenvolvimento da Indústria Pesqueira (GEDIP I e II, de 1968 a 1972, na região sul da costa brasileira); o Fauna Nectônica da Plataforma Continental Brasileira (FAUNEC, de 1975); o Projeto Integrado do IOUSP para Uso e Exploração Racional do Ambiente Marinho (Projeto FINEP, de 1976 a 1983); o Projeto Integrado Utilização Racional do Ecossistema Costeiro da Região Tropical Brasileira, Estado de São Paulo, (Projeto Integrado, de 1985 a 1990); o Projeto Pontos Anfidrômicos e Variações Sazonais do Atlântico Sul (PAVASAS, de 1984-1993); o Projeto Oceanografia da Plataforma Interna de São Sebastião (OPISS, de 1993 a 1998); o Projeto Circulação da Região Oceânica da Região Oeste do Atlântico Sul (COROAS, de 1992 a 1998); o Programa de Avaliação do Potencial Sustentável dos Recursos Vivos na Zona Econômica Exclusiva (REVIZEE, de 1996 a 2006); o Projeto Dinâmica

do Ecossistema de Plataforma da Região Oeste do Atlântico Sul (DEPROAS, de 2001 a 2004); o Projeto Importância e Caracterização da Quebra da Plataforma para Recursos Vivos e Não-Vivos (PADCT 1 e 2 de 1997 a 2002); o Projeto A Influência do Complexo Estuarino da Baixada Santista sobre o Ecossistema da Plataforma Continental Adjacente (ECOSan, de 2004 a 2008); o Projeto Produtividade, Sustentabilidade e Utilização do Banco de Abrolhos (PROABROLHOS); o Projeto Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica (REMO): Projeto Dinâmica do Meandramento da Corrente do Brasil entre Cabo de São Tomé e Cabo de Santa Marta (DINBRAS), dentre tantos outros antigos e recentes, de suma relevância para a ciência oceanográfica.

A participação de equipes brasileiras em projetos internacionais iniciou-se nos anos 1960 com o *Equalant International Expeditions* (1960-1964), na área equatorial atlântica. Seguiram-se outros projetos, como: o *Global Atmosphere Research Programmes* (GARP) e o *GARP Atlantic Tropical Experiment* (GATE, de 1974-1979); o *First Global GARP Experiment* (FGGE, de 1979); e o *World Ocean Circulation Experiment* (WOCE, de 1990 a 1998, com os Projetos *Romanche, Cither, Etambot*), que foi parte do Programa Internacional de Pesquisa Climática Mundial (*World Climate Research Program* - WCRP) e teve como objetivo estabelecer o papel dos oceanos no sistema climático da Terra. A fase de análise e modelagem destes dados se estendeu até 2002, no âmbito dos programas *Global Ocean Observing System* (GOOS), que é um programa permanente de observação, análise e modelagem de dados oceanográficos, do qual derivou o programa *Global Sea Level Observing System* (GLOSS), que visa o monitoramento e estudo das variações do nível do mar. Os ramos brasileiros desses programas constituem o GOOS-BRASIL e o GLOSS-BRASIL, que se encontram ativos e operacionalizados da Marinha do Brasil.

Associados aos programas citados se encontram: o Programa Nacional de Boias (PNBOIA), uma rede de boias de deriva e fundeadas na região costeira, rastreadas por satélite, que fornece dados meteorológicos e oceanográficos em tempo real para a comunidade científica; e o projeto PIRATA (*Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic*), uma rede de observação *in situ* composta por boias fundeadas, planejadas para monitorar uma série de variáveis dos processos de interação oceano-atmosfera no oceano Atlântico Tropical. O PIRATA é um programa de cooperação multinacional entre Brasil, França e Estados Unidos, que dividem as tarefas de implementação e manutenção da rede.

Atualmente o Brasil possui grupos de pesquisa bem consolidado, cursos de boa qualidade e uma relevante produção científica, com participação em diversos programas nacionais e internacionais de pesquisa oceanográfica, financiados por agências brasileiras de fomento à pesquisa, como: o Conselho Nacional de Desenvolvimento Cientifico e Tecnológico (CNPq); a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP); e a FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), além de suas correlatas em outros estados (ex.: FAPERJ, FACEPE, FAPESB, FAPERGS, FAPESC, FAPERN).

Muitas pesquisas recebem apoio de entidades internacionais, como o SCOR, UNESCO e GOOS. Algumas empresas, como a Petrobras e a Companhia DOCAS do Estado de São Paulo (CODESP), desenvolvem projetos de levantamento de dados e monitoramento, para atender exigências de licenciamento ambiental, por vezes conduzidos por universidades, sendo esses dados posteriormente utilizados em pesquisas científicas.

Existem ainda projetos que integram programas nacionais coordenados pela Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do MAR (SECIRM), que estão relacionados às águas de jurisdição nacional, a **Amazônia Azul**, como o LEPLAC, REMPLAC, REVIZEE, REVIMAR, PROARQUIPELAGO, PROTRINDADE e o próprio PROANTAR, entre outros.

Todos os projetos citados são apenas alguns exemplos, dentre tantos que já foram desenvolvidos ou que estão em andamento na área de Oceanografia no Brasil.

## 8. A Década do Oceano

A década de 2021 a 2030 foi proclamada pelas Nações Unidas como a **Década das Nações Unidas da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável**, ou **Década do Oceano**. Nesse sentido, serão destinados esforços, por meio da interface ciência–política, para fortalecer a gestão do oceano e das zonas costeiras, em benefício da humanidade, de modo que os países avancem na implementação da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. A criação da Década visa oportunizar o trabalho em conjunto das nações, para a produção de uma ciência oceânica multilateral. Além disso, já está claro que a gestão do oceano deve ser compartilhada, visto que muitas das ações e impactos locais, podem atingir ou gerar consequências em escala global. A coordenação das atividades para o delineamento da Década do Oceano está a cargo da Comissão Oceanográfica Intergovernamental (COI/UNESCO), para que todos possam obter "*o oceano que precisamos para o futuro que queremos*".

A Década do Oceano confere, definitivamente, o entendimento de que a Oceanografia é uma ciência conjunta, global, cooperativa, multidisciplinar e multifacetada e de importância fundamental para a promoção da sustentabilidade ambiental e para o equilíbrio do planeta.

## 9. Considerações finais

Este capítulo não encerra toda a história da Oceanografia. Ele teve como objetivo apresentar a construção e a evolução da ciência, destacando alguns de seus principais marcos e feitos. É uma longa história que se mistura à própria história da humanidade.

Espera-se que tenha ficado claro que a Oceanografia é uma ciência multidisciplinar, cujo avanço depende do desenvolvimento de tecnologias, de técnicas analíticas e observacionais, além da necessidade de cooperação entre diferentes atores, órgãos e nações, e da dedicação e do talento de especialistas das mais diversas áreas do conhecimento. A Oceanografia, assim como seu objeto de estudo, o oceano, é uma ciência sem fronteiras. É uma ciência única.

Foto: Francisco L. Vicentini (Acervo IOUSP)

# OCEANOGRAFIA GEOLÓGICA

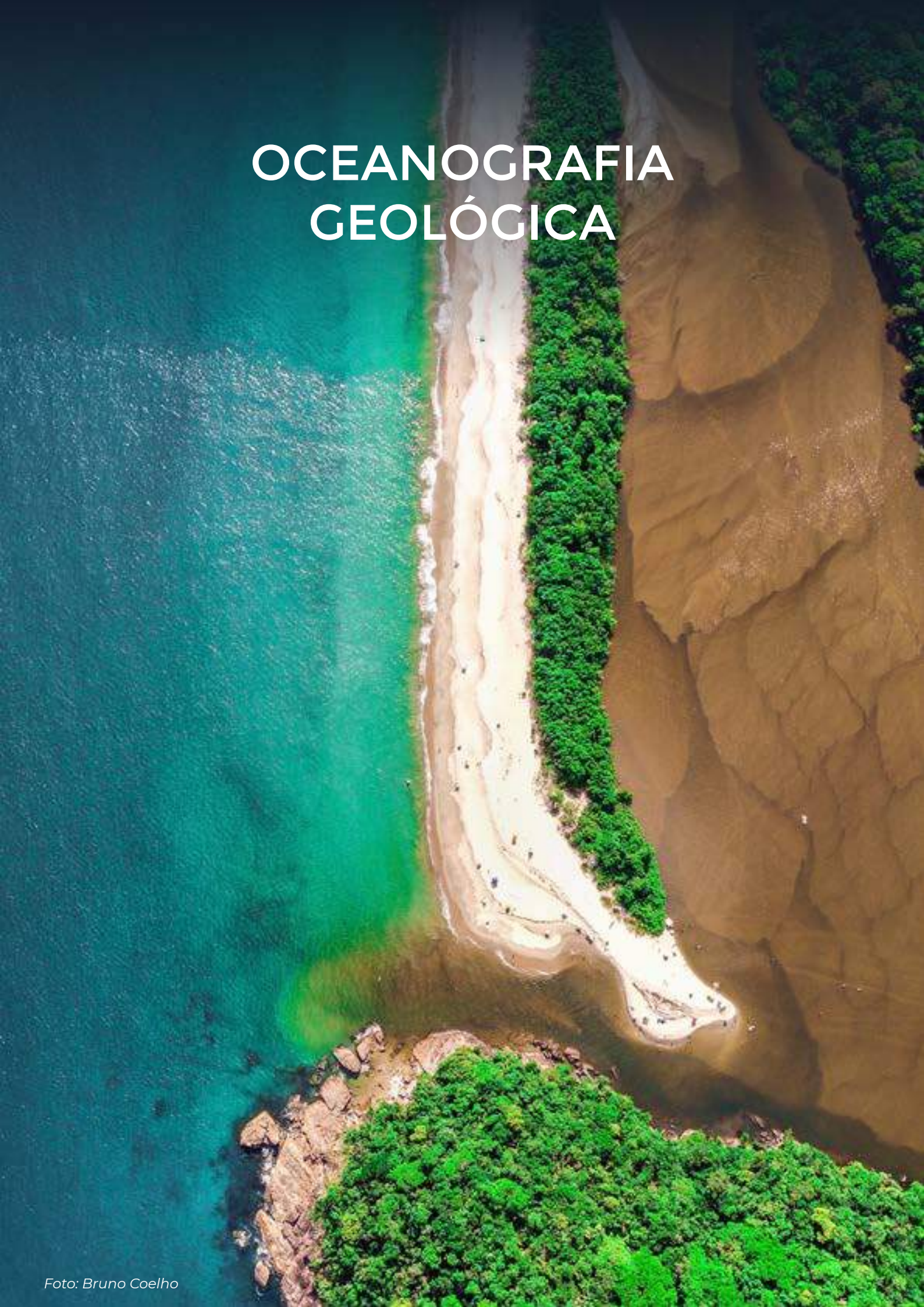


*Foto: Bruno Coelho*

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 2*

# INVESTIGANDO O PLANETA TERRA

*Luigi Jovane*

REVISÃO: JORGE J. P. FIGUEIREDO (UFRJ) E ANDRÉ NEGRÃO (IGC-USP)

CITAÇÃO SUGERIDA: JOVANE, Luigi. Investigando o planeta Terra. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 2: p. 55-67.

# Investigando o Planeta Terra

*Luigi Jovane*

## 1. Estrutura interna da Terra

A Terra pode ser simplificada como uma esfera ligeiramente achatada com seu interior amplamente heterogêneo. O nosso planeta é semelhante a uma cebola, onde as várias camadas possuem densidade, composição e propriedades distintas.

Nosso planeta pode ser dividido com base em suas propriedades químicas (composicionais) ou físicas (reológicas). No primeiro caso é dividido em **Crosta**, **Manto** e **Núcleo**. No segundo caso, em **Litosfera**, **Astenosfera**, **Mesosfera** e **Endosfera** (Fig. 1).

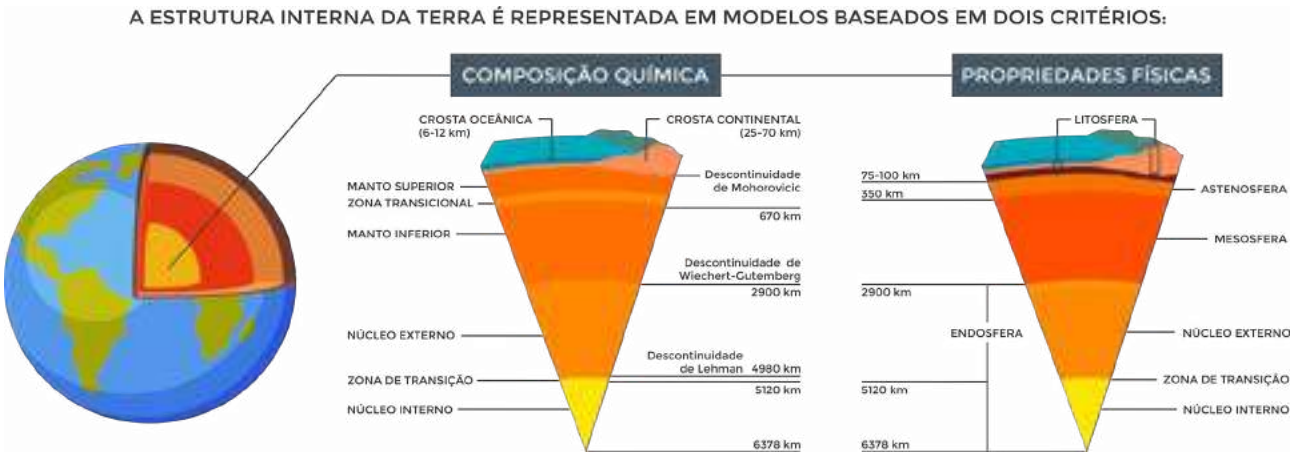



**FIGURA 1. A estrutura interna da Terra com as principais subdivisões.** *Ilustração: Leandro Coelho.*

As informações sobre a composição e as propriedades do planeta podem ser obtidas a partir de profundos furos de sondagem, os chamados **métodos diretos**. Apesar de fundamentais, tais amostragens são extremamente limitadas, uma vez que o nosso planeta possui mais de 6.000 km de raio. Assim, para investigar e determinar essas características, utilizamos também **métodos indiretos**, como as ondas sísmicas dos terremotos, que são medidas na superfície (Fig. 2).

Os estudos geofísicos, auxiliados pela **sismologia**, têm procurado esclarecer várias questões relacionadas ao interior do Terra. Um dos resultados mais importantes dos estudos sismológicos foi fornecer os modelos de velocidade das ondas sísmicas (primárias, chamadas **ondas *P***, e secundárias, chamadas **ondas *S***). Através do estudo da propagação das ondas de terremotos (sismos) é possível inferir sobre os tipos de materiais que essas ondas atravessam ao se propagarem pelas diferentes camadas do planeta.

As variações e os desvios das ondas oferecem elementos para conhecer a estrutura interna da Terra, ou seja, suas camadas, suas propriedades e seus limites. O estudo do vulcanismo, da densidade dos minerais e do grau geotérmico também são fundamentais para auxiliar os geofísicos em sua busca de conhecimento sobre essas regiões.

**FIGURA 2.** Esquema de investigação do interior da Terra.

## VOCÊ SABIA?

**O furo de sondagem das camadas geológicas mais profundo já realizado até hoje foi perfurado na Rússia e é chamado de Furo SG-3.**

A perfuração foi iniciada em 1970 e foi realizada no Norte da Rússia (na Península de Kola), com o objetivo de chegar até a base da crosta terrestre (cerca de 15 km). A perfuração foi encerrada em 1989, após atingir a profundidade de 12.262 m. Apesar de ser o furo mais profundo da Terra, ele só atingiu os primeiros quilômetros da crosta, o que representa um valor ainda insignificante quando comparado aos aproximadamente 6.371 km até o centro da Terra.

Abaixo, registros do SG-3: A) durante a perfuração; B) uma das brocas utilizadas para perfuração; e C) o furo, atualmente lacrado. *Imagens: ZME Science*.

## 1.1 A crosta terrestre

A camada mais fina e externa da Terra é a crosta. A crosta é tão fina que pode ser comparada à casca de uma maçã em relação à maçã inteira. É a camada mais acessível e melhor conhecida de forma direta, uma vez que é aqui que ocorre a vida. Apesar de observarmos que é formada por rochas e materiais fundamentalmente sólidos e muito resistentes, a crosta é uma camada muito frágil.

Sua espessura é variável, sendo maior onde há grandes montanhas e menor nos oceanos. É dividida em **crosta continental** e **crosta oceânica**, com composições diversas e espessuras diferentes. As espessuras externas variam de poucos quilômetros próximo às dorsais, onde teoricamente chega a 0, a até 70 quilômetros, abaixo das montanhas e cordilheiras.

A crosta continental é formada essencialmente por silicatos aluminosos e tem uma composição global semelhante à do granito (ou granodioríticas, que são rochas ricas em quartzo e silicatos de sódio e cálcio), medindo de 25 a 70 km de espessura. A crosta oceânica é composta essencialmente de basalto, formada por silicatos de ferro e magnésio, possui de 5 a 10 km (média de 7 km) de espessura e é mais densa que a crosta continental por conter mais ferro.

A crosta terrestre apresenta uma estrutura sísmica variável, com velocidade média das ondas ondas ***P*** de 6,5 km/s e das ondas ***S*** de 3,8 km/s, podendo-se assumir uma espessura média de cerca de 40 km. A crosta oceânica é mais fina, com uma velocidade média da onda ***P*** de mais de 6,0 km/s.

As placas tectônicas são fragmentos rígidos da Litosfera (Fig. 3) que flutuam sobre uma camada plástica, chamada Astenosfera, movimentando-se em direções e velocidades diferentes (até alguns centímetros por ano). Isso faz com que em algumas regiões da Terra as placas se afastem umas das outras (limites divergentes) ou se choquem (limites convergentes). Neste ultimo caso, uma placa pode ir abaixo da outra, acontecendo um processo chamado subdução.

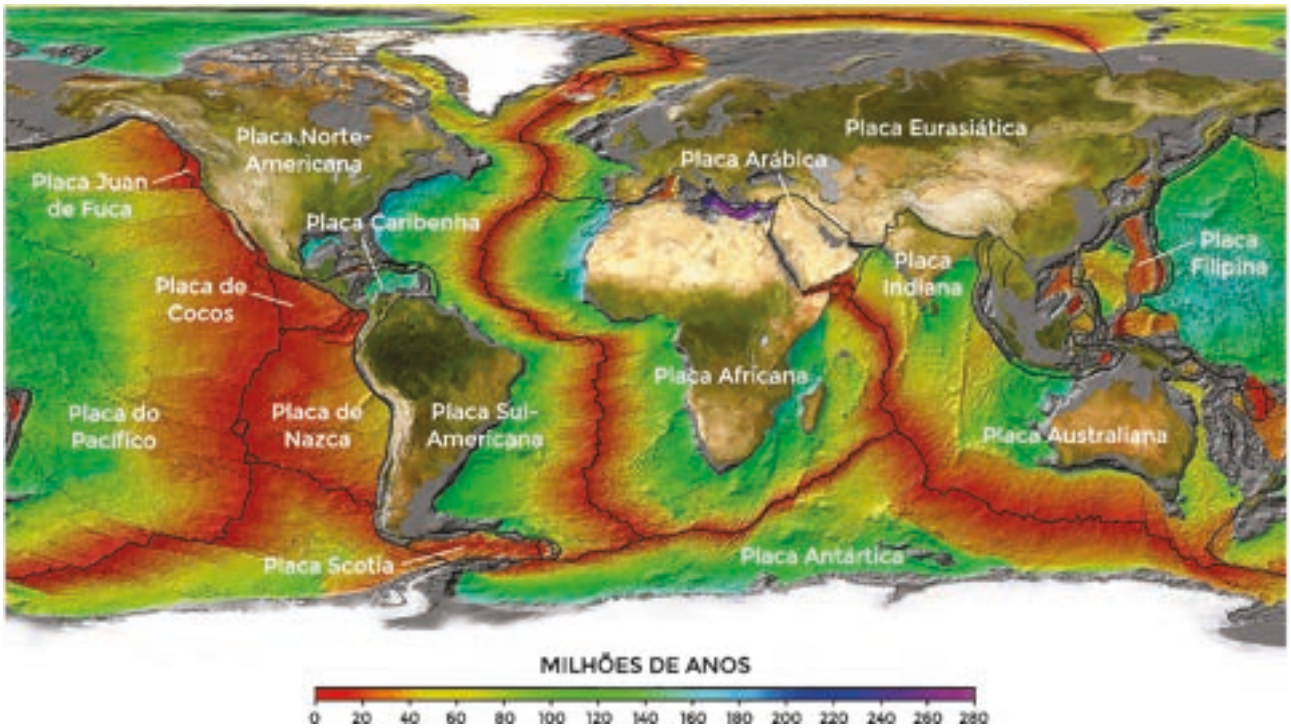



**FIGURA 3.** **Limites das placas tectônicas e a idade da litosfera oceânica (em milhões de anos).** *Adaptado de National Geophysical Data Center - NOAA.*

## 1.2 O manto

O manto está abaixo da crosta e representa cerca de 83% do volume do planeta e 67% de sua massa, possuindo uma espessura total de cerca 2.900 quilômetros. O manto, que é a camada mais espessa da Terra, divide-se em **manto superior** e **manto inferior**. O manto superior (entre 35-100 km) tem uma velocidade de ondas sísmicas de 8,0 km/s e temperatura relativamente baixa (100°C). Mais abaixo, no manto inferior, a velocidade das ondas sísmicas chega a até 13,5 km/s e a temperatura varia de 2.200°C, em sua porção mais externa, a 3.500°C, próximo ao núcleo. Essa discrepância na velocidade das ondas sísmicas deriva da uma mudança na composição química e física das rochas.

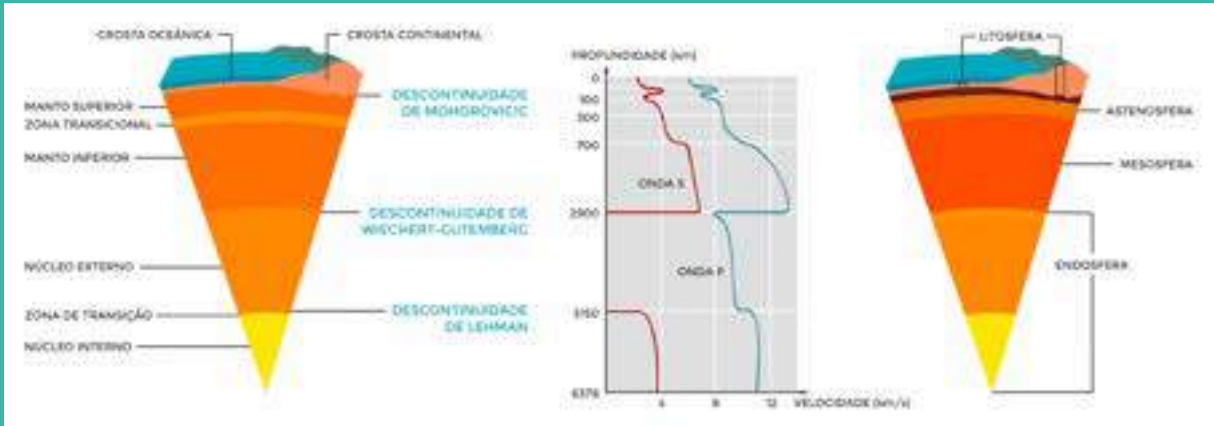
O manto é composto de minerais ricos em ferro e magnésio, como os piroxênios, olivinas, peridotitos, dunitos e eclogitos, caracterizados por possuir menos silício e alumínio, se comparados com os minerais da crosta. O manto é formado pela **litosfera** (parte rochosa e rígida que também faz parte da crosta) e a **astenosfera**, que tem baixa velocidade e é bem mais quente (acima de 1330°C). É na astenosfera que ocorre o movimento das placas tectônicas que são, portanto, segmentos do manto e não apenas da crosta. Na astenosfera há um aumento na velocidade das ondas sísmicas até a profundidade de cerca de 400 km. Em 400 km e 700 km, há dois aumentos acentuados na velocidade das ondas sísmicas, correspondentes à zona de transição, abaixo da qual, até cerca de 2.900 km, está localizado o manto inferior. Nessa camada, a velocidade das ondas sísmicas continua a aumentar gradualmente em direção ao centro da Terra. De maneira geral, no manto, a velocidade das ondas ***P*** varia entre 8 e 14 km/s e a das ondas ***S*** varia entre 5 e 7 km/s.

### VOCÊ SABIA?

**Na base da crosta existe uma descontinuidade chamada Descontinuidade de Mohorovicic (ou simplesmente Moho).**

Em 1909 o geofísico croata Andrija Mohorovicic (1857 - 1936) verificou que, em determinada camada, havia uma mudança abrupta na velocidade de propagação de ondas sísmicas. Essa descontinuidade foi explicada por uma diferença na composição dos materiais entre a base da crosta e o começo do manto superior. Por conta da descoberta, essa superfície recebeu o nome de "superfície de Mohorovicic", ou "Moho". A profundidade da Moho varia, com médias de 30 a 50 quilômetros de profundidade. No entanto, pode ser verificada a menos de 10 km, abaixo dos oceanos, ou atingir a profundidade de 70 km, abaixo de cordilheiras.

A Moho é, portanto, considerada uma descontinuidade primária, em correspondência com a qual há um aumento acentuado da velocidade das ondas sísmicas, em particular das ondas ***P***, que passam de 6,5-6,8 para 7,8-8,4 km/s. *Ilustração: Leandro Coelho.*



Se o contato crosta/manto é bem definido, ao contrário, o mesmo não acontece com o limite entre litosfera e astenosfera, que é um limite que depende muito do que está logo acima na crosta. A densidade varia de 3,2 (próximo da litosfera) a 3,7 (400 km). Abaixo desse limite ocorre um processo de equilíbrio gravitacional das placas, em função de sua densidade e o peso da massa acima delas. Esse processo, definido como equilíbrio isostático, faz com que os blocos da crosta que recebem mais material na superfície afundem, e os que são erodidos levantem.

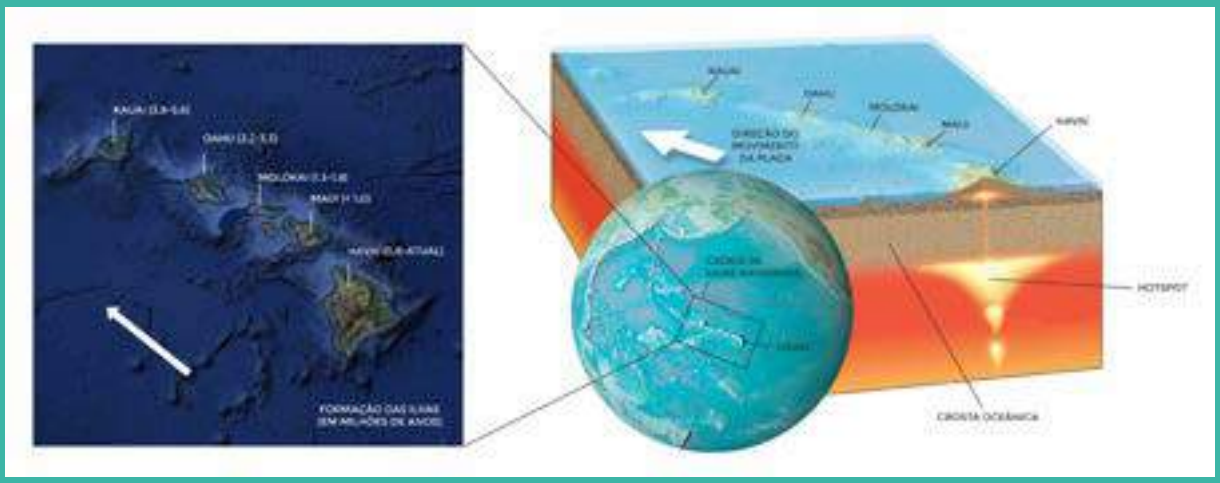
No manto existem alguns pontos fixos que têm uma temperatura constantemente mais alta que a região ao seu redor e são chamados de *hot spots* (pontos quentes). Nesses pontos, o material quente sobe e funde a crosta que está acima, criando estruturas vulcânicas complexas.

## VOCÊ SABIA?

**Sendo a crosta formada por placas em movimento, um vulcão é gerado quando uma placa passa por um ponto quente (*hot spot*). Com o passar do tempo o mesmo se apaga quando a placa desliza por cima desse ponto e, ao se deslocar, gera um novo vulcão.**

Esse processo pode acontecer por milhões de anos, enquanto o ponto quente estiver ativo, gera-se uma fileira de vulcões progressivamente mais antigos, com somente o mais jovem ainda ativo.

Um exemplo é o Arquipélago do Havaí, onde podemos observar um alinhamento de vulcões de direção NW-SE, pois a placa tectônica do Pacífico se desloca para Noroeste. Entre todas as ilhas, claramente vulcânicas, somente aquela mais ao Sudeste está em atividade, gerando no fundo do mar um novo vulcão. *Imagem adaptada de Tasa Graphic Arts*.



### 1.3 O núcleo

A **Descontinuidade de Wiechert-Gutenberg** (ver *box* da pagina anterior), que fica a 2.700-2.890 km de profundidade, divide o manto e o núcleo, assim como a **Descontinuidade de Mohorovicic** separa o manto e a crosta. A Descontinuidade de Wiechert-Gutenberg mostra que no núcleo a velocidade das ondas ***P*** diminui drasticamente, de cerca de 13,5 km/s para cerca de 8,0 km/s. As ondas ***S***, que tinham velocidade em torno de 7,5 km/s na base do manto, desaparecem completamente, como consequência do comportamento típico do material no estado líquido.

O núcleo terrestre é constituído principalmente por ferro (80%) e níquel, sendo dividido em uma parte externa líquida, e outra interna sólida e densa. Dentro do **núcleo externo**, que tem a espessura de cerca de 2.200 quilômetros, a velocidade das ondas P aumenta gradativamente até chegar a uma nova e forte descontinuidade, chamada **Descontinuidade de Lehman**, que separa o núcleo externo do interno. Nessa profundidade, a velocidade das ondas ***P*** aumenta, estabilizando-se em 11 km/s e as ondas ***S*** reaparecem (portanto, em um ambiente "sólido") para valores de cerca de 3,8 km/s. Essa é a mais profunda e menos conhecida das camadas que compõem o globo terrestre. O **núcleo interno** tem uma espessura de 1.250 km e é caracterizado por estar sob forte pressão. Isso faz com que o material (Fe-Ni), apesar de possuir a mesma composição que o núcleo externo, seja sólido. A temperatura pode chegar a até 5.000°C (um pouco inferior à temperatura da superfície do Sol).

Devido ao núcleo da Terra girar juntamente com o restante do planeta, é gerada uma corrente elétrica que provoca um campo magnético. Assim a Terra pode ser descrita como um único e enorme imã chamado **Campo Magnético Terrestre**, com polaridade oposta nos dois polos de rotação. O núcleo interno tem uma velocidade de rotação um pouco mais rápida que o restante do planeta e essa variação de velocidade de rotação é compensada pelo núcleo exterior, que é líquido.

## 2. Terremotos

O principal mecanismo de geração de ondas sísmicas na Terra encontra-se na liberação de energia mecânica por ocasião de terremotos, podendo haver ainda, pequenas ondas sísmicas (microssismos) devido à interferência do oceano ou das ondas do mar. Geralmente, um terremoto ocorre como resultado da fratura de uma parte da crosta da terra incapaz de suportar os esforços tectônicos acumulados em uma determinada área.

Existem ainda terremotos com fontes mais profundas do que a crosta, à exemplo das zonas de subducção. Simultaneamente com a fratura, ocorre a liberação do esforço aplicado e frequentemente, como o primeiro resultado visível, um deslocamento ao longo de uma superfície que é chamada de plano de falha (pode haver casos em que a falha não é visível na superfície, mas ainda está presente em profundidade).

Os terremotos ocorrem por diversas causas, que incluem diferentes eventos naturais como falhas ou explosões vulcânicas, por exemplo. Finalmente, também existem fontes sísmicas atribuídas a causas artificiais, incluindo explosões de vários tipos.

Supondo que a origem de um terremoto seja um ponto específico em subsuperfície, este ponto é chamado de hipocentro (ou foco), ou seja, o ponto no interior da Terra a partir do qual a energia sísmica é liberada. Epicentro é a projeção do hipocentro na superfície (também aqui idealmente identificado por um ponto).

Durante a propagação da fratura, ondas sísmicas são emitidas. Quanto acontece um evento sísmico a uma pequena distância do hipocentro, a extensão do fenômeno e a intensidade dos esforços podem ser capazes de ultrapassar o limite do comportamento plástico e podem ocorrer deformações permanentes, como fraturas e falhas (Fig. 4).

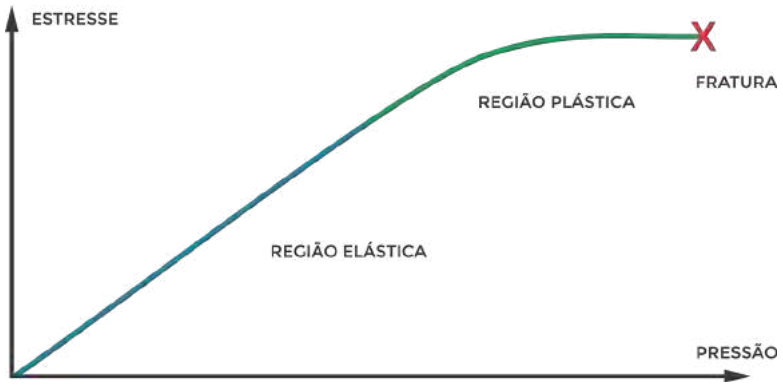



**FIGURA 4.** Modelo de deformação relacionando pressão e estresse. A deformação de cada material pode ser: elástica (o material volta às condições iniciais após a pressão); plástica (o material volta parcialmente as condições iniciais após pressão); e fratura (o material é afetado permanentemente e não volta às condições iniciais).

Acima de uma certa distância, quando a intensidade do fenômeno diminui, é possível classificar as ondas sísmicas como ondas elásticas. Se excluirmos, portanto, a vizinhança imediata do hipocentro, podemos assumir que a perturbação espacial que se propaga no meio da Terra após um terremoto é uma onda elástica. Isso significa que as partículas do meio interagem elasticamente e que a energia sísmica é transmitida por meio de um complexo de movimentos de onda (Fig.5). Para terremotos muito fortes, a energia de excitação é tal que permite que as ondas sísmicas percorram grande parte do interior da Terra ou mesmo fazer com que todo o nosso planeta oscile.

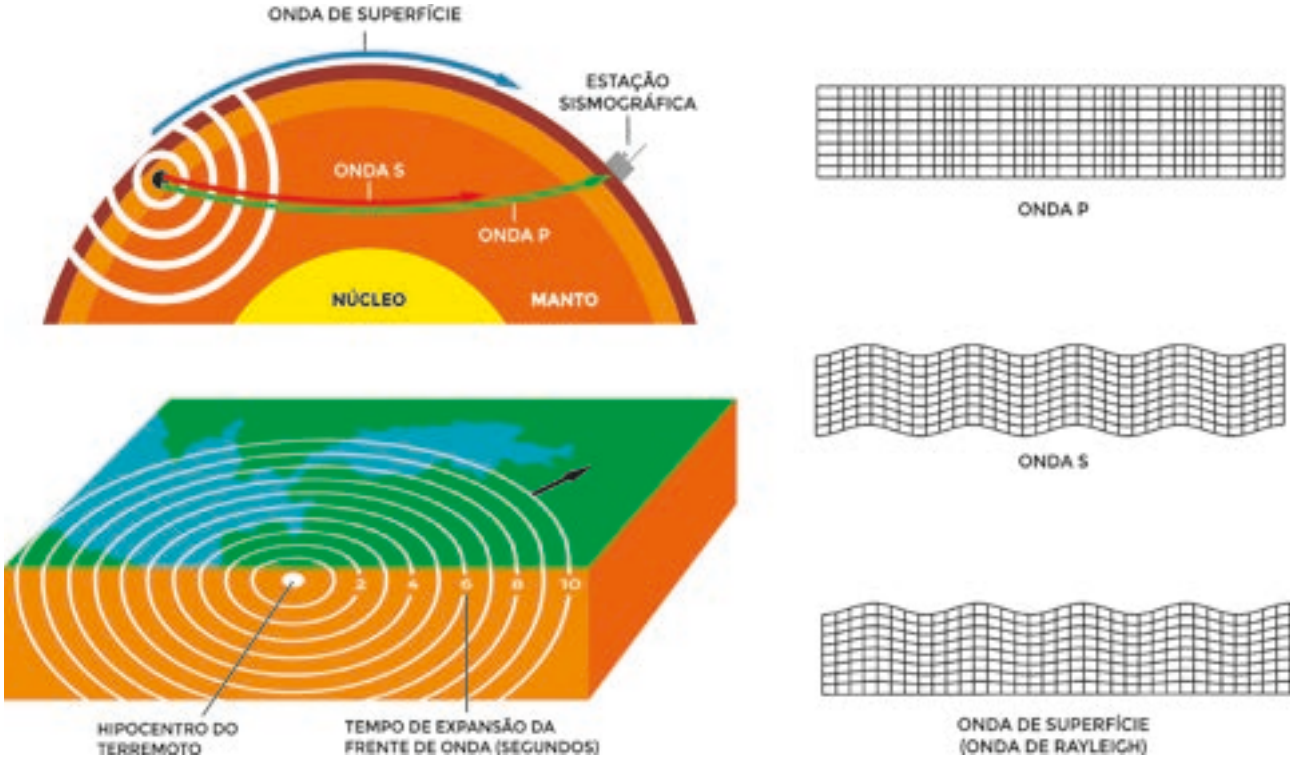



**FIGURA 5.** Esquemas simplificados de propagação de ondas de terremoto. *Ilustração: Leandro Coelho, adaptado de VHMSSCIENCE.*

## 3. Ondas de volume

Dentro de um meio homogêneo, dois tipos de ondas elásticas são propagadas, também conhecidas como ondas de volume: longitudinais e transversais. No primeiro (longitudinal, primárias ou ***P***), as partículas do meio oscilam longitudinalmente na direção da propagação da onda de forma semelhante às ondas acústicas que causam compressões e dilatações alternadas do meio (Fig. 6).

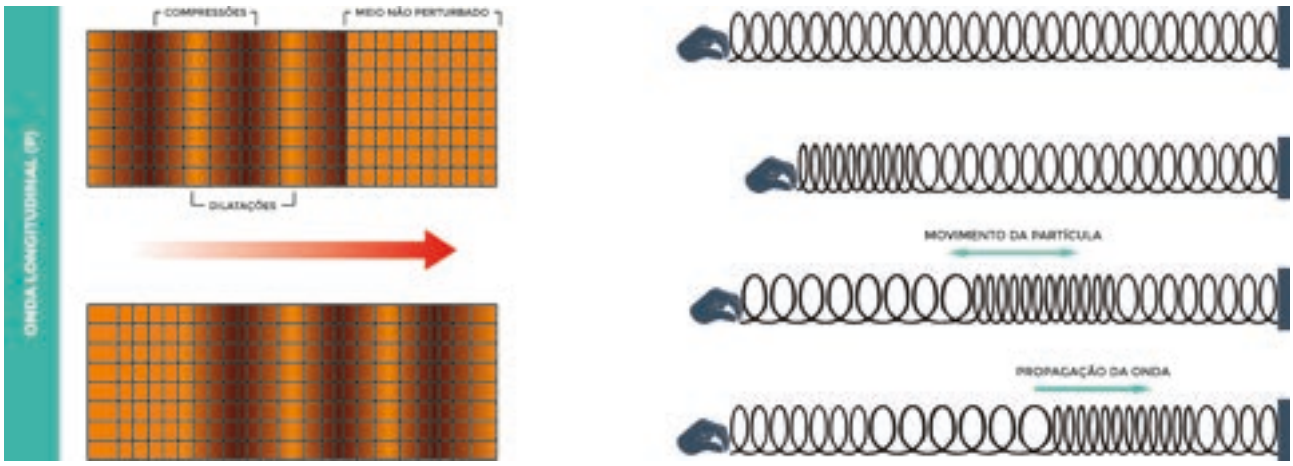



**FIGURA 6. Ondas de volume longitudinais (*P*).** *Ilustração: Leandro Coelho.*

No segundo (transversal, secundárias ou ***S***), as partículas do meio oscilam em uma direção ortogonal à direção de propagação de ondas (Fig.7). As ondas ***S*** são, portanto, semelhantes às obtidas em agitação de uma corda presa em uma de suas pontas; se observarmos o movimento das partículas em um plano, por exemplo vertical (vamos assumir por enquanto apenas uma direção de oscilação) notaremos que os elementos do acorde sofrerão distorção à medida que mudam rapidamente de forma, de um retângulo para um paralelogramo e vice-versa.

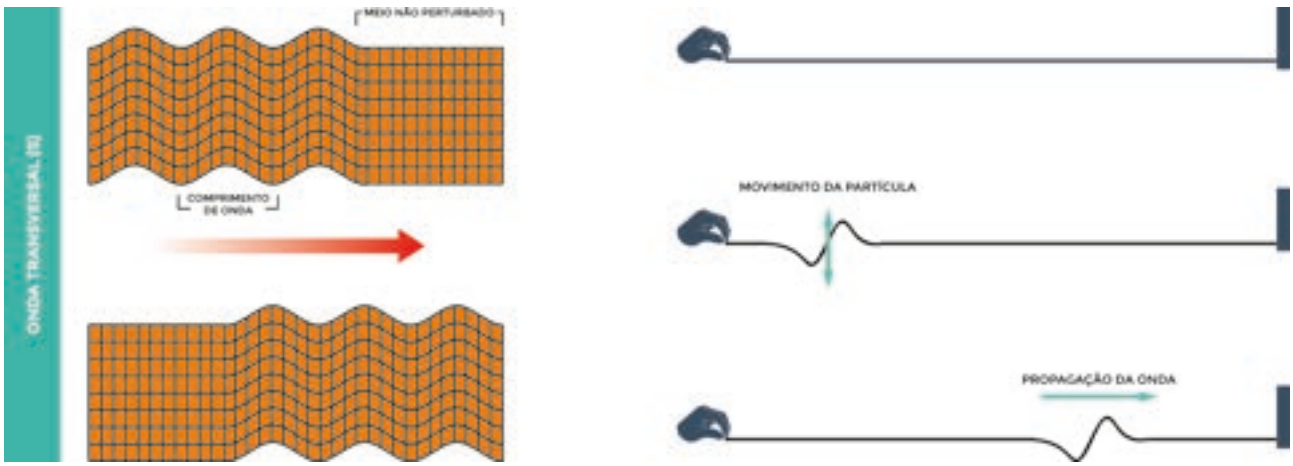



**FIGURA 7. Ondas de volume transversais (*S*).** *Ilustração: Leandro Coelho.*

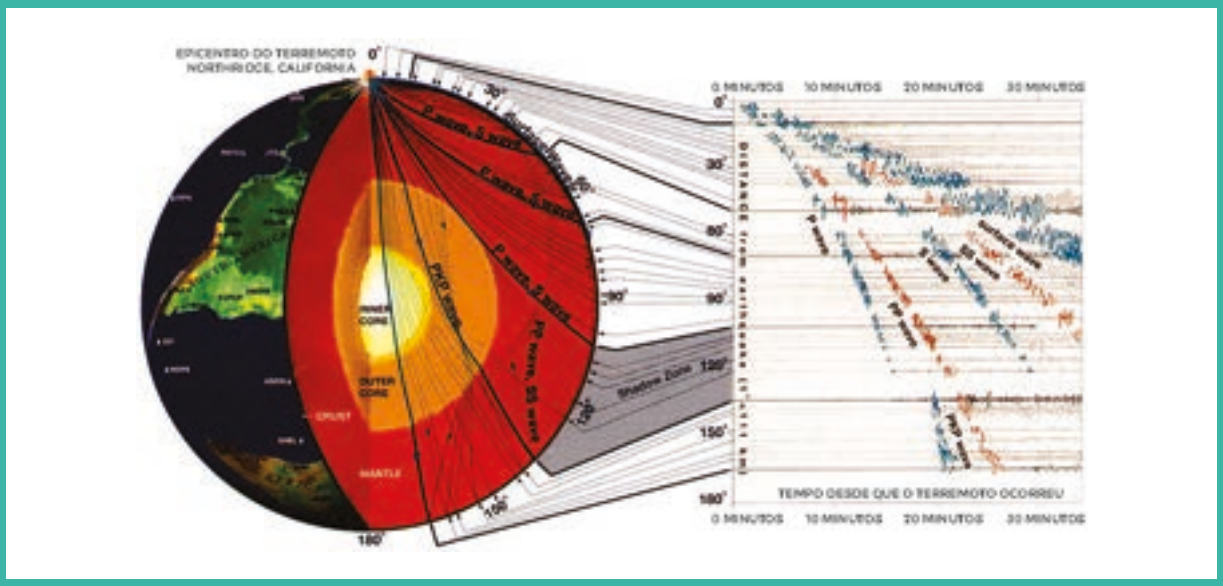
As camadas adjacentes são, então, submetidas a deformações transversais, mas sem alterações de volume nos elementos da corda. Portanto, a expansão neste caso é zero, e a única propriedade elástica que determina a velocidade de ondas ***S*** é, de fato, apenas a rigidez ou módulo de cisalhamento ***m***. Conclui-se que em meios fluidos se propagam apenas ondas longitudinais, ou ondas ***P***. Ambas as ondas ***P*** e ***S*** têm uma velocidade que não depende da frequência da onda, ou seja, elas não são dispersivas.

## VOCÊ SABIA?

**As principais ondas que se propagam dentro da crosta terrestre podem ser imaginadas como raios sísmicos.**

Em analogia ao estudo da óptica e sua terminologia, temos:

- ***Pg*** e ***Sg***: ondas diretas que fizeram seu caminho na primeira camada que constitui a crosta terrestre, tradicionalmente conhecida como camada de granito. Eles se registram como primeiras chegadas de ondas sísmicas até uma distância máxima de algumas dezenas de km do hipocentro.
- ***RiPg*** e ***RiSg***: ondas refletidas pela superfície que separa a camada granítica da basáltica (Conrad).
- ***P**** ou ***Pb*** e ***S**** ou ***Sb***: indicam ondas com trajetória mista em granito e basalto.
- ***PmP*** e ***SmP***: ondas refletidas na Moho.
- ***Pn*** e ***Sn***: ondas que cruzaram toda a crosta e são refratadas criticamente na interface crosta-manto, se propagaram com a velocidade do manto superior abaixo da Moho.




As ondas associadas a terremotos com epicentros a uma grande distância da estação receptora: essas ondas que fizeram apenas uma pequena parte de seu caminho na crosta e, em vez cruzaram o manto e em alguns casos até o núcleo, podem ter sofrido reflexos na descontinuidade do núcleo e do manto e, devido à convexidade do trajeto dos raios sísmicos, também sofreram reflexos na superfície da Terra. Nestes casos, ocorrerá o seguinte código:

- ***pP***: ondas que sofreram reflexão na superfície perto do hipocentro.
- ***PP***: ondas que sofreram reflexos na superfície terrestre 1 vez (PPP 2 vezes).
- ***PcP***: ondas que sofreram reflexão na superfície de separação núcleo-manto.
- ***PKP***: ondas que passaram pelo manto e refrataram no núcleo.
- ***PKiKP***: Ondas que passaram pelo manto e o núcleo externo e foram refletidas pelo núcleo interno sólido.
- ***PKIKP***: ondas que passaram pelo manto e sofreram refrações tanto no núcleo externo do que interno.

Além de uma certa distância angular crítica do hipocentro do terremoto ($\Delta$~110°, cerca de 12.000 km), a onda ***P*** não é mais registrada, devido à interposição do núcleo da terra que gera uma "sombra" (a área cinza). Assim, a primeira onda registrada é a ***PKP***.

## 4. Os sismogramas

O sismômetro é uma ferramenta fundamental para o estudo das ondas sísmicas. Neles são produzidos os sismogramas (tradicionalmente reproduzidos em papel) (Fig. 8), nos quais são exibidos os registros das ondas sísmicas durante os terremotos (na prática, atualmente, os sismogramas são produzidos a partir de dados armazenados em formato digital). Os sismogramas ainda são o meio mais imediato de reconhecer as características das ondas sísmicas de um terremoto, como o momento em que foi gerado e o caminho que a onda sísmica realizou até atingir a estação que a registrou.

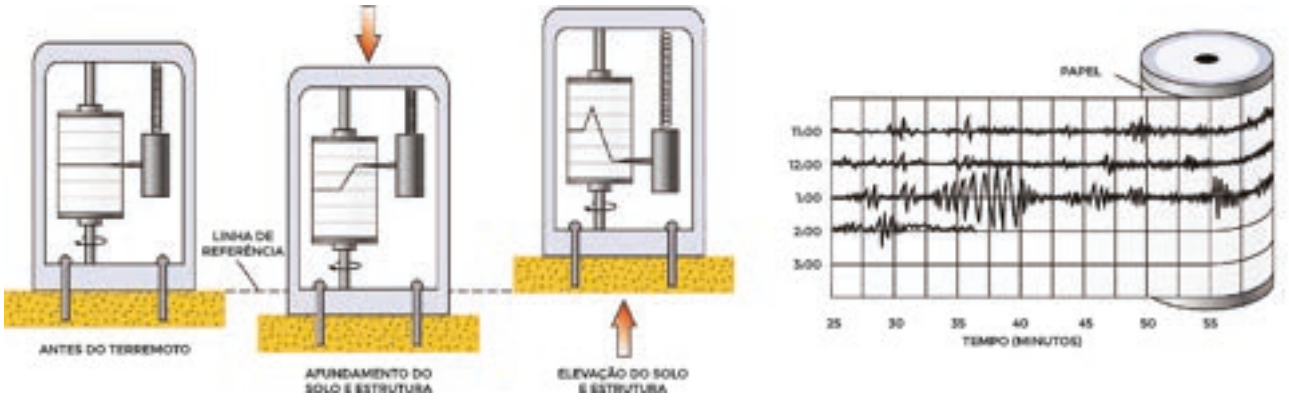



**FIGURA 8.** Modelo esquemático de sismômetro e sismograma.

## 5. Ondas acústicas

As ondas sísmicas, sendo onda acústicas (ondas onde a energia se propaga dentro de um meio por compressão e descompressão), podem também se propagar facilmente na água do mar (velocidade média de 1.500 m/s), nas camadas de rochas e sedimentos no fundo. Por isso, os elementos descritivos das ondas acústicas no mar podem ser simplificados.

### 5.1 Elementos descritivos

**Amplitude (*A*):** distância entre a posição de repouso de um elemento de matéria e sua posição com deslocamento máximo.

**Velocidade da onda (*v*):** a velocidade de propagação do pulso e não a do deslocamento das partículas.

**Fase (*F*):** é um termo que se refere a uma determinada posição em um ciclo, por exemplo, o pico de uma onda em forma de seno, que ocorre repetidas vezes em um determinado ponto e pode ser tomado como referência para a observação da propagação da onda.

**Comprimento de onda (*λ*):** a distância entre dois pontos de mesma fase em ciclos adjacentes.

**Frequência (*f*):** número de ciclos que ocorrem por unidade de tempo em uma determinada posição, medida em Hertz (Hz).

**Período (*P*):** tempo necessário para completar-se um ciclo. É o inverso da frequência ($1/f$).

**Frequência angular:** expressão da frequência em termos da trajetória que seria percorrida sobre uma circunferência após cada unidade de tempo, com a circunferência representando um ciclo completo:

$$\textit{Frequência angular} = 2 \cdot \pi \cdot \textit{frequência}$$

Importantes relações entre esses elementos podem ser facilmente deduzidas, sendo uma das mais úteis a relação entre comprimento de onda ($\lambda$), velocidade ($v$) de propagação e frequência ($f$):

$$\lambda = v/f$$

Temos também que o índice de refração ($n$) é dado por $n = V/v$, onde $V$ é a velocidade no vácuo e $v$ é a velocidade da propagação da onda no meio estudado.

Oscilações com padrão senoidal, comumente utilizadas em exemplo didáticos, podem ser descritas pela seguinte equação:

$$y = A \cdot sen\,(k \cdot x - \sigma \cdot t)$$

Onde $y$ é a posição de uma determina partícula em relação à posição de repouso; $A$ é a amplitude, que pode ser expressa como $y_m$ ($y$ máximo); $k$ é o número de onda ($k = 2 \cdot \pi / \lambda$); $x$ é a distância da origem da onda, medida no raio de propagação; $\sigma$ é a frequência angular; e $t$ é o período.

## 5.2 Lei de Snell

Dado um meio heterogêneo no qual há uma descontinuidade plana separando dois meios com características físicas diferentes (Fig. 9), em analogia à óptica geométrica, uma onda incidente na descontinuidade pode ser representada com um raio sísmico para o qual são definidos os seguintes ângulos: $i$ = incidência; $R$ = Reflexão; e $r$ = refração.

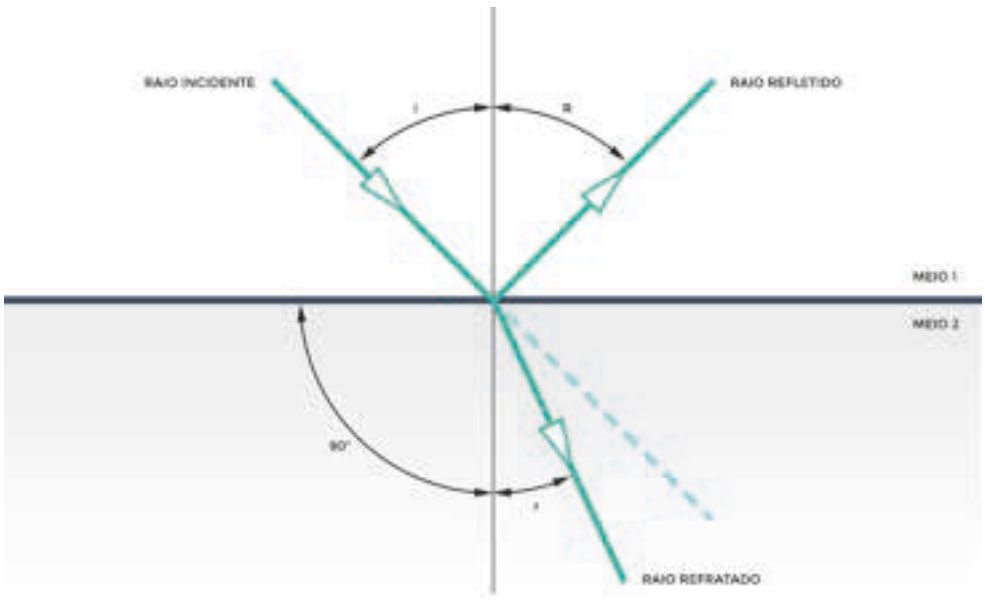



**FIGURA 9.** Representação gráfica do raio incidente e raio refletido através do meio 1 e do raio refratado através do meio 2. *Ilustração: Leandro Coelho.*

Com referência à figura, o plano da água é o plano de incidência. A Lei de Snell permite determinar os ângulos de reflexão e refração conforme duas mídias passam com velocidade $v_1$ e $v_2$.

$$\frac{sen\theta_1}{sen\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

No caso da reflexão:

$$\frac{sen\theta_i}{v_1} = \frac{sen\theta_R}{v_1} \rightarrow sen\theta_i = sen\theta_R$$

No caso da refração:

$$\frac{sen\theta_i}{v_1} = \frac{sen\theta_r}{v_2}$$

Considerando o índice de refração ($n$), temos que:

$$n = \frac{V}{v} \rightarrow v = \frac{V}{n}$$

Retornando à Lei de Snell, temos:

$$\frac{sen\theta_1}{sen\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \rightarrow \frac{sen\theta_1}{sen\theta_2} = \frac{V/n_1}{V/n_2} \rightarrow \frac{sen\theta_1}{sen\theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\therefore n_1 . sen\theta_1 = n_2 . sen\theta_2$$

Portanto:

$$n_1 . sen\theta_i = n_2 . sen\theta_r$$

As condições de contorno impostas na equação de onda mostram que na interface entre dois meios podemos ter conversão entre ondas $P$ e $S$.

## 5.3 Princípio de Huygens - frente de onda e raio

Ondas de corpo possuem propagação aproximadamente esférica. Pode-se visualizar a propagação de uma onda acompanhando-se o deslocamento de uma determinada fase. A superfície que une todos os pontos de mesma fase é denominada frente de onda.

Como não há adição de energia ao sistema, o aumento de área da esfera durante a propagação é compensado pela perda de amplitude, de forma a manter constante a energia total. A amplitude decai, em função desse efeito, proporcionalmente ao quadrado da distância percorrida.

Pode-se determinar a forma que uma frente de onda, caracterizada como uma superfície irregular, irá possuir após um intervalo de tempo $t$ admitindo-se que a nova frente será a superfície envoltória de todas as frentes de ondas que existiriam se cada ponto na frente anterior fosse uma pequena fonte. Este é o chamado Princípio de Huygens.

A representação gráfica do Princípio de Huygens (Fig.10) define que a segunda posição da frente de onda pode ser determinada considerando-se cada ponto da frente anterior como uma nova fonte. Em outras palavras, ao passar do tempo a frente de onda formada por um número infinitésimo de pontos produz um número infinitésimo de novas ondas geradas por cada um de pontos, estabelecendo uma nova frente de onda no instante seguinte que mantém a mesma geometria.

Muitas vezes é pouco conveniente representar uma onda pela frente de onda, que muda de posição constantemente. Mais frequentemente é utilizada a representação do raio da onda, definido como a menor trajetória entre dois pontos, como no caso de uma fonte e um receptor.

Quando uma onda de corpo atinge um limite entre dois meios com velocidades diferentes, ocorrem dois fenômenos principais:

- Parte da onda incidente é refletida de volta para o meio 1. O ângulo de reflexão é igual ao de incidência, ou seja, o ângulo entre o raio da onda incidente e uma normal ao plano de reflexão é igual ao ângulo entre o raio da onda refletida e essa normal;

- Parte é transmitida pelo meio 2. Para que se mantenha a coerência da frente de onda com o Princípio de Huygens, o raio muda de direção de acordo com a mudança de velocidade.

Essa mudança de direção segue a Lei de Snell, que relaciona o ângulo de incidência ($i_1$), o ângulo de refração ($i_2$), ambos medidos em relação a uma normal ao plano, e as velocidades dos meios 1 e 2 ($v_1$ e $v_2$).

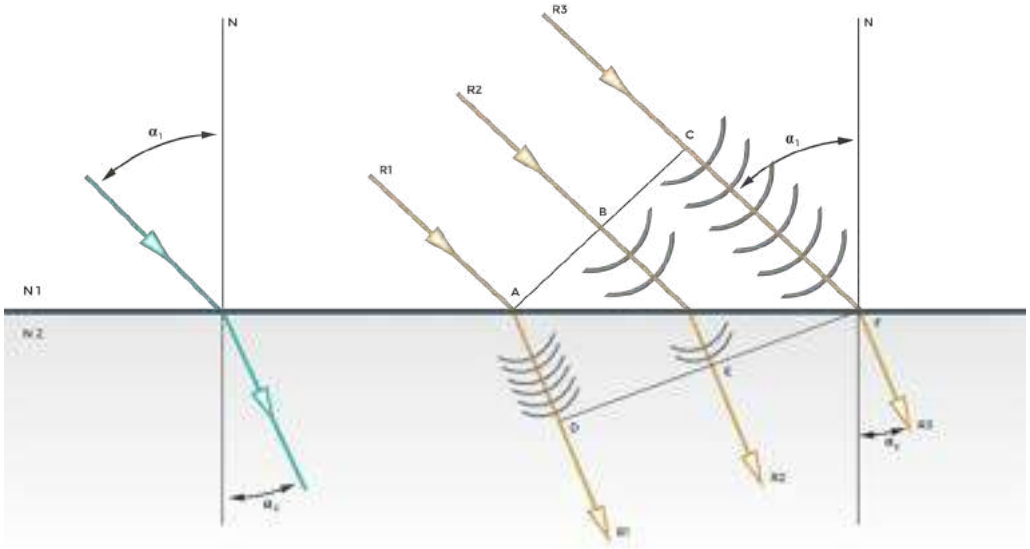



**FIGURA 10. Representação gráfica do Princípio de Huygens.** *Ilustração: Leandro Coelho.*

A Lei de Snell não era publicada até Huygens a mencionar em seu tratado sobre a luz. Assim $n_1$ e $n_2$ representam os coeficientes de refração dos dois meios, e $\alpha_1$ e $\alpha_2$ são os ângulos de incidência e refração do raio $R$ com a normal (perpendicular) $N$.

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 3*

# O RELEVO OCEÂNICO

*Gabriel Tagliaro & Luigi Jovane*

REVISÃO: CLEVERSON GUIZAN SILVA (UFF) E FARID CHEMALE JUNIOR (UNISINOS)

CITAÇÃO SUGERIDA: TAGLIARO, Gabriel; JOVANE, Luigi. O relevo oceânico. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 3: p. 71-84.

# O Relevo Oceânico

*Gabriel Tagliaro & Luigi Jovane*

## 1. Deriva continental e formação dos oceanos

Em 1912, o geofísico e metereologista alemão Alfred Wegener observou que as linhas de costa dos continentes pareciam se encaixar, como peças de um quebra-cabeça desmontado. A partir desta observação, ele então sugeriu que os continentes estiveram conectados no passado geológico, formando um grande continente de nome *Pangaea* (do grego *Pan* - toda e *Gaea* - Terra) e um grande oceano de nome *Panthalassa* (*Thalassa* – mar). Assim, Wegener elaborou uma das ideias mais revolucionárias da história, a **Teoria da Deriva Continental**. De acordo com essa teoria, a quebra e gradual separação do continente *Pangaea* deu origem aos atuais continentes e aos oceanos que os separam. A hipótese de Wegener foi amplamente rejeitada pela comunidade científica em sua época, entre os anos 1920-1940. Foi apenas ao longo das décadas de 1950 e 1960, em um contexto de muito investimento científico durante a Guerra Fria, que grandes avanços científicos em Oceanografia, Geologia e Geofísica corroboraram e ampliaram os conceitos pioneiros da deriva continental de Wegener, estabelecendo um conjunto de ideias que hoje se conhece como a Teoria das Placas Tectônicas.

Até os anos de 1950, pouco se sabia sobre a estrutura e o relevo do fundo oceânico. O desenvolvimento de técnicas de sonar, durante a Segunda Guerra Mundial, possibilitou que cientistas utilizassem estas técnicas para mapear o fundo dos oceanos durante os anos 50 e 60. Entre os pioneiros no mapeamento do relevo submarino se destacam **Marie Tharp** e **Bruce Heezen**, ambos da Universidade de Columbia (EUA), que compilaram dados de sonar adquiridos ao redor do mundo (Fig. 1).

**FIGURA 1.** O primeiro mapa global do assoalho oceânico publicado por Heezen e Tharp em 1964. Os trabalhos de Heezen e Tharp durante os anos de 1950-1960 foram pioneiros no mapeamento do relevo oceânico e abriram caminho para o entendimento dos processos de formação do assoalho oceânico.
*Fonte: The Floor of the Oceans, American Geographical Society.*

Marie Tharp era quem tinha a responsabilidade de ilustrar o relevo submarino a partir dos dados compilados e foi a primeira a identificar a presença de uma grande cadeia de montanhas submarinas no centro do Atlântico Norte. Posteriormente, feições semelhantes também foram encontradas no centro de todos os grandes oceanos, no Atlântico, no Pacífico e no Índico.

A identificação dessas cordilheiras submarinas foi uma revolução científica, já que os modelos de formação dos continentes então aceitos não conseguiam explicar a formação destas montanhas, hoje chamadas de dorsais meso-oceânicas. Tharp considerava que as dorsais meso-oceânicas se formavam a partir da quebra e da separação do assoalho oceânico, o que resultaria em grandes derrames vulcânicos submarinos, que então formariam tais montanhas submersas. Dessa forma, se o assoalho oceânico atualmente se expandia na região das dorsais, isso significava que no passado geológico os oceanos eram menores e que os continentes poderiam ter estado unidos, o que era exatamente a ideia da Deriva Continental de Wegener.

Com o passar dos anos, diversas técnicas de pesquisa científica foram desenvolvidas e ajudaram a confirmar a hipótese científica de Wegener, Tharp e Heezen. Dentre estas, com a técnica de paleomagnetismo, geólogos aprenderam a medir o magnetismo das rochas e descobriram que o campo magnético da Terra possuía um comportamento diferente no passado. Entre intervalos de tempo geológicos, foi observado que o polo magnético da Terra mudava de orientação do polo Norte (como é hoje) para o polo Sul, e vice-versa, em um movimento binário que ficou gravado no magnetismo das rochas ígneas formadas nestes intervalos. Assim, ao coletar e medir o magnetismo de amostras do assoalho oceânico localizadas entre os continentes e as dorsais meso-oceânicas, e associando-se as idades absolutas das rochas oceânicas com as medidas de paleomagnetismo, cientistas descobriram que as rochas do fundo oceânico eram mais novas próximas às dorsais e mais antigas em direção aos continentes. Foi assim revelado que os continentes estão em constante movimento ao longo do tempo, flutuando sobre o mar de magma da astenosfera.

## VOCÊ SABIA?

**Até a década de 1960, mulheres não podiam participar da maioria das expedições oceanográficas.**

**Marie Tharp pôde participar de uma expedição oceânica apenas em 1965, quase 20 anos após o início da sua carreira.** *Fonte: Lamont-Doherty Earth Observatory.*

## 2. Placas tectônicas e o Ciclo de Wilson

Atualmente, na Teoria das Placas Tectônicas, sabe-se que a litosfera terrestre, a camada sólida e mais externa do planeta com espessura média de 100-150 km, é dividida em 15 pedaços principais, chamadas de placas tectônicas. Estas placas tectônicas são mais espessas nos continentes e formadas por rochas de menor densidade (crosta continental) e são mais finas e densas nos oceanos (crosta oceânica). As placas tectônicas movimentam-se relativamente entre si ao longo da superfície terrestre, ora se aproximando e ora se afastando. Os limites entre as placas são convergentes quando as placas se aproximam, como, por exemplo, na costa oeste da América do Sul ao longo da Cordilheira dos Andes, e são divergentes quando as placas tectônicas se afastam, como ocorre nas dorsais meso-oceânicas.

Em um limite convergente, a placa tectônica mais densa (normalmente formada por crosta oceânica mais fria e antiga) mergulha por baixo da placa sobrejacente, em um movimento chamado de subducção. Assim, a outra extremidade da placa que mergulhou é gradualmente afastada da placa vizinha, o que forma uma zona de limite divergente no outro extremo da borda desta placa tectônica. Nesta zona de limite divergente, chamada de rifte ou zona de rifteamento tectônico, o afastamento tectônico resulta em grandes fissuras na litosfera terrestre que permitem que o magma da astenosfera suba até a superfície. Em seguida, o contato deste magma da astenosfera com as águas frias profundas, solidificará o magma rapidamente formando as rochas de um novo assoalho oceânico. Ao longo do tempo, este rifteamento expandirá gradualmente este novo oceano, separando os continentes. Por último, o resfriamento das rochas do assoalho oceânico ao longo de milhões de anos concomitante com a deposição de espessos pacotes de sedimentos nas margens dos continentes faz com que a crosta oceânica (mais densa e fina) afunde sob a crosta continental, formando então um novo limite convergente de placas que consumirá a crosta oceânica, reiniciando o ciclo (Fig. 2).

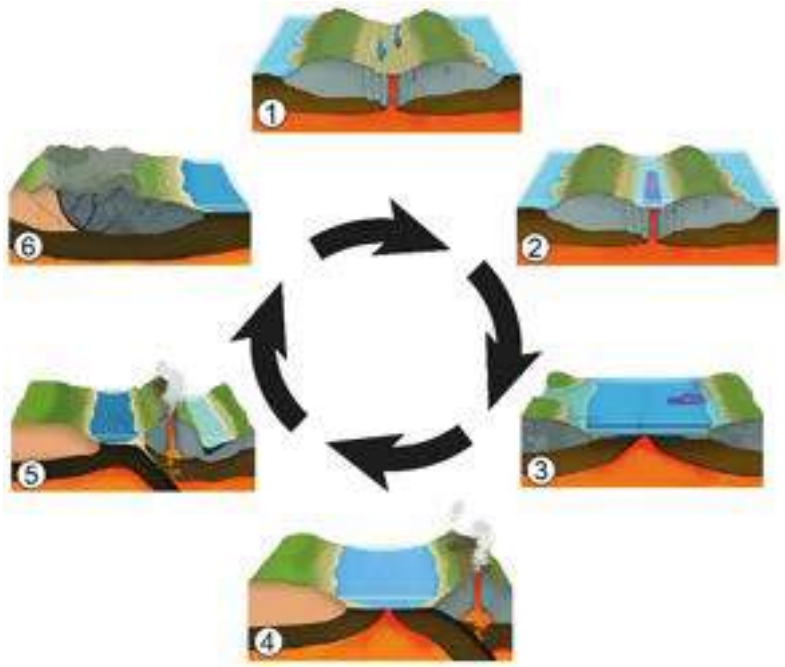



**FIGURA 2.** O constante e gradual processo de formação e consumo do assoalho oceânico ao longo da história da Terra é chamado de Ciclo de Wilson. O processo começa a partir do rompimento de uma massa continental (1), que resultará na formação de novo assoalho oceânico (2). Após um período de expansão do jovem oceano, um novo limite de placas convergentes se formará na margem continental (3), causando o consumo gradual do assoalho oceânico que sofre fusão devido ao calor na astenosfera (4). O oceano será fechado com a colisão dos continentes formando grandes cadeias de montanhas (5). Por último, os continentes permanecem estáveis e as cadeias de montanhas sofrem erosão e aplainamento (6), até que um novo ciclo comece (1). *Fonte: adaptado de Trabucho-Alexandre et al., 2011.*

Este contínuo ciclo de geração e destruição de oceanos, chamado de Ciclo de Wilson, gerou a formação de sete supercontinentes e superoceanos durante os 4,6 bilhões de anos da história da Terra, dos quais os últimos foram o supercontinente *Pangaea* e o superoceano *Pantalassa*, formados há cerca de 250 milhões de anos antes do presente. Existem também limites de placas onde a crosta não é produzida, nem destruída, chamados de zona de limites transformantes. Nestes limites, as placas deslizam entre si em um movimento lateral. Um exemplo de um limite transformante é a Falha de San Andreas na Califórnia, que separa a placa Norte-Americana e a placa do Pacífico.

## 3. Composição do assoalho oceânico

O assoalho oceânico possui ao redor de 6 km de espessura e é composto por diversas camadas de rochas formadas a partir do resfriamento do magma ascendente. A camada rochosa próxima à superfície possui ao redor de 500 metros de espessura e é composta por basaltos, rochas geradas pelo rápido resfriamento da lava que entra em contato com a água dos oceanos. Estas rochas basálticas adquirem dois formatos principais: lavas em almofadas (ou *pillow lavas*, em inglês), e derrames acamadados. Lavas em almofadas formam-se quando o contato da lava com a água marinha solidifica apenas a borda externa do corpo de lava, formando cilindros com ao redor de um metro de diâmetro. A lava do interior destes cilindros, ainda derretida, então flui pelo cilindro e é por sua vez também resfriada ao sair pela extremidade do cilindro, formando novas paredes. Este processo pode formar lavas em almofadas com dezenas de metros de extensão. Já derrames acamadados formam-se em lavas mais quentes, com viscosidades mais baixas. Assim, esta lava não é imediatamente solidificada quando entra em contato com a água e pode se espalhar horizontalmente por uma área mais ampla antes de solidificar, formando grandes lençóis de basaltos.

Abaixo da zona mais próxima da superfície formada pelos derrames de lava, há uma camada de rochas basálticas orientadas na vertical, chamada de enxame de diques basálticos. Diques basálticos formam-se por entre as fraturas que transportam o magma para a superfície, com espessuras ao redor de 1 km de profundidade. Por último, abaixo dos diques, o resfriamento mais lento do magma em profundidades mais altas resulta na formação de Gabros. São rochas com cristais maiores e de cores mais claras que os basaltos. Esta camada possui ao redor de 4,5 km de espessura e forma a base da crosta oceânica, em contato com o magma da astenosfera.

## 4. Zonas do relevo oceânico

Entre as dorsais meso-oceânicas e as zonas continentais costeiras, existe uma miríade de diferentes ambientes marinhos com características únicas quanto as suas feições de relevo. A disposição destes ambientes está diretamente relacionada com os processos tectônicos de formação do assoalho oceânico descrito acima. Próximas às dorsais, a expansão térmica das rochas pelo calor do magma ascendente forma grandes montanhas submarinas em profundidades ao redor de 2-3 km.

Conforme nos distanciamos da fonte de calor magmática das dorsais, o resfriamento do assoalho contrai a crosta formando grandes planícies abissais em profundidades entre 4 a 6 km. Nas margens dos continentes a maior espessura dos sedimentos e a transição da crosta oceânica

para a crosta continental diminui a profundidade dos oceanos. Por último, em zonas de limites convergentes, como ao longo da costa oeste na América do Sul, o afundamento de uma das placas tectônicas gera zonas de fossas abissais que podem chegar a profundidades acima de 10 km. Com base nestas diferenças, duas grandes áreas do relevo são então delimitadas e serão descritas a seguir: as margens continentais e as bacias oceânicas.

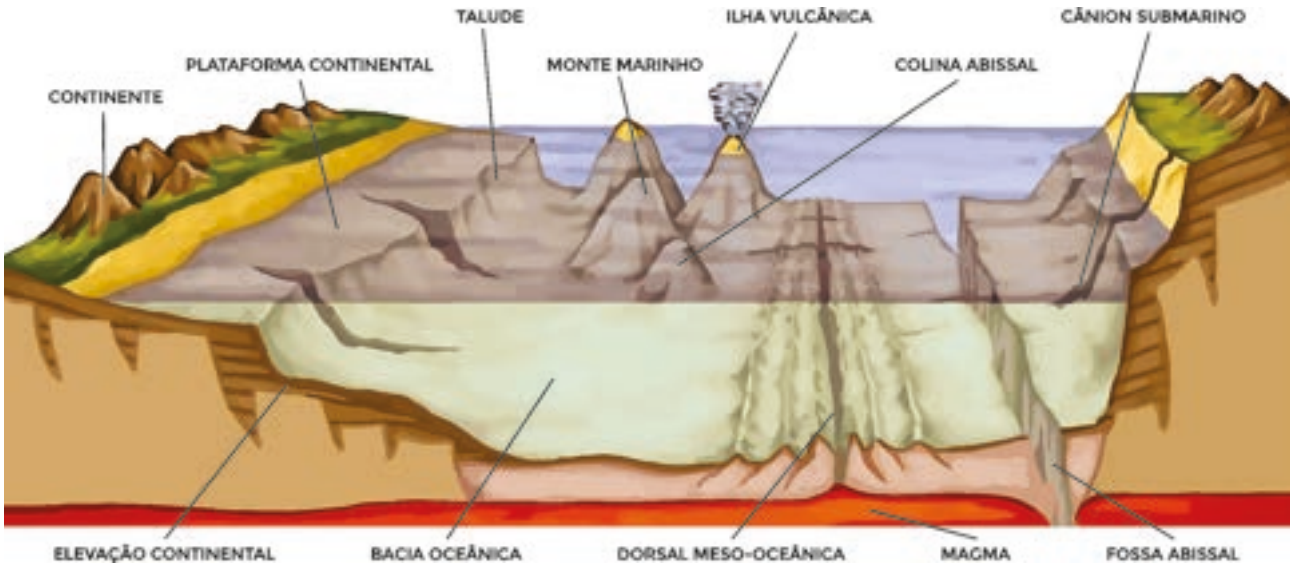
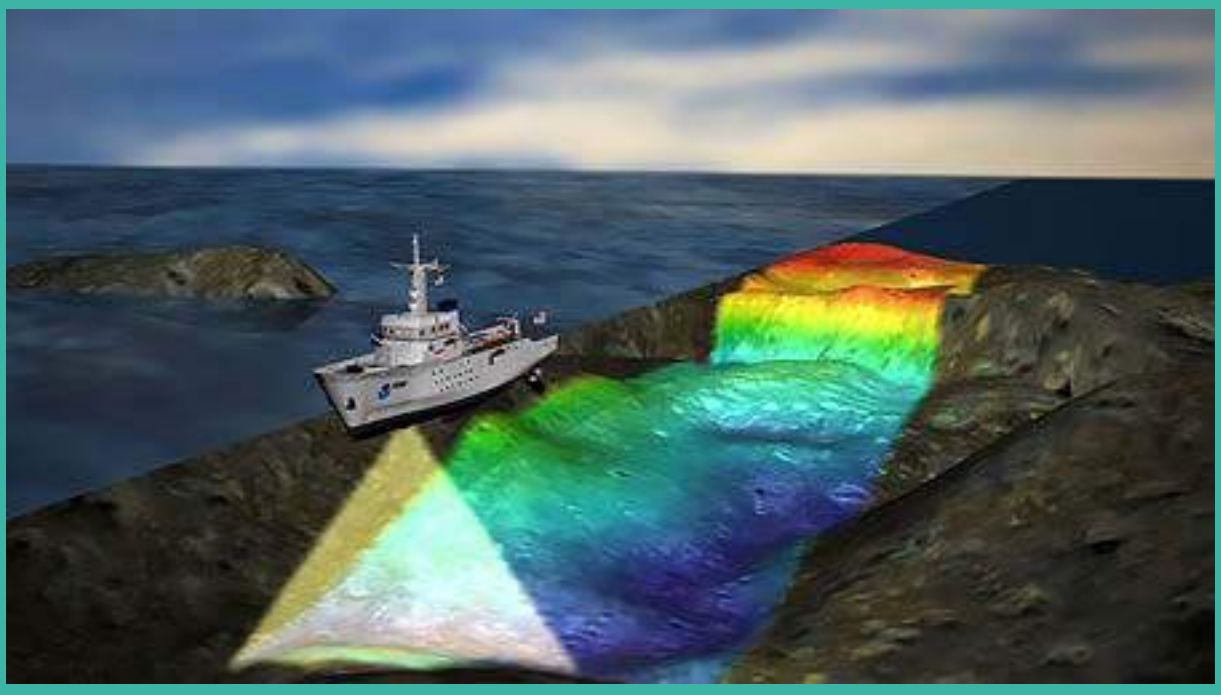



**FIGURA 3.** **As principais formas que caracterizam o relevo oceânico.** *Adaptado de Stihii.*

## VOCÊ SABIA?

**Até o ano 2020, apenas 19% do relevo oceânico havia sido mapeado em alta resolução.**

Nesse mesmo ano, a Fundação Nippon e a Organização Internacional pela Carta batimétrica dos Oceanos (GEBCO) lançaram o projeto SEABED 2030, que pretende completar o mapa batimétrico dos oceanos até 2030. *Fonte: USGS.*



# 5. Margens continentais

As margens continentais constituem a zona de transição entre a crosta continental, mais leve e espessa, e a crosta oceânica, mais densa e fina. Estão localizadas entre a zona costeira dos continentes, ao nível do mar, até regiões de mar profundo com até 5 km de profundidade. Estas regiões são extremamente importantes para a vida em sociedade, em virtude do transporte naval e dos amplos recursos naturais explorados, como a pesca e a extração de hidrocarbonetos. Margens continentais são do tipo passivas quando estão próximas a limites de placas divergentes e do tipo ativa quando estão próximas a limites de placas convergentes. Margens passivas estão divididas em três subprovíncias fisiográficas: a plataforma continental, o talude continental e a elevação continental. Já as margens ativas não apresentam a elevação continental. Estas subprovíncias fisiográficas são descritas em detalhe a seguir.

## 5.1 Plataforma continental

A plataforma continental é a porção do assoalho oceânico próxima às zonas costeiras, que se estende desde a linha de costa até profundidades médias de 200 m. A principal característica da plataforma continental é seu relevo quase plano, com declives de no máximo 1 grau, distribuído dentre os 70 km de largura média de uma plataforma. Em margens continentais onde ocorre um limite convergente de placas, como a margem oeste da América do Sul, a largura da plataforma continental é menor, ao redor de 30 km. A maior plataforma continental do mundo é a plataforma Siberiana na margem norte da Rússia, que se estende por mais de 1.000 km. A plataforma continental brasileira, do tipo margem passiva, é bastante heterogênea, com larguras de 10 km na sua menor porção, na costa da região nordeste, para até 300 km nas suas áreas mais largas, como na margem do estado do Pará e do Rio Grande do Sul. A plataforma continental está subsequentemente dividida de acordo com as suas caraterísticas geomorfológicas e biológicas. Geologicamente, temos a plataforma interior, média e exterior. Biologicamente, a plataforma continental é chamada de zona nerítica, e está subdividida em zona supralitorânea (limite das marés), mesolitorânea (coberta em maré cheia) e infralitorânea (coberta em maré baixa).

## 5.2 Talude continental

O talude continental é a zona da margem continental localizada entre a quebra da plataforma continental, em profundidades de 200 m, até profundidades entre 3-5 km. Esta região possui uma largura bastante variada. Dependendo do tipo de margem continental, a plataforma continental pode se estender de 20 km, em margens ativas, para até 100 km em margens passivas. É a porção da margem continental com o maior declive, com ângulos médios de 4 graus. O talude continental também é caracterizado por uma grande diversidade geomorfológica, com a presença de cânions submarinos, escarpas e vastos depósitos formados por deslizamentos de rochas e sedimentos submarinos.

## 5.3 Elevação continental

A elevação continental, também conhecida como sopé continental, estende-se da base do talude até a planície abissal, com profundidades superiores a 5 km. É a zona de transição entre o relevo relativamente acentuado do talude e as planícies abissais, que possuem declives de no máximo 1 grau.

O relevo da elevação continental é muitas vezes irregular pela presença de montes e platôs submarinos. Espessos depósitos de sedimentos concentram-se na elevação continental, principalmente em margens continentais próximas a grandes rios onde formam-se vastos leques submarinos que concentram uma grande quantidade de recursos petrolíferos. A elevação continental marca o fim da transição entre a crosta continental e a crosta oceânica.

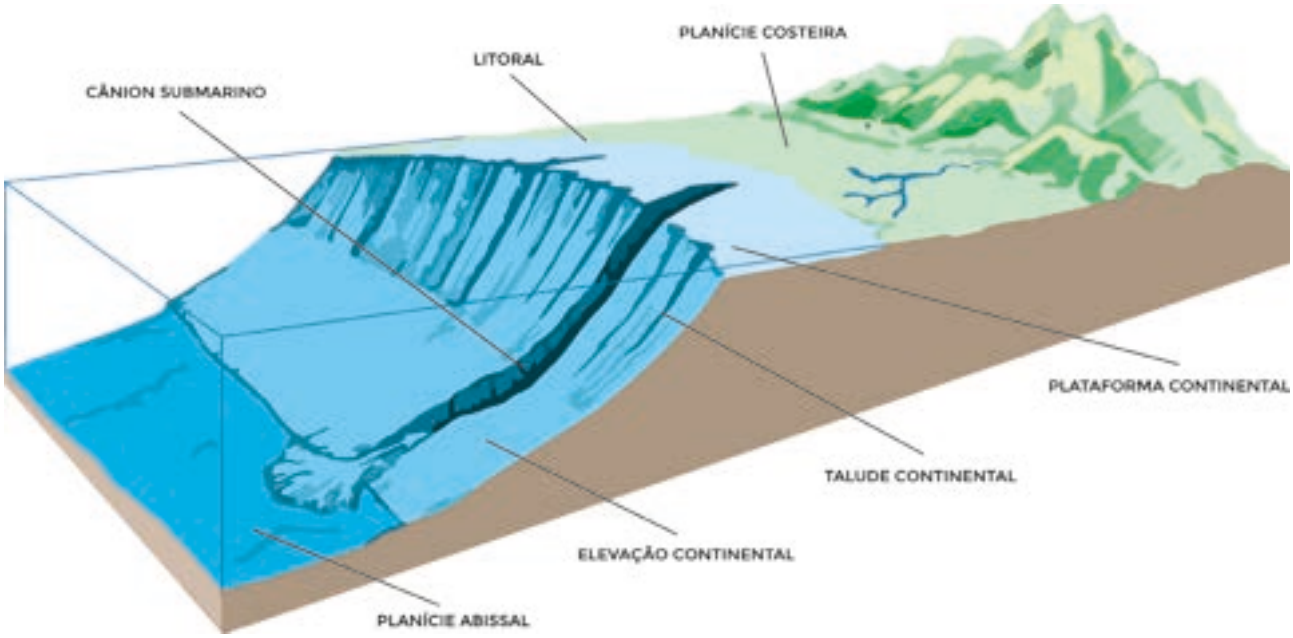



**FIGURA 4.** **Principais sub-províncias fisiográficas e feições de uma margem continental passiva.** *Adaptado de Encyclopedia Britannica.*

## 6. Bacias oceânicas

As bacias oceânicas localizam-se nas porções mais profundas, além da elevação continental. Geologicamente, o assoalho das bacias oceânicas é formado por crosta oceânica, rochas de densidades mais altas do que as rochas continentais, formadas pelo vulcanismo nos limites tectônicos de placas divergente. Dessa forma, o assoalho oceânico é menos espesso nas bacias oceânicas do que nas margens continentais, e está composto por elementos químicos mais pesados. As maiores bacias oceânicas são a bacia do Pacífico, do Atlântico, do Índico, do Oceano Austral e do Oceano Ártico. Três áreas principais compõem as bacias oceânicas, descritas a seguir: a planície abissal, as cordilheiras meso-oceânicas, e as fossas abissais.

### 6.1 Planície abissal

As planícies abissais são as zonas mais extensas do assoalho oceânico, cobrindo ao redor de 30% de toda superfície oceânica. Estendem-se da elevação continental até as cordilheiras meso-oceânicas ou fossas abissais na porção mais central dos oceanos. Possuem relevo plano e profundidades médias entre 4-5 km.

## 6.2 Cordilheiras meso-oceânicas

Na região central dos oceanos encontram-se as cordilheiras meso-oceânicas, ou dorsais meso-oceânicas, montanhas submarinas que estão presentes na porção central de todos os oceanos. As dorsais são formadas por vulcanismo pelas fissuras dos limites de placas divergentes. Após a formação destas montanhas submarinas ao longo do limite divergente, a contínua separação das placas desloca gradualmente as dorsais para regiões afastadas do limite de placas. Este movimento forma um conjunto de cristas e vales em regiões que podem se estender por até 1.000 km de largura. Os picos mais elevados das cordilheiras meso-oceânicas estão muitas vezes acima da superfície do mar e formam assim ilhas e arquipélagos, como o Arquipélago de São Pedro e São Paulo e a Islândia.

## 6.3 Fossas abissais

As fossas abissais são as regiões mais profundas dos oceanos, com profundidades de até 10.920 m, na Fossa das Marianas. São formadas ao longo de limites convergentes de placas, que podem ser entre uma crosta continental e uma oceânica, como na margem oeste da América do Sul, mas também entre duas crostas oceânicas, como no Japão. As fossas abissais mais profundas encontram-se nestes limites entre crostas oceânicas, onde ocorrem alinhamentos de vulcões ativos, formando os arcos vulcânicos (ou arco de ilhas), como se observa no Japão. Fossas abissais possuem declives muito elevados ao redor de 10 graus e dessa forma são consideradas as zonas mais íngremes do relevo oceânico. Apenas recentemente as fossas abissais começaram a ser exploradas e ainda muito pouco é conhecido sobre as características geológicas, oceanográficas e biológicas destas regiões.

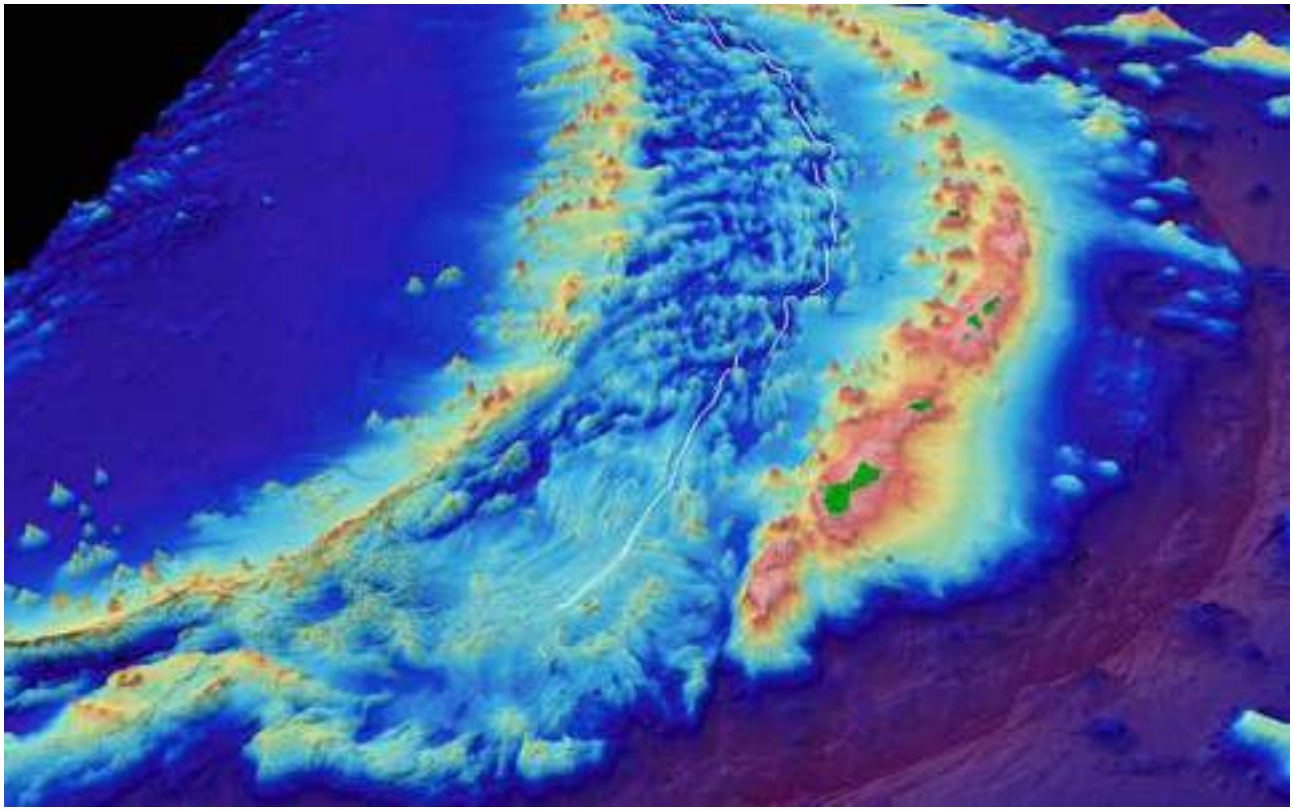


FIGURA 5. **Relevo oceânico ao longo da Fossa das Marianas (em roxo). A Fossa das Marianas é o resultado da colisão da placa tectônica do Pacífico (crosta oceânica) com a placa das Marianas (crosta oceânica), que formou, além da fossa, um conjunto de ilhas no centro do Oceano Pacífico. Em verde temos as Ilhas de Guam e as Ilhas Marianas.** *Fonte: NOAA*.

# 7. Outras feições do relevo oceânico

## 7.1 Fumarolas hidrotermais

Fumarolas hidrotermais submarinas são como gêiseres no assoalho oceânico, os quais localizam-se geralmente em limites divergentes de placas tectônicas. Nestas regiões, a ascensão do magma quente esquenta a água localizada entre os poros e fraturas da rocha de maneira similar como ocorre em fontes hidrotermais na superfície. Entretanto, fontes hidrotermais submarinas podem chegar a temperaturas da água de até 400°C, sem entrar em ebulição devido à alta pressão que a coluna de água exerce sob o fundo marinho. As altas temperaturas e o contato com o magma rico em minerais torna o fluido hidrotermal enriquecido em metais como ferro, zinco, cobre, chumbo e cobalto, entre outros. O contato do fluído hidrotermal com a água gélida das profundezas precipita estes metais em formato de torres hidrotermais, que podem chegar a ter 60 m de altura.

Estas estruturas foram descobertas em 1977 no Oceano Pacífico próximo às Ilhas Galápagos, em profundidades ao redor de 2.500 m. O que causou grande espanto na época, é que associadas a essas fontes hidrotermais submarinas há todo um ecossistema de organismos vivos, que era até então totalmente desconhecido. Foi então descoberto que a base desse ecossistema era formada por pequenos microorganismos que se alimentam de substâncias químicas presentes nas torres hidrotermais, como o sulfeto de hidrogênio. A presença destes microorganismos anaeróbicos, por sua vez, sustenta toda uma cadeia alimentar composta por mais de 300 espécies de organismos marinhos, incluindo poliquetas, camarões e peixes, de forma independente da ação fotossintética do Sol.

**FIGURA 6.** **Uma fumarola negra do campo de fontes hidrotermais do limite divergente de placas do Atlântico Norte. As fumarolas negras possuem uma composição rica em sulfetos metálicos enquanto as fumarolas brancas são ricas em óxidos de Bário, Cálcio e Silício.** *Fonte: Center for Marine Enviromental Sciences. MARUM - Research Faculty University of Bremem.*

As fontes hidrotermais submarinas são de grande importância científica para o entendimento da origem da vida. A autossuficiência e a grande diversidade dos ecossistemas formados ao redor das torres hidrotermais permite que se especule que a vida tenha sido originada em condições químicas similares, dentro de fluidos quentes enriquecidos em minerais. É por isso que uma boa parte da pesquisa moderna sobre a origem da vida na Terra ocorre em áreas de fumarolas hidrotermais submarinas, como no campo hidrotermal do maciço Atlantis, na dorsal meso-oceânica do Oceano Atlântico.

## 7.2 Vulcões submarinos

Vulcões submarinos são formados a partir de fissuras do assoalho oceânico, por onde ocorre o extravasamento de magma do manto terrestre. Este vulcanismo submarino ocorre principalmente em ambientes limites de placas tectônicas, tanto em limites divergentes como em limites convergentes. Contudo, vulcões submarinos também podem se formar no interior da placa tectônica, em zonas de anomalia de calor no manto, conhecidas como pontos quentes (*Hot Spots*), como o *Hot Spot* do Havaí ou da Cadeia Vitória-Trindade no Brasil. A montanha mais alta do planeta é o vulcão submarino Mauna Kea no Havaí com 10.210 m de altura, mais de 1.300 m a mais que o Monte Everest.

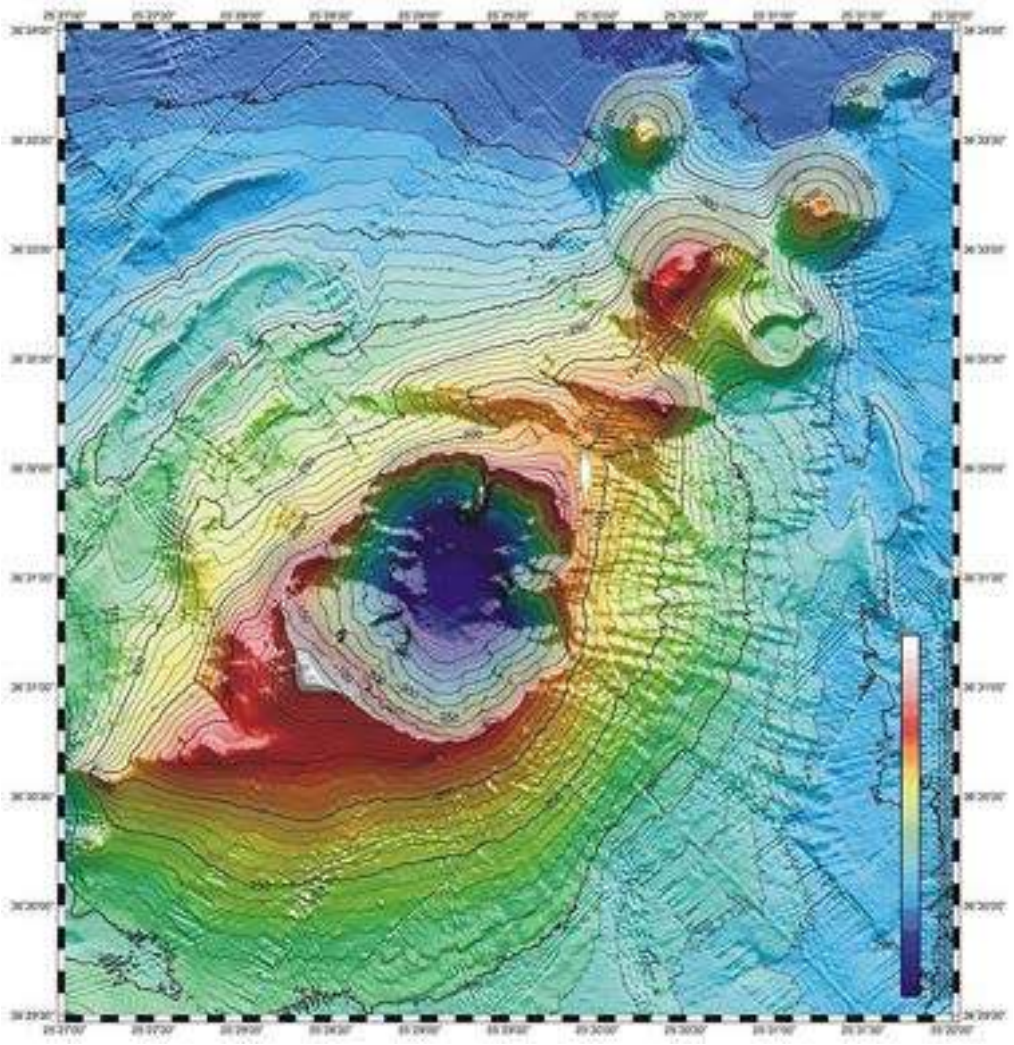


**FIGURA 7.** Mapa batimétrico do vulcão submarino de Kolumbo no Mar Egeo próximo a famosa Ilha de Santorini que também é um vulcão. Note que a caldeira do vulcão no centro da montanha é mais profunda que o assoalho oceânico ao redor do vulcão.

## VOCÊ SABIA?

**A exploração do assoalho oceânico em áreas ultraprofundas somente é possível utilizando-se submersíveis e, mais atualmente, com drones e robôs submarinos.**

O submersível *Alvin* é o mais famoso em atuação. Foi com ele que cientistas exploraram fontes hidrotermais, em 1977, e os destroços do Titanic, em 1986. *Fonte: WHOI*.

### 7.3 Platôs oceânicos

Quando o vulcanismo submarino é de grandes proporções (chamados de grandes províncias ígneas, ou LIPs na sigla em inglês), podem ser formados platôs oceânicos, grandes elevações com até 3 km de altura, caracterizadas por uma superfície de topo plana e bordas íngremes. Um total de 184 platôs oceânicos já foi documentado na Terra, cobrindo uma área que corresponde a 5,11% dos oceanos. A formação destes Platôs oceânicos ao longo da história da Terra gerou grandes impactos no clima e na vida da Terra. Por exemplo, a formação de dois dos maiores platôs oceânicos, o de Ontong e o Caribenho, entre 110 e 100 milhões de anos atrás, resultou em uma das maiores extinções da vida marinha. Grandes quantidades de $CO_2$ emitidas por esse vulcanismo submarino consumiu todo o oxigênio dos oceanos durante quase meio milhão de anos, o que incapacitou a recuperação da vida nos mares durante este período.

**FIGURA 8. Distribuição dos maiores platôs oceânicos.** *Adaptado de Kerr & Mahoney, 2007.*

### 7.4 Cânions submarinos

Cânions submarinos são grandes canais sinuosos presentes ao longo do talude das margens continentais. Representam canais que transportam grandes quantidades de sedimentos dos continentes para o fundo dos oceanos, conectando diretamente a plataforma continental com a planície abissal. Representam canais que transportam grandes quantidades de sedimentos dos continentes para o fundo dos oceanos. A formação dos cânions submarinos está relacionada a avalanches de sedimentos originadas no topo do talude continental. Estas avalanches geram correntes de turbidez de alta densidade com velocidades de até 50 km/h. A passagem da corrente de turbidez erode os sedimentos previamente depositados no assoalho oceânico, gerando canais escavados na região onde o deslizamento ocorreu. À medida que novas correntes de turbidez fluem nestes canais escavados pela ação da força gravitacional, vai-se então formando o cânion submarino que pode chegar a relevos de centenas de metros. Estas correntes de turbidez podem ser formadas naturalmente no topo do talude, pela alta deposição de sedimento, mas também ocorrem frequentemente durante terremotos. Dessa forma, a margem continental do estado da Califórnia nos Estados Unidos é famosa pela presença de inúmeros cânions submarinos, devido à alta frequência de terremotos gerados pela Falha de San Andreas. Importantes cânions submarinos incluem o Cânion de Monterrey na Califórnia e o Cânion do Amazonas na margem continental norte do Brasil.

### 7.5 Leques submarinos

Leques submarinos são depósitos sedimentos e de rochas sedimentares em forma de leques, que ocorrem na base do talude continental. Estão muitas vezes associados a cânions submarinos, sendo o depósito final dos sedimentos transportados ao longo dos cânions. De maneira similar aos cânions submarinos, são formados por correntes de turbidez que transportam sedimentos desde a plataforma continental até as planícies abissais, através do talude e elevação continentais. Leques submarinos podem atingir extensões de milhares de quilômetros, constituindo uma das maiores feições do relevo oceânico. Os maiores leques submarinos encontrados nos oceanos estão localizados próximos a deltas de grandes rios, como o Leque Bengala, formado por sedimentos transportados da cordilheira dos Himalaias pelos grandes rios Ganges e Brahmaputra. Este leque submarino possui 3.000 km de extensão, 1.430 km de largura e uma espessura total de sedimentos de 16,5 km. No Brasil, se destaca o leque submarino do Amazonas (Cone do Amazonas), formado gradualmente ao longo dos últimos 10 milhões de anos após o desenvolvimento do atual delta do Rio Amazonas.

### 7.6 Recifes de corais

Recifes de corais, ou arrecifes, são grandes estruturas formadas por rochas carbonáticas. Estas rochas são basicamente os esqueletos de vastas colônias de corais, organismos marinhos invertebrados que extraem o carbonato de cálcio da água do mar para produzir o exoesqueleto que protege os frágeis pólipos de cada indivíduo da colônia. Ao longo do tempo, a acumulação dos exoesqueletos de inúmeras gerações de corais é capaz de construir grandes plataformas carbonáticas, com quilômetros de espessuras e dezenas de quilômetros de extensão. Uma vez que as espécies de corais dependem de muita luz solar para o seu metabolismo, o topo dos recifes de corais está sempre próximo ao nível do mar, no topo da chamada zona fótica. Dessa forma, quando ocorre um aumento do nível do mar gradual, corais tendem a aumentar a secreção de exoesqueletos na superfície da plataforma carbonática, para manter a colônia dentro da zona fótica. Por isso, as bordas de uma plataforma carbonática são

muito íngremes, com ângulos de até 50 graus. Por outro lado, se o aumento do nível do mar ocorre de maneira muito rápida, como atualmente em virtude do aquecimento global, a incidência da luz solar se torna insuficiente sobre aqueles organismos, o que eventualmente dizima a colônia de corais. Entretanto, mesmo com a morte da colônia, a plataforma carbonática será preservada, como um registro fóssil de antigos recifes de corais.

Recifes de corais são encontrados em todos os oceanos, do Alasca ao Sul da Austrália, mas são principalmente localizados em águas claras e quentes das zonas equatoriais, como no mar do Caribe e no Pacífico Central. O maior sistema de corais ativo está localizado na Grande Barreira de Corais da Austrália, com mais de 2.400 km de extensão. No Brasil destaca-se o grande Banco de Corais de Abrolhos entre as costas do Espírito Santo e da Bahia, que compreende uma área total de 56.000 km$^2$.

**FIGURA 9.** A) A Grande Barreira de Corais na Austrália é o maior sistema de recife de corais do mundo e inclui 600 ilhas e 300 atóis. B) Esta estrutura viva sustenta uma imensa biodiversidade marinha no Oceano Pacífico, que está atualmente ameaçada de extinção pela acidificação dos oceanos em virtude do aquecimento global. *Fonte: VCG.*

## 7.7 Atóis

Um atol é uma ilha oceânica em formato circular formado pela interação entre diferentes processos geológicos ao longo do tempo. A formação de um atol começa pela formação de um vulcão submarino próximo ao nível do mar, localizado em um limite de placas tectônicas ou em zonas de anomalias de calor do manto terrestre. Após um longo período de atividade vulcânica esses vulcões se tornam inativos, gerando montanhas e ilhas. A partir daí, recifes de corais se desenvolvem no assoalho oceânico próximo a superfície, formando uma franja de corais circular ao redor da margem da ilha vulcânica. Ao longo de milhões de anos o topo do antigo vulcão vai desaparecendo, pelo afundamento da crosta oceânica e pela ação erosiva das ondas, formando uma laguna na parte central da ilha, entre os recifes de coral. O desenvolvimento final de um atol é marcado pelo total desaparecimento do vulcão original, permanecendo ao nível do mar apenas o recife de corais em formato circular. Exemplos de ilhas de atol incluem as Ilhas Bora Bora no Oceano Pacífico, onde parte do vulcão ainda permanece acima do nível do mar, e as Ilhas Maldivas no Oceano Índico e o Atol das Rocas no Brasil, onde apenas o recife de corais está acima do nível do mar.

**FIGURA 10.** A) Foto aérea da Montanha do Sassolungo nas Dolomitas da Itália, um antigo Atol formado há 220 milhões de anos atrás, época em que esta região da Itália estava inundada por um grande oceano de nome Tétis. B) Foto aérea do Atol das Rocas (Marinha do Brasil). Note a laguna que se forma na parte central da ilha, acima da antiga cratera de um vulcão. Ilhas de atol formam locais de natureza paradisíaca que estão atualmente ameaçados pelo aumento do nível do mar causado pelo aquecimento global.

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 4*

# SEDIMENTOS DO ASSOALHO OCEÂNICO

*Cintia Yamashita, Ana Cláudia Santarosa, Fabiane Sayuri Iwai & Silvia Helena de Mello e Sousa*

RENATA HANAE NAGAI (UFPR), GABRIEL TAGLIARO (IOUSP) E MARIA VIRGÍNIA ALVES MARTINS (UERJ)

CITAÇÃO SUGERIDA: YAMASHITA, Cintia et al. Sedimentos do assoalho oceânico. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 4: p. 87-103.

# Sedimentos do Assoalho Oceânico

*Cintia Yamashita, Ana Cláudia Santarosa, Fabiane Sayuri Iwai & Silvia Helena de Mello e Sousa*

Quando vamos à praia e pisamos na areia, podemos nos perguntar de onde vêm os grãos de areia, como e quando se formaram, do que são constituídos, se existem partículas semelhantes recobrindo todo o fundo marinho e se modificam de uma bacia oceânica para outra.

Outras questões podem vir à mente: há alguma relação entre fenômenos geológicos que ocorrem no continente e os processos oceânicos, como correntes marinhas, na formação e distribuição das partículas sedimentares? Há algum interesse econômico nos depósitos formados por essas partículas depositadas no fundo marinho? O que o estudo dessas partículas pode nos revelar para a compreensão da história dos oceanos?

Neste capítulo, vamos abordar a história dos sedimentos marinhos, genericamente considerados como partículas sedimentares, desde a sua formação até a sua chegada no oceano, sua composição e classificação, e a importância de seu estudo para o entendimento dos fenômenos geológicos e processos oceanográficos atuais e do passado.

## 1. O que são sedimentos marinhos?

Os sedimentos (*sedis*, do latim, assento, deposição) são partículas de matéria orgânica e inorgânica não consolidadas e que foram originadas tanto do processo de intemperismo de rochas vulcânicas, metamórficas ou sedimentares, como também de restos de organismos marinhos, precipitados químicos da água do mar, produtos de vulcanismo submarino e até de materiais do espaço sideral (por exemplo, meteoritos), sendo seu destino final a deposição em algum ambiente. O intemperismo nada mais é do que a desagregação e decomposição das rochas, podendo ocorrer através de processos físicos, químicos ou biológicos.

A maior parte do fundo marinho está coberta por espessas camadas de sedimentos. Em regiões mais jovens do fundo marinho, onde ainda não houve tempo suficiente para uma acumulação significativa, os sedimentos são mais escassos. Globalmente, as camadas de sedimentos marinhos têm em média cerca de 1 km de espessura, mas podem exceder 15 km em áreas de alta acumulação, como por exemplo em desembocaduras de rios que depositam volumes expressivos de material.

Os processos pelos quais as partículas sedimentares passam, desde sua formação, transporte e deposição final, alteram as características físicas e químicas dos sedimentos. Dessa forma, depósitos de sedimentos marinhos constituem um grande arquivo, registrando as condições geológicas, oceanográficas e climáticas presentes no momento de sua deposição. Os padrões e a composição das camadas de sedimentos no assoalho oceânico são de grande interesse para o estudo das condições do passado do oceano e suas interações com o continente e a atmosfera.

## 2. Qual a origem dos sedimentos marinhos?

O fundo marinho é um dos destinos finais do sedimento produzido pelos processos geológicos, biológicos e químicos que ocorrem no ambiente e daqueles de origem extraterrestre que chegam à superfície do planeta. Dessa forma, os sedimentos marinhos podem ter diversas fontes. Podem se formar nos próprios oceanos ou sobre os continentes ou podem até mesmo ter origem cosmogênica. Como visto no item anterior, um sedimento nada mais é que um produto da complexa interação de processos que agiram para formar, transportar e preservá-lo no fundo marinho.

Temos maior familiaridade com sedimentos resultantes de processos continentais, como a areia da praia e os sedimentos do fundo de um rio. A maior parte dos sedimentos que chega aos oceanos provêm do intemperismo de rochas presentes nos continentes. Pela ação da água e vento, e também árvores, animais e bactérias, ou mesmo geleiras, as rochas são desgastadas dando origem a esses sedimentos. Estas rochas são chamadas de rocha-matriz, ou rocha-mãe, tendo esse nome justamente por ser a fonte de sedimentos.

O intemperismo físico, também chamado de mecânico, resulta na quebra da rocha-matriz em fragmentos menores, sem que haja alterações químicas e mineralógicas da sua composição. Podemos citar como exemplos, a ação do sol e variações de temperatura, que resultam na expansão e contração da rocha, fazendo com que ela se desgaste ao longo do tempo. Já o intemperismo químico resulta na alteração química e mineralógica dos sedimentos durante o processo de intemperismo da rocha-matriz. Isso pode ocorrer através do contato com a água, que pode dissolver os componentes da rocha-matriz, e com presença/ausência de oxigênio no ambiente, resultando na oxidação/redução dos compostos da rocha-matriz. Os agentes biológicos presentes nas camadas de sedimentos, como plantas, animais e bactérias, podem também resultar no desgaste das rochas. A expansão de raízes pode resultar em intemperismo físico e os produtos de processos metabólicos dos organismos como ácidos e fluidos podem resultar em intemperismo químico.

As rochas, porém, não são a única fonte de sedimentos no ambiente continental. As explosões vulcânicas além de produzirem grande quantidade de lava, liberam também grandes quantidades de cinzas vulcânicas, que são capazes de viajar em suspensão na atmosfera até serem depositadas em áreas continentais a longas distâncias do vulcão de origem, ou até mesmo caírem diretamente sobre os oceanos.

Já os sedimentos que se formam nos próprios oceanos são predominantemente de origem biogênica, ou seja, produzidos por organismos vivos. Organismos que vivem tanto na superfície dos oceanos como associados ao fundo marinho podem produzir detritos fecais, conhecidos na sedimentologia como pelotas fecais, e também partículas resultantes da decomposição dos restos mortais desses organismos que chegam ao fundo marinho, conhecidas por neve marinha. No entanto, os sedimentos de fundo marinho são dominados por diminutas conchas calcárias ou silicosas, que pertencem a organismos que as produzem como forma de proteção ao seu corpo, como observado também em mexilhões e outros moluscos providos de conchas. Dentre esses organismos podemos citar os foraminíferos, cocolitoforídeos, ostracodes, diatomáceas, corais e algas coralíneas, entre outros. Em menor quantidade, são produzidos no fundo marinho sedimentos de origem química. Os sedimentos de origem química têm sua formação associada a feições como fumarolas, vulcões submarinos, montes submarinos, diagênese, autigênese de minerais ou até mesmo a simples presença de correntes marinhas de fundo, propícias à formação desses sedimentos.

Quanto ao material extraterrestre que pode fazer parte dos sedimentos marinhos, ele muitas vezes não é facilmente identificado, sendo frequentemente necessária uma análise minuciosa em

microscópio e às vezes até mesmo análise geoquímica para identificar sua presença em uma amostra. Os sedimentos cosmogênicos vêm em duas formas principalmente: como esferas microscópicas; e como fragmentos de meteoros maiores. A origem das partículas esféricas está provavelmente associada à desintegração dos meteoros quando esses entram em contato com a atmosfera do nosso planeta. Já os fragmentos maiores vêm de colisões de meteoritos com a Terra. A presença de sedimentos extraterrestres não é muito representativa nem sobre os continentes nem no fundo marinho, embora estima-se que entre 5 e 300 toneladas de material cosmogênico chegam diariamente à superfície da Terra.

**VOCÊ SABIA?**

**Diamantes podem ser encontrados no fundo dos oceanos.**

O processo de entrada e choque de corpos extraterrestres pode resultar na produção de nanodiamantes e microesferulas. Assim como as cinzas de erupções vulcânicas, esses sedimentos finos podem ser transportados por longas distâncias e se depositar nos fundos marinhos.

## 3. Classificação quanto à origem do sedimento

Dependendo da literatura utilizada, os sedimentos oceânicos podem ser classificados de diversas maneiras: pelo tamanho das partículas que o compõem; pela descrição dos seus componentes; pelo processo de formação; e por alguma combinação desses três parâmetros.

Várias classificações são baseadas essencialmente na composição do sedimento, embora essas classificações também indiquem frequentemente a origem dos sedimentos. Assim, com base nas suas fontes de origem, os sedimentos nos oceanos podem ser genericamente classificados como: detríticos; biogênicos; e autigênicos. Eles são classificados empregando-se a regra dos 30%; ou seja, se o sedimento é composto por mais de 30% de qualquer um dos componentes referidos, ele será classificado como tal. Entretanto é preciso ressaltar que não há sedimento puramente detrítico, biogênico ou autigênico, já que os sedimentos são sempre uma mistura desses diferentes componentes.

### 3.1 Detrítico

Os sedimentos detríticos são partículas de diferentes tamanhos, resultantes dos processos de erosão e intemperismo de rochas preexistentes e que são transportadas para os oceanos pela água, gelo e vento. Os sedimentos detríticos podem ser divididos em terrígenos, vulcânicos ou cosmogênicos.

### *3.1.1 Terrígeno*

Os sedimentos terrígenos são mais abundantes próximos aos continentes (especialmente adjacente às desembocaduras de rios) e também em planícies abissais oceânicas. Eles são resultado do intemperismo e erosão das rochas continentais e são constituídos por fragmentos de rochas, grãos de minerais leves como quartzo e feldspato, e grãos de minerais pesados (definidos como minerais com densidade maior que 2,8 g/ $cm^3$, superior à do quartzo, 2,65 g/ $cm^3$), dentre os quais podem ser citados a monazita e a magnetita.

### *3.1.2 Vulcânico*

Os sedimentos vulcânicos são compostos por minerais trazidos para o oceano principalmente pelo vento, como poeira e cinzas de erupções vulcânicas. São partículas muito finas, com tamanho aproximado de 1 μm ($1 \times 10^{-6}$ m). O componente vulcanogênico nos sedimentos marinhos pode ser bastante expressivo nas proximidades de vulcões ativos e após grandes erupções, como a do vulcão Krakatoa (Indonésia) em 1886. Depositados em águas profundas, também podem ser encontrados sedimentos de origem vulcânica submarina, como fragmentos de lava inalterados, vidro vulcânico e grãos minerais.

### *3.1.3 Cosmogênico*

Os sedimentos cosmogênicos, de origem extraterrestre, são os menos abundantes e são compostos por partículas que chegam do espaço sideral e resistem à atmosfera da Terra para compor o registro sedimentar. Possuem formato tipicamente esférico, variando de 0,1 a 1 mm em tamanho. Estas partículas apresentam assinaturas geoquímicas distintas, além de compostos orgânicos não típicos da Terra, e fornecem informações sobre variações na taxa de bombardeio de raios cósmicos e impactos catastróficos, como o evento que causou a extinção dos dinossauros, há 65 milhões de anos.

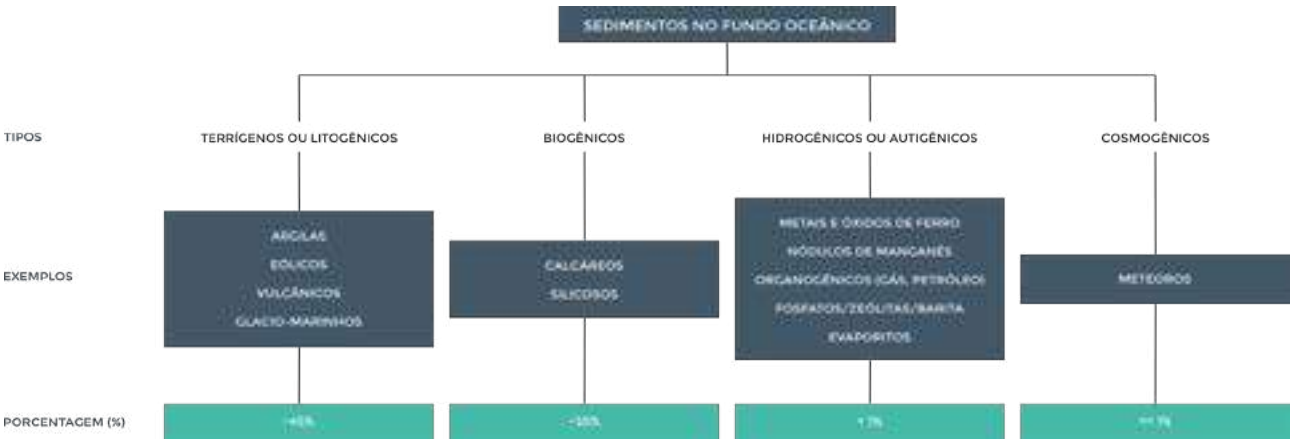



**FIGURA 1.** Tipos de sedimento, exemplos e porcentagem no fundo oceânico.

## 3.2 Biogênico

Sedimentos biogênicos, conforme o próprio nome indica, se formam direta ou indiretamente por meio de atividade biológica. Eles são compostos por restos orgânicos e principalmente por partes duras mineralizadas, produzidas por uma variedade de organismos marinhos.

Os restos orgânicos em decomposição e a matéria fecal produzida pelos organismos marinhos é dissolvida pela água do oceano, decomposta por bactérias ou consumida por animais, enquanto afunda lentamente em direção ao fundo marinho. Apenas uma pequena quantidade desse material atinge o fundo (em torno de 1%).

Já as partes duras mineralizadas são representadas essencialmente por dois tipos de partículas biogênicas, os carbonatos e a sílica biogênica (opala). Essas vasas calcárias ou silicosas, como são chamadas, podem abranger 75% do fundo marinho. O carbonato biogênico em águas rasas é produzido principalmente por corais e algas calcárias. Já em maiores profundidades, o carbonato biogênico tem como principais fontes os cocolitoforídeos (algas marinhas unicelulares) (Fig. 2), foraminíferos (protozoários) e pterópodes (gastrópodes marinhos) (Fig. 3). Já as vasas silicosas são menos comuns em comparação com as carbonáticas. Os organismos responsáveis pela produção de sílica são as diatomáceas, radiolários (Fig. 2) e em menor quantidade, os silicoflagelados (algas de coloração marrom-dourado).

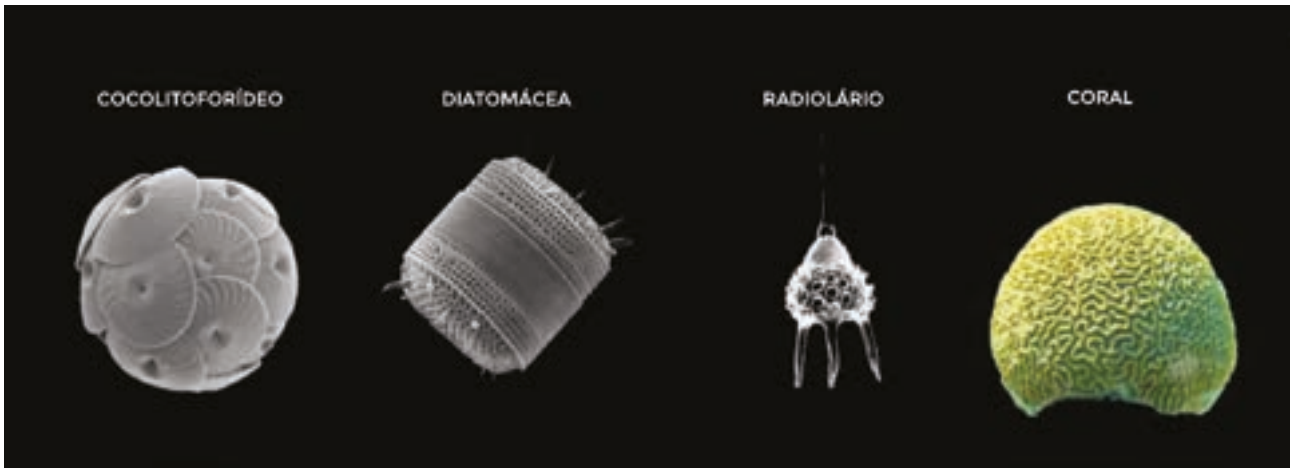



**FIGURA 2. Exemplos de cocolitoforídeo, diatomácea, radiolário e coral.** *Fonte: Monteiro et. al. (2016); fickleandfreckled (wikimedia commons); Andreas Drews (https://pxhere.com/en/photo/239774); e coral por Hannes Grabe/AWI (wikimedia commons), respectivamente.*

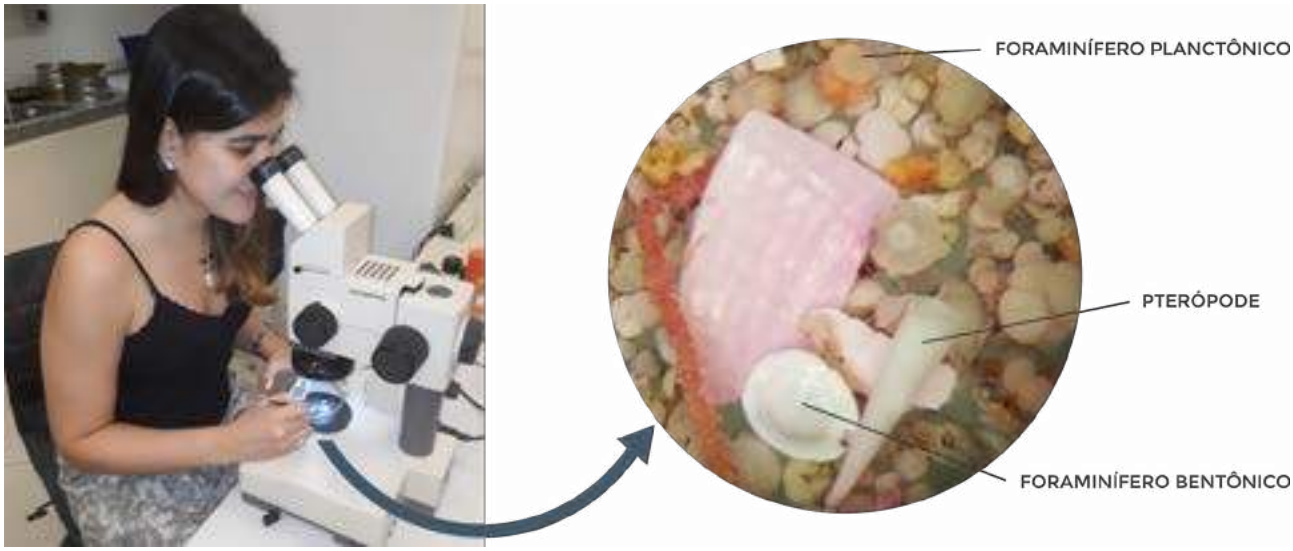



**FIGURA 3. Amostra sedimentar coletada na Bacia de Santos, a 700 metros de profundidade, contendo foraminíferos e pterópodes. Utiliza-se um estereomicroscópio com aumento de pelo menos 80 vezes para estudo desses organismos.** *Fonte: Arquivo pessoal de Cintia Yamashita e Ana C. Santarosa.*

Os sedimentos biogênicos podem ser formados também por influência de metabolismo da comunidade microbiana presente no ambiente, que induz a precipitação química de minerais carbonáticos "*in situ*" e aprisionamento de sedimentos terrígenos, formando os depósitos denominados de microbialitos. Além desses depósitos, ocorrem no fundo oceânico bioconstruções, também conhecidas como recifes, que são considerados edifícios formados por esqueletos carbonáticos de organismos, que não sofrem transporte.

### 3.3 Autigênico

Os sedimentos autigênicos são aqueles formados no mesmo local onde estão presentes, a partir de lentas reações físico-químicas entre compostos minerais específicos e a água do mar. Os principais representantes, e que são considerados recursos minerais de interesse econômico, são as acumulações de óxidos e hidróxidos de manganês e ferro em forma de nódulos polimetálicos na superfície do fundo marinho, com tamanhos que variam entre 0,5 a 10 cm (Fig. 4). Depósitos hidrotermais também são autigênicos, precipitando-se em torno de cordilheiras ativas onde a circulação hidrotérmica lixivia certos tipos de metais da rocha basáltica e transporta o material dissolvido para o fundo marinho. As condições oxidantes e o resfriamento dessas soluções hidrotermais resultam na precipitação de óxidos e hidróxidos de Fe e Mn, além de sulfetos e sulfatos. Esses depósitos são predominantemente encontrados em regiões profundas, onde o ambiente é calmo e estável, favorecendo as lentas reações físico-químicas envolvidas na sua formação.

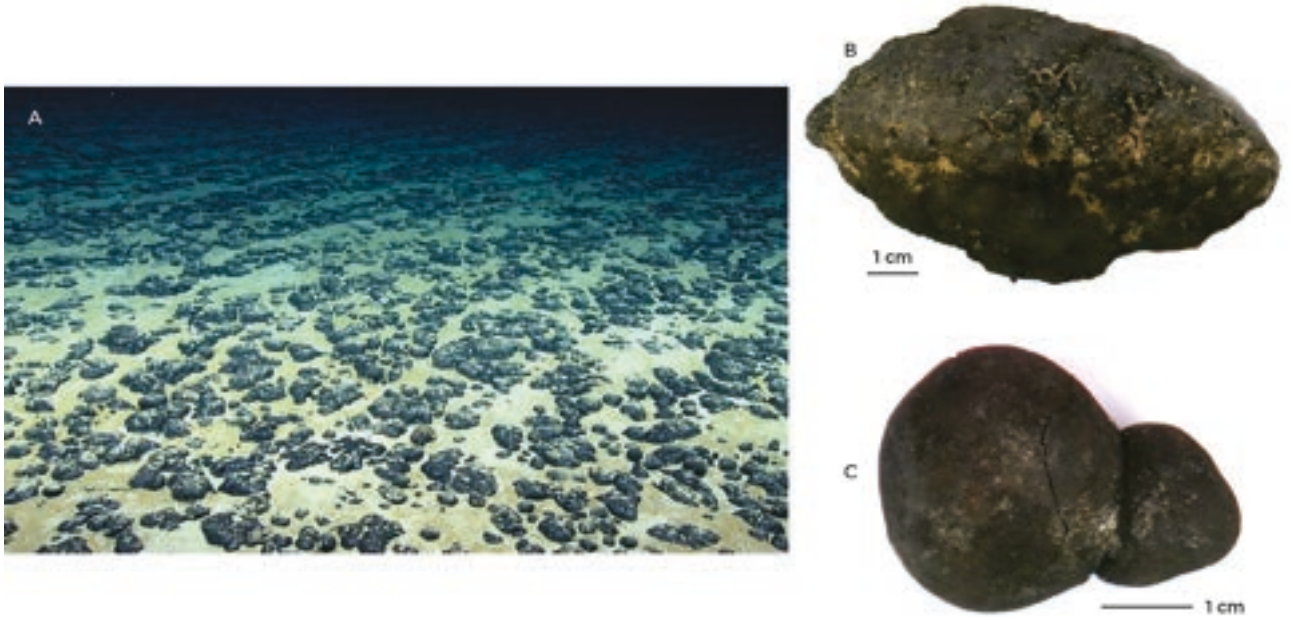



**FIGURA 4. A) Depósito marinho de nódulos polimetálicos.** *Fonte: NOAA.* **Detalhe de exemplares coletados nos oceanos Pacífico (B) e Índico (C).** *Arquivo pessoal cedido por Luigi Jovane.*

Outro importante exemplo de depósito autigênico são os evaporitos. Sua formação é favorecida em locais de clima árido e de circulação marinha restrita, onde o processo de evaporação excede a quantidade total de água proveniente de chuvas e descargas de rios e córregos. Esses depósitos apresentam minerais evaporíticos de grande interesse econômico, utilizados nas indústrias química, agrícola e de construção. Dentre esses, podemos citar a halita, mais conhecida como "sal de cozinha" e a gipsita, utilizada tanto na fabricação de gesso quanto para correção de solos na agricultura. Depósitos evaporíticos também desempenham um papel significativo como rochas selantes de hidrocarbonetos, possibilitando o acúmulo de petróleo.

## VOCÊ SABIA?

**Os depósitos de sedimentos autigênicos marinhos são grandes "minas de ouro".**

O estoque continental de alguns minerais encontram-se próximo ao seu esgotamento. Devido a dificuldade de extração, os estoques de muitos minerais marinhos, principalmente os de grande profundidade, foram pouco ou nunca explorados, possuindo um grande volume de minerais. Com o avanço da tecnologia para sua extração e aumento de sua demanda para componentes eletrônicos, empresas terão o interesse num futuro próximo de explorar estas "minas de ouro" profundas.

CONTEÚDO DE METAIS EM NÓDULOS DE MANGANÊS DA ZONA CLARION-CLIPPERTON NO OCEANO PACÍFICO

| ELEMENTO | MANGANÊS | NÍQUEL | COBRE | TITÂNIO | ÓXIDOS DE TERRA RARA |
|---|---|---|---|---|---|
| PESO (MILHÕES DE TONELADAS) | 5992 | 274 | 226 | 67 | 15 |

# 4. Distribuição dos sedimentos marinhos

## 4.1 Como se transportam?

Os principais meios de transporte dos sedimentos até o oceano ou dentro do ambiente oceânico são o vento, a água e a gravidade, carregando o sedimento de uma área fonte de sedimentos até seu destino final no oceano. Esses três agentes de transporte podem agir de diferentes formas sobre os sedimentos, dando origem a diferentes tipos de transporte. A força desses agentes pode agir sobre um grão individual, fazendo o transporte grão a grão por rolamento, rastejamento, saltação ou suspensão (Fig. 5), ou sobre uma massa de grãos, dando origem a transportes de massa como avalanches, correntes de turbidez e areias movediças. O vento e a água podem atuar sobre grãos individuais de sedimento enquanto a gravidade atua em massas de sedimento, como será detalhado adiante.

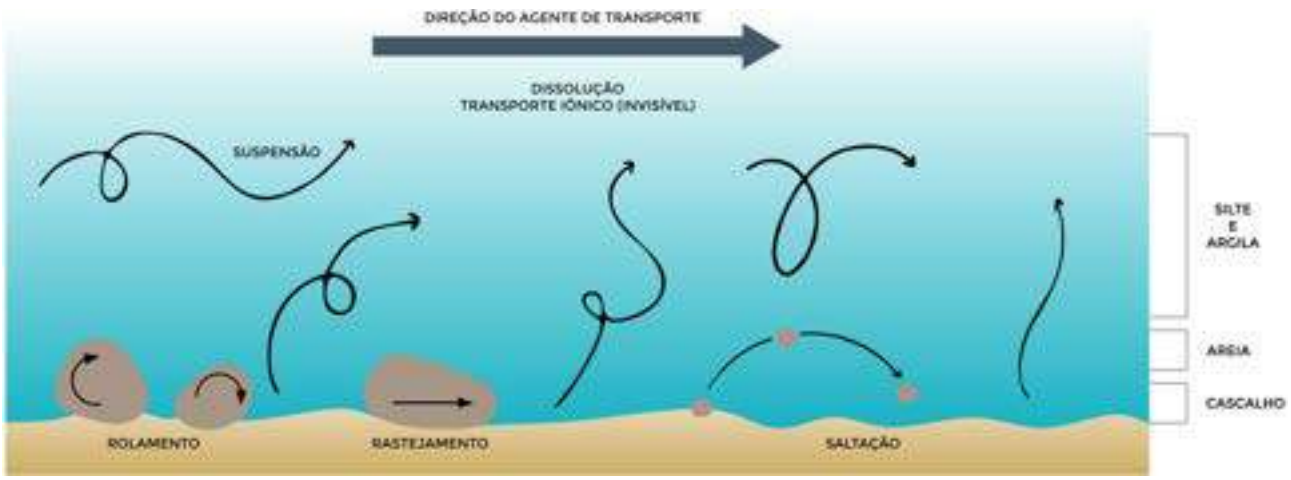



**FIGURA 5.** Representação gráfica do transporte de sedimentos e elementos para a formação de sedimentos (transporte iônico). À direita, é indicada a faixa de tamanho de grão em que cada tipo de transporte atua predominantemente. *Ilustração: Leandro Coelho.*

O que determina a ocorrência e o tipo de transporte em grãos individuais de sedimento é a interação entre as características do agente de transporte, o vento ou a água, e do próprio sedimento. A principal relação determinante do transporte é a velocidade, também chamada de energia, do agente de transporte e o tamanho do grão de sedimento (Fig. 6). Quanto maior o sedimento, maior será a energia necessária para sua mobilização e quanto maior a energia do agente de transporte, mais efetivo será o transporte. Como exemplo, imagine grãos de areia em uma praia; em dias em que a brisa marítima na praia é fraca, os grãos de areia permanecem parados mesmo que estejam sujeitos a ação do vento sobre eles. No entanto, quando a brisa marítima se torna moderada, é possível observar alguns grãos de areia rolando (rolamento) ou saltando (saltação) sobre o chão; e se você olhar para uma conchinha que esteja também no chão da praia, ela ainda estará parada, pois é pesada demais para ser movida por aquela brisa marítima. Porém, em dias em que a brisa marítima é intensa, o vento pode ser suficiente para remover os grãos de areia do chão, carregando-os no ar (suspensão) por distâncias maiores; e dependendo da força do vento, a concha que antes ficava parada, pode até rolar ou saltar sobre o chão da praia.

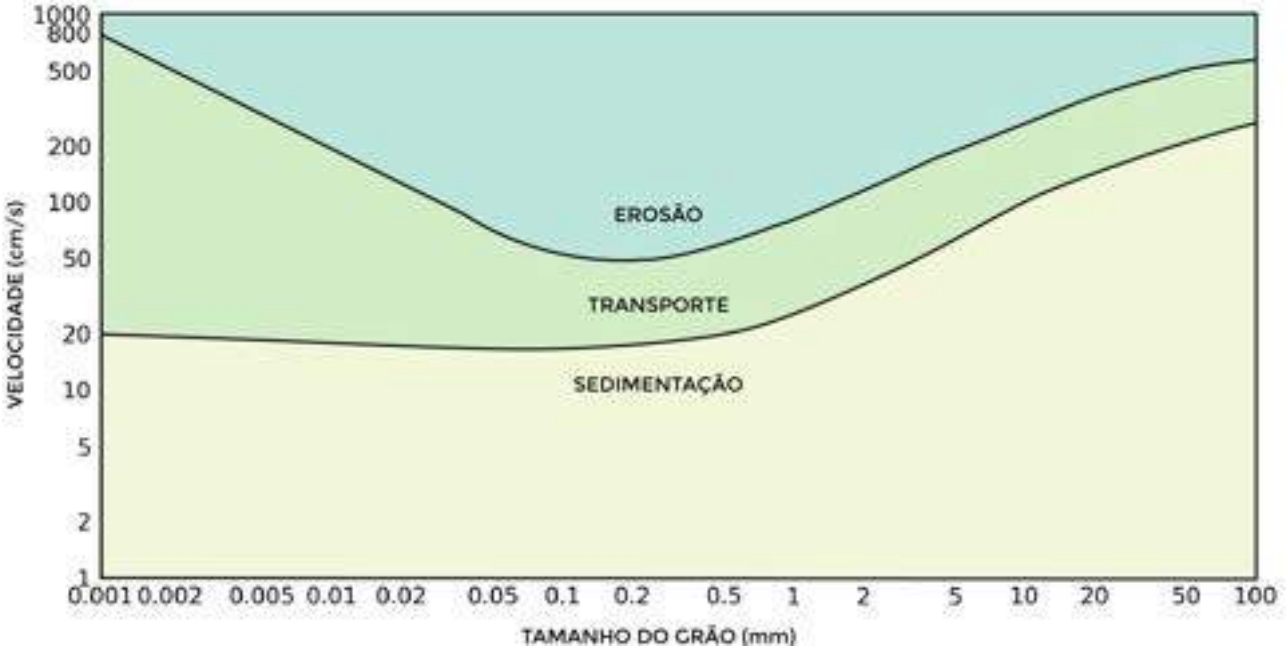



**FIGURA 6.** O diagrama de Hjulstrom-Sundborg ilustra a relação entre a velocidade do agente de transporte (água ou vento) e o tamanho dos grãos do sedimento. Para grãos de tamanho maior, em termos gerais é necessária uma maior velocidade do agente geológico, tanto para causar erosão quanto para o seu transporte. Note que para sedimentos de tamanho reduzido (< 0,1 mm), a velocidade do agente geológico necessária para erodir o sedimento se torna crescente conforme o tamanho do grão reduz, devido à tendência de coesão de sedimentos de granulometria muito fina.

No caso dos sedimentos de origem química apresentados no item 3.3, o sedimento é formado no próprio local de deposição do sedimento. No entanto, ainda assim ocorre transporte dos elementos que formarão o sedimento de uma área fonte para a área de deposição. Nesse caso, os elementos que formarão o sedimento químico são transportados dissolvidos na água na forma de íons, dando nome a esse tipo de transporte, transporte iônico (Fig. 5). Quando o material em solução encontra condições ideais à formação de compostos sólidos, ocorre então a precipitação desse material, transformando-se assim em sedimento.

Os principais agentes de transporte de sedimentos das áreas continentais para os oceanos são o vento e a água. O transporte eólico transporta os sedimentos principalmente por suspensão, pelo movimento do ar. Os sedimentos também podem ser transportados para o ambiente marinho pela

água, tanto em sua forma líquida ou sólida pela ação de rios e geleiras, respectivamente. Os rios são considerados os mais importantes meios de transporte de sedimentos e transportam os materiais de três maneiras diferentes: por rolamento, por suspensão e por solução (transporte iônico) (Fig. 5). O transporte pelo gelo, importante em áreas alpinas e/ou polares, é originado pela ação da gravidade, através da acumulação de neve. Os sedimentos podem ser transportados pelas geleiras na sua superfície, no seu interior ou na sua região basal. Blocos de gelo que se desprendem das geleiras podem transportar fragmentos de minerais, de rochas pré-existentes e de partículas finas que se depositaram na sua formação (Fig. 7).

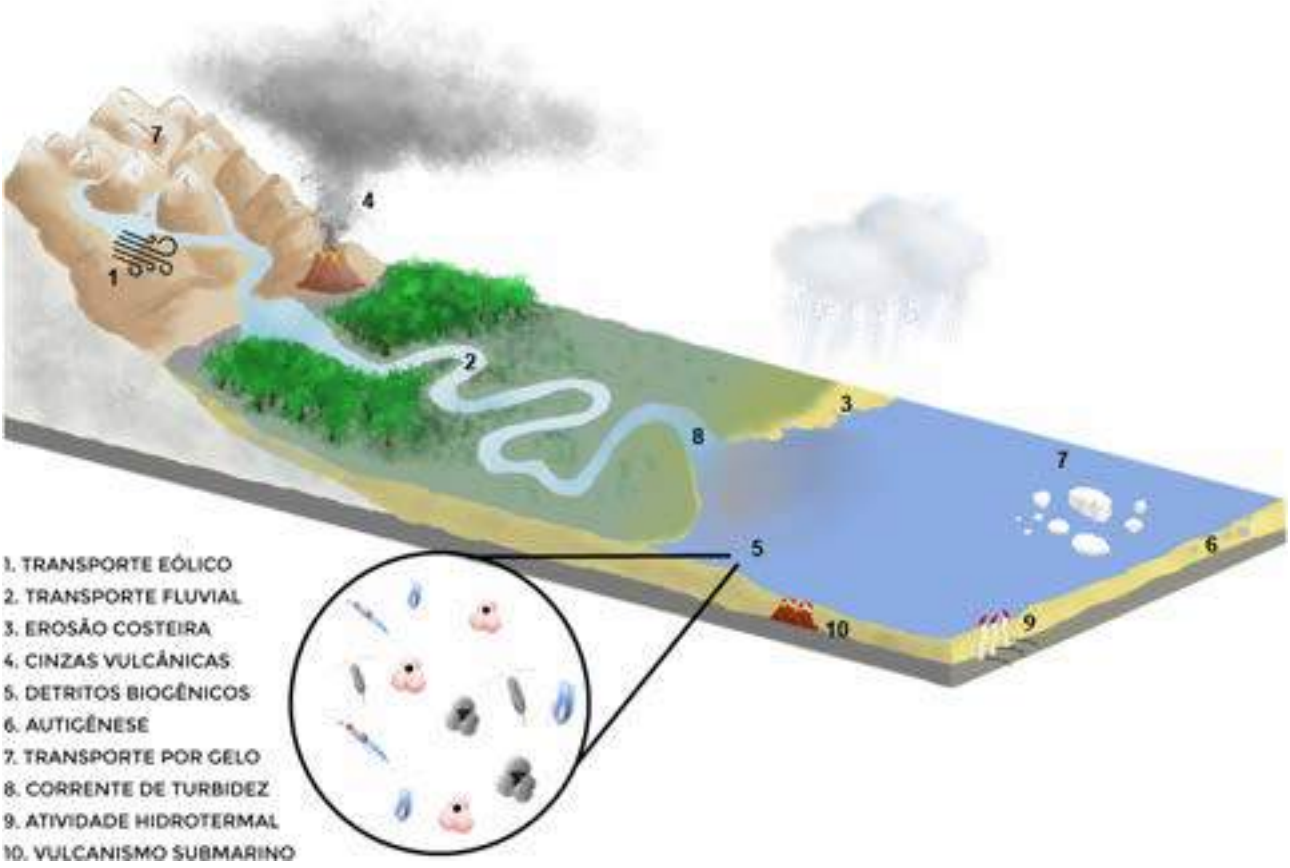
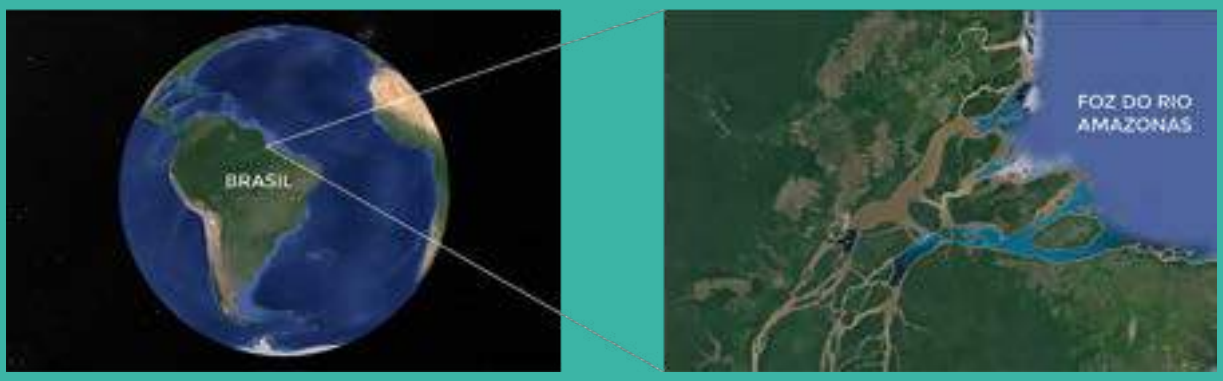



**FIGURA 7. Modelo de deposição e transporte dos sedimentos.** *Adaptado de Carlos E. L. Elmadjian.*

## VOCÊ SABIA?

**O Rio Amazonas transporta anualmente cerca de 170 milhões de toneladas de substâncias em solução e 425 milhões de toneladas em suspensão.**



Ao chegar ao ambiente marinho, parte dos sedimentos é depositada ao longo das margens continentais, onde são depositadas predominantemente as partículas terrígenas, transportadas, em geral, por rolamento ou suspensão. Além das partículas terrígenas, são depositados sedimentos biogênicos em algumas áreas de alta produtividade biológica ou condições físico químicas favoráveis. Depósitos de sedimentos terrígenos em bacias oceânicas são formados quase que exclusivamente por argilas transportadas para as desembocaduras dos rios e depositadas onde a sedimentação de partículas são favorecidas.

Nos oceanos os sedimentos podem ser transportados ou redistribuídos por diferentes formas de correntes. Quem observa as ondas se quebrando na beira da praia e o movimento de subida e descida das marés pode observar a quantidade de sedimento que é mobilizado do fundo das praias pelas correntes formadas pela ação das ondas. No entanto, um grande volume de sedimentos é transportado nos oceanos sem que a gente consiga observar esse transporte. Existem diferentes tipos de correntes oceânicas que podem ser formadas pela interação dos ventos com a superfície dos oceanos e também por diferenças de densidade entre águas quentes/frias e salinas/menos salinas.

As ondas, marés e correntes oceânicas transportam sedimentos pelos oceanos de forma contínua, e estão sempre agindo sobre os sedimentos de forma mais ou menos intensa, mas de forma ininterrupta. Assim como nos continentes, em que vemos a ocorrência de deslizamentos de terra episódicos decorrentes de eventos meteorológicos intensos ou às vezes da própria instabilidade do terreno e ação da gravidade, os oceanos também possuem transporte de sedimentos episódicos que podem ser causados por tempestades e também por gravidade.

Em alguns casos, os grãos do sedimento e o agente de transporte (água) encontram-se fortemente associados, formando uma massa única (por exemplo, fluxo de detritos). Nesses casos, o transporte pode ocorrer na forma de uma massa de sedimentos, onde o sedimento e o agente de transporte se movimentam igualmente, mantendo forte associação ao longo do movimento. Diferentemente do transporte grão a grão, em que o grão pode apresentar uma velocidade e trajetória independente da velocidade e direção do agente de transporte, no transporte de massa, o sedimento e o agente de transporte terão a mesma velocidade e trajetória. Esse tipo de transporte é frequentemente noticiado nos meios de comunicação, quando ocorrem deslizamentos de terra e avalanches, com consequências dramáticas (perdas de vidas humanas e bens materiais).

A interação dos ventos com o mar torna-se mais intensa em eventos de tempestade e pode haver interação do vento com o fundo marinho. Durante esses eventos, substratos sedimentares, que em situações cotidianas não sofrem transporte, podem ser mobilizados por ondas geradas por vento. No decurso de tempestades violentas, sedimentos com tamanho de grão, que comumente são transportados em uma dada região e profundidade oceânica, podem ser remobilizados e, uma vez colocados em suspensão, levados para áreas diferentes. Esse tipo de transporte não ocorre em situações normais, sendo então caracterizado como transporte episódico.

Em regiões marinhas onde há elevado gradiente batimétrico, como no talude (ver capítulo **O Relevo Oceânico**), a instabilidade causada pela sobrecarga de sedimentos, movimentos associados a atividade sísmica e outros eventos que podem ocorrer no fundo marinho podem resultar no transporte de grandes volumes de sedimentos na forma de fluxos de massa. Essa forma de transporte é chamada de corrente de turbidez, capaz de atingir altas velocidades (até algumas dezenas de km/h) e transportar os grãos de sedimento de forma conjunta em um fluxo de água e sedimentos (Fig. 8).

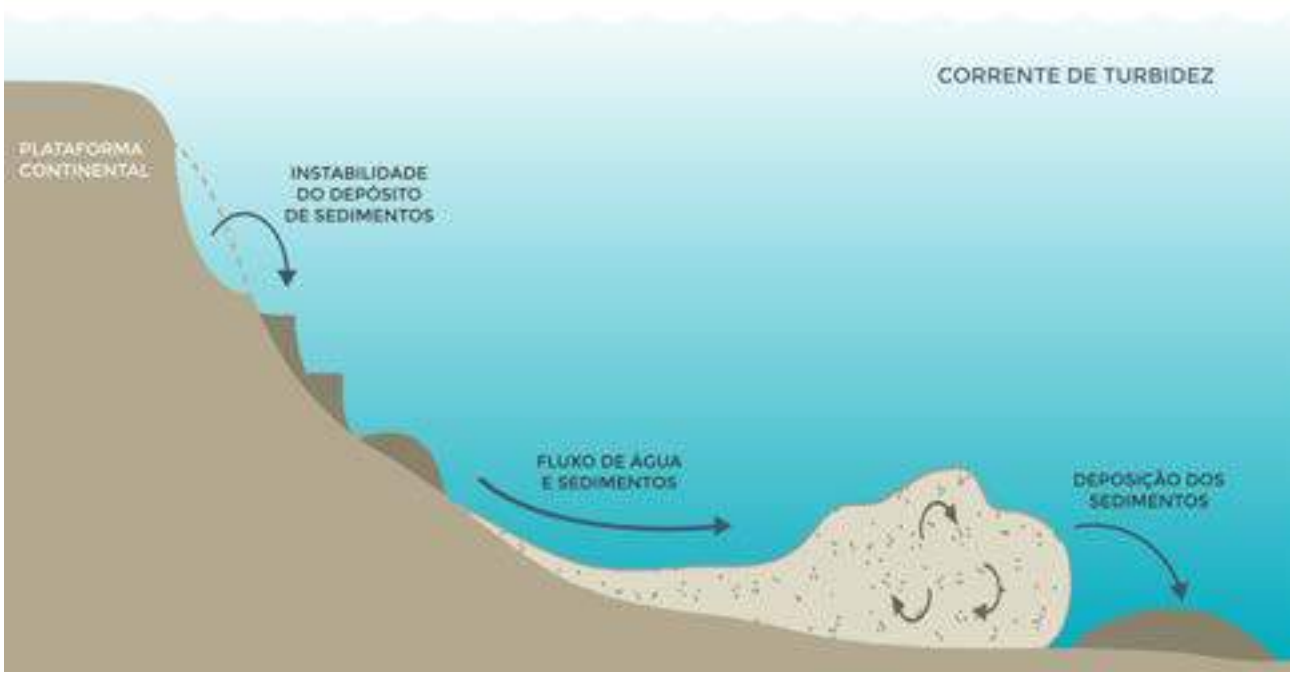



**FIGURA 8.** **As correntes de turbidez é uma forma de transporte de sedimentos decorrente da instabilidade do fundo marinho. Dessa forma, sedimentos de diâmetro maior, que são comumente encontrados mais próximos aos continentes, são depositados em locais mais distantes dos continentes e profundos.** *Adaptado de NOAA's National Ocean Service*.

## VOCÊ SABIA?

**O transporte de sedimentos marinhos já causou a interrupção da comunicação global entre os continentes.**

Em 1929, uma corrente de turbidez no Atântico Norte causou danos em cabos de telégrafos nos fundos oceânicos. Estima-se que nesse transporte episódico de sedimentos tenham sido mobilizados cerca de 200 bilhões de m³ de sedimentos, que foram deslocados por 700 km, atingindo velocidades máximas de 80km/h.

Além de transportar os sedimentos, os agentes de transporte ainda causam alterações no sedimento, o que é chamado de maturação do sedimento. Ao longo do seu transporte, os sedimentos sofrem colisões e atritos entre si e com o substrato (interações físicas), além de interações químicas e biológicas. Essas interações fazem com que o sedimento altere seu tamanho, formato e até composição. Quanto maior o transporte sofrido pelo sedimento, maior o grau de alteração ou maturação do sedimento. Ao longo do transporte, o sedimento tende ser selecionado, arredondado e tornar seus grãos esféricos.

## VOCÊ SABIA?

**O tamanho das partículas, o grau de seleção, arredondamento e esfericidade são frequentemente utilizados para classificar os sedimentos.**

Ainda que matacão, bloco e seixos sejam encontrados nos oceanos, a maioria dos sedimentos é constituída por material formado por partículas mais finas, como areia, silte e argila. Geralmente, quanto menor for o tamanho das partículas, mais facilmente poderão ser transportados por correntes marinhas. Os sedimentos podem ser compostos de partículas de tamanhos semelhantes ou por uma mistura de grãos de tamanhos variados.

Os sedimentos compostos de partículas de tamanhos semelhantes recebem o nome de bem selecionados e aqueles com grãos de diferentes tamanhos, de mal selecionados. Tanto a seleção como o grau de arredondamento e esfericidade estão ligados com a energia do ambiente que a transportou. Em regiões de alta energia encontramos grãos mais angulares e mal selecionados.

TAMANHO DO GRÃO

| TAMANHO (mm) | MATACÃO | BLOCO | SEIXO | GRÂNULO | AREIA MUITO GROSSA | AREIA GROSSA | AREIA MÉDIA | AREIA FINA | AREIA MUITO FINA | SILTE | ARGILA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1024 - 256 | 256 - 64 | 64 - 4 | 4 - 2 | 2 - 1 | 1 - 0,5 | 0,5 - 0,25 | 0,25 - 0,125 | 0,125 - 0,062 | 0,062 - 0,004 | < 0,004 |

Além disso, diferentes formas de transporte resultam em diferentes tipos de interação. O transporte pelo vento torna o sedimento mais suscetível a interações físicas (choques e atritos) enquanto o transporte pela água aumenta a ocorrência de interações químicas (dissolução e outras reações químicas). Dessa forma, através da observação dos grãos de um sedimento é possível inferir a distância percorrida pelo sedimento e também o meio de transporte utilizado.

Em geral, o sedimento de praias tem tamanho menor e coloração mais clara do que sedimentos de rios, onde encontramos maior quantidade de cascalho e seixos mais escuros. Isso ocorre porque o sedimento presente nas praias, estiveram sujeitos, em geral, a muitos ciclos sedimentares, enquanto os sedimentos dos rios são menos retrabalhados e comumente se encontram próximos da rocha mãe. Ao longo do seu caminho os sedimentos se desgastam, diminuem de tamanho e sofrem alterações químicas que resultam na perda de cor do grão. No entanto, existe uma grande variedade de sedimentos

de praia; praias com areias mais claras ou escuras; com maior ou menor quantidade de conchas; e até mesmo praias rochosas. Os diferentes tipos de sedimentos de praias podem indicar, portanto, o caminho que o grão percorreu até chegar à praia, seja um caminho mais curto e com baixa energia ou mais longo e com alta energia.

## 4.2 Como se depositam?

Os diferentes tipos de sedimentos que ocorrem no fundo marinho não apresentam distribuição homogênea nos oceanos, variando de um local para outro. O acúmulo de determinado tipo de sedimento dependerá da quantidade de material proveniente da fonte, da distância da fonte, do tempo que o sedimento teve para acumular, da preservação do sedimento e da quantidade de outros tipos de sedimentos que também é adicionada ao sistema.

A deposição e o transporte dos sedimentos terrígenos no ambiente marinho obedecem a Lei de Stokes (equação matemática que expressa a velocidade de deposição das partículas). Portanto, de maneira genérica, a deposição de areia (vários tamanhos) ocorre nas margens continentais, passando à fração síltica nas plataformas continentais e argila nas regiões abissais. Porém, podemos encontrar areias nas regiões abissais, trazidas pelas correntes de turbidez ou cânions (vales de antigos rios, que corriam na plataforma continental em épocas que o nível do mar era mais baixo).

Sedimentos detríticos ou terrígenos ocorrem próximos às margens continentais, onde a descarga de rios e outros processos depositam grandes quantidades desses sedimentos na plataforma continental. Nas regiões polares, os sedimentos terrígenos também são comuns já que a espessa cobertura de gelo pode limitar a produção primária e a ruptura e derretimento das geleiras sobre os oceanos causa a deposição de partículas dos mais variados tamanhos. Sedimentos terrígenos de frações maiores (por exemplo areia) são menos comuns na porção central dos oceanos, pois essas áreas estão muito longe das fontes para que esses sedimentos se acumulem. As argilas pelágicas ou argilas vermelhas, por outro lado, são a exceção e devido ao seu diminuto tamanho, são facilmente dispersadas pelo vento e por correntes. Esse sedimento é composto principalmente por quartzo e argilominerais (por exemplo caulinita e ilita) e sua cor vermelha ou marrom é atribuída ao processo de oxidação do ferro nos sedimentos.

Os sedimentos biogênicos, conforme vimos anteriormente, são formados principalmente pelos corais, algas calcárias, pelas vasas calcárias (compostas por cocolitoforídeos, foraminíferos e pterópodes) e pelas vasas silicosas (compostas por radiolários, diatomáceas e em menor quantidade silicoflagelados e espículas de esponjas). A ocorrência dessas vasas está relacionada com o balanço entre a produtividade biológica do plâncton, que ocorre nas águas superficiais, o processo de dissolução a que os fragmentos e estruturas esqueletais dos organismos estão sujeitos tanto na coluna d'água como no fundo oceânico, e à diluição por outros tipos de sedimentos.

O carbonato de cálcio se dissolve mais facilmente em águas frias e, portanto, a maior parte desse tipo de sedimento concentra-se nas regiões mais rasas e elevadas dos oceanos, como cordilheiras e plataformas, localizadas em zonas tropicais, subtropicais e temperadas, onde as temperaturas mais amenas favorecem o desenvolvimento e a proliferação dos organismos calcários. Em determinada profundidade, conhecida como profundidade de compensação do carbonato (***PCC***), a taxa de fornecimento de carbonato de cálcio da superfície é igual à taxa de dissolução, devido ao aumento da pressão, diminuição da temperatura e aumento da concentração de $CO_2$ dissolvido na água. Portanto, abaixo da ***PCC***, em torno de 4.000 metros de profundidade, ocorre a dissolução dos minúsculos esqueletos de carbonato de cálcio e dessa forma, não há acúmulo de material biogênico calcário.

As vasas silicosas coincidem com regiões oceânicas ricas em nutrientes, onde altas concentrações de nitrogênio, fósforo e sílica na camada eufótica resultam dos processos de mistura vertical e ressurgência. As vasas de diatomáceas se depositam em duas faixas extensas, uma em torno da Antártica e a outra localizada na porção norte do oceano Pacífico. A presença marcante das vasas de diatomáceas nas regiões polares se deve à afinidade desses organismos para a sobrevivência em condições oceânicas frias. Já as vasas silicosas ricas em radiolários são observadas nas regiões equatoriais onde ocorre o fenômeno de ressurgência.

O predomínio das partículas biogênicas ocorre em assoalhos das bacias oceânicas, onde o aporte de material terrígeno é pequeno e em plataformas rasas ao longo do Equador. Em regiões mais profundas e distantes da costa, predomina a ocorrência de vasas carbonáticas e silicosas. Depósitos de minerais autigênicos podem ser encontrados nas margens continentais ou nos assoalhos das bacias oceânicas em lugares onde tenham condições físico-químicas (temperatura, Eh, pH) adequadas para a cristalização dos minerais, a partir dos íons presentes na água do mar.

A Figura 9 mostra de maneira genérica o resultado da interação entre os fatores acima citados e apresenta a distribuição dos diferentes tipos de sedimento no fundo marinho.

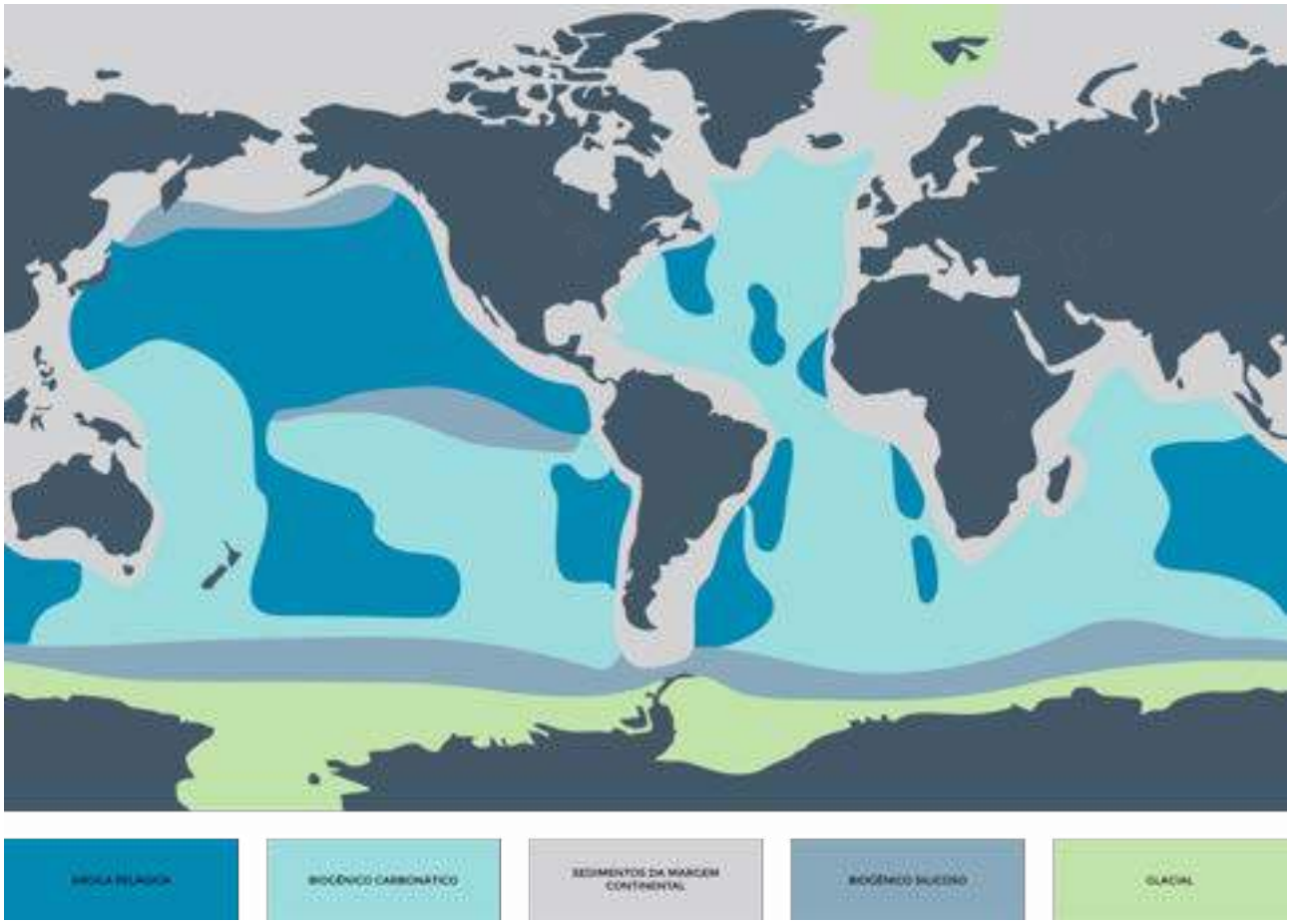



**FIGURA 9. Distribuição dos sedimentos no assoalho oceânico.** *Ilustração: Leandro Coelho, adaptada de Wikimedia Commons.*

As características da sedimentação marinha tornam os sedimentos depositados nos oceanos um arquivo de informações históricas sobre a Terra e, por isso, é a principal ferramenta utilizada para estudar as mudanças ambientais que ocorrem no meio marinho e também sobre os continentes. Em contraste à sedimentação continental, que está frequentemente sujeita à ação erosiva de chuvas e ventos, a sedimentação marinha em ambientes profundos ocorre geralmente de maneira lenta e constante. O sedimento depositado é conservado de forma sequencial e a análise de uma coluna

de sedimentos coletada nesses locais pode fornecer registros ambientais que abrangem até milhões de anos. Informações como o aumento e diminuição das calotas polares, variações da intensidade de chuvas sobre os continentes e o comportamento do campo magnético da Terra são algumas das informações que podem ser obtidas através do estudo de um testemunho marinho.

## 4.3 Sedimentos nos fundos marinhos: processos sedimentares marinhos

Os processos sedimentares marinhos são resultado da interação entre agentes geológicos e processos oceanográficos, que levam à formação dos depósitos de sedimentos que ocorrem nos fundos oceânicos. Como visto, a energia do agente geológico determina a ocorrência do intemperismo (erosão), transporte e sedimentação dos grãos detríticos que compõem o sedimento (Fig. 6). Em se tratando dos depósitos de sedimentos biogênicos e autigênicos, processos oceanográficos como aumento na produtividade primária, e mudanças físico-químicas dos oceanos (temperatura e pH, por exemplo) são de grande relevância. No entanto, esses processos não ocorrem de forma isolada. A ação do vento, por exemplo, num dado momento pode ao mesmo tempo estar dando origem a um novo grão de sedimento (erosão) e transportando outros grãos de sedimento; e ao reduzir sua intensidade, o grão se deposita.

O desgaste das rochas e, portanto, do relevo continental, e o transporte de sedimentos pela ação dos agentes geológicos referidos, podem levar ao aplanamento das paisagens caso não houvesse renovação do relevo da superfície da Terra pela atividade tectônica. Porém este planeta possui grande atividade interna. Os sedimentos depositados no fundo marinho, quer sejam detríticos, biogênicos, autigênicos ou cosmogênicos podem tanto retornar ao interior do planeta como também ser novamente expostos à superfície continental. Em regiões de contato entre placas tectônicas, os sedimentos do fundo marinho podem ser subductados e consumidos pelo calor do interior do planeta. Os elementos que compõem os sedimentos marinhos então retornam ao manto terrestre, e no contexto do ciclo das rochas, ao longo do tempo geológico, poderão retornar à superfície terrestre dando continuidade à formação de rochas (Fig. 10). Pode ocorrer exposição do fundo marinho ao longo da plataforma continental, devido a variações no nível do mar, e em região de contato entre placas tectônicas, onde pode haver o soerguimento de camadas de sedimento.

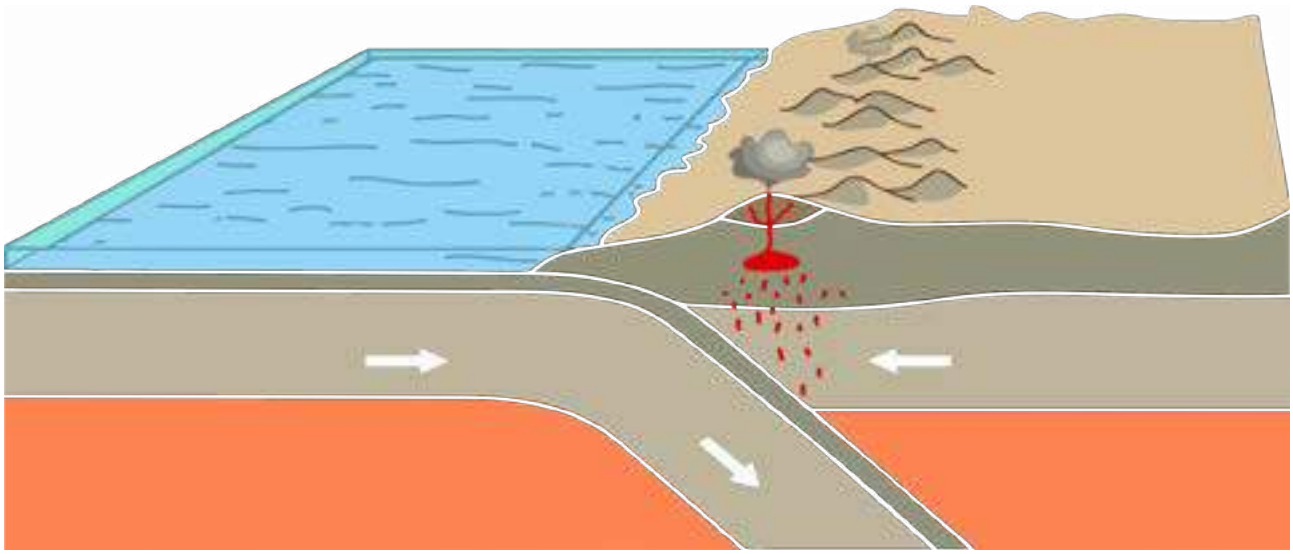


**FIGURA 10.** **Representação esquemática da renovação do relevo continental, permitindo que o ciclo sedimentar não seja interrompido. Sedimentos do fundo oceânico retornam ao interior terrestre, mais tarde se tornando novamente rochas suscetíveis à erosão, transporte e sedimentação.** *Adaptado de U.S. Geological Survey.*

Dessa forma, os agentes geológicos e oceanográficos que levam à sedimentação de sedimentos marinhos ocorrem dentro de um grande ciclo, que leva milhares até milhões de anos para se completar e o estudo dos processos envolvidos nesse ciclo permite entender a dinâmica e a história do nosso planeta.

## VOCÊ SABIA?

**Sedimentos marinhos podem ser observados apenas em fundos oceânicos?**

Não. Sedimentos tipicamente marinhos podem ser observados em áreas emersas atualmente. Sedimentos depositados na fase inicial da formação do Oceano Atlântico hoje se encontram em áreas continentais, devido a fenômenos tectônicos ocorridos na região ao longo do tempo geológico.

As finas camadas (folhelhos) de silte da Formação Teresina, datada em mais de 250 milhões de anos, podem ser observadas na Rodovia Castelo Branco (km 160). *Foto: arquivo pessoal de Fabiane S. Iwai.*

## Referências Bibliográficas

BEHNAM, A.; VISBECK, M. 2014. Marine Resources–Opportunities and Risks. Hamburg, Germany.

GARRISON, T. 2010. Fundamentos de oceanografia. São Paulo, Cengage Learning. 426p.

KENNETT, J.P. 1982. Marine geology. New Jersey, Prentice Hall. 813p.

MONTEIRO, F.M., BACH, L.T., BROWNLEE, C., BOWN, P., RICKABY, R.E.M., POULTON, A.J., TYRRELL, T., BEAUFORT, L., DUTKIEWICZ, S., GIBBS, S., GUTOWSKA, M.A., LEE, R., RIEBESELL, U., YOUNG, J. & RIDGWELL, A. 2016. Why marine phytoplankton calcify. Science Advances, 2(7), E1501822. DOI: 10.1126/sciadv.1501822.

NETO, J.A.B, PONZI, V.R.A. & SICHEL, S.E.L. 2004. Introdução à geologia marinha. Rio de Janeiro, Interciência. 279p.

OPEN UNIVERSITY COURSE TEAM. 1989. Ocean chemistry and deep-sea sediments. Oxford, Pergamon Press, 1 ed. 134p.

SUGUIO, K. 1973. Introdução à sedimentologia. São Paulo, Univ. de São Paulo, Edgard Blücker Ltda. 317p.

SUGUIO, K. 1980. Rochas Sedimentares. São Paulo, Univ. de São Paulo, Edgard Blücker Ltda. 500p.

TEIXEIRA, W., TOLEDO, M.C.M., FRANCHILD, T.R. & TAIOLI, F. 2000. Decifrando a Terra. São Paulo, Oficina de Textos. 557p.

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 5*

# METODOLOGIAS EM GEOFÍSICA MARINHA

*Daniel Pavani Vicente Alves & Luigi Jovane*

REVISÃO: ALEX BASTOS (UFES), MARCO IANNIRUBERTO (UNB), TEREZA ARAUJO (UFPE)
E DENISE MOURA (IAG-USP)

CITAÇÃO SUGERIDA: ALVES, Daniel Pavani Vicente; JOVANE, Luigi. Metodologias em geofísica marinha. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 5: p. 107-123.

# Metodologias em Geofísica Marinha

*Daniel Pavani Vicente Alves & Luigi Jovane*

O estudo da geologia de qualquer local se inicia na observação. Depois de observar, são necessárias amostras das rochas e sedimentos para que sejam realizadas análises e construção dos modelos geológicos. Entretanto, no ambiente marinho, essa etapa nem sempre é tão simples, já que entre os pesquisadores e o leito marinho está a coluna d'água. Com centenas ou milhares de metros de água entre o observador e o fundo marinho, não é possível identificar afloramentos, montes submarinos, diferentes tipos de sedimento e rochas ou quaisquer outras características geológicas que em terra são muito mais facilmente observadas. Para contornar essa limitação, os estudos de Oceanografia Geológica por vezes utilizam amostragens indiretas do fundo marinho, e cada uma delas fornece informações diferentes sobre as características do ambiente.

Os **métodos indiretos** são assim chamados porque utilizam propriedades físicas do meio, seja ele a água ou o substrato, para inferir outras propriedades. Utilizando-se, por exemplo, a propagação do som na água, é possível determinar a distância de alvos desde o emissor desse som – assim como fazem animais na natureza, como os golfinhos ou os morcegos. Por isso, a utilização de métodos indiretos traz grandes vantagens para o estudo do fundo do mar, como cobertura espacial, velocidade de aquisição de dados, amarração com dados diretos, como amostras de sedimentos, entre outras. Dentre os métodos indiretos existentes, no ambiente marinho, destacam-se os **métodos acústicos** e os **métodos potenciais**.

## VOCÊ SABIA?

**Sonares vêm sendo utilizados até hoje em dia para a identificação de minas submarinas.**

Um dos grandes problemas decorrentes das grandes guerras do início do século XX foram as minas submarinas lançadas por diversas nações. Até hoje, em diferentes locais do mundo, sonares são utilizados para a identificação dessas minas para sua futura desativação. *Imagem: US Naval Institute*.

# 1. Métodos acústicos

Talvez os mais importantes métodos indiretos utilizados no ambiente marinho sejam os métodos acústicos, ou seja, todos aqueles baseados na emissão de ondas sonoras. De forma geral, um método acústico funciona pela emissão e recepção das ondas sonoras após sua interação com o substrato. Essa interação pode gerar dados simples como o tempo de retorno da onda, até dados mais complexos, como a fase ou amplitude de retorno dessa onda. Assim, cada uma dessas interações entre o substrato e as ondas acústicas está relacionada a uma forma bastante específica de geração e emissão das ondas.

## 1.1 Ecobatimetria

A **batimetria** é a medição da espessura da coluna d'água, ou seja, das profundidades do leito oceânico. Esse tipo de medição é realizado há muito tempo, das formas mais variadas, desde estacas de madeiras a prumos. Por sua vez, a **ecobatimetria** é a medição destes valores a partir de ondas acústicas, isto é, de forma indireta. Utilizando métodos de emissão reprodutíveis, transdutores emitem um sinal acústico que percorre a coluna d'água, reflete no fundo e é registrado pelos receptores. Assim, o que a ecobatimetria essencialmente mede é o tempo que leva para um sinal emitido retornar após refletir no fundo do mar. A conversão desse tempo em profundidade é realizada posteriormente, a partir da **equação do espaço** e da velocidade de propagação de ondas acústicas na água do mar:

$$\Delta S = v \cdot \Delta t / 2$$

Ou seja, conhecendo-se a velocidade ($v$) de propagação da onda sonora na água do mar, e medindo-se o tempo de ida ou volta da onda sonora ($\Delta t/2$), chega-se ao espaço percorrido ($\Delta S$), ou seja, a **profundidade**. Um ponto importante: o som precisa viajar pela coluna d'água nos dois sentidos, ou seja, descendo e subindo novamente. Assim, o tempo medido pelos ecobatímetros é sempre o tempo duplo, isto é, tempo de ida + volta. Portanto, para a utilização da equação do espaço, esse tempo é sempre dividido por dois.

Dois métodos principais de ecobatimetria são atualmente utilizados: o monofeixe e o multifeixe. Seu funcionamento e resultados são diferentes e serão explicados a seguir. Entretanto, há etapas da operação que são as mesmas para ambos os métodos. Um levantamento batimétrico, seja ele mono ou multifeixe, deverá utilizar um ecobatímetro instalado em uma embarcação, responsável por emitir e receber o sinal refletido; um sistema de posicionamento, podendo ser GPS, DGPS ou RTK (ver mais à frente, no item 1.1.3), por exemplo; e um método de aferição da velocidade do som na coluna d'água.

### *1.1.1. Batimetria monofeixe*

Na **ecobatimetria monofeixe** é utilizado apenas um feixe de emissão acústica para medição das profundidades. Isso quer dizer que o ecobatímetro monofeixe emite um feixe acústico em direção ao leito marinho e recebe de volta o sinal refletido. Esse modo de operação gera medições pontuais da profundidade, ou seja, durante a navegação da embarcação, são coletados pontos consecutivos de leituras batimétricas (Fig. 1A). A quantidade de pontos coletados, portanto, dependerá de fatores como a velocidade da embarcação, a profundidade local e a taxa de amostragem do equipamento utilizado, por exemplo.

A batimetria monofeixe gera **seções batimétricas**, geralmente obtidas em malhas regulares que, posteriormente, podem ter seus dados de profundidade interpolados para obtenção de um mapa batimétrico. Apesar de equipamentos modernos possuírem altíssima precisão, isto é, com capacidade de identificar diferenças de profundidade da ordem de centímetros, eles possuem uma limitação intrínseca: a obtenção pontual de dados limita a cobertura espacial dos levantamentos. E é aí que entra a ecobatimetria multifeixe.

### *1.1.2. Batimetria multifeixe*

A **ecobatimetria multifeixe** surgiu justamente para ampliar a cobertura espacial dos levantamentos, eliminando (ou tentando eliminar) a necessidade de interpolação dos dados. O grande diferencial de um levantamento multifeixe é a possibilidade de cobertura total do fundo marinho (Fig. 1B). Ela é um tanto mais complexa, operando com diversos feixes de emissão, com equipamentos comumente utilizando valores de 256 ou 512 feixes. Esses feixes são emitidos transversalmente à trajetória da embarcação de aquisição (Fig. 2), realizando uma espécie de varredura do leito, com coberturas laterais que variam com a profundidade, mas que vão de poucas dezenas até centenas de metros. Assim, com essa varredura lateral, é possível obter dados batimétricos na totalidade da área de interesse, variando apenas o tempo de navegação para isso.

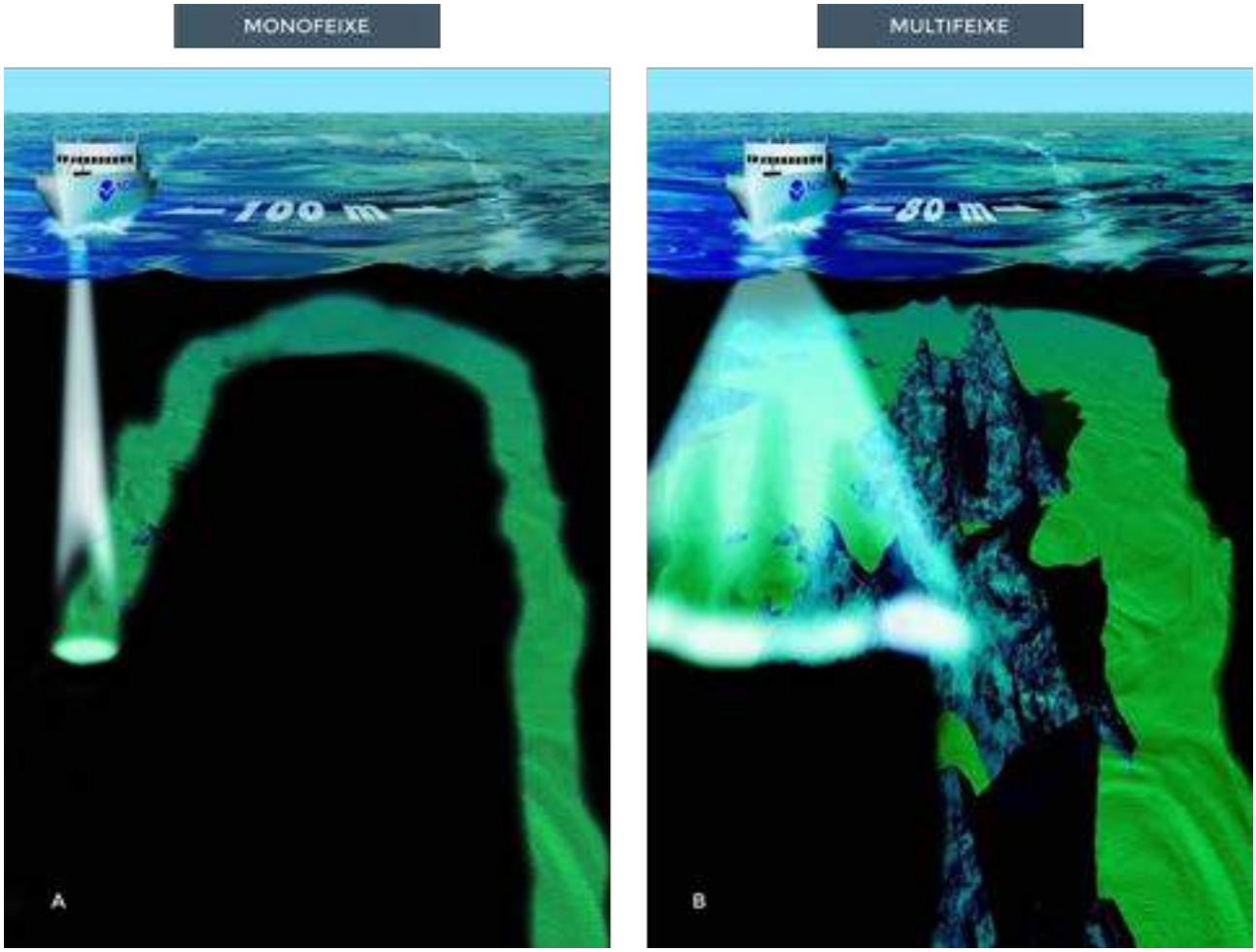



**FIGURA 1.** Apesar de funcionarem de forma similar, pela emissão e recepção de ondas sonoras refletidas pelo meio, os ecobatímetros monofeixe (A) e multifeixe (B) produzem resultados diferentes. Enquanto o sistema monofeixe resulta em dados batimétricos "em linha", o sistema multifeixe produz resultados em uma faixa de cobertura, permitindo até mesmo a cobertura total do leito marinho. *Fonte: NOAA*.

Apesar da maior complexidade do sistema e também do maior custo, a ecobatimetria multifeixe proporciona levantamentos batimétricos muito mais completos, rápidos e precisos, já que dispensa, em princípio, a interpolação de dados. Esse tipo de levantamento é utilizado quando o objetivo é a obtenção de dados muito precisos e os mais realistas possíveis, como para a criação e atualização de cartas náuticas, controle de dragagem de portos, definição da área de instalação de plataformas de petróleo, cabos submarinos, naufrágios e qualquer estrutura e/ou morfologia do fundo do mar, antrópica ou natural.

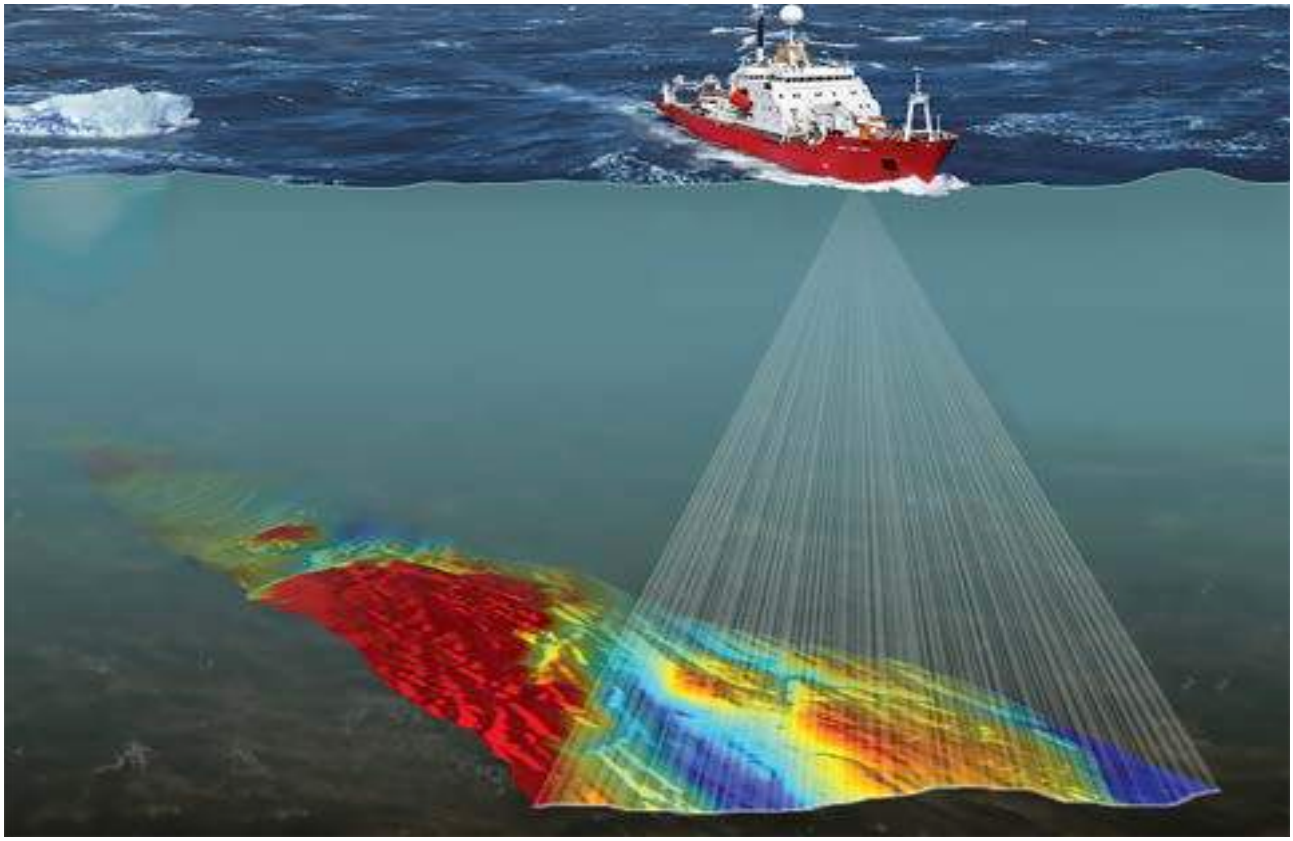


**FIGURA 2.** O sistema de ecobatimetria multifeixe admite inúmeros feixes sonoros transversalmente à trajetória do navio, fazendo uma leitura das profundidades em forma de "varredura" e permitindo até mesmo a cobertura total da área a ser estudada. *Fonte: British Antarctic Survey*.

### *1.1.3. Aferição da velocidade do som e sistema de posicionamento*

Por maior que seja a qualidade do ecobatímetro utilizado, todo e qualquer levantamento batimétrico necessita de duas informações que devem ser extremamente precisas: o valor da velocidade de propagação do som na água do mar local; e o posicionamento da embarcação utilizada.

A velocidade de propagação do som pode ser aferida de diferentes formas. Os testes de barra ("*bar check*", como é mais conhecido em inglês) são os mais simples e consistem na medição da profundidade entre o ecobatímetro e uma placa metálica, posicionada logo abaixo do emissor, a profundidades conhecidas e variadas, controladas pelo operador. Assim, sabendo-se a profundidade real da placa (determinada pelo comprimento da corda ou cabo utilizado), é possível ajustar a profundidade aferida pelo ecobatímetro, até que se encontre o valor da velocidade.

O teste de barra é bastante primitivo e contém muitas fontes de incertezas. Por isso, equipamentos eletrônicos são preferíveis para a determinação da velocidade. Esses equipamentos podem ser tanto CTDs, com diversos equipamentos acoplados, quanto perfiladores de som especificamente produzidos

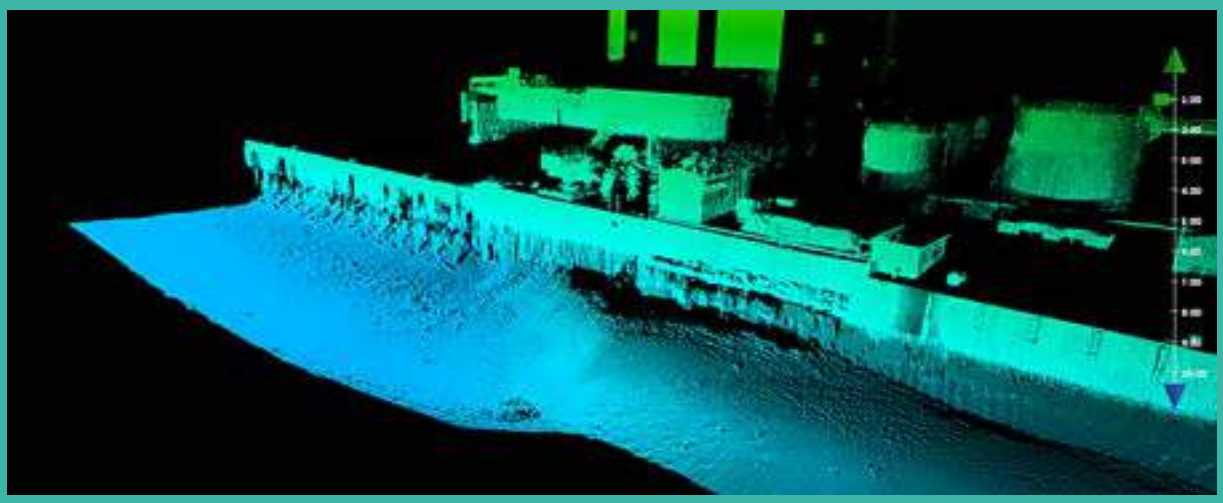
para isso. A grande vantagem dos perfiladores de velocidade do som é que eles realizam medidas em intervalos muito pequenos (da ordem de centímetros) no eixo vertical – isto é, na coluna d'água - sendo capazes de produzir um perfil vertical de velocidade praticamente contínuo.

O posicionamento da embarcação é outro fator fundamental para a qualidade de um levantamento batimétrico. O resultado de uma batimetria consiste em três valores: ***z*** (profundidade), ***x*** e ***y***, sendo esses últimos dois a posição horizontal do ponto medido. Essa posição pode ser expressa, por exemplo, em latitude e longitude, e é determinada a partir de equipamentos com diferentes precisões. O mais conhecido é o GPS, que fornece a informação de posição da embarcação a partir de satélites em órbita em volta da Terra. O GPS (*Global Positioning System*) é uma tecnologia mais antiga, que foi melhorada e teve sua precisão aprimorada com o advento da correção diferencial, que deu origem ao DGPS (*Differential Global Positioning System*). Esse novo sistema utiliza a mesma posição fornecida pelos satélites em órbita, mas a corrige a partir de mais posições e informações, que aumentam a precisão da posição em mais de 100 vezes. Finalmente, existe uma outra tecnologia capaz de aumentar bastante a precisão do posicionamento da embarcação, chamada RTK (*Real Time Kinematic*). Esse método aumenta a precisão da posição fornecida pelos satélites a partir de um posicionamento extra obtido por um equipamento em terra e transmitida através de ondas de rádio para a embarcação. Assim, como depende dessa transmissão por rádio, apesar de fornecer posições com precisão centimétrica, o RTK só pode ser utilizado em ambientes próximos à costa.

## VOCÊ SABIA?

**Sistemas de aquisição multifeixe podem ser acoplados a sistemas de radar aéreos, permitindo o mapeamento completo de zonas portuárias.**

Somando-se as informações provenientes de dados batimétricos e dados de radar em superfícies emersas, é possível, por exemplo, obter um levantamento completo de uma região portuária, desde o leito marinho, passando pelas paredes do cais até mesmo os guindastes e prédios do porto. *Imagem: Chesapeake Technology*.



### 1.2. Sísmica de reflexão

Outro método acústico bastante conhecido é o método sísmico, principalmente com a **sísmica de reflexão**. Esse método utiliza a reflexão de ondas sísmicas (um tipo de onda acústica) em interfaces que marcam camadas sedimentares de diferentes contrastes de **impedância acústica**. A impedância

acústica (***Z***) é uma característica dos meios físicos relacionada à sua densidade (***ρ***) e à velocidade de propagação (***v***) da onda sonora nesse meio:

$$Z = \rho \cdot v$$

A reflexão das ondas sísmicas acontece sempre que há uma diferença nas impedâncias acústicas entre dois meios subsequentes, ou seja, sempre que a onda encontrar uma variação de ***Z***, ocorrerá uma reflexão. Essa reflexão será tão intensa quanto o coeficiente de reflexão (***R***), que é calculado com base na ***Z*** dos meios 1 e 2:

$$R = (Z_1 - Z_2) / (Z_1 + Z_2)$$

Ou seja, quanto maior a diferença entre as impedâncias acústicas entre os meios, maior será o coeficiente de reflexão e, portanto, maior será a amplitude da onda refletida. Consequentemente, as amplitudes refletidas têm relação direta com o tipo de interface entre os meios, dando pistas importantes para se inferir a composição sedimentar do substrato marinho (Fig. 3). Por essa razão, as seções sísmicas obtidas com a sísmica de reflexão fornecem informações sobre a morfologia do subfundo, estratigrafia, petrografia, evolução deposicional, entre outras.

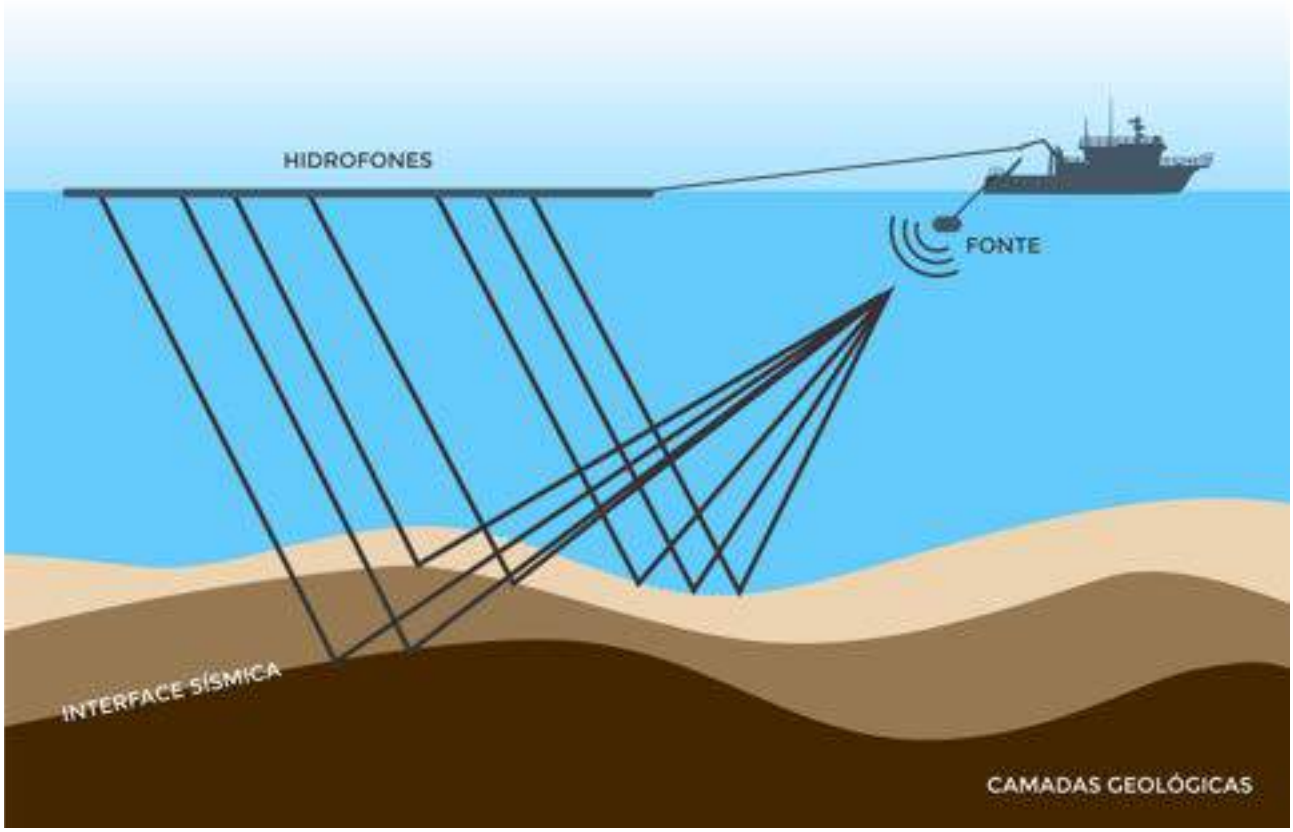



**FIGURA 3. A sísmica de reflexão marinha é obtida pela interação de ondas sísmicas geradas por uma fonte sísmica, que refletem nas interfaces de contraste de impedância acústica, voltando até receptores acústicos (hidrofones).** *Ilustração: Leandro Coelho.*

A sísmica de reflexão é utilizada amplamente tanto na terra quanto no mar, e é muito difundida entre pesquisadores e, principalmente, na indústria do petróleo. Seções sísmicas são utilizadas para a obtenção de dados do subfundo marinho, podendo penetrar vários quilômetros no leito marinho, atingindo sedimentos e rochas de muito milhões de anos atrás (Fig. 4). Além disso, com uma complexa análise do sinal sísmico, é possível também chegar a informações como a composição das rochas, teor

de fluidos e granulometria, sendo essenciais para a exploração de óleo e gás no mar. A sísmica de reflexão pode ser classificada ainda como sísmica rasa, quando a penetração é da ordem de poucas dezenas ou centenas de metros, e também sísmica profunda, quando a penetração pode atingir muitos quilômetros no subleito marinho.

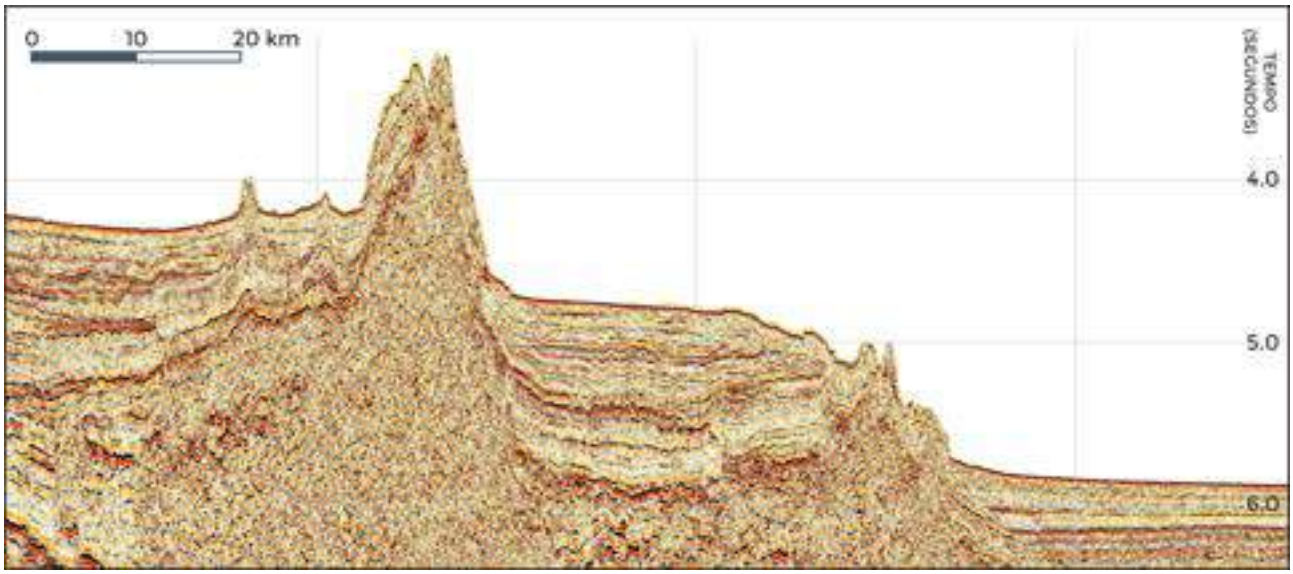



**FIGURA 4.** Os sinais refletidos possuem diversas características, como fase e amplitude, e são utilizados para a geração de seções sísmicas.

Os sistemas de aquisição sísmica podem ser classificados como monocanal ou multicanal, dependendo da quantidade de canais receptores das ondas sísmicas refletidas. Ambos os sistemas dependem da emissão de uma onda sísmica gerada por uma fonte sísmica (Fig. 5A). Entretanto, o sistema monocanal possui apenas um canal receptor, ou seja, todas as reflexões retornam para um mesmo receptor, chamado de hidrofone (Fig. 5B). Isso faz com que, semelhante à batimetria monofeixe, os dados da sísmica monocanal sejam "pontuais" que, em sequência, formam uma seção sísmica. Entretanto, há também sistemas multicanais, que operam com diversos hidrofones (com conjuntos de 24, 48, 72 ou 96 canais, por exemplo), dependendo da finalidade e orçamento. A utilização de mais canais de recepção aumenta a resolução dos dados sísmicos, aumentando a razão sinal/ruído. Além disso, a sísmica multicanal permite diversos tipos de processamento de sinal, desde análise de velocidades, a correções diversas, migração e empilhamento. Sistemas multicanais possuem operação muito mais complexa e são muito mais caros, sendo praticamente restritas à indústria de óleo e gás ou algumas poucas instituições de pesquisa do mundo.

A sísmica de reflexão possui duas técnicas principais, podendo ser bidimensional (2D) ou tridimensional (3D). A sísmica 2D realiza a aquisição de dados sísmicos em linhas de navegação, com apenas duas dimensões. Nela, há uma fonte e um streamer (Fig. 5B), que é um conjunto de hidrofones, dependendo do número de canais do sistema. Já a sísmica 3D, muito mais complexa, realiza a aquisição com diversos streamers, o que gera uma aquisição normalmente na vertical, mas também no plano, resultando em três dimensões.

Recentemente, uma nova tecnologia passou a ser desenvolvida, com a análise temporal das variações sísmicas. A chamada sísmica 4D é produzida por levantamentos 3D idênticos, mas em tempos distintos. Ou seja, estudos desse tipo buscam analisar as diferenças ocorridas no fundo oceânico ao longo do tempo – como, por exemplo, durante a exploração de uma reserva de petróleo. Esse tipo de estudo é muito utilizado pela indústria para o volume e segurança de reservatórios, por exemplo.

**FIGURA 5.** O sistema de aquisição sísmico é formado essencialmente por uma fonte emissora de ondas sísmicas, exemplificado em (A) por um *sparker*, e por um conjunto de receptores, conhecidos por hidrofones, que ficam instalados em longas "mangueiras" (B), conhecidas como *streamers*.

### *1.2.1. Sismoestratigrafia*

Uma área muito importante de estudo em Geologia e Oceanografia Geológica é a **Sismoestratigrafia**. Essa área do conhecimento utiliza dados sísmicos para o estudo da estratigrafia dos depósitos sedimentares. A análise sismoestratigráfica se baseia na identificação das terminações dos refletores sísmicos, bem como na existência de descontinuidades. Sequências deposicionais são delimitadas por duas superfícies conhecidas como **discordâncias**. Essas superfícies se diferenciam das camadas sedimentares acima e abaixo, estando geralmente relacionadas a um evento deposicional ou erosivo. Esse evento, em geral, causa um grande contraste de impedância acústica, produzindo refletores de altas amplitudes no registro sísmico.

Além das discordâncias, internamente às sequências, o padrão de terminações dos refletores é também essencial para se compreender a deposição no sistema. O primeiro tipo de terminações é o *onlap*, quando as camadas sedimentares terminam horizontalmente sobre uma superfície inclinada. A variação da posição do *onlap* está diretamente relacionada à retrogradação e progradação das linhas de costa. O *downlap* é um tipo de terminação em que as camadas terminam inclinadas sobre uma superfície mais antiga horizontal. De forma geral, o avanço do *downlap* em direção ao centro da bacia está relacionado a sistemas progradantes, enquanto seu recuo está relacionado a sistemas retrogradantes. Os refletores sísmicos podem terminar também de duas outras maneiras, de forma concordante com as superfícies limitantes ou em truncamentos, quando terminam de forma abrupta. Os truncamentos erosivos são importantes terminações, já que marcam processos erosivos intensos que finalizaram um padrão deposicional até então dominante. Uma queda abrupta do nível de base, por exemplo, pode expor os sedimentos até então submersos a processos costeiros, causando erosão e destruição das camadas já depositadas. Esses truncamentos estão associados a superfícies erosivas que tendem a ser bastante regionais e marcar eventos geológicos importantes como as glaciações.

A análise das seções sísmicas busca pela identificação dessas terminações, padrões de reflexões internas às camadas (amplitude, frequência), velocidade intervalar e características morfológicas para definir as sismofácies. As sismofácies ajudarão na caracterização das sequências sísmicas, permitindo sua melhor correlação com a sequência sedimentar e com poços de amarração. Aliás, a amarração dos dados sísmicos com dados litológicos através de dados provenientes de poços de exploração é fundamental para a correta interpretação das seções sísmicas e sua correlação com a sequência estratigráfica.

## 1.3. Sísmica de refração

Enquanto a sísmica de reflexão está interessada nas ondas acústicas que foram refletidas nas interfaces com contraste de impedância acústica, a **sísmica de refração** analisa as ondas que foram refratadas nessas mesmas interfaces. Lembrando-se da Lei de Snell, uma onda incidente sobre uma interface entre diferentes meios, produzirá uma onda refletida e uma onda refratada. Assim, um levantamento sísmico de refração terá os mesmos componentes de um sistema de reflexão, com a diferença da onda que será registrada.

Na sísmica de refração, a fonte sísmica emite a onda acústica que percorrerá a coluna d'água e atingirá o solo marinho. A partir daí, a cada interface de contraste de impedância acústica haverá a geração de uma onda refratada. Ainda segundo a Lei de Snell, quando a onda incidente atinge o ângulo crítico, a onda refratada terá ângulo de 90° em relação à normal, percorrendo "horizontalmente" a região de interface entre os dois meios. Após certo tempo, essa onda é refratada novamente, retornando à superfície para ser lida pelos hidrofones.

Levantamentos de sísmica de refração não são muito comuns no ambiente marinho, ainda que possíveis, sendo muito mais utilizados em terra. Eles têm como principal objetivo a obtenção de informações sobre a velocidade de propagação do som nas camadas. Por sua vez, essas velocidades possuem relação direta com a composição das rochas e dos sedimentos. Sendo assim, a sísmica de refração é capaz de fornecer características geológicas do substrato marinho, auxiliando a própria sísmica de reflexão.

### 1.4. Imageamento acústico

Outro método acústico muito utilizado no ambiente marinho é o imageamento acústico, realizado pelo **sonar de varredura lateral** (SVL). Esse equipamento opera com a emissão de ondas acústicas lateralmente, em um emissor que é rebocado pela embarcação. Esse equipamento é geralmente chamado de "peixe" e costuma ter a forma de um torpedo. Ao ser rebocado, ele faz uma varredura do fundo marinho, obtendo informações dos padrões de retroespalhamento da onda acústica no leito. Seu objetivo não é a aferição das profundidades e, portanto, não é o tempo de ida e volta da onda acústica que ele mede.

Apesar de medir também o tempo de retorno, mais para posicionamento dos dados do que para aferição das profundidades, o SVL mede a energia retroespalhada, ou seja, o quanto da energia emitida por ele retornou após refletir no leito marinho. A energia retroespalhada está também relacionada à diferença de impedância acústica entre os meios. No caso do SVL, essa diferença será sempre entre a água (meio 1) e o leito marinho (meio 2). Assim, como diferentes regiões do leito marinho possuem impedâncias acústicas diferentes – regiões de acúmulo de areia, de lama, rochas, por exemplo – a energia retroespalhada será também diferente. Dessa forma, a obtenção dessas informações permite uma caracterização qualitativa do fundo marinho.

A técnica é chamada de imageamento, por conta do resultado gerado pelo sonar, chamados sonogramas. Os sonogramas e, após processamento, os mosaicos, são verdadeiras imagens do fundo marinho, geradas a partir de ondas acústicas (Fig. 6). Quando validado por amostragens diretas do fundo, o uso das informações do SVL se torna uma excelente ferramenta para a classificação geológica e sedimentar de amplas regiões do leiro marinho, sem a necessidade de inúmeras coletas de amostras.

**FIGURA 6. O sonograma é o resultado do imageamento acústico, em que a energia de retroespalhamento é medida para a geração de uma "imagem" do leito marinho. Sonogramas são capazes de auxiliar na identificação de leitos rochosos, arenosos, lamosos e até mesmo na identificação e mapeamento de habitats e na arqueologia.** *Fonte: Salt Ambiental.*

# 2. Métodos potenciais

## 2.1. Gravimetria

### *2.1.1. Medição da aceleração da gravidade no mar*

Gravimetria é uma área da Geofísica que estuda as variações da aceleração da gravidade. Essas medidas podem ser usadas em operações de reconhecimento de corpos profundos em pequena ou grande escala nas regiões marinhas, com aplicações nos estudos crustais, minerários e do fundo marinho. As medidas podem ser feitas no mar com navios, submarinos ou por satélite.

A gravimetria marinha surgiu como uma técnica gravimétrica padrão há cerca de 50 anos, embora as primeiras tentativas tenham sido feitas ainda mais cedo, nas décadas de 1920 e 1930, a bordo de submarinos. Ficou claro desde o início que as medições marítimas tinham uma precisão inferior às realizadas na superfície da terra. No mar, o gravímetro está sujeito às acelerações da embarcação, portanto, os efeitos dessa movimentação precisam ser removidos dos dados. Qualquer aceleração experimentada pela embarcação também é sentida pelo gravímetro a bordo. Essa aceleração $\boldsymbol{a}$ é automaticamente adicionada ao vetor de gravidade real, $\boldsymbol{g}$, para que o medidor registre a soma dos valores e assim, os efeitos da aceleração do navio sejam, tanto quanto possível, removidos:

$$\boldsymbol{g^* = g + a}$$

A componente mais importante de $\boldsymbol{a}$ é a aceleração vertical, que tem um impacto total no $\boldsymbol{g^*}$ registrado e é a principal fonte de erro na medição da gravidade marinha. A precisão da gravimetria marítima é, na melhor das hipóteses, da ordem de 3 a 500 μGal. Atualmente, a aceleração tridimensional de embarcações pode ser medida muito bem usando sistemas globais de navegação por satélite com múltiplas antenas (GNSS), usados normalmente em conjunto com uma unidade de medida inercial (*Inertial Measurement Unit* - IMU), que compreende uma série de acelerômetros e giroscópios. Como as antenas GNSS e a IMU não estão localizadas no mesmo local que o gravímetro, elas podem estar sujeitas a acelerações ligeiramente diferentes, e essas diferenças devem ser explicadas no que é chamado de correção do braço da alavanca. Os movimentos do navio induzidos por ondas submetem um gravímetro no mar a acelerações de alta frequência (acima de 0,1 Hz) com magnitudes que podem exceder 10 Gal. O movimento incessante impede a medição ajustando a tensão da mola, como na gravimetria terrestre. A influência dos movimentos do navio é minimizada utilizando uma plataforma estabilizadora. A orientação da plataforma é continuamente ajustada por servomotores, controlados por giroscópios e acelerômetros, na tentativa de preservar a orientação vertical do gravímetro.

A gravimetria por satélite é a única tecnologia de sensoriamento remoto atualmente disponível para medir variações de gravidade com grande precisão tanto que permite medir a água armazenada abaixo dos primeiros centímetros da coluna do solo ou o armazenamento total de líquidos e água congelada. Além do GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*), foram lançados outros dois satélites avançados de monitoramento da gravidade: o CHAMP da Alemanha em 2000; e o GOCE, da Agência Espacial Europeia em 2009. O CHAMP e o GOCE aumentaram significativamente a capacidade de mapear o campo de gravidade estática em seus momentos de lançamento, tendo o GOCE uma resolução espacial significativamente mais alta que o GRACE. No entanto, nenhum deles era adequado para monitorar o campo de gravidade variável no tempo e inferir alterações na água na superfície da Terra (*Total Water Storage* - TWS).

O GRACE durou muito além de sua vida útil de missão de cinco anos, e terminou em outubro de 2017. Enquanto isso, o GRACE-FO (GRACE - *Follow-on* – Fig. 7D) é um projeto de missão quase idêntico, o que proporcionaria continuidade no registro de dados, ao mesmo tempo em que proporciona alguma melhoria na resolução devido aos avanços tecnológicos básicos dos últimos 10 anos. Essa missão foi lançada em maio de 2018 e vai permitir o estudo das variações do campo gravitacional nos mares além do monitoramento da disponibilidade de água com base em gravimetria na próxima década.

A água é essencial para a vida e vulnerável, por exemplo, à superexploração, poluição e redistribuição associadas a quaisquer mudanças na precipitação e temperatura. As informações fornecidas pelo GRACE têm um grande potencial para melhorar o monitoramento e o entendimento da disponibilidade de água doce, ajudando assim a reduzir as consequências ambientais e sociais. A hidrologia e outras comunidades que monitoram alterações climáticas têm demorado um pouco para adotar o GRACE como uma ferramenta comercial, devido aos complexos aspectos das observações. No entanto, histórias de sucesso como as descritas aqui estão aumentando a conscientização e criando impulso para pesquisas e aplicativos habilitados para os dados da missão GRACE. Estender o registro de dados dessa missão também reduzirá a incerteza e melhorará a compreensão dos impactos climáticos e antropogênicos no ciclo da água que começaram a ser revelados. Esperamos que, à medida que esses impactos se tornem menos ambíguos, as partes interessadas e os formuladores de políticas tomem melhores decisões e reduzam as ameaças aos nossos preciosos recursos de água doce.

### *2.1.2 Correções nas medidas da aceleração da gravidade no mar*

Quando se efetua um levantamento gravimétrico, várias correções precisam ser feitas. Entre as mais importantes são a correção de Terra Normal, correção de Eötvös, correção de maré, correção de ar-livre, correção Bouguer e correção de terreno.

A correção de Terra Normal remove dos dados um modelo teórico da Terra em forma de um elipsóide de referência em rotação. Depois que essa correção é feita, os dados são denominados de anomalias gravimétricas. A correção de Eötvös é feita quando os dados são adquiridos em movimento, caso das medidas feitas no mar. Essa correção elimina o efeito cinemático dos veículos em movimento.

A correção de maré elimina os efeitos gravitacionais do Sol e da Lua, e é feita a partir de modelos teóricos da movimentação desses corpos celestes com relação à Terra. A correção ar-livre (FAC – Fig. 7A) corrige a diminuição da gravidade com o distanciamento do ponto de medida do centro da terra, de acordo com a Lei de Newton. Em síntese, remove o efeito da elevação onde a gravidade foi medida, com relação ao nível médio do mar não perturbado (NMM).

A correção Bouguer (BC – Fig. 7B) remove o efeito das massas entre o ponto de medida e a superfície do NMM pela aproximação da camada de rocha por uma placa horizontal infinita de espessura igual a elevação. Após efetuadas as correções ar-livre e de Bouguer, a anomalia gravimétrica resultante indica variações anômalas de massa, sendo, portanto, negativa em áreas montanhosas e cratônicas e positiva em regiões com acumulo de minerais densos.

A correção de terreno complementa a correção de Bouguer simples, por esse motivo, quando realizada, os dados são denominados de anomalia Bouguer completa. Essa correção remove o efeito de massas topográficas, ou seja, grandes cadeias de montanhas ou fossas. Somente se faz necessária próxima dessas feições.

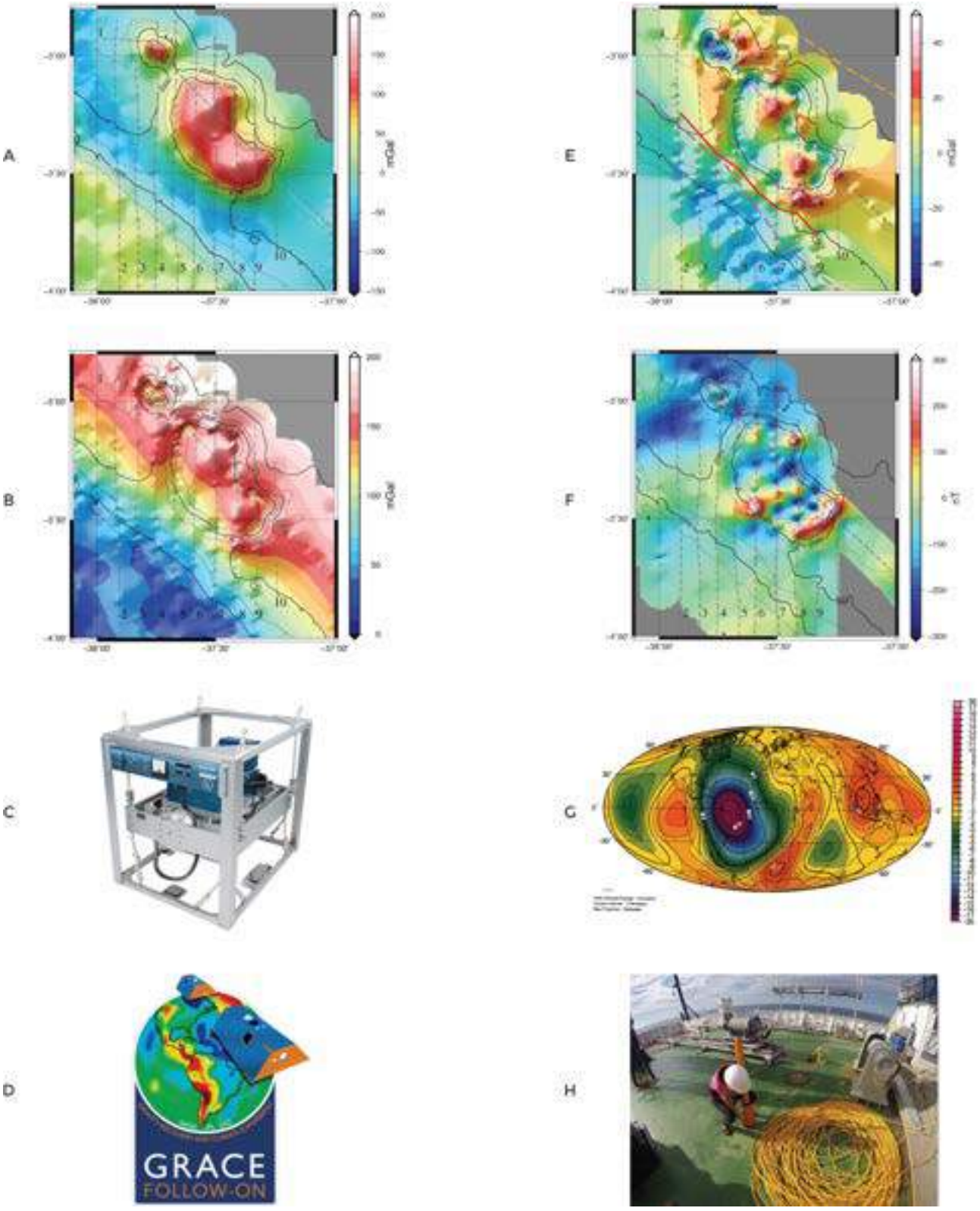



**FIGURA 7. A) Mapa de anomalia** *free-air* **do Ceará Plateau; B) Mapa normal de Bouguer do Ceará Plateau; C) Gravímetro dinâmico** *ZLS Dynamic Meter™* **da** *ZLS Corporation*; **D) Logo do projeto** *GRACE FOLLOW-ON* **(GRACE-FO); E) Mapa residual de Bouguer do Ceará Plateau; F) Dados observados da anomalia magnética do Ceará Plateau; G) Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS); H) Magnetômetro marinho rebocado da** *Marine Magnetic – SeaSpy2* **a bordo do N/Oc. Alpha Crucis.** *As figuras do Ceará Plateau são do artigo: Denise Silva de Moura, Eder Cassola Molina, Ya-ra Regina Marangoni, Luigi Jovane, Gravity and magnetic constraints on the crustal structure of the Ceará Plateau, Brazilian Equatorial Margin, 2019, Frontiers in Earth Science, 7, 309.*

Além destes, existem outros tipos de correções que são mais relacionadas a dados gravimétricos marinhos em função do movimento do navio e com as ondas do Mar. A partir de dados de uma unidade de medida inercial (IMU, já comentada anteriormente), é possível corrigir as variações de movimento da embarcação durante a aquisição dos dados. Estes movimentos podem ser decorrentes das oscilações da embarcação em seus três eixos de movimento (***x***, ***y***, e ***z***), além do movimento das ondas, conhecido por *heave*.

## 2.2. Magnetometria

### *2.2.1. Origem do campo magnético terrestre*

O campo magnético da Terra se assemelha ao campo gerado por um grande imã localizado no centro da Terra. Atualmente, os polos magnéticos são inclinados 11,5° em relação ao eixo de rotação da Terra. A origem do campo magnético terrestre decorre da dinâmica do núcleo da Terra (97 a 99%), das rochas magnetizadas da crosta (1 a 2%) e de fontes externas como o vento solar (1 a 2%). O campo principal seria produzido por correntes de convecção, no núcleo externo líquido, acopladas com a rotação da Terra. Porém, a dinâmica do núcleo externo é ainda pouco conhecida e o núcleo é quente demais para permitir qualquer magnetização (temperatura de Curie inferior a 770°C). O campo principal varia de aproximadamente 25.000 nT próximo ao equador até 65.000 nT nos polos. O campo magnético terrestre penetra no espaço (10 vezes o raio do planeta) na região chamada magnetosfera. A forma dipolar do campo é distorcia pelo vento solar, cujas partículas viajam a velocidades da ordem de 400 km/s.

### *2.2.2 Orientação do campo geomagnético*

O campo geomagnético pode ser representado por um vetor ***F*** que possui magnitude e direção. A direção do campo é definida pela declinação ***D*** e pela inclinação ***I***.

A intensidade do campo é dada pela equação:

$$(X^2 + Y^2 + Z^2)\ 1/2$$

Onde ***X***, ***Y*** e ***Z*** são as coordenadas cartesianas. A declinação é o ângulo entre o norte magnético e o norte azimutal. A inclinação magnética corresponde ao mergulho do campo magnético em relação a horizontal. É aproximadamente 0 no equador e 90° nos polos magnéticos. A cada cinco anos é feito um mapa de declinação e inclinação magnética da Terra. As posições onde o campo magnético é vertical correspondem aos polos magnéticos. O polo magnético norte está em 78,5°N e 103,4°W, e o polo sul em 65°S e 139°E. Através da medição da inclinação e da declinação magnética gravada nos grãos magnéticos das rochas podem-se definir as posições dos paleopolos magnéticos. Ao longo da sua história, a Terra tem sofrido reversões magnéticas, com uma reversão a cada meio milhão de ano em média (entre 10 mil e 25 milhões de anos). A causa das reversões magnéticas é pouco conhecida, mas a considerada mais provável atualmente é o desacoplamento entre a rotação da Terra e o movimento de convecção de massa no núcleo externo.

O campo geomagnético se desenvolve também na parte externa da Terra em uma área que se chama Magnetosfera que cobre e protege a Terra do vento solar. A região, próxima às regiões polares, onde a Magnetosfera é enfraquecida e o vento consegue quase chegar a superfície da Terra é o cinturão de Van Allen (Fig. 8).

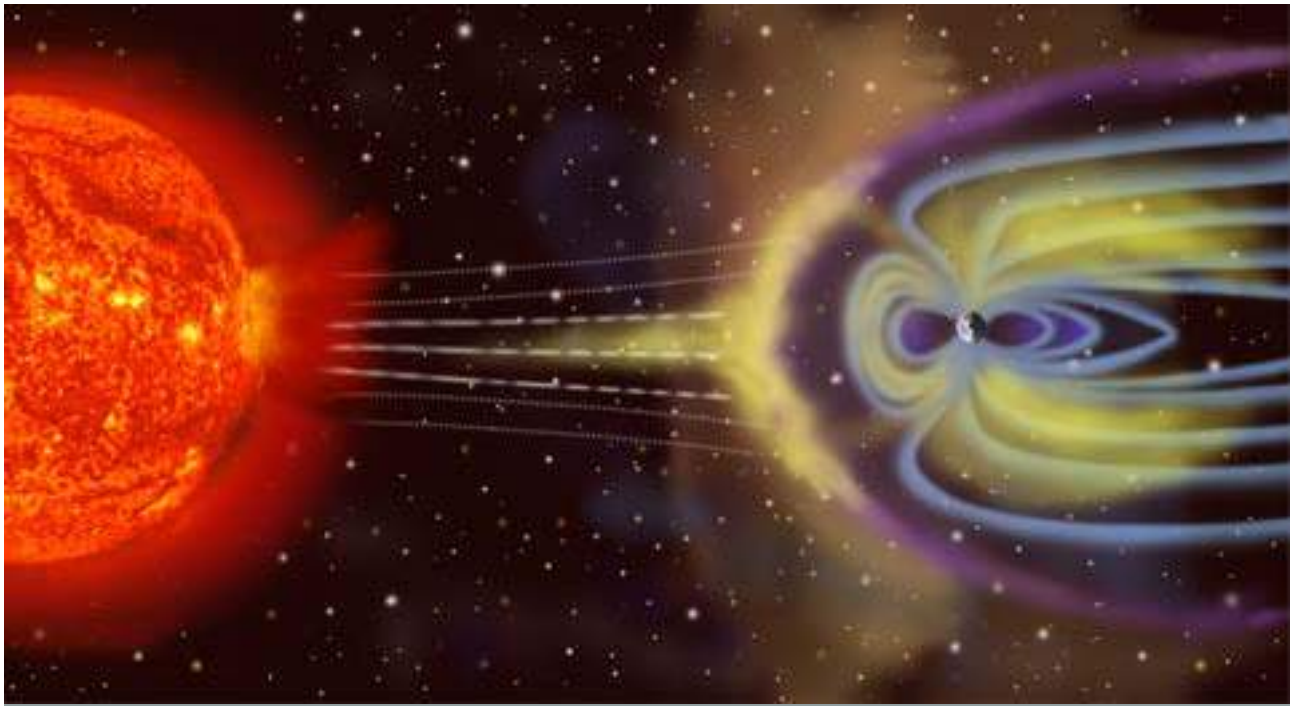
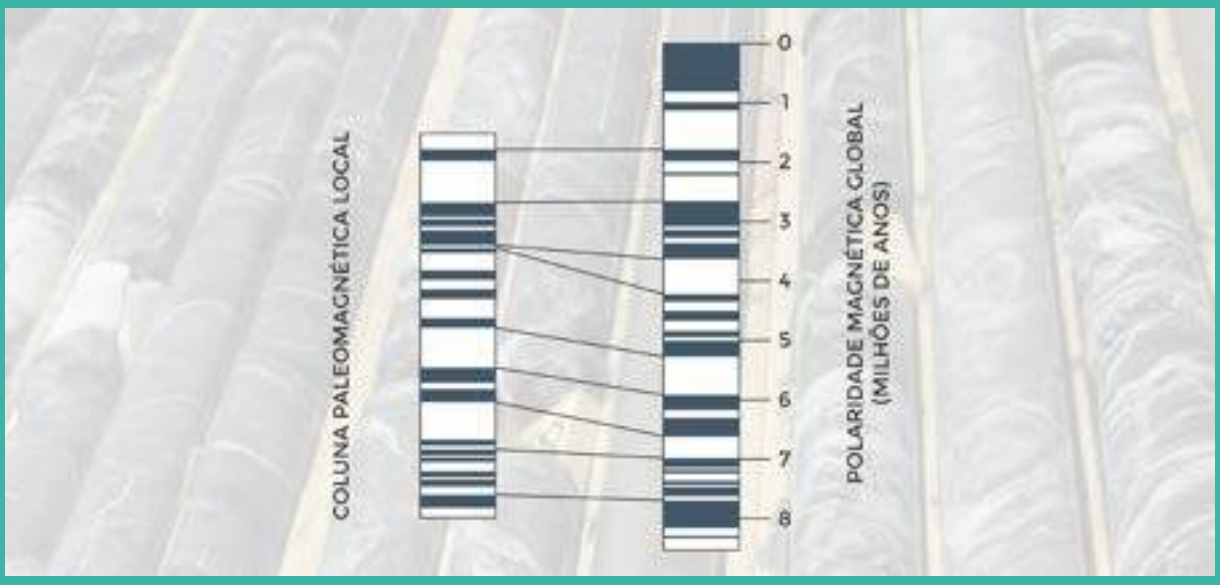


**FIGURA 8.** **Esquema gráfico representando o Sol e a Terra com o vento solar e a Magnetosfera. Distancias e dimensões não reais.** *Fonte: Wikimedia commons.*

## VOCÊ SABIA?

**A partir de dados magnéticos das rochas presentes ao longo de um testemunho, é possível realizar uma datação relativa das rochas.**

A variação da polaridade e intensidade da magnetização das rochas em um testemunho tem relação direta com o campo magnético terrestre de quando essa rocha se formou. Dessa forma, conhecendo as propriedade magnéticas das rochas em uma sequência, e contando-se as inversões de polaridade geomagnética, é possível relacionar essas inversões com as inversões do campo terrestre globais (em inglês *Global Polarity Time Scale* - GPTS), que possuem idades bem definidas. Assim, obtém-se indiretamente as idades nesse testemunho.



### *2.2.3. Variações do campo geomagnético*

O campo magnético terrestre é dinâmico e sujeito a variações de origem interna e externa:

**Variações diurnas:** existem variações diurnas do campo com, por exemplo, variações de 10 a 100 nT em dias calmos, ou seja, sem tempestades magnéticas. Essa variação diurna pode ser monitorada com um magnetômetro fixo em uma estação-base em terra.

**Tempestades magnéticas:** correspondem ao período de atividade solar exagerada que causa perturbações na magnetosfera. As tempestades magnéticas causam variações de milhares de nT no campo magnético da Terra. A frequência das tempestades magnéticas está diretamente associada aos ciclos de atividade solar (11 anos). As tempestades magnéticas geram interrupção na transmissão ondas de rádio, TV, telefone, interrupção dos sistemas de comunicação militares e de navegação marinha, por exemplo.

**Auroras:** luzes geradas por partículas carregadas, entrando com alto ângulo nos polos Norte e Sul magnéticos da Terra. As partículas carregadas formam espirais em torno das linhas de força magnética.

**Anomalia magnética crustal:** componente relacionada às variações na magnetização das rochas crustais, até a profundidade correspondente à temperatura de Curie, algumas dezenas de km na crosta continental e entre alguns metros, próximo das dorsais, e alguns km nas regiões mais antigas da crosta oceânica. As medidas do campo geomagnético da Terra feitas nos últimos 400 anos mostram um deslocamento gradual na localização dos polos, em cerca de 1% ao ano, chamado de variação secular. O campo geomagnético pode ser matematicamente estimado pela fórmula IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) e é recalculado a cada 5 anos devido às variações seculares.

Existe uma anomalia da intensidade do campo geomagnética no Brasil, a Anomalia Magnética do Atlântico Sul, AMAS ou SAA (do inglês, *South Atlantic Anomaly* – Fig. 7G). Essa anomalia é relacionada com um aumento da radiação magnética na região da parte mais interna do cinturão de Van Allen na superfície da Terra. A AMAS se forma porque existe um deslocamento entre a direção do mergulho do campo magnético terrestre e o centro geográfico por 450 km. A anomalia do Atlântico Sul é muito importante porque afeta telecomunicações, aumenta a ocorrência de relâmpagos, satélites e outras espaçonaves com órbitas a algumas centenas de quilômetros de altitude.

### *2.2.4. Levantamentos magnetométricos marinhos*

Os levantamentos magnetométricos aquáticos são feitos com um magnetômetro rebocado atrás do navio, a uma distância suficiente para que os motores e hélices do navio não afetem os valores medidos (Fig. 7H). Se o estudo é realizado próximo à costa, pode ser utilizado um magnetômetro base (estação-base) para correções das anomalias diurnas e tempestades.

As aplicações da magnetometria marinha são diversas:

- Prospecção de jazidas de minerais ferromagnéticos;
- Mapeamento estrutural;
- Fraturas no embasamento;

- Crateras de impacto (astroblemas);
- Arqueologia marinha;
- Mapeamento de sedimentos contaminados;
- Reconhecimento de corpos vulcânicos dentro de montanhas submarinhas (Fig. 7 E e F); e
- Localização de estruturas metálicas enterradas e/ou submersas como cabos.

### *2.2.5 Magnetômetros*

A magnetometria se concentra na medição do campo magnético da Terra:

**Intensidade do campo total:** mede apenas a magnitude do vetor campo magnético;

**Vetor campo magnético:** mede a densidade de fluxo em uma direção especifica no espaço (componentes ***X***, ***Y*** e ***Z***);

Existem três tipos principais de instrumentos para a medição da densidade de fluxo magnético (***B***):

- Magnetômetros Fluxgate (Fig. 7H);
- Magnetômetros de precessão de prótons; e
- Magnetômetros de vapor alcalino.

O magnetômetro Fluxgate funciona com duas bobinas primárias opostas envoltas por uma segunda bobina de medição. Uma corrente contínua passa através da bobina primária. O campo H reforça um dos campos primários e reduz o outro. A voltagem induzida na bobina secundária é proporcional ao campo geomagnético.

O magnetômetro de precessão de prótons mede a frequência de precessão (*spins*) do núcleo hidrogênio (próton). Uma garrafa preenchida com um fluido rico em hidrogênio (água, querosene ou fluído *Overhauser*) é energizada por uma corrente elétrica, passando através da bobina. A medição da frequência de precessão dos prótons informe sobre a intensidade do campo B.

O magnetômetro de vapor alcalino funciona com o bombardeio de vapor de metais alcalinos (Cs, Rb, K) contidos num tubo por luz ultravioleta de alta frequência. Os elétrons no gás ficam excitados em níveis altos de energia. A taxa de retorno aos níveis normais de energia é proporcional à intensidade do campo geomagnético. A sensibilidade é de 0,001 nT ou 1 pT.

Levantamentos magnetométricos marinhos podem ter sua resolução aumentada sensivelmente com o uso de gradiômetros, que são instrumentos para medir o gradiente magnético vertical ou horizontal. O instrumento funciona com dois magnetômetros a diferentes posições em relação ao leito marinho e que medem o campo geomagnético simultaneamente. A diferença de campo é divida pela distância de separação entre os sensores (nT/m).

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 6*

# METODOLOGIAS EM TESTEMUNHOS MARINHOS

*Luigi Jovane*

REVISÃO: HELENICE VITAL (UFRN), MARTINO GIORGIONI (UNB) E JAIRO F. SAVIAN (UFRGS)

CITAÇÃO SUGERIDA: JOVANE, Luigi. Metodologias em testemunhos marinhos. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 6: p. 127-141.

# Metodologias em Testemunhos Marinhos

*Luigi Jovane*

## 1. Introdução e métodos de perfuração

Os poços normalmente são efetuados com métodos hidráulico-rotativo onde as hastes ficam aprofundando o furo com rotação de uma cabeça de perfuração empurrada por um sistema de hastes. Esta técnica se desenvolveu mais que tudo para perfuração e exploração de reservatórios de hidrocarbonetos. Este método não preserva a coleta do testemunho, que é um tipo de amostra que captura as camadas estratigráficas com profundidade enquanto preserva a sequência deposicional (sedimentos mais jovens estão no topo e sedimentos mais antigos estão no fundo). Para obter testemunhos (*core* em inglês) são necessários outros métodos que usam a penetração de um amostrador diretamente no sedimento mais ou menos consolidado. Portanto, obter testemunhos não perturbados em sedimentos (materiais não consolidados) com os métodos hidráulico-rotativos é extremamente difícil.

Comparado ao método de perfuração hidráulico-rotativo de rochas no continente, a maioria das empresas perfuradoras marinhas considera impossível a recuperação de materiais não consolidados e, como consequência, muitas nem tentam. Normalmente nas perfurações industriais é feita somente a recuperação dos fragmentos de rochas expulsos na lama de perfuração que são comumente chamados de material ou sedimento de calhas. Por exemplo, na indústria de perfuração e exploração a base do furo e a parede do poço é revestida antes de iniciar qualquer operação de aproveitamento do poço. No entanto, nos estudos de prospecção e nas reconstruções geológicas a recuperação contínua das camadas de sedimentos é fundamental.

Os testemunhos de sedimentos de fundo do mar são especialmente úteis porque não são afetados por processos de intemperismo, modificações e também alterações antrópicas, típicas dos ambientes terrestres. Sendo assim, são caracterizados por uma sedimentação mais constante e contínua, que permite aos cientistas obter registros mais claros e completos de períodos da história da Terra. Por exemplo, o estudo de testemunhos de sedimentos marinhos permite encontrar padrões climáticos em eras antigas, como durante os impactos de corpos celestes, eventos quentes extremos e as eras glaciais. Essas informações são muito úteis para aprimorar o entendimento das interações entre oceanos, atmosfera e sistema climático e calcular padrões de mudanças futuras.

Os sedimentos encontrados em um testemunho são um registro histórico das condições da água e da atmosfera e podem ser usados para reconstruir os ambientes passados na Terra. Como as velocidades de deposição de sedimentos, chamadas taxas de sedimentação, em algumas áreas são bastante lentas, mesmo um testemunho relativamente curto, com apenas alguns metros de comprimento, pode representar uma história de milhares de anos.

Ao estudar testemunhos marinhos, os cientistas podem aprender sobre a circulação oceânica, o clima, a formação de depósitos minerais, o movimento de placas tectônicas, a química da água e a estabilidade do fundo do mar. A presença ou ausência de fósseis e minerais específicos em testemunhos de sedimentos podem indicar específicas condições climáticas em épocas passadas, como durante as eras glaciais. Alguns cientistas se referem aos testemunhos como cápsulas do tempo, porque as informações

que os testemunhos contêm podem durar centenas de milhares e até milhões de anos. Os cientistas podem usar essas informações para melhorar a compreensão do sistema climático e prever cenários e eventos no futuro através de modelagem matemática.

Existem várias técnicas para coletar testemunhos com intuito de determinar as características dos sedimentos e dos processos sedimentares ao longo do tempo geológico. A seguir serão apresentadas as principais delas.

## 1.1 Testemunhos por gravidade

O testemunhador por gravidade (em inglês *gravity corer*) permite que os pesquisadores amostrem e estudem as camadas de sedimentos no fundo de lagos e oceanos. Tem esse nome porque é constituído por um tubo testemunhador que é levado para o fundo do corpo d'água e inserido no sedimento pela gravidade. Para operar o testemunhador por gravidade, os usuários precisam de um barco com um guincho poderoso o suficiente para abaixar e elevar o testemunhador (pode pesar de centenas a milhares de quilogramas) e de um cabo de aço, comprido o suficiente para alcançar o fundo do mar (Fig. 1).

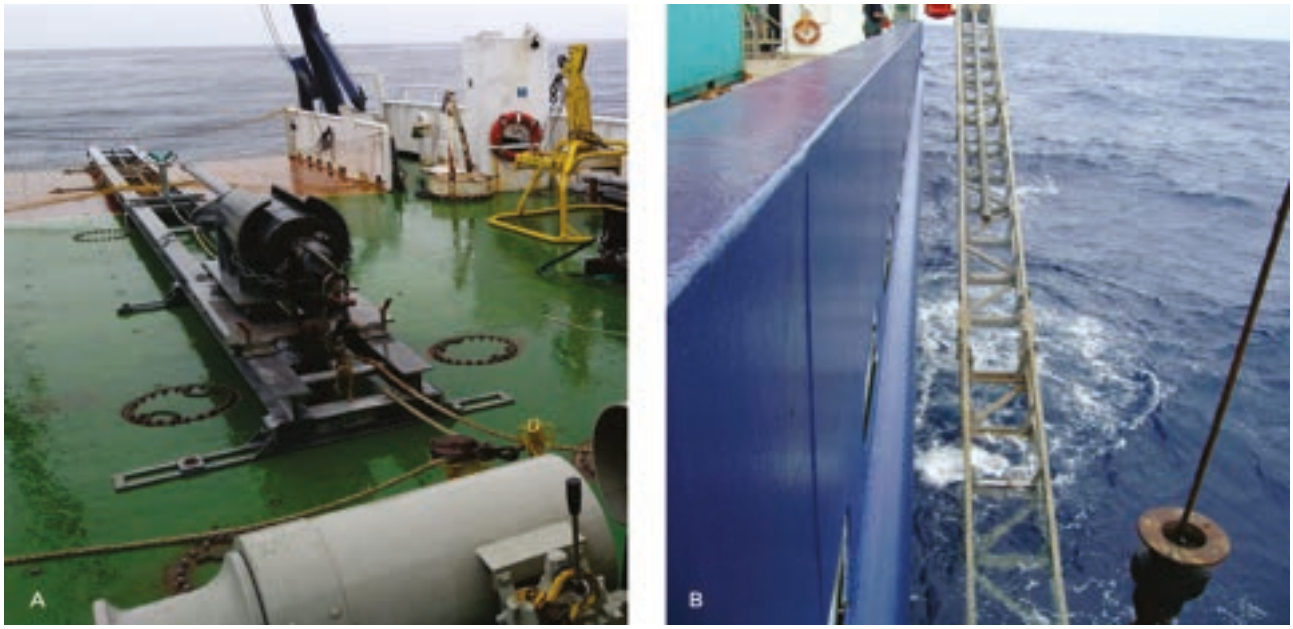



**FIGURA 1.** A) Trilho do testemunhador por gravidade do navio brasileiro Alpha Crucis (Cruzeiro RGR1 - 2018). B) O testemunhador por gravidade do navio alemão Maria S. Merian (Cruzeiro AMADEUS - 2012).

Há as vantagens de ser simples, robusto, relativamente confiável, com pouco custo associado, fácil de usar e requer pouca manutenção. Entretanto, o testemunhador por gravidade pode ser pesado para manejar e complicado de implantar e recuperar. Os testemunhos são longos (dezenas de metros, com máximo de 60 m) e devem ser levantados na posição horizontal e manobrados sobre o trilho para trazê-los a bordo do navio. A cabeça de perfuração (*core-catcher*, em inglês) está na base do testemunho e inclui também um aparelho que não permite aos sedimentos saírem, chamado "aranha".

Mesmo sofrendo compactação dos sedimentos devido a pressão do peso, os testemunhos coletados por testemunhadores por gravidade, são usados para múltiplas analises, algumas simples, como cor, composição e textura dos sedimentos ou a presença de alguns tipos de organismos marinhos. Também podem ser realizadas outras análises mais sofisticadas, como a composição isotópica de alguns elementos e outras assinaturas geoquímicas para estudar as condições paleoceanográficas.

## 1.2 Piston corer

O testemunhador a pistão (em inglês, *piston corer*) é um tubo longo, com um peso de chumbo, utilizado para extrair amostras de sedimentos lamosos. Os testemunhadores de pistão têm um mecanismo que e acionado quando um retentor atinge o fundo e ajuda a evitar a perturbação no sedimento (Fig. 2). Além disso, há um pistão dentro do tubo, que gera um vácuo, permitindo a recuperação de amostras com até 27 m de comprimento.

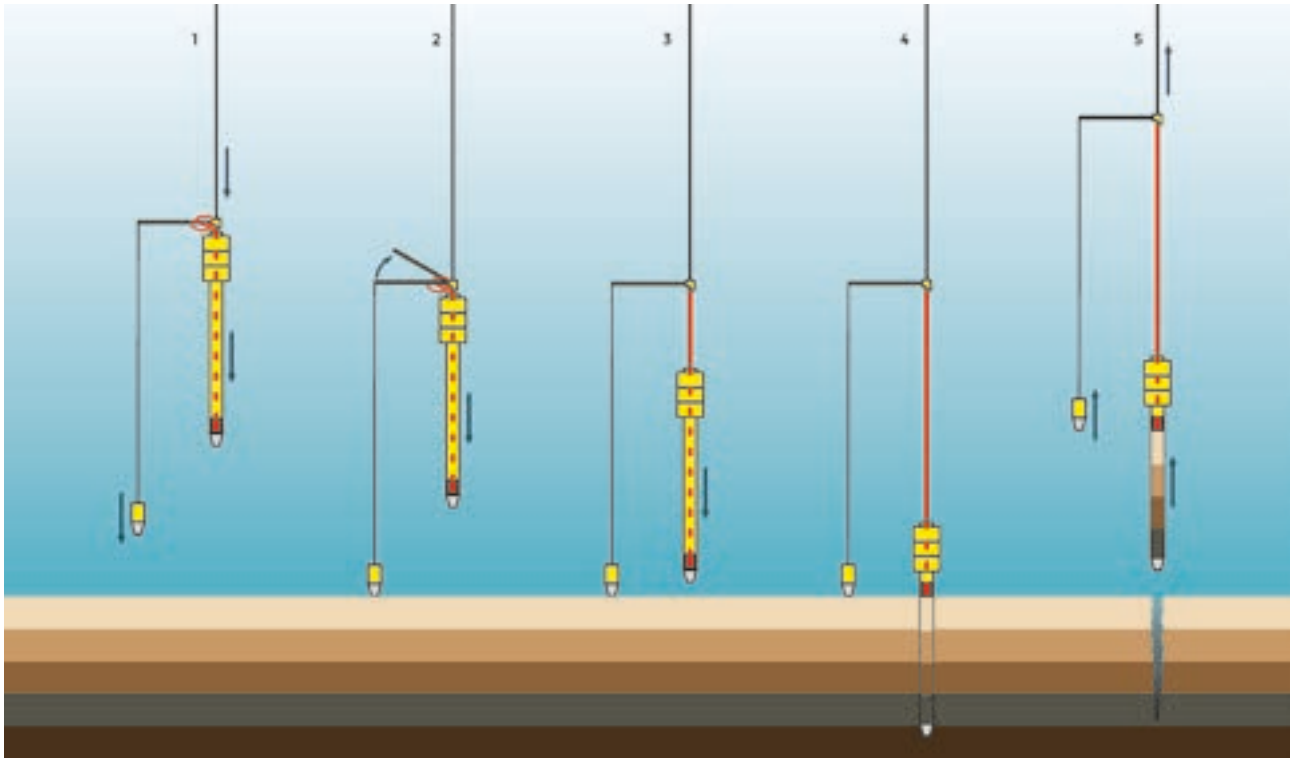



**FIGURA 2. Sistema de funcionamento do piston corer.** *Ilustração: Leandro Coelho.*

A vantagem desse sistema, em comparação com o testemunhador por gravidade, é que o pistão interno permite que o sedimento macio seja capturado sem compressão ou perturbação significativa, garantindo a melhor qualidade das amostras recuperadas e evitando a compactação. As desvantagens dos testemunhadores a pistão são seu tamanho e peso, às vezes difíceis de manusear e podem deformar e alterar o sedimento recolhido. Por causa das operações envolvidas e dos equipamentos necessários, os testemunhadores de pistão não podem ser utilizados em todos os navios de pesquisa. É necessário equipamento de manuseio especial para lançar e recuperar com segurança este equipamento em alto mar. Para segurar o sedimento, são utilizadas válvulas de retenção e combinações de coletores de testemunho tipo "aranha" que podem ser adaptadas para diferentes tipos de sedimentos (Fig. 3).

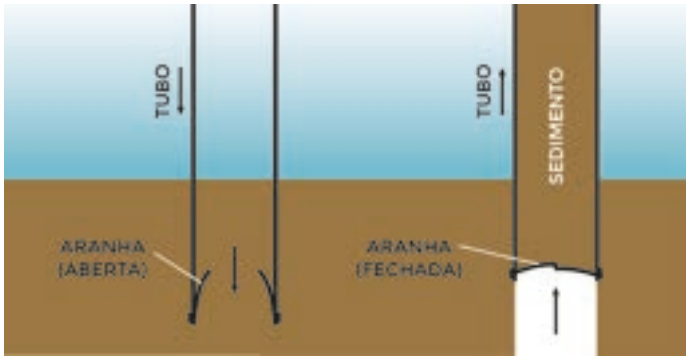



**FIGURA 3. Esquema ilustrando o funcionamento da válvula de retenção do tipo "aranha".** *Ilustração: Leandro Coelho.*

## VOCÊ SABIA?

**O que permite a captura de sedimento com um testemunhador por pressão?**

Você pode ter uma ideia ao colocar um canudo em um *milk-shake*, cobri-lo com o dedo por cima, depois extrair o canudo e notar que o sorvete fica preso. Da mesma maneira, o testemunhador por pistão mergulha no fundo do mar e coleta lama em seu tubo. Uma vedação na parte inferior reterá a amostra de sedimentos durante a recuperação.

### 1.3 Vibracorer

O testemunhador por vibração (*vibracorer*) (Fig. 4) é uma técnica para recuperar uma variedade de sedimentos que vai desde inconsolidados, muito macios até muito densos, em locais que a maioria das outros testemunhadores simplesmente não podem ser utilizados, em geral locais muito rasos onde os navios não podem ter acesso. O equipamento testemunhador por vibração consiste em um cabeçote vibrante, que é conectado a um tubo de testemunhagem de alumínio, PVC, aço ou aço inoxidável, de 5 a 10 cm de diâmetro, que pode ter até 15 metros de comprimento. Os sedimentos podem ser coletados diretamente nos tubos sem revestimento, ou com um revestimento rígido ou macio. Para uma melhor taxa de penetração e recuperação, a frequência de vibração pode variar para diferentes tipos de materiais.

Os testemunhos coletados com essa técnica são contínuos, preservam as estruturas sedimentares e a taxa típica de recuperação, em geral, é superior a 90%. Para segurar o sedimento, são utilizadas válvulas de retenção e combinações de coletores de testemunho tipo aranha que podem ser adaptadas para diferentes tipos de sedimentos.

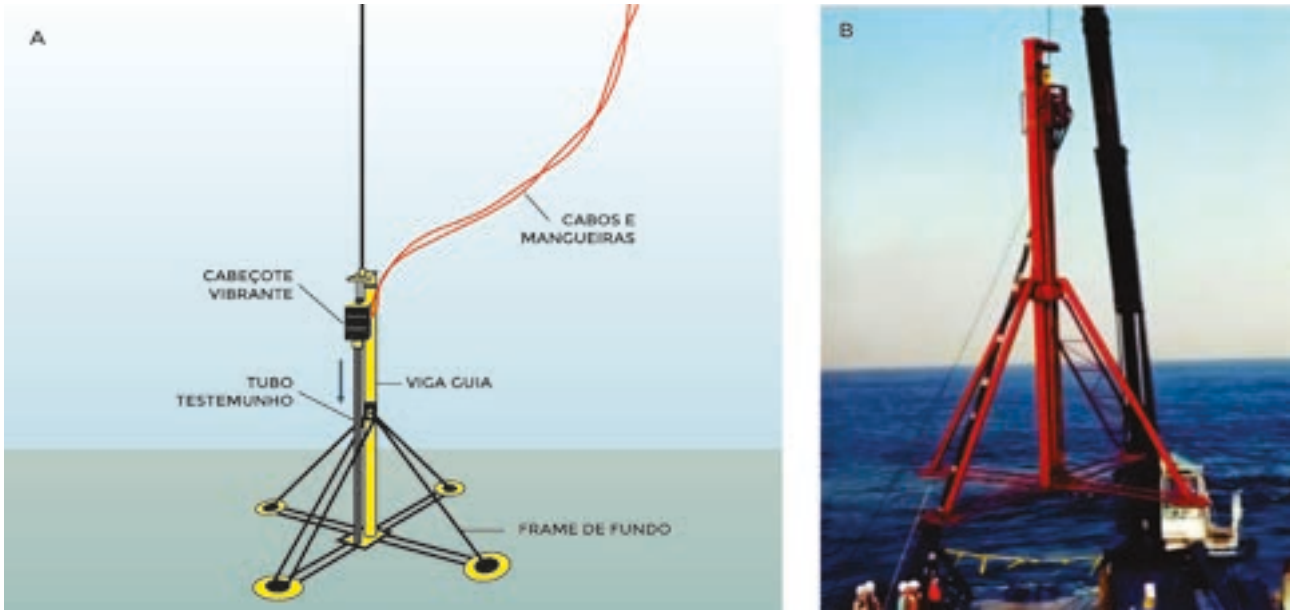



**FIGURA 4.** Vibracorer em modelo (A) e em foto de fase de lançamento (B).

### 1.4 Métodos de perfuração por rotação

A pesquisa petrolífera financiou métodos e técnicas inovadores de perfuração e coleta de sedimentos consolidados e não consolidados. Esses esforços de pesquisa mostraram que: (1) a

maioria dos materiais consolidados e não consolidados pode ser retirada do testemunho pelo método hidráulico-rotativo; e (2) a retirada do testemunho hidráulico-rotativo é um processo lento e caro, exigindo uma quantidade considerável de paciência e experiência do operador. Areia, silte, argila e combinações desses materiais podem ser coletados pelo método hidráulico-rotativo (Fig. 5), com muito pouco distúrbio ou contaminação, se forem usadas as técnicas adequadas.

Camadas de sedimentos muito grossos, como seixos e blocos, sem um material mais fino que os ligam, são muito porosas e permeáveis, tornando-se, portanto, totalmente desagregadas e contaminadas pela intrusão do fluido de perfuração.

**FIGURA 5.** **A) O navio Joides Resolution - programa *International Ocean Discovery Program* (IODP), que tem capacidade de fazer as perfurações de rotação. B) Exemplo de testemunho de sedimentos vulcânicos consolidados coletados da IODP, feito com rotação.**

## VOCÊ SABIA?

### O que é o programa IODP?

O IODP é o programa de pesquisa internacional mais antigo do mundo e tem como objetivo científico investigar a história e a estrutura da Terra, a partir do registro de sedimentos e rochas em águas profundas dos oceanos. Utiliza tecnologias de perfuração oceânica como instrumento essencial para coleta de amostras, que permitem o levantamento de dados e contribuem para o alcance de novas descobertas sobre o sistema Terra. As áreas temáticas prioritárias de pesquisa são: (1) Mudança Climática e Oceânica: lendo o passado, informando o futuro; (2) Fronteiras da Biosfera: biodiversidade e forçantes ambientais dos ecossistemas no fundo do mar; (3) Conexões Terrestres: processos e seus impactos no meio ambiente, da superfície terrestre do fundo do mar; e (4) A Terra em Movimento: processos e riscos na escala de tempo humana.

## 2. Propriedades físicas dos testemunhos

Medidas de propriedades físicas de alta resolução estratigráfica são feitas para fornecer informações sobre o caráter físico geral do sedimento. Tais dados aprimoram nossa compreensão do contexto físico-químico e histórico dos depósitos oceânicos e aumentam a caracterização da unidade litológica, facilitando a correlação dos dados de perfilagem de poço com medidas discretas e descrições do testemunho contínuo. Os dados de propriedades físicas são importantes para:

- Correlação estratigráfica furo a furo e local a local, para construção de seções compostas;
- Detecção de descontinuidades laterais, causadas naturalmente ou pelo processo de perfuração;
- Obtenção de informações sobre diferenças na composição e textura dos sedimentos;
- Detecção de ciclos orbitais e outros marcadores estratigráficos; e
- Identificação dos principais refletores sísmicos e construção de perfis sísmicos sintéticos.

Um testemunho (*core*) geralmente tem um comprimento de 9,5 m e é dividido em seções (*sections*) de 1,5 m de comprimento cada uma. Portanto, um testemunho completo é constituído de seis seções, mais uma sétima, mais curta. Às vezes a sexta seção também pode ser mais curta que as outras.

As propriedades físicas são medidas em seções inteiras de testemunho e as amostras podem ser estudadas de forma 'contínua', ou seja, medidas no testemunho inteiro com um espaçamento definido (por exemplo a cada cm). Alternativamente podem ser 'discretas', com medidas efetuadas em subamostras extraídas dos testemunhos originais (por exemplo a cada seção). Existe também um equipamento que se chama *MultiSensor Core Logger* (MSCL) (Fig. 6) que permite efetuar, de forma contínua, diferentes medidas ao mesmo tempo.

**FIGURA 6. O sistema *Multi Sensor Core Logger* (MSCL) da GeoTek, com sensores de colorimetria, luminescência, raio gama natural, raio gama induzido, susceptibilidade magnética, onda-P e resistividade elétrica.** *Foto: Geotek.*

## 2.1 Colorimetria e espectrofotometria

As radiações eletromagnéticas visíveis ao olho humano têm comprimento de onda entre 380 e 750 nm, que é um pequeno intervalo do amplo espectro eletromagnético. Comprimentos de onda abaixo de 380 nm são chamados luz ultravioleta (UV) e acima de 750 nm, luz infravermelha. Através da Colorimetria e Espectrofotometria obtemos as medidas quantitativas e digitalizadas da cor e da luz, respectivamente.

A colorimetria se baseia na substituição de respostas subjetivas, como "azul claro", "roxo escuro intenso" ou "ouro brilhante", por um sistema numérico objetivo, calculado com escalas de cores como *Pantone Matching System* (***PMS***), ***CMYK*** (*Cyan*, *magenta*, *yellow* e *black*), ***HTML*** (código de 6 letras e números) e ***RGB*** (*Red*, *Green*, *Blue*).

A espectrofotometria é o método de análises ópticas, quantitativa, da absorção da luz pelo sedimento, onde a concentração de um mineral na substância absorvente, nesse caso o sedimento, é proporcional à quantidade de luz absorvida. Essas medidas são efetuadas por equipamentos denominados espectrofotômetros.

As medições da refletância espectral difusa são realizadas usando um espectrofotômetro que mede os espectros de refletância difusa do testemunho aberto da faixa do ultravioleta ao infravermelho próximo (380 – 900 nm), em incrementos de 2 nm. Os dados espectrais também são convertidos no espaço de cores da Comissão Internacional de Iluminação, ***L****, ***a**** e ***b****, onde ***L**** varia de preto para branco, ***a**** de verde para vermelho e ***b**** de azul para amarelo. Medições precisas de refletância espectral difusa requerem contato nivelado entre os sensores do instrumento.

Um analisador de superfície a laser integrado auxilia no reconhecimento de irregularidades na superfície da seção do testemunho (ou seja, rachaduras e vazios), e os dados dessa ferramenta são registrados para fornecer uma verificação independente da fidelidade das medições e filtrar os dados para remover irregularidades nos dados causadas por intervalos ou perturbações da perfuração (Fig. 7).

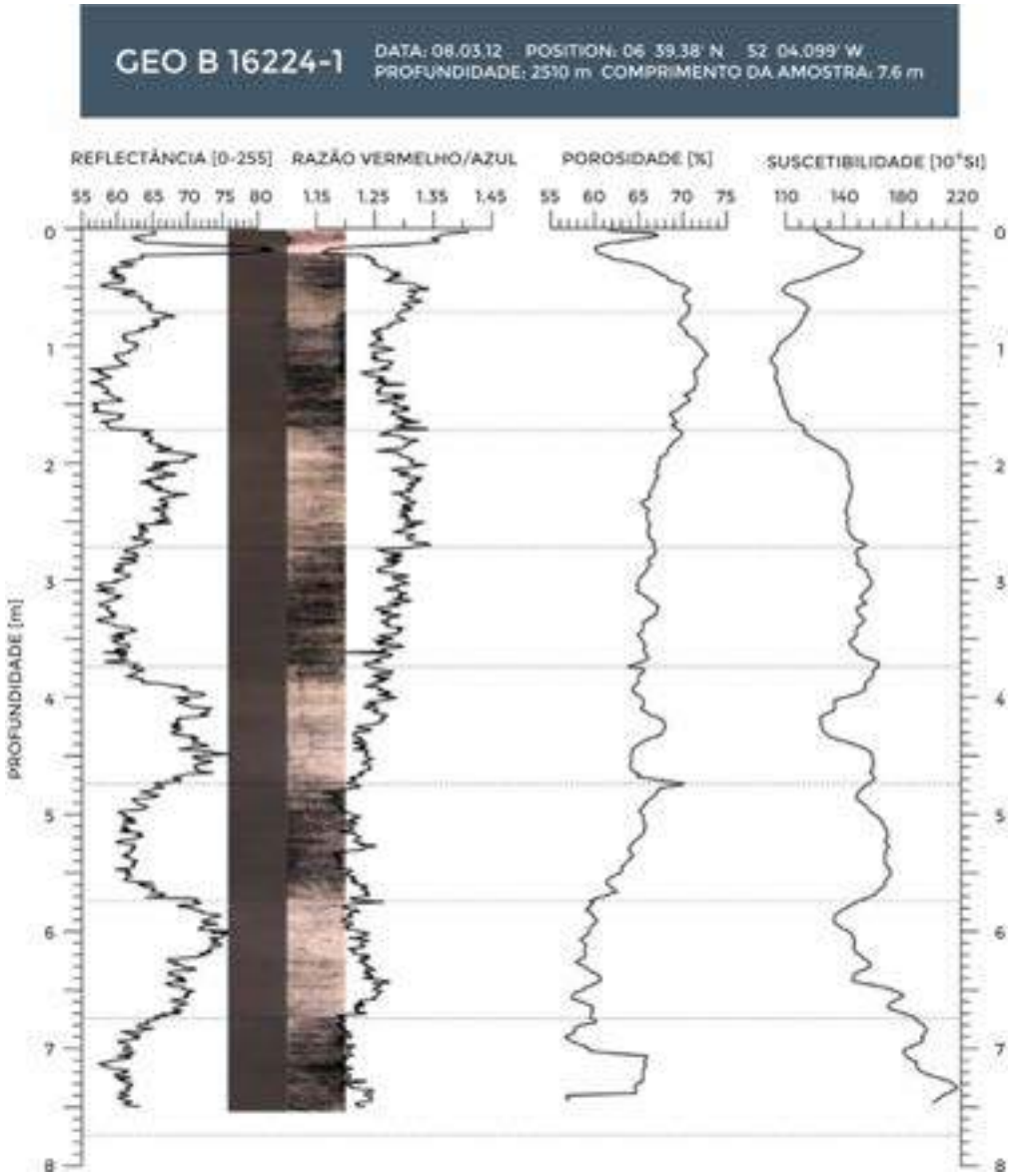



**FIGURA 7.** Refletância, razão vermelho/azul, porosidade e susceptibilidade magnética do testemunho GeoB 16224-1 (Amapá) do Cruzeiro AMADEUS 2012.

## 2.2 Umidade e densidade (MAD)

Densidade, porosidade, proporção de poros e conteúdo de água são propriedades básicas de sedimentos e rochas. Essas informações são obtidas com mais precisão por meio de determinações de massa e volume. A massa ou o volume do material a granel (úmido), o material seco e a água extraída (assumida como sendo fluido de poro intersticial) são corrigidos para a massa e o volume de sal evaporado durante o processo de secagem após a coleta da amostra.

A massa e o volume dos sais provenientes da evaporação da água intersticial são calculados a respeito da salinidade padrão e da densidade da água do mar em condições de laboratório e de uma densidade média de sal da água do mar.

As amostras principais para análise de umidade e densidade (MAD) são coletadas de uma seção para medir:

**Massa:** medida usando um sistema de balança analítica dupla de compensação de movimento e um forno de secagem; e

**Volume:** medido usando um paquímetro ou um picnômetro de deslocamento de hélio que emprega o princípio de deslocamento de fluido de Arquimedes para determinar o volume de objetos sólidos.

As propriedades de interesse da MAD são: densidade do sólido; teor de água; densidade aparente (considerando os poros); densidade seca (sem água); porosidade; e taxa de vazios. Essas medidas podem ser feitas somente em amostras discretas e são destrutivas.

## 2.3 Condutividade térmica

Condutividade térmica é uma propriedade do material que descreve a capacidade de conduzir calor. A condutividade térmica pode ser definida como "*a quantidade de calor transmitida através da espessura unitária de um material – em uma direção normal para uma superfície da área unitária – devido a um gradiente de temperatura unitário em condições de estado estacionário*".

As unidades de condutividade térmica são medidas aplicando uma temperatura por um lado do testemunho e medindo o tempo que se percebe uma variação de temperatura do outro lado do testemunho. Sua unidade de medida é $\boldsymbol{W / (m \cdot K)}$ no sistema internacional (SI). Essas medidas são destrutivas, e podem ser feitas somente em amostras discretas.

## 2.4 Ondas P

As medidas da velocidade da onda ***P*** (onda de compressão) em testemunhos são feitas no testemunho inteiro antes de ser aberto, ou em um sistema de bancada projetado para medir essas velocidades em subamostras de testemunhos consolidados ou litificadas, que podem ser de forma cúbica ou cilíndrica. O primeiro sistema faz uma medida a cada intervalo no testemunho, mas em amostras discretas, são coletadas com uma frequência de uma seção.

A separação entre os transdutores é calibrada usando espessuras de 40 a 90 mm e verificada em uma seção de 65 mm. O atraso é calculado automaticamente no software e verificado periodicamente,

usando os dois transdutores juntos. O sistema usa um par de transdutores de orientação vertical medindo um sinal acústico de 230 kHz e aplicando pressão de amostra consistente através do uso de um sistema de fuso de esferas de precisão com alça destacável internamente. O nível de pulso do transmissor é ajustável, assim como o ganho do sinal, garantindo o recebimento de um sinal claro. A temperatura ambiente e a distância de percurso são registradas automaticamente usando a sonda de temperatura conectada e o deslocamento (*offset*) do micrômetro a laser.

A conversão do sinal analógico em digital de alta frequência permite que o sinal da onda seja exibido através do software em um osciloscópio digital, com a forma de onda de primeira chegada escolhida automaticamente e a velocidade calculada. Para melhorar o acoplamento entre o transdutor e a amostra, os testemunhos têm que conter o fluido original da rocha. Em amostras discretas é possível aplicar água destilada às cabeças do transdutor/receptor.

## 2.5 Raio Gama Natural (NGR)

As emissões de raios gama naturais (NGR) dos sedimentos são uma função do decaimento aleatório e discreto dos isótopos radioativos que ocorem naturalmente nos sedimentos, predominantemente os isótopos de $^{238}U$, $^{232}Th$ e $^{40}K$, e são medidos através de detectores de cintilação alojados em um coletor blindado. O detector de NGR em testemunhos possui uma janela de medição de 7,5 cm e o intervalo de amostragem é definido em 6 cm, a fim de maximizar a resolução das medidas e minimizar a reamostragem de intervalos. Os dados são apresentados como contagens totais por segundo e referem-se à integração de todas as contagens de emissões na faixa de energia de raios gama entre 0 e 3 MeV e são mais adequados para correlação entre testemunhos.

Nenhuma correção é feita nos dados do NGR para levar em conta os efeitos de volume relacionados ao sedimento preenchendo incompletamente o revestimento do testemunho. A medida de NGR define o número de contagem de raios gama que chegam ao sensor em relação aos materiais radioativos como U, Th e K, que são presentes principalmente nas argilas. Portanto, os valores de NGR são diretamente relacionados à quantidade de argilas presentes no testemunho.

## 2.6 Densidade de Raio Gama, Raios Gama Induzido ou Raio Gama Aparente

A densidade de volume é um reflexo da porosidade saturada da água, tamanho dos grãos, densidade dos grãos (mineralogia), empacotamento dos grãos e perturbação do descaroçamento. Para medir a densidade aparente, a Densidade de Raio Gama (GRA) ou Induzido utiliza uma cápsula de 10 mCi, $^{137}Cs$ como fonte de raios gama (com o pico de energia principal em 0,662 MeV) e um detector de cintilação. O pico estreito de colimação é atenuado quando passa pelo centro do testemunho.

Os fótons incidentes são espalhados pelos elétrons do sedimento pela dispersão de Compton. Portanto, o valor do número de contagem de Raios Gama que chega ao sensor, em relação a fonte radioativa do outro lado do testemunho, é diretamente relacionada à densidade aparente do sedimento dentro do testemunhador.

A atenuação da intensidade do raio incidente está diretamente relacionada à densidade de elétrons que passam através do testemunho de sedimento, dado o coeficiente de atenuação médio (em micrômetros) do sedimento. No caso de recuperação incompleta, a GRA deve ser considerada como uma estimativa mínima.

## 2.7 Resistividade elétrica

A resistividade elétrica (também chamada resistência elétrica específica ou resistividade de volume) e o seu inverso, a condutividade elétrica, são propriedades fundamentais de um material, que quantificam a intensidade com que ele resiste ou conduz corrente elétrica. Uma baixa resistividade indica um material que prontamente permite a passagem de corrente elétrica. A resistividade é comumente representada pela letra grega rho ($\boldsymbol{\rho}$).

A unidade SI de resistividade elétrica é o ohm · metro (Ω · m). Por exemplo, se uma amostra de rocha de material sólido de 1 m × 1 m × 1 m tiver contatos em duas faces opostas e a resistência entre esses contatos for de 1 Ω, a resistividade do material será de 1 Ω · m.

Um testemunho não consolidado é geralmente caracterizado por sua falta de litificação ou cimentação. As propriedades brutas do material do testemunho são controladas, no entanto, pelo tamanho dos grãos. O material mais grosseiro costuma ser difícil de amostrar intacto devido à sua natureza sem coesão, enquanto o material de granulação mais fina pode ser coeso e manter a sua textura característica. Consequentemente, a caracterização de amostras não consolidadas em laboratório varia com a litologia.

A medição da resistividade elétrica em sedimentos não consolidados pode ser problemática. Alterações no estado físico do testemunho podem levar a determinações de resistividade que não são representativas do estado *in situ*. Assim, sedimentos inconsolidados fornecem um meio de estudar o comportamento de consolidação que não é possível usando amostras de rochas cimentadas, nas quais mudanças sutis na textura podem mascarar o processo de interesse subjacente.

A natureza inconsolidada do material também pode reduzir os problemas dos eletrodos, frequentemente associados a rochas mais competentes. Tais medidas têm sido usadas no campo oceanográfico por várias décadas. Essa contribuição revisa técnicas experimentais relevantes, previamente aplicadas no estudo de sedimentos do fundo do mar, que podem ser apropriadas para uso na indústria de hidrocarbonetos.

Em laboratório é possível investigar as relações entre resistividade elétrica, porosidade e permeabilidade. Além disso, é possível deduzir a porosidade da amostra a partir de medições de sua resistividade elétrica. Usando medições de resistividade de alta resolução espacial, é possível produzir imagens de laboratório de sedimentos não consolidados que se relacionam com o grau de heterogeneidade na porosidade (Fig. 7).

## 2.8 Provas geotécnicas e resistência ao cisalhamento

A resistência ao cisalhamento não drenada ($\boldsymbol{S}$) dos sedimentos pode ser medida usando diferentes dispositivos. O **torvane** e o **penetrômetro de bolso** são dispositivos portáteis que permitem a determinação rápida da resistência ao cisalhamento em sedimentos coesivos. O penetrômetro de bolso é mais eficaz quando os sedimentos ficam levemente endurecidos, enquanto o torvane permite a determinação da força de cisalhamento em sedimentos fracos e moderadamente endurecidos.

O torvane é um dispositivo pequeno, portátil e de mola, com uma lâmina de palheta pressionada na amostra e girada. As medições de força feitas com o torvane são afetadas por alterações na quantidade de pressão aplicada ao dispositivo e na taxa de rotação. Semelhante aos testes automatizados de cisalhamento de palhetas, as determinações de $\boldsymbol{S}$ usando o portátil torvane assumem que um cilindro de sedimento é cisalhado uniformemente em torno do eixo da palheta e permanece em uma condição

não drenada durante o teste. Nesse estado, a coesão é o principal contribuinte para a resistência ao cisalhamento. A violação dessa suposição ocorre com o rompimento progressivo da amostra com falha, drenagem das pressões locais dos poros e comportamento de escorregamento.

O penetrômetro de bolso (Fig. 8) mede a resistência à compressão não confinada dos sedimentos, que, em uma argila ideal, é igual a duas vezes ***S***. As medições são feitas pressionando a cabeça retrátil do penetrômetro na extremidade do testemunho. A quantidade de força necessária para pressionar a cabeça 5 mm no sedimento é lida em uma escala calibrada. A resistência máxima ao cisalhamento mensurável com o penetrômetro de bolso é de 245 kPa.

**FIGURA 8.** Análise em testemunho de sedimentos utilizando-se o penetrômetro.

O cone de queda mede a penetração de um cone padrão, à medida que cai livremente a uma distância definida e se incorpora ao sedimento. O cone de queda é geralmente o dispositivo usado em terra. Durante o teste, o cone é abaixado de forma que apenas toque e marque a superfície do testemunho dividido antes de ser travado no lugar com a leitura do mostrador. O cone é então liberado e penetra na superfície da amostra. A resistência ao cisalhamento não drenada é determinada usando uma fórmula empírica.

## 2.9 Paleomagnetismo

### *2.9.1 Magnetoestratigrafia*

A magnetoestratigrafia é mais conhecida como uma técnica que emprega correlação entre diferentes seções estratigráficas, usando as direções magnéticas que definem as reversões de polaridade geomagnética como horizonte-marcador definido na escala global de polaridade (*Global Polarity Time Scale* - ***GPTS***). As idades das inversões de polaridade fornecem amarração entre pontos de comparação comuns entre os testemunhos e a ***GPTS***, permitindo uma correlação de tempo extremamente precisa.

Recentemente, a magnetoestratigrafia adquiriu um significado mais amplo, agora se referindo a muitos tipos de medidas magnéticas dentro de uma sequência estratigráfica. Muitas dessas medidas fornecem correlação e controle de idade, não apenas para os limites mais antigos e mais recentes de um intervalo de polaridade, mas também dentro de intervalos.

Assim, a magnetoestratigrafia não representa mais uma ferramenta de datação baseada apenas nas inversões de polaridade geomagnética, mas compreende um conjunto de técnicas que inclui medições de todos os parâmetros do campo geomagnético, magnetismo ambiental, alteração magnética e paleoclimática das rochas registradas em rochas sedimentares e correções importantes das direções magnéticas relacionadas à geodinâmica, tectônica e processos diagenéticos.

Diagramas de componentes vetoriais (ou Zijderveld modificados) são usados para exibirem dados de desmagnetização passo a passo. Quando uma série de camadas de rocha apresenta o mesmo sinal de inclinação da magnetização remanescente característica (***ChRM***), é chamada de magnetozona (ou unidade magnetoestratigráfica). Isso se dá pois, dentro deste intervalo, há uma única polaridade do campo magnético.

Nominalmente, inclinação, declinação e intensidade da ***ChRM*** para cada amostra é examinado através de uma análise de componentes principais (***PCA***) das etapas de desmagnetização.

### *2.9.2 Propriedades magnéticas*

O magnetismo ambiental é usado para identificar e caracterizar a mineralogia magnética e fornece restrições para a interpretação paleomagnética dos resultados e para compreensão dos fatores que controlam as mudanças ambientais. Medições do magnetismo ambiental são baratas, rápidas, não destrutivas e fornecem informações fundamentais sobre o tamanho, abundância e composição de minerais magnéticos. Essas medições podem ser realizadas ao longo de uma sequência sedimentar em alta resolução e incluem: (1) suscetibilidade magnética (Fig. 6) e remanências artificiais: (2) magnetização anisterética remanente (***ARM***); (3) magnetização isotérmica remanente (***IRM***); magnetização de campo remanente isotérmico inverso (***BIRM***); e (4) parâmetros dependentes coercitivos (***S-ratio*** e ***HIRM***).

Susceptibilidade magnética de campo baixo ($\chi$ normalizado para peso e $\kappa$ normalizado para volume) representa quanta magnetização (***M***) um material retém quando um campo magnético (***H***) é aplicado. Portanto, é um parâmetro complexo que reflete a soma de materiais magnéticos, como como materiais ferromagnéticos *sensu lato* (por exemplo, magnetita), antiferromagnéticos (por exemplo, hematita) e materiais não magnéticos, como paramagnético (por exemplo, silicatos ou argilas) e diamagnético (por exemplo, quartzo ou carbonato). Os resultados da suscetibilidade magnética de campo baixo devem ser interpretados com cautela, pois podem estar relacionados a inúmeros processos. A magnetização remanente de histerese é ativada apenas pelos minerais magnéticos mais intensos, frequentemente grãos de domínio único (***SD***), que não possuem parede do domínio e são uniformemente magnetizados. Isto é, consequentemente, um *proxy* para a concentração de magnetita de origem eólica, biogênica ou impactoclástica ou de outros processos ambientais.

A magnetização remanente isotérmica ativa todos os grãos magnéticos até a saturação (também chamados de ***SIRM*** ou ***Mrs***), que normalmente é de 1 T ou 900 mT. O ***IRM***, portanto, é o principal *proxy* para a concentração magnética. A relação entre ***ARM*** e ***IRM*** ($ARM / IRM_{900mT}$) fornece um *proxy* para o tamanho dos grãos magnéticos. Em seguida, ***IRMs*** menores podem ser aplicados ao ***IRM***, chamados de ***IRM*** de campo inverso (***BIRM***), para produzir relações ***IRM*** que fornecem informações sobre a composição magnética. Esses são os chamados ***S-ratio*** e ***HIRMs*** (transmitidos a 300 e 100 mT, respectivamente). Eles são calculados como, por exemplo: $S\text{-}ratio_{300mT} = BIRM_{300mT} / IRM_{900mT}$, $S\text{-}ratio_{100mT} = BIRM_{100mT} / IRM_{900mT}$, $HIRM_{300mT} = (IRM_{900mT} + BIRM_{300mT}) / 2$, $HIRM_{100mT} = (IRM_{900mT} + BIRM_{100mT}) / 2$ para indicar as diferentes respostas de minerais magnéticos (magnetita vs. hematita).

## 3. Micropaleontologia

As interações entre água, ar, rocha e vida na Terra são fundamentais para a dinâmica dos processos do nosso planeta. As composições dos oceanos e da atmosfera são definidas por essas interações, nas quais os microrganismos desempenham um papel particularmente importante. Eles retiram o $CO_2$ da atmosfera produzindo calcário e matéria orgânica, mas requerem nutrientes como cálcio, fosfato e ferro, fornecidos pelos processos geológicos para fazê-lo. Por sua vez, a atividade microbiana afeta as taxas e os processos cíclicos pelos quais esses nutrientes são fornecidos e reciclados. A partir dessa complexa rede de reação, são examinados diversos compartimentos, desde respiradouros e escoamentos no fundo do mar até sedimentos marinhos e recifes de corais.

A Terra possui arquivos ricos que são lidos usando rastreadores isotópicos para entender como o reciclagem de elementos pode ter variado no passado. Assim podem ser reconhecidas várias formas de microfósseis, tanto calcários, como algas coccolitóforas (nanoplâncton calcário) e foraminíferos (planctônicos e bentônicos), quanto silicosos, como radiolários, diatomáceas, silicoflagelados, bem como pólens e dinoflagelados.

A presença ou ausência de cada espécie e sua forma, ao longo de um testemunho, que representa uma sequência temporal, significa a ocorrência ou desaparecimento da espécie naquele ambiente, que pode ter um significado de evento, seja de extinção (última ocorrência) ou de aparecimento (primeira ocorrência) de uma nova espécie. Pode ainda indicar um "*turnover*", em que as espécies mudaram de área porque as condições ambientais se tornaram desfavoráveis. Portanto, os microfósseis podem dar informações sobre a idade dos sedimentos, mas também sobre as condições e os processos presentes naquele ambiente de deposição (ver capítulo **Sedimentos do Assoalho Oceânico**).

Análises macro e micropaleontológicas de lâminas delgadas, cortes finos e outros materiais são realizadas nos laboratórios com microscópios ópticos ou eletrônicos. As lâminas delgadas são geralmente feitas a partir de amostras de sedimentos clásticos e biogênicos bem selecionados, de granulação fina (lama, micrite, etc.). Eles também podem ser feitos a partir de frações de grãos finos que são extraídas mecanicamente (por peneiramento) de sedimentos mal selecionados.

## 4. Geoquímica

As análises geoquímicas em testemunhos incluem associações de elementos e minerais, a caracterização de gases voláteis, a composição da água intersticial, a geoquímica do carbono inorgânico e carbono orgânico sedimentar. Essas medidas podem providenciar informações sobre transformações, fluxos e ciclos de elementos no ambiente e sobre os diversos aspectos geoquímicos que moldam os ecossistemas marinhos.

Podem ser analisadas a composição química de rochas, os sedimentos sólidos, a coluna de água, os fluidos de poros e partículas que vão da superfície do oceano para o fundo do mar. O objetivo é esclarecer os meios de subsistência dos microrganismos e seu importante papel nos ciclos de elementos da Terra moderna. Também visa o entendimento sobre os processos paleoambientais a partir da assinatura química no registro de sedimentos marinhos. Essas análises são também realizadas para estudar a presença de compostos relacionados à poluição.

A caracterização de associações mineralógicas, espécies elementares dissolvidas e sua composição isotópica fornece dados críticos para a identificação de fontes de fluido, reações rocha-fluido, vias de migração de fluidos, que são parte dos processos diagenéticos que acontecem depois da deposição do sedimento, mas antes que o sedimento vire rocha. Além disso, dados geoquímicos ajudam a caracterizar a biosfera subterrânea e a restringir os estoques de balanço de massa que operam no sedimento.

## 5. Análise estatística no estudo de testemunhos

Devido ao fato de que a maioria dessas medidas são repetíveis e não destrutivas, é possível fazer medidas diferentes no mesmo material, o que significa que uma mesma amostra pode fornecer mais de um dado, que, portanto, são chamados metadados. Essas técnicas são rapidamente renovadas e novos parâmetros são acrescentados, que, de forma mais confiável e mais simples, descrevem os processos que ocorrem na área da perfuração. Os testemunhos marinhos, portanto, não representam somente a fonte dos inúmeros parâmetros descritos acima, mas, quando apropriadamente guardados, constituem-se em um acervo imenso de informações.

Para responder as perguntas científicas e entender os processos através dos números dos metadados, utilizamos uma abordagem estatística com ênfase em análise de *cluster*, onde desenvolve-se métodos computacionais (baseados em algoritmos de partição) capazes de gerar padrões de agrupamentos de acordo com as semelhanças (ou diferenças), existentes em um determinado pacote de dados.

A análise de *cluster* corresponde a utilização de diversos métodos particionais e aglomerativos com o intuito de separar um pacote de dados em diferentes grupos, de acordo com a similaridade entre seus elementos. Essa ação é conhecida como *clustering*, sendo um importante método para compreender pacotes de dados multidimensionais, onde muitas vezes a comparação estatística univariada entre seus elementos não é viável. Esses podem ser divididos em dois grupos principais: hierárquicos e particionais.

Algoritmos hierárquicos não necessitam de um número de *clusters* predefinido, fornecendo informações a respeito da similaridade entre os elementos do conjunto de dados através de um dendograma, por exemplo.

Algoritmos particionais, por sua vez, irão separar os elementos em ***k*** *clusters* (ou grupos) distintos e fornecem informações composicionais sobre os grupos gerados. Porém, necessitam de um número (***k***) de *clusters* pré-definido pelo analista. No tocante aos métodos estatístico-computacionais desenvolvidos, podemos usar dois algoritmos de agrupamento particionais, o ***PAM*** (*Partioning Around Medoids*) e o *Fuzzy C-Means*.

Além disso, registros ambientais obtidos por medições finamente amostradas ao longo de sequências, podem ser avaliados como séries temporais e relacionadas a variações paleoclimáticas e mudanças paleoambientais. Em particular, as mudanças paleoclimáticas em escalas de 105–106 anos, muitas vezes resolvidas no registro sedimentar, foram fortemente moduladas por insolação forçada astronomicamente. O registro de frequências de forçantes astronômicas em *proxies* paleoclimáticos pode ser usado como uma ferramenta para executar ajustes astronômicos e desenvolver escalas de tempo contínuas sequências estratigráficas.

## 6. Avaliação de impacto ambiental usando testemunhos

Desde que desenvolvemos uma consciência ambiental, a sociedade impõe que sejam feitos uma série de estudos de avaliação de impacto ambiental antes de tomar decisões sobre a construção de empreendimentos e atividades econômicas. Portanto, para obter o licenciamento ambiental emitidos pelas instâncias oficiais, é necessário fazer uma série de estudos técnicos fundamentais para entender as condições iniciais do ambiente na área de impacto direto (a área onde vai ser construído o empreendimento) e para reconstruir os eventos de risco ocorridos no passado. Assim surgiu o requisito de uma declaração de impacto ambiental, que resultou em uma proliferação de técnicas para avaliação de impacto ambiental. Eles podem ser classificados de acordo com sua função nas três principais categorias, de identificação de impacto, avaliação de impacto e comparação de impacto.

As técnicas de identificação de impacto devem considerar como as questões devem ser organizadas, como o material deve ser apresentado, quais limites geográficos e outros devem ser fixados para manter a análise em um tamanho gerenciável e quais critérios descritivos devem ser incluídos.

As técnicas de avaliação de impacto, além de identificar os impactos de um projeto, atribuem um valor numérico à sua significância. Para alguns impactos, uma escala de medição física pode não ser apropriada sem modificação. Para outros, não existe escala física objetiva. Nos dois casos, é necessário recorrer a julgamentos subjetivos para quantificar a verdadeira entidade de um impacto.

Esses julgamentos devem ser feitos sistematicamente e, sempre que possível, de maneira que os valores resultantes formem uma escala de intervalo ou proporção, em vez de meramente uma escala ordinal. Assim, é necessário entender qual parâmetro sedimentologico, físico ou geoquímico pode ser usado para definir a relação direita com o impacto e, portanto, a significância da avaliação. O estudo de testemunhos sedimentares marinhos representa, portanto, uma das técnicas de comparação de impacto, além da avaliação de impacto, ponderando a importância relativa de cada impacto e combinando os impactos para uma avaliação geral do projeto e quaisquer alternativas a ele.

Embora a preparação do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) suscite vários dos problemas mais espinhosos que ocorrem no planejamento da tomada de decisões, estudo dos parâmetros de impacto em testemunhos são problemas que devem ser enfrentados e não evitados. Embora as técnicas sugeridas acima, de maneira alguma resolvam todos os problemas levantados, elas fornecem respostas parciais. As pessoas envolvidas na avaliação de impacto ambiental só tem a ganhar criando um arcabouço de dados (metadados) pensando sistematicamente sobre exatamente quais tarefas devem ser realizadas e fazendo uma escolha apropriada de técnicas para realizar essas tarefas.

O desenvolvimento de novas tecnologias, mesmo seguindo diretivas com relação a proibição de certas substâncias perigosas em decorrência da grande demanda conduz a um impacto direto ao meio ambiente. A determinação dos teores desses elementos potencialmente tóxicos permite avaliar seu impacto sobre a vida animal e vegetal, além de monitorar seus ciclos na biosfera. Entretanto, esses metais pesados também têm ocorrência natural. A ocorrência natural de metais pesados em solos, por exemplo, depende, principalmente, do material de origem sobre o qual o solo se formou, dos processos de formação, da composição e proporção dos componentes de sua fase sólida.

# OCEANOGRAFIA FÍSICA

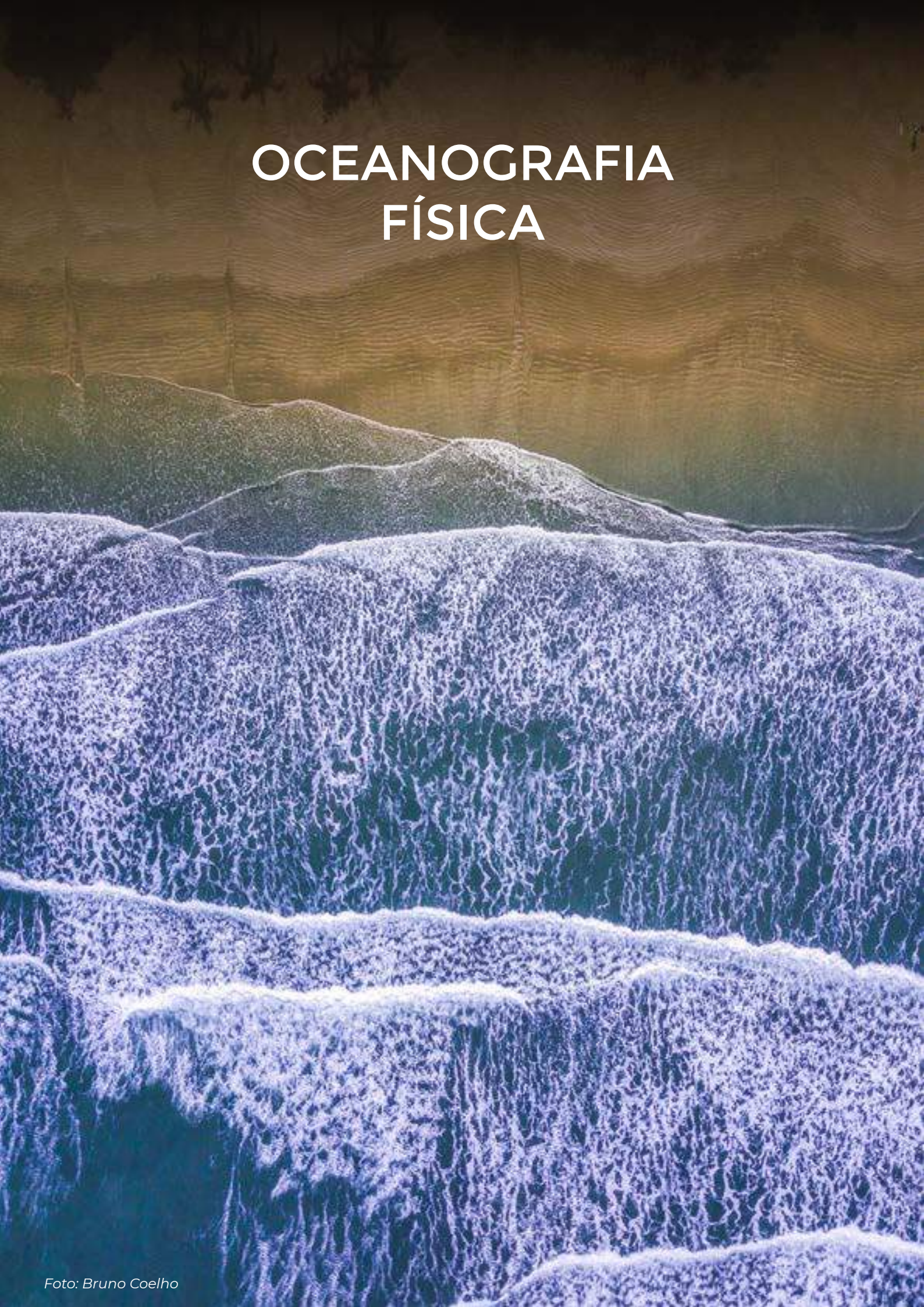


*Foto: Bruno Coelho*

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 7*

# CIRCULAÇÃO E MASSAS D'ÁGUA

*Joseph Harari*

CITAÇÃO SUGERIDA: HARARI, Joseph. Circulação e massas d'água. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 7: p. 147-166.

# Circulação e Massas d'Água

*Joseph Harari*

## 1. Introdução

O estudo científico dos oceanos tem se desenvolvido extraordinariamente desde meados do século XX, com a adoção de modernas tecnologias de medição e o desenvolvimento de teorias para explicar as características observadas (Castello & Krugg, 2017). Mas quais são os **principais objetivos de pesquisas e estudos em Oceanografia Física**? Aqui estão os mais importantes:

**1) Determinar as variações espaço–temporais das propriedades físico-químicas** da água do mar (temperatura, salinidade, etc.), de modo a caracterizar o meio a ser estudado (uma região costeira, a área equatorial, ou o oceano profundo, etc.);

**2) Desenvolver técnicas de medições de variáveis** de interesse no oceano, como correntes, ondas, etc. Atualmente, equipamentos modernos e bancos de dados são essenciais para o desenvolvimento científico;

**3) Conhecer a propagação de ondas mecânicas** (som) **e eletromagnéticas** (luz) no oceano; as ondas sonoras são importantes para comunicação, localização e medições no mar; a luz é importante nos processos biológicos (fotossíntese) e nos processos físicos (balanço de calor no oceano);

**4) Classificar as águas oceânicas**, em "tipos d'água" e "massas d'água", a partir de valores típicos de temperatura, salinidade e profundidade (ou pressão). O reconhecimento de massas d'água e o acompanhamento de suas trajetórias é essencial para os estudos oceanográficos; e

**5) Conhecer os movimentos no oceano**, sob a forma de correntes e de ondas, em diversas escalas no espaço e no tempo, desde alguns cm e poucos segundos até milhares de km e décadas ou séculos.

Para atingir seus objetivos, especialmente o de determinar a dinâmica do oceano, a Oceanografia Física conta com o apoio de duas grandes áreas do conhecimento: **1) Meteorologia**, devido à interação da atmosfera com o oceano, através dos ventos, das trocas calor, etc.; e **2) Astronomia**, devido à influência dos corpos celestes no oceano, formando as marés astronômicas.

Foto: Leandro Coelho

## 2. Propriedades físico-químicas da água do mar

As principais propriedades físico-químicas da água do mar são (Pickard & Emery, 1990; Stewart, 2005):

### 2.1 Temperatura da água do mar

É medida em ˚C e no mar aberto varia entre os limites de -2˚C a +30˚C. O limite inferior é regulado pelo ponto de congelamento da água do mar (um pouco abaixo do ponto de congelamento da água pura, que é de 0˚C, devido à presença dos sais dissolvidos na água do mar). E o limite superior é definido pelo calor específico da água do mar (capacidade de reter calor), sua condutividade térmica (capacidade de conduzir calor), a mistura de águas com diferentes temperaturas e a evaporação (mais da metade da energia recebida nas camadas superiores do oceano é utilizada para evaporação, e o restante para variações de temperatura). Entretanto, águas costeiras rasas podem ter valores máximos de temperatura um pouco acima de 30˚C.

### 2.2 Salinidade

A quantidade total de substâncias dissolvidas na água do mar se denomina "salinidade", cujas unidades são grama por quilograma (g/kg) ou partes por mil (‰). A salinidade média da água do mar é cerca de 35 g/kg, sendo que no mar aberto o intervalo é 33 a 37 g/kg. Salinidades mais baixas (28 a 29‰) são encontradas em águas costeiras, devido à influência de rios e drenagem continental. Alguns pequenos mares têm salinidade muito pequena (Báltico, 20‰) e outros muito grande (Mediterrâneo, 38.5‰ e Mar Vermelho, 40‰). Os "constituintes maiores" da água do mar correspondem a 10 elementos químicos, os quais constituem 99,7% dos sais dissolvidos na água do mar; esses constituintes maiores (sódio, cloro, etc.) possuem uma propriedade muito importante: embora a concentração total de sais dissolvidos varie bastante no espaço e no tempo, as proporções dos constituintes maiores são praticamente constantes. Torna-se possível determinar a salinidade analisando somente um dos constituintes maiores. O cloro, o elemento mais abundante, foi escolhido, dado que uma técnica analítica simples é disponível, através de uma titulação com nitrato de prata. Dessa forma, através do método químico, se determina a "**salinidade absoluta**". No entanto, desde a década de 80 a determinação direta da salinidade por análise química da água do mar se tornou de difícil operacionalização rotineira, de modo que foi desenvolvida a técnica de medir a salinidade a partir da condutividade elétrica da água do mar, o que resultou na definição da "**salinidade prática**", sendo consideradas as unidades ups (por exemplo, 35,22 ups – unidades práticas de salinidade); quando não se especifica unidades para a salinidade, os valores correspondem a ups, e o método de determinação é o da condutividade elétrica.

### 2.3 Pressão hidrostática

É o peso da coluna de água por unidade de área no mar. A pressão total num certo nível de profundidade corresponde à soma da pressão hidrostática com a pressão atmosférica na superfície do mar (sendo que a pressão atmosférica normal é $1.013 \times 10^2$ N/m$^2$, ou seja, 1.013 hPa, corresponde a 1 atmosfera). Note-se que a cada 10 metros de aumento em profundidade resulta um aumento de pressão de cerca de 1 atmosfera. A profundidade média dos oceanos é de 3.730 m (enquanto a elevação média dos continentes é de 840 m) e a máxima profundidade dos oceanos é de 11.524 m,

na Fossa Mindanao, no Pacífico Oeste (e a máxima altitude dos continentes é de 8.840 m, no Monte Everest, Himalaia, Ásia). Consequentemente, a pressão hidrostática média no fundo do mar é de 370 atmosferas, e a máxima é de 1.100 atmosferas.

### 2.4 Densidade da água do mar

É a relação entre massa e volume da água do mar, sendo expressa em kg/m$^3$. Na superfície varia tipicamente entre 1.020 e 1.030 kg/m$^3$, sendo que em profundidade se chega a ter valores próximos a 1.050 kg/m$^3$. A densidade da água pura à pressão atmosférica é de 1.000 kg/m$^3$, sendo que a água do mar tem valores maiores principalmente devido à presença dos sais. A salinidade ($s$), a temperatura ($t$) e a pressão ($p$) e determinam a densidade da água do mar ($\rho$), através de uma equação polinomial chamada "**equação do estado da água do mar**".

O aumento de temperatura provoca diminuição da densidade (devido ao aumento de volume); o aumento de salinidade provoca aumento de densidade (pois a massa aumenta e há efeitos moleculares de contração); e o aumento de pressão provoca aumento de densidade (por compressão). Mas essas variações de $\rho$ com $s, t, p$ não são lineares.

**Temperatura potencial** e **densidade potencial** são cálculos de temperatura e densidade eliminando o efeito da pressão, e só apresentam diferenças significativas (em relação aos valores realísticos) em grandes profundidades.

Temperatura e salinidade (e densidade) são importantes identificadores da água do mar por serem propriedades conservativas da água subsuperficial. Isto significa que, abaixo da superfície, não existe processo algum importante que altere qualquer uma das duas, com exceção da mistura. Na superfície, a precipitação e a evaporação alteram a salinidade; e muitos processos alteram a temperatura, principalmente a radiação solar. Concluindo, as massas de água podem ser rastreadas por valores característicos de $s, t, p$.

## 3. Distribuição das propriedades

A seguir serão abordados os principais aspectos das variações das propriedades com a latitude, a longitude, a profundidade e as estações do ano (Garisson, 2010).

### 3.1 Distribuição da temperatura na superfície:

Em geral, as isotermas acompanham os paralelos terrestres, com temperaturas mais baixas nas regiões polares e mais altas nas baixas latitudes (Fig. 1). Isto se deve principalmente ao efeito da radiação solar, cuja média anual chega a ultrapassar 400 Watts/m$^2$ na região equatorial e não ultrapassa 200 Watts/m$^2$ nas áreas polares. Porém, nas baixas latitudes, se tem temperaturas mais baixas no lado leste do que no lado oeste dos oceanos; esta característica é notória no Atlântico Sul e no Pacífico Sul, nas isotermas de 25°C no verão e nas isotermas de 20°C no inverno; este aspecto se deve aos ventos alísios (na região tropical), que tendem a afastar as águas no lado leste dos oceanos para o mar aberto, favorecendo o afloramento de águas mais frias vindas abaixo da superfície.

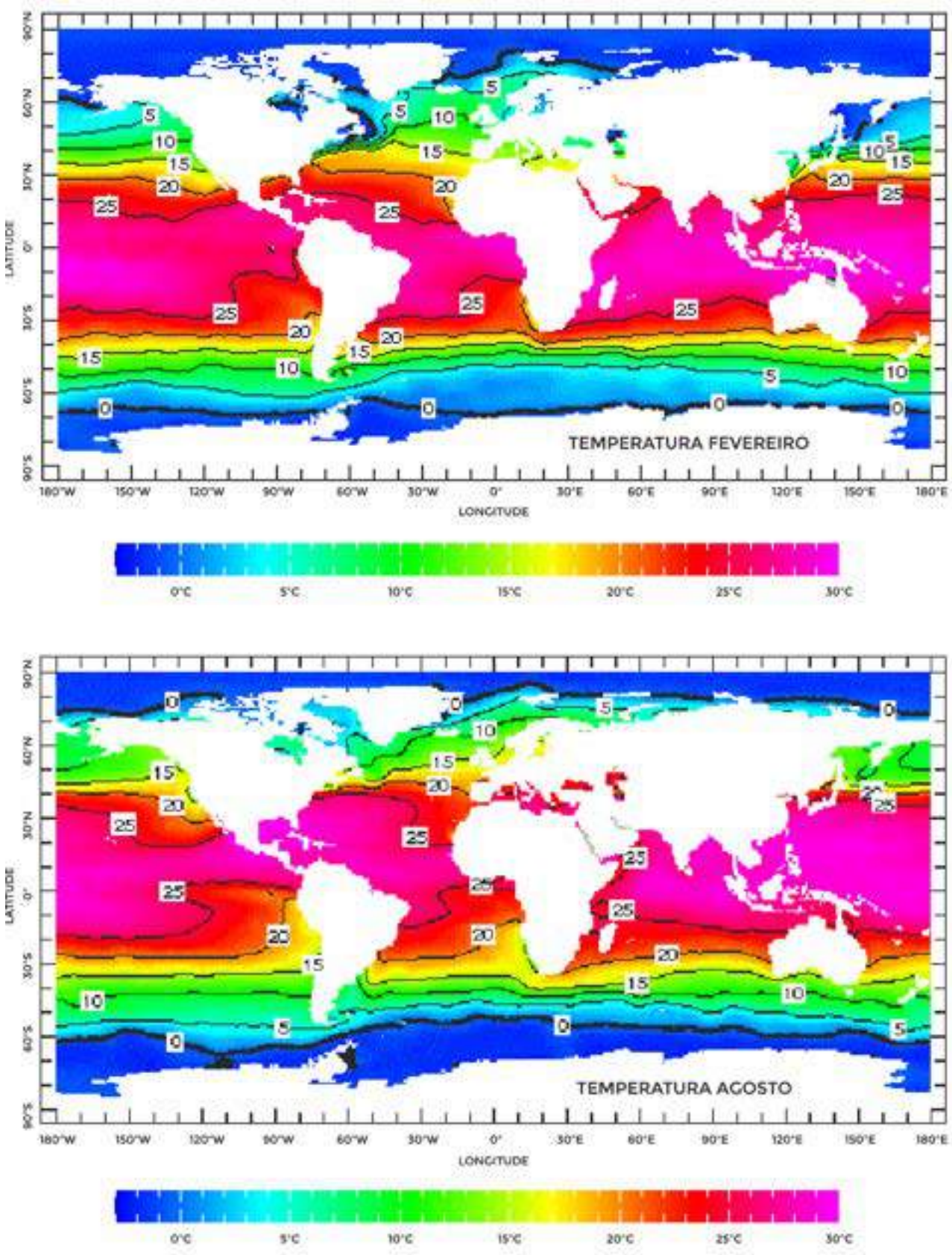



**FIGURA 1. Temperatura média na superfície dos oceanos, em fevereiro e agosto, em °C.** *Dados extraídos do WOA – World Ocean Atlas – 2009, de Locarnini et al., 2010.*

### 3.2 Distribuição vertical de temperatura

Nas latitudes baixas, a coluna d'água em geral possui três camadas (Fig. 2A): camada da superfície, com espessura típica de 50 a 200 m e temperatura próxima à da superfície; termoclina principal, de 200 a 1.000 m, com grande variação da temperatura com a profundidade; e a camada do fundo, abaixo dos 1.000 m, com pequena variação de temperatura com a profundidade. Em altas latitudes, não há termoclina: temperatura é relativamente uniforme na vertical (Fig. 2C); e nas latitudes médias, a termoclina principal é uma "termoclina sazonal", pois só ocorre no verão (Fig. 2B). A camada da superfície é chamada "camada de mistura", por ser homogênea, devido à mistura causada pelo vento e pelas ondas.

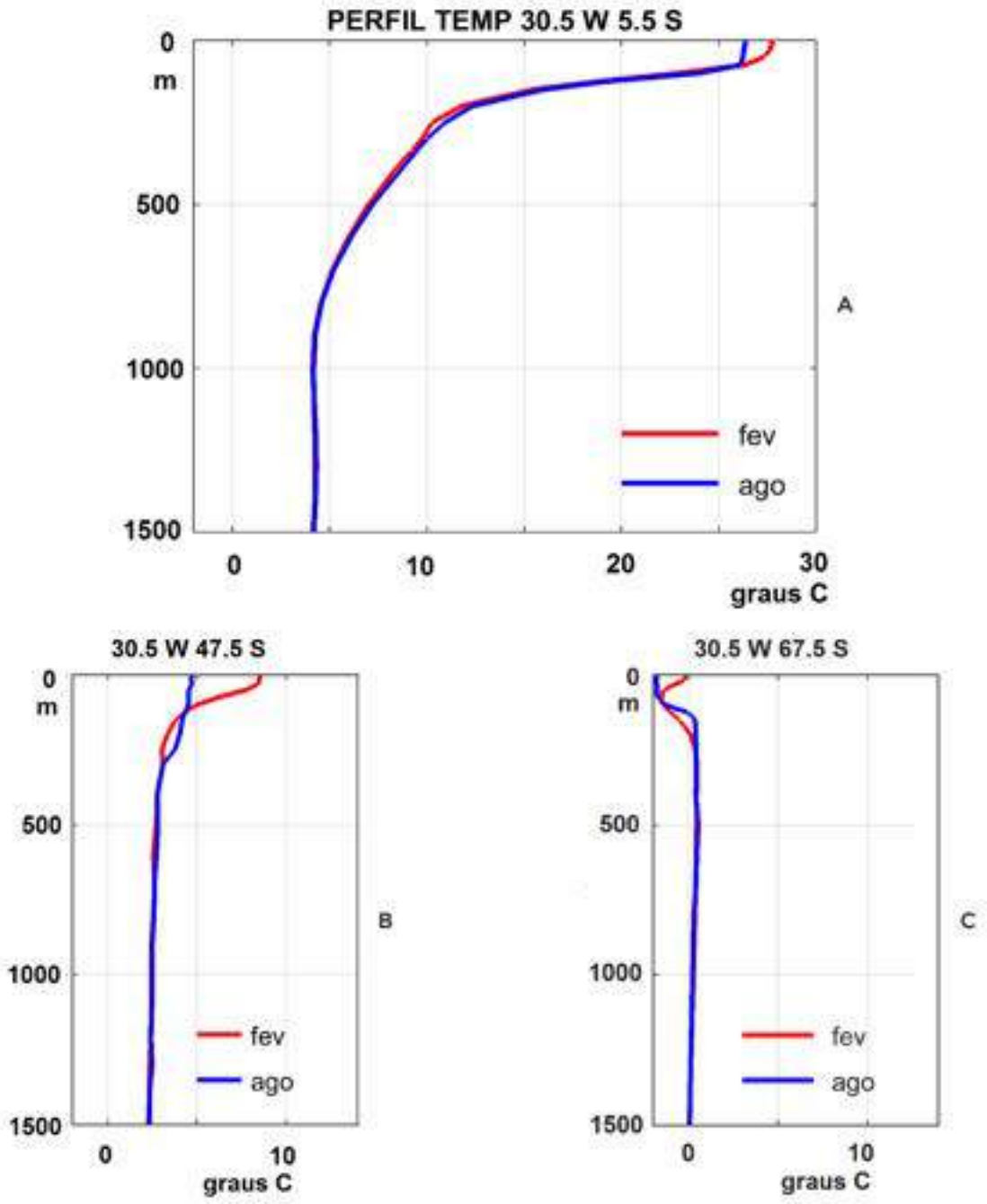



**FIGURA 2.** **Perfis verticais típicos de temperatura nas baixas (A), médias (B) e altas latitudes (C), em °C. Nessa figura, se encontram valores médios mensais de fevereiro (verão) e agosto (inverno), na longitude de 30,5°W e nas latitudes de 5,5°S (baixa latitude), 47,5°S (latitude média) e 67,5°S (alta latitude).** *Dados extraídos do WOA – World Ocean Atlas – 2009, de Locarnini et al., 2010.*

### 3.3 Variações sazonais da estrutura vertical da temperatura

Em águas oceânicas, nas áreas tropicais e nas altas latitudes, as variações sazonais da estrutura vertical da temperatura são muito pequenas, visto que as temperaturas na superfície do ar e do mar não variam significativamente. Entretanto, nas latitudes médias, há uma variação sazonal marcante da estrutura vertical da temperatura das águas oceânicas, o que origina uma "termoclina sazonal" (Fig. 2). Abaixo dos 500 m, as variações de temperatura do oceano com as estações do ano são muito pequenas, sugerindo um ambiente muito homogêneo para a temperatura nas grandes profundidades. Por outro lado, águas costeiras possuem variações diurnas e sazonais de temperatura bem maiores que o oceano profundo, com valores até em torno de 10°C.

### 3.4 Distribuição da salinidade na superfície

A salinidade na superfície dos oceanos varia geralmente entre 33 e 37, tendo variação meridional, com baixos valores nas altas latitudes, máximos em cerca de 25°N e S e mínimo logo ao Norte do Equador (Fig. 3). A salinidade na superfície nas regiões oceânicas (longe da costa) é controlada principalmente por dois fatores: a evaporação, que a aumenta, e a precipitação, que a reduz. Os máximos de salinidade na superfície estão nas regiões dos ventos alísios, que provocam um máximo de evaporação menos precipitação. O congelamento de água aumenta a salinidade, e o degelo a diminui, mas estes efeitos são secundários e localizados. Assim, baixos valores de salinidade são encontrados em regiões de alta precipitação e nas regiões polares, enquanto que valores muito altos aparecem em regiões com excesso de evaporação, como por exemplo o Mar Mediterrâneo (39) e o Mar Vermelho (41). Em regiões costeiras, além de precipitação e evaporação, pode haver a influência do desaguadouro de rios com grande vazão fluvial e a drenagem continental de precipitação, de modo que valores de salinidade abaixo de 30 podem ocorrer (note-se os baixos valores de salinidade próximo ao Rio Amazonas e o Rio da Prata).

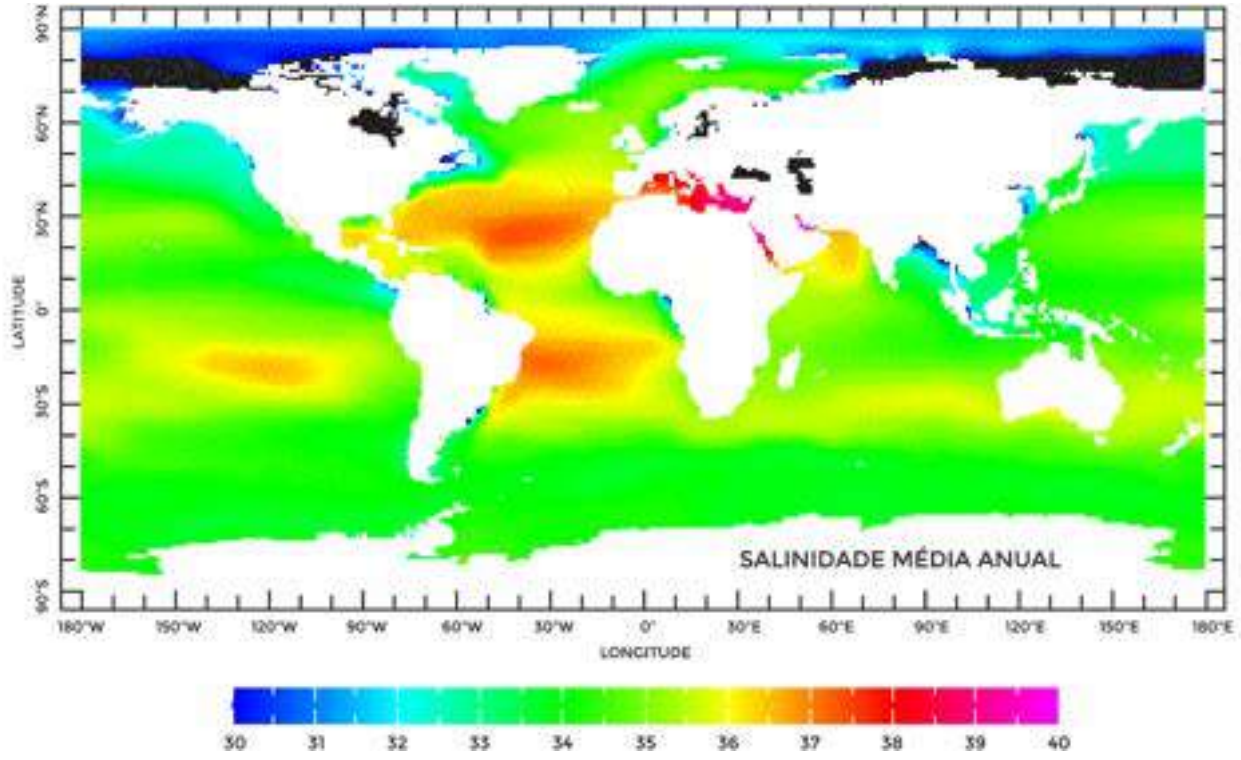



**FIGURA 3. Salinidade média anual na superfície dos oceanos, em ups.** *Dados extraídos do WOA – World Ocean Atlas – 2009, de Antonov et al, 2010).*

## 3.5 Distribuição vertical de salinidade

Quanto à distribuição vertical de salinidade, esta não é tão simples de descrever como a de temperatura. Isto porque a densidade (que é o fator responsável pela estabilidade vertical) é principalmente determinada pela temperatura (em águas oceânicas). Somente nas águas costeiras, e em estuários, a salinidade é tão importante quanto a temperatura como elemento controlador da densidade. De qualquer forma, os efeitos principais que determinam os perfis de salinidade em águas oceânicas são a evaporação e a precipitação, que aumentam a salinidade de superfície nas baixas latitudes e diminuem a salinidade de superfície nas altas latitudes (Fig. 4).

Em águas muito profundas, abaixo de 4.000 m, a salinidade é muito uniforme, 34,6 a 34,9, e a temperatura tem pequenas variações (-0,9 a 2°C); isto significa que essas águas profundas têm características bastante uniformes. Nos perfis verticais, uma camada intermediária entre a de superfície e a do fundo pode apresentar grande variação de salinidade com a profundidade, sendo chamada "haloclina". Por outro lado, em regiões costeiras com grande descarga de água doce de rios, a salinidade é diminuída pela influência fluvial, principalmente na superfície, e pode também ocorrer uma haloclina, entre a camada de superfície (pouco salina) e a de fundo (muito salina).

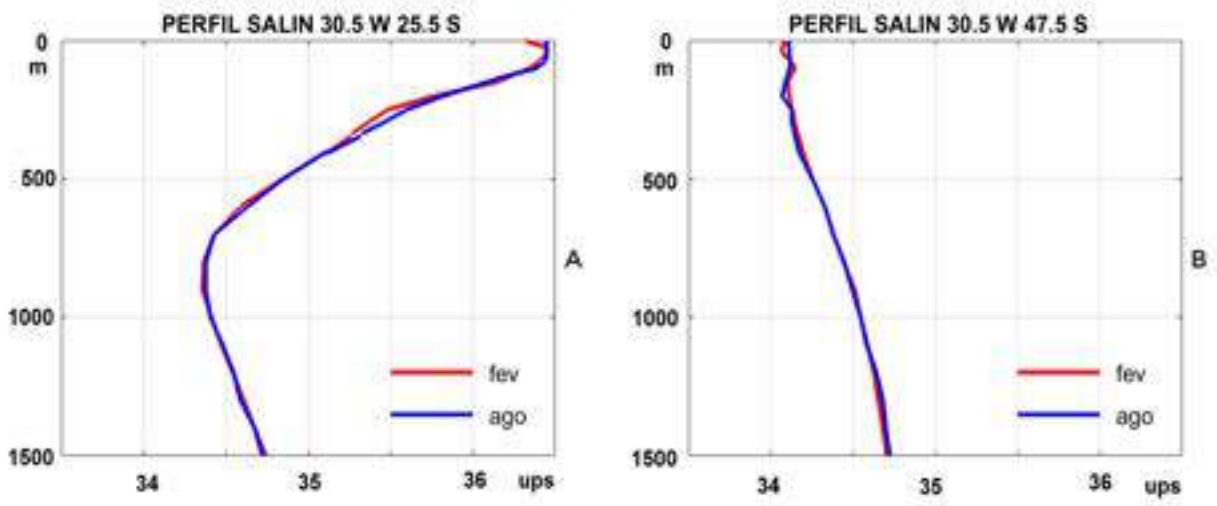



**FIGURA 4. Perfis verticais típicos de salinidade em áreas oceânicas, no Atlântico Sul. Nessa figura se encontram valores médios mensais de fevereiro (verão) e agosto (inverno), na longitude de 30,5°W e nas latitudes de 25,5°S (baixa latitude) e 47,5°S (latitude média).** *Dados extraídos do WOA – World Ocean Atlas – 2009, de Antonov et al., 2010.*

## 3.6 Variações temporais da salinidade

No oceano aberto, variações sazonais de salinidade na superfície são pequenas, menores que 0,5; somente em regiões de grande variação anual da precipitação e nas latitudes muito altas (próximo ao gelo) há grandes variações anuais (só na superfície). Variações diurnas da salinidade em áreas oceânicas são muito pequenas. Por outro lado, em regiões costeiras, variações de vazões fluviais, principalmente entre as estações chuvosas e secas, podem resultar em grandes variações de salinidade da água do mar.

### 3.7 Distribuição da densidade

No oceano profundo, a distribuição de densidade é uma "imagem espelhada" da temperatura. Portanto, a densidade na superfície varia de 1.022 kg/m$^3$ no Equador (mínimo) a 1.030 kg/m$^3$ nos polos (máximo). Densidade aumenta com a profundidade, mas não de uma forma uniforme: nas regiões equatorial e tropical há uma camada superior de densidade com pequeno aumento com a profundidade, depois há uma camada na qual a densidade aumenta rapidamente com a profundidade, chamada picnoclina, e abaixo desta camada a densidade aumenta suavemente com a profundidade (camada do fundo). Em altas latitudes, a densidade aumenta suavemente com a profundidade, e a picnoclina inexiste. Esta estrutura vertical de densidade, e o contraste entre as baixas e médias latitudes, são mais facilmente verificados nos perfis de densidade potencial (Fig. 5). Normalmente, a picnoclina acompanha a termoclina; sendo uma camada muito estável, constitui uma barreira à passagem de águas (e propriedades) na vertical; como resultado, o oceano pode ser aproximado em modelos por "duas camadas" (um quente e uma fria) separadas por uma interface (a picnoclina). Por outro lado, em águas costeiras, a salinidade é um importante fator controlador da densidade, em todos os níveis de profundidade.

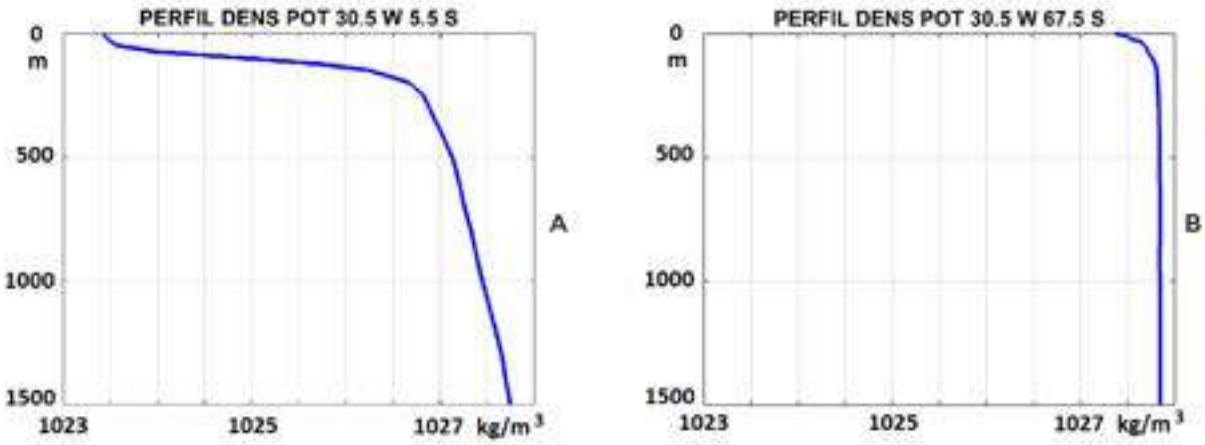



**FIGURA 5.** **Perfis verticais típicos de densidade potencial em áreas oceânicas, no Atlântico Sul. Nessa figura se encontram valores médios anuais, na longitude de 30,5°W e nas latitudes de (A) 5,5°S (baixa latitude) e (B) 67,5°S (latitude média) (B).** *Valores extraídos do Banco de Dados LEVITUS 94 (Levitus & Boyer, 1994).*

A Figura 6 mostra a distribuição da espessura das três camadas da estrutura vertical de temperatura (e densidade) no oceano profundo – camada de mistura, termoclina (e picnoclina) e camada do fundo - em função da latitude.

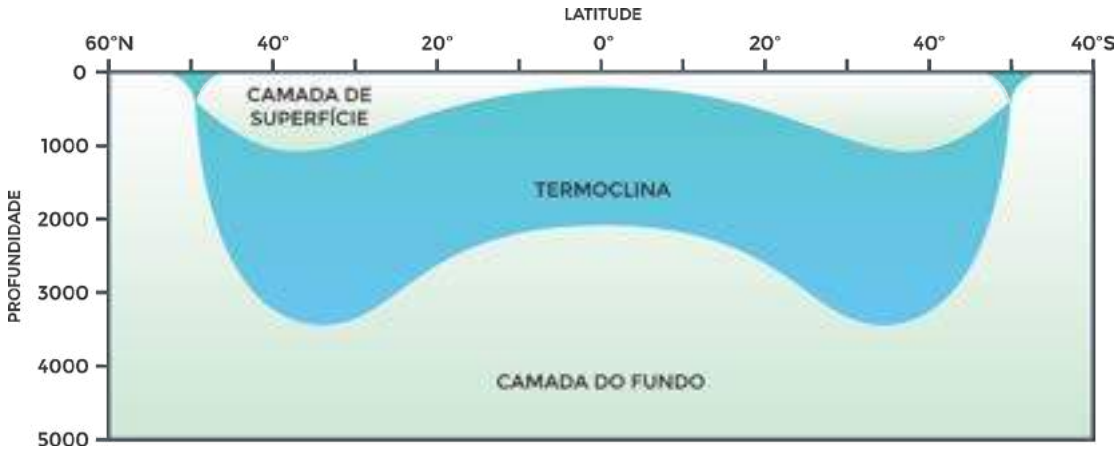



**FIGURA 6.** **Distribuição das camadas na estrutura vertical de temperatura (e densidade), em função da latitude, com a camada de superfície, termoclina (e picnoclina) e camada do fundo.**

## 4. Massas de água

Uma vez conhecidas as distribuições espaço-temporais das propriedades físico-químicas da água do mar, o passo seguinte na construção do conhecimento se encontra na classificação das massas de água nos oceanos (Tomczak & Godfrey, 1994).

Um número limitado de combinações particulares de temperatura e salinidade ocorre nos oceanos. Isto porque a maioria das massas d'água adquire propriedades características na superfície, em determinadas regiões, geralmente nas altas latitudes, devido à influência da atmosfera; e, ao se deslocarem, levam consigo as propriedades originais. Dessa forma, normalmente uma massa d'água é identificada pela combinação característica das propriedades que apresenta, e sua trajetória pode ser determinada.

Não é possível reconhecer uma parcela de água somente pela sua densidade, visto que há muitas combinações de temperatura e salinidade (e pressão) que produzem a mesma densidade; entretanto, a combinação temperatura-salinidade (e pressão) pode ser usada para este fim, com a vantagem destas propriedades serem conservativas nas camadas abaixo da superfície; isto significa que, abaixo da superfície, não há nenhum processo que introduza ou remova calor ou sal, de modo que a quantidade total de calor e sal é aproximadamente constante.

O "**diagrama T-S**", é um gráfico da temperatura contra a salinidade, no qual cada ponto do diagrama representa a combinação temperatura-salinidade a uma dada profundidade de uma coluna vertical no oceano (e corresponde a uma densidade); os pontos reunidos em sequência de profundidades crescentes compõem uma curva contínua.

No diagrama T-S, um ponto (na prática, um conglomerado de pontos próximos) é chamado "**tipo d'água**"; uma porção da curva T-S (na prática, não exata) representa uma "**massa d'água**". Dessa forma, uma massa d'água possui uma faixa de temperaturas e uma faixa de salinidades associadas a ela; processos climáticos de superfície formam os tipos d'água; e uma massa d'água pode ser considerada como uma mistura de dois ou mais tipos d'água.

As águas de superfície não recaem em categorias exatas de massas d'água devido à grande variabilidade de seus parâmetros. Em geral, espera-se que as águas de maior profundidade sejam formadas nas latitudes mais altas, enquanto as mais próximas à superfície sejam formadas mais próximo ao Equador. Dessa forma, na superfície de áreas tropicais se considera a formação das Massas de Água Tropicais, com altas temperaturas e salinidades (> 20°C, > 36 ups).

Adicionalmente, em áreas costeiras de baixas latitudes e grande aporte fluvial (ou drenagem de águas continentais) são detectadas as Massas de Água Costeiras, com altas temperaturas e baixas salinidades (> 26°C, < 34 ups).

O Quadro 1 apresenta os principais tipos e massas de água do Oceano Atlântico, com seus valores limites de temperatura e salinidade e as profundidades em que atingem o equilíbrio vertical e passam a fluir horizontalmente.

A Figura 7 apresenta as mesmas informações do Quadro 1, incluindo os diagramas T-S referentes aos pontos 30,5°W 22,5°N e 30,5°W 22,5°S, para valores médios climatológicos de temperatura e salinidade do mês de abril.

**QUADRO 1.** Principais tipos e massas de água no Oceano Atlântico, com suas profundidades de equilíbrio e intervalos de temperatura e salinidade.

| Massa de água | Abreviação | Profundidade (m) | Temperaturas mín. e máx. (°C) | | Salinidades mín. e máx. | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Água de Fundo Antártica | AFAA | 4000 m ao fundo | -5,0 | 2,0 | 30,00 | 34,86 |
| Água Circumpolar Antártica | ACAA | 100 a 4000 m | 0,1 | 2,0 | 34,62 | 34,73 |
| Água Intermediária Antártica | AIAA | 500 a 1000 m | 3,0 | 6,0 | 34,20 | 34,60 |
| Água Central do Atlântico Sul | ACAS | 100 a 300 m | 6,0 | 20,0 | 34,60 | 36,00 |
| Água Profunda do Atlântico Norte | APAN | 1300 m ao fundo | 3,0 | 4,0 | 34,60 | 35,00 |
| Água Intermediária do Atlântico Norte | AIAN | 300 a 1000 m | -1,5 | 3,0 | 34,70 | 34,90 |
| Água Central do Atlântico Norte | ACAN | 100 a 500 m | 7,0 | 20,0 | 35,00 | 36,70 |
| Água Mediterrânea | AM | 1400 a 1600 m | 2,6 | 11,0 | 35,00 | 36,20 |
| Água Tropical | AT | | 20,0 | | 36,00 | |
| Água Costeira | AC | | 26,0 | | | 34,00 |

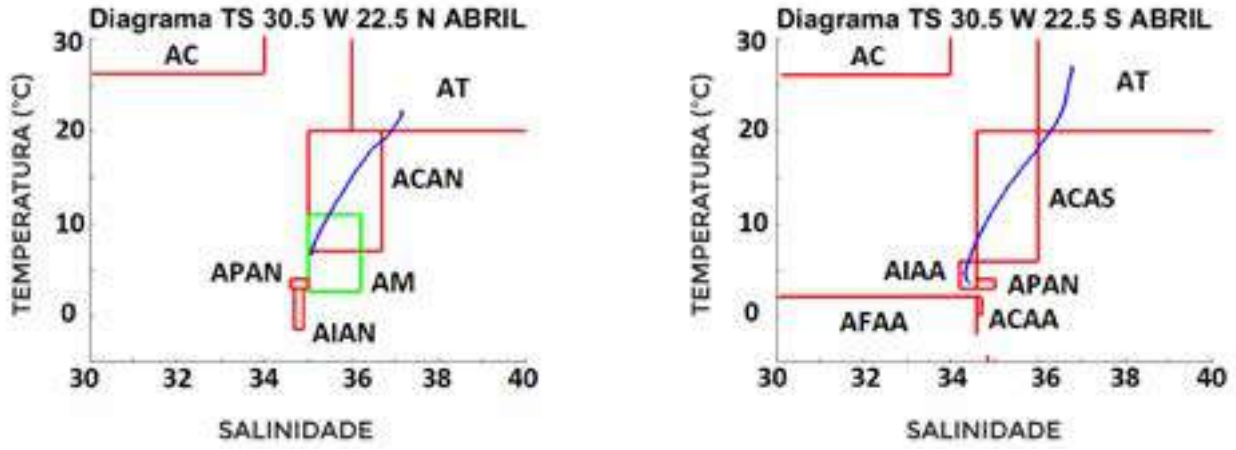



**FIGURA 7.** Diagramas TS para o valores médios climatológicos mensais em abril (linhas azuis) nos pontos 30,5°W 22,5°N (esquerda) e 30,5°W 22,5°S (direita) e os limites de temperatura e salinidade dos principais tipos e massas de água no Oceano Atlântico Norte (esquerda) e Sul (direita).

## 5. Efeitos que geram correntes no oceano

Há cinco formas principais de geração de correntes no oceano (McLellan, 1968; Siedler, Church & Gould, 2001):

**1) Efeitos termohalinos:** a circulação termohalina corresponde aos movimentos da água produzidos quando a densidade é alterada por variações de temperatura ou salinidade em alguma região do oceano. Um aumento de densidade (devido ao resfriamento da água ou aumento da salinidade) faz com que a água mergulhe e desloque as águas profundas; assim, o início da circulação termohalina é um fluxo vertical mergulhando a uma profundidade intermediária ou mesmo ao fundo; e o prosseguimento é como um fluxo horizontal, com as águas recém afundadas

deslocando as antigas residentes no local. A excessiva perda de energia térmica pelos oceanos nas altas latitudes provoca um aumento da densidade das águas na superfície e gera este tipo de circulação (Fig. 8A). O efeito isolado da salinidade na geração da circulação termohalina ocorre principalmente nas regiões tropicais (Fig. 8B), por efeito de evaporação (regiões de máxima salinidade na superfície). Em grande escala, os efeitos térmicos prevalecem sobre os halinos. Os "efeitos termohalinos" ocorrem também em escalas menores, como por exemplo em estuários, onde há o encontro de água doce do rio com água salina do mar, ou no mar Mediterrâneo (Fig. 9).

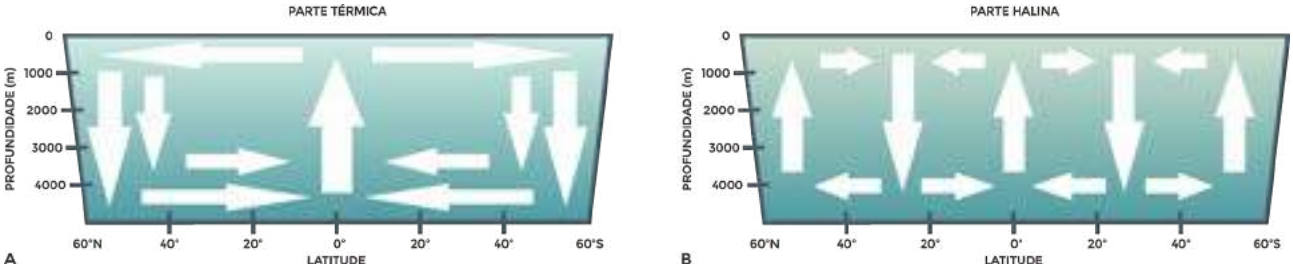



**FIGURA 8.** Esquema da circulação termohalina em grande escala: A) parte térmica; e B) parte halina.

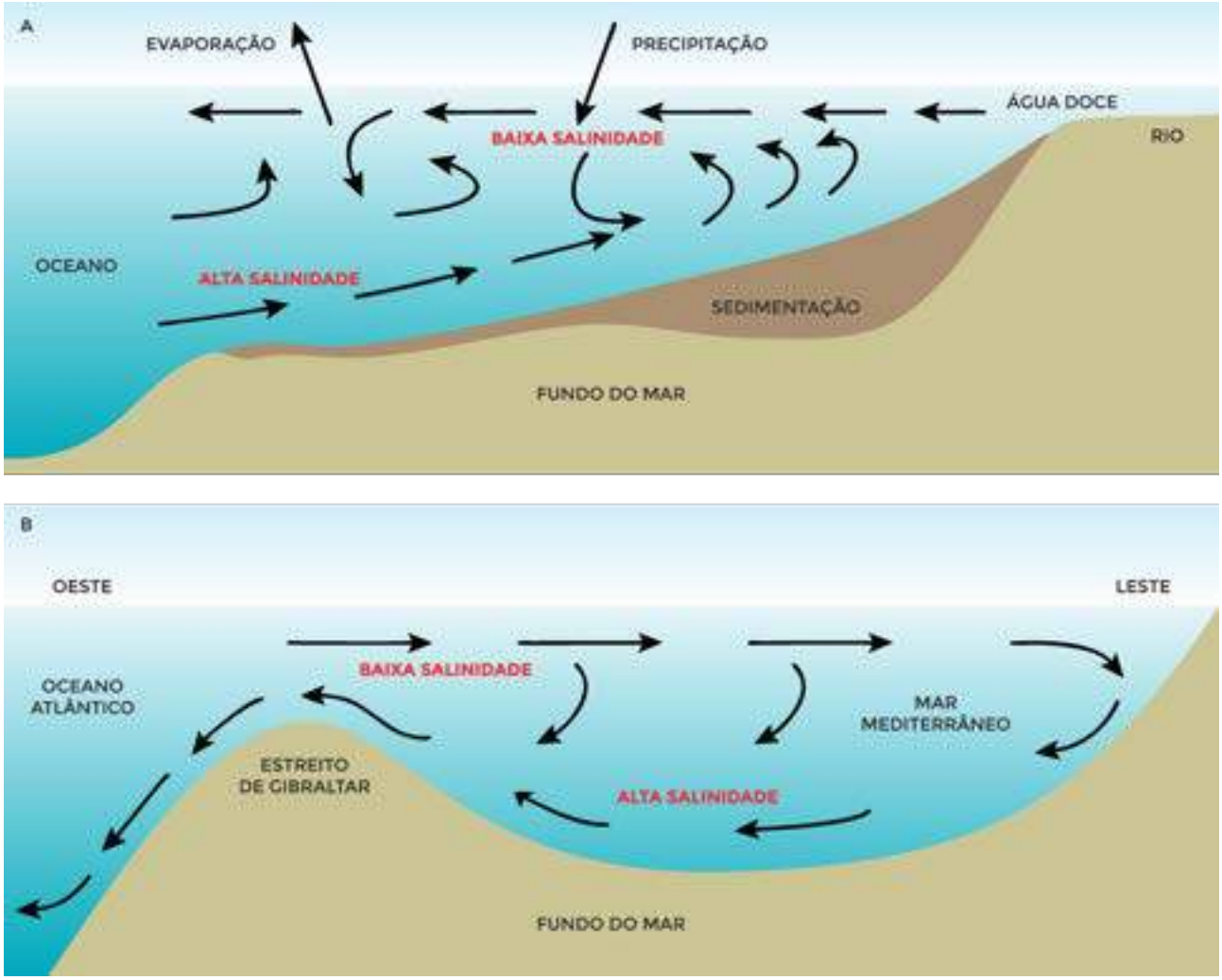



**FIGURA 9.** Esquema da circulação termohalina: A) em um estuário; e B) no Mar Mediterrâneo. *Ilustração: Leandro Coelho.*

**2) Circulação gerada pelo vento**: ocorre principalmente na primeira centena de metros de profundidade e é basicamente uma circulação horizontal. A fricção do vento na superfície do mar é a força geradora do movimento, mas a direção da corrente na superfície do mar não é a do vento: a rotação da Terra origina a força de Coriolis, que deflete as correntes para a esquerda do vento no hemisfério Sul e para a direita do vento no hemisfério Norte. Ao longo da vertical, se tem a "espiral das correntes de deriva" (Fig. 10): a intensidade das correntes diminui exponencialmente com a profundidade e a direção muda linearmente com a profundidade (para a esquerda no Hemisfério Sul e para a direita no Hemisfério Norte). Com ventos fortes em regiões suficientemente profundas, a variação da direção com a profundidade é tão importante que se chega a ter correntes em profundidade que são opostas ao vento de superfície. Por exemplo, a 35°N, um vento forte de 36 km/h, que sopra para Norte, gera uma corrente na superfície de cerca 0,06 m/s para Nordeste, e a 100 m de profundidade se tem uma corrente por volta de 0,01 m/s para Sul. Em locais rasos, a deflexão das correntes ao longo da vertical é menor e as correntes tendem a ser alinhadas com o vento ao longo da coluna de água.

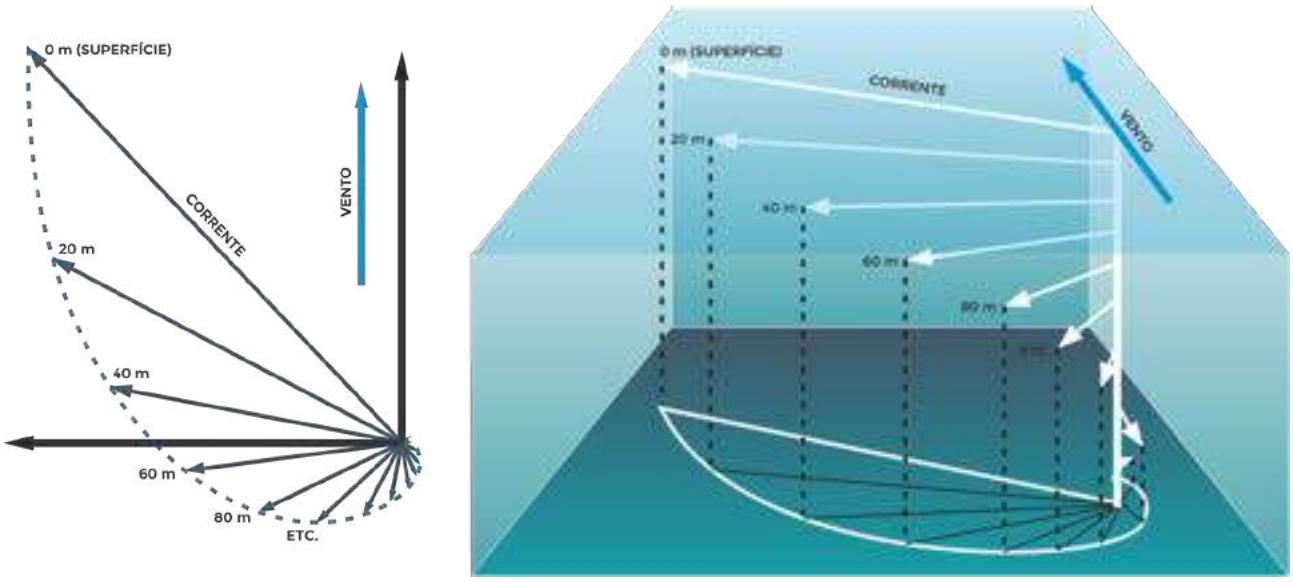



**FIGURA 10.** Perfil vertical das correntes geradas pelo vento (no Hemisfério Sul). *Ilustração: Leandro Coelho.*

**3) Gradientes (variações horizontais) de pressão atmosférica** geram acelerações, da pressão maior para a menor, em toda a coluna d'água (Fig. 11A).

**4) Inclinações do nível médio do mar** também induzem acelerações no oceano, do nível maior para o menor, desde a superfície até o fundo (Fig. 11B).

**5) O Sol e a Lua** atuam com a força da gravidade, gerando as correntes de maré astronômica, ao longo de toda a coluna d'água; ver esquema da Figura 12: devido à presença do corpo celeste (no caso, a Lua), as águas no seu quadrante tem elevação; as águas no quadrante oposto também tem elevação; e as águas nos outros dois quadrantes tem rebaixamento; como a Terra gira, para um observador em Terra (por exemplo na ilha), as águas se elevam e rebaixam duas vezes por dia – gerando as correntes de maré (ver capítulo sobre marés e nível médio do mar).

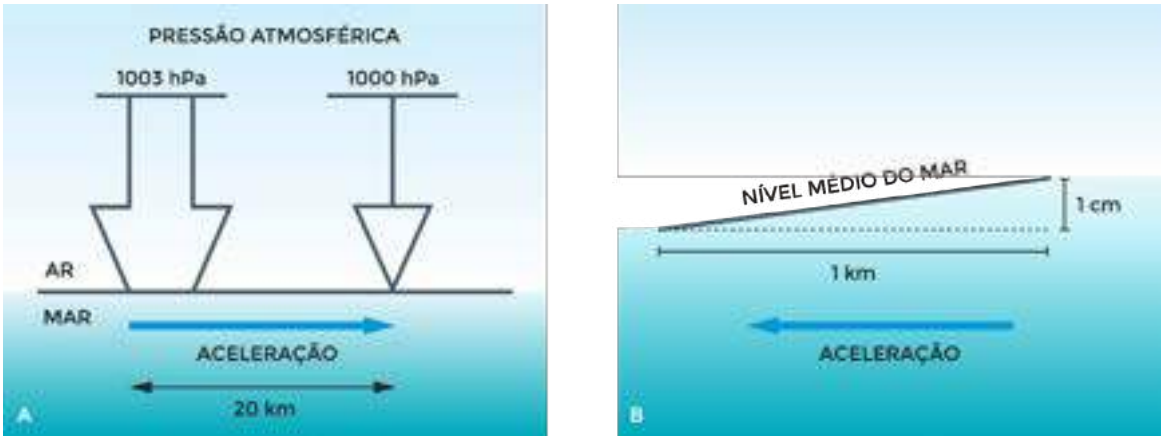



FIGURA 11. Aceleração gerada por gradiente: A) de pressão atmosférica; e B) do nível médio do mar.

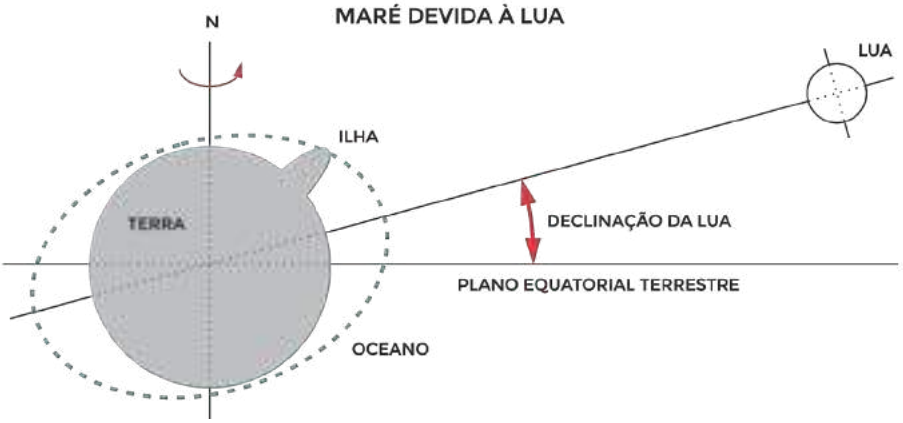



FIGURA 12. Geração de correntes de maré pelo efeito gravitacional da Lua.

As correntes oceânicas são, portanto, resultantes do efeito combinado dos movimentos termohalinos (predominam em águas profundas), dos movimentos gerados pelo vento (predominam na superfície) e dos movimentos devidos a gradientes de pressão atmosférica, inclinações da superfície e influências astronômicas (em toda a coluna). Todos os movimentos são afetados:

- **Pela força de Coriolis**, devida à rotação da Terra, que deflete as correntes para a esquerda no Hemisfério Sul, e para a direita no Hemisfério Norte; e
- **Por efeitos de continuidade**, que são também importantes nos fluxos oceânicos (raramente ocorrem variações muito abruptas na intensidade e direção das correntes).

Em todos os casos, os movimentos prosseguem e se desenvolvem muito além das regiões de origem, gerando os grandes sistemas de circulação nos oceanos. Além dos efeitos que geram e modificam os sistemas de circulação, há efeitos (de atrito) que atenuam os movimentos:

- **Fricção das correntes com o fundo do mar,**
- **Fricção vertical** (entre camadas de fluido em movimento relativo ao longo da coluna d'água); e
- **Fricção lateral** (entre porções vizinhas de fluido em movimento relativo na mesma profundidade).

A seguir, serão estudados os grandes sistemas de circulação nos oceanos, com uma divisão: circulação na superfície e circulação em águas profundas. Não existe uma fronteira definida entre

águas de superfície e águas profundas. Entretanto, normalmente se consideram as águas de superfície até o início da termoclina: é a camada de mistura, com espessura de 200 a 500 m, geralmente bastante homogênea devido à mistura gerada pelo vento e pelas ondas. E se consideram águas profundas as que se encontram abaixo da termoclina (ou picnoclina).

## 6. Circulação de superfície nos oceanos

As circulações nas superfícies das grandes áreas oceânicas mostram semelhanças notáveis (Tomczak & Godfrey, 1994) - ver esquemas para o Oceano global (Fig. 13) e para o Oceano Atlântico (Fig. 14).

- Nos **giros subtropicais**, as circulações de superfície são horárias no hemisfério Norte e são anti-horárias no hemisfério Sul;
- Nos giros subtropicais, as correntes de superfície são mais concentradas e mais intensas no lado Oeste do que no lado Leste do oceano;
- Na **região equatorial**, um pouco ao Norte e um pouco ao Sul do Equador, ocorrem, na superfície, as correntes Norte Equatorial e Sul Equatorial, ambas para Oeste, que fazem parte dos giros subtropicais; essas duas correntes são separadas por uma Corrente Contra Equatorial, fluindo para Leste; e
- Nas **regiões de altas latitudes** ocorrem os giros polares, que são anti-horários no hemisfério Norte e horários no hemisfério Sul.

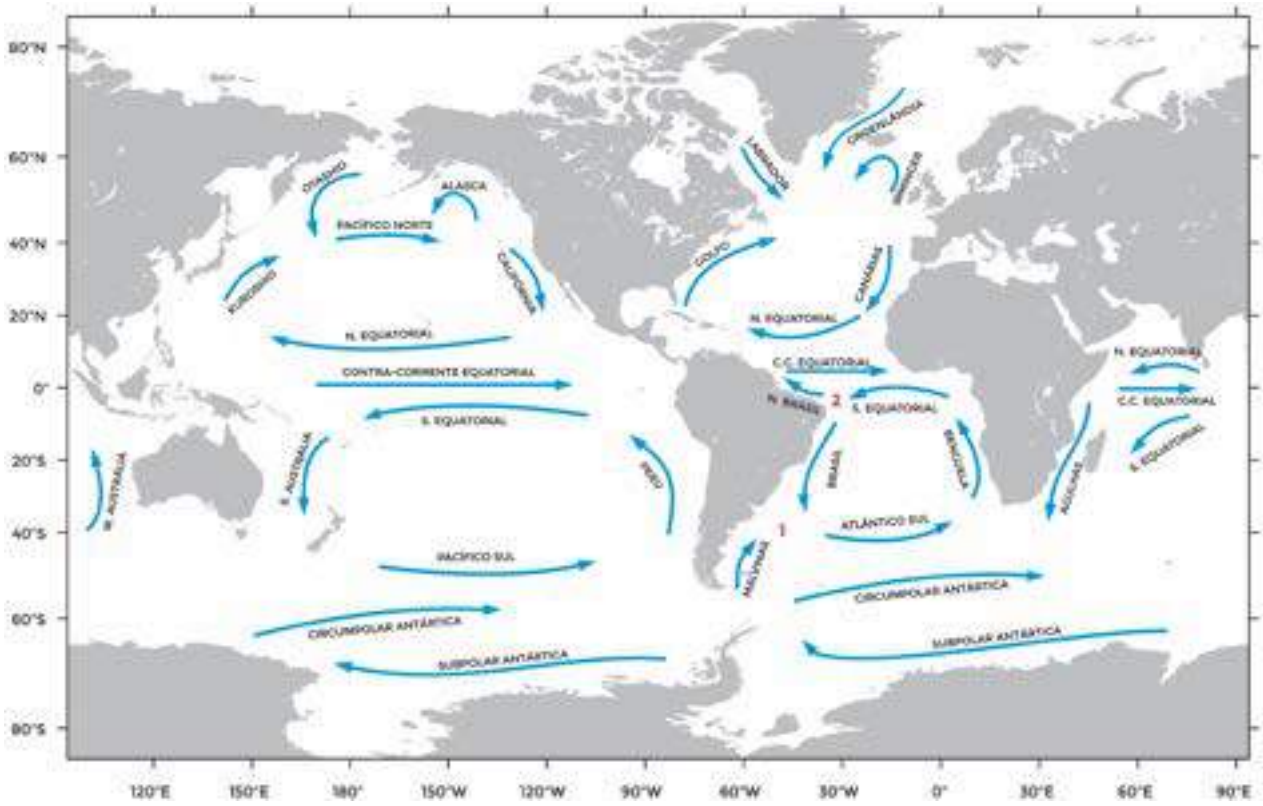



**FIGURA 13. Circulação média de superfície no oceano global. 1) Confluência Brasil – Malvinas; e 2) bifurcação da Corrente Sul Equatorial (gerando a Corrente do Brasil e Corrente Norte do Brasil).** *Adaptado de Neumann & Pierson (1966).*

No Atlântico Norte, o giro subtropical (horário) é formado pela Corrente Norte Equatorial, Corrente do Golfo (corrente de limite Oeste, muito intensa e concentrada, chegando a atingir 2,5 m/s), Corrente do Atlântico Norte e Corrente das Canárias (corrente de limite Leste, fraca e espalhada). No Atlântico Sul, o giro subtropical (anti-horário) é formado pela Corrente Sul Equatorial, Corrente do Brasil (corrente de limite Oeste, muito intensa e concentrada), Corrente do Atlântico Sul e Corrente de Benguela (corrente de limite Leste, fraca e espalhada).

No Oceano Atlântico, há duas feições adicionais específicas para a circulação de superfície (Fig. 13):

- A **Confluência Brasil – Malvinas**, que ocorre ao largo da América do Sul, entre 38°S e 42°S e a 48°W, com o encontro de águas quentes e salinas da Corrente do Brasil e águas frias e de baixa salinidade da Corrente das Malvinas; e
- A **bifurcação da Corrente Sul Equatorial**, em 5°S 30°W aproximadamente – formando a Corrente do Brasil e a Corrente Norte do Brasil, a qual vai alimentar o giro subtropical do Atlântico Norte.

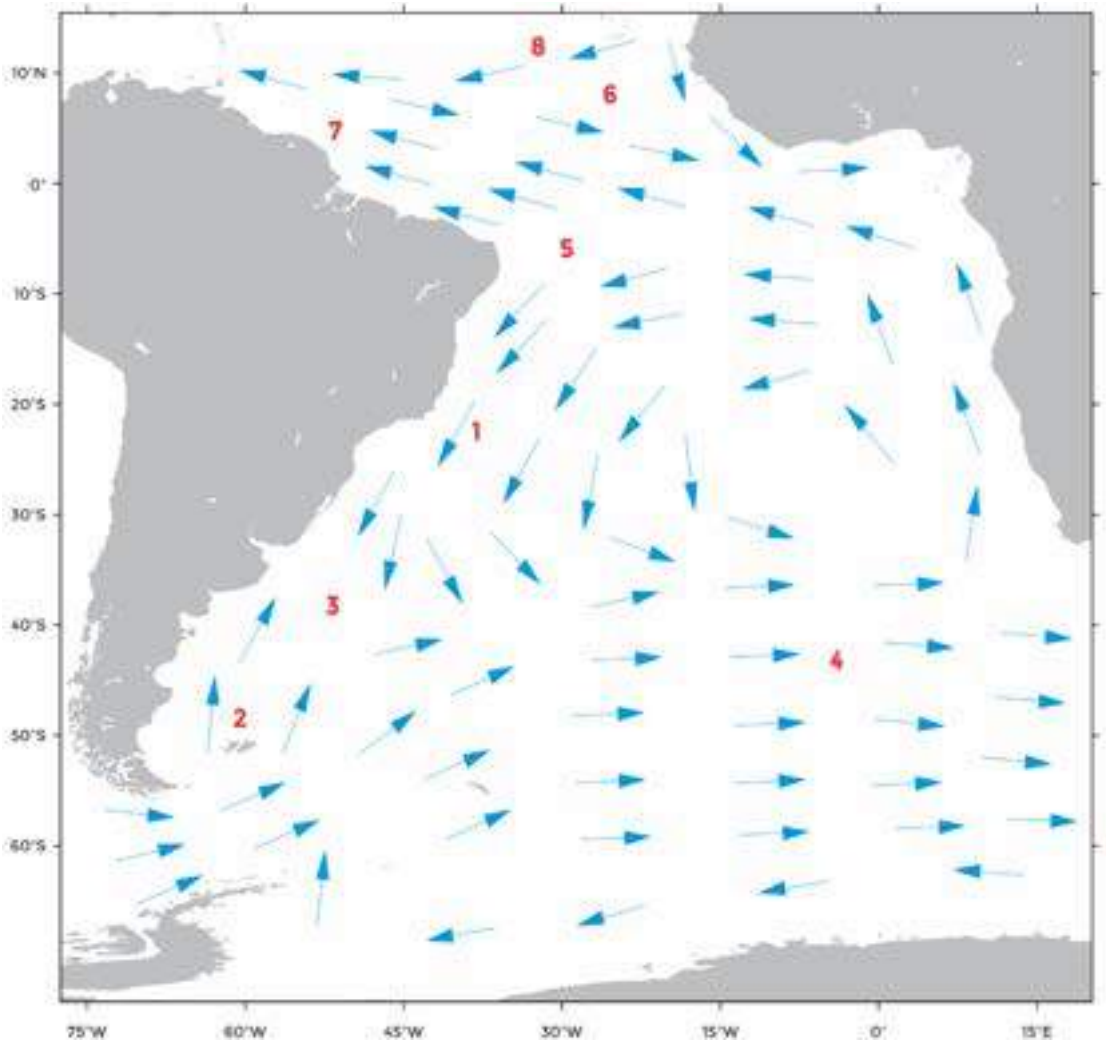



**FIGURA 14.** Detalhamento da circulação média de superfície no lado Oeste do Oceano Atlântico Sul. Correntes assinaladas com numerais: 1) Corrente do Brasil; 2) Corrente das Malvinas; 3) Confluência Brasil – Malvinas; 4) Corrente do Atlântico Sul (também conhecida como Corrente de Deriva Vento Oeste); 5) Bifurcação da Corrente Sul Equatorial (gerando a Corrente do Brasil e Corrente Norte do Brasil); 6) Contra-corrente Equatorial (para Leste); 7) Corrente Norte do Brasil; e 8) Corrente Norte Equatorial. *Adaptado de Pickard & Emery (1990).*

Já para as circulações em águas profundas não ocorrem características globais. Normalmente, para estas águas se considera cada região em particular e, às vezes, é necessária uma divisão dessas águas em camadas. A circulação em águas profundas é fortemente influenciada pela topografia do fundo e esse é um dos fatores que a tornam particular para cada região.

## 7. Massas de água e circulação profunda no Oceano Atlântico

As análises de massas d'água e o conhecimento da circulação profunda nos oceanos, e em particular no Oceano Atlântico, atualmente contam com um enorme apoio de medições em grandes programas de cooperação internacionais e modelos matemáticos computacionais sofisticados (The Open University. 1992; Siedler, Church & Gould, 2001).

Nas vizinhanças do continente antártico, particularmente no Mar de Weddell, a água atinge temperaturas extremamente baixas no inverno. Em consequência, esta água tem a mais elevada densidade de superfície do mundo oceânico e, tendo ganho estas características, ela afunda e flui ao longo do fundo em direção ao Equador. De fato, essa água tem sido medida a até 45°N de latitude. Ela é chamada **Água de Fundo Antártica** (AFAA), obviamente devido à sua área de formação e localização vertical.

A Água de Fundo Antártica também flui para Leste, em torno do Continente Antártico e, devido ao surpreendente efeito de grande alcance em profundidade da corrente de superfície Deriva Vento Oeste, se mistura a esta, formando a **Água Circumpolar Antártica** (ACAA), que é bastante homogênea. A Água Circumpolar Antártica fornece água de fundo para os Oceanos Índico e Pacífico Sul (Fig. 15).

A **Água Profunda do Atlântico Norte** (APAN) é formada em áreas relativamente pequenas, na costa da Groenlândia. Sendo menos densa que a Água de Fundo Antártica, ela se assenta sobre esta e flui para o Sul. A Água Profunda do Atlântico Norte é continuamente modificada no seu trânsito pela mistura com outras massas d'água; de qualquer forma, suas características chegam a ser notadas a 60°S, na superfície.

A aproximadamente 60°S, a **Água Intermediária Antártica** (AIAA) mergulha até 1000 m e segue para o Norte, até 20°N. A **Água Intermediária do Atlântico Norte** (AIAN) se forma a cerca de 60°N e flui para o Sul, também a 1.000 m, encontrando-se com a Água Intermediária Antártica (Fig. 15).

Em torno de 45° de latitude, no inverno dos dois hemisférios, são formadas a **Água Central do Atlântico Norte** (ACAN) e a **Água Central do Atlântico Sul** (ACAS). Elas afundam até cerca de 300 m e se dirigem ao Equador, perdendo a sua identidade à medida que se espalham (Fig. 15).

Uma significativa incursão de águas ocorre através da **Água Mediterrânea** (AM), a qual encontra o seu nível de equilíbrio a 1.500 m de profundidade; ela entra no Atlântico Norte após atravessar o Estreito de Gibraltar. Esta água é continuamente formada na parte Norte do Mediterrâneo Oeste, pelo resfriamento do inverno e pela evaporação através do ar seco que sopra da África do Norte. Estas águas frias e salinas afundam e fluem para o Sul e para Oeste. Elas têm uma forte influência na Água Profunda do Atlântico Norte, sentida a até 3.000 km a Oeste e Sul de Gibraltar.

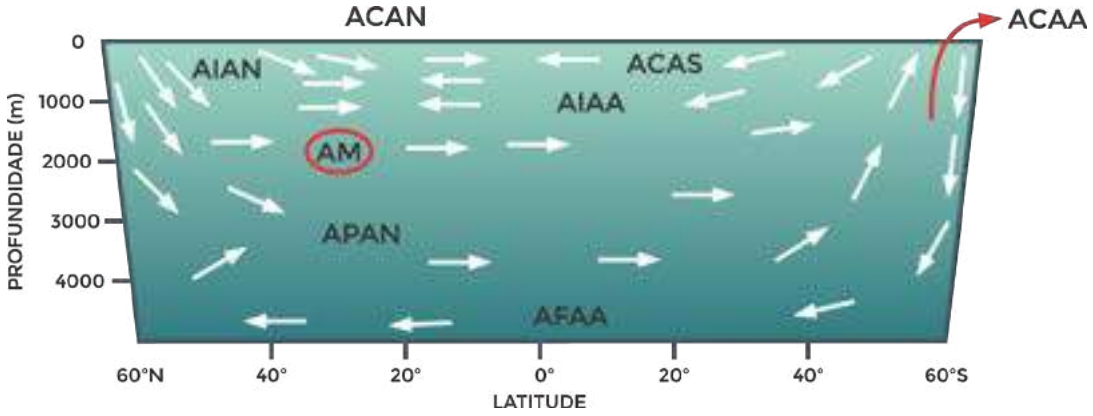



**FIGURA 15.** Circulação em águas profundas no Oceano Atlântico, envolvendo as massas de água: AFAA - Água de Fundo Antártica; APAN - Água Profunda do Atlântico Norte; AIAA - Água Intermediária Antártica; AIAN - Água Intermediária do Atlântico Norte; ACAS - Água Central do Atlântico Sul; ACAN - Água Central do Atlântico Norte; AM - Água Mediterrânea (intrusão pelo Canal de Gibraltar); e ACAA – Água Circumpolar Antártica (circunda a Antártica).

Um esquema básico das massas d'água e da circulação, de superfície e em profundidade, ao largo da costa sul - sudeste brasileira, é apresentado na Figura 16, baseado nas análises de Silveira *et al.* (2000); neste esquema, se encontram quatro massas de água que se deslocam superpostas, associadas a correntes de grande escala. Do fundo para a superfície, a Água de Fundo Antártica se desloca na direção do Equador, a Água Profunda do Atlântico Norte se dirige rumo ao polo Sul, a Água Intermediária Antártica se move na direção do Equador e a Água Tropical (com a Corrente do Brasil) se dirige para o polo Sul.

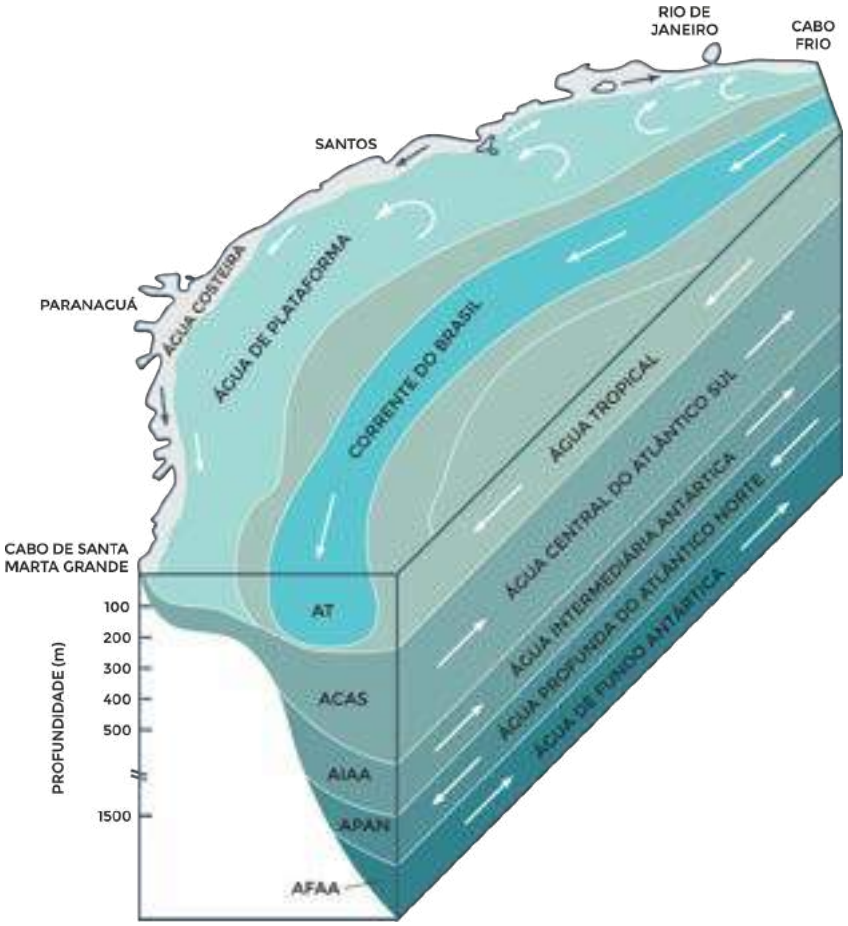



**FIGURA 16.** Esquema de massas de água e circulação ao largo da costa sudeste brasileira. *Baseado nas análises de Silveira et al (2000).*

## 8. Complementação

Medições oceanográficas e modelos computacionais têm demonstrado o acoplamento das circulações de superfície e profunda, no oceano global, em função dos maiores volumes transportados, o que gera a "**célula de revolvimento meridional**", que abrange e interliga os Oceanos Atlântico, Pacífico e Índico.

Uma ilustração desta célula global se encontra na Figura 17; para o Oceano Atlântico, os maiores transportes de volume são devidos à Corrente Sul Equatorial, Corrente Norte do Brasil e Corrente do Golfo (na superfície), além do deslocamento da Água Profunda do Atlântico Norte (desde sua região de formação na Groenlândia, até superfície na Antártica) e da Água Circumpolar Antártica.

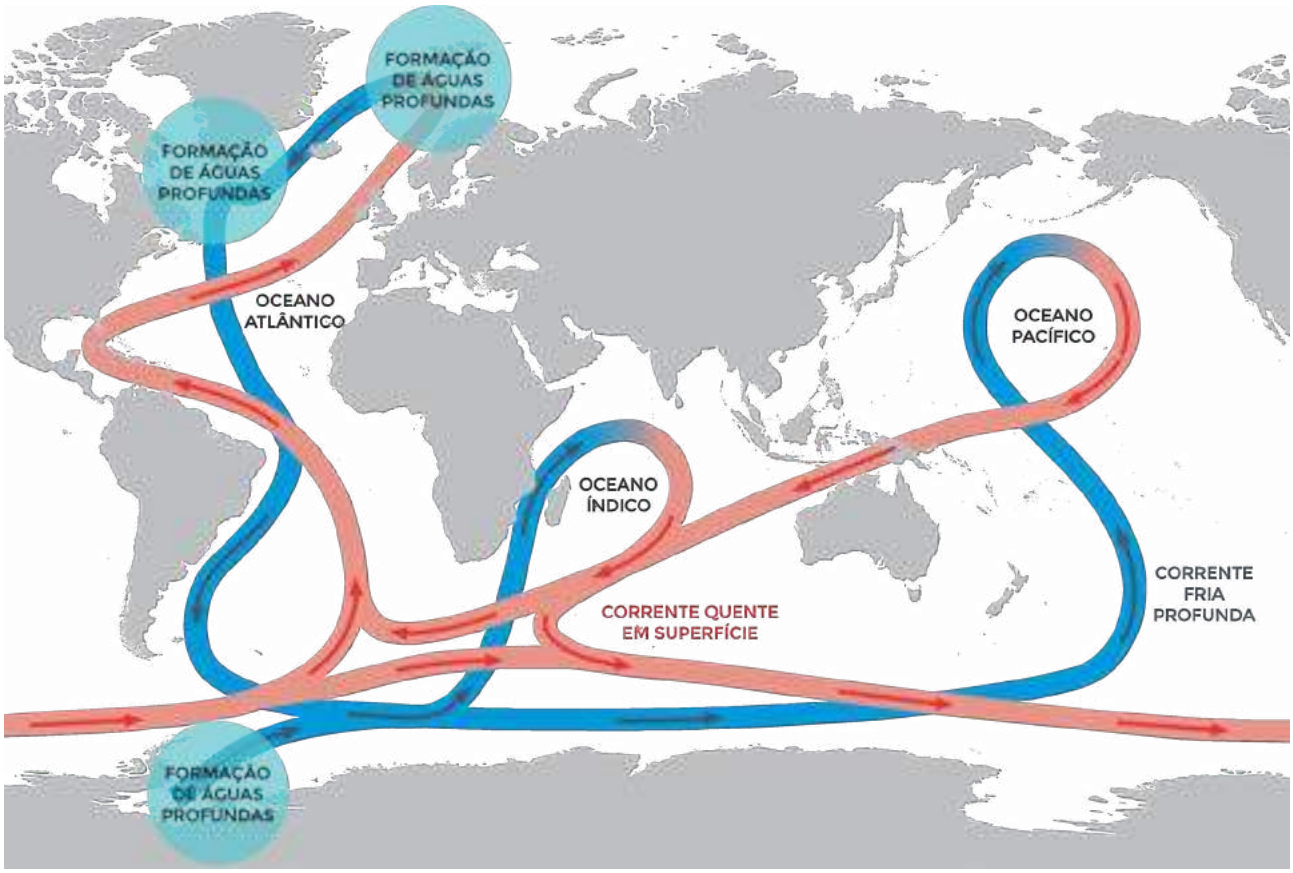



**FIGURA 17.** Célula de revolvimento meridional, acoplando os maiores transportes de volume pela superfície (setas vermelho) e pelo fundo (setas em azul).

Neste capítulo foi dada ênfase à circulação em grande escala, gerada principalmente por efeitos meteorológicos, com os ventos forçando a circulação de superfície e influências termohalinas forçando a circulação em profundidade.

Entretanto, pesquisas em pequena escala e devidas a efeitos astronômicos são igualmente importantes. Como exemplo, a Figura 18 apresenta uma simulação em computador de correntes no estuário de Santos, onde as correntes vazantes de maré ao longo do Porto de Santos atingem intensidades acima de 0,5 m/s.

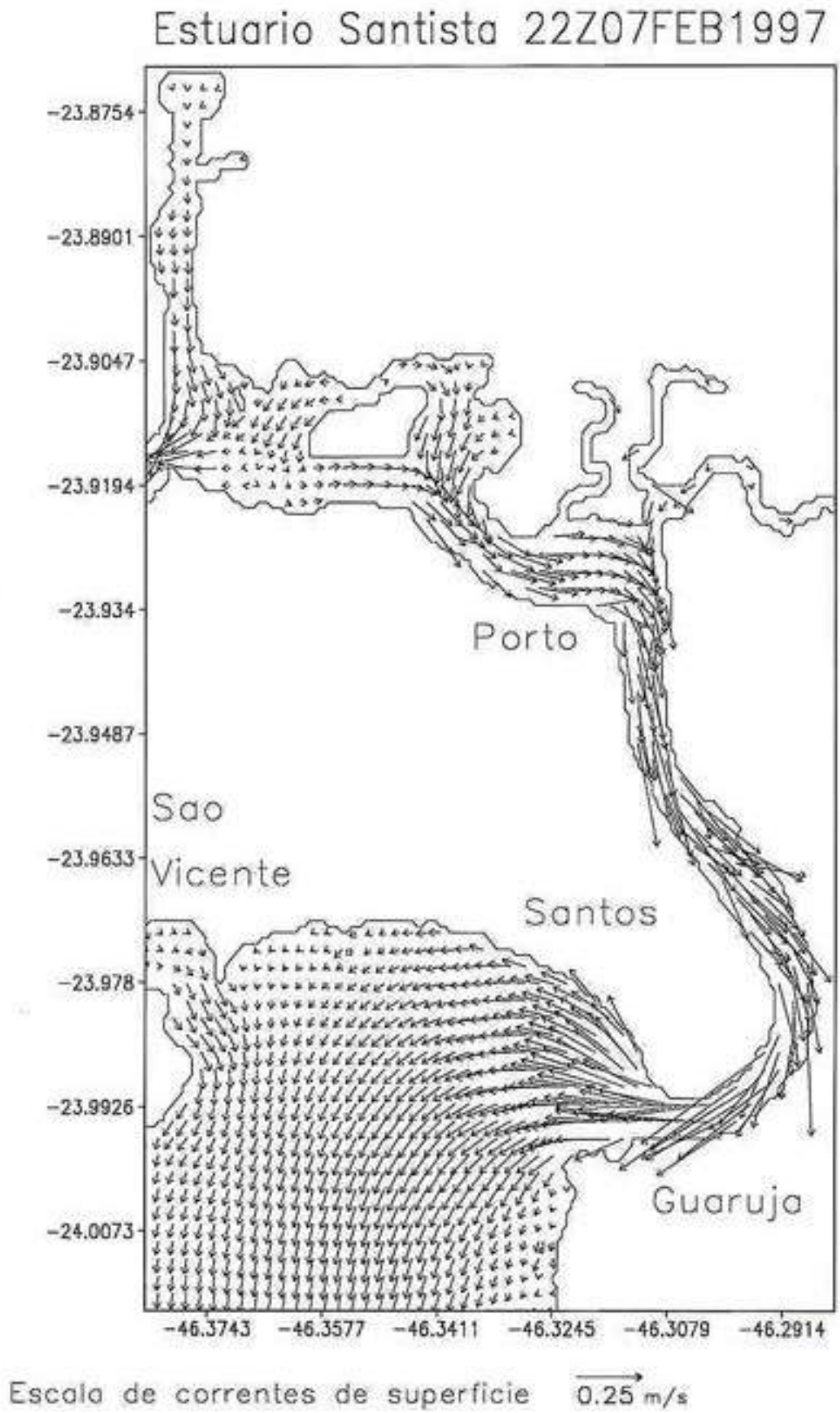



**FIGURA 18.** Correntes de superfície no estuário de Santos, em 07 de fevereiro de 1997, 22h GMT, em condição de maré vazante.

## Referências Bibliográficas

ANTONOV, J. I., D. SEIDOV, T. P. BOYER, R. A. LOCARNINI, A. V. MISHONOV, H. E. GARCIA, O. K. BARANOVA, M. M. ZWENG & D. R. JOHNSON, 2010. World Ocean Atlas 2009, Volume 2: Salinity. S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 69, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 184 pp.

CASTELLO, J. P. & KRUG, L.C., 2017. Introdução às Ciências do Mar. 1ª Reimpressão. Pelotas (RS): Editora Textos. 602p. (versão on-line disponível em: <https://cienciasdomarbrasil.furg.br/images/livros/LivroIntroducaoCienciasDoMar.pdf>.

GARISSON, T., 2010. Fundamentos de Oceanografia. Tradução da 4ª Versão Norte-Americana. São Paulo (SP): Cengage Learning. 426p. (disponível em: <https://docero.com.br/doc/xc8vcn>.

LEVITUS, S., BOYER, 1994. T. P. World Ocean Atlas.

LOCARNINI, R. A., A. V. MISHONOV, J. I. ANTONOV, T. P. BOYER, H. E. GARCIA, O. K. BARANOVA, M. M. ZWENG & D. R. JOHNSON, 2010. World Ocean Atlas 2009, Volume 1: Temperature. S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 68, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 184 pp.

MCLELLAN, H.J., 1968. "Elements of Physical Oceanography". Pergamon Press, Edinburgh, Great Britain, 151 pp.

NEUMANN, G. & PIERSON J. R., W. J., 1966. Principles of Physical Oceanography. Prentice - Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 545 pp.

PICKARD, G. L. & EMERY, W. J., 1990. Descriptive Physical Oceanography - an introduction. Pergamon Press, 5th edition, 320 p.

SIEDLER, G. & CHURCH, J. & GOULD, J., 2001. Ocean Circulation & Climate: Observing and Modeling the Global Ocean (International Geophysics). Academic Press. 640 pp.

SILVEIRA, I. C. A. & SCHMIDT, A. C. K. & CAMPOS, E. J. D. & GODOI, S. S. & IKEDA, Y. 2000. A Corrente do Brasil ao Largo da Costa Leste Brasileira. Revista Brasileira de Oceanografia, 48 (2): 171-183.

STEWART, R. H., 2005. Introduction to Physical Oceanography. Department of Oceanography, Texas A & M University. 344 pp. (versão on-line disponível em: <http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng_textbook/contents.html>.

THE OPEN UNIVERSITY COURSE TEAM, 1992.
VOL 1 - The ocean basins: their structure and evolution - 171 p.
VOL 2 - Seawater: its composition, properties and behaviour - 165 p.
VOL 3 - Ocean circulation - 238 p.
VOL 4 - Waves, tides and shallow water processes - 187 p.
VOL 5 - Ocean chemistry and deep-sea sediments - 134 p.
VOL 6 - Case studies in Oceanography and marine affairs - 248 p.
Pergamon Press.

TOMCZAK, M.& GODFREY, J. S., 1994. Regional oceanography: an introduction. Pergamon Press, London. 391 pp. (versão pdf disponível em: <http://www.es.flinders.edu.au/~mattom/regoc/pdfversion.html>.

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 8*

# DINÂMICA OCEÂNICA: O OCEANO COMO FLUIDO GEOFÍSICO

*Sueli Susana de Godoi, Ilson Carlos Almeida da Silveira & Luiz Bruner de Miranda*

CITAÇÃO SUGERIDA: GODOI, Sueli Susana de; SILVEIRA, Ilson Carlos Almeida da & MIRANDA, Luiz Bruner de. Dinâmica oceânica: o oceano como fluido geofísico. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 8: p. 169-201.

# Dinâmica Oceânica: O Oceano como Fluido Geofísico

*Sueli Susana de Godoi, Ilson Carlos Almeida da Silveira & Luiz Bruner de Miranda*

## 1. Apresentação

A abordagem aqui apresentada, sobre dinâmica oceânica com enfoque no oceano como fluido geofísico, visa introduzir, inicialmente, conceitos básicos e ilustrações relacionados com a Oceanografia Física Descritiva ou Oceanografia Sinótica e Oceanografia Dinâmica. Conceitos sobre circulação oceânica gerada pelo vento e circulação termohalina são apresentados, baseados na interação oceano-atmosfera e estratificação de massa, isto é, na distribuição de densidade da água do mar.

Na sequência, são inseridos conceitos sobre a escala de dimensão horizontal, característica dos oceanos, pela observação de mapas horizontais de temperatura, salinidade e de densidade. A escala vertical é observada pela visualização de seção vertical de densidade da água do mar. Tais conceitos são de suma importância no tópico relacionado com análise de escalas da dinâmica oceânica.

Considerando o cenário apresentado, são introduzidas as características do oceano como um fluido geofísico, a saber: "***raso, estratificado e em rotação***"

Complementando, são idealizados experimentos práticos com a finalidade de visualizar a importância ou não da rotação da Terra e da estratificação de massa no estudo da dinâmica de processos oceânicos.

Finalmente, o leitor é convidado a interagir com a prática da Oceanografia Física, pela observação de ilustrações, referentes ao Sistema Corrente do Brasil, relacionando produtos gerados pela aplicação de métodos de estudo da Oceanografia Física Descritiva e Oceanografia Dinâmica. A abordagem se encerra com exemplos de algumas embarcações oceanográficas, importantes no ensino e na pesquisa oceanográfica, do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo em um tempo passado, "Navio Oceanográfico Professor Wladimir Besnard", e presente, "Navio Oceanográfico Alpha Crucis"e "Barco Oceanográfico Alpha Delphini".

Foto: Bruno Coelho

## 2. Oceanografia Física Descritiva x Oceanografia Dinâmica

A Oceanografia é uma ciência que estuda o ambiente marinho, buscando o entendimento de características de processos oceânicos envolvendo vários aspectos: biológicos, físicos, químicos e geológicos. Como ferramentas, a ciência Oceanografia utiliza a matemática e a ciência da computação.

Sob o aspecto da Oceanografia Física há dois principais enfoques de estudo que merecem ser abordados: Oceanografia Física Descritiva ou Sinótica e a Oceanografia Dinâmica.

- **Oceanografia Sinótica ou Descritiva:** busca reduzir observações a uma simples "sinopse" ou resumo e é inapta a fazer previsões. Visto que a perspectiva sinótica simplesmente descreve o que já aconteceu, ou seja, no momento em que as observações foram feitas.

- **Oceanografia Dinâmica:** Oceanografia Dinâmica: utiliza leis da Física para obter relações matemáticas entre as forças atuantes nas águas do oceano e seus consequentes movimentos, podendo inferir previsões.

Importante observar que estudos realizados com enfoque em dinâmica dos oceanos são complementados com a Oceanografia Física Descritiva.

## 3. O sistema oceano-atmosfera-fundo submarino

Inicialmente, a importância dos processos termohalinos para a circulação do oceano como um todo pode ser visualizada examinando como interagem o sistema físico oceano-atmosfera. Considere o diagrama representado na Figura 1, onde estão representados esquematicamente uma bacia oceânica simplificada, os fluídos oceano-atmosfera e o fundo submarino, sob a ação da:

- aceleração da gravidade ($g$)
- rotação da Terra na direção normal - $(2\,\Omega\,sen\,\varphi)\,(\vec{n})$: onde $\Omega$ é a velocidade angular da Terra; e $\varphi$ corresponde a latitude geográfica.
- O esquema da bacia oceânica também indica fontes de fluxo de calor oriundas no fundo do oceano.

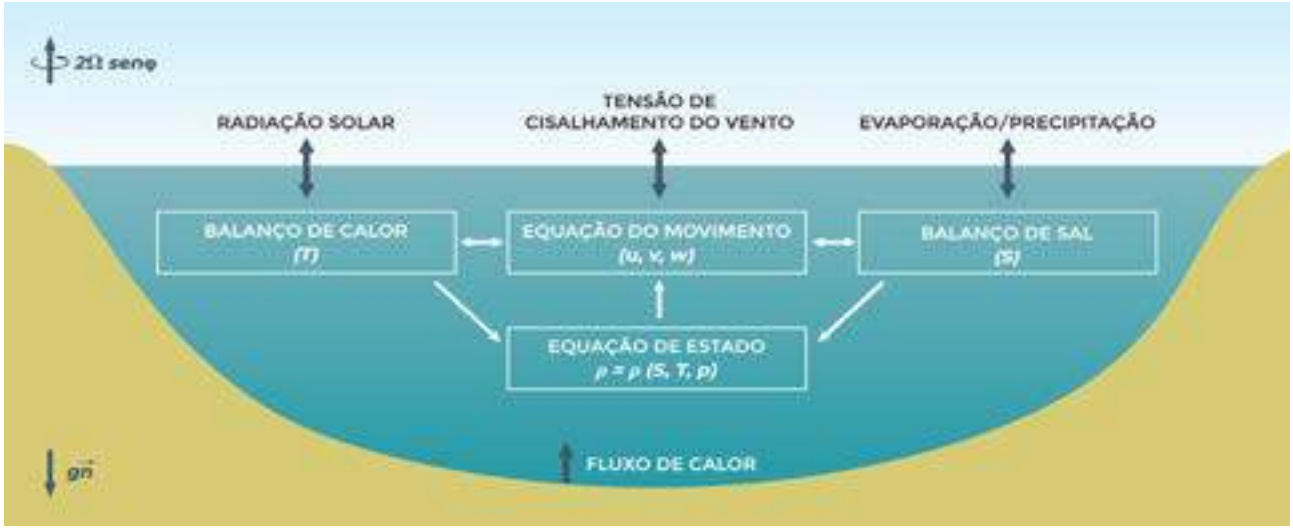



**FIGURA 1. Diagrama esquemático: ar/mar/fundo oceânico.** *Cortesia: Miranda & Godoi (em revisão).*

A interação mútua entre o sistema oceano-atmosfera se faz através dos balanços de calor e sal, os quais determinam a concentração dessas propriedades na camada de superfície dos oceanos; essas concentrações, que são medidas em função da temperatura (***T***) e da salinidade (***S***), isto é quantidade de sais dissolvidos na água do mar, geram movimentos nas camadas superficiais e profundas denominados de circulação termohalina, governada pela densidade da água do mar (***ρ***), de natureza baroclínica.

Um ponto a colocar é que, a força de gradiente de pressão pode ser gerada pela inclinação da superfície livre e pela variação baroclínica do gradiente de pressão. No primeiro caso, esta é denominada de força barotrópica de gradiente de pressão. O termo "barotrópica" significa que as isopicnais, linhas de mesma densidade, estão na mesma direção da pressão ou das isóbaras. Ambas são paralelas. No segundo caso, tem-se a força de gradiente de pressão baroclínica. Nesta situação, significa que as isopicnais são inclinadas relativamente às isóbaras. As isopicnais cruzam as isóbaras.

A temperatura e a salinidade, associadas à pressão hidrostática (***p***) da coluna de água, determinam a densidade da água do mar, a qual é calculada por uma equação de estado da forma $\rho = \rho(S,T,p)$. A distribuição da densidade determina a estratificação de massa que por sua vez vai gerar gradientes de pressão de natureza baroclínica e, consequentemente, componentes dos movimentos. Esses são classificados de correntes de densidade que, quando em equilíbrio com a aceleração de Coriolis e para um escoamento estacionário e sem atrito, são denominados de movimento geostrófico. Portanto, este último consiste no balanço entre a aceleração de Coriolis e a força de gradiente de pressão por unidade de massa. Exemplos do movimento geostróficos serão dados no final do presente capítulo.

Complementando, aos movimentos citados estão também superpostas as correntes de maré. Essas correntes são movimentos cíclicos com periodicidade conhecida e que são gerados pela atração gravitacional da Terra, Sol e Lua.

Considerando a breve descrição precedente, há de se notar que, a temperatura e a salinidade são propriedades físico/químicas da água do mar responsáveis pela circulação de natureza baroclínica dos oceanos, plataformas continentais e estuários. As propriedades temperatura, salinidade e pressão, são denominadas de variáveis independentes. Uma metodologia adequada foi desenvolvida, desde os primórdios da investigação oceanográfica, para permitir que as propriedades e variáveis dependentes da água do mar, tais como densidade, correntes, calores específicos, gradientes adiabáticos de temperatura, velocidade de propagação do som, dentre outras, possam ser calculadas com a precisão adequada. As propriedades salinidade e temperatura, associadas à concentração das inúmeras substâncias presentes na água do mar, complementam as características ecológicas do ambiente marinho.

## 3.1 Circulação atmosférica

Breves comentários são apresentados sobre algumas características da circulação atmosférica global. O mapa (Fig. 2) mostra a distribuição horizontal global do regime de ventos em larga escala, para condições de julho. A tensão de cisalhamento, força sobre área, exercida pelos ventos sobre a superfície livre do mar, isto é, na interface ar-mar, gera as correntes denominadas de deriva pelo vento. Tais correntes, ao convergirem ou divergirem dos contornos dos continentes, geram inclinações da superfície livre em relação às superfícies de repouso originando as correntes de inclinação de natureza barotrópica, o que significa que as isóbaras, linhas de mesma pressão, são paralelas às isopicnais, linhas de mesma densidade. Tais correntes ocorrem simultaneamente aos movimentos termohalinos, governados pela densidade no interior do oceano, e geostróficos.

Observar o sentido dos giros subtropicais, sobre os oceanos Atlântico, Pacífico e Índico (Fig. 2). Nos oceanos Atlântico e Pacífico, no Hemisfério Sul, o giro é anti-horário e no Hemisfério Norte o giro é horário. No oceano Índico, o regime de ventos é governado pelas monções, isto é, ventos que mudam com as estações do ano. Notar que no oceano Austral, o qual circunda a Antártica, o vento sopra de oeste para leste, também denominado de vento de deriva oeste.

Por razões históricas, o vento é de onde vem e a corrente no oceano é para onde vai. Então, por exemplo, vento de nordeste significa que o vento sopra de nordeste e a corrente flui para sudoeste. Antigamente, saber de onde vem o vento era muito importante para erguer edificações robustas de tal forma que estas não fossem afetadas pela intensidade dos ventos. Por outro lado, na navegação, ter conhecimento do sentido da corrente é um fator importante que pode auxiliar a embarcação ter um melhor desempenho.

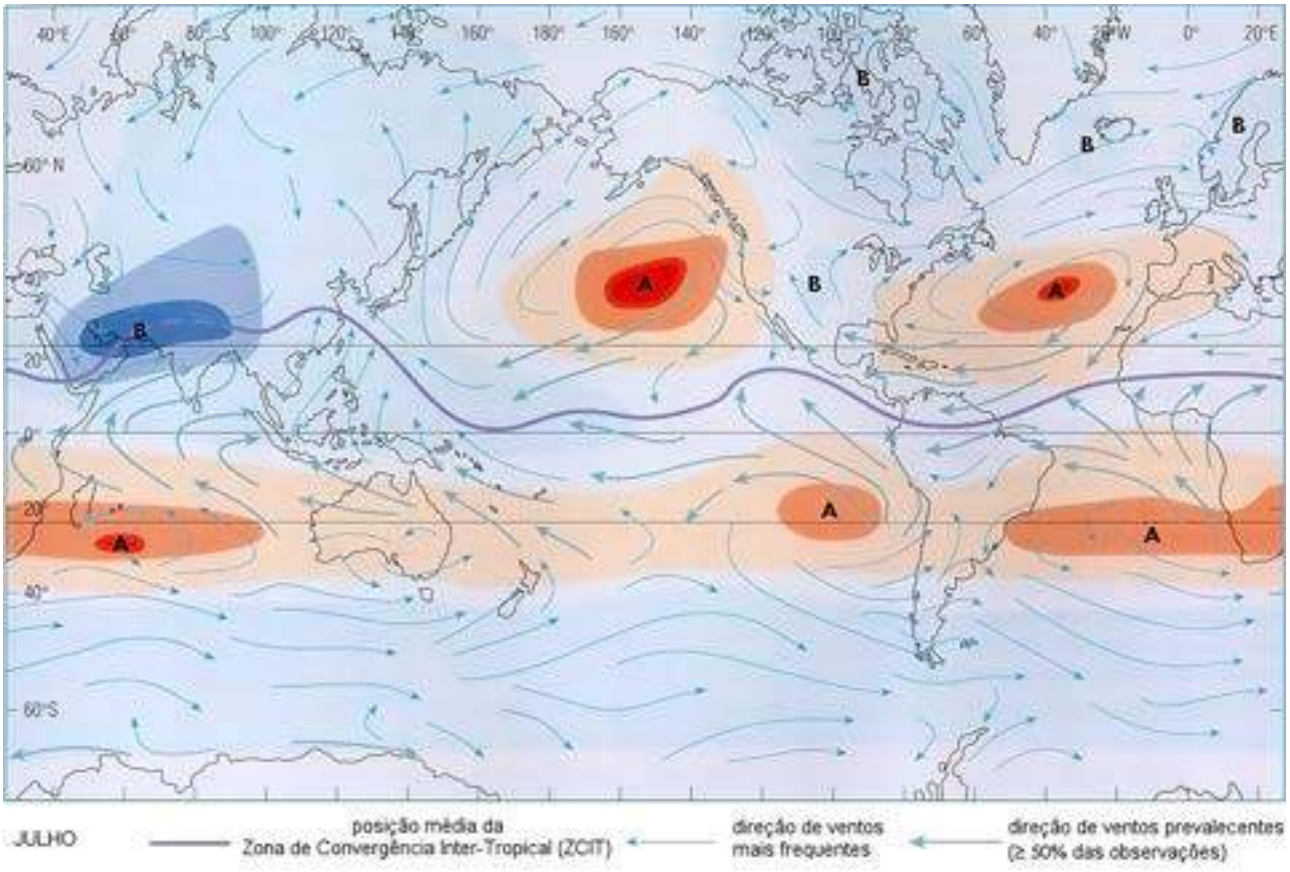



**FIGURA 2.** **Mapa mostrando o sistema global de ventos de superfície, em julho. Os centros de alta pressão, (A - anti-ciclones), e de baixa pressão (B - ciclones), estão também indicados. A Zona da Convergência Intertropical (ITCZ) indica o encontro dos ventos alíseos de Nordeste e Sudeste.** *Adaptado de The Open University (2001).*

## 3.2 Circulação oceânica em superfície

O mapa da circulação oceânica global em superfície pode ser observado na Figura 3. Aqui há de se notar a influência do padrão de ventos (Fig. 2) sobre o sentido das correntes de superfície. Embora o vento atue na interface ar-mar, transferindo quantidade de movimento, que consiste no produto entre massa e velocidade, do ar para o mar formando as ondas e as correntes de superfície, seus efeitos são sentidos indiretamente até 1.000 metros de profundidade. Naturalmente, os primeiros metros da coluna de água consistem em uma camada bem misturada, denominada de camada de mistura.

Complementando, os giros subtropicais, caracterizados por centros de alta pressão, isto é, anti-ciclônicos, têm sentido anti-horário no Hemisfério Sul e horário no Hemisfério Norte. O sentido dos giros pode ser entendido pela aplicação do balanço geostrófico, definido previamente.

As correntes oceânicas (Fig. 3) estão denominadas de acordo com a região em que estão fluindo, por exemplo, Oceano Atlântico Sul - Corrente do Brasil, Corrente de Benguela; Oceano Atlântico Norte - Corrente do Golfo, Corrente da Noruega, Corrente das Canárias; Oceano Pacífico Sul - Corrente do Peru; Oceano Pacífico Norte – Corrente de Kuroshio, Corrente da Califórnia; Oceano Índico – Corrente da Somália. Notar o sistema de correntes equatoriais, presentes nos oceanos Atlântico, Pacífico e Índico. No Oceano Austral flui a Corrente Circumpolar Antártica, oriunda da ação dos ventos de deriva oeste.

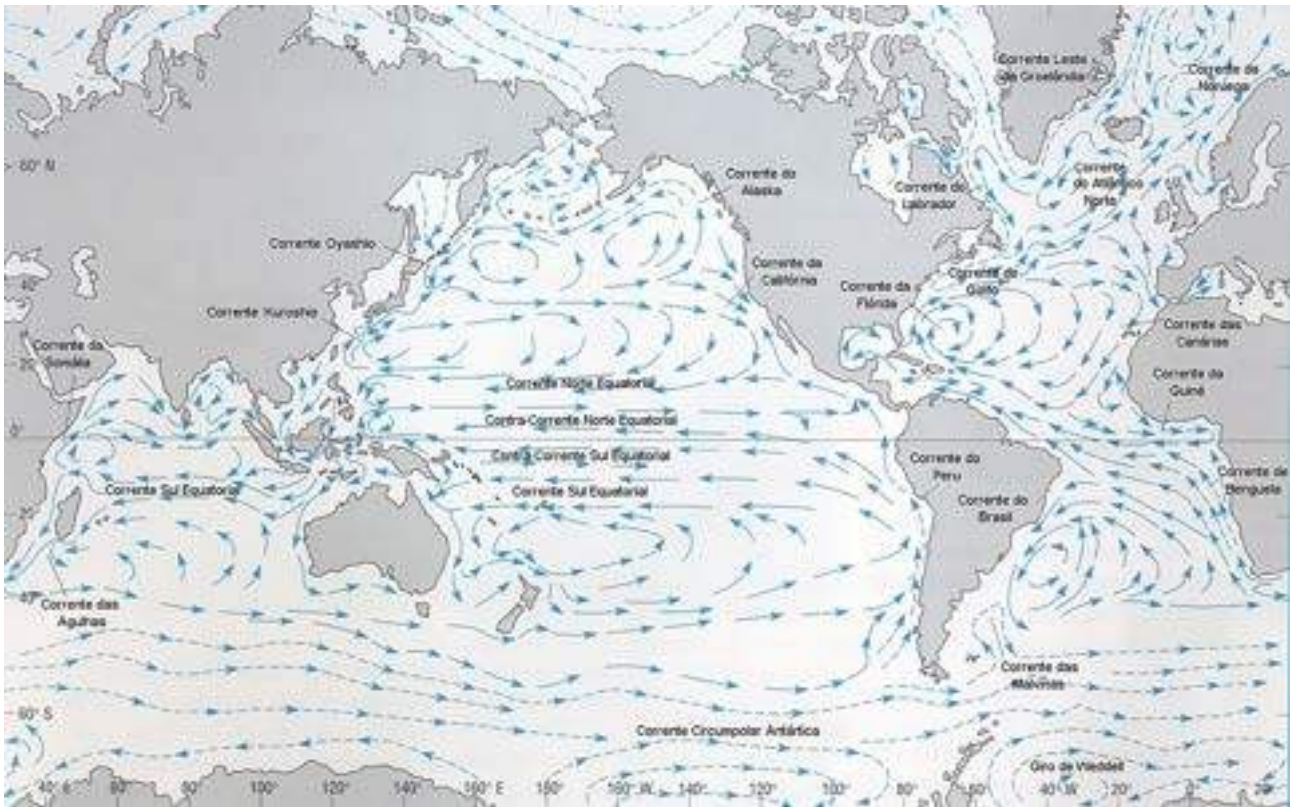



**FIGURA 3.** **Circulação oceânica global em superfície.** *Adaptado de The Open University (2001).*

## 3.3 Circulação termohalina

Agora, um importante ponto consiste em observar como é a circulação no interior do oceano. Previamente, foi colocado que a combinação da circulação térmica e halina tem-se a circulação thermohalina. O mapa indicado na Figura 4 mostra o esquema da circulação thermohalina global, denominada de "esteira transportadora", onde tem-se o percurso da Água Profunda do Atlântico Norte (APAN). Essa massa de água é formada na região do mar do Labrador. No inverno há formação de gelo, o qual expulsa o sal fazendo com que as águas fiquem mais densas. Pela combinação de processos de convecção profunda, horizontal e vertical, há subsidência da massa de água. Esta se acomoda em um estado de equilíbrio hidrostático, isto é, nas camadas onde há um balanço entre empuxo e aceleração da gravidade. Na sequência, se afasta de sua região de formação sendo transportada ao longo das camadas profundas pela Corrente Profunda do Atlântico Norte em direção ao Equador até a Divergência Antártica, onde aflora em camadas próximas à superfície. Neste percurso, a APAN apresenta águas mais frias e menos salinas. O tempo estimado para percorrer toda a sua trajetória é ao redor de 1000 anos.

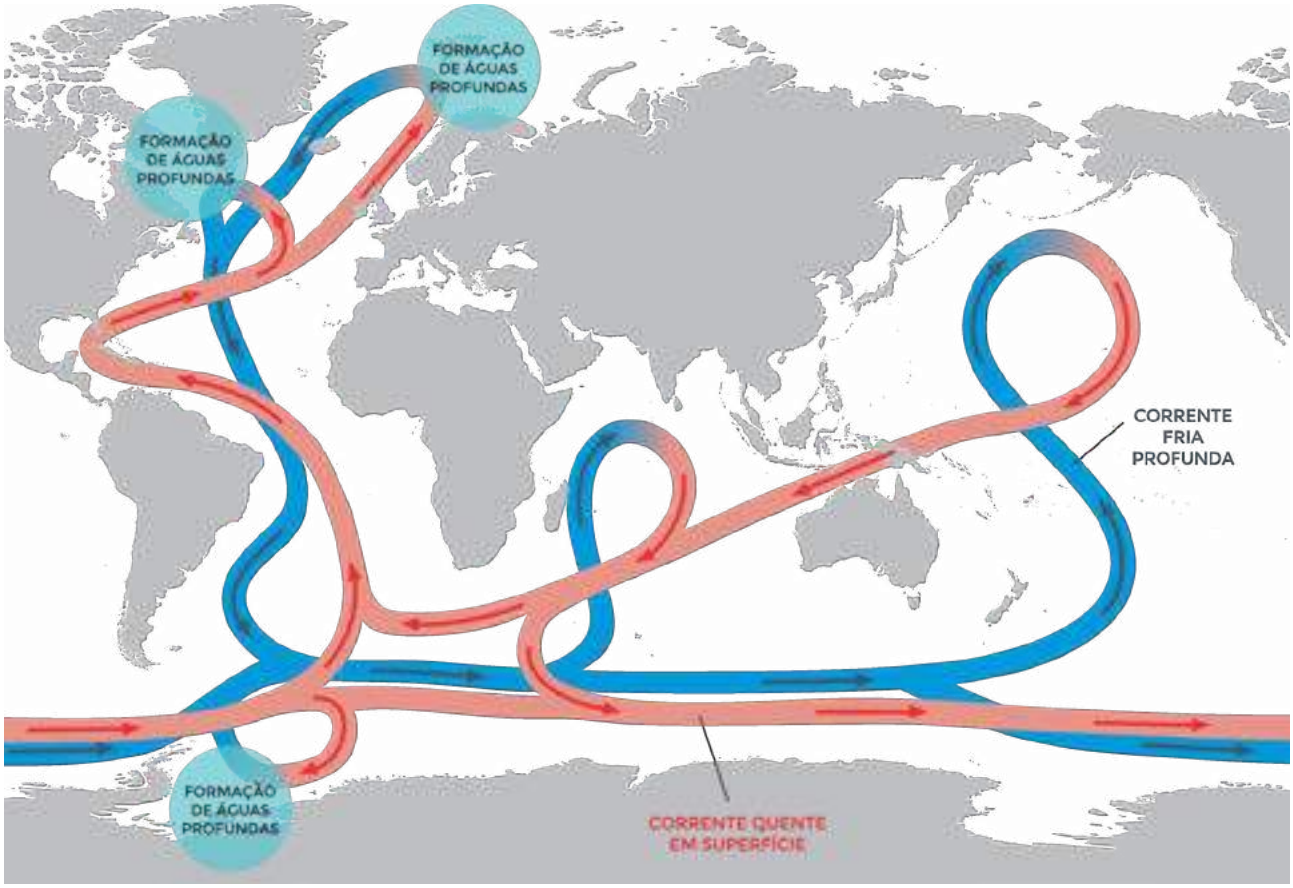



**FIGURA 4.** Circulação termohalina global simplificada - "A esteira transportadora". *Cortesia Leandro Coelho*.

## 3. Observando escalas características e a estratificação de massa do oceano

No estudo da dinâmica dos oceanos um aspecto relevante é caracterizar as escalas horizontal e vertical, relacionadas com os processos físicos de interesse. As visualizações destas escalas podem ser inferidas, por exemplo, pela observação de mapas de distribuições horizontais e de seções verticais de propriedades físico/químicas da água do mar. Neste sentido, serão apresentados, na sequência, exemplos para observar tais escalas.

A distribuição horizontal da temperatura da superfície do mar (°C) pode ser observada na Figura 5. Na região equatorial é de se esperar um máximo de temperatura, devido a uma maior incidência da radiação solar na superfície terrestre. Por outro lado, em direção aos polos a quantidade de radiação solar por unidade de área diminui e, consequentemente, a temperatura da superfície do mar também.

Aqui vale ressaltar a escala horizontal em larga escala, correspondente aos giros subtropicais, característica do oceano, a qual é da ordem de $10^6$ m. Isto significa que um navegador necessita percorrer $10^3$ km de distância para se ter uma variação de temperatura de aproximadamente 20°C entre o Equador e altas latitudes. Essa escala horizontal característica será utilizada posteriormente na análise da geometria do oceano como fluido geofísico.

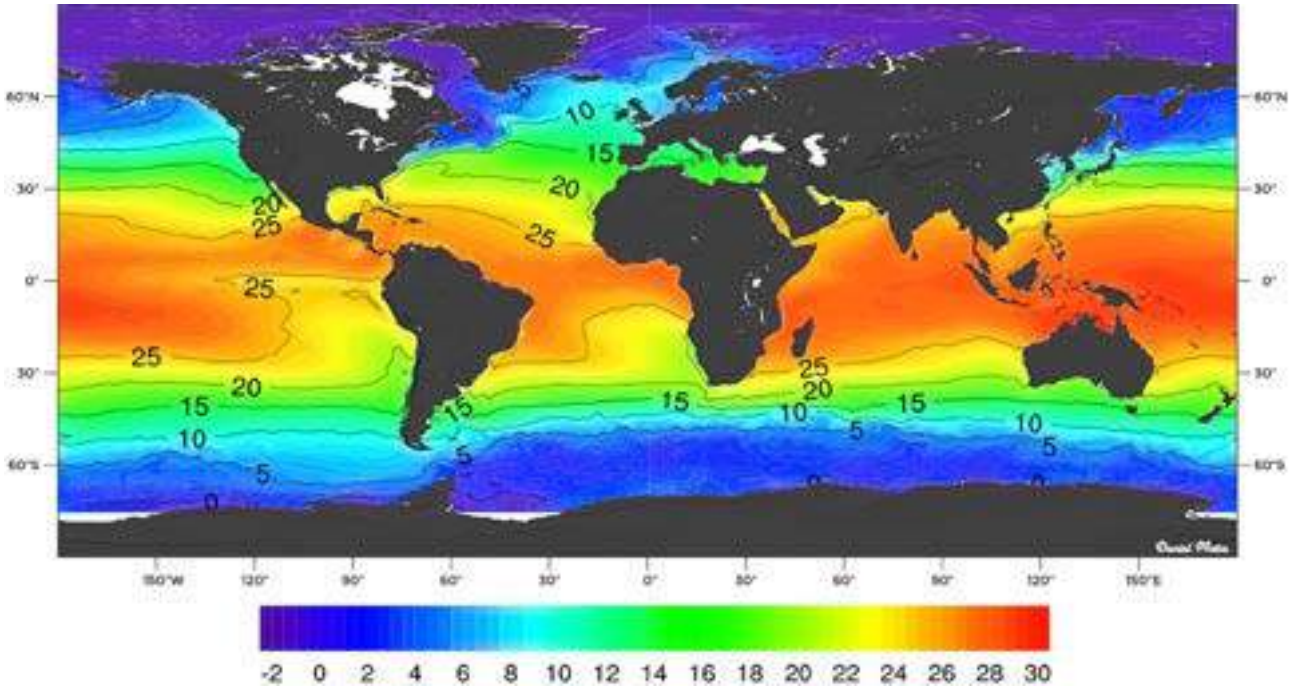



**FIGURA 5.** Mapa horizontal da temperatura da superfície do mar (°C), obtido com modelagem numérica. A escala horizontal associa níveis de cores e valores de temperatura. *Cortesia Daniel Moita*.

Complementando, a distribuição horizontal de salinidade (Fig. 6) evidencia um mínimo nas proximidades da região equatorial. Há um máximo de precipitação, devido a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) formada pelo encontro dos ventos alísios de Nordeste e Sudeste (Fig. 2). A posição da ZCIT varia com as estações do ano, associada com a variação de temperatura. Isto é, a ZCIT se desloca para norte, no verão do Hemisfério Norte, e para sul, no verão do Hemisfério Sul. A salinidade é máxima na região dos trópicos, onde a evaporação predomina sobre precipitação, diminuindo em direção aos polos. Da mesma forma que a distribuição horizontal de temperatura, a escala horizontal, em larga escala, característica é da ordem de $10^6$ m.

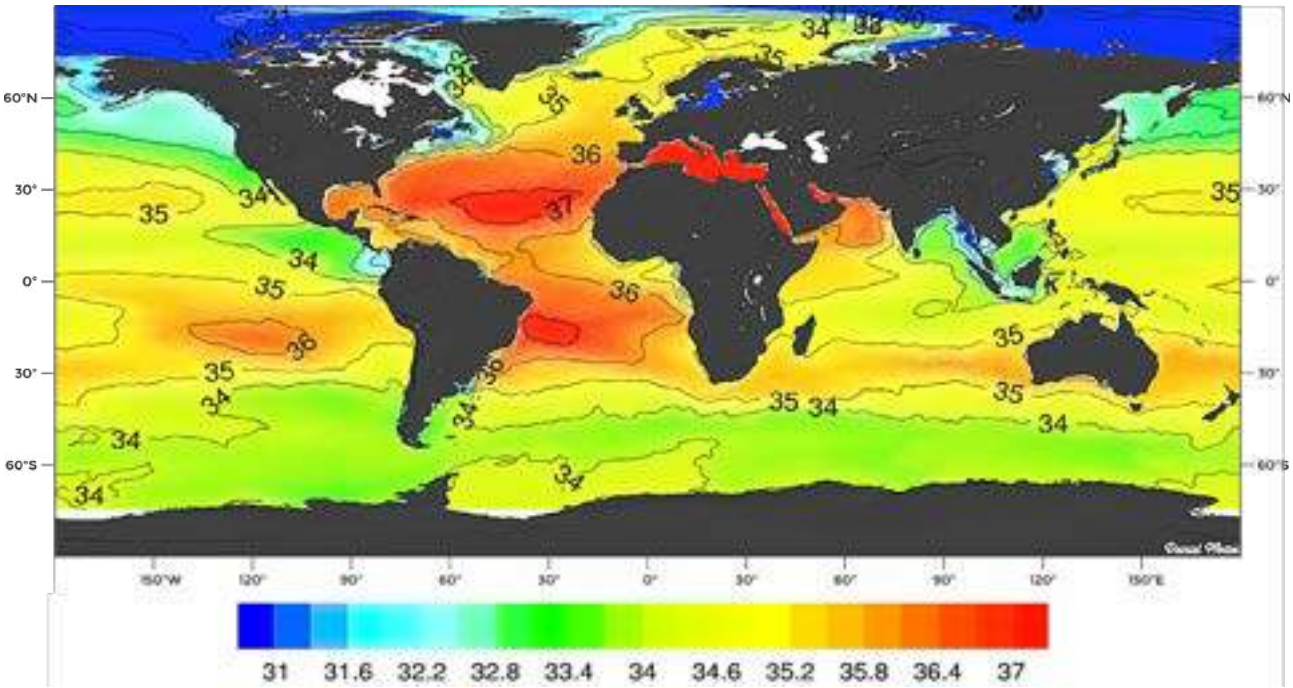



**FIGURA 6.** Mapa horizontal de salinidade da superfície do mar, obtido com modelagem numérica. A escala horizontal associa níveis de cores e valores de salinidade. *Cortesia Daniel Moita*.

Conforme colocado previamente, a densidade da água do mar é uma variável dependente da salinidade, temperatura e pressão. Essa propriedade é inferida utilizando uma equação de estado da água do mar. A densidade média do oceano é aproximadamente 1.024 kg · $m^{-3}$, portanto, da ordem de $10^3$ kg · $m^{-3}$. Em Oceanografia, em termos práticos, usa-se um parâmetro denominado de ***Sigma***$_T$ ($\sigma_T$) – equivalente à densidade convencional. Esta quantidade é obtida fazendo a diferença entre a densidade "*in situ*" e a máxima densidade da água pura à 4°C, a qual é igual a $10^3$ kg · $m^{-3}$. Ao utilizar a temperatura potencial ($\theta$), tem-se a densidade potencial ou, para os propósitos práticos, a densidade potencial convencional ($\sigma_\theta$). Lembrando, a temperatura potencial é uma temperatura resultante da correção dos efeitos de altas pressões sobre a parcela de água, quando esta é trazida de uma elevada profundidade para um nível de interesse, por exemplo a superfície do mar, de forma adiabática.

A distribuição horizontal de densidade convencional na superfície, ou $\sigma_T$, pode ser visualizada no mapa indicado na Figura 7. Como a densidade depende da salinidade, temperatura e pressão, é de se esperar que esta seja relativamente menor nas regiões de baixas latitudes e crescendo em direção aos polos, onde a água do mar é mais fria. Deve-se observar que a densidade é mínima na região equatorial, baixas latitudes, devido ao máximo de temperatura e não ao mínimo de salinidade.

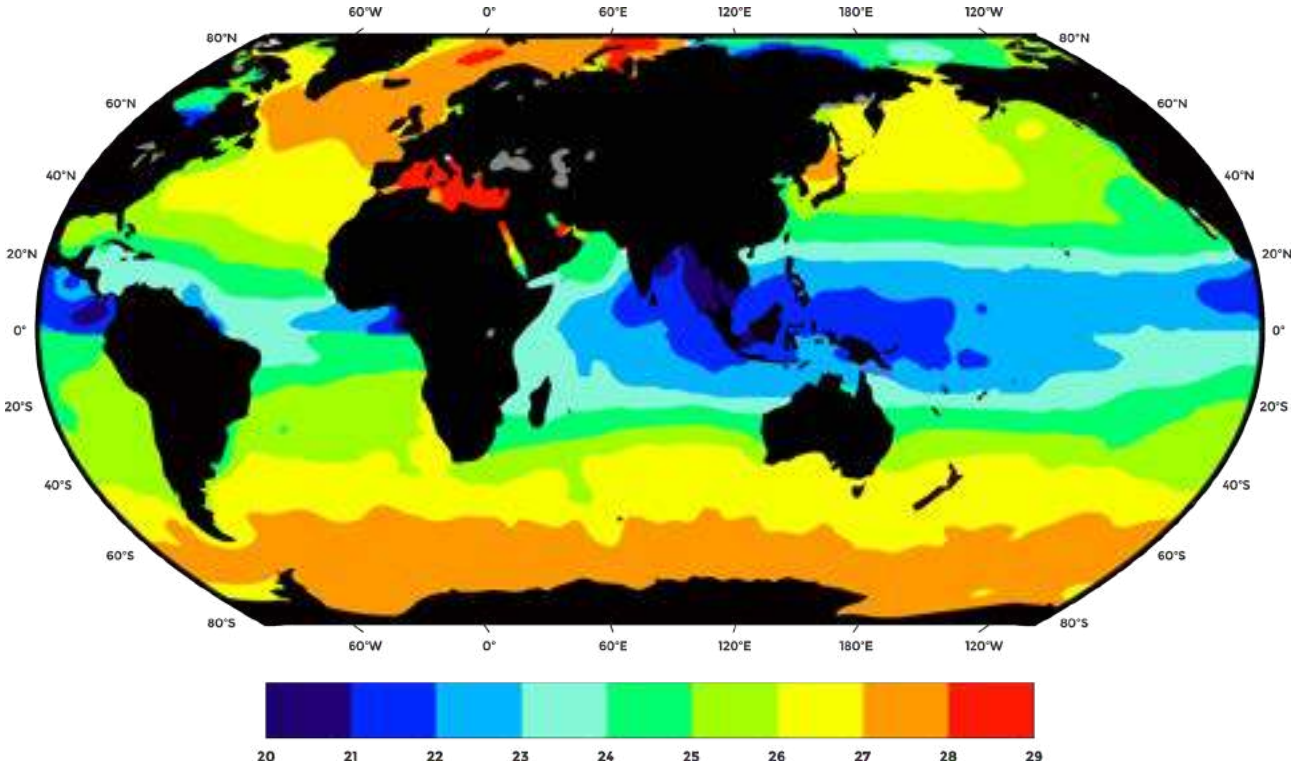



**FIGURA 7.** **Mapa horizontal de densidade convencional (kg. $m^{-3}$) da superfície do mar. A escala horizontal associa níveis de cores e valores de densidade convencional.** *Fonte: Talley et al. (2011).*

As seções verticais de propriedades físico/químicas da água do mar, ao longo de toda a coluna de água em uma região oceânica, possibilitam observar a profundidade média do oceano e a estrutura vertical de tais propriedades no interior do oceano. Para exemplificar, suponha um corte meridional ao longo do Oceano Atlântico (Fig. 8). A estrutura vertical da seção meridional de densidade potencial convencional está indicada na Figura 9. Primeiramente, observa-se que pela escala de profundidade, pode-se inferir a profundidade média do oceano, isto é, da ordem de 3 · $10^3$ m. No caso, a seção meridional estende-se aproximadamente entre 70°S e 65°N, indicando uma extensão horizontal próxima de 16 · $10^3$ km.

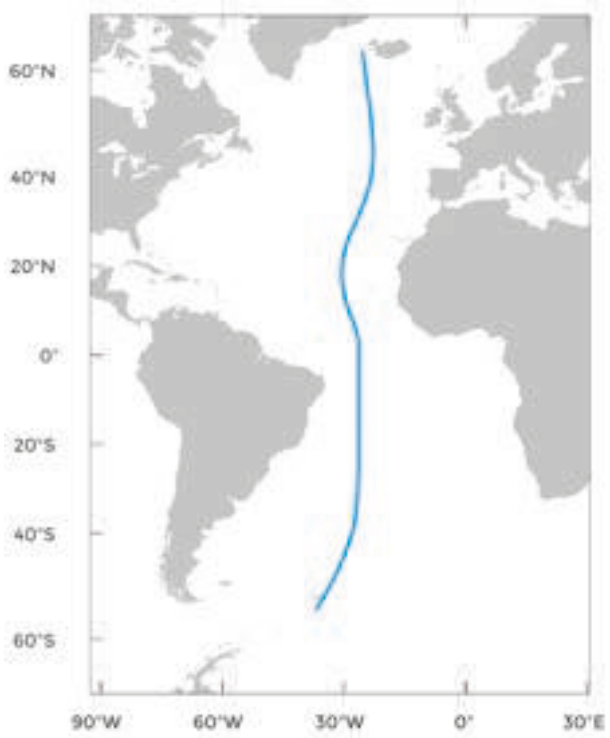



**FIGURA 8.** **Mapa indicando a localização geográfica da seção meridional de densidade convencional – Oceano Atlântico.** *Adaptado de Talley et al. (2011).*

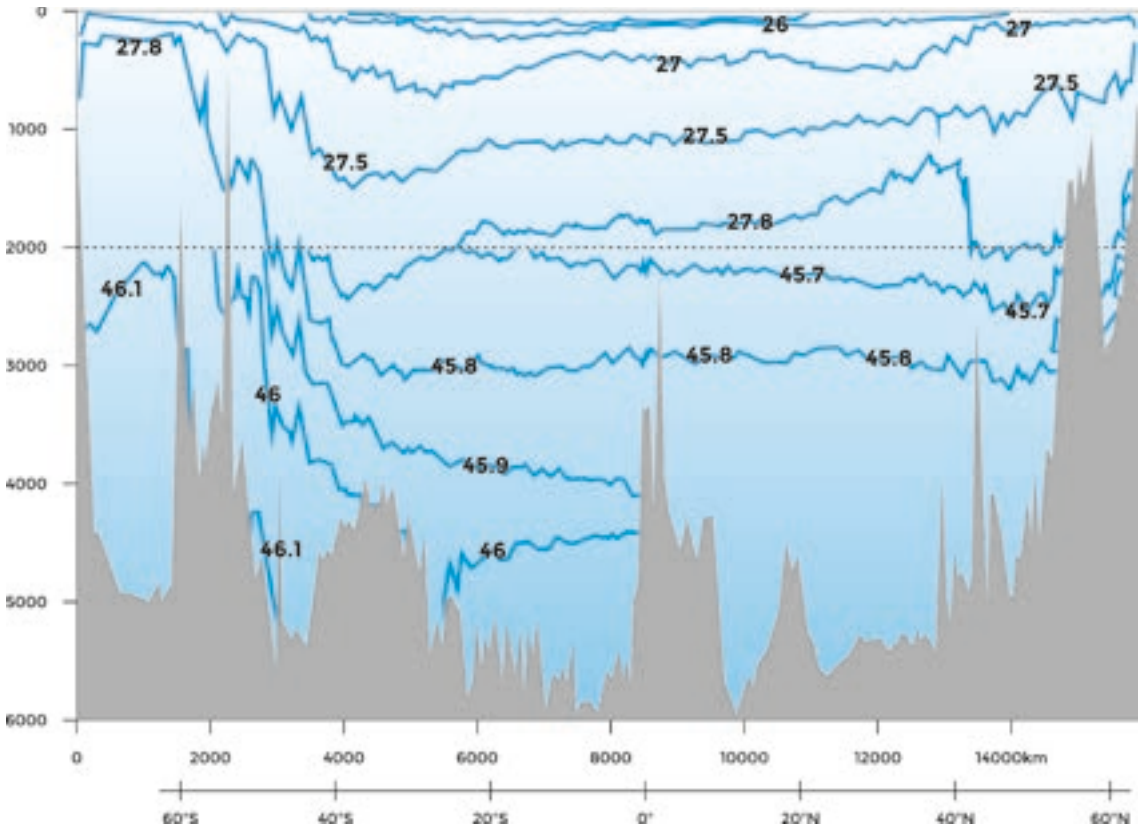



**FIGURA 9.** **Seção vertical meridional de densidade potencial convencional (kg. m$^{-3}$). A linha tracejada em 2000 m indica a interface entre as estruturas de densidades usando níveis de referência: superfície do mar ($\sigma_\theta$) e 4000 dbar ($\sigma_4$). Oceano Atlântico.** *Adaptado de Talley et al. (2011).*

Uma característica importante no estudo do oceano como fluido geofísico é a estrutura vertical da coluna de água. Neste caso, observa-se na Figura 9 as configurações da camada de mistura, picnoclina, onde há um gradiente acentuado de densidade, e camada do oceano profundo.

Com a finalidade de visualizar de forma geral a interação entre a incidência da radiação solar, circulação atmosférica, circulação oceânica e massas de água ao longo da coluna de água, é apresentado o diagrama esquemático esboçado na Figura 10. A estrutura mostra que o oceano é verticalmente estratificado, formado por infinitas camadas. Este é, também, um conceito relevante no estudo do oceano como um fluido geofísico, o qual será abordado no próximo item.

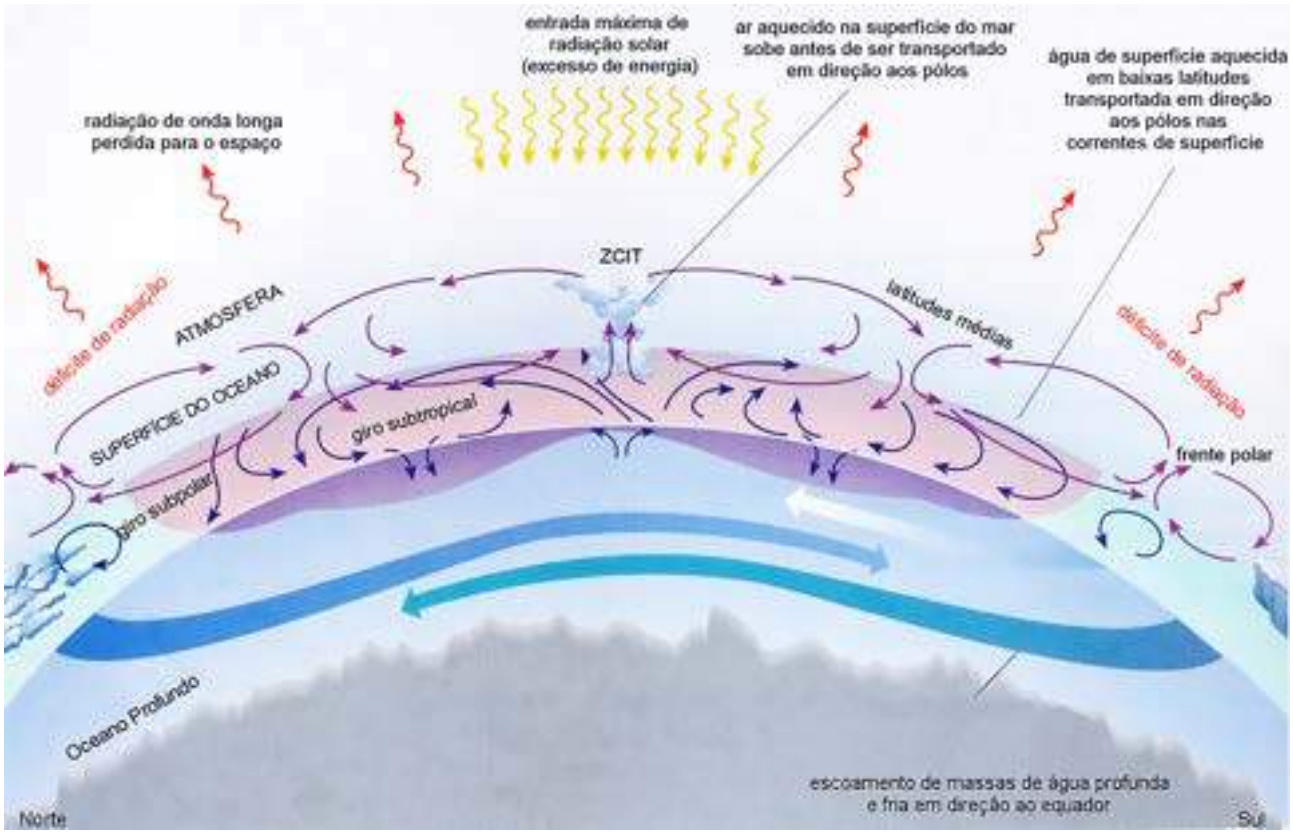



**FIGURA 10. Diagrama esquemático mostrando a interação entre a incidência da radiação solar, circulação atmosférica, circulação oceânica e massas de água ao longo da coluna de água. ZCIT (Zona da Convergência Inter Tropical).** *Adaptado de The Open University (2001).*

## 5. O oceano como um fluido geofísico

Considerando os tópicos abordados previamente, estes são de suma importância para um melhor entendimento do oceano como fluido geofísico. De forma geral, pontos a serem destacados consistem na ordem de grandeza das escalas horizontal e vertical dos oceanos e na estratificação de massa, isto é, a estrutura vertical dos oceanos, que constitui de uma série de camadas formadas por massas de água transportadas por correntes oceânicas.

Lembrando, a circulação no interior do oceano é governada pela densidade da água do mar. Ainda, a densidade da água do mar depende da salinidade e da temperatura em função da pressão, e é calculada por uma equação de estado da água do mar.

Na sequência, aspectos relacionados com a análise de escalas de processos oceânicos são abordados. A ideia é, por exemplo, possibilitar o entendimento dos efeitos da rotação da Terra e da estratificação de massa nos movimentos oceânicos. O conjunto de informações consiste em uma forma de método de estudo da dinâmica oceânica.

## 5.1 Sólidos e fluidos

### *5.1.1 Conceitos*

No estudo da dinâmica oceânica é importante introduzir brevemente conceitos sobre o significado físico de um corpo sólido e de um fluido. Suponha que tais elementos, sólido e fluido, estejam sob ação de forças externas (Kundu, 1990):

- Um elemento sólido, quando submetido à uma força externa, tem um formato preferencial, que tende a retornar quando da remoção das forças atuantes; e
- Um elemento fluido não possui nenhum formato preferencial e irá se deformar continuamente, perante a aplicação de uma força externa.

### *5.1.2 A Hipótese do Continuum*

Um fluido, ou qualquer outra substância correspondente, é composto de um expressivo número de moléculas em constante movimento e colisões.

A matéria é então descontínua ou discreta. Em princípio, é possível estudar a mecânica de um fluido avaliando o movimento das moléculas, propriamente dito.

- O volume de uma molécula de água é aproximadamente $(2{,}76 \cdot 10^{-10})^3$ m$^3$ ~ $10^{-29}$ m$^3$;
- Sabendo que o volume do Oceano Atlântico é da ordem de $3 \cdot 10^{18}$ m$^3$, o número de moléculas correspondente é de $10^{48}$ moléculas;
- Mas, geralmente, só há interesse na manifestação média do movimento molecular. Pode-se então ignorar a estrutura molecular discreta da matéria e tratá-la como meio contínuo:

» ***continuum***.

Mas quando a hipótese do *continuum* é válida?

A hipótese do *continuum* é válida quando a escala de comprimento do sistema de fluxo for muito maior do que a trajetória livre da molécula. Na atmosfera, ao nível do solo, essa trajetória é da ordem de $5 \cdot 10^{-8}$ m.

Concluindo, é possível ignorar a estrutura molecular discreta do fluido e tratá-lo como um meio contínuo - o *continuum*.

## 5.2 O fluido geofísico chamado oceano

A Geofísica pode ser definida como a ciência que estuda a estrutura, as propriedades físicas e os processos dinâmicos que occorem nas esferas que compõem o planeta Terra.

### ESFERAS TERRESTRES

**Atmosfera, hidrosfera e litosfera**

- **Atmosfera:** a camada fluida de gases que se mantém unida ao planeta através da força da gravidade, sua circulação e as massas de ar;
- **Hidrosfera:** inclui os corpos de água do planeta, como os oceanos, rios, lagos, mares internos, geleiras e águas subterrâneas;
- **Litosfera:** envolve as rochas e estruturas internas do planeta (ver capítulo **Investigando o Planeta Terra**).

**O Planeta Terra.** *Imagem: NASA (Wikimedia Commons).*

A questão que surge é: como caracterizar o oceano como um fluido geofísico?

Considerando os aspectos abordados previamente, pode-se dizer que o oceano é: **raso**; **estratificado**; e está **em rotação**.

Na sequência serão abordados cada um destes aspectos.

### *5.2.1 Geometria: razão de aspecto*

No caso de caracterizar o oceano geofísico como raso, há de se considerar a geometria da bacia oceânica. Esta pode ser avaliada pela razão de aspecto entre a escala característica da profundidade média do oceano e a escala característica da extensão horizontal do oceano.

De modo geral a geometria está relacionada pela razão, dada por:

$$\delta = H / L$$

onde $H$ é a extensão vertical (profundidade) e $L$ sua extensão horizontal.

## EXEMPLIFICANDO A RAZÃO DE ASPECTO

**Tal conceito pode ser entendido considerando a razão de aspecto entre a profundidade de uma banheira ($H_b$) e sua extensão horizontal ($L_b$)**

Em uma banheira, considere as seguintes escalas:

- $H_b$ = 0,5 m, profundidade da banheira; e
- $L_b$ = 1,5 m, largura ou comprimento da banheira.

*Imagem: cortesia Victor Alves de Souza*

Utilizando esses valores, tem-se:

$$\delta_b = H_b / L_b = 0{,}5\ m / 1{,}5\ m = 0{,}33$$

Razão de aspecto = 1:3

Qual é o significado de $\delta_b$?

A profundidade da banheira é três vezes menor que a sua extensão horizontal!

No oceano, considere as seguintes escalas inferidas previamente:

- $H_o = 3 \cdot 10^3$ m, a profundidade média do oceano;
- $L_o = 3 \cdot 10^6$ m, escala horizontal do oceano, em larga escala

No caso, considerando a extensão horizontal dos giros oceânicos, equivalente a 30 graus de latitude, e sabendo que:

- 1 grau de latitude = 60 minutos;
- 1 minuto = 1 milha náutica (mn);
- 1 grau de latitude = 60 milhas náuticas; e
- 1 mn = 1.852 m.

Tem-se, 30 graus de latitude equivale a $3 \cdot 10^6$ m.

Portanto,

$$\delta_0 = H_o / L_o = 3 \cdot 10^3 m / 3 \cdot 10^6 m$$

$$\delta_0 = 1 \cdot 10^{-3}$$

**Razão de aspecto = 1:1000**

Analogamente, outra razão de aspecto importante é dada entre a profundidade média dos oceanos ($H_o$) e o raio médio da Terra ($R_{Terra}$), ou seja:

$$\delta = 3 \cdot 10^3 m / 6 \cdot 10^6 m$$

$$\delta = 0{,}5 \cdot 10^{-3}$$

**Razão de aspecto = 1:2000**

Qual é o significado?

No primeiro caso, a profundidade média dos oceanos é mil vezes menor que a escala horizontal dos oceanos e, no segundo, duas mil vezes menor do que o raio médio da Terra. Em termos de ordem de grandeza corresponde a $10^3$.

Conclusão: considerando a razão de aspecto ($10^{-3}$) entre a profundidade média do oceano ($3.10^3$ m) e a escala horizontal característica ($3.10^6$ m), o oceano pode ser considerado "raso"!

Significado físico: as velocidades verticais nos oceanos são relativamente menores que as velocidades horizontais, da ordem de $10^{-4}$ m/s e $10^{-1}$ m/s em larga escala, respectivamente. A razão é que há pouco espaço na vertical para as velocidades se desenvolverem, comparativamente com aquele para as velocidades horizontais.

### *5.2.2 Estratificação: estrutura de densidade*

Prosseguindo, o passo seguinte é caracterizar o oceano como um fluido geofísico estratificado.

Em uma banheira, a água pura tem uma estrutura de densidade homogênea, conforme pode ser observado no perfil vertical de densidade (Fig. 11). A máxima densidade da água pura à 4°C é $\boldsymbol{\rho} = 10^3$ kg · m$^{-3}$.

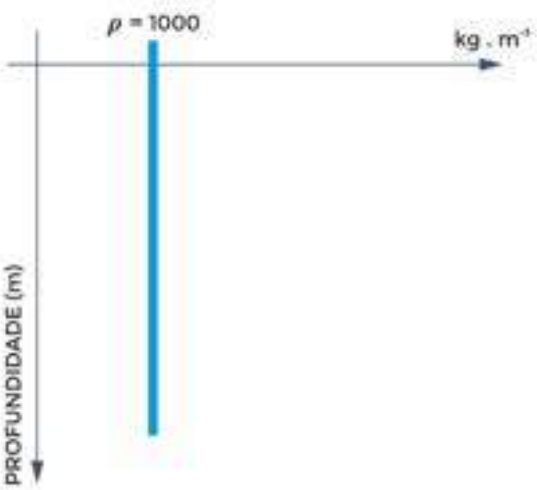



**FIGURA 11.** Perfil vertical da máxima densidade da água pura (kg . m$^{-3}$) à 4°C.

No oceano, águas menos densas, isto é, mais quentes, se encontram nas camadas superiores, enquanto água mais densas, isto é, mais frias, se encontram em maiores profundidades. O correspondente perfil vertical de densidade convencional, quantidade esta denominada por $\boldsymbol{Sigma_T}$, está representado na Figura 12.

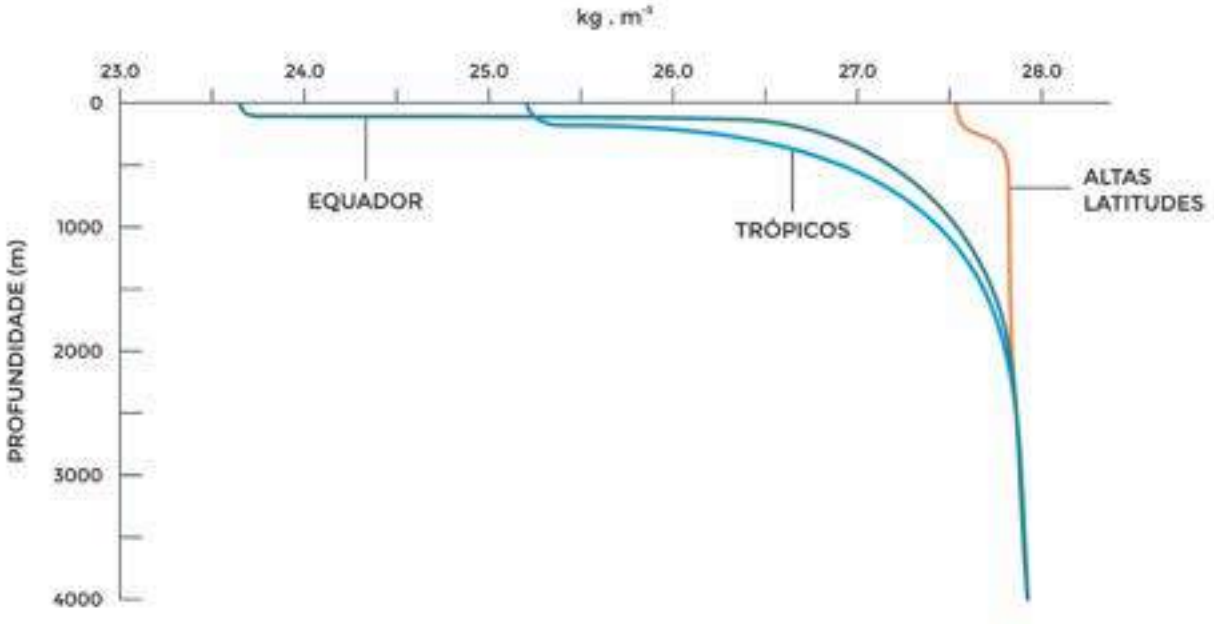



**FIGURA 12.** Perfis verticais de densidade convencional - $\boldsymbol{Sigma_T}$ (kg . m$^{-3}$): equador, trópicos e altas latitudes. *Adaptado de The Open University (1995).*

Lembrando, $\boldsymbol{Sigma_T = \sigma_T = (\rho\ (S, T, p) - 1.000)\ kg \cdot m^{-3}}$ consiste na diferença entre a densidade calculada com a salinidade, temperatura e pressão medidas "*in situ*" e a máxima densidade da água pura à 4°C. Portanto, é uma forma prática de considerar a densidade da água do mar. Mas, em cálculos dinâmicos, deve-se considerar a ordem de grandeza de $\boldsymbol{\rho} = 10^3$ kg · m$^{-3}$.

Observar, na Figura 12, que há três perfis verticais de densidade convencional, referentes às regiões do equador, trópicos e altas latitudes. Notar a presença das camadas de mistura, das picnoclinas e do oceano profundo. Do equador para as altas latitudes, os gradientes de densidade convencional, característicos da picnoclina, se mostram comparativamente menores. Em altas latitudes, a picnoclina já não se mostra tão acentuada, pois há um limite para o máximo de densidade.

### *5.2.3 O efeito da rotação da Terra*

A rotação da Terra (Fig. 13) em torno de seu eixo conduz ao chamado efeito de Coriolis. Lembrando, o parâmetro de Coriolis é a igual a $f = 2\,\Omega\,sen\varphi$, em que:

- $\Omega$ = 2π / tempo de 1 revolução = 2π / 24 horas; e
- $\varphi$ = latitude média.

No Hemisfério Norte, objetos em movimento tendem a ser defletidos para a direita da direção de sua trajetória. Já no Hemisfério Sul, objetos em movimento tendem a ser defletidos para a esquerda da direção de sua trajetória. O efeito é mais acentuado nos polos, e decai para zero em direção ao equador. A razão é que o parâmetro de Coriolis depende do seno da latitude.

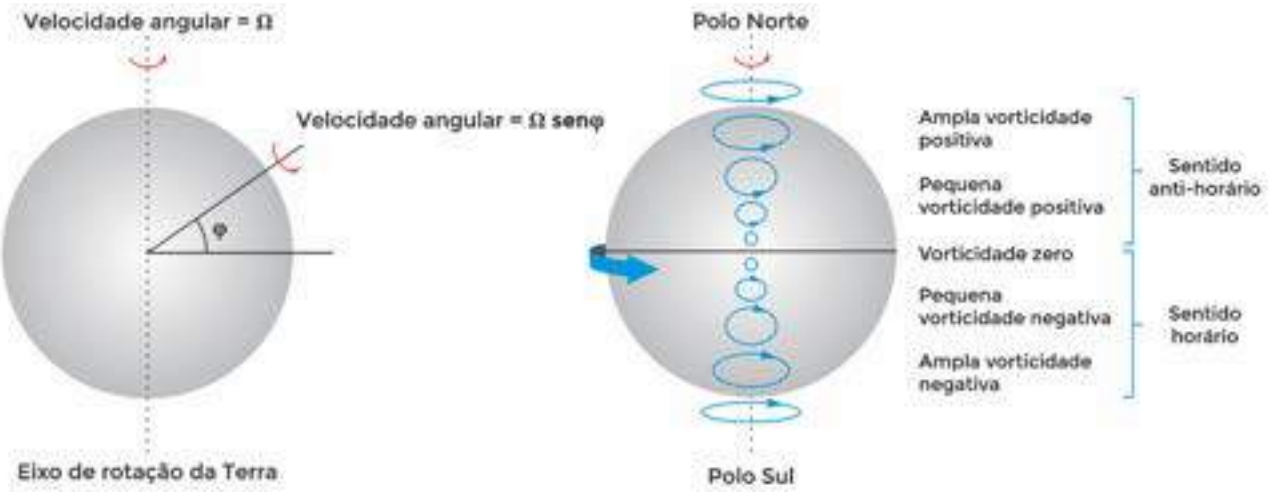
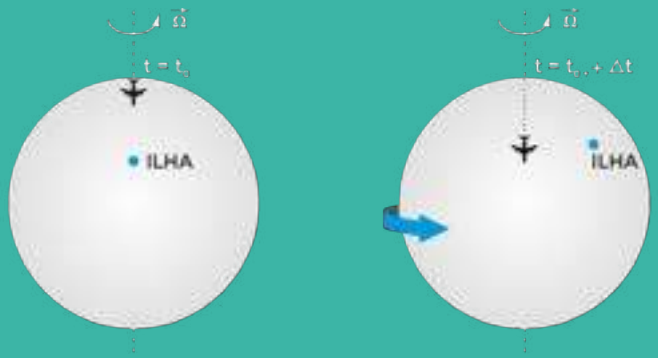



**FIGURA 13.** **A rotação da Terra e a aceleração de Coriolis, entre o Equador e o polos Norte e Sul.** *Adaptado de The Open University (2001).*

## A ROTAÇÃO DA TERRA

**O efeito da rotação da Terra pode ser visualizado considerando a trajetória de uma aeronave, viajando do Polo Norte em direção à uma Ilha no Oceano Atlântico Norte. Observando do espaço:**




Se o observador se encontra fixo à esfera em rotação, a aeronave parecerá ter "guinado" em direção à oeste. Primeiramente, como ponto de partida, considere o tempo igual a $t_0$ no momento que a aeronave inicia sua trajetória. Neste instante, a Terra, com a localização da ilha, está em uma dada posição. Como a Terra gira de oeste para leste, após uma fração do tempo de revolução, $t = t_0 + \Delta t$, a trajetória da aeronave parecerá desviada para oeste. *Imagem adaptada de The Open University (2001).*

## 6. Elementos de análise de escala

Continuando, no estudo da dinâmica oceânica, um tópico de suma importância e que será abordado na sequência é a Análise de Escala. Então, uma questão que surge é: A água que escoa pelo ralo de uma banheira, após retirar o tampão, "gira" no mesmo sentido ou em sentidos opostos nos hemisférios Norte e Sul?

Para entender essa questão, observe o conjunto de banheiras mostradas na Figura 14.

**FIGURA 14.** Simulação do efeito da rotação da Terra, considerando a geometria de uma banheira.
*Cortesia: Victor Alves de Souza.*

Ao remover o tampo da banheira, será que o escoamento de água gira no sentido horário no Hemisfério Norte e anti-horário, no Hemisfério Sul, semelhante aos sentidos dos Giros Subtropicais em cada correspondente hemisfério? Isto é, será que o efeito da rotação da Terra influencia no sentido do movimento do escoamento?

Com a finalidade de responder essa questão, será iniciado o estudo de análise de escalas. Para isso, deve-se considerar primeiramente as dimensões físicas e unidades características de processos oceânicos em estudo. Aspectos que serão abordados no próximo item.

### 6.1 Dimensões físicas e unidades

As leis fundamentais que governam os movimentos nos oceanos satisfazem ao princípio da homogeneidade dimensional. Ou seja, todos os termos, em equações que expressam as leis físicas, têm a mesma dimensão. Tais dimensões podem ser expressas em termos múltiplos e razões de quatro propriedades dimensionalmente independentes:

- Comprimento [$\boldsymbol{L}$] - metro, m
- Profundidade do movimento [$\boldsymbol{H}$] - metro, m
- Velocidade horizontal [$\boldsymbol{U}$] – distância / tempo – $m \cdot s^{-1}$
- Velocidade vertical [$\boldsymbol{W}$] – distância / tempo – $m \cdot s^{-1}$
- Massa [$\boldsymbol{M}$] - quilograma, kg
- Densidade média [$\boldsymbol{\rho_0}$] - massa/volume - $kg \cdot m^{-3}$
- Variação de densidade [$\boldsymbol{\Delta\rho}$] - massa/volume - $kg \cdot m^{-3}$
- Tempo [$\boldsymbol{t}$] - segundos, s
- Temperatura [$\boldsymbol{T}$] - graus Kelvin, K ou Celsius, °C

A análise de escalas permite a estimativa de cada termo que compõe as equações hidrodinâmicas, que são equações diferenciais parciais sem soluções gerais conhecidas. Isto significa que tais equações são resolvidas utilizando condições de contorno, por exemplo, ar-mar, mar-fundo marinho, mar-continente. A finalidade da análise de escala é simplificar tais equações, reduzindo o número de termos, e, desta forma, entender os processos oceânicos de forma mais simples. E como estimar a escala de tempo no oceano?

No oceano é mais "fácil" estimar uma escala de velocidade, pois há instrumentos oceanográficos que registram essa quantidade "*in situ*", do que a escala de tempo. Consequentemente, a escala de tempo pode ser inferida a partir da definição de velocidade:

$$U = L/t \rightarrow t = L/U$$

As escalas de tempo dos movimentos do oceano podem variar, de frações de segundos a décadas. Um espectro de ondas, mostrando características de tipos de ondas, pode ser visualizado na Figura 15.

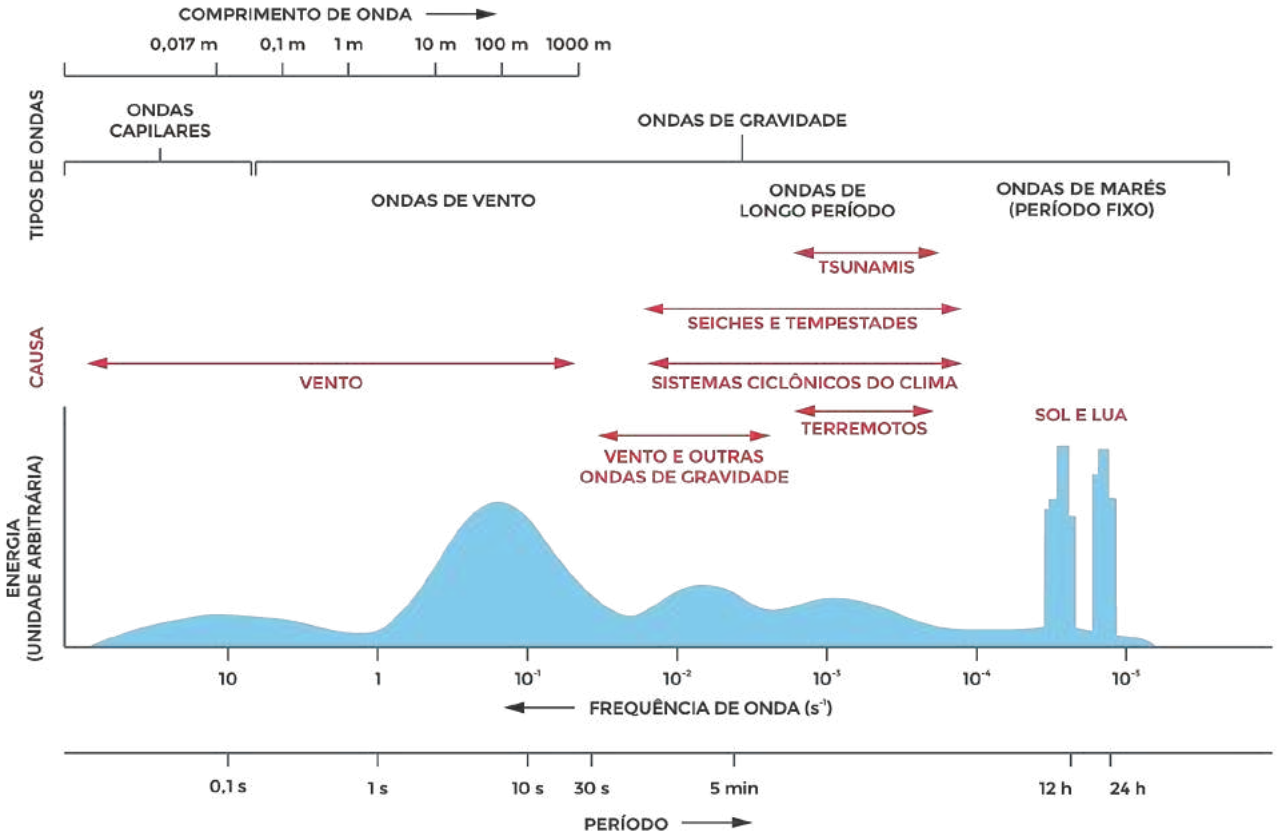



**FIGURA 15.** **Espectro das características de tipos de ondas.** *Adaptado de The Open University (2000).*

Um importante ponto em análise de escala é conhecer as características do processo marinho que se quer estudar. No caso, para fazer uma análise de escala de um dado tipo de onda, deve-se conhecer a velocidade orbital das parcelas de água, o período e o comprimento da onda característicos. A Tabela 1 exemplifica escalas típicas dos movimentos no oceano em larga, meso e pequena escalas.

**TABELA 1.** **Exemplos de escalas típicas dos movimentos no oceano.**

| Larga escala | Meso escala | Pequena escala |
|---|---|---|
| $L = 10^6$ m | $L = 10^5$ m | L = 10 m |
| $H = 10^3$ m | $H = 10^3$ m | H = 10 m |
| $U = 10^{-1}$ m · $s^{-1}$ | $U = 10^{-1}$ m · $s^{-1}$ | $U = 10^{-1}$ m · $s^{-1}$ |
| $W = 10^{-4}$ m · $s^{-1}$ | $W = 10^{-3}$ m · $s^{-1}$ | W = U m · $s^{-1}$ |

## 6.2 A importância da rotação da Terra e da estratificação de massa

Questão: como a rotação da Terra e a estratificação de massa podem ter sua importância avaliada nos movimentos oceânicos?

### *6.2.1 A importância da rotação da Terra*

Avaliar a importância do efeito da rotação da Terra nos escoamentos irá permitir responder à questão, levantada previamente, sobre o sentido de escoamento da água ao retirar o tampão de uma banheira.

Lembrando, a taxa de rotação da Terra ou velocidade angular ($\Omega$) é dada por:

$$\Omega = (2\,\pi) / 24\,h = 7{,}29 \times 10^{-5}\ rad\ s^{-1}$$

Para saber se a rotação da Terra tem influência em um dado movimento, deve-se comparar a escala de tempo do movimento com a escala de tempo de uma revolução. Se os movimentos do fluido evoluem em escala de tempo comparáveis ou mais longas que o período de rotação da Terra, pode-se afirmar que o fluido irá sentir o efeito da rotação. Logo, tem-se a razão:

$$\varepsilon_t = (Tempo\ de\ 1\ revolução) / (Escala\ de\ tempo\ do\ movimento)$$

Então, $\varepsilon_t = (\Omega\, t)^{-1}$, onde $\varepsilon_t$ é denominado "***número de Rossby local***" e é um número admensional.

Se $\varepsilon_t$ é menor ou igual a ordem 1, simbolicamente expresso por O(1), os efeitos da rotação da Terra devem ser considerados.

Sabendo que a velocidade é dada por $U = L / t$, então $t = L / U = LU^{-1}$. Portanto,

$$\varepsilon = (Tempo\ de\ 1\ revolução) / (Tempo\ que\ a\ partícula\ necessita\ para\ cobrir\ uma\ distância\ L,\ tendo\ velocidade\ U)$$

$$\varepsilon = \Omega^{-1} / LU^{-1},$$

Em termos do parâmetro $f_0 = 2\ \Omega\ sen\varphi_0$ - parâmetro de Coriolis, ao redor de uma latitude central, tem-se:

$$\varepsilon = \frac{U}{|f_0|\,L}$$

onde $\varepsilon$ é denominado "***número de Rossby advectivo***" e também é um número admensional.

Concluindo, considerando o número de Rossby local ($\varepsilon_t$) e número de Rossby advectivo ($\varepsilon$):

Se $\varepsilon_t$ ou $\varepsilon$ = O(1), a rotação da Terra começa a ser importante no movimento;

Se $\varepsilon_t$ ou $\varepsilon$ << 1, a rotação da Terra é importante!!! domina o movimento; ou

Se $\varepsilon_t$ ou $\varepsilon$ >> 1, a rotação da Terra não influencia no movimento.

Retomando o exemplo dado, para investigar se a rotação da Terra influencia no sentido do escoamento em uma banheira e em um oceano, e considerando:

- Banheira → $\varepsilon = 10^{3} >> 1$, para um escoamento de pequena escala, significa que a rotação da Terra não influencia no sentido da circulação!!!
- Oceano → $\varepsilon = 10^{-3} << 1$, para um escoamento de larga escala, significa que a rotação da Terra influencia no sentido da circulação!!!

Conclusão: relembrando a questão que foi colocada previamente,

**"A água que escoa pelo ralo de uma banheira, após retirar o tampão, "gira" no mesmo sentido ou em sentidos opostos nos hemisférios Norte e Sul?",**

pode agora ser respondida. Conforme visto pela análise de escala, utilizando o número de Rossby advectivo, **no caso da banheira, a rotação da Terra não influencia no sentido de rotação do escoamento.**

### *6.2.2 A importância da estratificação*

Em dinâmica oceânica, ao estudar determinados tipos de processos oceânicos, a estratificação de massa pode ser ou pode não ser importante no movimento. Portanto, o passo seguinte é apresentar como avaliar a importância da estratificação.

O oceano, tipicamente, consiste de camadas de fluido de diferentes densidades, que sob a ação da gravidade, tendem a se arranjar em pilhas verticais, correspondentes a um estado de energia potencial mínima. No entanto, o movimento dos fluidos tende a perturbar esse estado de equilíbrio, soerguendo fluido mais denso e afundando fluido mais leve (Fig. 16).

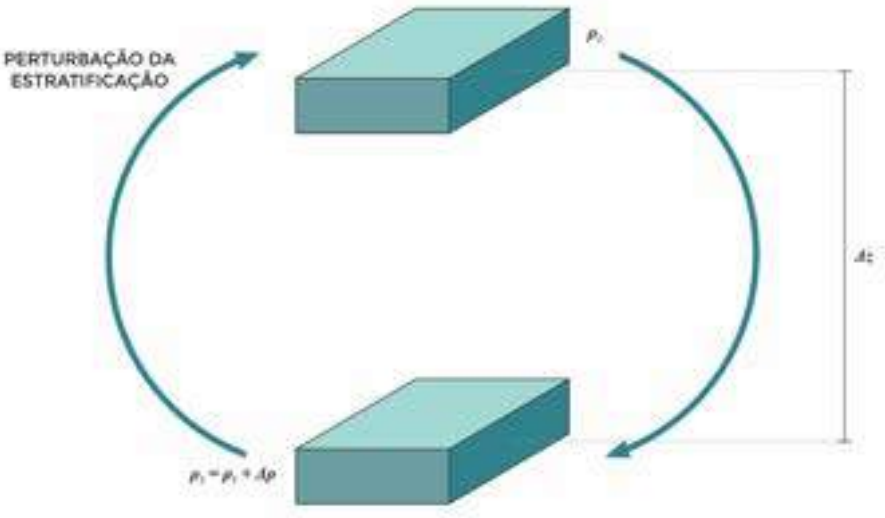



**FIGURA 16.** Esquema ilustrando o deslocamento vertical de uma parcela de água devido à perturbação na estrutura de densidade, isto é, na estratificação de massa, ao longo da coluna de água.

Assim, por conservação de energia, o aumento de energia potencial tem que ocorrer às custas de decréscimos de energia cinética. Logo, a importância da estratificação deve ser avaliada comparando a energia cinética ($E_K$) e a potencial ($E_p$). Denominando por número de Froude, $F_r$, a razão dada por:

$$F_r = \frac{\text{Energia cinética disponível} / \text{unidade de volume}}{\text{Variação de energia potencial} / \text{unidade de volume}}$$

$$F_r = 1/2 \frac{\rho_0 U^2}{\Delta \rho g D}$$

Simbolicamente,

$$F_r = E_K / E_P$$

onde,

$\rho_o$ $[M/L^3]$ - densidade média da água do mar;

$\Delta\rho$ $[M/L^3]$ - variação de densidade;

$U$ $[L/t]$ – velocidade;

$g$ $[L/t^2]$ – aceleração da gravidade; e

$D$ $[H]$ profundidade.

Se $F_r \approx 1$,

- Típico acréscimo de $E_P$, consome significante $E_K$;
- Significado físico: há início da perturbação!

Se $F_r << 1$,

- Existe insuficiente $E_K$ para perturbar a estratificação e limita a capacidade do fluido se mover verticalmente.
- Significado físico: ou a estratificação é forte ou a corrente é fraca!

Se $F_r >> 1$,

- Mudanças em $E_P$ ocorrem à custa de pouca $E_K$, logo a estratificação não é importante.
- Significado físico: ou a estratificação é fraca ou a corrente é forte!

Conclusão: se o número de Froude, $F_r$ = O(1), o efeito da estratificação deve ser considerado no movimento!

### 6.3 A importância da rotação da Terra e da estratificação: o raio de deformação interno

Supondo uma situação em que, tanto a rotação, como a estratificação são importantes no movimento. Isso significa que ambos, número de Rossby advectivo ($\varepsilon$) e número de Froude ($F_r$) são da ordem 1, ou seja: $\varepsilon$ = O(1); e $F_r$ = O(1). Portanto, se:

$$\varepsilon = \frac{U}{|f_0| L} = 1 \quad \text{e} \quad F_r = 1/2 \frac{\rho_0 U^2}{\Delta \rho g D} = 1$$

Combinando essas duas expressões, tem-se:

$$L = \frac{1}{|f_0|} \left( \frac{2 \Delta \rho g D}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{2}} = R_i$$

onde $R_i$ corresponde ao ***raio de deformação interno***.

O raio de deformação interno de Rossby define a escala do movimento e é o menor número a partir do qual a rotação da Terra e a estratificação de massa do oceano são importantes.

Se $L << R_i$: movimento de pequena escala

Se $L = O(R_i)$: movimento de mesoescala

Se $L >> R_i$: movimento de grande escala

#### RAIO DE DEFORMAÇÃO INTERNO

**Exemplificando, considerando processos em médias latitudes, tem-se:**

- $f_o = 10^{-4} \cdot s^{-1}$
- $\Delta\rho = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (a variação de densidade no oceano é aproximadamente 3 kg · m$^{-3}$, equivalente a O(1) kg · m$^{-3}$)
- $\rho_o = 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (densidade média do oceano)
- $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (aceleração da gravidade)
- $D = 10^3$ m (profundidade média do oceano)

Portanto, tem-se que:

$R_i$ = ~ 33 km, em termos de ordem de grandeza, equivale a O(10) km

Significado físico: raio de deformação interno é a distância na qual a tendência gravitacional de manter as isopicnais, isolinhas de mesma densidade, planas ou manter a estratificação de massa em um estado de mínima energia potencial, equilibrada pelo efeito de rotação da Terra.

Continuando, o tópico seguinte apresenta brevemente métodos de estudos de fluidos geofísicos. Primeiramente, são inseridos os conceitos relacionados com a descrição lagrangiana e euleriana. Na sequência, experimentos são mostrados para ambas abordagens.

## 7. Métodos de estudos de fluidos geofísicos: Lagrangiano e Euleriano

Em Oceanografia há duas formas de descrever os movimentos dos fluidos, a descrição lagrangiana e a descrição euleriana. Considere $\boldsymbol{P}$ uma propriedade qualquer do fluido e $\vec{r}$ o vetor posição definido por:

$$\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k},$$

onde $\vec{r}_i$, é o vetor posição da i-ésima parcela do fluido.

**Descrição Lagrangiana:** consiste em acompanhar a "história", ou a trajetória, de uma parcela do fluido. Neste caso, há duas variáveis independentes: o índice da parcela de água, em uma dada posição, $\vec{r} = \vec{r}_i$ , referenciada em um tempo arbitrário $t = 0$.

Portanto, $P = P(\vec{r}_i, t)$

A posição da partícula é expressa como $\vec{r} = \vec{r}_i$ em um tempo $t$, cuja posição era $\vec{r}_0$ em $t_0 = 0$.

Significado físico: a descrição lagrangiana permite seguir individualmente cada parcela de água, variando no tempo. Consequentemente, as duas variáveis independentes são o tempo e o índice, ou rótulo da partícula.

Exemplificando: o mapa indicado na Figura 17 mostra a circulação no Oceano Atlântico ao largo da costa do Brasil, mapeada pelo uso de boias de deriva.

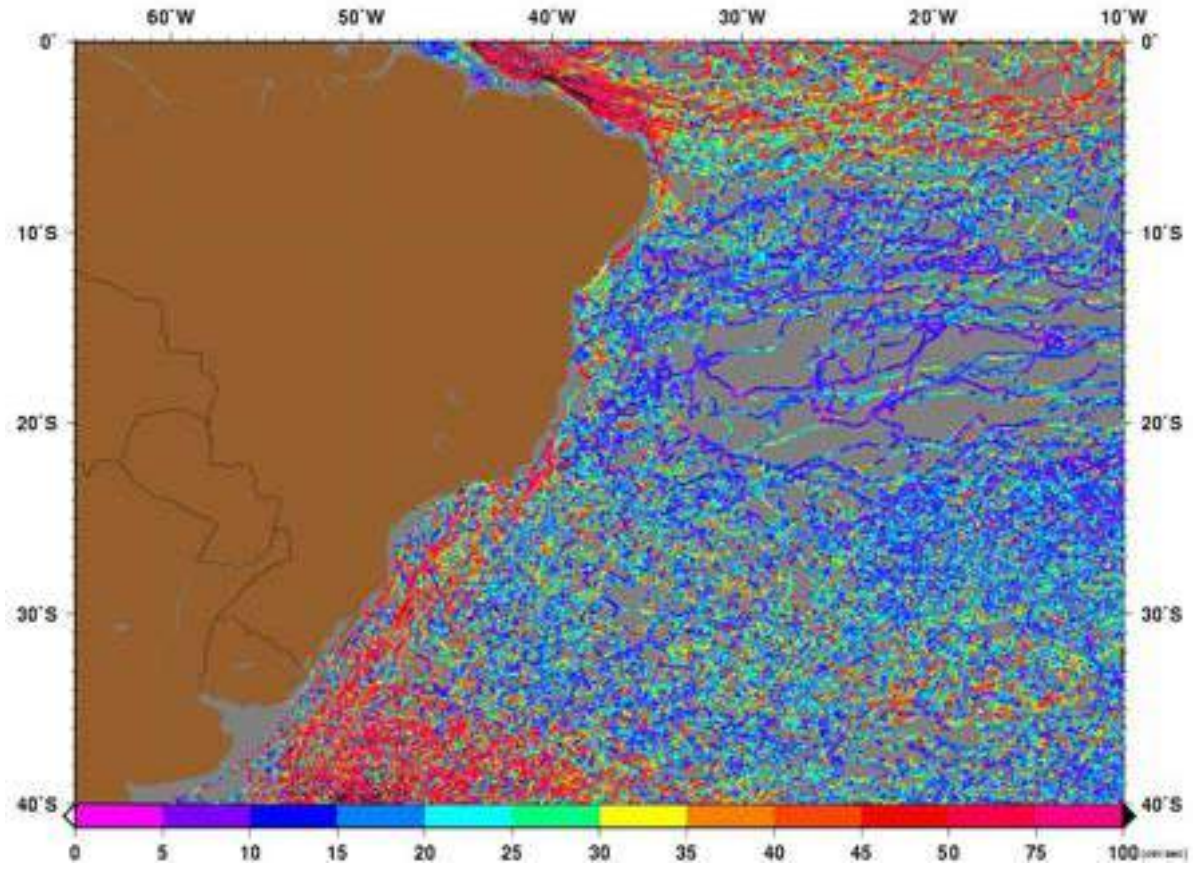



**FIGURA 17.** Experimento Lagrangiano: Circulação no Oceano Atlântico ao largo da Costa do Brasil, mapeada com boias de deriva. *Fonte: <https://oceancurrents.rsmas.miami.edu/atlantic/spaghetti-speed.html>.*

**Descrição Euleriana:** assume que $\boldsymbol{P = P(\vec{r}, t)}$. As propriedades do fluido são determinadas pela "posição" do sistema no espaço-tempo, logo $\boldsymbol{r}$ e $\boldsymbol{t}$ são tomadas como variáveis independentes.

Significado físico: além de observar a variação local de uma propriedade no tempo, simula-se em seguir a parcela de água. Para isto, considera-se que uma dada propriedade é advectada, ou seja, transportada, pelas correntes oceânicas. No estudo da dinâmica de processos oceânicos, normalmente adota-se a descrição euleriana.

Exemplificando, a Figura 18 ilustra um método de estudo usando a descrição euleriana. Nesta figura está esboçada a rede de estações oceanográficas realizadas durante o Projeto Circulação Oceânica da Região Oeste do Atlântico Sul (COROAS): Subprojeto Hidrografia de Meso-escala - HM. Observa-se que as localizações das redes hidrográficas se superpõem para os períodos indicados de verão/1993 e inverno/1993. A área em estudo consiste na Região Central do Embaiamento de São Paulo – Oceano Atlântico Sudoeste. O contorno da costa e o relevo de fundo desta região podem ser observados na Figura 19.

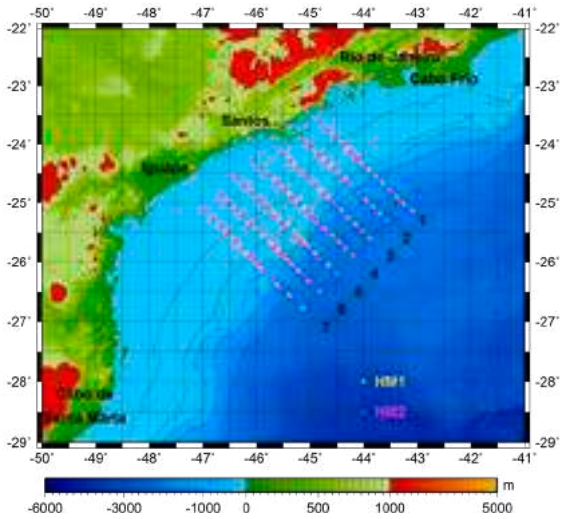



**Figura 18.** Experimento Euleriano 1 - rede de estações oceanográficas - cruzeiros oceanográficos de meso-escala - HM1 - verão / 1993 e HM2 - inverno / 1993. Estações: HM1 = 104; HM2 = 97; espaçamento entre as estações Δx = 5 mn - 10 mn (18,5 km). Projeto COROAS. Região Central do Embaiamento de São Paulo – Oceano Atlântico Sudoeste. *Fonte: Godoi (2005).*

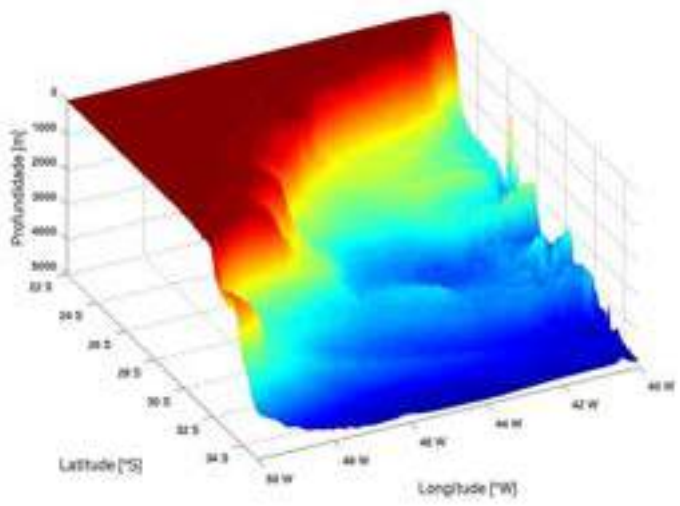



**FIGURA 19.** Contorno da costa e relevo de fundo da região referente ao Embaimento de São Paulo. *Cortesia: Laboratório de Dinâmica Oceânica - IOUSP.*

Em cada estação oceanográfica (Fig. 18) é lançado, por exemplo, entre outros instrumentos, um perfilador de condutividade, a qual é convertida em salinidade, temperatura, em função da profundidade ("*Conductivity, Temperature and Depth*" – CTD). Com o conjunto de registros de dados pode-se elaborar perfis e seções verticais de propriedades físico/químicas da água do mar. Mapas horizontais destas propriedades na superfície e nos diversos níveis amostrados podem complementar a análise.

Exemplificando um outro experimento euleriano indicado na Figura 20, o qual mostra um mapa da distribuição horizontal de salinidade à 40 metros de profundidade.

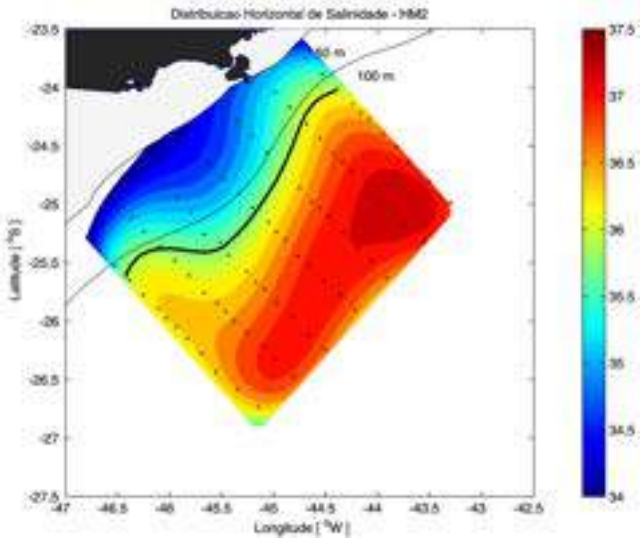



**FIGURA 20.** Experimento Euleriano 2. Mapa da distribuição horizontal da salinidade da água do mar, superposto a rede de estações oceanográficas. Cruzeiro oceanográfico HM-2 - Projeto COROAS. A linha editada em preto representa a isohalina de 36, indicando a interface entre Água Costeira e Água Tropical transportada pela Corrente do Brasil. Região Central do Embaiamento de São Paulo - Oceano Atlântico Sudoeste. *Fonte: Godoi (2005).*

As seções verticais de temperatura potencial (Fig. 21A), salinidade (Fig. 21B) e de densidade potencial convencional (Fig. 21C) são, também, exemplos considerando uma descrição euleriana. O conjunto de seções verticais se refere à radial 7 (Fig. 18) do cruzeiro oceanográfico COROAS - Região Central do Embaiamento de São Paulo – Oceano Atlântico Sudoeste. As estruturas verticais das referidas propriedades mostram o sistema de Corrente do Brasil e Corrente de Contorno Intermediária. O núcleo da Corrente do Brasil é evidente, transportando Água Tropical para sul/sudoeste com temperaturas maiores que 20°C, salinidades maiores que 36 e águas menos densas, em média 25,5 kg · $m^{-3}$.

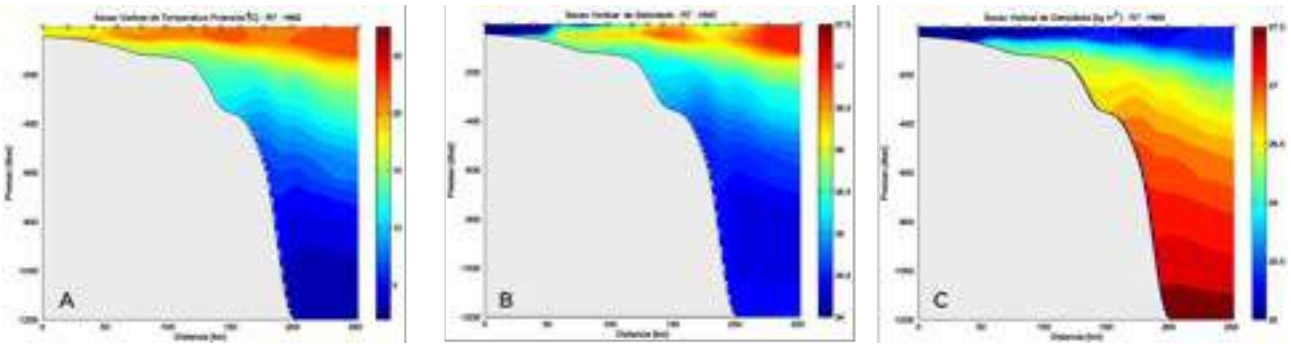



**FIGURA 21.** Experimento Euleriano 2: Região Central do Embaiamento de São Paulo - Oceano Atlântico Sudoeste, Radial 7 - Os triângulos brancos no topo das seções verticais indicam as localizações das estações oceanográficas: (A) Seção vertical de tempertura potencial (°C); (B) seção vertical de salinidade; e (C) seção vertical de densidade potencial convencional (kg . $m^{-3}$). *Fonte Godoi (2005).*

## 8. Experimentos: Sistema Corrente do Brasil x Corrente de Contorno Intermediária

No presente momento, é adequado inserir, para finalizar, uma aplicação de método de estudo de dinâmica oceânica, considerando os breves fundamentos teóricos apresentados previamente. Com a finalidade de observar a estrutura vertical das correntes oceânicas e massas de água associadas, na região ao largo da costa Nordeste, Leste e Sudeste do litoral Brasileiro, o leitor é convidado a interagir com o diagrama esquemático apresentado na Figura 22. Este diagrama retrata parcialmente o padrão de circulação e massas de água associado ao Giro Subtropical do Atlântico Sul na referida região.

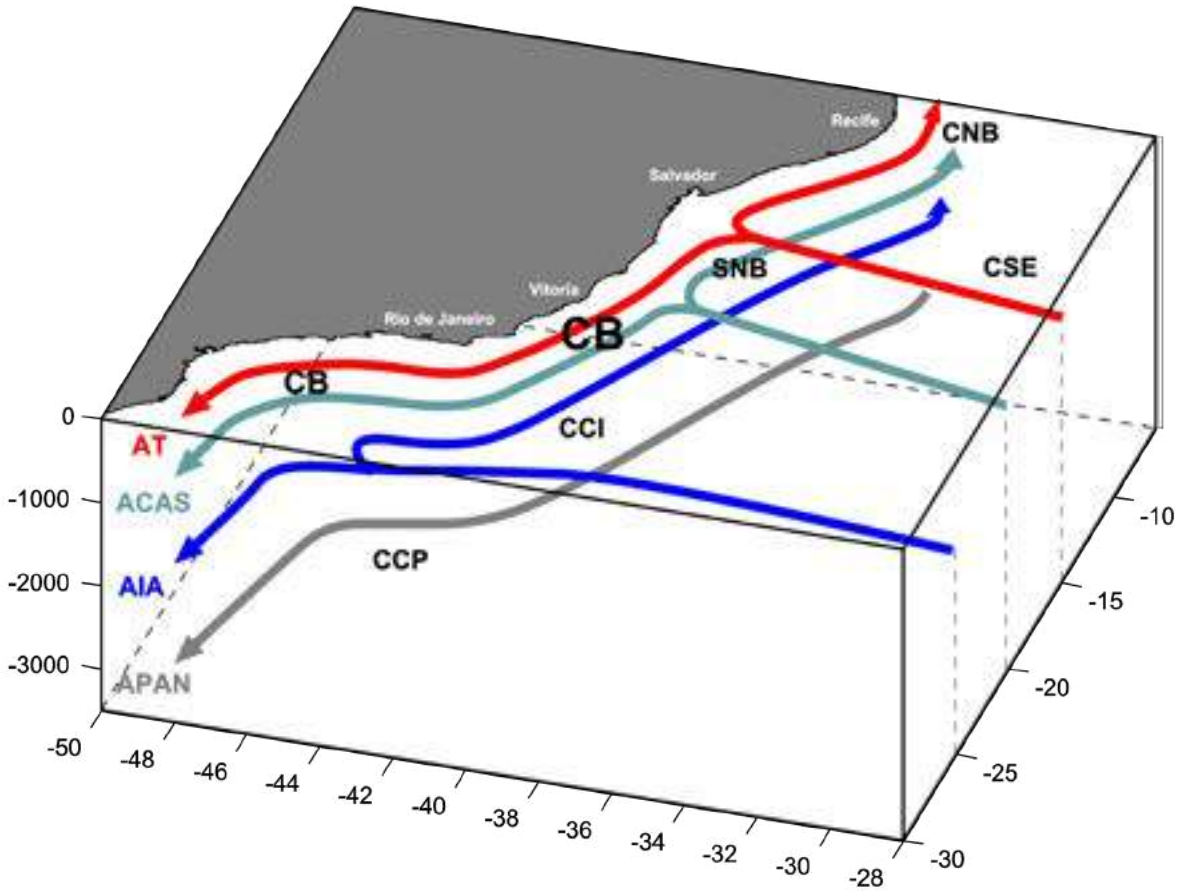



**FIGURA 22.** Esquema mostrando a estrutura vertical da circulação oceânica e massas de água transportadas pelos sistemas de correntes ao largo da costa Nordeste, Leste e Sudeste do litoral Brasileira, inseridas no Giro Subtropical do Atlântico Sul: Corrente Sul Equatorial (CSE); Corrente Norte do Brasil (CNB); Subcorrente Norte do Brasil (SNB); Corrente do Brasil (CB); Corrente de Contorno Intermediária (CCI); e Corrente de Contorno Profunda (CCP). As correspondentes massas de água estão, assim, indicadas: Água Tropical (AT); Água Central do Atlântico Sul (ACAS); Água Intermediária Antártica (AIA); e Água Profunda do Atlântico Norte (APAN). *Fonte Soutelino (2008).*

Contextualizando brevemente sobre as características dos sistemas de correntes oceânicas (Fig. 22), a CB é uma corrente de contorno oeste que compõe o Giro Subtropical do Atlântico Sul. Esta é formada pela bifurcação da Corrente Sul Equatorial (CSE), ao norte da margem continental brasileira. Stramma & England (1999) descreveram um transporte de volume menor na CB em relação às demais correntes de contorno oeste. Segundo estes autores, isso ocorre pelo fato da CSE transportar relativamente um maior volume para o norte na margem equatorial brasileira, se integrando à Subcorrente Norte do Brasil (SNB).

Continuando, a CB se origina, portanto, da bifurcação da CSE, a partir de 10°S. Nesta região, a corrente é fraca e rasa, atingindo apenas 100 metros de profundidade. Escoando ao largo de 14,5°S, se torna uma corrente de contorno, fluindo em direção ao Sul, atingindo, então, 150 metros de profundidade. Já nos 20°S, mostra um aumento em espessura, próximo de 400 – 500 m, e velocidade média de 0,5 m/s. A partir de 20-21°S, a CB apresenta, em níveis picnoclínicos, uma alimentação efetiva dos ramos da CSE. Em seu escoamento para Sul/Sudoeste a CB transporta Água Tropical (AT) e Água Central do Atlântico Sul (ACAS).

Complementando, nas camadas entre 800 m e 1.000 m de profundidade, encontra-se a massa de Água Intermediária Antártica (AIA), transportada pela CCI. Nas camadas mais profundas, acima de 1.000 m de profundidade, a massa de Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) é transportada pela Corrente de Contorno Profunda (CCP).

A configuração esquemática do sistema de correntes e massas de água mostra que o oceano é verticalmente estratificado. Conforme comentado previamente, fica evidente que a estrutura vertical é formada por camadas com águas menos densas próximo à superfície, aumentando sua densidade ao longo da coluna de água, devido aos efeitos combinados de temperatura, salinidade e pressão.

Mas, como estimar a circulação oceânica usando dados observados de temperatura, salinidade em função da pressão? Conforme colocado previamente, pode-se estimar a velocidade de corrente utilizando instrumentos oceanográficos. Em dinâmica, há a possibilidade de utilizar o método dinâmico clássico para inferir campos de velocidades relativas, denominadas de velocidades geostróficas (Pond & Pickard, 1991). Este método necessita de um nível de referência, denominado de nível de movimento nulo, isto é, onde o valor da velocidade da corrente é zero, por exemplo, na interface entre dois sistemas de correntes e massas de água associadas, fluindo em sentidos opostos.

Mas, como inferir o nível de referência?

Observando novamente a Figura 22, nota-se a bifurcação da CCI, em níveis sub-picnoclínicos, aproximadamente ao largo de 25°S e 044°W na região central do Embaiamento de São Paulo. Um ramo desta corrente flui para Norte/Nordeste e outro para Sul/Sudoeste. Com a CB fluindo para Sul/Sudoeste e a CCI fluindo para Norte/Nordeste, pode-se inferir a profundidade da interface do nível de movimento nulo, associado com a interface entre ACAS e AIA. Uma estimativa desta profundidade é de aproximadamente 480 – 500 m (Godoi, 2005).

Com a estimativa do nível de referência, o passo seguinte é aplicar o método dinâmico (Pond & Pickard, 1991). A aplicação deste método irá produzir as velocidades relativas geostróficas, isto é, ao nível de referência adotado.

Neste ponto, vale complementar, um pouco mais, sobre o movimento geostrófico. No estudo da dinâmica do oceano faz-se uso de leis de conservação: quantidade de movimento linear; massa; calor; sal; vorticidade; entre outras. Entende-se por lei de conservação, aquela em que a variação total de uma propriedade qualquer, composta pela variação da propriedade no tempo e advecção da propriedade pelo campo de velocidade, é nula se não houver fontes e/ou sorvedouros.

Mas, no caso de conservação de quantidade de movimento linear, a qual consiste no produto de massa por velocidade, há forçantes atuando no sistema ar-mar-interior do oceano. Tais forçantes podem ser consideradas como forças de superfície e forças de corpo. As primeiras atuam na superfície do sistema oceano, por exemplo a ação dos ventos, e as segundas no seu interior, como o efeito da rotação da Terra e a aceleração da gravidade.

Então, aplicando o princípio de conservação de quantidade de movimento linear chega-se a segunda Lei de Newton: ***Força = massa · aceleração***, isto é, $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$. Em Oceanografia considera-se, normalmente, as acelerações iguais às forças por unidade de massa. A construção dessa equação, considerando as diversas forçantes, conduz à chamada Equação de Navier-Stokes (Pond & Pickard, 1991). Esta é usada para estudo da dinâmica de diversos processos oceânicos, meteorológicos, entre outros.

Pela análise de escalas típicas para meso-escala, citadas previamente, as componentes da equação de conservação de momento linear, compostas pelas velocidades zonal (leste / oeste), meridional (norte / sul) e vertical ($w$), podem ser simplificadas. O resultado para um escoamento estacionário e sem atrito, conduz ao balanço geostrófico! O movimento geostrófico é dado pelo conjunto de equações abaixo.

Componente $u$ de velocidade zonal (leste / oeste):

$$-fv = -1/\rho \, \partial p/\partial x$$

Componente $v$ de velocidade meridional (norte /sul):

$$fu = -1/\rho \, \partial p/\partial y$$

Componente $w$ de velocidade vertical:

$$\partial p/\partial z = -\rho g$$

Este é um movimento estritamente horizontal, onde tem-se a aceleração de Coriolis, devido a rotação da Terra, e as forças de gradiente de pressão por unidade de massa, causadas pela inclinação da superfície livre do oceano e pelas variações laterais de densidade ao longo da coluna de água. Nota-se que a componente vertical de velocidade se reduz ao balanço hidrostático, onde a força peso está em balanço com a aceleração da gravidade. E como estimar a velocidade geostrófica da corrente?

Conforme colocado previamente, esta pode ser estimada usando o método dinâmico. Tendo o campo de velocidades geostróficas, pode-se calcular o campo de função de corrente geostrófica, a qual satisfaz a conservação de massa (Pond & Pickard, 1991). Após essa breve explanação, será apresentado o resultado da estrutura horizontal do campo de função de corrente geostrófica, considerando o sistema CB-CCI (Fig. 23 – painel superior). A base de dados considera as observações registradas durante o cruzeiro oceanográfico HM-2, realizado no inverno de 1993, durante o projeto COROAS (Fig. 18).

Seguindo Godoi (2005), com a finalidade de validar o resultado da configuração do mapa da função de corrente geostrófica próximo da superfície em 2 dbar (decibar = dbar = metro), é feita uma comparação com as feições observadas na imagem da Temperatura da Superfície do Mar, obtida na faixa do infravermelho termal, mapeada pelo sensor "*Advanced Very High Resolution Radiometer*" - satélite "*National Oceanic and Atmospheric Administration*" (AVHRR/NOAA-11), em 20 de julho de 1993 (Fig. 23 – painel inferior). A observação conjunta mostra as estruturas de vórtices associados aos meandros do sistema CB. De acordo com Godoi (2005), tais meandros são ondas baroclínicas de primeiro modo. As feições observadas mostram vórtices ciclônicos, com rotação horária, caracterizados por centros de baixa pressão e núcleos frios, e anticiclônicos, com rotação anti-horária, caracterizados por centros de alta pressão e núcleos quentes. As evidências da combinação de mapas sinóticos e imagens AVHRR sugerem e confirmam informações acerca do comprimento de onda destas ondas, de 200 a 300 km.

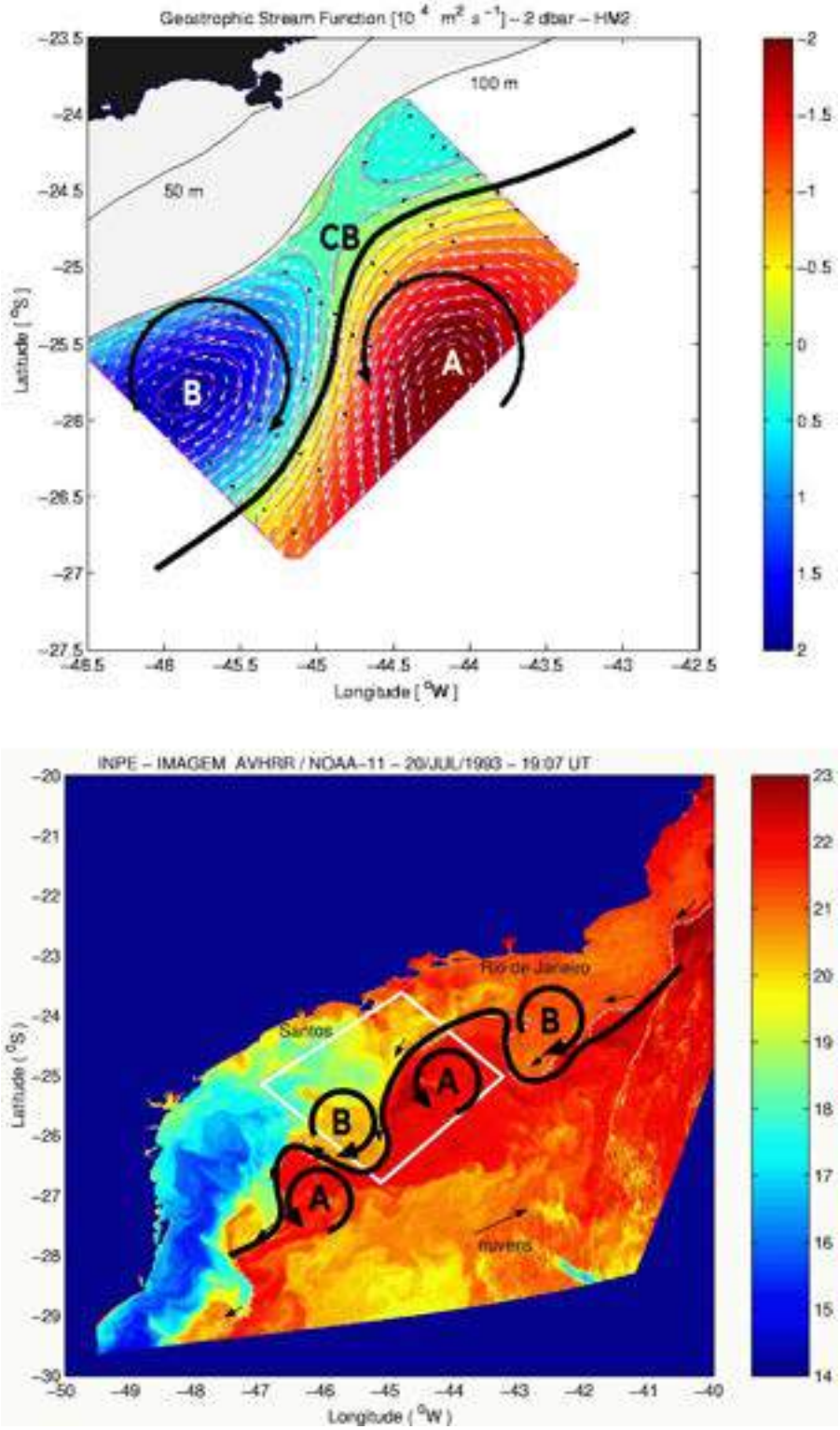



**FIGURA 23.** Interpretação conjunta do mapa da função de corrente geostrófica para 2 dbar - cruzeiro HM2 - inverno 1993 (painel superior), ressaltando o escoamento da Corrente do Brasil (CB), delineado pelo traçado preto, na região central do embaiamento de São Paulo e imagem da Temperatura da Superfície do Mar - AVHRR/NOAA-11 - 20/julho/1993 (painel inferior). Nesta imagem a escala de cores (à direita) fornece níveis de temperatura. A frente termal da Corrente do Brasil está delineada pela linha tracejada (branco). As setas ao longo dessa frente indicam o sentido de escoamento da Corrente do Brasil. O meandramento dessa corrente acompanhado de vórtices ciclônicos (B - centro de baixa pressão) e anti-ciclônicos (A - centro de alta pressão) são evidentes (traçado preto). O retângulo (branco) indica a região investigada pelo projeto COROAS - subprojeto HM – meso-escala (Fig.18). *Fonte: Godoi (2005).*

Na sequência são apresentados perfis verticais de velocidades geostróficas usando o método dinâmico clássico (Fig. 24 – painel superior) e modelo numérico seccional "*Princeton Ocean Model*" (POM-xσ ) (Fig. 24 – painel inferior). As seções verticais se referem à radial 7, localizada ao sul da região investigada, entre 25° e 27°S, do cruzeiro oceanográfico HM2 - Inverno/1993 - Projeto COROAS (Fig.18).

Observa-se que há semelhanças das configurações da estrutura de velocidade ao longo da coluna de água. A Corrente do Brasil, fluindo para sul, nos primeiros 500 metros da coluna de água, apresenta velocidades médias da ordem de 0,5 m/s. Por outro lado, a Corrente de Contorno Intermediária transporta Água Intermediária Antártica em direção ao norte. Neste caso, as velocidades médias são relativamente menores, da ordem de 0,1 m/s.

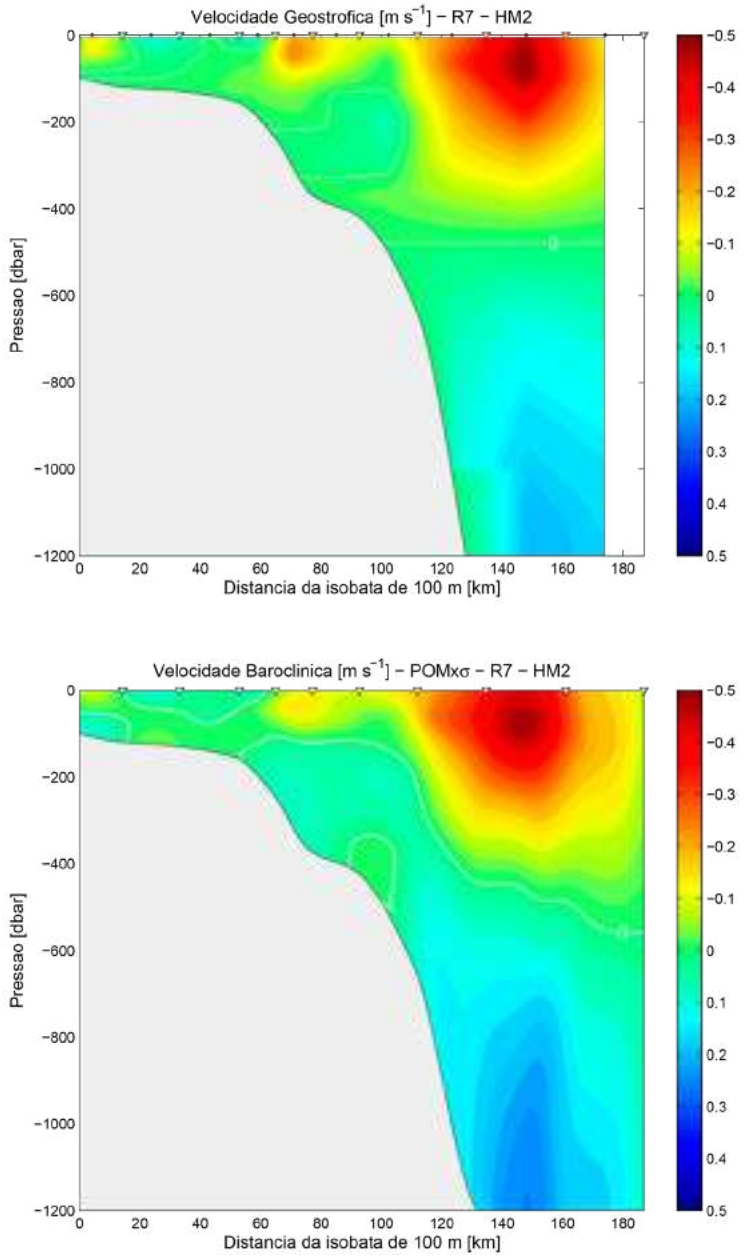



**FIGURA 24. Estrutura vertical de velocidade geostrófica de corrente usando o método dinâmico clássico (painel superior). Estrutura vertical de velocidade baroclínica de corrente modelada usando o código numérico seccional "*Princeton Ocean Model*" (POM xσ) (painel inferior). Radial 7 (25° - 27°S) - Cruzeiro oceanográfico HM2 - Inverno/1993 - Projeto COROAS.** *Fonte: Godoi (2005).*

De forma bem simples, entende-se por velocidade baroclínica quando há "cisalhamento da corrente" ou "cisalhamento geostrófico", isto é, variação vertical da velocidade horizontal ao longo da coluna de água. À medida que aumenta a profundidade, as superfícies isobáricas tornam-se cada vez mais próximas da horizontal. Então, o gradiente horizontal de pressão diminui e o mesmo ocorre com a velocidade geostrófica, até que em alguma profundidade as superfícies isobáricas são horizontais e a corrente geostrófica é nula.

Sintetizando, o leitor teve a oportunidade de experimentar breves comentários e exemplos sobre o enfoque da Oceanografia Física Descritiva e Oceanografia Dinâmica. Destaca-se no estudo da dinâmica oceânica a importância de caracterizar o oceano como fluido geofísico: raso, estratificado e em rotação!

Aplicações práticas foram apresentadas enfocando método de estudo da dinâmica oceânica, o método dinâmico clássico, o qual se utiliza de observações "*in situ*" de propriedades físico/químicas da água do mar. Um ponto de suma relevância consiste em validar os resultados obtidos pelo método dinâmico. No caso, foram utilizados imagem da temperatura da superfície do mar, obtida na faixa do infravermelho termal, e resultados oriundos de simulações numéricas.

A Oceanografia observacional é uma vertente que necessita do uso de embarcações para obter registros de dados "*in situ*". No momento é oportuno apresentar algumas embarcações oceanográficas, utilizadas no ensino e na pesquisa oceanográfica. Exemplificando, o cruzeiro oceanográfico do Projeto COROAS foi realizado a bordo do "Navio Oceanográfico Professor Wladimir Besnard" (Fig. 25) – IOUSP, ou simplesmente "N/Oc. W. Besnard". Este navio, construído em Bergen - Noruega, foi protagonista na história dos estudos marítimos brasileiros e operou de 1967 a 2008.

**FIGURA 25.** **Navio Oceanográfico Prof. Wladimir Besnard - IOUSP.** *Cortesia: Francisco Luiz Vicentini Neto.*

Também é oportuno comentar sobre a atual flotilha ativa do IOUSP, composta pelo "Navio Oceanográfico Alpha Crucis" (Fig. 26), o "Barco Oceanográfico Alpha Delphini" (Fig. 27), e mais dois barcos de pesquisa de pequeno porte: o Albacora e o Veliger II. As duas primeiras embarcações encontram-se atracadas junto ao armazém 8, no Porto de Santos, São Paulo, onde também já esteve atracado, em um tempo passado, o "Navio Oceanográfico Professor Wladimir Besnard". Os barcos de pesquisa Albacora e Veliger II se encontram, respectivamente, nas Bases de Pesquisas e Ensino doutor João de Paiva Carvalho, Cananeia, litoral sul paulista, e Clarimundo de Jesus, Ubatuba, litoral norte paulista. Estas duas últimas embarcações navegam, principalmente, em áreas costeiras e de plataforma interna.

**FIGURA 26.** **Navio Oceanográfico Alpha Crucis – IOUSP.** *Cortesia: Francisco Luiz Vicentini Neto*.

**FIGURA 27.** **Barco Oceanográfico Alpha Delphini – IOUSP.** *Cortesia: José Gustavo Imakawa*.

*"Aos navegantes que singram Mares sem Fim" … em busca de novos horizontes !!!*

## Referências Bibliográficas

GODOI, S. S. D., 2005. Dinâmica Quase-geostrófica do Sistema Corrente do Brasil no Embaiamento de São Paulo (23, 5 ºS - 27 ºS). Tese de Doutorado, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 133 pp.

KUNDU, P.K. 1990. Fluid Mechanics. Academic Press, Inc., 638p.

MIRANDA, L.B. & GODOI, S.S.de (em revisão). Termodinâmica da água do mar e análise de massas de água. Universidade de São Paulo. São Paulo. 465p.

PICKARD, G.L. & EMERY, W.J. 2002. Descriptive Physical Oceanography: An Introduction. Elsevier Science. 5th ed. 320p.

POND, S. & PICKARD, G. L.: Introductory Dynamical Oceanography. Pergamon Press. Oxford, UK. Ed. 329p., 1991.

STRAMMA, L., ENGLAND, M., 1999. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. J. Geophys. Res., 104(C9) 20863-20883.

SOUTELINO, R.G. 2008. A origem da Corrente do Brasil. Dissertação de Mestrado. Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo, São Paulo, 101p.

TALLEY, L.D.; PICKARD, G.L.; EMERY, W.J. & SWIFT, J.H. 2011. Descriptive Physical Oceanography: An Introduction. Elsevier. Sixth Edition. 555p.

THE OPEN UNIVERSITY. 1995. Seawater: its composition, properties and behaviour. Pergamon Press, Second ed., 168p.

THE OPEN UNIVERSITY, 1999. Waves, Tides and Shallow-Water Processes. Second Edition. Butterworth-Heinemann, Oxford, 227p.

THE OPEN UNIVERSITY, 2000. Waves, Tides and Shallow-Water Processes. Second Edition. Butterworth-Heinemann, Oxford, 227p.

THE OPEN UNIVERSITY. 2001. Ocean Circulation. Pergamon Press, Second ed., 286p.

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 9*

# OCEANOGRAFIA FÍSICA COSTEIRA E ESTUARINA

*Joseph Harari & Sueli Susana de Godoi*

REVISÃO: LUIZ BRUNER DE MIRANDA

CITAÇÃO SUGERIDA: HARARI, Joseph; GODOI, Sueli Susana de. Oceanografia física costeira e estuarina. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 9: p. 205-223.

# Oceanografia Física Costeira e Estuarina

*Joseph Harari & Sueli Susana de Godoi*

## 1. Oceanografia costeira

Uma definição básica de zona costeira é "*a interface ou zona de transição onde parte do continente é afetada pela proximidade com o mar e onde parte do oceano é afetada devido a sua proximidade com o continente*" (Sorenson & McCreary, 1990).

Condições oceanográficas em águas costeiras diferem em muitos aspectos das condições no oceano aberto. Em particular, variações espaciais e temporais são maiores. Alguns dos fatores que causam estas diferenças são descargas de rios, correntes de maré e o efeito dos limites costeiros na circulação. A pesca, o despejo de resíduos e problemas de navegação constituem exemplos da importância dos estudos costeiros. Algumas das características da Oceanografia costeira serão a seguir descritas.

- O efeito da costa como uma fronteira limite nas correntes oceânicas é óbvio. Aqui se tem uma das poucas situações em que o homem pode exercer uma significativa influência no oceano; por exemplo, a construção de diques, para a proteção da navegação, pode também redirecionar as correntes. Por outro lado, correntes e ondas na costa podem modificar as praias, com o transporte de areia e sedimentos ou por efeito de erosão.

- Os efeitos das correntes de maré são relativamente maiores na costa. Essas correntes podem causar variações diurnas e semidiurnas no volume d'água, mistura vertical, homogeneização e transporte de calor.

- A radiação solar penetra até o fundo nas colunas d'água de locais rasos, causando elevações de temperatura maiores que no oceano profundo.

- O efeito direto da descarga de rios é de reduzir a salinidade das camadas de superfície, e até mesmo das camadas profundas. Naturalmente, isto ocorre se houver acentuada mistura vertical. Em geral, a descarga de rios tem uma significativa variação sazonal, o que provoca flutuações sazonais da salinidade em águas costeiras muito maiores que no oceano aberto. Como os rios frequentemente carregam sedimentos em suspensão, normalmente águas costeiras são opacas; a deposição destes sedimentos diminui a profundidade, conduzindo ao assoreamento, e em consequência resultam problemas de navegação.

- Em locais de baixa precipitação, a evaporação se torna importante e são então observados valores elevados de salinidade bem como de temperatura, em baías e mares parcialmente fechados.

- Massas de ar continentais, soprando sobre o oceano, afetam suas características, como por exemplo em áreas costeiras nas vizinhanças de imensos desertos, onde ocorrem elevados níveis de evaporação.

- Condições físico-químicas podem afetar fortemente a pesca. Por exemplo, no Atlântico Norte, a elevação da temperatura de valores ligeiramente negativos para + 1°C proporciona um acentuado aumento na pesca do bacalhau.

- Medições oceanográficas em águas costeiras devem levar em conta a expressiva variação espacial e temporal das propriedades. Por exemplo, enquanto em mar aberto a distância entre estações oceanográficas é entre 20 e 100 km, medições costeiras devem ser efetuadas a intervalos de 5 a 10 km, ou menos. Além disso, as intensas variações costeiras diárias, sazonais e anuais das propriedades requerem medições nas respectivas escalas temporais. Por outro lado, eventualmente, alguns estudos no oceano profundo requerem pequeno espaçamento entre as estações, como por exemplo no caso de vórtices associados às correntes de contorno Oeste.

## 2. Estuários

Dentre os sistemas costeiros, os estuários têm interesse especial por constituírem polos de atração de atividades econômicas, portuárias, de lazer, entre outros (Miranda *et al.*, 2002). Entretanto, são notórios os problemas advindos das atividades exercidas pelo homem nesses ambientes, especialmente quanto a seu equilíbrio ambiental e ecológico (Silva, 2000). Inicialmente, será apresentada uma breve discussão sobre a definição de estuário.

O termo estuário tem sido tradicionalmente usado para denotar a parte mais baixa de um rio, onde a maré e o fluxo do rio interagem. Para os oceanógrafos, uma definição mais precisa é necessária, de modo a definir o conjunto de fenômenos associados ao encontro de águas oceânicas com águas interiores de características diferentes. Alguns cientistas definem o estuário simplesmente como a região em que a água oceânica é diluída por descarga de rios vindos do continente; mas esta definição incluiria extensas regiões costeiras, com fronteiras continentais muito diversas.

Uma definição de estuário é colocada por Cameron e Pritchard (1963): "*Um estuário é um corpo d'água costeiro semifechado, tendo uma conexão livre com o mar aberto, e no qual a água do mar é diluída com água não salina provinda do continente*". Outra definição de estuário, que enfatiza a presença de um rio afluente e o efeito da maré, é dada por Fairbridge (1980): "*Um estuário é uma reentrância de mar em um vale fluvial, estendendo-se até o limite da propagação da maré, e divisível em três setores: o baixo estuário, ou zona marítima, com ligação direta com o mar; o estuário médio, onde ocorre a mistura de água doce e salina; e o estuário superior, ou fluvio-marítimo, com água doce, mas sujeito à influência da maré*" (Fig. 1). O extremo fechado de um estuário é chamado "cabeceira" e o extremo marítimo é chamado "barra" ou "boca".

**FIGURA 1. Esquema de um estuário e de seus setores.** *Ilustração: Leandro Coelho, baseado em Fairbridge, 1980.*

A água do rio que escoa pelo estuário parcialmente se mistura com a água salina do mar e eventualmente flui na direção do mar aberto, na camada superior. Por continuidade um correspondente fluxo de água do mar escoa abaixo da superfície, para o interior do estuário; exemplo deste padrão de circulação é apresentado na Figura 2, a partir dos cálculos das correntes médias mensais na Baía de Santos, através de modelo numérico hidrodinâmico (Harari *et al.*, 2009). Os fluxos de entrada e saída são dinamicamente associados. Enquanto o aumento do fluxo do rio tende a diminuir a salinidade da água do estuário, simultaneamente há um aumento do fluxo vindo do mar, o que, por sua vez, eleva a salinidade. Portanto, em um estuário, se observa um equilíbrio dinâmico, quase-estacionário, entre os aportes de água fluvial e de água salina, cujas interações definem as características do estuário.

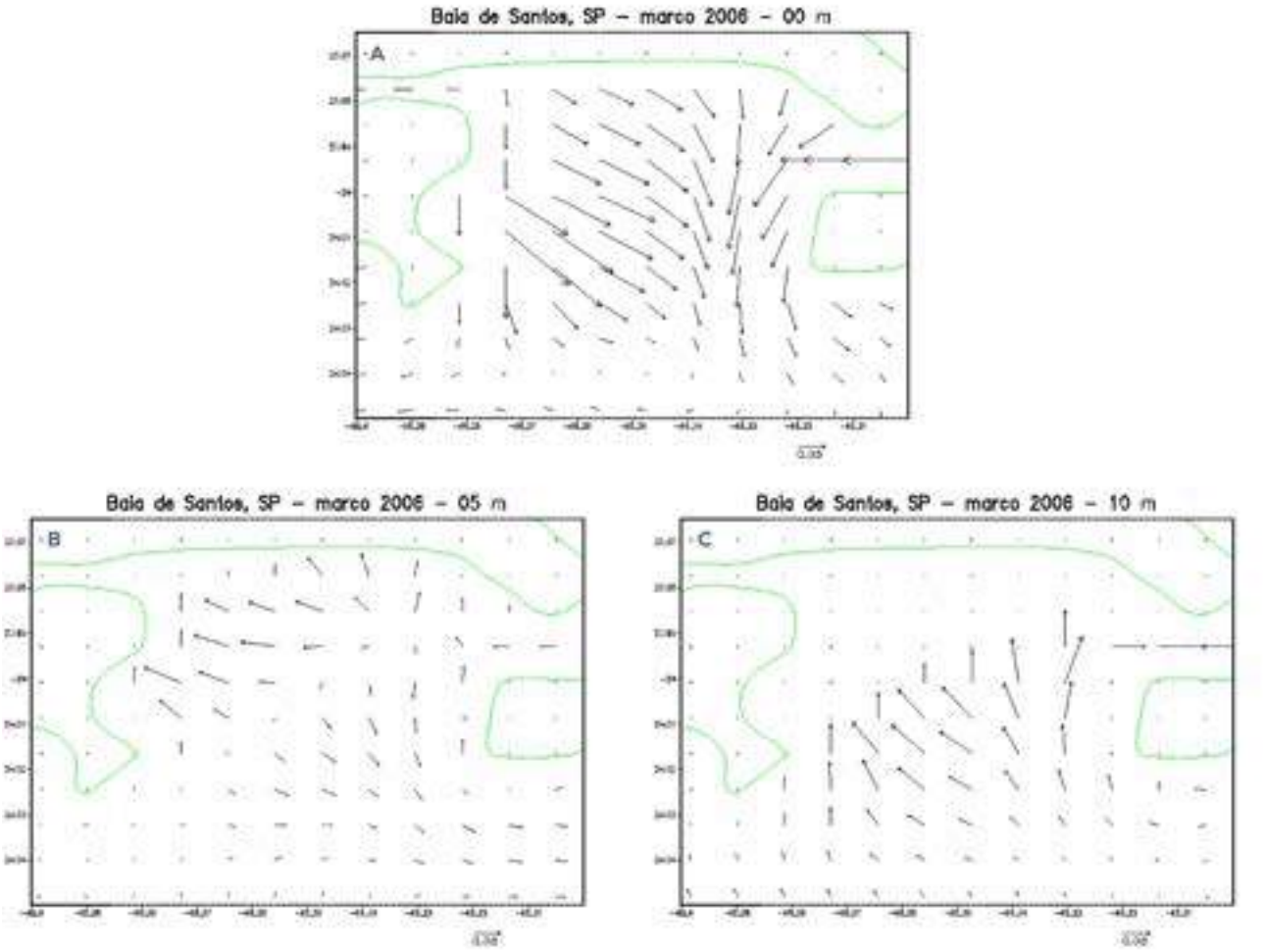



**FIGURA 2.** Mapa da circulação na Baía de Santos – Litoral Sul Paulista – com as correntes médias mensais, em março de 2006, calculadas por modelo numérico hidrodinâmico: A) superfície (painel superior) – onde predomina a corrente vazante (na direção do mar aberto); B) a 05 m (inferior esquerdo); e C) a 10 m de profundidade (inferior direito) – onde predomina corrente enchente (em direção ao interior do estuário). Escala dos vetores em m/s. *Fonte: Harari et al., 2009.*

Como as marés em geral afetam bastante a circulação e a mistura de águas nos estuários, é importante considerar variações significativas que ocorrem nos períodos de maré de sizígia (na lua nova ou cheia, quando ocorrem as maiores amplitudes de maré) e os períodos de maré de quadratura (na lua cheia ou minguante, quando ocorrem as menores amplitudes de maré). Na maré de sizígia se tem as maiores preamares e as menores baixa-mares, enquanto na maré de quadratura se tem as menores premares e as maiores baixa-mares.

Os processos que ocorrem nos estuários, como por exemplo a distribuição da salinidade, são tipicamente advectivos, associados aos transportes pelas correntes, ou difusivos, associados a efeitos de transferência moleculares ou turbilhonares. Alguns estuários apresentam uma camada intermediária, caracterizada por acentuada variação de salinidade com a profundidade, chamada haloclina.

## 3. Classificação de estuários

Os estuários podem ser classificados de várias maneiras. Em termos de geomorfologia (Pritchard, 1967; Fairbridge, 1980), podem ser divididos em:

**Estuários associados a planícies costeiras**: são geralmente rasos e com topografia de fundo suave.

**Fiordes (do norueguês, *Fjords*)**: são caracterizados por águas relativamente profundas e encostas íngremes. Estes ocorrem principalmente em regiões onde a glaciação é o efeito mais importante na forma do continente.

**Estuários associados a barras**: são constituídos por um canal estreito entre o continente e uma barra, construída pela sedimentação provocada por ondas.

Quanto à qualidade ambiental, os estuários podem ser analisados de acordo com vários indicadores (Silva, 1993):

**Qualidade estética:** relacionada à presença de resíduos visíveis, como óleos ou espumas, podendo ser boa, aceitável ou má.

**Qualidade sanitária**: relacionada à presença de organismos patogênicos, em função das concentrações de coliformes fecais e totais, podendo ser boa, aceitável ou má.

**Estado trófico**: depende do excesso de concentrações de nitrogênio, fósforo e clorofila $\alpha$, podendo ser oligotróficos, caracterizado por baixas concentrações, mesotróficos, com concentrações médias, ou eutróficos, com altas concentrações.

**Poluição tóxica**: relacionada com a presença de substâncias nocivas aos organismos aquáticos.

Os estuários também podem ser classificados em função do efeito dominante no controle da circulação ou mistura:

**Controlados por rios:** estuários nos quais a descarga fluvial é preponderante nos padrões de circulação e mistura.

**Controlados pela maré**: estuários onde as correntes de maré determinam a circulação e a mistura de águas.

**Controlados pelo vento**: estuários normalmente restritos a regiões de pequena amplitude de maré e onde a circulação e a mistura induzidas pelo vento são preponderantes.

Outra classificação dos estuários é em função de sua salinidade, podendo ser (Pritchard, 1967):

**Positivos:** se a evaporação for menor que a precipitação e as descargas fluviais.

**Negativos:** se a evaporação exceder a precipitação e as descargas dos rios.

**Neutros:** quando há equilíbrio entre a evaporação com a precipitação e as descargas fluviais.

Os estuários são também classificados em função do grau de estratificação (Bowden, 1980 - Fig. 3):

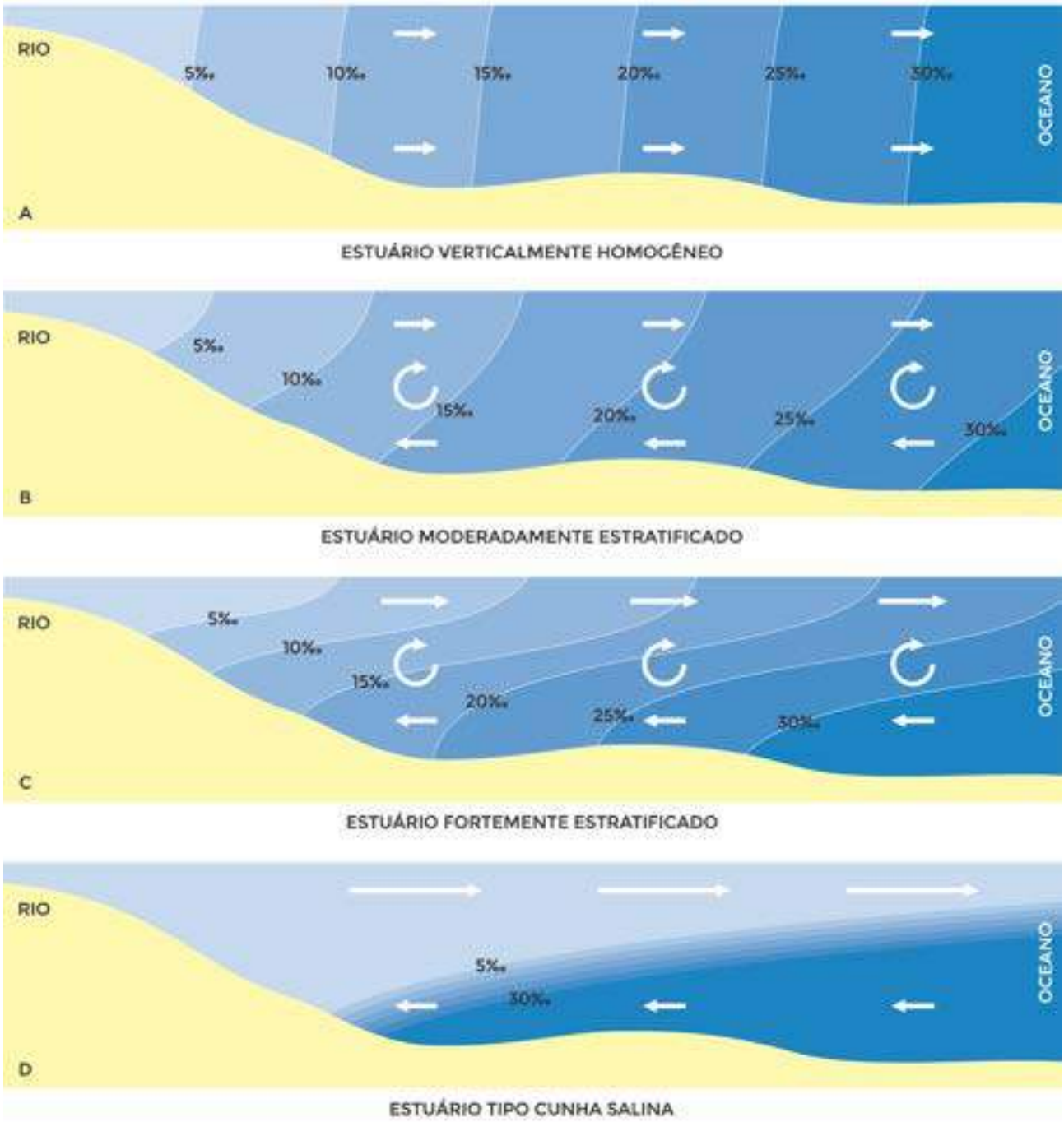



**FIGURA 3.** Estuários classificados quanto à sua estratificação: A) verticalmente homogêneos; B) moderadamente estratificados; C) fortemente estratificados; e D) do tipo cunha salina. Os gradientes de cores indicam as isohalinas (linhas de mesma salinidade) e as setas indicam a direção e intensidade das correntes na superfície e no fundo. *Ilustração: Leandro Coelho*.

**Estuários verticalmente homogêneos (A):** nestes, a água é misturada verticalmente e os estuários são homogêneos desde a superfície até o fundo, em cada local particular do estuário. A salinidade aumenta ao longo do estuário, da cabeceira à boca. As isohalinas da Figura 3 mostram a homogeneidade da água e as setas indicam a direção do fluxo líquido, o qual é na direção do mar em todas as profundidades. Os estuários verticalmente homogêneos normalmente são rasos e controlados pela maré.

**Estuários moderadamente estratificados (B):** nestes, a salinidade aumenta mais próximo ao mar, mas a água apresenta duas camadas; a camada de superfície é menos salina que a do fundo, havendo mistura entre elas (indicada pelas setas circulares na Figura 3). Neste tipo de estuário se tem um fluxo líquido de saída na superfície e um fluxo líquido de entrada no fundo. Estes estuários são normalmente rasos e controlados pelos rios.

**Estuários fortemente estratificados (C)**: nestes, na camada de superfície, a salinidade aumenta de quase zero, no rio, a valores próximos aos encontrados no oceano na extremidade aberta; entretanto, na camada de fundo, a salinidade é praticamente uniforme, da cabeceira para a boca. Novamente, o fluxo líquido é de saída na superfície e de entrada nas camadas de fundo. Nestes estuários há uma nítida haloclina, a camada na qual a salinidade aumenta significativamente com a profundidade. Nesta camada, os gradientes verticais de salinidade podem chegar a 20 ‰/m. Tal situação ocorre principalmente no verão, onde há períodos de intensa descarga de rios. A mistura vertical apresenta predominância de movimento ascendente das águas salinas. Estes estuários são do tipo fiordes, e são controlados por rios.

**Estuários do tipo cunha salina (D)**: nestes, a secção longitudinal de salinidade é característica: a água salina do mar se introduz como uma cunha abaixo da água do rio. Esta situação normalmente ocorre em rios com grande transporte de volume d'água. Note-se que a correspondente secção longitudinal apresentada na Figura 3 é exagerada na direção vertical; na verdade, a cunha salina é realmente bastante fina, de modo que as isohalinas são na realidade quase horizontais. A estrutura salina dos estuários do tipo cunha salina é similar à dos fortemente estratificados, com a distinção que nos de cunha salina não há gradientes de salinidade na superfície, devido ao imenso volume d'água dos rios.

Outra forma de estimar a estratificação de um estuário se encontra na razão entre ***P*** (o Prisma de maré, ou seja, o volume de água do mar que entra no estuário durante a maré enchente) e ***R*** (o volume de água doce que alcança o estuário num período de maré); a razão ***P/R*** representa a importância relativa entre as forçantes de maré e a descarga fluvial do estuário (Miranda *et al.*, 2002); segundo Dyer (1997), um estuário é classificado como altamente estratificado quando esta razão é maior que 1.

Uma classificação clássica de estuários é baseada no diagrama de estratificação – circulação de Hansen & Ratray (Hansen & Ratray, 1966; Dyer, 1997; Ibañez *et al.*, 1997). Este diagrama se baseia em dois parâmetros adimensionais, calculados a partir de dados de correntes e de salinidade: o parâmetro de estratificação (***pe***) e o de circulação (***pc***):

$$pe = \frac{s_f - s_s}{s_m}$$

$$pc = {}^{u_s}/_{u_r}$$

Onde $S_f$ é a salinidade no fundo, $S_s$ é a salinidade na superfície e $S_m$ é a salinidade média na coluna de água; $u_s$ é a corrente na superfície e $u_r$ é a vazão fluvial. A partir desses cálculos, estes parâmetros são representados no diagrama da Figura 4.

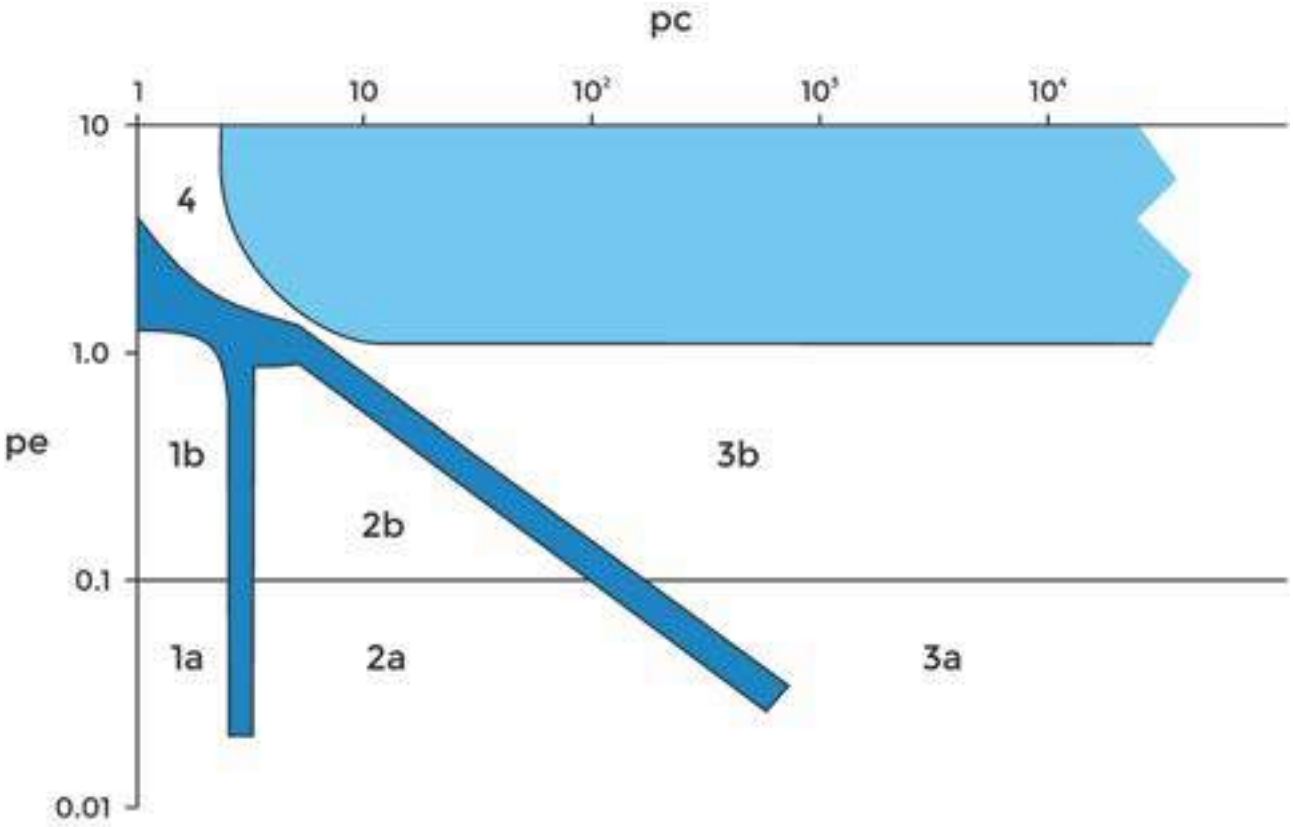



**FIGURA 4.** Diagrama de Hansen - Ratray (1966) para a classificação de estuários: pe representa o parâmetro de estratificação; pc representa o parâmetro de circulação; os segmentos indicados no esquema delimitam os tipos de estuários em: **homogêneo** (1a - homogêneo, 1b - fraca estratificação vertical); **estratificado** (2a - fracamente estratificado, 2b - fortemente estratificado); **duas camadas** (3a - fracamente estratificado, 3 b - fortemente estratificado); **de cunha salina** (4).

Com este diagrama, foi estabelecido um critério analítico e quantitativo para a classificação de estuários nos seguintes tipos:

**Tipo 1**: estuário homogêneo, isto é, bem misturado: há fluxo para jusante e transporte de sal para montante, apenas por difusão. O tipo 1a é homogêneo e o tipo 1b tem fraca estratificação vertical.

**Tipo 2:** estuário estratificado, mas parcialmente misturado: há inversão da corrente na coluna de água. A advecção e a difusão contribuem para o fluxo salino para montante; o tipo 2a é fracamente estratificado e o tipo 2b é fortemente estratificado.

**Tipo 3:** caracterizado por fluxo em duas camadas e a transferência de sal para montante é principalmente advectiva; o tipo 3a é fracamente estratificado e o tipo 3b é fortemente estratificado.

**Tipo 4:** estuário de cunha salina: a haloclina e o fluxo de água doce ocorrem sobre uma superfície quase estacionária.

As classificações de estuários acima apresentadas são muito úteis para a sua caracterização e para o desenvolvimento de pesquisas, considerando que estas regiões, dentre todos os compartimentos dos oceanos, são as que apresentam as maiores interações entre fenômenos físicos, químicos, biológicos, geológicos e de atividades humanas. Por conseguinte, são as regiões em que mais atuam equipes interdisciplinares, com a colaboração de especialistas de várias áreas do conhecimento.

## 4. Exemplos de estuários

A seguir, serão apresentados dois estuários de grande importância no Estado de São Paulo, com algumas de suas características físicas e hidrodinâmicas: o Sistema Estuarino – Lagunar de Cananéia – Iguape e o Estuário de Santos – São Vicente - Bertioga.

### 4.1 O Sistema Estuarino-Lagunar de Cananéia-Iguape

O sistema estuarino - lagunar de Cananéia - Iguape está localizado localizado no litoral sul do Estado de São Paulo, entre 24° 36' e 25° 06'S e 47° 15' e 48° 06' W (Fig. 5). Este sistema possui uma configuração deveras complexa, formado por quatro ilhas: Cardoso, Cananéia, Comprida e Iguape, as quais estão separadas entre si por sistemas de canais lagunares influenciados por rios e marés. Esses canais se comunicam com o oceano através de desembocaduras denominadas Cananéia, Icapara e Ribeira; devido ao rompimento do canal arenoso ao sul da Ilha do Cardoso, foi formada uma nova barra, denominada de Barra Nova de Cananéia, a qual tem conexão direta com as águas interiores do canal de Ararapira; a antiga barra de Ararapira agora encontra-se assoreada, fechando a comunicação com águas oceânicas ao sul deste canal.

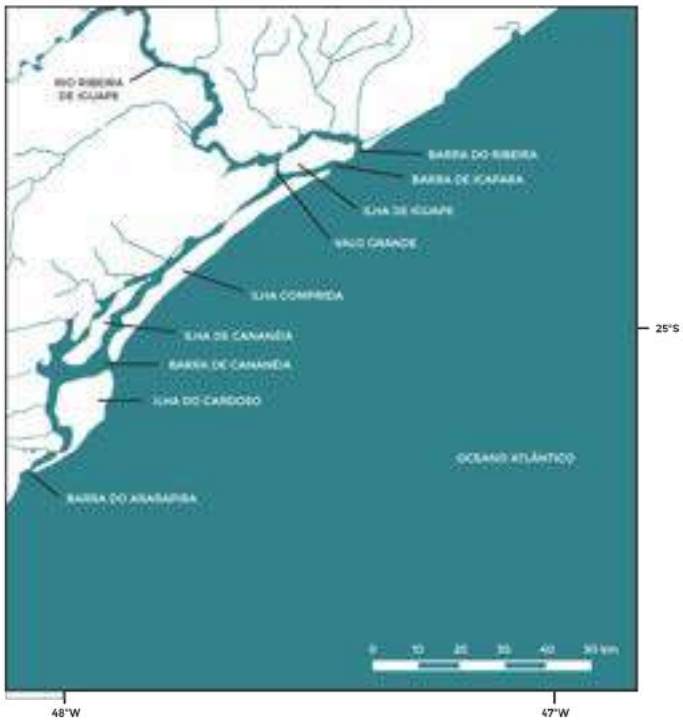



FIGURA 5. Complexo estuarino – lagunar de Cananéia-Iguape (de acordo com Bonetti & Miranda, 1997), mostrando: as Ilhas Cardoso, Cananéia, Comprida e Iguape; as Barras de Ararapira, Cananéia, Icapara e Ribeira; a Barragem do Valo Grande e o Rio Ribeira de Iguape.

O aporte de água doce no sistema estuarino-lagunar ocorre por meio da bacia de drenagem formada pelos rios Ribeira do Iguape, Taquari, Mandira, das Minas, Itapitangui e outros de menor expressão. O rio Ribeira do Iguape é a principal fonte de água doce, fluindo ao longo do canal artificial do Valo Grande, localizado no Município de Iguape.

O canal foi construído no século XIX, em 1855, por mão de obra escrava, e apresentava, originalmente, 4 m de largura e 2 m de profundidade, tendo a finalidade de facilitar o transporte de arroz produzido na cidade de Iguape. Devido à força das águas do rio Ribeira de Iguape, atualmente a largura do canal chega a quase 300 metros, com sete metros de profundidade.

Considerando tais aspectos, tem-se observado acentuado desequilíbrio ecológico no Sistema Estuarino-Lagunar Cananéia-Iguape. No decorrer do tempo esse sistema tem perdido suas características naturais, o que tem diminuído acentuadamente a pesca na região, principalmente em função de mudanças físico-químicas das águas interiores do sistema.

A seguir, serão apresentados os resultados de um modelo numérico hidrodinâmico do Sistema Estuarino de Cananéia – Iguape, incluindo a área costeira adjacente (Carlos & Harari, 2018); a batimetria considerada na modelagem é apresentada na Figura 6, com dois pontos geográficos assinalados, nos quais foram extraídas séries temporais de resultados do modelo, e um *zoom* da região do sistema estuarino-lagunar (com a localização do Mar Pequeno).

Os resultados de modelagem a serem apresentados são referentes ao mês de novembro de 2019; neste mês, quatro frentes frias passaram pela costa do Estado de São Paulo, nos dias 11, 15, 24 e 27.

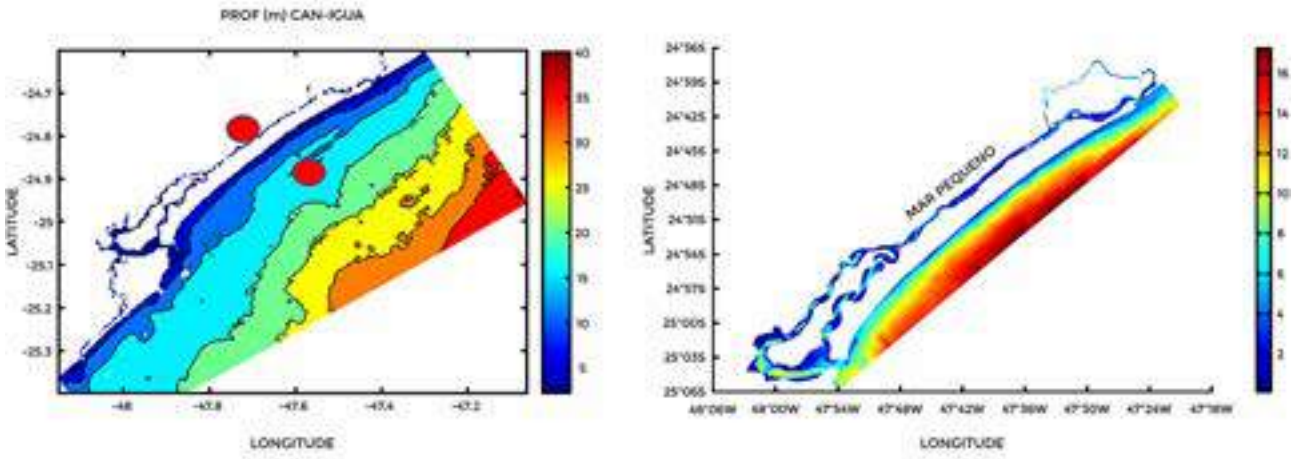



**FIGURA 6.** Batimetria da região costeira de Cananéia – Iguape (em metros), com dois pontos assinalados (círculos em vermelho, a 47,68°W 24,8°S e 47,6°W 24,9°S) nos quais foram analisadas as variações temporais de propriedades, e um *zoom* na região estuarino – lagunar, com a localização do Mar Pequeno.

A Figura 7 mostra mapas de temperatura, salinidade e correntes (na superfície) em instante específico de interesse, às 22h do dia 14 de novembro de 2019; a distribuição de temperatura mostra valores mais elevados no interior do estuário (devido à pequena profundidade, o que proporciona a absorção de calor numa coluna de água reduzida, e portanto maior aquecimento).

A salinidade tem valores bem menores no interior do estuário (devido ao aporte de água doce, principalmente pelo Rio Ribeira de Iguape) e as velocidades são muito intensas nas desembocaduras de Cananéia e Icapara (por efeito de continuidade).

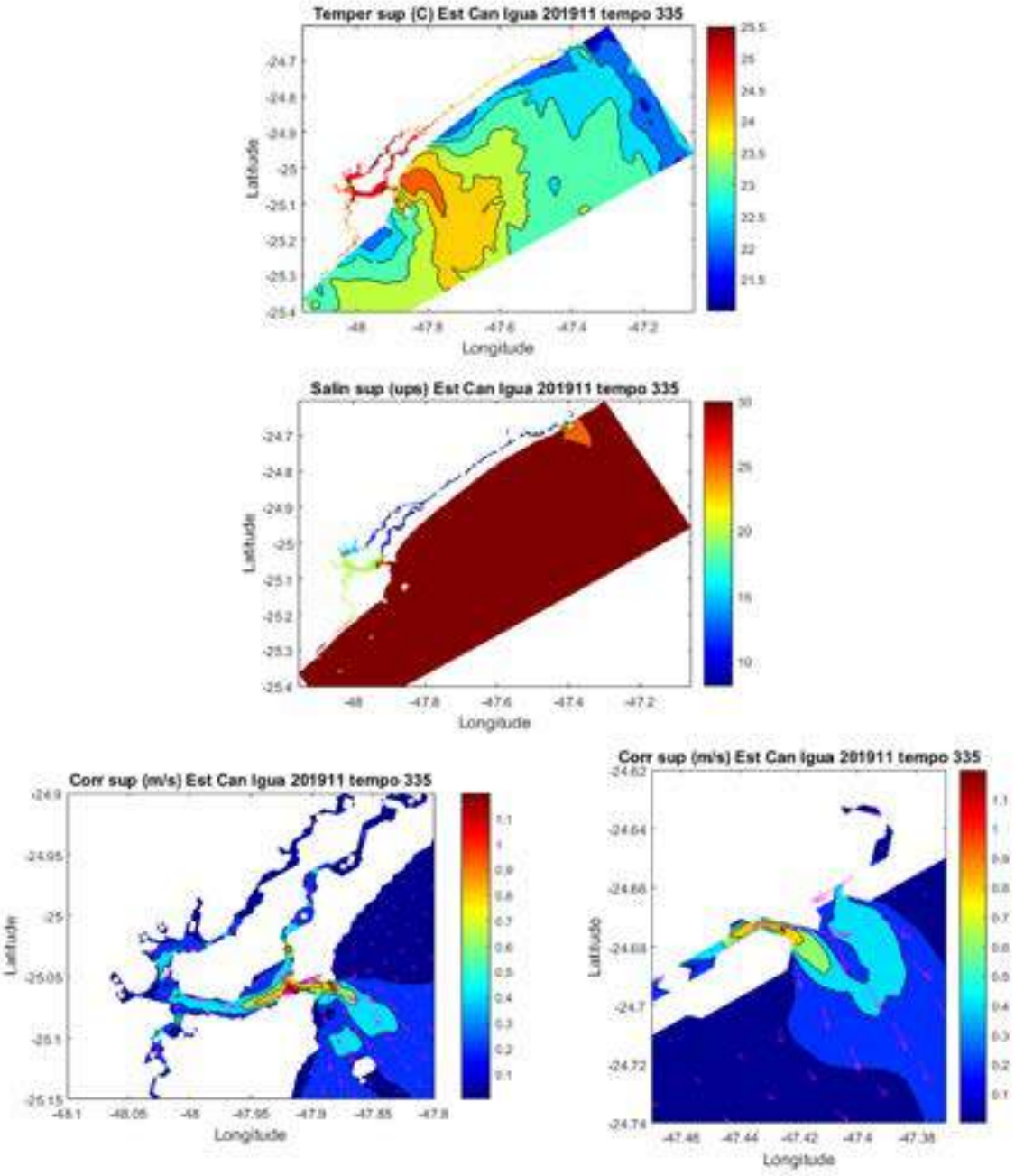



**FIGURA 7.** Mapas de temperatura (°C, acima), salinidade (ups, no meio) e correntes (m/s, abaixo), na superfície, no Sistema Estuarino - Lagunar de Cananéia - Iguape e região costeira adjacente, às 22h do dia 14 de novembro de 2019. Mapas de correntes com *zoom* nas Barras de Cananéia e Icapara.

A figura 8 mostra a evolução temporal das propriedades ao longo do tempo, no mês de novembro de 2019, nos dois pontos selecionados – um no interior do estuário (47,68°W 24,8°S) e outro na região costeira frente à Ilha Comprida (47,6°W 24,9°S). Esta figura demonstra que as séries temporais de nível do mar são similares; isto se deve ao fato das ondas de maré penetrarem no sistema estuarino pelas duas barras (Cananéia e Icapara); entretanto, níveis do mar abaixo de zero são mais intensos ao largo, o que demonstra uma retenção de águas no estuário durante as vazantes; novamente se observa temperaturas um pouco mais altas no interior do estuário do que na região costeira, mas o efeito de frentes frias e a correspondente queda de temperatura a partir do dia 10 são notáveis nos dois pontos; finalmente, há enorme diferença de salinidade entre os pontos analisados, evidentemente devido à influência dos rios no sistema estuarino – lagunar.

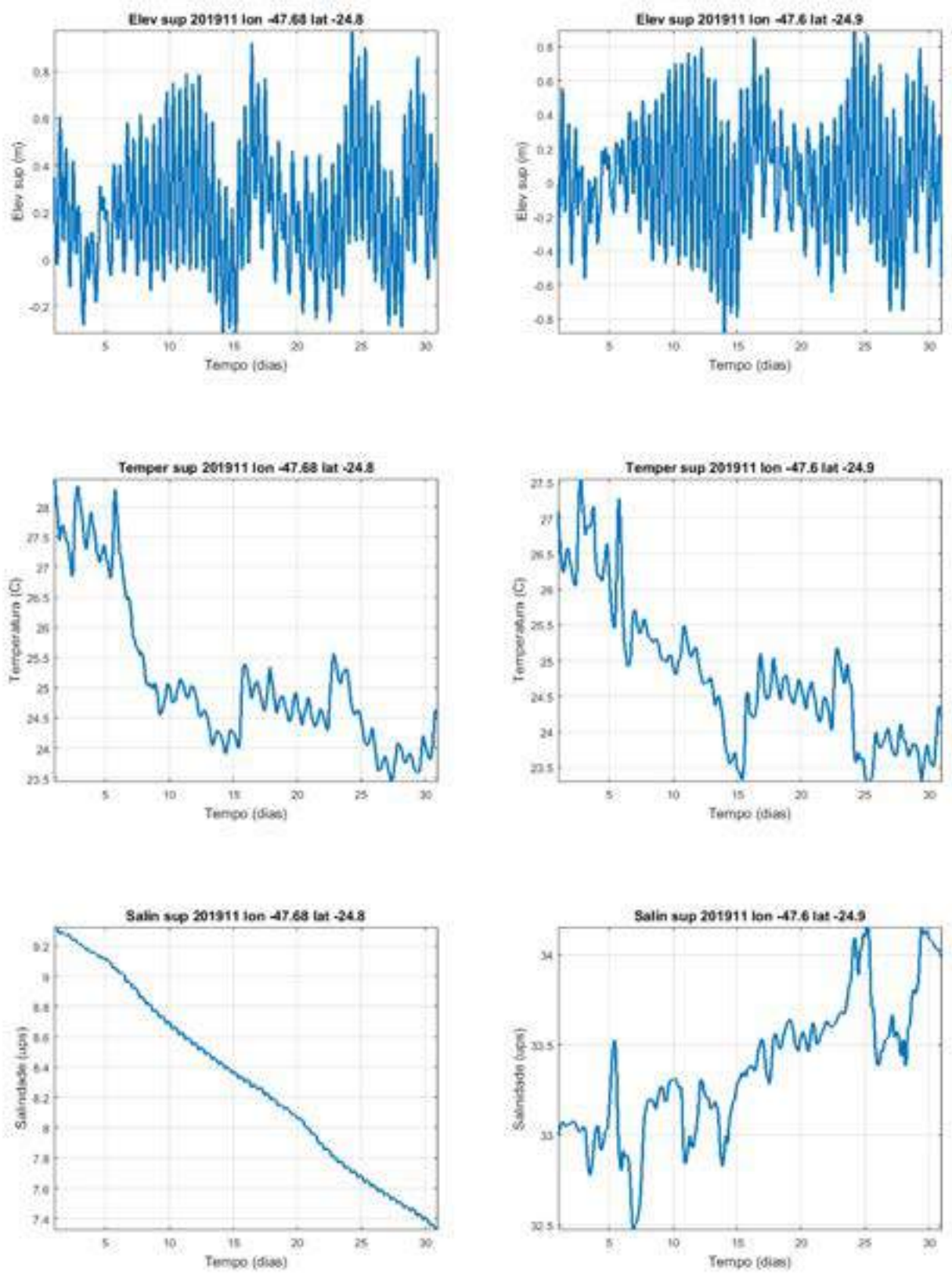



**FIGURA 8.** Evolução temporal das propriedades ao longo do tempo, no mês de novembro de 2019, nos dois pontos selecionados – no interior do estuário (47,68°W 24,8°S, à esquerda) e na região costeira em frente à Ilha Comprida (47,6°W 24,9°S, à direita): nível do mar (m, acima), temperatura (°C, no meio) e salinidade (ups, abaixo).

Diversos estudos sintetizaram o comportamento do sistema lagunar estuarino, baseado em campanhas de medições e em resultados de modelos numéricos hidrodinâmicos, como o acima descrito. Este estuário foi classificado, no período em que o Valo Grande estava fechado, como um canal raso, fracamente estratificado, forçado por marés semi-diurnas, com amplitudes médias de 1,2 m na sizígia e 0,25 m na quadratura (Miyao, 1977; Mesquita & Harari, 1983; Miyao & Harari, 1989). Depois da abertura do canal e o consequente aumento da introdução de água doce, o norte do sistema estuarino passou a ser caracterizado como parcialmente misturado e altamente estratificado (Miranda & Castro, 1996; Bérgamo, 2000; Bernardes & Miranda 2001).

A circulação no sistema estuarino-lagunar Cananéia-Iguape é governada, principalmente, pela ação das ondas de maré. Tais ondas adentram ao sistema pelas Barras de Cananéia, ao sul, e Icapara, ao norte (Kato, 1966). No caso de Cananéia foi indicada uma maior entrada, devido à maior profundidade da Barra; em Icapara há uma entrada da maré menos acentuada, devido ao assoreamento da região (Miyao, 1977). Evidentemente, há influência da distribuição de água doce fluindo dos diversos rios previamente mencionados (Bernardes & Miranda 2001). As correntes na região estuarina apresentam assimetria entre as camadas de superfície e de fundo, sendo que as correntes são mais intensas na superfície durante a maré vazante, e no fundo durante a maré enchente (Miyao, 1977; Miranda & Castro, 1996). Durante a maré vazante, com a saída de águas interiores menos densas do sistema, nas camadas superiores, tem-se observado intensas velocidades de correntes de maré, da ordem de 1 a 1,5 m/s.

## 4.2 O sistema estuarino de Santos – São Vicente – Bertioga

O sistema estuarino de Santos - São Vicente - Bertioga se encontra na Baixada Santista, entre 23° 48'S e 24° 06'S e entre 46° 30'W e 46°W, sendo formado pelas Ilhas de São Vicente e Santo Amaro, e contendo a Baía de Santos e os Canais de São Vicente, de Piaçaguera do Porto de Santos e de Bertioga; seus principais rios são Cubatão, Perequê, Mogi-Piaçaguera, Quilombo e Itapanhaú (Fig. 9). No Canal de Bertioga se encontra a foz do rio Itapanhaú, que constitui a principal bacia hidrográfica da área e a principal fonte potencial de sedimentos, cuja descarga ocorre a apenas 2,5 km da desembocadura do Canal; este rio possui 25 km de extensão e largura média de 460 m, com profundidades que variam entre 3 a 15 metros.

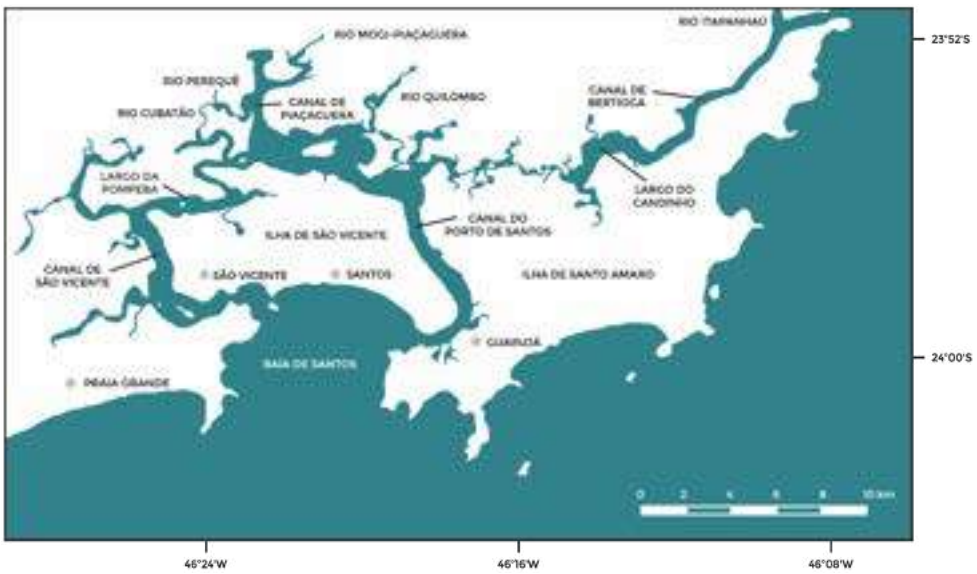



**FIGURA 9.** Estuário de Santos – São Vicente - Bertioga, mostrando: as Ilhas de São Vicente e Santo Amaro; a Baía de Santos e os Canais de São Vicente, do Porto de Santos, de Piaçaguera e de Bertioga; e os principais rios: Cubatão, Perequê, Mogi-Piaçaguera, Quilombo e Itapanhaú.

Este sistema estuarino constitui, portanto, uma zona de transição entre as águas salinas do Oceano Atlântico e as águas provindas dos rios acima citados, formando um ambiente bastante dinâmico e complexo. Esta região se destaca pela grande ocupação e desenvolvimento econômico, em função do polo industrial de Cubatão, do turismo de veraneio e, principalmente, das atividades portuárias – sendo o Porto de Santos o maior da América Latina.

Também para o Estuário de Santos – São Vicente – Bertioga serão apresentados inicialmente os resultados de um modelo numérico hidrodinâmico que inclui a área costeira adjacente (Harari *et al.*, 2002; Harari *et al.*, 2013).

A batimetria considerada na modelagem é apresentada na Figura 10, com dois pontos geográficos assinalados, nos quais foram extraídas séries temporais de resultados do modelo. Novamente os resultados de modelagem a serem apresentados são referentes ao mês de novembro de 2019.

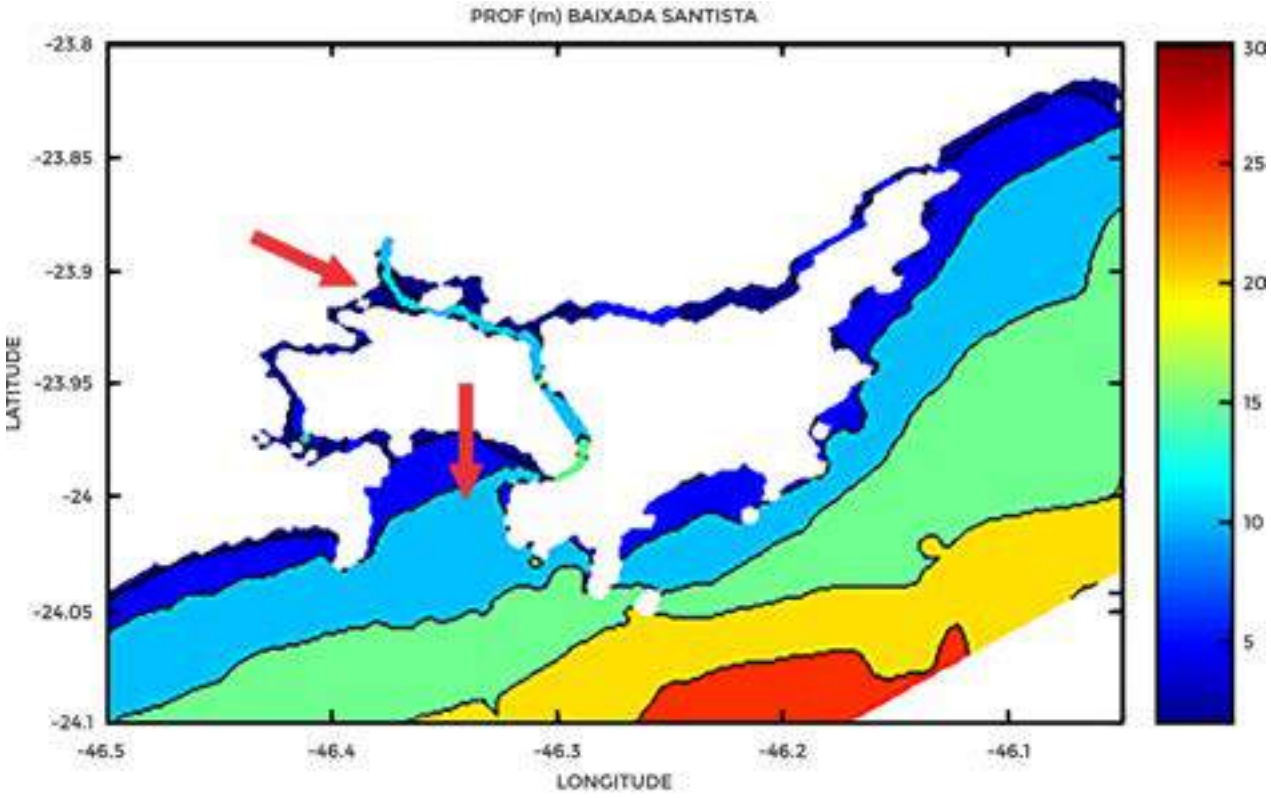



**FIGURA 10.** Batimetria do Estuário de Santos – São Vicente – Bertioga e região costeira adjacente (em metros), com dois pontos assinalados (setas em vermelho, em 46,355°W 23,92°S e 46,35°W 24°S) nos quais foram analisadas as variações temporais de propriedades.

A Figura 11 mostra mapas de temperatura, salinidade e correntes (na superfície), às 22h do dia 14 de novembro de 2019, nos quais há várias similaridades nas análises realizadas para a região de Cananéia – Iguape. A distribuição de temperatura na região da Baixada Santista mostra valores mais elevados no interior do estuário (com a absorção de calor numa coluna de água reduzida, e portanto maior aquecimento); a salinidade tem valores bem menores no interior do estuário (devido ao aporte de água doce); e as velocidades são muito intensas nas entradas dos Canais (do Porto de Santos e de São Vicente, por efeito de continuidade).

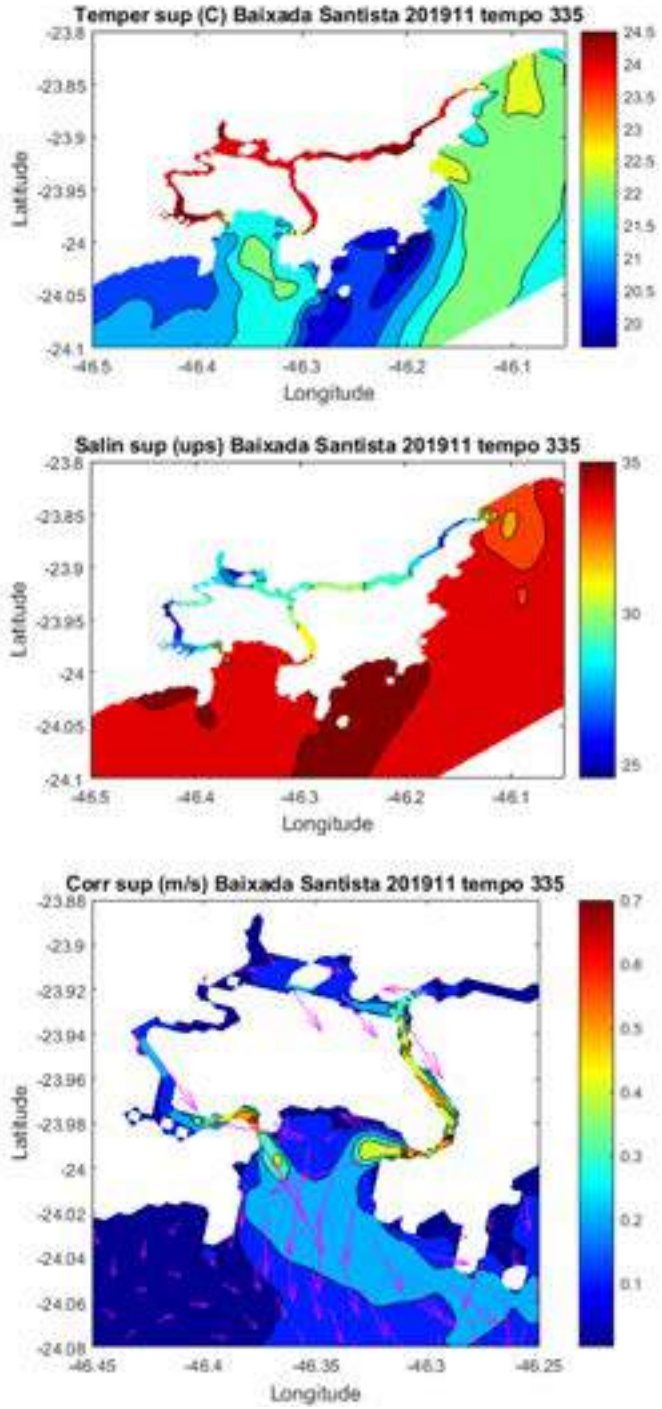



**FIGURA 11.** Mapas de temperatura (°C, acima), salinidade (ups, no meio) e correntes (m/s, abaixo), na superfície, no Estuário de Santos - São Vicente - Bertioga e região costeira adjacente, às 22h do dia 14 de novembro de 2019. Mapas de correntes com zoom nas entradas dos Canais do Porto e de São Vicente.

A Figura 12 mostra a evolução temporal das propriedades ao longo do tempo, no mês de novembro de 2019, nos dois pontos selecionados – um no interior do estuário, no Canal de Piaçaguera (46,355°W 23,92°S) e outro na Baía de Santos (46,35°W 24°S). Esta figura demonstra que as séries temporais de nível do mar são similares; isto se deve ao fato das ondas de maré penetrarem no sistema estuarino pelos Canais do Porto de Santos e de São Vicente; se observa temperaturas um pouco mais altas no interior do estuário do que na região costeira, e o efeito de frentes frias com a correspondente queda de temperatura a partir do dia 10 são evidentes nos dois pontos; finalmente, a salinidade na Baía é significativamente maior que no canal interior.

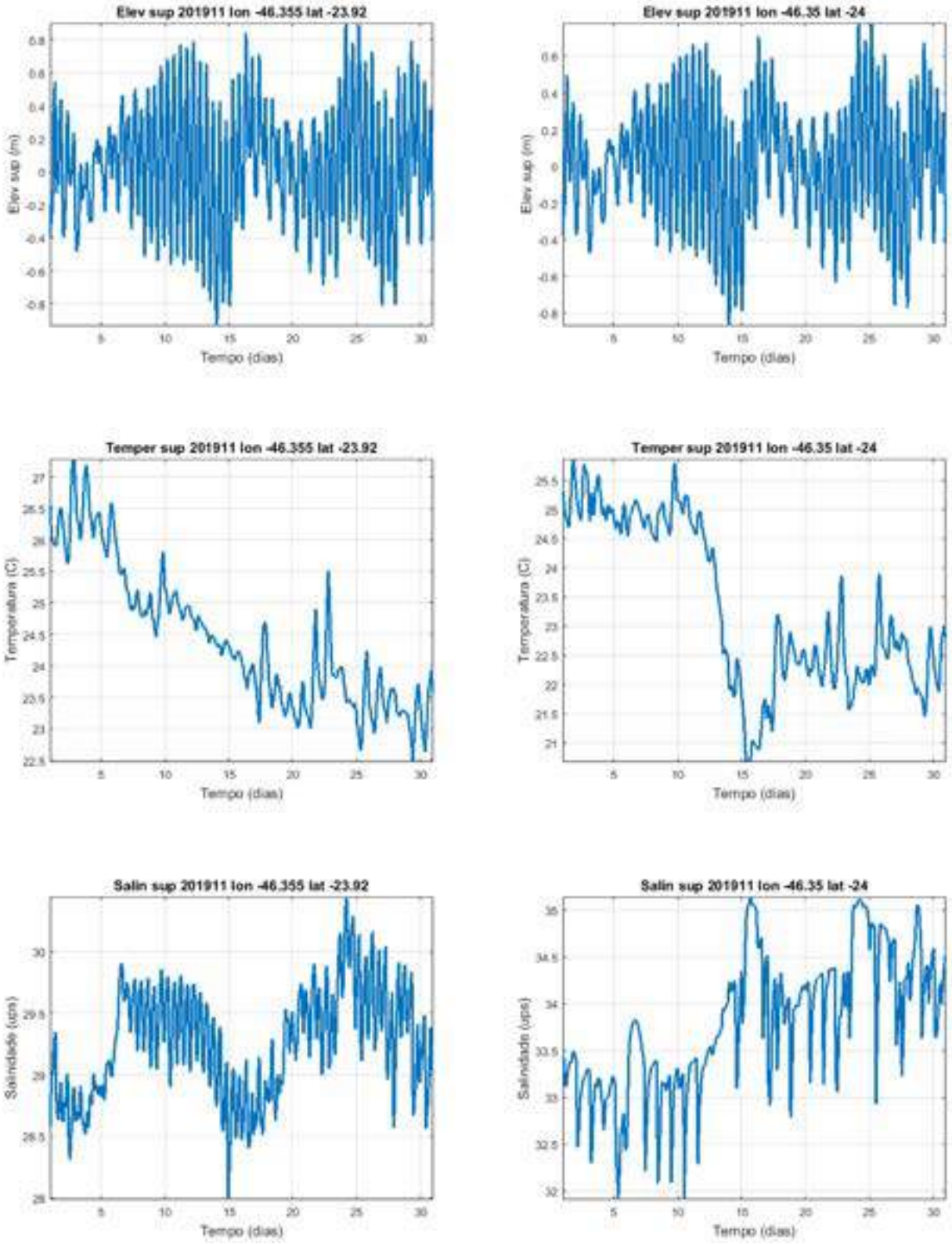



**FIGURA 12.** Evolução temporal das propriedades ao longo do tempo, no mês de novembro de 2019, nos dois pontos selecionados - no Canal de Piaçaguera (46,355°W 23,92°S, à esquerda) e na Baía de Santos (46,35°W 24°S, à direita): nível do mar (m, acima), temperatura (°C, no meio) e salinidade (ups, abaixo).

Também para o Estuário de Santos – São Vicente – Bertioga diversos estudos sintetizaram seu comportamento, através de campanhas de medições e resultados de modelos numéricos hidrodinâmicos. O processo básico que ocorre nesta circulação estuarina é a mistura de água doce oriunda da drenagem

continental com a água salgada do oceano; e os fatores essenciais que controlam esse processo são as marés e as vazões fluviais, considerando as variações de densidade causadas pela mistura entre as águas fluviais e as advindas do oceano adjacente.

A onda de maré é semidiurna com desigualdades diurnas, e se propaga simultaneamente pelos canais de Santos e São Vicente e pelo Canal de Bertioga, com amplitudes médias que variam de 0,27 m na quadratura a 1,23 m na sizígia, conforme o estudo de Harari & Camargo (1998). Os resultados obtidos nesse estudo para o estuário de Santos – São Vicente – Bertioga demonstram características regionais dos fluxos de maré, e o decaimento da intensidade das correntes de maré em profundidade, por influência da fricção no fundo. Além disso, há variações significativas das correntes em áreas com grandes variações de batimetria e de contornos terrestres, como no Canal do Porto e nas Praias de Santos. Harari e Camargo (1998) indicaram o contraste das intensidades das circulações entre as áreas mais profundas e as regiões mais rasas, além de assimetrias de maré nas regiões mais rasas e rotação no sentido anti-horário das correntes na região costeira. Segundo este estudo, há uma convergência das correntes de maré enchentes dos Canais de São Vicente e de Bertioga, no Largo da Pompeba e no Largo do Candinho, onde ocorrem encontros das ondas de marés provenientes de suas extremidades (e uma divergência das correntes de maré nas vazantes).

Nos canais estreitos do Estuário Santista, a maré vazante implica a predominância de água doce, enquanto a maré enchente favorece a manutenção de águas salobras, definindo uma circulação estuarina homogênea. Nos largos (Pompeba e entrada do Canal de São Vicente) ocorrem efeitos mínimos dos fluxos fluviais residuais, havendo circulação predominantemente por correntes de marés, constituindo-se em zonas de baixa energia. O mesmo ocorre no Canal de Bertioga, que mostra áreas de influência de correntes de maré junto à cidade de Bertioga, mas fluxos fluviais residuais de pouca penetração e pequeno transporte de fundo no sentido Bertioga-Canal do Porto.

Resultados obtidos por Roversi *et al*. (2016a) indicam que, a cada 30 dias, todo o Sistema Estuarino de Santos apresenta uma renovação das águas maior que 95%; as regiões da Baía de Santos e da embocadura do Canal de Bertioga apresentam taxas de renovação mais elevadas em relação às regiões localizadas no interior do estuário, onde foram identificadas diferenças sazonais, em razão das influências das vazões fluviais afluentes. Os mapas obtidos por Roversi *et al*. (2016b) indicam que as águas do Rio Cubatão e do Rio Quilombo alcançam a Baía de Santos preferencialmente pelo Canal de São Vicente e pelo Canal do Porto de Santos, respectivamente. Os autores destacam ainda que as águas do Rio Cubatão permanecem aprisionadas na região de mangue na maior parte do tempo.

O estuário Santista não se enquadra num modelo simples de circulação estuarina, possuindo transições entre diversos tipos. Na região do Alto Estuário, as águas dos rios provenientes da Serra do Mar adentram o sistema, originando um predomínio de fluxo unidirecional que se propaga em direção à baía (Harari *et al*., 2002); esta característica é notada também no Canal do Porto e, na parte centro leste da baía de Santos, o fluxo resultante unidirecional segue em direção ao mar aberto, como mostrado na Figura 2A.

Segundo o trabalho de Miranda *et al*. (2012), o Canal de Piaçaguera pode ser classificado como parcialmente misturado e fracamente estratificado (tipo 2a); durante os períodos de quadratura e sizígia, as velocidades longitudinais de enchente variaram entre 0,20 m/s e 0,30 m/s; na vazante, variaram entre 0,40 m/s e 0,45 m/s; no entanto, a estratificação da salinidade permaneceu inalterada em ambas as condições. Por outro lado, segundo Miranda *et al* (1998), o Canal de Bertioga pode ser classificado como parcialmente misturado (tipo 2); neste canal, devido às mudanças nas forças de maré durante os períodos de sizígia e quadratura, a classificação muda do tipo 2b (altamente estratificado) para o tipo 2a (fracamente estratificado); e as velocidades de pico ao longo do canal variaram de 0,4 m/s a 0,6 m/s, durante as enchentes, e de 0,7 m/s a 1,0 m/s, durante as vazantes.

## 4.3 Conclusão

Os exemplos dos dois estuários apresentados demonstram a enorme variabilidade das condições hidrodinâmicas e dos parâmetros físico-químicos nos estuários. Esses aspectos, aliado ao fato destas regiões serem em geral muito ocupadas e exploradas pelo homem, faz com que seja importante a realização de pesquisas e monitoramentos de estuários, com a contribuição de especialistas em várias áreas do conhecimento, como oceanógrafos físicos, biólogos, geólogos e químicos, além de engenheiros, meteorologistas, sanitaristas, ecólogos, ambientalistas, entre outros.

Foto: Leandro Coelho

## Referências Bibliográficas

BÉRGAMO, A. L. 2000. Características da Hidrografia, Circulação e Transporte de Sal: Barra de Cananéia, Sul do Mar de Cananéia e Baía do Trapandé. Dissertação de Mestrado no Instituto Oceanográfico da USP, 254 p.

BERNARDES, M. E. C.; MIRANDA, L. B. 2001. Circulação estacionária e estratificação de sal em canais estuarinos: simulação com modelos analíticos. Rev. Bras. Oceanogr 49:115–132.

BONETTI, F. J.; MIRANDA, L. B. 1997. Estimativa da descarga de água doce no sistema estuarino-lagunar de Cananéia-Iguape. Revista Brasileira de Oceanografia, v. 45, n. 2, p. 89-94.

BOWDEN, K. F. 1980. Physical factors: salinity, temperature, circulation and mixing processes. In: Chemistry and Geochemistry of Estuaries. E. Olausson & I. Cato (Eds). John Wiley and Sons, New York.

CAMERON, W. M.; PRITCHARD, D. W. 1963. Estuaries. In: The sea – ideas and observations on Progress in the study of the seas. M. N. Hill (Ed.). v. 2 – The composition of the sea water. Interscience Publishers. John Wiley and Sons, New York.

CARLOS, A. F.; HARARI, J. 2018. Interação da hidrodinâmica com o gerenciamento costeiro e pesqueiro no Litoral Sul de São Paulo. Capítulo do livro da Coletânea de Dissertações e Teses do Programa de Pós-graduação em Ciência Ambiental da USP (PROCAM USP) 2018 – "Caminhos do conhecimento em interdisciplinaridade e meio ambiente" – Organizadores: Paulo Antonio de Almeida Sinisgalli & Pedro Roberto Jacobi, Editora: Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE USP), ISBN 978-85-86923-55-5, p. 15 – 37.

DYER, K. R. 1997. Estuaries. A Physical Introduction. John Wiley and Sons, 2nd Edition, New York.

FAIRBRIDGE, R. W. 1980. The estuary: its definition and geodynamic cycle. In: Chemistry and Geochemistry of Estuaries. E. Olausson & I. Cato (Eds), p. 1 – 35. John Wiley and Sons, New York.

HANSEN, D. V.; RATRAY, M. 1966. New dimensions in estuary classification. Limnology and Oceanography, v. 11, no. 3.

HARARI, J.; CAMARGO, R. 1998. Modelagem numérica da região costeira de Santos (SP): circulação de maré. Revista Brasileira de Oceanografia, vol. 46 (2), p. 135 - 156.

HARARI, J.; CAMARGO, R.; MIRANDA, L. B. 2002. Modelagem numérica hidrodinâmica tridimensional da região costeira e estuarina de São Vicente e Santos (SP) - Pesquisa Naval - Suplemento Especial da Revista Marítima Brasileira, n° 15, p. 79 - 97.

HARARI, J.; FERREIRA, F. R.; DEGASPARI, F. A.; SARTOR, S. M. 2013. Modelagem numérica da hidrodinâmica e da dispersão de esgoto na Baía de Santos, SP – Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH), vol. 18 (1), p. 205 - 214.

HARARI, J.; FRANÇA, C. A. S.; MARQUES, J. 2009. Aplicações da modelagem numérica da Baía de Santos (SP, Brasil): correntes residuais e dispersão de poluentes. Capítulo do livro "Governança da Água no Brasil – uma visão interdisciplinar", Org. Wagner Costa Ribeiro, Editores Annablume, FAPESP e CNPq, ISBN 978-85-7419-927-6, com 379 páginas. Capítulo se encontra em p. 361 – 379.

IBAÑEZ, D.; PONT, D.; PRAT, N. 1997. Characterization of the Ebre and Rhone Estuaries. Limnology and Oceanography, 42 (1), p. 89 – 101.

KATO, K. 1966. Geochemical studies on the mangrove region of Cananéia, Brazil. I. Tidal variations of water properties. Boletim do Instituto Oceanográfico, São Paulo 15:13–20.

MESQUITA AR DE; HARARI J. 1983. Tides and tide Gauges of Cananéia and Ubatuba - Brazil (lat, 24°).- Relatório Interno do Instituto Oceanográfico da USP, n° 11, 14 p.

MIRANDA L. B.; DE CASTRO B. M.; KJERFVE B. 1998. Circulation and mixing due to tidal forcing in the Bertioga Channel, Sao Paulo, Brazil, Estuaries.

MIRANDA L. B.; OLLE E. D.; BÉRGAMO A. L.; SILVA L. D. S.; ANDUTTA F. P. 2012. Circulation and salt intrusion in the Piaçaguera channel, Santos (SP), Brazilian Journal of Oceanography.

MIRANDA, L.B.; CASTRO, B. M. 1996. On the salt transport in the Cananéia Sea during a spring tide experiment. Rev. bras. Oceanogr. 44(2):12-133.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. 2002. Princípios de Oceanografia Física de Estuários. EDUSP, 2a. Edição, 432 p., ISBN-13: 978-8531406751.

MIYAO, S. Y. 1977. Contribuição ao estudo da oceanografia física da região de Cananéia (25°S, 48°W). Tese, Univ. São Paulo, São Paulo, Brasil. 87 p.

MIYAO, S. Y.; J. HARARI. 1989. Estudo preliminar da maré e das correntes de maré da região estuarina de Cananéia (25 S-48 W). Boletim do Instituto Oceanográfico, São Paulo 37 (2): 107–123.

PRITCHARD, D. W. 1967. What is an estuary: physical viewpoint. In: Estuaries. G. H. Lauff (Ed.) American Association for the Advancement of Science, no. 83, Washington D. C.

ROVERSI, F.; ROSMAN, P. C. C.; HARARI, J. 2016A. Análise da renovação das águas do Sistema Estuarino de Santos usando modelagem computacional - Revista Ambiente & Água, v. 11, p. 566-585, doi: 10.4136/ambi-agua.1770.

ROVERSI, F.; ROSMAN, P. C. C.; HARARI, J. 2016B. Análise das trajetórias das águas continentais afluentes ao sistema estuarino de Santos – Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH), Versão On-line ISSN 2318-0331, vol. 21 (1), p. 242 - 250.

SILVA, M. C. 1993. Indicadores do Estado do Ambiente para Águas costeiras e Estuarinas. V. 3 do Estudo preparatório para a definição de projetos elegíveis no contexto do fundo de coesão. Relatório 106 / 93 – NEt, LNEC, Lisboa, Portugal.

SILVA, M. C. 2000. Estuários – critérios para uma classificação ambiental. Revisa Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, vol. 5, no. 1, p. 25 – 35.

SORENSEN, J.C.E.; MCCREARY, S. T. 1990. Institutional Arrangements for Managing Coastal Resources and Environments. 194p., Coastal Management Publications No. 1. NPS/US AID Series, National Park Service, Office of International Affairs, Washington, DC, U.S.A. ISBN: 978-0931531002.

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 10*

# CIRCULAÇÃO NA PLATAFORMA CONTINENTAL

*Marcelo Dottori & Belmiro Mendes de Castro Filho*

REVISÃO: LUIZ BRUNER DE MIRANDA

CITAÇÃO SUGERIDA: DOTTORI, Marcelo. Circulação na plataforma continental. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 10: p. 227-235.

# Circulação na Plataforma Continental

*Marcelo Dottori & Belmiro Mendes de Castro Filho*

## 1. Introdução

A plataforma continental é a região mais rasa dos oceanos, tendo seu início no encontro dos continentes com as águas oceânicas e terminando onde as profundidades começam a aumentar abruptamente, região conhecida como quebra da plataforma continental. A plataforma continental pode ser considerada, de fato, como uma porção do continente que está coberta por águas marinhas.

Como características mais gerais, a plataforma continental tem profundidades entre 0 e 200 metros, com uma largura que pode variar significativamente entre alguns poucos quilômetros e centenas de quilômetros. A inclinação do fundo é da ordem de um para 1.000, ou seja, para cada quilômetro que se caminha em direção ao oceano profundo, ganha-se um metro de profundidade. Quando se mede a fração da área dos oceanos ocupadas pela plataforma continental, chega-se a um valor global da ordem de 15%. No Oceano Atlântico, a plataforma continental ocupa uma fração maior, de cerca de 19%. Entretanto, quando se olha para os volumes de água dos oceanos que estão sobre a plataforma continental, teremos valores muito menores, dadas as profundidades típicas da plataforma continental e a média das profundidades dos oceanos (~3.700 metros).

Apesar de suas dimensões reduzidas, tanto em sua área quanto dos volumes de suas águas, a plataforma continental adquire uma importância singular por se tratar da região onde as interações entre os seres humanos e os oceanos ocorrem.

Basicamente, é na plataforma continental que atividades turísticas, embarque e desembarque de mercadorias, despejo de poluentes e acidentes ambientais marinhos, por exemplo, ocorrem. Assim, a compreensão dos processos dinâmicos e termodinâmicos da plataforma continental torna-se particularmente importante. Como exemplo, cartas náuticas da região costeira que orientam as ações em casos de acidente com petróleo (Cartas SAO - Sensibilidade Ambiental ao Óleo) necessitam de informações sobre as correntes locais. Essas informações são importantes para se estabelecer as regiões mais vulneráveis e, consequentemente, orientar as medidas mais adequadas na mitigação dos problemas ocasionados pela poluição.

As características físicas da plataforma continental, isto é, seu pequeno volume, fundo inclinado e barreira física continental, por exemplo, tornam os processos físicos da plataforma continental diferentes daqueles observados no oceano profundo. Dentre esses processos, podemos destacar a maior amplitude das oscilações da superfície devido às marés, as correntes geradas pelo vento e aquelas geradas pelas descargas fluviais. Vale destacar, entretanto, que apesar desta dinâmica peculiar, não há uma barreira física entre a plataforma continental e as outras regiões oceânicas e, portanto, existe uma interação entre os processos nas regiões profundas dos oceanos e os processos na plataforma continental.

Neste capítulo, vamos abordar algumas destas questões dinâmicas características da plataforma continental do ponto de vista qualitativo e de uma maneira relativamente simples, quantitativa, quando possível (Brink & Robinson, 1998; Simpson & Sharples, 2012; Emery & Thompson, 2015).

# BELMIRO MENDES DE CASTRO FILHO (1948-2020)

*In memoriam*

Paulistano, físico, oceanógrafo brasileiro, autoridade mundial em Oceanografia Física, obteve o título de Professor Titular da Universidade de São Paulo em 2000, com atuação no Instituto Oceanográfico da USP (IOUSP), onde foi Diretor na gestão 2001-2005. Decano, atuou no Departamento de Oceanografia Física, Química e Geológica (DOF-IOUSP), tendo sido Chefe nas gestões 1997-1999, 1999-2001, 2005-2007 e 2007-2009.

Graduado em Física pela Universidade de São Paulo (1972), com mestrado em Oceanografia, na área de Oceanografia Física, pela Universidade de São Paulo (1977) e doutorado em Oceanografia Física e Meteorologia pela University of Miami (1985).

Com vasta experiência na área de Oceanografia, com ênfase em Oceanografia Física, atuou principalmente nos seguintes temas: Hidrodinâmica da Plataforma Continental e de Estuários, além de Física da Poluição Marinha. Orientou 25 mestres e 10 doutores. Responsável, no decorrer do tempo, por nove disciplinas de pós-graduação além de conduzir pesquisas científicas e ministrar aulas de graduação. Participou de 54 bancas de teses e/ou dissertações e em 89 bancas de qualificação. Produziu mais de 40 trabalhos completos veiculados em revistas científicas nacionais e internacionais e em livros. Em 2002, foi coautor com Prof. Dr. Luiz Bruner de Miranda e Bjorn Kjerfve, do livro "Princípios de Oceanografia Física de Estuários", pela Editora da Universidade de São Paulo (EDUSP). A obra foi contemplada, em 2003, com o Prêmio Jabuti da Câmara Brasileira do Livro. Posteriormente, esse mesmo livro foi editado em inglês.

Professor Belmiro Mendes de Castro Filho participou de diversas expedições e cooperações científicas junto à empresa Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras), Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR) entre outros. Como pesquisador, foi um dos que desvendou o mecanismo da ressurgência em Cabo Frio.

Lançou, em 7 de maio de 2019, junto com o Prof. Dr. Marcelo Dottori e equipe do Laboratório de Hidrodinâmica Costeira do IOUSP, o sistema on-line de Previsão do Mar (PREAMAR), inédito e acessível gratuitamente para toda a sociedade. A ferramenta fornece previsão com até 48 horas de antecedência sobre o comportamento das correntes marinhas, a elevação da superfície do mar, além de temperatura e salinidade para três regiões da costa do Estado de São Paulo: a plataforma continental, o canal de São Sebastião e o sistema estuarino de Santos-São Vicente-Bertioga.

Em sua carreira profissional, o Prof. Dr. Belmiro Mendes de Castro Filho se dedicou ao ensino, pesquisa, extensão e administração com muito afinco. Complementando, sempre esteve presente, participando da vida da Instituição e de toda a comunidade Oceanográfica.

Como homenagem póstuma, foi criado recentemente o "Colóquio Prof. Belmiro Castro de Oceanografia Física" (CBC), constituído por um ciclo de seminários. A motivação para a realização do CBC vem ao encontro de um antigo desejo do estimado Prof. Dr. Belmiro Mendes de Castro Filho, em criar um espaço para proporcionar encontros da comunidade de Oceanografia Física, ainda tão pequena, com a finalidade de divulgar, discutir e aprimorar pesquisas de suma relevância na academia e nas demais esferas correlatas.

Eternizamos nossa eterna gratidão!!!

## 2. Marés na plataforma continental

Um dos processos mais perceptíveis na plataforma continental é a elevação do mar gerada pela ação do Sol e da Lua, conhecido como marés (ver capítulo **Marés e Nível Médio do Mar**). A experiência que a maioria das pessoas têm no mar, ao longo de um período relativamente curto, de algumas horas, deixa clara a atuação destes astros com o vai-e-vem constante das águas nas praias. Entretanto, as oscilações devido às marés são relativamente reduzidas fora da plataforma continental. Para se ter uma ideia, as elevações de maré observadas em regiões oceânicas profundas são de alguns poucos centímetros enquanto que, na plataforma continental, é comum observarmos variações da ordem de um metro e, em locais específicos, podem chegar a vários metros.

Por que, então, há diferenças tão marcantes nas oscilações de maré na costa e no oceano profundo? Como mencionado anteriormente, as características físicas da plataforma continental (pequena profundidade, inclinação e presença dos continentes) são responsáveis por este comportamento diferente e amplificado das variações do nível do mar associados com a maré. É importante salientar, contudo, que as marés observadas na praia são principalmente o resultado de ondas que se propagam na plataforma continental, e a ação direta da atração gravitacional do Sol e da Lua contribuem com uma parcela muito pequena nessas oscilações.

Para entender como esta amplificação da maré ocorre, vamos tratar de uma plataforma continental equatorial e de profundidade uniforme. Assim, com estas simplificações, a força de Coriolis deixa de existir (plataforma equatorial), e teremos uma onda de gravidade se propagando, com velocidade de propagação igual a $\sqrt{(g \cdot H)}$, onde $g$ é a aceleração da gravidade e $H$ é a profundidade da plataforma continental. Suponha, agora, que na quebra da plataforma continental, isto é, a região onde termina a plataforma continental e começa o oceano profundo, o nível do mar ($\eta_a$) oscila devido a maré com a seguinte expressão:

$$\eta_a = A\cos(\omega t) \quad (1),$$

lembrando que $\omega = 2\pi / T$, onde $T$ é o período da maré que, tipicamente, é de cerca de 12 horas (maré semidiurna) ou 24 horas (maré diurna), e $t$ é o tempo. Trabalhando com as equações de Navier-Stokes, que são uma forma da 2ª Lei de Newton para os fluidos, teremos a seguinte solução para esse problema:

$$\eta = A\frac{\cos(\alpha x)}{\cos(\alpha L)}\cos(\omega t) \quad (2),$$

onde $\alpha = \omega / \sqrt{(g \cdot H)}$, $\lambda$ é o comprimento da onda de maré, $L$ é a largura da plataforma continental e $x$ é a distância da costa. Olhando especificamente para a elevação devido à maré na costa ($\eta_0$), isto é, em $x = 0$, e usando a Equação (1), teremos o seguinte:

$$\eta_0 = \frac{A}{\cos(\alpha L)}\cos(\omega t) \Rightarrow \eta_0 = \frac{\eta_a}{\cos(\alpha L)} \quad (3).$$

Assim, a oscilação na costa é igual a oscilação na quebra da plataforma dividida por $\cos(\alpha L)$. Como o cosseno é uma função limitada entre -1 e 1, a elevação na costa será sempre igual ou maior do que a oscilação da maré na quebra da plataforma, mostrando, portanto, a amplificação deste sinal entre o oceano profundo e a plataforma continental.

Embora nem todas as plataformas continentais localizem-se no equador e tampouco tenham profundidade homogênea, a Equação (3) é capaz de explicar, matematicamente, o que observamos diretamente quando estamos na praia. Fisicamente, temos uma onda de gravidade estacionária transmitindo as oscilações da quebra da plataforma para toda a plataforma continental, como pode ser visto na Equação (2).

A Equação (3) é capaz, ainda, de explicar casos como as marés observadas na foz do Rio Amazonas e na Baía de São Marcos, no Maranhão. Nestes 2 casos, há uma amplificação significativa da maré, que chega a variar entre a maré baixa e a maré alta até 7 metros, dependo da fase da Lua. Observe que, nas Equações (2) e (3), haverá o fenômeno de ressonância se $\boldsymbol{\cos(\alpha L) = 0}$. Neste caso, teremos:

$$\alpha L = \frac{\pi}{2} + n\pi \Rightarrow \alpha L = \frac{\pi}{2}(2n+1), n \in \mathbb{N} \quad (4).$$

Assim, se usarmos a definição dada anteriormente para $\alpha$, teremos a seguinte relação entre a largura da plataforma e o comprimento de onda no caso de ressonância:

$$L = \frac{(2n+1)}{4}\lambda, n \in \mathbb{N} \quad (5).$$

Por exemplo, quando a largura da plataforma for próxima a ¼ do comprimento da onda de maré (para $\boldsymbol{n = 0}$), haverá uma amplificação muito acentuada da maré na costa. A Figura 1 mostra, esquematicamente, essa relação entre a onda de maré e o comprimento da plataforma continental.

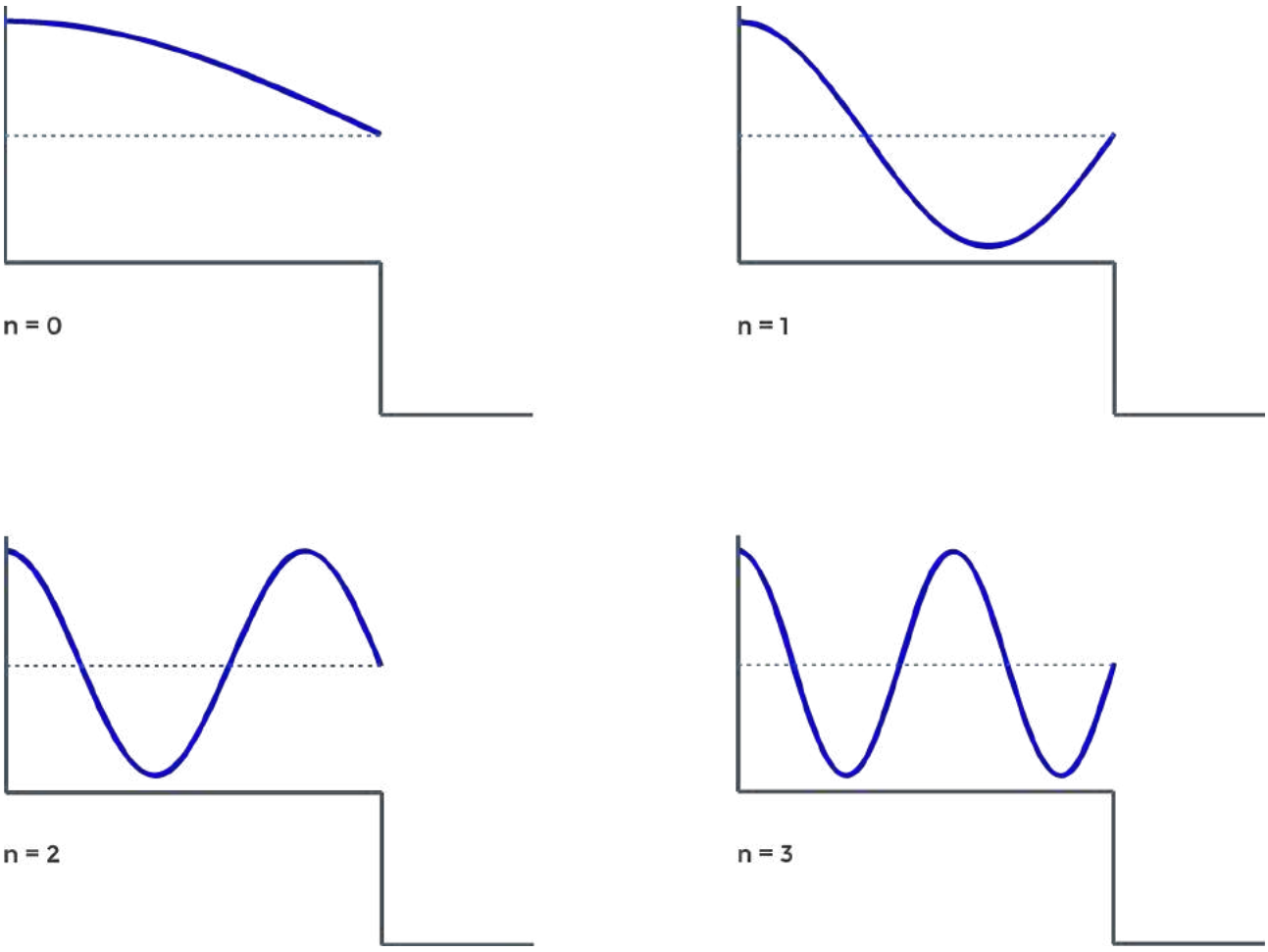



FIGURA 1. Relação entre a onda de maré e o comprimento da plataforma continental.

## 3. Correntes na plataforma continental

Um outro processo dinâmico bastante importante na plataforma continental são as correntes geradas pelo vento. Para entender esse processo, é necessário recordar como ocorre o transporte de Ekman e, também, o balanço geostrófico. Resumidamente, no transporte de Ekman na superfície, isso é, quando ocorre o balanço entre a força de atrito devido ao vento na superfície e a força de Coriolis, teremos, na média, as águas próximas à superfície deslocando-se com um ângulo de 90° com relação ao vento, ficando à esquerda do vento no Hemisfério Sul e à sua direita no Hemisfério Norte. Já o balanço geostrófico, isso é, quando há um equilíbrio entre a força de gradiente de pressão (por exemplo, a força gerada pela inclinação da superfície) e a força de Coriolis, teremos um deslocamento das águas que deixa a maior pressão (ou maior elevação da superfície) à direita no Hemisfério Sul e à esquerda no Hemisfério Norte.

Vamos, então, imaginar o seguinte: uma plataforma continental, inicialmente em repouso, localizada no Hemisfério Sul, com uma linha de costa meridional, isto é, uma linha de costa na direção Norte-Sul, com o continente localizado a Oeste do oceano e, por fim, um vento que passa a soprar na superfície de Sul para Norte, mantendo sua intensidade e direção, como na Figura 2.

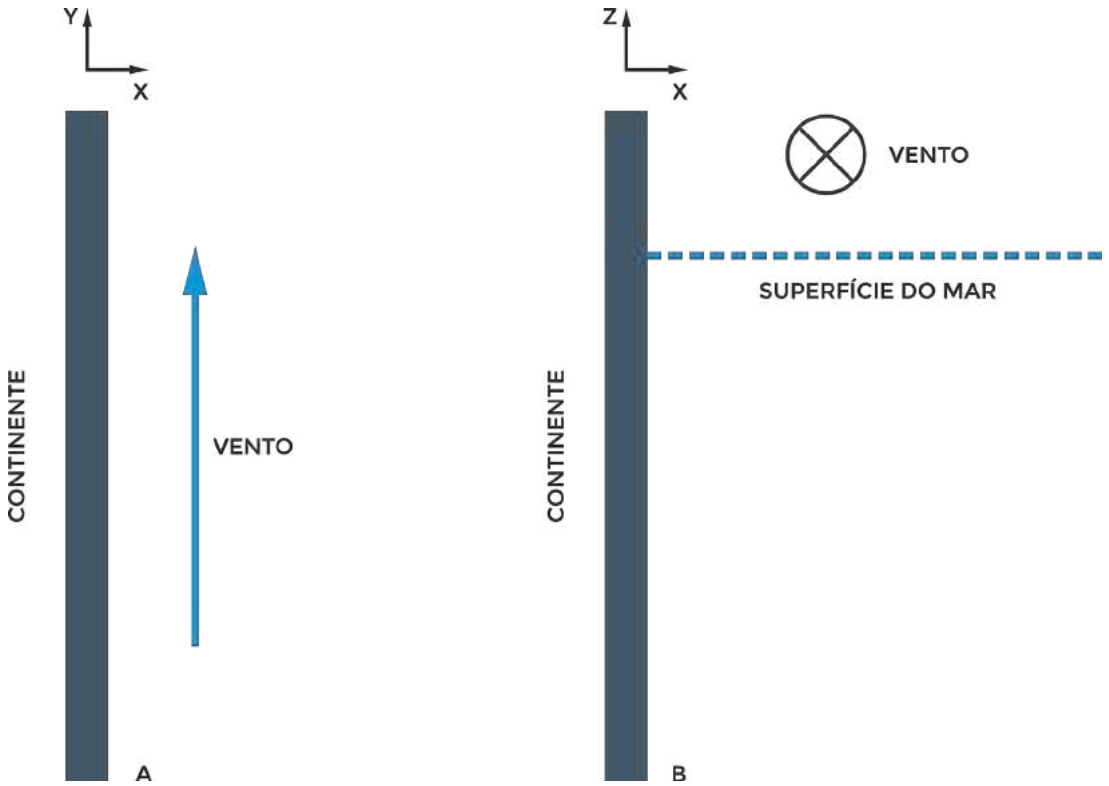



**FIGURA 2.** Esquema ilustrando a plataforma continental (Hemisfério Sul): A) inicialmente em repouso; e B) com vento passando a soprar na superfície, de sul para norte.

Neste cenário, inicialmente, com o vento soprando por um tempo relativamente longo, o transporte de Ekman deslocará as águas da superfície para oeste, em direção ao continente. Esse deslocamento, associado à barreira física do próprio continente, fará com que as águas da plataforma comecem a ser empilhadas junto à costa. Esse empilhamento irá gerar uma inclinação da superfície e, portanto, um diferencial de pressão entre a região costeira, com o nível do mar mais elevado, e a região afastada da costa, com o nível do mar rebaixado. Por fim, esse diferencial de pressão, uma vez em equilíbrio geostrófico, irá gerar correntes para norte, na mesma direção daquela observada para o vento (Fig. 3).

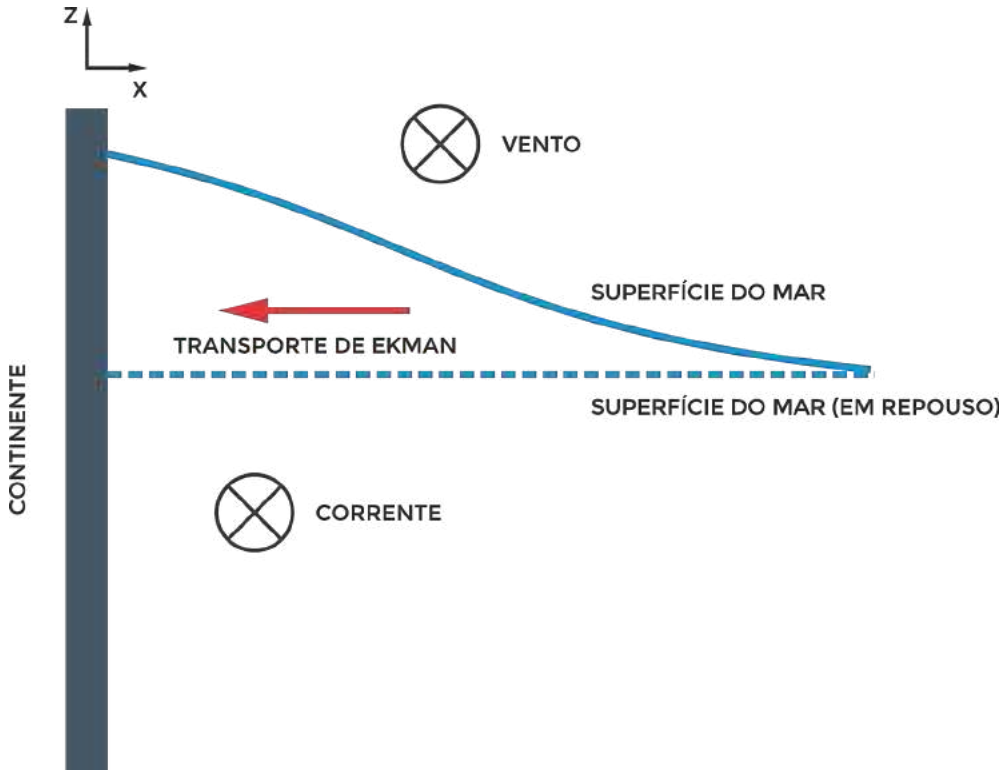



**FIGURA 3.** Esquema ilustrando o empilhamento de água junto à costa, devido ao transporte de Ekman (Hemisfério Sul).

É importante salientar, entretanto, os seguintes aspectos dessa dinâmica associada ao vento na plataforma continental:

- A atuação do vento é restrita a uma camada muito delgada da superfície;
- Embora as correntes geradas pelo vento e o próprio vento ocorram na mesma direção, as correntes são, de fato, uma resposta indireta à ação do vento;
- As correntes geradas pelo balanço geostrófico associado ao gradiente de pressão devido à inclinação da superfície ocorrem em toda a coluna d'água;
- No equador, onde a força de Coriolis é nula, não é possível observar essa dinâmica; e
- A presença do continente é fundamental nesse processo, pois esse limite permite a acumulação (ou remoção) de água junto à costa, responsável pela geração da força de gradiente de pressão.

É importante notar que ventos perpendiculares à linha de costa também são capazes de gerar correntes na plataforma continental. Entretanto, as correntes geradas por esses ventos são, normalmente, muito menos intensas do que aquelas geradas por ventos paralelos.

A razão para isto está no fato de que ventos perpendiculares geram um transporte de Ekman que é paralelo à linha de costa e, portanto, não é eficiente em acumular, ou remover, águas junto a região costeira. Assim, os ventos perpendiculares à costa não são capazes de gerar inclinações do nível do mar significativas e, portanto, as correntes associadas a estes ventos são muito menos intensas.

## 4. Ressurgência na plataforma continental

A ressurgência é o fenômeno onde as águas mais frias que se encontram abaixo da termoclina chegam a superfície. No Brasil, a região mais conhecida por este fenômeno é a região de Cabo Frio, com praias de águas bastante frias, embora localizada no trópico. O processo de ressurgência também está associado com os ventos na costa, principalmente os ventos paralelos à linha de costa.

Vamos imaginar uma situação similar àquela proposta anteriormente, mas com o vento atuando na direção oposta. Teremos, então, o seguinte: uma plataforma continental, localizada no Hemisfério Sul, com uma linha de costa meridional, com o continente localizado à oeste do oceano e, por fim, um vento que sopra na superfície de Norte para Sul, mantendo sua intensidade e direção, na direção oposta do que mostra a Figura 3.

Neste cenário, o transporte de Ekman, que se dá à esquerda do vento, remove águas da costa e, inicialmente, gera uma inclinação da superfície com consequente geração de correntes, como explicado anteriormente, mas para sul, neste caso. Simultaneamente, águas mais frias de regiões mais profundas da plataforma continental deslocam-se em direção à costa, para ocupar a superfície. Eventualmente, as águas que se encontram abaixo da termoclina afloram, gerando a ressurgência (Fig.4) .

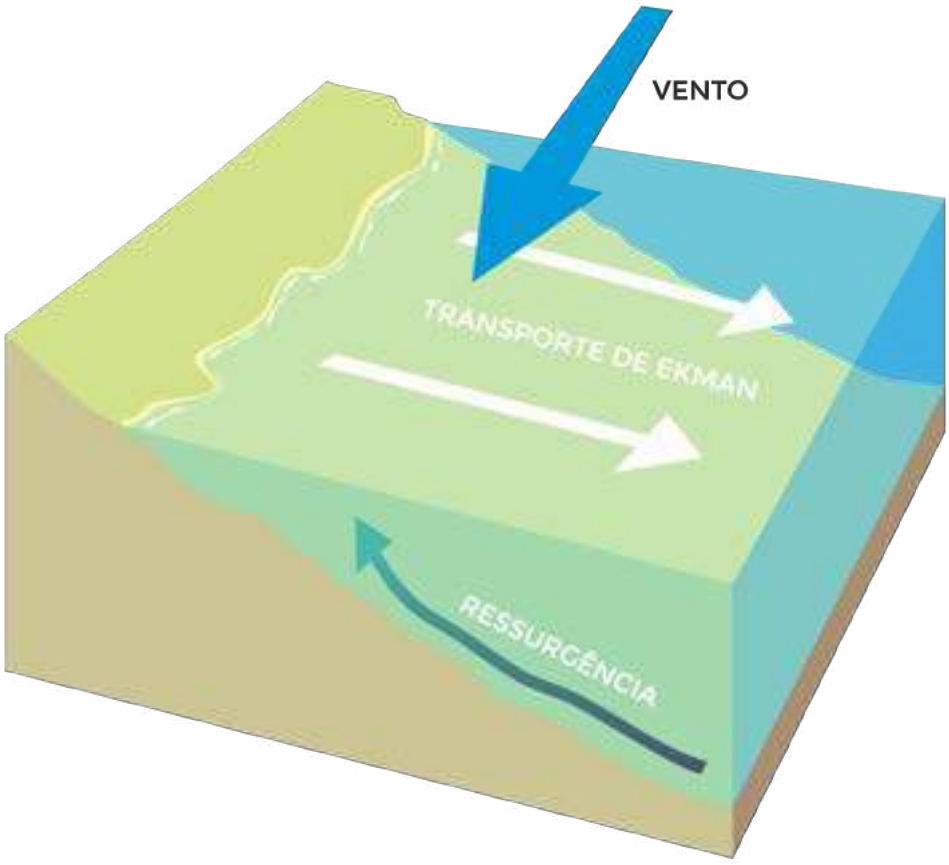



**FIGURA 4.** Esquema ilustrando o fenômeno da resurgência na plataforma continental.

O vento soprando na direção adequada, entretanto, não é suficiente para que a ressurgência ocorra. De fato, é necessário que os ventos soprem por longos períodos de tempo (da ordem de poucos dias) constantemente na mesma direção, além de uma topografia de fundo que favoreça o processo de ressurgência, como no caso de Cabo Frio.

## 5. A plataforma continental brasileira (PCB)

Com uma extensão superior a 7.500 km, a PCB apresenta características muito distintas em suas diversas porções (Fig 5). Com o seu limite norte em Cabo Orange (4°30'N), e seu limite sul no Chuí (34°45'N), cerca de 10% desta plataforma encontra-se no Hemisfério Norte. A largura máxima da PCB é de cerca de 330 km na região amazônica e sua largura mínima, de cerca de 8 km, ocorre ao largo de Salvador, na Bahia. A sua profundidade também varia significativamente, entre um mínimo de 40 m em alguns pontos da região nordeste, como em Sergipe, e um máximo de pouco mais de 180 m, ao largo dos estados de São Paulo e do Rio Grande do Sul. A inclinação do fundo é bem suave na região de Abrolhos, cerca de 0,3 m/km, e bastante inclinada ao largo de Salvador e Aracaju, atingindo cerca de 10 m/km.

Todas essas informações podem ser observadas nas cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil. Estas cartas, atualmente, encontram-se praticamente todas em formato digital no *site*[1] da DHN, e estão disponíveis para *download* gratuitamente.

**FIGURA 5.** Plataforma continental brasileira.

[1] Para saber mais sobre as cartas náuticas, acesse <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav-cartas-nauticas/cartas-nauticas>

## Referências Bibliográficas

BRINK, K.H. & A.R. ROBINSON (eds.). 1998. The Global Coastal Ocean: Processes and Methods. John Wiley & Sons, Inc., 604 p, ISBN 0471115444, 9780471115441.

EMERY, W.J. & R.E. THOMPSON. 2015. Data Analysis Methods in Physical Oceanography (Second edition). Pergamon Press, 658 p., ISBN 0-444-50757-4

SIMPSON, J.H., SHARPLES, J., 2012. Introduction to the Physical and Biological Oceanography of Shelf Seas, Cambridge University Press, 448 p, ISBN: 9780521701488

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 11*

# CIRCULAÇÃO OCEÂNICA EM GRANDE ESCALA E AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

*Edmo José Dias Campos*

CITAÇÃO SUGERIDA: CAMPOS, Edmo José Dias. Circulação oceânica em grande escala e as mudanças climáticas. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 11: p. 239-251.

# Circulação Oceânica em Grande Escala e as Mudanças Climáticas

*Edmo José Dias Campos*

Neste capítulo iremos primeiramente abordar os aspectos gerais da circulação dos oceanos em grande escala, isto é, escalas que se relacionam às dimensões das bacias oceânicas. Em seguida, faremos uma exposição dos mecanismos físicos gerais, através dos quais os oceanos regulam o clima e suas variabilidades.

## 1. A circulação oceânica

Os oceanos cobrem cerca de três quartos da superfície terrestre, com uma profundidade média de cerca de 4 mil metros. Esse imenso volume de água está em constante movimento, em escalas espaciais que variam desde distâncias intermoleculares até dimensões planetárias. A Oceanografia Física é a ciência que estuda os movimentos oceânicos em escalas macroscópicas, cujas principais causas são a atração gravitacional da própria Terra e dos outros corpos celestes, os gradientes de pressão e as diferenças de densidade, resultantes do aquecimento diferencial da superfície do planeta e da ação dos ventos. No domínio do tempo, os movimentos também se manifestam em uma grande variedade de escalas. As marés, movimento resultante do efeito combinado das atrações astronômicas e da rotação do planeta, são fenômenos cuja maior energia se concentra em períodos da ordem de um dia.

A escala de tempo da ordem de um dia é denominada "**escala inercial**", por estar associada a efeitos inerciais resultantes da rotação do planeta. No estudo das correntes oceânicas costuma-se classificar os movimentos em uma linha de tempo dividida pelo período inercial, conforme ilustrado pela Figura 1. A distribuição por escalas de tempo da energia cinética (***K***) dos movimentos oceânicos apresenta grandes concentrações de energia em torno das escalas inerciais ou em movimentos com períodos da ordem e superiores a alguns meses.

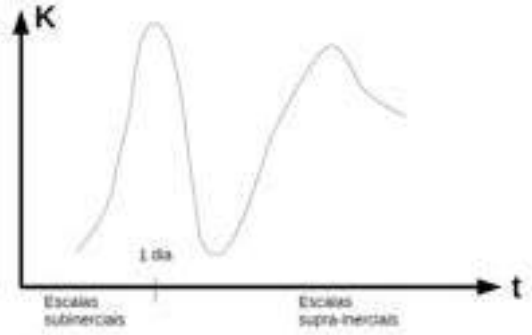



**FIGURA 1.** A energia cinética (***K***) dos movimentos oceânicos concentra-se em escalas da ordem de um dia (escala inercial) e em períodos superiores a alguns meses ou anos (escalas supra-inerciais).

Considerando-se essa distribuição bimodal, para efeito de estudos costuma-se dividir os movimentos oceânicos em movimentos de alta frequência (períodos da ordem ou mais curtos que a escala inercial) ou movimentos de baixa frequência (períodos muito maiores do que o inercial). Os movimentos de baixa frequência são também movimentos de grandes escalas espaciais (ordem de dezenas de quilômetros ou mais). Nessas grandes escalas espaço-temporal, os principais agentes fornecedores de energia são, a gravidade terrestre, os gradientes de densidade resultantes das diferentes distribuições de temperatura e salinidade, e o arrasto do vento na superfície do mar – na verdade, o Sol é a fonte primária de energia termodinâmica uma vez que o vento resulta dos gradientes térmicos resultantes do aquecimento diferencial da atmosfera.

## 1.1 Circulação forçada pelo vento

O vento exerce uma força (tensão) sobre a superfície do oceano, proporcional ao quadrado da sua velocidade. Isso não só produz ondas no mar, mas também transfere quantidade de movimento para a camada superficial do oceano. O vento faz com que toda a camada superficial do oceano se movimente em uma "espiral" devido ao efeito da rotação do planeta ("Força" de Coriolis). Essa camada, conhecida como **camada de Ekman** (nome do cientista que desenvolveu a teoria em 1908), tem apenas cerca de 50 a 200 metros de profundidade mas produz gradientes de pressão que estendem ação do vento para até mil metros. A média de transporte dentro da camada de Ekman é de 90° para a direita do vento no Hemisfério Norte, 90° para a esquerda no Hemisfério Sul.

O arrasto do vento é o agente predominante nas camadas superiores do oceano. O movimento resultante da ação do vento restringe-se a, no máximo, os primeiros mil metros de profundidade, com velocidades típicas da ordem de 0,1 a 1,0 m/s, e é usualmente denominado de "**circulação forçada pelo vento**". O termo "circulação" resulta do fato desse movimento ser caracterizado por circuitos fechados. Isto é, as parcelas de fluido circulam ao longo de "linhas de corrente", completando um "giro horizontal" em um determinado período de tempo.

As regiões subtropicais dos oceanos são caracterizadas por grandes células de circulação anticiclônicas (sentido horário no Hemisfério Norte e anti-horário no Hemisfério Sul), conforme ilustrado pela Figura 2. Devido à esfericidade e rotação da Terra (efeito de Coriolis), as correntes do lado oeste das bacias são bem mais intensas do que do lado leste.

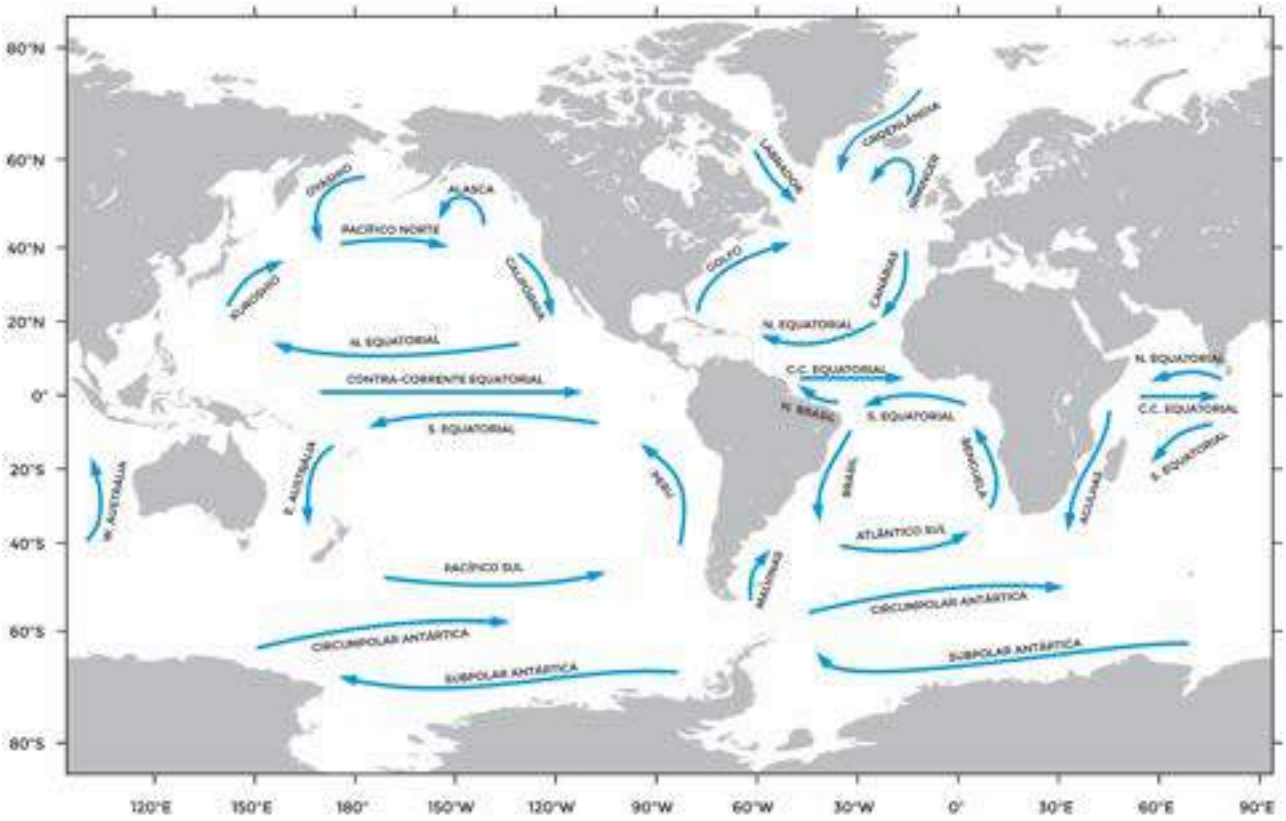



**FIGURA 2.** As correntes forçadas pelo vento nas camadas superiores do oceano são caracterizadas por circuitos fechados, razão pela qual esse conjunto de correntes é denominado Circulação. Nas regiões subtropicais destacam-se os giros anticiclônicos, células de circulação no sentido horário no Hemisfério Norte e anti-horário no Hemisfério Sul. Na região equatorial as correntes são predominantemente zonais (direção Leste-Oeste). No Oceano Austral, a Corrente Circumpolar Antártica perfaz um giro completo ao redor da Antártica.

## 1.2 Circulação termohalina

O movimento resultante das diferenças latitudinais de temperatura e salinidade é denominado "**Circulação Termohalina**" e se estende até as profundezas do oceano. Em escala global, a circulação termohalina média pode ser representada por um circuito tridimensional que se assemelha a uma esteira transportadora de uma fábrica, conduzindo e redistribuindo calor por todas as bacias oceânicas (Fig. 3).

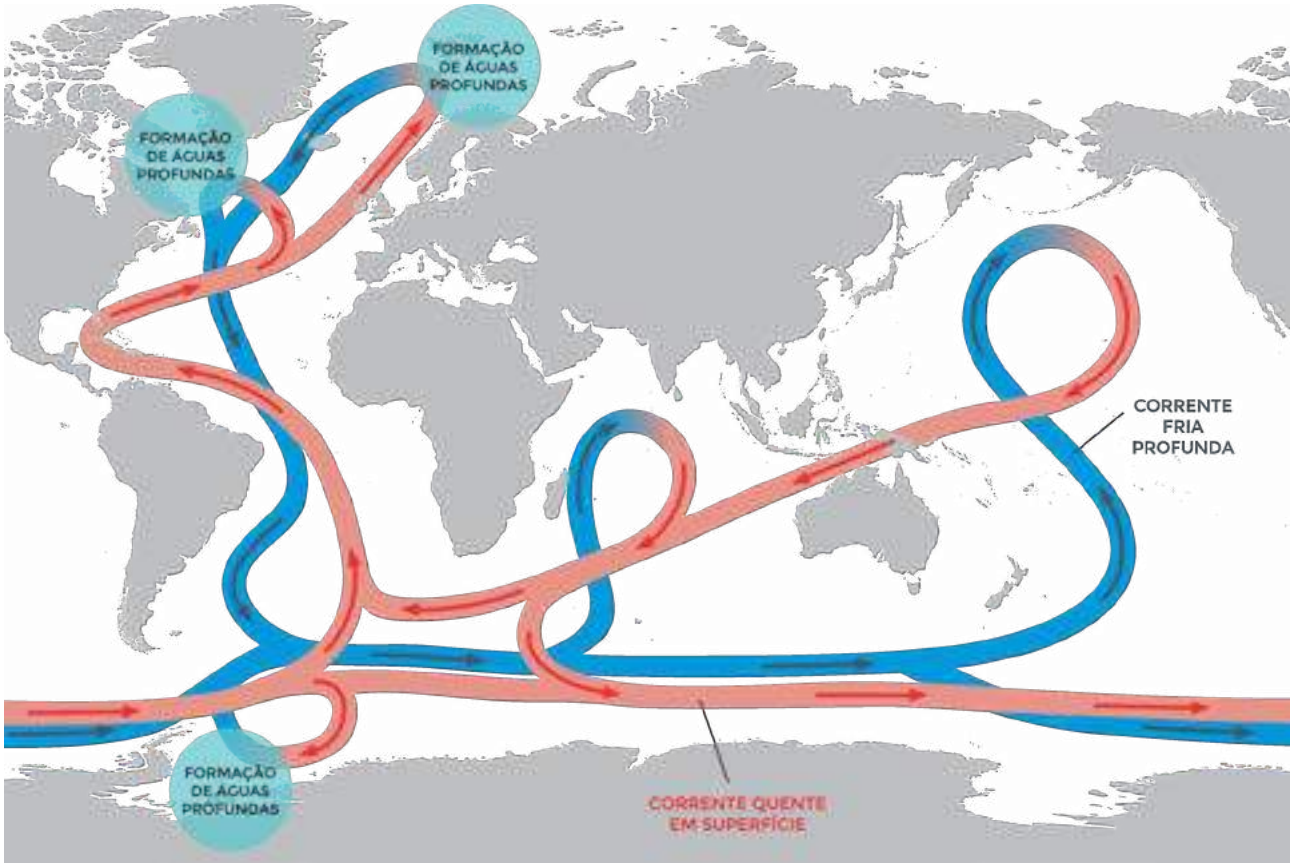



**FIGURA 3.** A "Esteira Transportadora Termohalina": Águas superficiais das diferentes bacias oceânicas fluem em direção ao Atlântico Sul, de onde são transportadas para o Atlântico Norte. No Mar da Noruega essas águas liberam calor para atmosfera, afundam e então retornam pelo fundo para completar o circuito.

No Atlântico, a componente da circulação termohalina é uma célula vertical na direção Norte-Sul denominada de Célula Meridional do Atlântico (CMA). Essa célula é mantida pelo seguinte mecanismo:

- Águas superficiais das outras bacias oceânicas adentram o Atlântico Sul pela passagem de Drake e ao Sul da África, e eventualmente são transportadas para o Atlântico Norte;
- Ao passar pela região equatorial do Atlântico, essas águas se aquecem e se tornam mais salinas devido à evaporação;
- Ao atingir altas latitudes no Hemisfério Norte, particularmente no Mar da Noruega, as águas mais quentes vindas de Sul liberam calor para a atmosfera e, em virtude da maior concentração de sal em comparação com as águas de origem local, se tornam mais pesadas e afundam;
- A massa de água resultante desse "afundamento", denominada de Água Profunda do Atlântico Norte (APAN), flui de volta para o Atlântico Sul, de onde é exportada para as outras bacias oceânicas, completando a circulação termohalina.

## 1.3 O Atlântico Sul

O oceano Atlântico Sul é um componente fundamental da Célula Meridional do Atlântico, e consequentemente, da circulação termohalina global, mecanismo pelo qual o oceano controla as condições climáticas do planeta. Nas camadas superiores da região subtropical, a circulação média do Atlântico Sul é dominada pelo "**Giro Subtropical**", uma célula de circulação horizontal no sentido anti-horário forçada predominantemente pelo vento (Fig. 4).

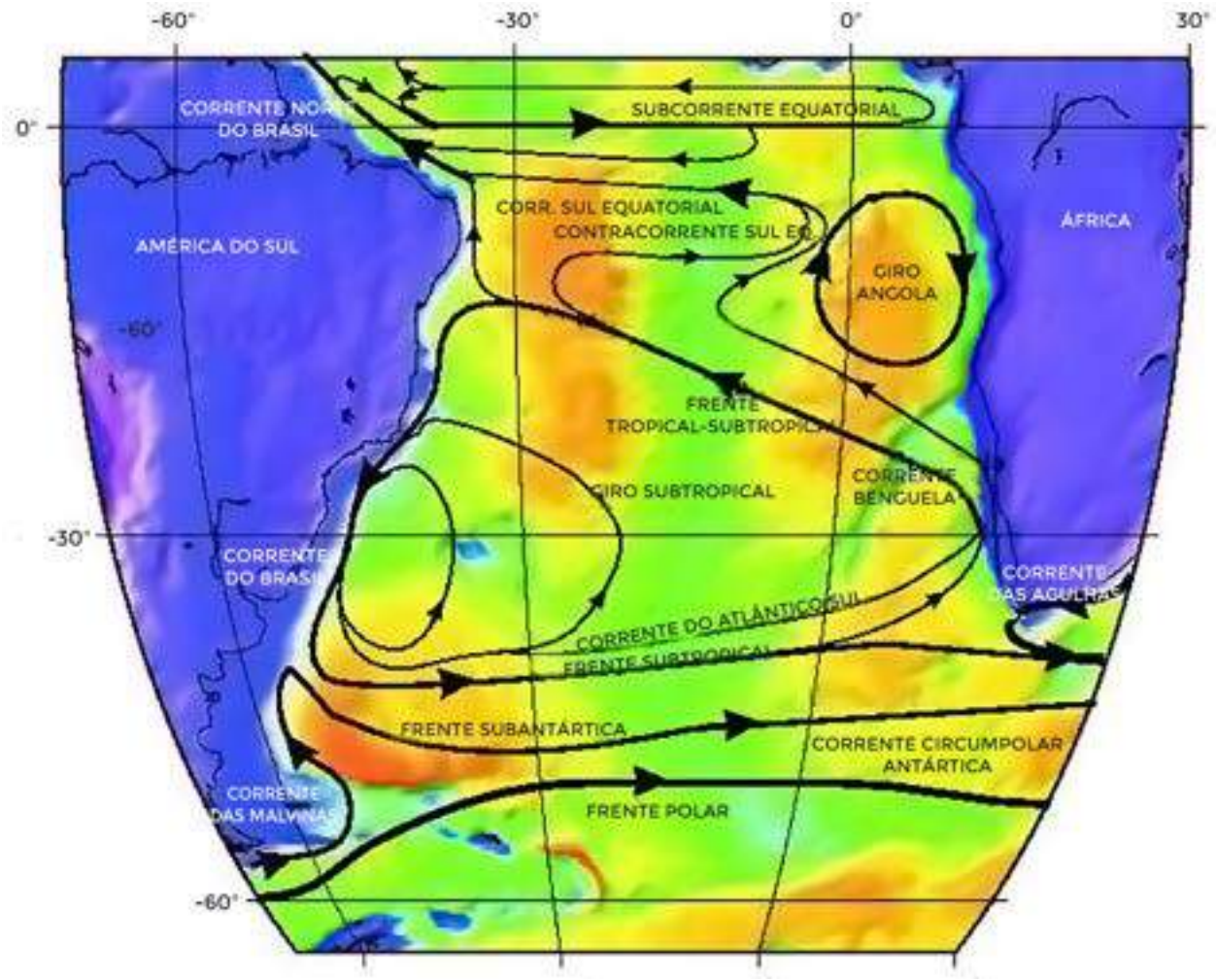



**FIGURA 4.** As correntes nas camadas superiores do Atlântico Sul.

Nesse sistema, águas de regiões próximas à África do Sul fluem em direção Noroeste através da Corrente de Benguela. Na parte central do Atlântico, essa corrente passa a ser denominada de Corrente do Atlântico Sul, a qual se bifurca entre aproximadamente 15°S e 5°S. O ramo norte dessa bifurcação é denominado Corrente Norte do Brasil, fluindo em direção ao Hemisfério Norte. O ramo sul dá origem à Corrente do Brasil, a qual escoa para Sul como parte do giro subtropical. Essa corrente serpenteia ao largo da costa Brasileira transportando águas mais quentes e salinas até aproximadamente 38°S, onde se separa da costa e flui para Leste, como a Corrente do Atlântico Sul. Nas proximidades da África, essa corrente se conecta com a Corrente de Benguela, completando o circuito.

Ao sul de 50°S, o padrão de circulação é dominado pela Corrente Circumpolar Antártica, que como o nome indica, flui ao redor do continente Antártico. O ramo mais ao norte dessa corrente, ao adentrar a bacia do Atlântico através da Passagem de Drake, contorna o Arquipélago das Malvinas

e flui para Norte ao largo da extensa plataforma continental Argentina. Esse fluxo, denominado de Corrente das Malvinas (também conhecida como Corrente das Falklands), segue para Norte até encontrar a Corrente do Brasil e também se separar da costa.

É importante ressaltar que a Corrente das Malvinas mantém sua estrutura vertical em praticamente toda a coluna de água, desde a superfície ao fundo. Essa característica impede que a Corrente das Malvinas adentre a plataforma continental e continue para Norte até a Bacia de Santos, conforme é descrito, erroneamente, em algumas publicações mais antigas.

Na verdade, a Corrente das Malvinas nem mesmo se mistura à Corrente do Brasil. Ao separar-se da costa, volta-se para Sul-Sudeste reintegrando-se ao sistema da Corrente Circumpolar Antártica.

Nas regiões Equatoriais os padrões de circulação são predominantemente zonais, isto é, fluxos ao longo de faixas latitudinais de Leste para Oeste ou de Oeste para Leste. Próximo ao continente sul-americano, predomina-se a Corrente Norte do Brasil, que cruza o Equador e transporta para Norte águas do Hemisfério Sul em direção ao Caribe, Golfo do México e, eventualmente, às altas latitudes do Atlântico Norte.

## 1.4 O Atlântico Sudoeste

Na região subtropical do Atlântico Sudoeste, ao largo do litoral brasileiro, a Corrente do Brasil se apresenta como um fluxo com velocidades da ordem de até 1 m/s, com largura máxima de aproximadamente 200 km, escoando para Sul ao longo da quebra da plataforma continental (Fig. 5).

Esse fluxo transporta para Sul dois tipos principais de massas de água: Água Tropical (AT), águas superficiais relativamente quentes e salinas, e Água Central do Atlântico Sul (ACAS), entre aproximadamente 50 m e 400 m de profundidade, com temperaturas e salinidades mais baixas e alto teor de nutrientes.

Nas camadas mais profundas as correntes são marcadas pelo transporte para Norte da Água Intermediária Antártica (AIA), originadas de regiões ao Sul de 45°S, e o fluxo para Sul das águas relativamente mais salinas formadas no Mar da Noruega, a APAN.

Nas proximidades do fundo do oceano são encontradas as águas mais frias, oriundas do Mar de Weddel: a Água Antártica de Fundo (AAF).

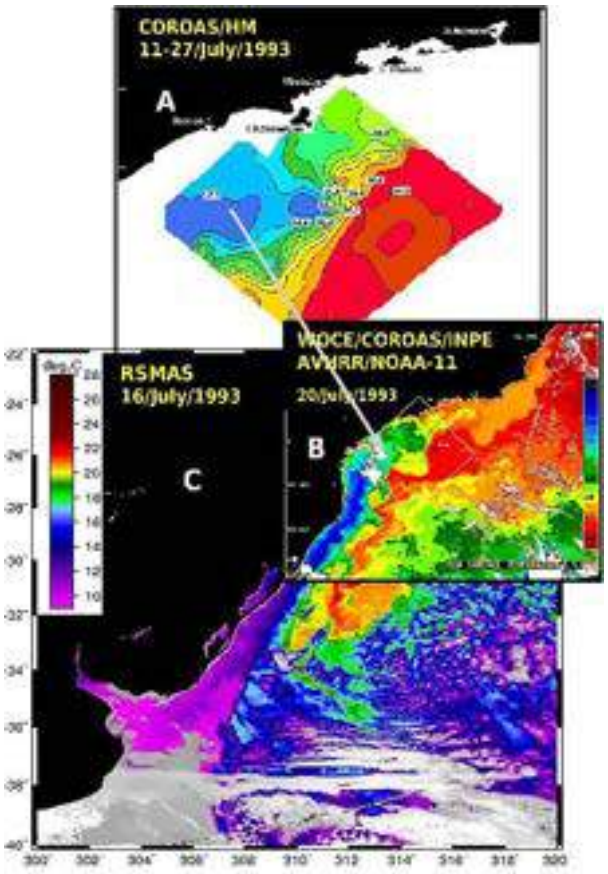



**FIGURA 5.** Composição de imagens da temperatura da superfície do mar obtida por satélite (B e C) e da salinidade da superfície amostrada durante cruzeiro do Projeto COROAS em Julho de 1993. A Corrente do Brasil é representada pelas cores mais "quentes" (amarelo-vermelho). Sobre a plataforma continental, entre a Corrente do Brasil e o continente, destaca-se o fluxo para norte de águas oriundas do Rio da Prata.

## 1.5 A Confluência Brasil-Malvinas

A região de encontro das correntes do Brasil e das Malvinas é conhecida como Confluência Brasil-Malvinas (CBM) e constitui-se em uma das regiões mais energéticas dos oceanos terrestres (Fig. 6). A CBM é um elemento fundamental na formação de águas que eventualmente irão circular como parte da Célula Meridional do Atlântico. A alta variabilidade espaço-temporal da latitude de confluência dessas duas correntes de contorno oeste tem grande impacto na redistribuição do calor e, consequentemente, nas condições climáticas, tanto em nível regional quanto global.

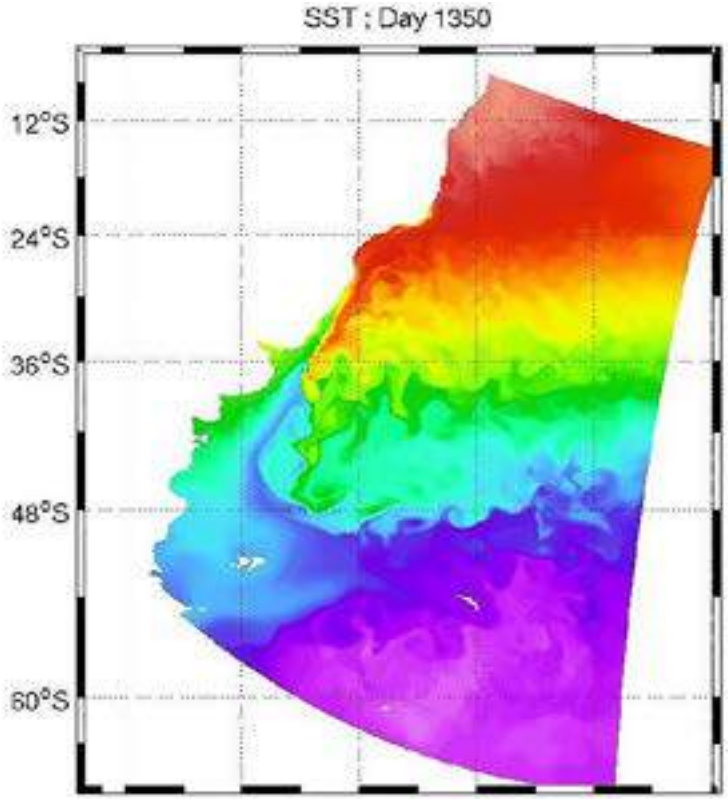



**FIGURA 6.** Resultado de modelo numérico desenvolvido pelo Laboratório de Modelagem Numérica dos Oceanos (LABMON), do IOUSP, mostrando a distribuição de Temperatura da Superfície do Mar na região de confluência Brasil-Malvinas. Essa zona de alto contraste térmico representa uma das mais energéticas de todo o oceano terrestre e desempenha papel de grande importância para o clima, em escalas regional e global.

## 1.6 Plataforma continental sudeste da América do Sul

As correntes do Brasil e das Malvinas fluem ao longo da quebra da plataforma continental, como paredes verticais delimitando as regiões mais rasas da Plataforma continental e o oceano profundo. Na região de Cabo Frio e em outros pontos ao longo da Corrente do Brasil, por um mecanismo conhecido como ressurgência, porções da ACAS são bombeadas para próximo à superfície, por sobre a plataforma continental, propiciando uma maior concentração de nutrientes e, consequentemente, uma maior produtividade biológica.

Sobre a plataforma continental, em escalas de tempo suprainerciais, os principais agentes responsáveis pelo movimento oceânico são também o vento e os gradientes termohalinos, modificados pelo efeito da rotação do planeta (efeito de Coriolis). Nas escalas inerciais e subinerciais, as marés e os processos sinóticos na atmosfera assumem também papel de grande importância.

Nas escalas temporais mais longas, a circulação na plataforma continental sudeste da América do Sul, desde a Patagônia Argentina até as proximidades de Cabo Frio, resulta da ação combinada do vento e das diferenças de densidade. Ao contrário das regiões mais ao largo, onde as diferenças de densidade são causadas principalmente por gradientes de temperatura, sobre a plataforma continental as diferenças de salinidade também contribuem decisivamente para o movimento. Esses gradientes de salinidade são causados principalmente pelo aporte de água doce desde o continente.

Na região em destaque, são duas as principais fontes de água doce para a plataforma continental: o Estreito de Magalhães, no extremo sul da Patagônia, e o Rio da Prata. A massa de água que adentra a plataforma continental patagônica pelo Estreito de Magalhães é originada do Pacífico e tem baixa salinidade por conter uma grande quantidade de águas resultantes de degelo das geleiras andinas. Sob a ação dos ventos e do efeito de Coriolis, essas águas fluem para Norte, contribuindo decisivamente para a formação das Águas de Plataforma ao largo da Argentina. Mais ao norte, essas águas se juntam ao grande volume de água doce do Rio da Prata.

## 1.7 A influência do Rio da Prata na plataforma continental sudeste do Brasil

O Rio da Prata – o quinto maior rio em volume de água no mundo e o segundo maior no Hemisfério Sul – foi descoberto em 1516 por Juan Dias de Solis, um explorador português a serviço da Espanha, em sua busca por uma passagem conectando o Atlântico ao Pacífico. Sua bacia de drenagem cobre aproximadamente 20% do continente sul-americano, encompassando parte substancial da Argentina, Bolívia, Brasil, Uruguai e Paraguai (Fig. 7).

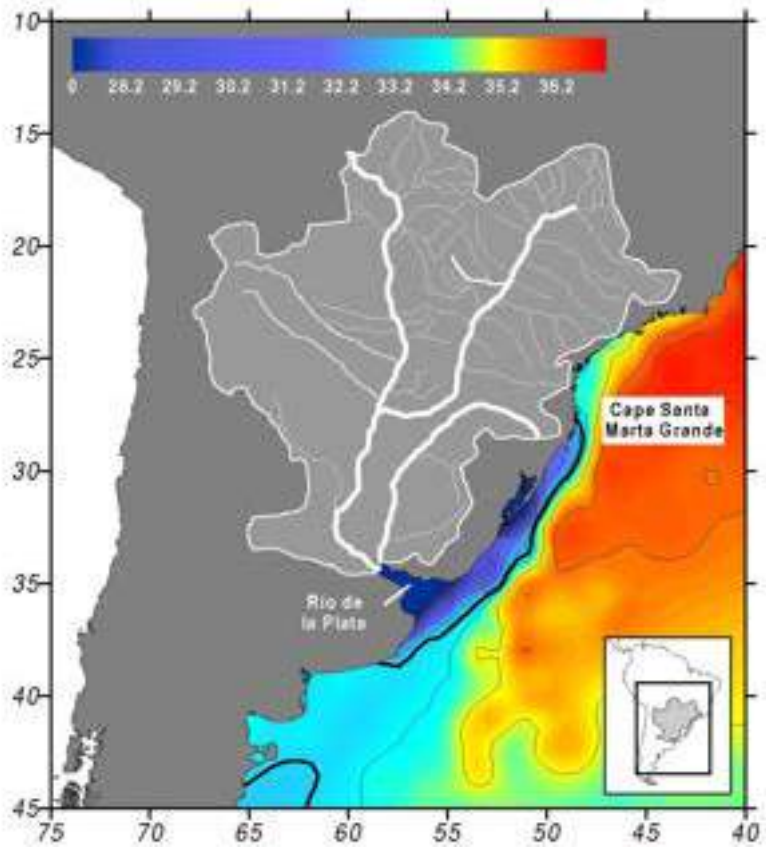



**FIGURA 7.** A bacia hidrográfica do rio da Prata ocupa uma vasta área da América do Sul, incluindo rios importantes como o Paraguai, o Paraná e o Uruguai. Em média, o Rio da Prata injeta cerca de 23 mil metros cúbicos de água por segundo, formando uma pluma de baixa salinidade (cor azul escura), que pode atingir até mesmo a latitude de Cabo Frio, no litoral do Rio de Janeiro.

Sua desembocadura forma o estuário mais largo do mundo (220 km de largura), de onde são lançados em média 23.000 metros cúbicos de água por segundo e cerca de 57 milhões de metros cúbicos de sedimentos, por ano, sobre a plataforma continental adjacente. Essa massa de água lamacenta se espalha ao longo do litoral norte da Argentina, do Uruguai e do sul do Brasil, injetando carbono e poluentes de origem continental para o oceano aberto, alterando a estratificação de densidade da região oceânica adjacente e impactando o ecossistema marinho costeiro. Esses efeitos são modulados por variações climáticas em sua bacia de drenagem. Registros hidrológicos, por exemplo, mostram que fenômenos climáticos globais tais como *El Niño* têm efeitos substanciais na magnitude da descarga do Rio da Prata, podendo atingir valores superiores a 50 mil metros cúbicos por segundo.

Até recentemente, apesar dos impactos econômicos e ambientais, muito pouco era conhecido sobre a pluma formada pelas águas do Rio da Prata sobre a plataforma continental, ou de seus efeitos na física e biologia da região costeira. Há apenas uma década, mesmo a extensão latitudinal (Norte-Sul) dessa pluma era desconhecida.

Por exemplo, durante o inverno Austral de 1993, durante uma campanha de pesquisa conduzida pelo Instituto Oceanográfico da USP (Projeto COROAS), águas de salinidade e temperatura inesperadamente baixas foram detectadas na plataforma continental ao largo de Santos (vide painel A da Fig. 5). Inicialmente pensou-se que essas águas eram resultantes de precipitação ou de descargas fluviais na vizinhança. Entretanto, análises posteriores de imagens de satélite da temperatura da superfície do mar, obtidas durante o período, mostraram que essas águas eram oriundas da região da desembocadura do Rio da Prata.

Hoje, os resultados das pesquisas mostram que a pluma de baixa salinidade formada pelas águas do Prata flui para Norte, devido à ação do vento e do efeito da rotação do planeta. Durante o inverno, quando os ventos de Sudoeste são predominantes, essa massa de água alcança as maiores distâncias ao longo do litoral brasileiro. Há períodos em que combinações de alta descarga e ventos de Sudoeste mais persistentes fazem com que a pluma chegue até mesmo a latitude de Cabo Frio. Quando isso ocorre, a presença dessa água de baixa densidade sobre a plataforma continental interfere no mecanismo de ressurgência (bombeamento) da ACAS para regiões mais internas da plataforma, impactando drasticamente a produtividade primária e a atividade pesqueira na região. Há estudos que mostram uma alta correlação entre variações na captura de pescados com a presença dessas águas ao largo do litoral brasileiro.

## 2. O oceano e o clima do planeta

A molécula de água é formada por dois átomos de hidrogênio e um de oxigênio arranjados em uma configuração espacial tal que a molécula fica polarizada. Ou seja, apresenta um lado positivo e outro negativo. Essa polarização resulta em uma série de propriedades físico-químicas, tais como alto poder de dissolução iônica, formação de polímeros e alto calor específico.

O calor específico da água, cerca de mil vezes maior do que o do ar e um dos mais altos dentre todas as substâncias conhecidas, representa uma grande capacidade térmica. Isto é, a mudança de temperatura da água é relativamente lenta e implica em uma troca de grandes quantidades de calor com o meio. Essa alta "inércia térmica", associada com a grande quantidade de água que cobre a superfície do planeta, é um elemento fundamental no controle das condições climáticas.

As complexas reações químicas que levaram ao surgimento da vida no planeta Terra certamente ocorreram no ambiente termicamente estável representado pelos oceanos, e a manutenção dessa vida só é possível devido à grande massa líquida que recobre o planeta.

O Sol é a fonte principal da energia que mantém o clima da Terra. Princípios termodinâmicos básicos estabelecem que todo o corpo que recebe calor se aquece e emite calor, até atingir uma temperatura de equilíbrio, quando a quantidade de calor emitida for igual à recebida. Assim, ao longo de milhões de anos a Terra tem apresentado uma temperatura de equilíbrio, por meio da devolução para o espaço do calor recebido do Sol. O simples fato de o leitor estar neste momento lendo estas linhas comprova definitivamente o fato de essa temperatura de equilíbrio ter se mantido em uma faixa propícia à vida, ao longo de um longo período da história do planeta. Menos óbvio, porém, é o fato de essa temperatura de equilíbrio ser distribuída sem grandes variações espaciais.

O balanço entre o calor recebido do Sol e a radiação emitida de volta ao espaço varia latitudinalmente. Em baixas latitudes existe um ganho líquido de calor, ou seja, a radiação de ondas curtas recebida do Sol é maior que a radiação de ondas longas devolvida ao espaço. Nas altas latitudes ocorre o inverso. Na ausência de um mecanismo transferindo o excesso de calor das baixas para as altas latitudes, a temperatura média da região tropical seria muito superior e a das regiões subpolares muito inferior aos valores atuais. Na verdade, essas temperaturas seriam tão diferentes que a vida, como ela é na Terra, só seria possível em uma faixa muito estreita nas latitudes médias. O movimento da capa fluida formada pela atmosfera e os oceanos é o mecanismo responsável pela transferência meridional de calor, resultando em variações latitudinais de temperatura que permitem a vida em praticamente toda a extensão da superfície terrestre.

Na atmosfera, a transferência de calor é feita principalmente pelos movimentos sinóticos, ou seja, desvio dos padrões médios climatológicos. Nos oceanos, a circulação média é o mecanismo principal nesse transporte meridional de calor. De uma forma geral, o papel combinado desses dois importantes componentes do sistema climático ocorre da seguinte forma. Em latitudes médias e baixas, o movimento médio dos oceanos transporta calor em direção aos polos. Nas médias e altas latitudes o calor trazido pelos oceanos é absorvido pela atmosfera e redistribuído sobre as diferentes regiões oceânicas e continentais. Após perder calor para a atmosfera, a massa de água transportada pelas correntes oceânicas desde as baixas latitudes acaba por se tornar mais densa que as águas de origem local, afunda e retorna lentamente para baixas latitudes.

Na ausência de continentes, o padrão médio de circulação oceânica devido a essa troca de calor seriam células similares às células de Haddley e Walker na atmosfera. Porém, devido à forma como os continentes se distribuem nos dias de hoje, o padrão médio da circulação oceânica resultante dos gradientes meridionais de temperatura e salinidade se apresenta como a grande esteira transportadora termohalina.

## 2.1 O papel do Oceano Atlântico

De uma forma geral, esse mecanismo global transporta, nas camadas superiores, águas desde o Pacífico e o Índico até o Atlântico Sul. Ao sul da África, águas oriundas do Índico adentram o Atlântico por meio do processo conhecido como o "**Vazamento das Agulhas**". Ou seja, enormes quantidades de águas mais quentes e salinas do Índico aprisionadas em "anéis" destacados da Corrente das Agulhas, devido às instabilidades hidrodinâmicas na região onde essa corrente retroflete e se volta para Leste (Fig. 8). Essa via de transporte de águas entre as duas bacias é conhecido como a "Rota Quente".

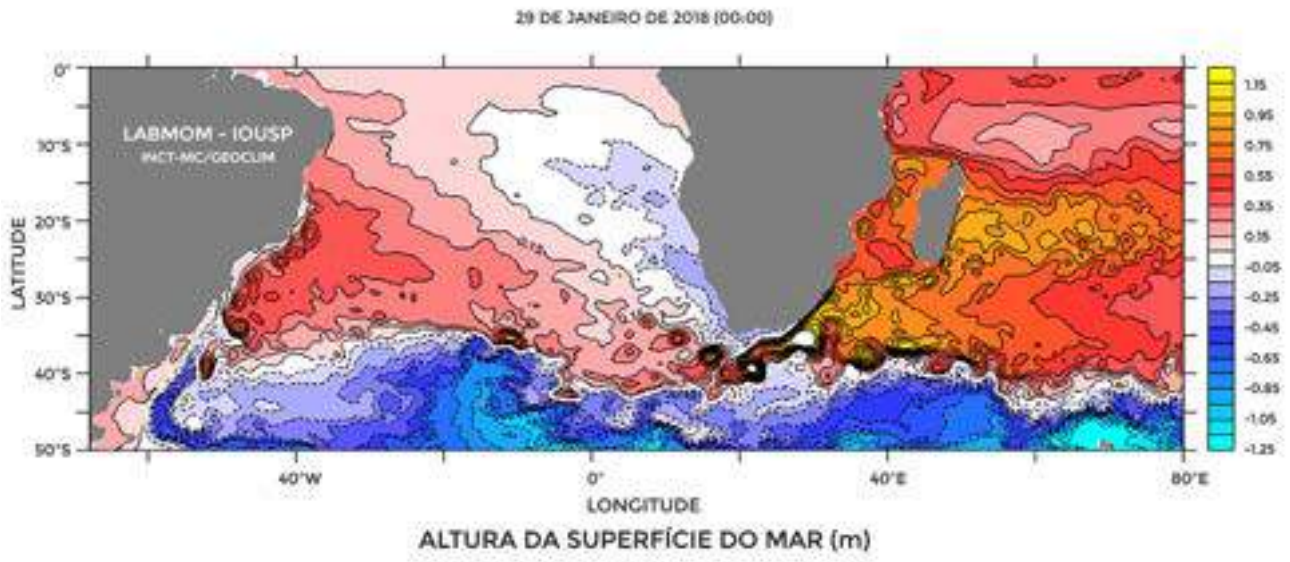



**FIGURA 8.** Vazamento das Agulhas. Resultado de modelo numérico mostrando a transferência de águas superficiais quentes, do Índico para o Atlântico Sul, por meio de anéis e filamentos na região de retroflexão da Corrente das Agulhas.

Do lado oeste da bacia, ao sul da América do Sul, águas mais frias e menos salinas transportadas pela Corrente Circumpolar Antártica (CCA) adentram o Atlântico Sul e uma parte dessas águas flui para Norte ao largo da plataforma continental Argentina, na forma da Corrente das Malvinas. Em aproximadamente 38°S essa corrente se encontra com a Corrente do Brasil (CB) e se volta para Sudeste, reintegrando-se à CCA.

Na região de confluência com a CB, parte dessas águas vindas do Pacífico se mistura com águas locais contribuindo com a formação da massa de água das regiões superiores do Atlântico Sul. Essa rota de entrada de águas através da Passagem de Drake é conhecida na literatura como a "Rota Fria".

Nas camadas superiores da região subtropical do Atlântico Sul, as águas transportadas pelas duas rotas alimentam a Corrente Sul Equatorial . Essa corrente se dirige para Noroeste até as proximidades da costa brasileira, entre aproximadamente 5°S e 10°S, onde se bifurca.

O ramo sul dessa bifurcação dá origem à Corrente do Brasil. O ramo norte forma a Corrente Norte do Brasil (CNB), transportando águas em direção ao Equador, alimentando um sistema complexo de correntes que resulta em um transporte líquido de águas do Hemisfério Sul para o Norte, transportando o excesso de calor das regiões tropicais para as altas latitudes do Atlântico Norte.

## 2.2 O furacão Catarina

A Corrente do Brasil transporta e redistribui calor ao longo de sua trajetória no Atlântico Sudoeste. Parte desse calor é transferido para a atmosfera, servindo de fonte de energia para diferentes manifestações atmosféricas na região. Dentre esses fenômenos meteorológicos, destacam-se tempestades conhecidas como ciclones extratropicais, formados inicialmente por instabilidades atmosféricas, mas que dependem do reservatório de calor na camada superficial do oceano para sua evolução e magnitude. Um exemplo dessas perturbações atmosféricas foi o Catarina, o primeiro furacão que se tem registro no Atlântico Sudoeste, em março de 2004 (Fig. 9).

Estudos das condições oceânicas durante a ocorrência desse fenômeno mostraram que a temperatura da superfície do mar na região estava mais alta que o normal, o que possivelmente tenha sido a razão para o crescimento incomum de um ciclone extratropical, transformando-o em e um furacão.

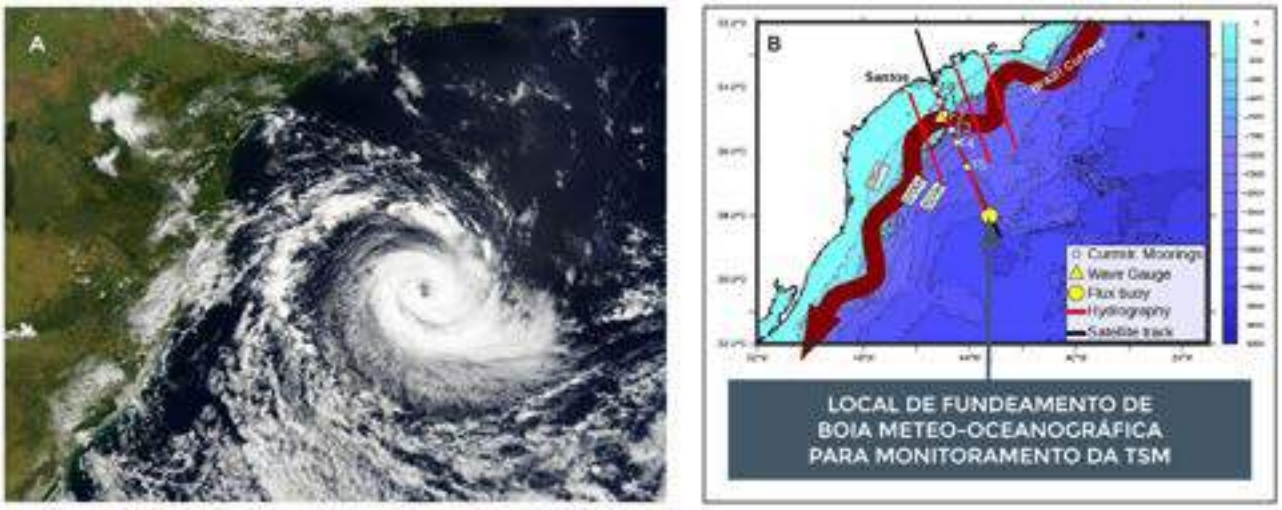



**FIGURA 9.** A) Em março de 2004, possivelmente devido à ocorrência de temperaturas da superfície do mar (TSM) anomalamente altas no Atlântico Sudoeste, um ciclone extratropical formado por instabilidades atmosféricas desenvolveu-se de forma incomum, atingindo o status de furacão. B) Com o objetivo de monitorar o reservatório de calor na camada superficial do oceano, possibilitando a previsão de futuras ocorrências desse fenômeno, será fundeada uma boia meteo-oceanográfica em 28°S, 42°W, como parte de projeto financiado pelo Programa de Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia (MCT/CNPq/FAPESP).

## 2.3 O Dia Depois de Amanhã

No filme "O Dia Depois de Amanhã" (*The Day After Tomorrow*, em inglês), Hollywood aborda de forma sensacionalista, porém com um certo embasamento científico, um tema relacionado com a resposta oceânica ao aquecimento global. Colocado de maneira simplista, um dos efeitos do aquecimento do planeta é o degelo das camadas de gelo no Ártico, o que é um fato já verificado. Esse degelo resulta em uma grande quantidade de água de baixa salinidade nas altas latitudes do Atlântico Norte, fazendo com que as águas trazidas de sul pela CMA se tornem mais pesadas muito antes de atingir as latitudes presentemente alcançadas. Esse afundamento antecipado resultará em menor quantidade de calor liberado para a atmosfera, eventualmente fazendo com que a temperatura caia.

Como a inércia térmica oceânica é grande, o processo de alteração da corrente é lento e, uma vez desencadeado, demandará um tempo grande para retornar ao estado original. Assim, o resultado final seria uma espécie de uma nova era glacial no Atlântico Norte.

Alguns estudos paleoclimáticos mostram que a circulação termohalina durante a última glaciação tinha a sua componente norte, completamente enfraquecida, sendo dirigida basicamente pela formação de água densa na região da Antártica (Clauzet *et al.*, 2007). Essa configuração sugere uma boa correlação entre o padrão de circulação e as condições climáticas. Experimentos com modelos numéricos também corroboram essa hipótese. Simulações com modelos acoplados oceano-atmosfera mostram que o enfraquecimento da Circulação Termohalina resulta no Atlântico Norte mais frio, contrastando com o Atlântico Tropical e Sul mais quentes, devido à redução do transporte de calor pelo oceano (Haarsma *et al.*, 2015; Vellinga & Wood, 2002; Dahl *et al.*, 2005; Zhang & Delworth, 2005).

## 3. O oceano como absorvedor de carbono

Os oceanos absorvem grandes quantidades do $CO_2$ atmosférico. Um quarto deste gás presente na atmosfera é produzido pelo ser humano, através da queima dos combustíveis fósseis, que acaba, mais tarde, sendo armazenado nos próprios oceanos. Em algumas regiões oceânicas este carbono pode ser armazenado durante séculos ajudando, assim, na redução dos efeitos do aquecimento global.

Com a absorção do $CO_2$, aspectos da biogeoquímica dos oceanos vão se alterando. O conteúdo total de carbono inorgânico nos oceanos aumentou em quase uma centena de gigatoneladas (Gt = bilhões de toneladas) entre o início da era industrial (1750) e o final do século XX. E continua a aumentar.

Existem evidências recentes que hoje o oceano está absorvendo menos carbono de origem antrópica (em termos relativos) do que no período entre 1750 e 1994. Estas evidências são consistentes com a expectativa de diminuição da capacidade dos oceanos de absorver carbono, com impactos negativos no cenário de mudanças climáticas globais. No entanto, a carência de medidas consistentes não permite uma conclusão definitiva.

Ao mesmo tempo, o excesso de $CO_2$ sequestrado reage com a água do mar tornando-a mais ácida, contribuindo para a redução do pH, o que acarreta em consequências drásticas para a biodiversidade marinha. Os efeitos já são perceptíveis na destruição dos recifes de corais.

A absorção de $CO_2$ excedente na interface oceano-atmosfera também contribui para a redução da capacidade dos oceanos de absorver $CO_2$. A redução do pH além de um ponto crítico poderia levar a um fluxo do $CO_2$ dos oceanos de volta para a atmosfera, aumentando mais ainda o aquecimento global. Nesse cenário os oceanos deixariam de atuar como moderadores do clima.

Com a crescente tendência de aumento de $CO_2$ atmosférico e as incertezas sobre os processos oceânicos descritos anteriormente, diversos estudos e revisões têm sido realizados pela comunidade científica, no intuito de tentar esclarecer tais questões controvérsas e encontrar soluções mais ambientalmente corretas e viáveis. Embora todos estes estudos forneçam subsídios básicos para entender o ciclo do $CO_2$ nos oceanos, a contextualização para a região do Atlântico Sul ainda é necessária.

O Brasil, pela sua enorme extensão costeira margeando o Atlântico Sul e pelo seu elevado peso no cenário sociopolítico entre os países que margeiam esta bacia oceânica, deve, portanto, fornecer contribuição científica significativa ligada à temática proposta.

## Referências Bibliográficas

CLAUZET, G., WAINER, I., LAZAR, A., BRADY, E, OTTOBLIESNER, B.A. 2007. numerical study of the South Atlantic circulation at the Last Glacial Maximum. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, v. 253, p. 509-528, 2007.

DAHL K.A., BROCCOLI A.J., STOUFFER R. 2005. Assessing the role of North Atlantic freshwater forcing in millennial scale climate variability: a tropical Atlantic perspective. Clim. Dyn. 24:325–346

HAARSMA, R.J., SELTEN, F.M., DRIJFHOUT, S.S.. 2008. Decelerating Atlantic meridional overturning circulation main cause of future west European summer atmospheric circulation changes. Environ. Res. Lett. 10 094007, 9p.

VELLINGA M., WOOD R.A. 2002. Global climatic impacts of a collapse of the Atlantic thermohaline circulation. Clim. Change. 54:251–267.

ZHANG R., DELWORTH T.L. 2005. Simulated tropical response to a substantial weakening of the Atlantic thermohaline circulation. J. Clim. 18:1853–1860.

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 12*

# ONDAS NO MAR

*Sueli Susana de Godoi & Joseph Harari*

REVISÃO: RICARDO DE CAMARGO (IAG USP)

CITAÇÃO SUGERIDA: GODOI, Sueli Susana de; HARARI, Joseph. Ondas no mar. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 12: p. 255-273.

# Ondas no Mar

*Sueli Susana de Godoi & Joseph Harari*

## 1. Introdução

Informações sobre ondas nos oceanos, decorrentes de observações, análise de dados, modelagem numérica e sistemas de previsão, são de suma relevância nos meios acadêmico, científico e social e econômico, em grande número de atividades, como a engenharia costeira, a proteção à navegação, o lazer, entre outros.

A superfície do mar apresenta variações contínuas de nível. Em qualquer local, a superfície é alternadamente erguida e rebaixada, em relação a uma posição média. Visando descrever o fenômeno das ondas, são usados os seguintes parâmetros, relativos a um único distúrbio simples (Fig. 1):

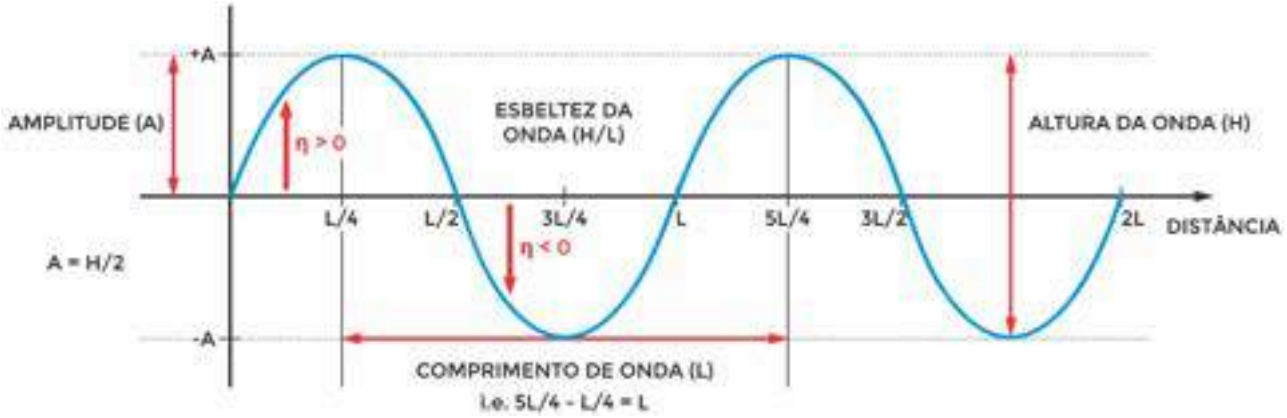



**FIGURA 1.** Parâmetros de uma onda: perfil vertical de duas ondas oceânicas idealizadas, mostrando as dimensões lineares e a forma senoidal. *Adaptado de Open University (1999).*

**Elevação η:** é a distância vertical instantânea de um ponto da superfície a um nível representando a superfície sem distúrbio; depende da posição $x$ e do tempo $t$, e pode assumir valores positivos ou negativos.

**Altura de onda ($H$):** é a distância vertical entre uma crista (máxima elevação) e o cavado (mínima elevação) adjacente.

**Amplitude ($A$):** é a metade da altura de onda, $A = H/2$.

**Comprimento de onda ($L$):** é a distância horizontal entre cristas consecutivas (ou cavados consecutivos), na direção de propagação da onda.

**Período da onda ($T$):** é o intervalo de tempo entre a ocorrência de cristas (ou cavados) sucessivos, numa posição fixa; frequência é o inverso do período, $f = 1/T$.

**Velocidade de fase ($c$):** é a velocidade na qual a onda viaja, $c = L/T$.

**"Esbeltez":** é a relação $H/L$; ondas baixas e longas têm pequena esbeltez, ondas altas e curtas possuem grande esbeltez.

## 2. Geração de ondas e forças controladoras - tipos de ondas

Basicamente, as ondas do mar podem ser classificadas como:

**Ondas progressivas:** são aquelas em que a configuração da onda se move, e a energia se desloca através da superfície.

**Ondas estacionárias:** são formadas a partir de uma superposição de duas ondas idênticas viajando em sentidos opostos: nas ondas estacionárias a configuração da onda não se move, e não há transporte de energia.

**Ondas de corpo:** ondas que viajam com o material, como por exemplo ondas sonoras, onde a variável física que sofre oscilação é a pressão.

Um exemplo de espectro de ondas pode ser visualizado no esquema da Figura 2.

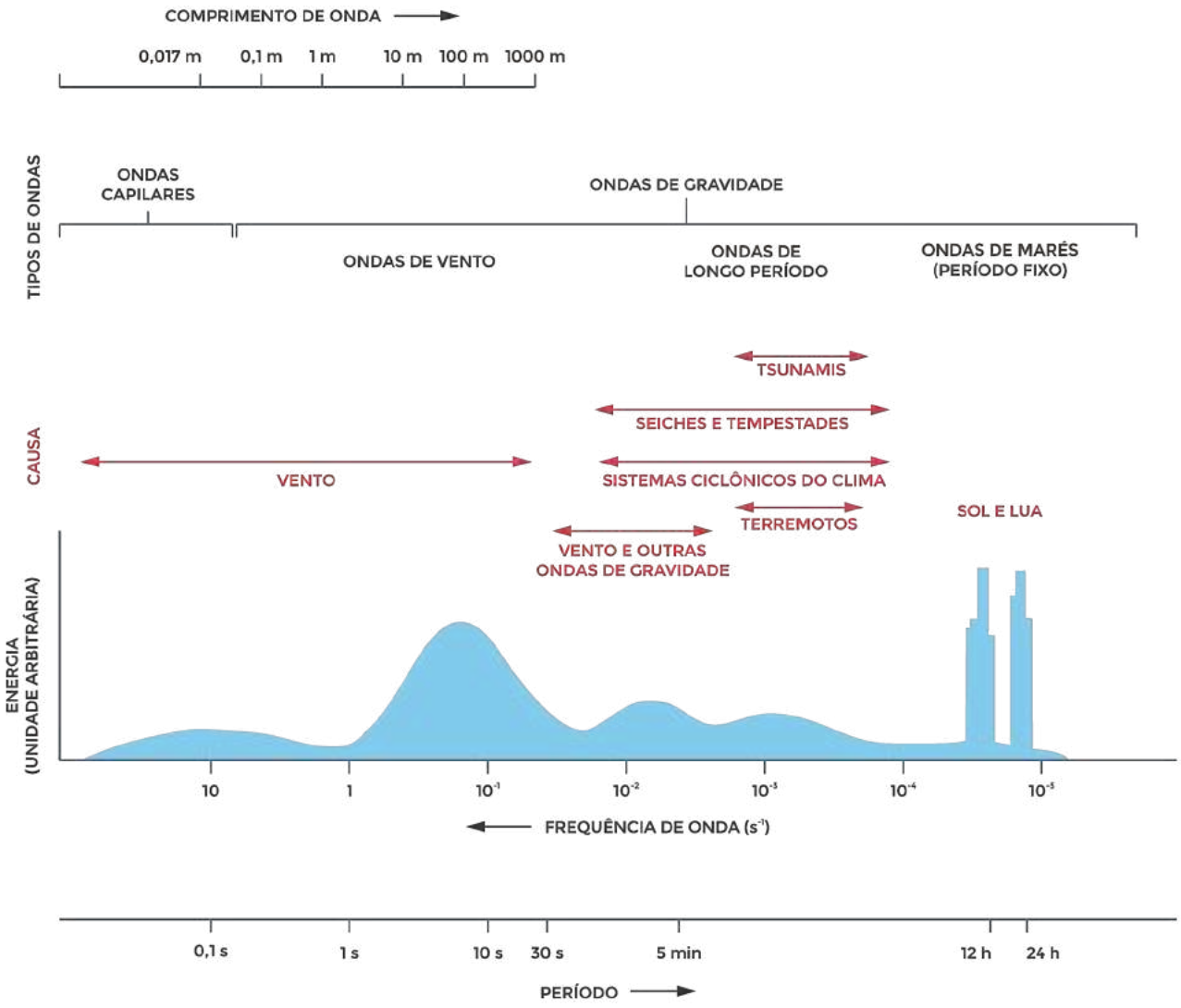



**FIGURA 2.** Espectro de energia das ondas - Tipos de ondas de superfície, mostrando as relações entre comprimento de onda, frequência e período da onda, a natureza das forçantes atuantes e a quantidade de energia em cada tipo de onda. *Adaptado The Open University, 2000.*

Os principais efeitos geradores de ondas nos oceanos são ventos e maremotos, além da atração gravitacional do Sol e da Lua. Estas últimas forçantes atuam para formar um tipo especial de ondas – as ondas de maré. As principais forças que controlam as características das ondas, denominadas de "forças restauradoras", são:

**Tensão da superfície da água:** importante somete para ondas de pequenos valores de amplitude, período e comprimento de onda;

**Força da gravidade**;

**Força de Coriolis:** associada à rotação da Terra, importante somente para ondas muito longas.

Algumas características dos principais tipos de ondas no oceano são comentadas a seguir (Le Blond & Mysak, 1978; Kinsman, 1984; Pond & Pickard, 1991):

**Ondas capilares:** ventos muito fracos provocam distúrbios muito pequenos na superfície do mar, gerando as ondas capilares, com alturas de décimos de centímetros, comprimentos de poucos centímetros e períodos de décimos de segundos; a força restauradora é a tensão da superfície do mar.

**Ondas geradas pelo vento tipo vagas:** quanto mais fortes sopram os ventos, maior a amplitude das ondas geradas. As maiores amplitudes são associadas com maiores comprimentos de onda e maiores períodos: a presença dos ventos faz com que as ondas geradas não tenham feições regulares, mas parecendo ter "cristas reduzidas". Ondas das mais variadas amplitudes, comprimentos e períodos podem ser identificadas. As cristas das ondas são notavelmente na forma de picos e tendem a ser inclinadas na direção de propagação. Ainda que a direção geral de progressão coincida com a dos ventos presentes e recentes, há consideráveis variações de ondas individuais; isto resulta em picos mais curtos e no "mar confuso". A Figura 3 ilustra imagem do estado do mar, em uma região de tempestade.

**FIGURA 3. Ondas no mar geradas pelo vento, na região de tempestade.** *Foto: Pexels por Pixabay*.

**Marulho (*swell*):** Na ausência de ventos locais, perturbações na superfície em regiões oceânicas se portam como ondas longas e regulares, com períodos de 10 a 30 segundos. A amplitude, tipicamente de 1 a 2 m, é pequena em comparação com o comprimento de onda, da ordem de poucas centenas de metros. A configuração da superfície na direção de propagação da onda, no oceano aberto, se aproxima a uma função seno (Fig. 4).

No marulho as cristas e cavados formam linhas longas e retas, que se estendem por pelo menos 6 ou 7 comprimentos de onda, perpendicularmente à direção de propagação. Uma única crista viaja uma distância $L$ num tempo $T$, de modo que a velocidade de fase da onda ou celeridade é dada por $c = L/T$, variando tipicamente de 3 a 10 m/s (10 a 36 km/h). O marulho representa ondas geradas pelo vento que viajaram para fora da área de atuação do vento, ou o vento local cessou.

**FIGURA 4. Ondas tipo "*swell*" no oceano profundo e chegando à praia.** *Foto: Francisco Luiz Vicentini Neto.*

***"Surf beat"*:** ondas resultantes da sobreposição de ondas incidentes em praias inclinadas são chamadas "*surf beat*", cujo período típico é de vários minutos.

**"Seiches":** corpos d'água apresentam frequências naturais de oscilação (ressonâncias), regulados pela profundidade, dimensões horizontais e configuração de bacias, plataformas, baías, estuários, etc. Estas frequências naturais de oscilação, chamadas "seiches", normalmente são excitadas por condições meteorológicas ou marés. Um seiche é uma onda estacionária, em um corpo fechado ou parcialmente fechado de água. Uma onda estacionária oscila no tempo, mas o perfil de amplitude não se move no espaço. Seiches e fenômenos relacionados com seiches têm sido observados em lagos, reservatórios, baías, portos e mares. O requisito fundamental para a formação de um seiche é a massa de água ser pelo menos parcialmente delimitada, permitindo a formação da onda estacionária.

**Ondas de tormentas:** são ondas devidas a ventos muito fortes (Fig. 5).

**FIGURA 5. Ondas de tempestade/tormenta.** *Foto: Patricia Alexandre por Pixabay*.

**Tsunamis:** são ondas geradas por distúrbios do fundo marinho, maremotos ou terremotos (Fig. 6), em intervalos irregulares; seu nome japonês é indicativo de sua frequente ocorrência no Oceano Pacífico. Devido ao fato de que a perturbação ocorre no interior do sistema, estas ondas são denominadas também de ondas de corpo. No mar aberto, essas ondas longas passam praticamente desapercebidas, embora a energia transmitida seja grande; já em regiões rasas, essas ondas atingem um efeito espetacular, formando verdadeiras paredes de água, de até 5 ou 10 metros de altura, causando destruição avassaladora na costa. Os períodos das ondas são da ordem de 10 a 60 minutos, e os comprimentos de onda no oceano profundo vão de poucos quilômetros a centenas de quilômetros.

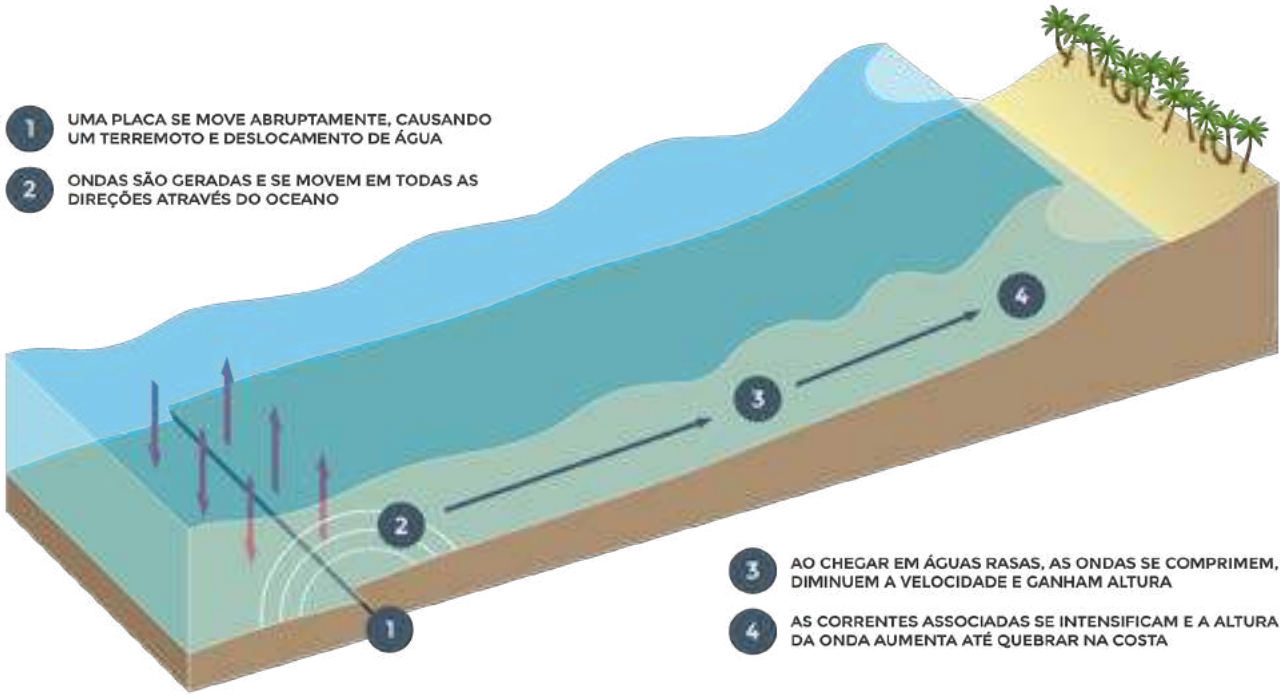



**FIGURA 6. O princípio de geração de um "tsunami" no oceano, devido a abalo sísmico e movimentação de placas tectônicas.** *Ilustração: Leandro Coelho, adaptado de University of Alaska*.

**Marés de tormenta ou ressacas:** ventos persistentes podem empilhar água contra a costa, elevando de forma anormal o nível da superfície do mar; podem também rebaixar de forma exagerada este nível. Esses efeitos são chamados marés de tormenta ou ressacas, e podem ser tratados como ondas de longo período, embora esses distúrbios não sejam, estritamente falando, periódicos.

**Marés astronômicas ou simplesmente marés:** são distúrbios resultantes da atração gravitacional do Sol e da Lua, com periodicidades bem definidas. Os movimentos da água são característicos de ondas longas, sendo muito influenciados pela configuração das bacias e pela aceleração de Coriolis.

**Ondas de trans-marés:** são formadas pela composição de distúrbios gerados por tempestades ou furacões com as marés astronômicas.

**Ondas planetárias:** são ondas muito longas, devidas à variação da vorticidade planetária, que consiste na variação do efeito de rotação da Terra nas correntes marítimas; como exemplo, se tem as ondas de Rossby (que sempre se deslocam para Oeste, ao longo dos paralelos terrestres) e ondas de Kelvin (que se propagam nas plataformas continentais e no Equador para leste).

No presente capítulo, ênfase será dada às ondas de gravidade. Especificamente, são abordadas ondas geradas pelo vento: vagas e marulhos (Kinsman, 1984).

## 3. Relação entre ventos e ondas

Qualitativamente, ventos fortes produzem ondas altas, que tendem a ser longas; e comprimentos de ondas longos são associados com longos períodos. “Pista” é a extensão horizontal em que o vento age na superfície do mar, a partir do ponto de observação. "Duração" é o tempo de atuação do vento na superfície do mar.

Matematicamente, ondas geradas pelo vento são representadas pela somatória de termos senos e cossenos. Os parâmetros característicos das ondas podem apresentar valores extremos e valores médios. Por exemplo, a "altura significativa das ondas" ($\boldsymbol{H_{1/3}}$ ou $\boldsymbol{H_s}$), é a média das alturas de um terço das ondas de maior amplitude (numa região, em um particular intervalo de tempo). Somente ventos fortes, com extensa pista ou longa duração, geram ondas significativas no oceano; o arrasto do vento gera ondas cuja esbeltez ($\boldsymbol{H/L}$) tem valores entre 0,03 e 0,06 (tipicamente, para ventos muito fortes, $\boldsymbol{H}$ = 5 m e $\boldsymbol{L}$ = 100 m). O "período significativo" é a média dos períodos associados com as ondas consideradas no cálculo da "altura significativa".

A relação entre velocidade do vento, estado do mar e altura significativa das ondas pode ser apreciada pelo uso da Escala Beaufort, originalmente proposta pelo Almirante britânico Sir Francis Beaufort (1774-1857) – ver Tabela 1. Essa escala é válida somente para ondas geradas no interior de um sistema com atuação de vento local e supõe-se um tempo suficientemente longo para que o padrão das ondas (altura, comprimento, etc.) seja estabelecido (resultando então, no “mar completamente desenvolvido”).

Por outro lado, “Mar de Almirante” é uma expressão usada para um mar extremamente calmo, praticamente sem ondulações (Fig 7).

**TABELA 1.** Escala Beaufort: relação entre denominação, velocidade do vento (m/s), estado da superfície do mar e altura significativa das ondas (m). *Adaptado de Open University (1999).*

| Beaufort N° | Nome | Velocidade do vento (m/s) | Estado da superfície do mar | Altura significativa das ondas (m) |
|---|---|---|---|---|
| **0** | Calmaria | 0,0 - 0,2 | Mar como um espelho | 0 |
| **1** | Vento muito brando | 0,3 - 0,5 | Marolas na água em forma de escamas e sem cristas com espuma | 0,1 - 0,2 |
| **2** | Brisa leve | 1,6 - 3,3 | Pequenas ondulações, cristas translúcidas, mas não quebram | 0,3 - 0,5 |
| **3** | Brisa suave | 3,4 - 5,4 | Ondulações maiores, as cristas começam a quebrar, espuma espalhada | 0,6 - 1 |
| **4** | Brisa moderada | 5,5 - 7,9 | Pequenas ondas se tornando mais longas, espuma razoavelmente frequente | 1,5 |
| **5** | Brisa fresca | 8,0 - 10,7 | Ondas moderadas, tomando formas cada vez mais longas, muita espuma e chances de borrifo | 2 |
| **6** | Brisa forte | 10,8 - 13,8 | Ondas grandes se formando, cristas de espuma branca se espalham por todos os lados e grande probabilidade de borrifos | 3,5 |
| **7** | Vento moderado | 13,9 - 17,1 | Mar revolto, espuma branca de arrebentação, o vento "arranca" camadas de espuma | 5 |
| **8** | Vento fresco | 17,2 - 20,7 | Ondas razoavelmente altas e com grande comprimento, faixas com espuma branca, fraca arrebentação | 7,5 |
| **9** | Vento forte | 20,8 - 24,4 | Ondas altas, faixas de espuma densa, borrifos começam a atrapalhar a visibilidade | 9,5 |
| **10** | Vento muito forte | 24,5 - 28,4 | Ondas muito altas, o vento "arranca" faixas de espuma, a superfície do mar fica branca; a visibilidade é afetada | 12 |
| **11** | Tempestade | 28,5 - 32,7 | Ondas excepcionalmente altas, o mar está coberto por longas faixas de espuma, navios de pequeno e médio porte somem no cavado das ondas, visibilidade bastante afetada | 15 |
| **12** | Furacão | ≥ 32,7 | Ar repleto de espuma e borrifos, mar completamente branco e borrifos, visibilidade bastante reduzida | ≥ 15 |

**FIGURA 7.** **"Mar de almirante": mar calmo, espelhado, praticamente sem ondulações.** *Foto: Bruno Coelho.*

Dada a variabilidade das ondas no mar, surge a questão de como quantificar uma dada onda para a análise de intervenções numa região costeira. Uma primeira abordagem consiste na análise estatística de dados de ondas observadas em determinado local.

Por exemplo, um registro adequado das alturas permite a determinação da função de densidade de probabilidade desta variável. Assim, pode-se definir valores da altura das ondas que só são superados a determinados intervalos de tempo; por exemplo, numa determinada região, a altura de onda de 5 m é superada somente a cada 10 anos.

Uma análise análoga pode ser efetuada para o período das ondas registradas, podendo-se inclusive analisar estatisticamente de forma conjunta a altura e o período das ondas.

Outra forma de abordar a quantificação de ondas na superfície do mar é através do espectro de energia de ondas, o qual consiste em uma função que relaciona o quadrado da altura da onda (proporcional à energia da onda), que se propaga em uma dada direção, com a frequência ou o período desta onda.

Basicamente, o espectro mostra a distribuição de energia em função do período das ondas, para uma dada direção de propagação. Caso sejam consideradas todas as direções possíveis de propagação, tem-se, então, o espectro direcional de energia. O espectro de energia pode ser obtido usando medições diretas das ondas ou fazendo uso de modelos numéricos de simulação da propagação de ondas.

## 4. Crescimento das ondas e mar totalmente desenvolvido

As regiões em que as ondas são geradas pelo vento são chamadas de pistas de onda. Para ocorrer um acréscimo de energia no grupo de ondas presente na pista, algumas especificações devem ocorrer: na região de formação os ventos devem ser fortes e permanentes, de mesma direção, e a pista deve ser relativamente extensa, da ordem de centenas de quilômetros.

Os primeiros cálculos de ondas geradas pelo vento foram realizados no projeto JONSWAP - *Joint North Sea Wave Project* (Hasselmann *et al.*, 1973). Baseado em dados observacionais foram desenvolvidas as seguintes relações empíricas para o cálculo da altura significativa das ondas ($H_s$, em metros) e do período ($T$, em segundos), em função da intensidade do vento a 10 m de altura ($U_{10}$, em m/s), da pista de vento ($F$, em metros) e aceleração da gravidade ($g$, em m/s):

$$\frac{g.H_S}{U_{10}^2} = 0{,}0016 \left(\frac{g.F}{U_{10}^2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{g.T}{U_{10}} = 0{,}2857 \left(\frac{g.F}{U_{10}^2}\right)^{\frac{1}{3}}$$

De acordo com estas equações, o aumento da intensidade do vento e da pista produz maiores alturas de onda, mas existe um limite para o crescimento; este limite ocorre quando a velocidade de fase da onda atinge a velocidade do vento em superfície (Pierson & Moskowitz, 1964). Quando ambos se propagam com mesma velocidade, o vento não transfere mais energia para o oceano, atingindo o estágio de maturação ou desenvolvimento total. Neste estágio tem-se o "oceano completamente desenvolvido". Observações comprovam a existência desse limite, em que:

$$\frac{g.H_S}{U_{10}^2} = 0{,}2433$$

$$\frac{g.T}{U_{10}} = 8{,}134$$

As relações precedentes limitantes podem ser observadas na Figura 8, onde se tem a altura significativa do campo de ondas (m) em função da pista (km) que o vento sopra. Observar que, dado um valor de vento, mesmo que a extensão da pista aumente, a altura significativa da onda e o período não ultrapassam um valor limite, atingindo portanto um valor de estabilização. Conforme colocado, este estágio configura o oceano completamente desenvolvido, isto é, a taxa de energia fornecida pelo vento é equivalente à taxa de energia dissipada pelas ondas.

A partir do limite em que as ondas não podem mais receber energia dos ventos, estas tendem a se propagar para fora da região de geração formando o marulho (*swell*). Conforme se propagam, as ondas de diversas velocidades e frequências separam-se umas das outras, configurando o fenômeno da dispersão das ondas. Após percorrer vários quilômetros, agrupam-se então os conjuntos de ondas com parâmetros relativamente semelhantes, chamados de grupos de ondas (Kinsman, 1984). Na natureza apenas as ondas com maior amplitude e período se organizam dessa maneira; entretanto são raros os casos em que só exista marulho (*swell*) ou apenas ondas de vento (vagas).

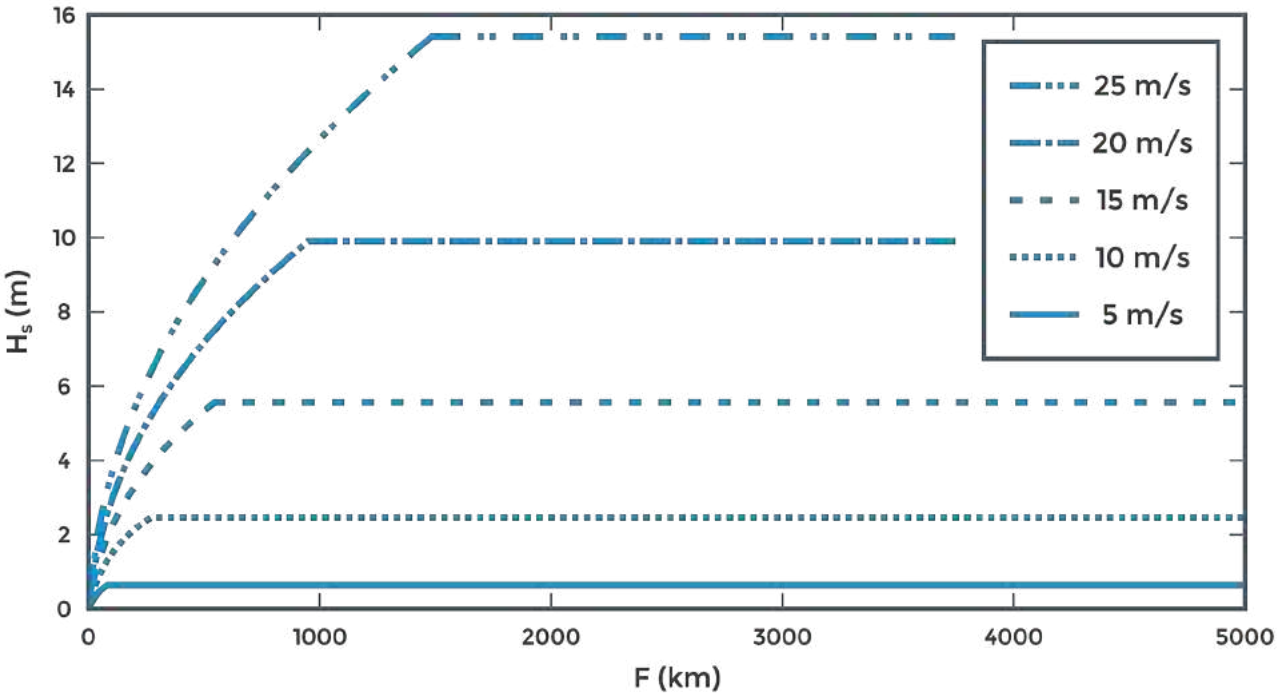



FIGURA 8. Desenvolvimento limite da altura significativa $H_s$ (m), em função da extensão da pista (km), para velocidades do vento de 5, 10, 15, 20 e 25 m/s. As linhas retas paralelas configuram um oceano completamente desenvolvido.

## 5. A teoria de Airy de ondas de gravidade

A teoria de onda clássica ou teoria de Airy (1841) trata de ondas planas de forma permanente, partindo das seguintes hipóteses simplificadoras: a amplitude da perturbação na superfície (***A***) é muito pequena se comparada ao comprimento de onda (***L***) e à profundidade (***h***); o fluido tem profundidade uniforme ***h***; o fundo é suave e impermeável; a pressão atmosférica no nível do mar é uniforme; o fluido é não viscoso, o que significa que o atrito é desprezado; o fluido é incompressível e homogêneo, significa que a densidade da água do mar é constante; a aceleração de Coriolis pode ser desprezada, excluindo ondas muito longas; e a tensão na superfície do mar pode ser desprezada, excluindo ondas muito curtas.

Assim, a superfície $\eta$ varia no espaço (na direção de propagação $x$) e no tempo ($t$) na forma:

$$\eta = A \cos\left[2\pi\left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T}\right)\right]$$

A velocidade de fase é calculada através da expressão:

$$c = \sqrt{\frac{g \tanh(kh)}{k}}$$

onde $k$ é o número de onda ($k = 2\pi / L$) e a tangente hiperbólica é calculada através de:

$$\tanh \propto = \frac{e^{\propto} - e^{-\propto}}{e^{\propto} + e^{-\propto}}$$

A expressão da velocidade de fase ***c*** tem duas simplificações importantes. Sendo ***h*** a profundidade e ***L*** o comprimento de onda, em águas profundas (***h / L > 0,5***), a velocidade de propagação das ondas é dada por:

$$c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$$

Para águas rasas (***h / L < 0,05***), a velocidade de propagação das ondas é:

$$c = \sqrt{gh}$$

As equações da Teoria de Airy definem o movimento orbital das partículas individuais de água. Em locais profundos, as partículas se movem em órbitas circulares fechadas, com raio $R = A^{(-2\pi z/L)}$, ou seja, o raio da órbita circular diminui exponencialmente com a profundidade ***z***.

A Figura 9 mostra as órbitas das trajetórias das partículas de água, as velocidades orbitais instantâneas e as linhas de corrente (tracejadas) numa onda que se propaga em águas profundas; abaixo da profundidade igual à metade do comprimento de onda ($z = L/2$) o movimento orbital das partículas é desprezível.

Em locais rasos, as trajetórias das partículas de água são elipses achatadas, cujo eixo horizontal é $(A\,L)/(\pi\,h)$ e o eixo vertical é $2\,A\,(h-z)/h$, como mostrado na Figura 10 (o eixo horizontal é constante na profundidade e o eixo vertical diminui linearmente com o aumento da profundidade).

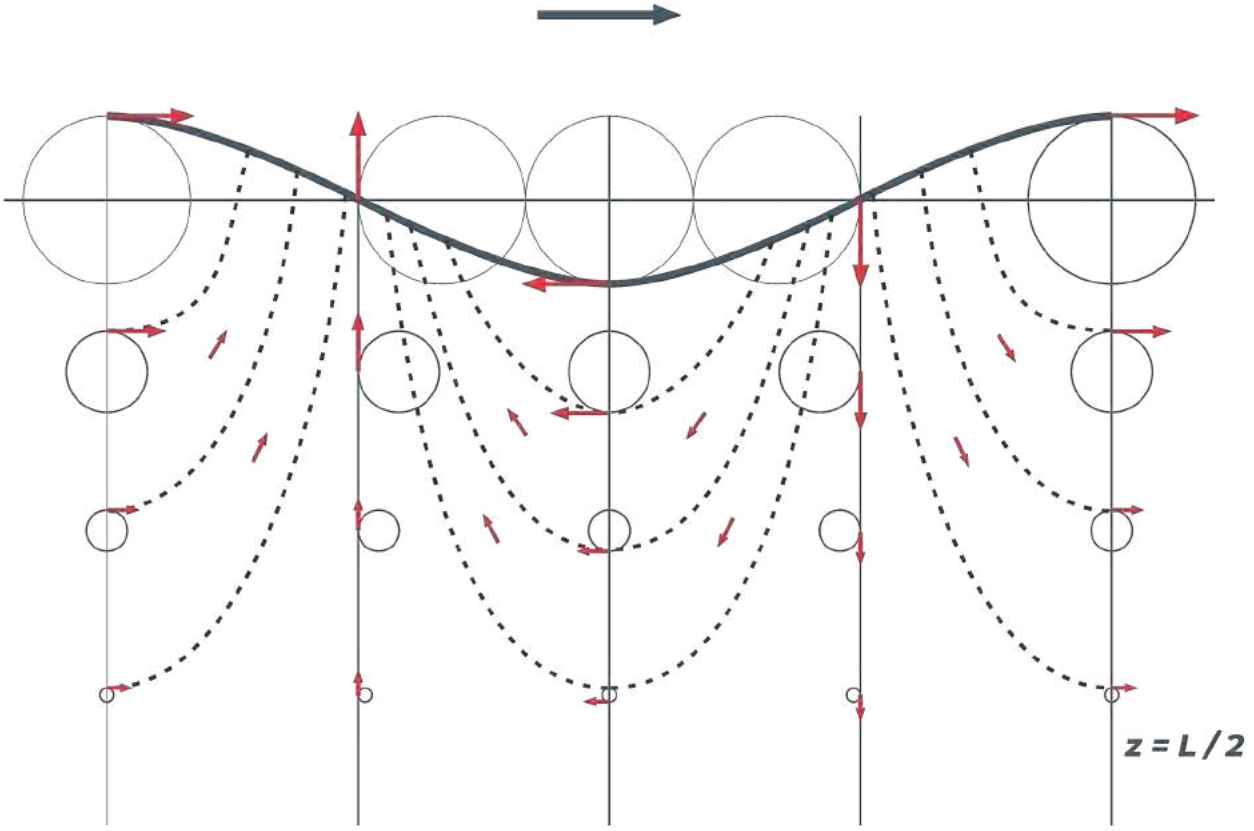



**FIGURA 9.** **Trajetórias circulares de partículas de água para ondas de gravidade se deslocando em águas profundas.** *Ilustração: Leandro Coelho.*

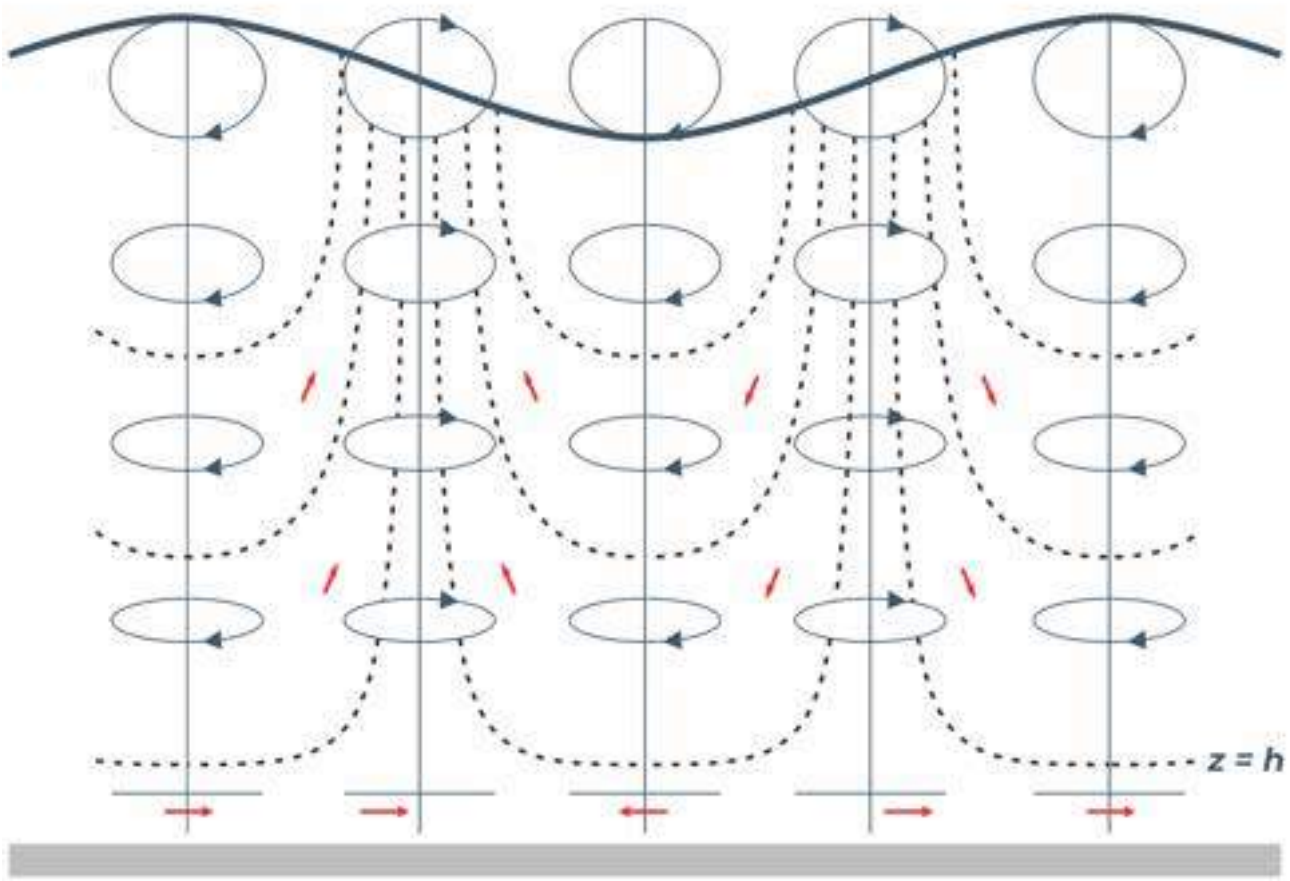



**FIGURA 10.** Trajetórias elípticas de partículas de água para ondas de gravidade se deslocando em águas rasas (junto ao fundo são retilíneas). *Ilustração: Leandro Coelho.*

É interessante notar que, em águas rasas, a velocidade de fase $c$ varia com a profundidade $h$, segundo a expressão $c = \sqrt{gh}$ ; como $c = L / T$, então o comprimento de onda também varia com a profundidade $(L = c\,T = = \sqrt{gh} \cdot T)$, mantendo o período constante. Portanto, em regiões progressivamente mais rasas, a velocidade de fase diminui e o comprimento de onda diminui, mas o período se mantém.

Um aspecto fundamental do estudo de ondas no oceano é a sua diferença em relação a correntes marítimas. Nas correntes há movimento longitudinal de partículas, enquanto nas ondas as partículas não possuem movimento longitudinal significativo, apenas movimento circular (ou na forma de elipses). Portanto, as ondas se caracterizam por propagação de energia, sem deslocamento longitudinal significativo de partículas.

Nesse ponto do presente estudo, uma vez conhecidos os conceitos de velocidade de fase e velocidade das partículas de ondas, é interessante fazer uma comparação entre velocidades de alguns processos geofísicos: ventos fortes na superfície tem velocidades da ordem de 10 m/s a 20 m/s (36 km/h a 72 km/h) e correntes intensas no oceano tem velocidade na superfície da ordem de 1 m/s a 2 m/s (3,6 km/h a 7,2 km/h); sob condições de ventos fortes em pistas muito longas, as ondas de superfície tem velocidades orbitais na superfície da mesma ordem das correntes de superfície; nessas condições, as ondas de superfície possuem velocidade de fase típica de 15 m/s desde o oceano profundo até a plataforma (cerca de 54 km/h, até 50 m de profundidade), que diminui à medida que a profundidade diminui, para cerca de 10 m/s (36 km/h, a 10 m de profundidade), e diminui cada vez mais até a arrebentação.

## 6. Fenômenos associados à propagação de ondas na superfície

**Dispersão:** normalmente, num local do oceano são gerados trens de ondas com vários comprimentos de onda. No oceano profundo, as mais longas (maiores valores de $L$) se propagam mais rapidamente (maiores valores de $c$) e assim o trem se dispersa (pois $c = \sqrt{(g\,L)/(2\,\pi)}$ ) . Portanto, as águas profundas são um meio dispersivo para as ondas de gravidade, pois a velocidade de fase é função do comprimento de onda.

**Reflexão das ondas:** obstáculos na água, tais como diques e ilhas, podem parcialmente refletir as ondas que se movem ao seu encontro.

**Refração das ondas:** como a velocidade de fase em águas rasas normalmente varia com a profundidade, as ondas em águas rasas sofrem refração na direção das regiões mais rasas. Em consequência, numa praia reta e longa, com inclinação do fundo uniforme, todas as ondas tendem a se propagar perpendicularmente à linha da costa (Fig. 11). Isto se deve ao fato que uma linha de crista cuja extremidade atinge antes a praia tem velocidade menor (por estar em região mais rasa) e, de certa forma, "espera" até que o restante da linha de crista atinja a mesma profundidade.

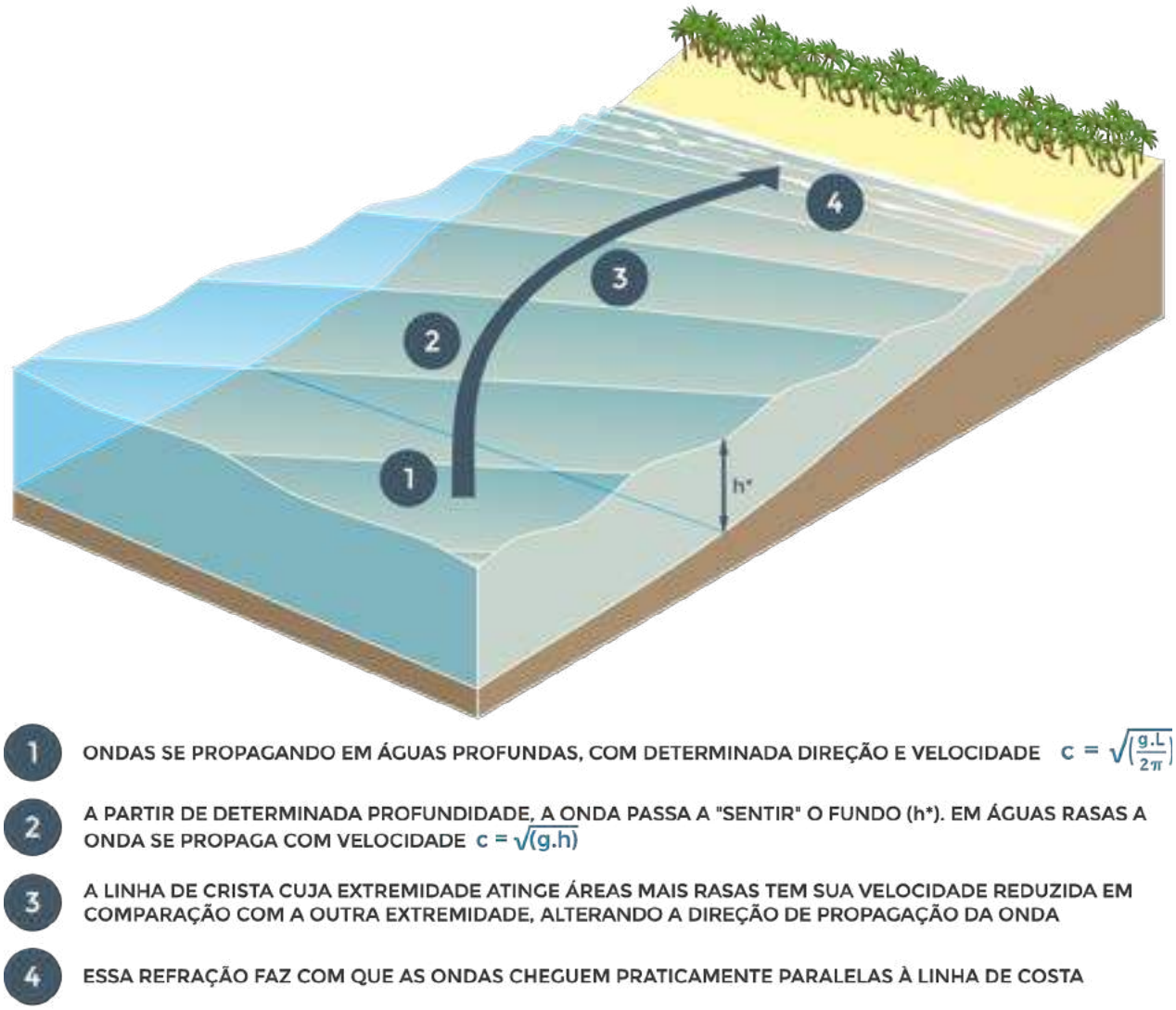



**FIGURA 11.** Refração para ondas atingindo uma praia retilínea com isobatimétricas paralelas à linha da praia: linha de crista tende a ficar paralela à lista da costa. *Ilustração: Leandro Coelho.*

**Quebra de ondas:** Em ondas de pequena esbeltez (***H / L*** pequeno), a velocidade das partículas é pequena, comparada com a velocidade de fase das ondas. O aumento de esbeltez provoca um aumento de velocidade das partículas. Se a velocidade das partículas se tornar maior que a velocidade de fase das ondas então as ondas ficam instáveis e quebram. Observações no mar têm demonstrado que o mínimo ângulo ***θ*** numa crista de onda estável é 120°; alternativamente, pode-se considerar que o máximo valor da esbeltez, para ondas estáveis em águas profundas, é ***H / L = 1/7*** (Fig. 12). Além das relações previamente citadas, outra formulação propõe que as ondas arrebentam quando sua altura (***H***) é igual a 78% da profundidade (***h***).

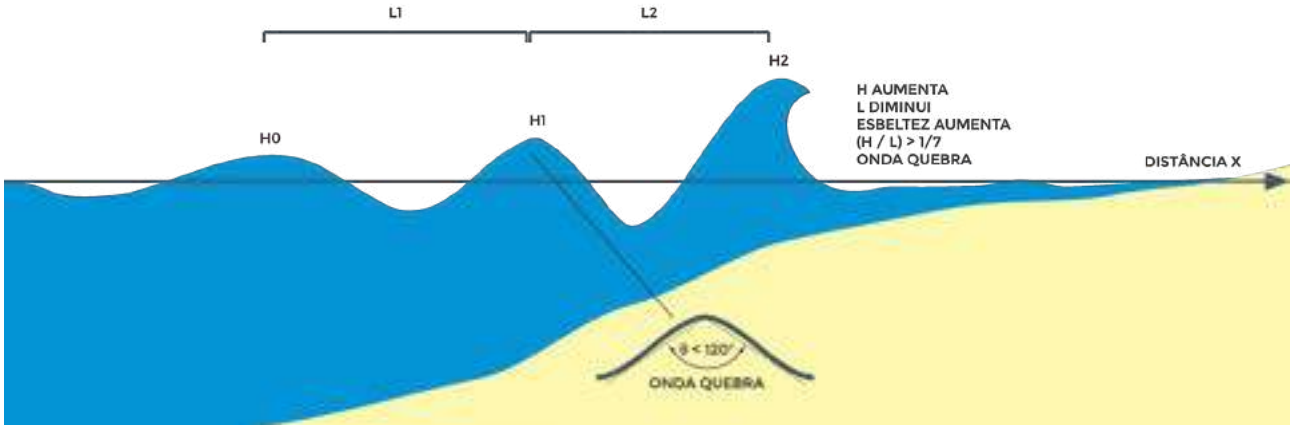



**FIGURA 12.** **Esbeltez e ângulo de crista na quebra de uma onda.** *Ilustração: Leandro Coelho.*

Quando há arrebentação de ondas, muitas vezes ocorre acúmulo de água na linha da costa e, em consequência da convergência de fluxos opostos ao longo da linha da costa, são geradas "correntes de retorno" (Fig. 13), no sentido do mar aberto, que podem ser especialmente perigosas para banhistas.

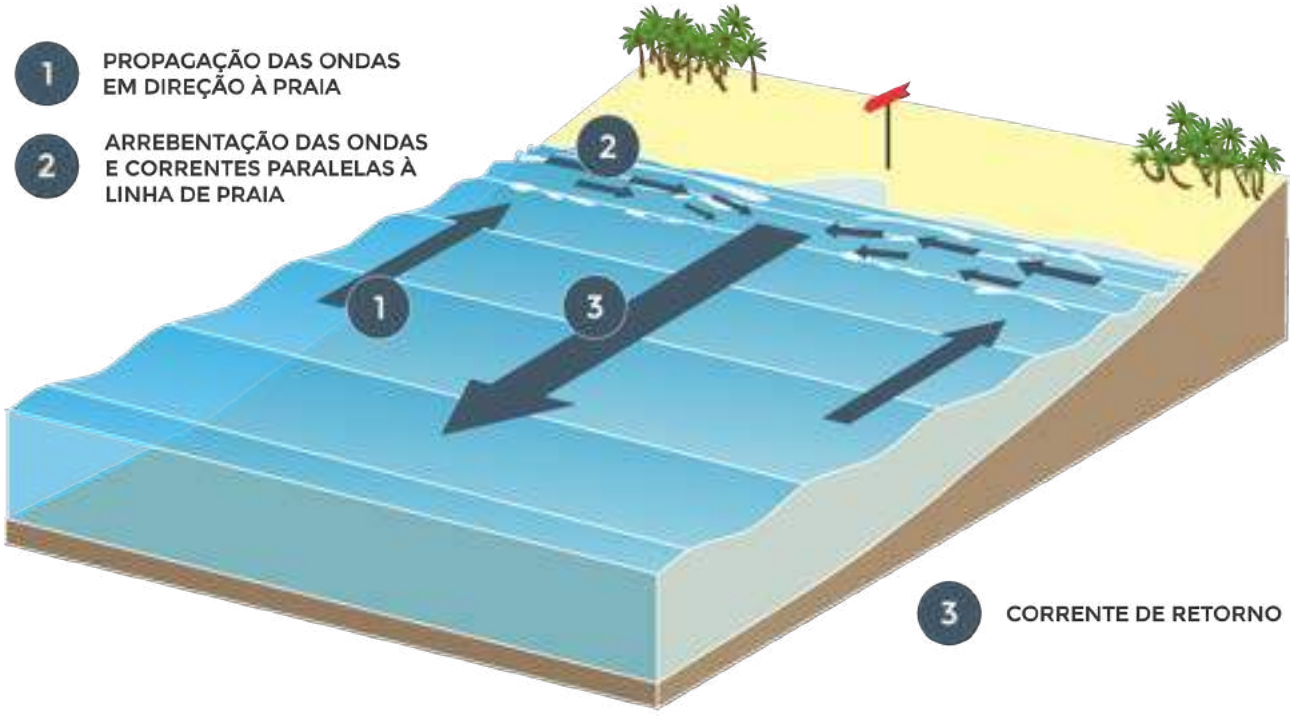



**FIGURA 13.** **Arrebentação de ondas numa região praial e formação de correntes de retorno.** *Ilustração: Leandro Coelho.*

## 7. Energia das ondas

As ondas possuem energia cinética e potencial. De fato, são as conversões sucessivas de energia potencial em cinética e cinética em potencial, das partículas de água, que mantém as oscilações (Fig. 14).

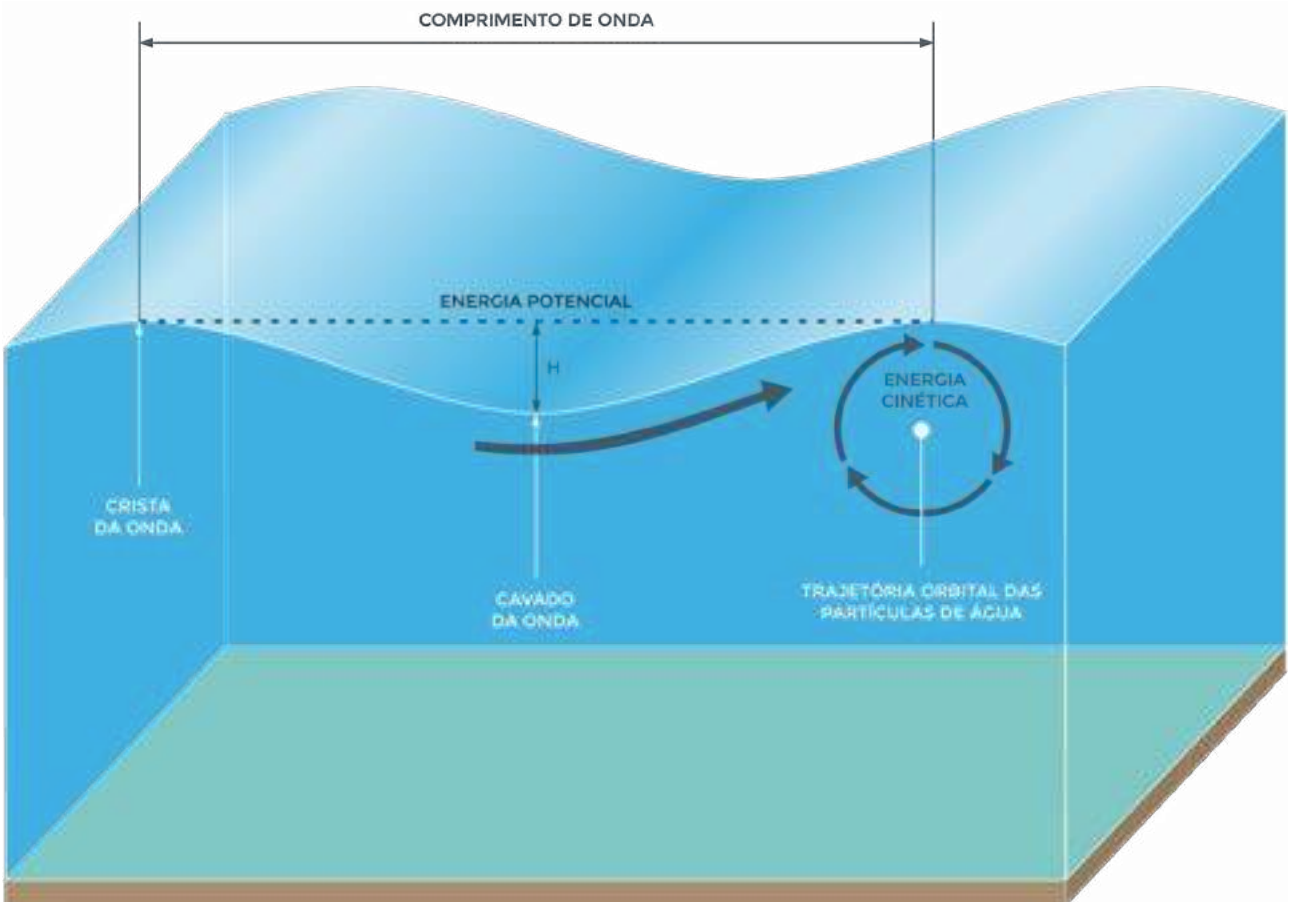



**FIGURA 14.** Esquema indicando as energias potencial e cinética das ondas, associadas à altura da onda e ao movimento orbital das partículas de água. *Ilustração: Leandro Coelho.*

Num local com profundidade sem distúrbio $h$ e densidade da água uniforme $\rho$, sendo $A$ a amplitude das ondas, a energia potencial $E_p$ e a energia cinética $E_k$, por unidade de área, são dadas por:

$$E_p = E_k = \frac{1}{4} \rho g A^2$$

E a energia total, por unidade de área, é:

$$E = E_p + E_k = \frac{1}{2} \rho g A^2$$

Note-se que a energia de uma onda depende de um único parâmetro da onda, sua amplitude (ao quadrado).

A potência por unidade de largura numa frente de onda, em águas rasas, é dada por:

$$P = \frac{1}{2} \rho g A^2 \sqrt{gh}$$

Pela continuidade de transmissão de energia, a amplitude $A$ aumenta com a diminuição de $h$, de modo que o produto $A^2 \sqrt{h}$ permanece constante. Isto explica o aumento da amplitude das ondas ao se aproximarem da linha da costa (Fig. 14).

Em regiões costeiras com grande variação da profundidade $h$, por refração, as ondas tendem a se propagar para as partes de menor profundidade (pois $c = \sqrt{gh}$ ). Como visto acima, à medida que as ondas se propagam para regiões rasas, sua velocidade diminui e o comprimento de onda diminui (mantendo o período constante). E na expressão matemática acima, ao manter o produto $A^2 \sqrt{h}$ constante, se observam os maiores aumentos da amplitude $A$ nos locais de menor profundidade $h$; e quanto maior a amplitude $A$, maior é a energia $E$ das ondas (por unidade de área). Dessa forma, se observa maior esbeltez das ondas e uma concentração de energia em regiões costeiras rasas (Fig. 15).

No oceano, à medida que as ondas caminham em direção à costa, sua amplitude vai aumentando gradativamente, em função do aumento da densidade espacial de energia, causado pela diminuição de profundidade. Para a profundidade tendendo a zero, as amplitudes das ondas tenderiam para um valor infinito, fato este não observado na prática. Na realidade, em locais rasos, as ondas ficam mais curtas e mais altas, portanto mais esbeltas, ficam então instáveis e arrebentam ($H/L > 1/7$), dissipando sua energia de forma intensa, até desaparecerem. O fenômeno da arrebentação de ondas é de grande importância para a estabilidade de praias e de estruturas costeiras.

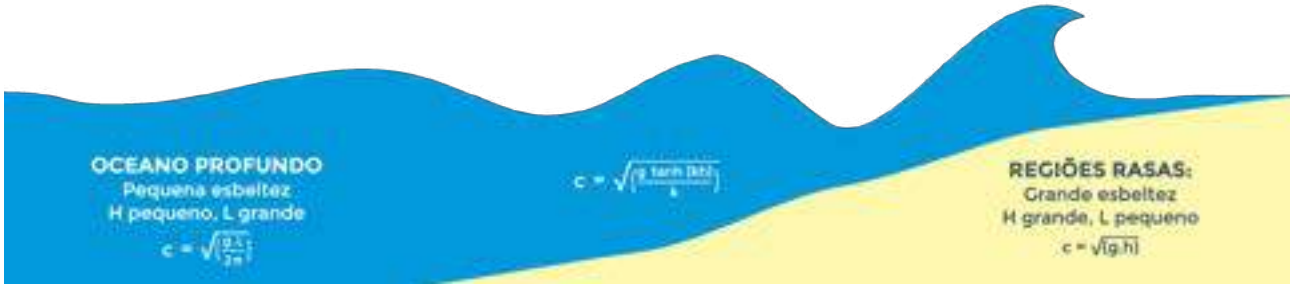



**FIGURA 15.** Propagação de ondas de áreas profundas, com pequena esbeltez, para áreas rasas, com grande esbeltez, ocorrendo a quebra de ondas em regiões muito rasas. *Ilustração: Leandro Coelho*.

## 8. Ondas internas

As ondas apresentadas previamente são as que se manifestam como uma oscilação da interface ar - mar, sendo a relação de densidades do ar e do mar aproximadamente 1:1000. Oscilações similares são possíveis na interface de dois fluidos de densidades diferentes. A energia envolvida nas oscilações depende da razão:

$$\frac{diferença\ de\ densidades}{maior\ densidade}$$

Quando a diferença de densidades é uma pequena fração da densidade, ondas de grande amplitude podem se propagar com pequena energia. No oceano real, observações tem demonstrado que variações de temperatura em profundidade podem ser associadas a ondas internas, notáveis principalmente nas variações espaciais e temporais das profundidades das isotermas (Fig. 16).

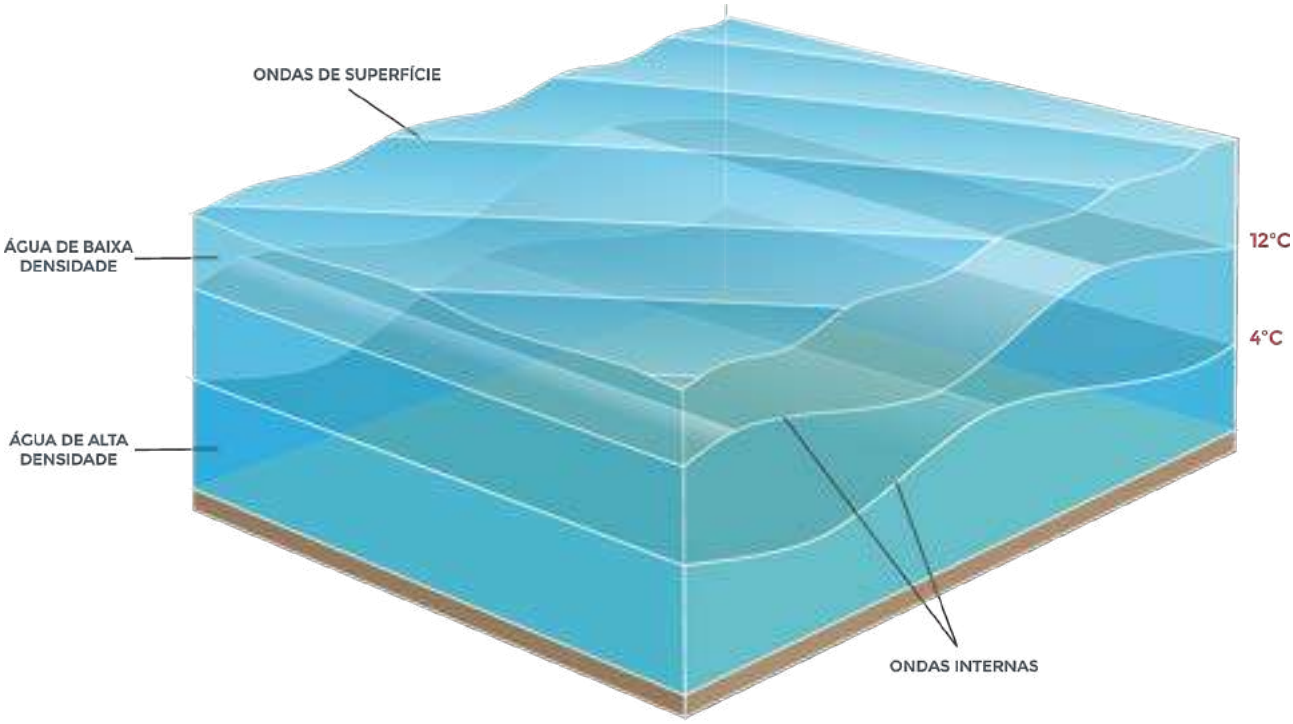



**FIGURA 16.** Ondas internas no oceano, evidenciadas pelas oscilações das isotermas. *Ilustração: Leandro Coelho*.

## 9. Medições de ondas

Atualmente, ondógrafos direcionais são utilizados para medições, baseados em boias de superfície fundeadas, em geral na plataforma continental, mas livres para se deslocar por pequenas distâncias (Fig. 17). Essas boias são dotadas de acelerômetros, que medem a aceleração da água, fornecendo assim os parâmetros das ondas: altura, direção, período e velocidade.

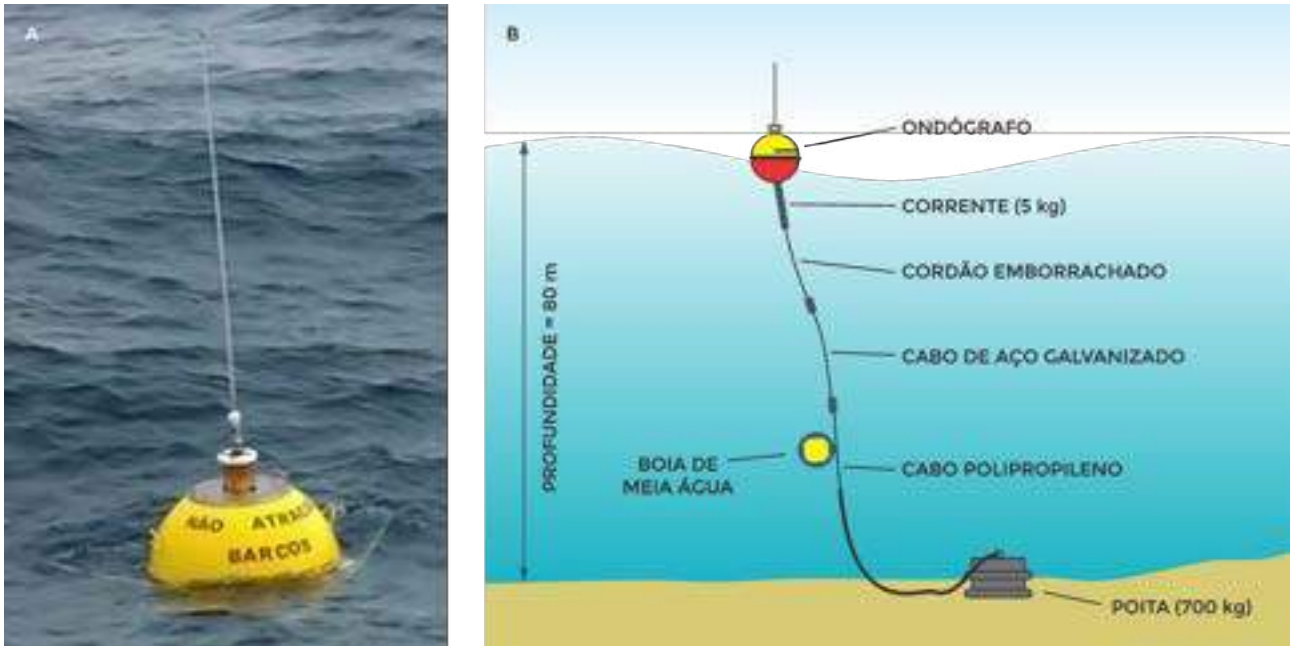



**FIGURA 17.** Ondógrafo direcional (A) e o esquema de seu fundeio (B). *Ilustração: Leandro Coelho*.

Radares de abertura sintética e escaterômetros (em satélites ou aviões) são usados para medições remotas de ondas, com base nas características dos ecos de pulsos emitidos; fotografias aéreas também fornecem informações sobre as ondas, a partir da rugosidade da superfície.

Finalmente, medições da altura significativa de ondas são realizadas pela altimetria de satélite, em função da forma dos ecos de sinais eletromagnéticos emitidos pelo satélite, os quais são mais alterados quanto maior a altura significativa das ondas.

## 10. Previsões de ondas

A expressiva velocidade de propagação de ondas de superfície no oceano, de até 50 km/h, faz com que sejam importantes os sistemas de alerta de ondas muito altas e tsunamis. Tais ondas podem colocar em grande risco a navegação e populações litorâneas.

Atualmente, previsões de ondas são realizadas por modelos numéricos da propagação de ondas, através do cálculo do espectro de densidade da energia, a partir de informações de vento fornecidas por previsões meteorológicas (ou, eventualmente, a partir de informações de maremotos). A Figura 18 mostra previsão de modelo de ondas global MFWAM do Serviço Meteorológico Francês, com informações sobre a altura significativa e a direção de incidência das ondas, no Sudoeste do Oceano Atlântico.

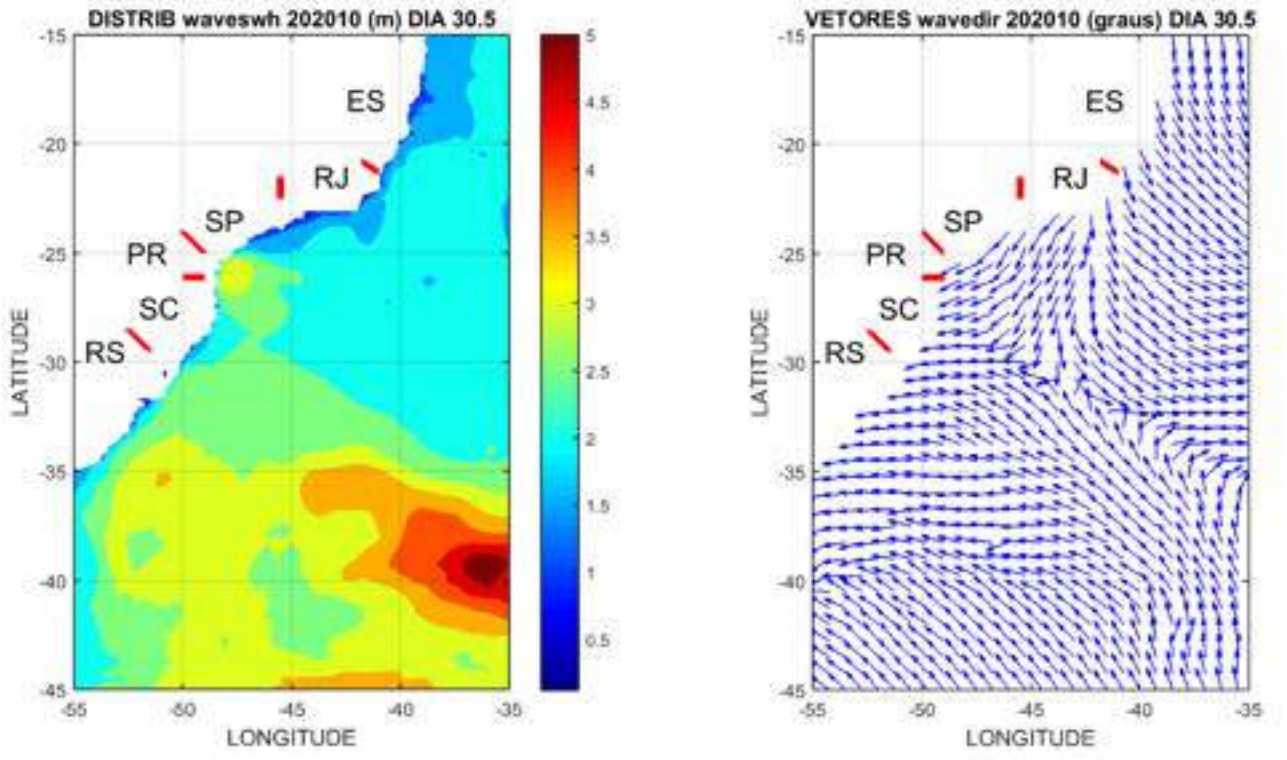



**FIGURA 18.** Distribuição das alturas significativas de ondas (em metros) e da direção de incidência, segundo os cálculos do modelo de ondas global MFWAM, na região 15°S - 45°S 55°W - 35°W, para 12h GMT de 30 de outubro de 2020.

## Referências Bibliográficas

AIRY, G. B. 1841. "Tides and waves". In Hugh James Rose; et al. (eds.). Encyclopædia Metropolitana. Mixed Sciences. 3 (published 1817–1845). Also: "Trigonometry, On the Figure of the Earth, Tides and Waves", 396 pp.

HASSELMANN, L. *et al.*, 1973. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl. A, 8 (12), 289–300.

KINSMAN, B. 1984. Wind Waves: Their Generation and Propagation on the Ocean Surface. Dover Publications Inc., New York, 676 p.

LE BLOND, P. H. , MYSAK, L. A. 1978. Waves in the Ocean. Elsevier Scientific Publishing, Amsterdan.

PIERSON W.J., AND L. MOSKOWITZ. 1964. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigordskii. Journal of Geophysical Research 69: 5181–5190.

POND, S., PICKARD, G.L. 1991. Introductory Dynamical Oceanography. Pergamon Press. 329p.

THE OPEN UNIVERSITY, 2000. Waves, Tides and Shallow-Water Processes. Second Edition. Butterworth-Heinemann, Oxford, 227p.

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 13*

# MARÉS E NÍVEL MÉDIO DO MAR

*Joseph Harari, Afrânio Rubens de Mesquita & Ricardo de Camargo*

CITAÇÃO SUGERIDA: HARARI, Joseph; MESQUITA, Afrânio Rubens de; CAMARGO, Ricardo de. Marés e nível médio do mar. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 13: p. 277-296.

# Marés e Nível Médio do Mar

*Joseph Harari, Afrânio Rubens de Mesquita & Ricardo de Camargo*

## 1. Introdução

As mais longas ondas no oceano são associadas com as **marés astronômicas**, as quais são geradas por forças externas (atração gravitacional do Sol e da Lua) e possuem períodos exatos (por exemplo, 12 h 25 min 14 seg). Os comprimentos de onda são, em todos os lugares, muito maiores que a profundidade da água, de modo que a progressão das ondas é governada pela velocidade de fase em águas rasas; esta velocidade de fase é cerca de 720 km/h para uma profundidade de 4.000 m e cerca de 115 km/h para uma profundidade de 100 m. A principal maré semi diurna tem período de 12,42 h e comprimentos de onda de 10.000 km (a 4.000 m de profundidade) a 1.500 km (a 100 m de profundidade). Em função dessas características, a aceleração de Coriolis (devida à rotação da Terra) tem efeito importante nos movimentos devidos à maré; e por conta do tamanho limitado das bacias oceânicas, não ocorrem trens de vários comprimentos de onda (McLellan, 1968).

## 2. Descrição das marés

Nos oceanos, a superfície da água não fica fixa num nível, mas alternativamente sobe e desce. Quando atinge uma elevação máxima, ocorre uma **preamar**, e quando atinge a elevação mínima, ocorre uma **baixa-mar**. Esta flutuação normalmente ocorre duas vezes por dia, de modo que, em cada dia, há duas preamares e duas baixa-mares. A diferença em elevação entre preamar e baixamar é chamada **range da maré**; a **amplitude de maré** é, por sua vez, metade do range da maré (Fig.1).

Em regiões costeiras, especialmente em baías longas e na desembocadura de rios, a elevação do nível da água é acompanhada por um fluxo chamado **maré enchente** e a queda do nível por um fluxo chamado **maré vazante**. Os movimentos no oceano associados com as elevações da maré astronômica são chamados **correntes de maré**. Como o sentido das correntes de maré muda, há um período sem movimento horizontal devido a forças de maré; quando este período é próximo à preamar se chama **estofa da preamar** e quando é próximo à baixamar se chama **estofa da baixa-mar**.

No mar aberto, os termos preamar, baixamar, range, amplitude e correntes de maré se aplicam igualmente; apenas inexistem as marés enchente e vazante e as estofas de preamar e baixa-mar, pois as correntes de maré são representadas por **vetores rotativos no tempo**, os quais descrevem as denominadas elipses das correntes de maré.

Outras características do fenômeno são:

1) O range da maré não é o mesmo em todo lugar e varia virtualmente do zero a mais de 15 metros. **Pontos anfidrômicos** no oceano são regiões nas quais a maré tem range praticamente zero.

2) Num dado local, a preamar ocorre aproximadamente uma hora mais tarde que no dia anterior. **O intervalo médio da maré** é o tempo médio entre duas preamares sucessivas, e vale 12 horas, 25 minutos e 14 segundos.

3) Em muitos lugares, as duas marés de um dia têm ranges diferentes. Nestes lugares, a natureza da desigualdade diurna varia através do mês, usualmente sendo reproduzida a cada mês. Em geral a "**desigualdade diurna**" é associada a variações no intervalo de tempo entre sucessivas preamares, chamadas "**desigualdades no intervalo da maré**"; num caso extremo, os intervalos da maré podem ser 14 horas e 11 horas (Fig. 1).

4) O range da maré numa dada posição não é constante, variando periodicamente entre máximos e mínimos (Fig. 2). Normalmente há dois ciclos completos num mês, ainda que em alguns lugares apenas um. Períodos em que o range é máximo são conhecidos como sizígia e as marés que então ocorrem são as **marés de sizígia**. Períodos com range mínimo são quadraturas, com as **marés de quadratura**. Marés de sizígia ocorrem com Lua Cheia ou Nova enquanto as de quadratura, com Lua Crescente ou Minguante.

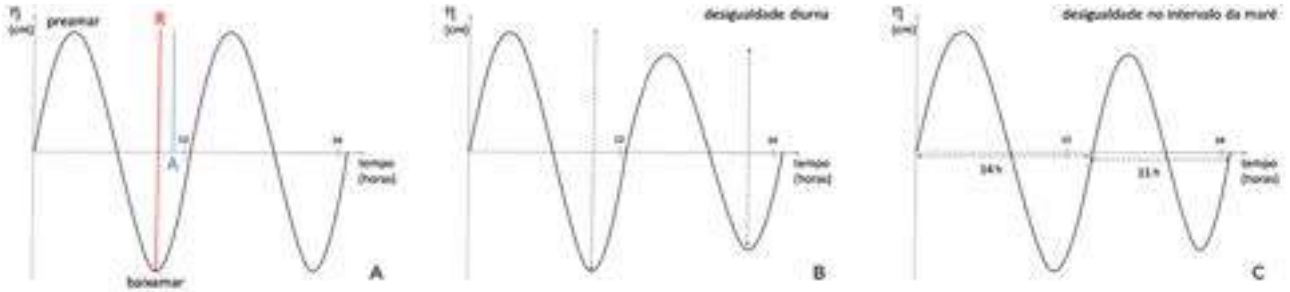



FIGURA 1. Esquemas de: A) preamar e baixa-mar; B) desigualdade diurna; e C) desigualdade no intervalo de maré. Range ***R*** e amplitude ***A = R / 2***.

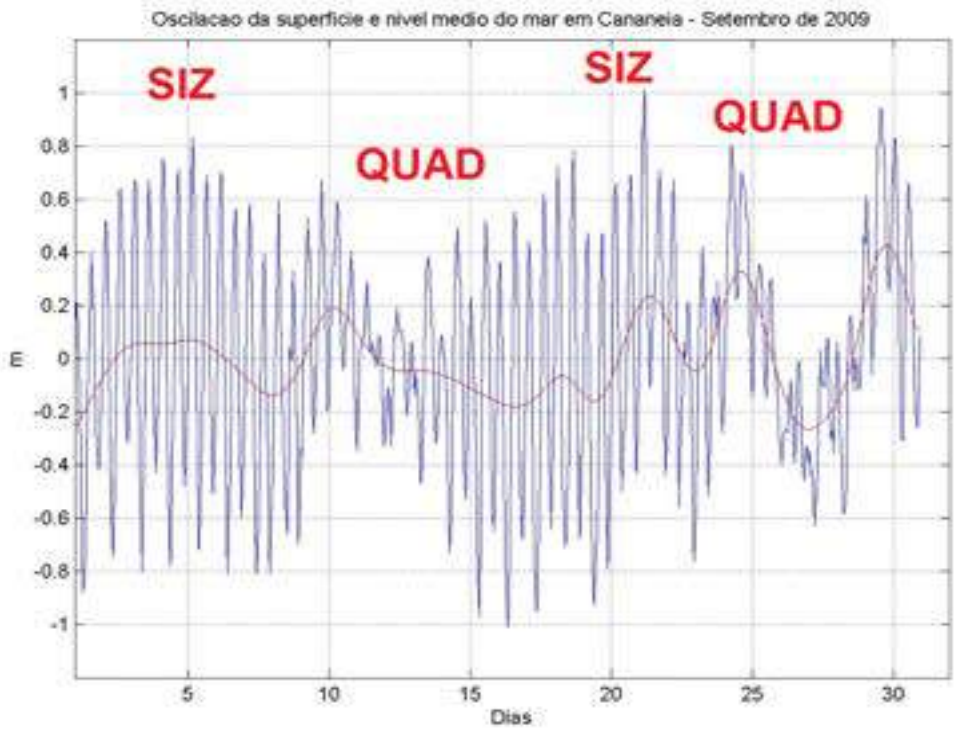



FIGURA 2. Marés de sizígia (SIZ) e quadratura (QUAD) ao longo de um mês (setembro de 2009), em Cananéia (SP). A linha azul representa o nível do mar medido e a linha vermelha representa o cálculo dos efeitos meteorológicos e de densidade no nível do mar.

## 3. Marégrafos

Marégrafos são aparelhos que registram o nível do mar, e podem ser de flutuador, de pressão ou de radar. Na costa, qualquer destes métodos pode ser empregado, enquanto que, no oceano aberto, são utilizados marégrafos de pressão ou medições de altímetros a partir de satélites ou aviões.

A Figura 3 mostra o esquema de um **marégrafo de flutuador**. O flutuador e seu contra peso operam dentro de um tubo com orifício no fundo, movendo-se verticalmente com a variação do nível do mar e girando uma roda; esta, por sua vez, arrasta uma roda menor concêntrica e solidária, movimentando um fio ligado a uma pena registradora. Esta pena registra a maré no papel que envolve um tambor, o qual gira acionado por um relógio. O movimento alternativo da pena produzido pela oscilação do flutuador, aliado à rotação das rodas, reproduz sobre o papel a **curva de maré** ou **maregrama**. O esquema do tubo e o contra peso do flutuador funcionam como um filtro, evitando que ondas capilares e outras ondas de período muito curto sejam registradas. A fim de que uma estação maregráfica possa ser recuperada em qualquer época, é imprescindível que, mediante um nivelamento geométrico, o zero da régua seja referido a marcas fixas em terra, chamadas **Referências de Nível (RN)**.

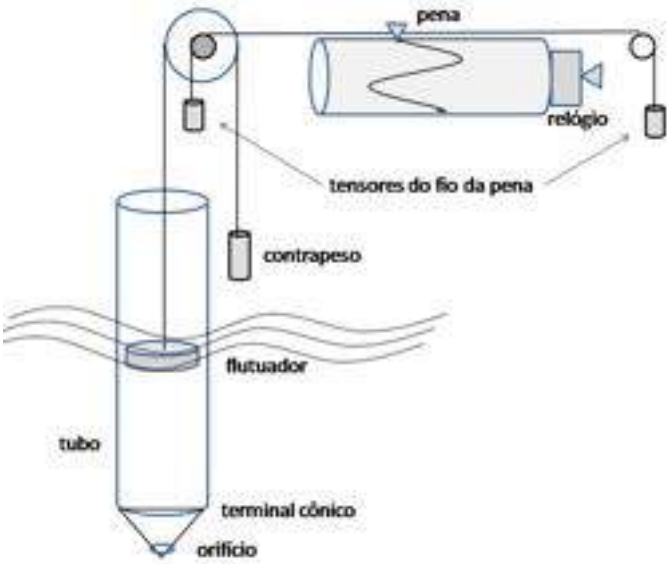



FIGURA 3. Esquema de marégrafo de flutuador.

**Marégrafos de pressão** são normalmente sensores de pressão colocados no fundo do mar e que medem a pressão (ou a altura) da coluna d'água e a registram internamente a determinados intervalos de tempo (nessas medidas, deve ser subtraída a pressão atmosférica). Em locais profundos, esses aparelhos (acoplados a boias) são fundeados por longos períodos de tempo com poitas ou âncoras; ao final dos períodos de medições, na sua recuperação, os marégrafos de pressão são liberados das poitas ou âncoras por meio de comunicação acústica; uma vez liberados, as boias acopladas aos aparelhos os levam até a superfície, onde são coletados pelos navios (e os registros de nível do mar são lidos). Marégrafos de pressão são também utilizados na linha da costa, juntamente com barógrafos, o que facilita a subtração da pressão atmosférica (e, evidentemente, não há necessidade das operações de fundeio e recuperação, possibilitando a leitura imediata dos registros).

Atualmente, **marégrafos de radar** são também utilizados: eles operam fora da água e enviam pulsos eletromagnéticos para baixo, os quais voltam refletidos na superfície do mar; o intervalo de tempo entre a emissão dos pulsos e a recepção dos ecos indica a distância do emissor à superfície do mar, da qual se extrai a informação sobre o nível da superfície do mar (Fig. 4).

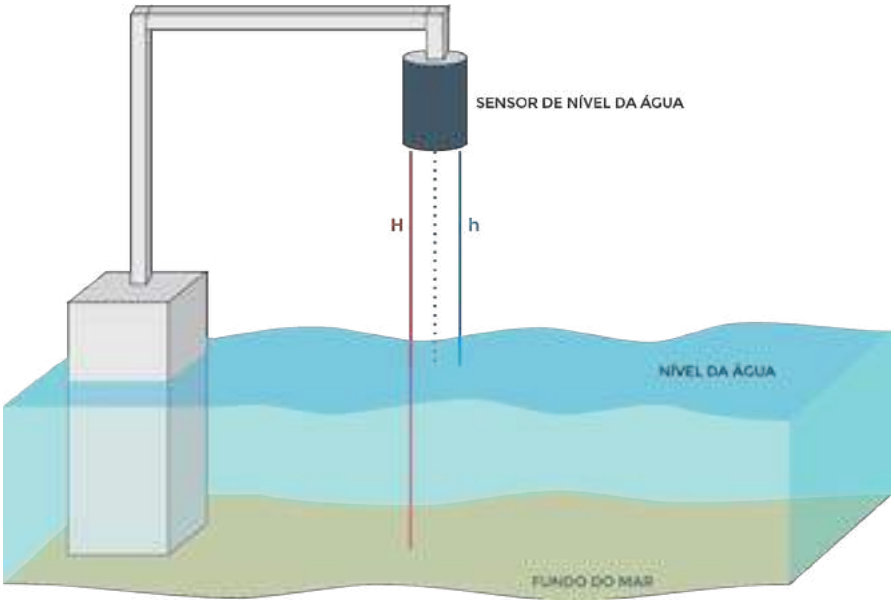



**FIGURA 4.** Marégrafo "radar": nível da superfície do mar = ***H*** (constante) – ***h*** (medição do sensor).

O nível da superfície do mar pode também ser medido através de **altímetros** (sensores ativos) colocados em satélites ou aviões; esses sensores enviam sinais (eletromagnéticos) e os recebem refletidos: o intervalo de tempo para a recepção do eco, a intensidade e a forma do mesmo permitem inferir o nível da superfície do mar, a intensidade do vento e a altura das ondas de superfície (Fig. 5).

Na realidade, o princípio de medição do nível do mar por altimetria é o mesmo do marégrafo de radar; a diferença é que o marégrafo de radar é instalado num ponto específico da costa, possibilitando uma alta taxa de amostragem, com grande precisão, mas num único ponto geográfico; por outro lado, a altimetria de satélite realiza medições ao longo de toda a trajetória do satélite (cobertura praticamente global), mas com precisão limitada (devido a muitas interferências no pulso eletromagnético do altímetro) e com intervalo de amostragem (para cada ponto específico do oceano) bem maior.

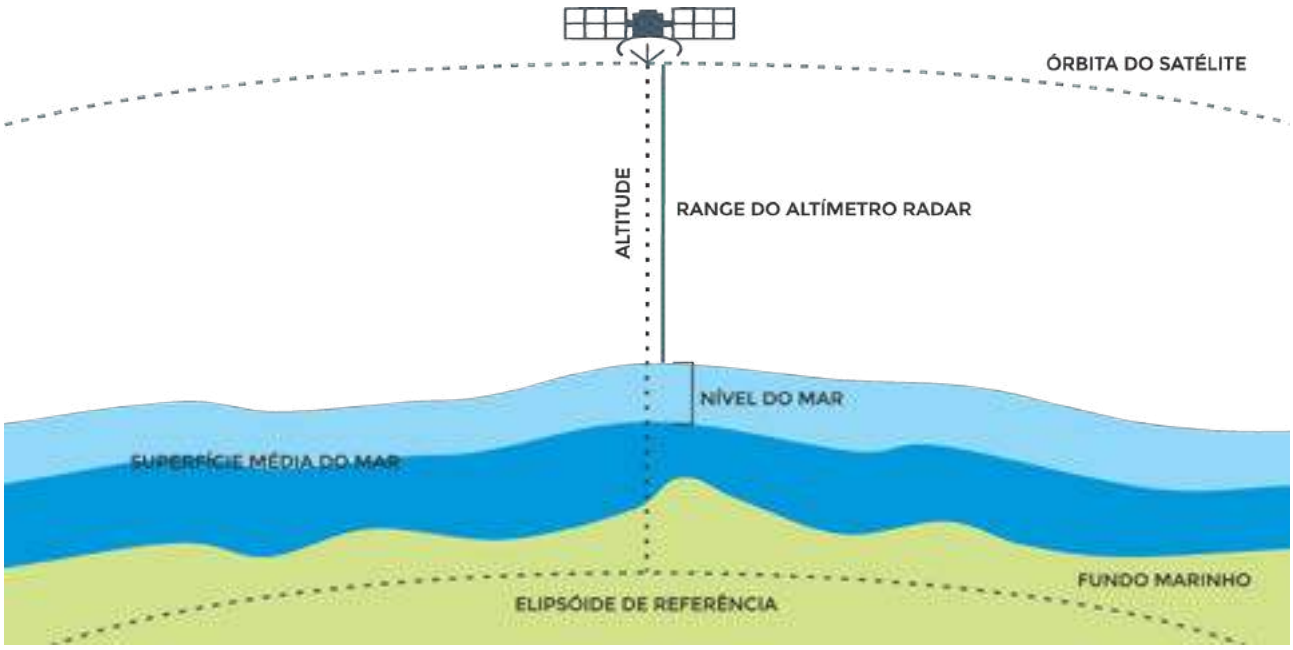



**FIGURA 5.** Esquema de medição de nível do mar pela altimetria de satélite (nível do mar = altitude do satélite – range – superfície média do mar); range é calculado em função do intervalo de tempo entre emissão e recepção de sinal eletromagnético; altitude é dada continuamente por estações rastreadoras; altitude e superfície média do mar são fornecidos em relação a um elipsoide de referência.

## 4. Níveis de referência

O registro da maré em um dado local por um período de tempo suficientemente longo, da ordem de vários anos, permite determinar os níveis de referência da maré neste local (Fig. 6).

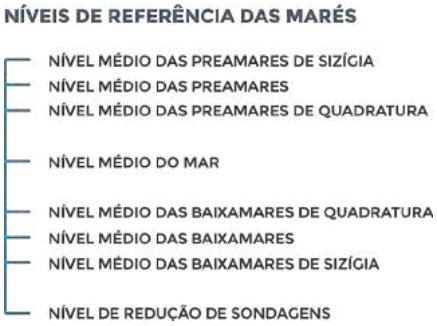



**FIGURA 6.** Níveis de referência das marés.

**1) Nível médio do mar:** corresponde à média das alturas de maré observadas num longo período.

**2) Níveis médios de preamares e baixa-mares:** são os valores médios das elevações observadas nas preamares e baixa-mares, respectivamente.

**3) Níveis médios das preamares e baixa-mares de sizígia:** correspondem aos valores médios das preamares e baixa-mares observadas nos períodos de sizígia.

**4) Níveis médios das preamares e baixa-mares de quadratura:** análogo ao anterior, para os períodos de quadratura.

**5) Nível de redução de sondagens:** é um nível suficientemente abaixo do nível médio do mar, que informa aos navegantes as condições mínimas de segurança de uma região costeira para suas embarcações e navios; este nível normalmente é publicado nas cartas náuticas.

## 5. A Teoria do Equilíbrio das marés

A **Teoria do Equilíbrio** foi a primeiro desenvolvimento teórico para representar o efeito das marés. Ela visa examinar o efeito de um corpo celeste numa esfera coberta por uma camada de fluido. Assumindo a Terra como uma esfera coberta por um oceano de profundidade uniforme, o efeito gravitacional da Lua é indicado na Figura 7.

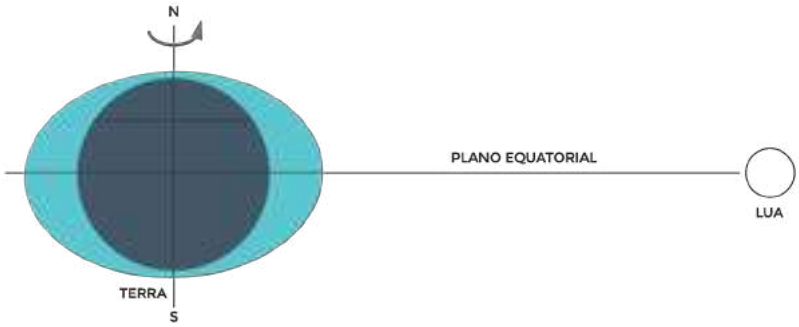



**FIGURA 7.** Esquema básico da Teoria do Equilíbrio das marés, com a configuração da superfície do mar na presença da Lua.

No sistema Terra – Lua, as marés são associadas ao movimento da Terra e da Lua em torno do Centro de Massa comum, cujas forças atuantes dão origem a dois quadrantes com elevações (bulbos) diametralmente opostos em relação ao centro da Terra, no quadrante da Lua e no quadrante oposto ao da Lua, e dois quadrantes com depressões (Fig. 7). Atuam, neste movimento, as forças gravitacional e centrífuga; no quadrante da Terra com bulbo do lado da Lua predomina a força gravitacional, enquanto no quadrante da Terra com bulbo oposto ao da Lua predomina a força centrífuga (Fig. 7). Como a Terra efetua um giro completo em 24 horas, um mesmo local experimenta duas preamares e duas baixa-mares por dia. Para uma maré de equilíbrio devido à Lua, o deslocamento do equilíbrio é de +35,4 cm na preamar e -17,7 cm na baixa-mar. É importante salientar que esta força centrífuga não se deve ao movimento de rotação da Terra em torno de seu eixo.

Quando o astro gerador da maré se encontra deslocado do plano equatorial da Terra (declinação) a configuração do equilíbrio corresponde à da Figura 8, o que explica a desigualdade das duas marés observadas num dia ("desigualdade diurna").

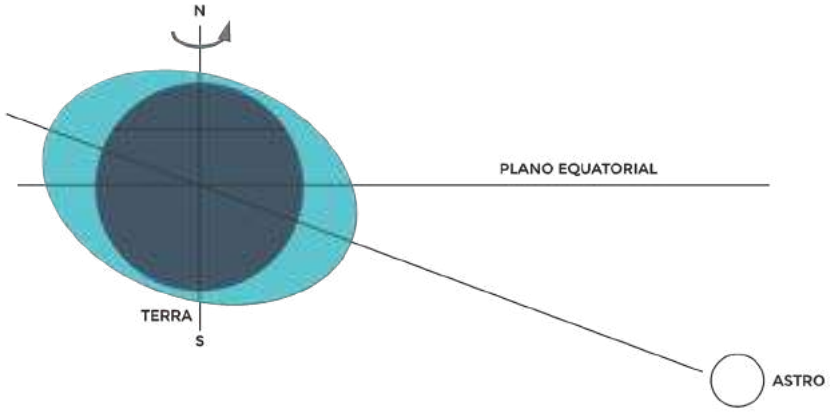



**FIGURA 8.** Efeito da declinação de um astro nas marés.

Como a órbita lunar possui uma declinação de 28° em relação ao plano do Equador terrestre, dependendo da latitude, os bulbos apresentam desigualdade diurna, ou seja, as preamares de um dia não são iguais, assim como as baixa-mares, e também não há simetria entre preamares e baixa-mares (Fig. 1). Note-se também que a Lua tem uma órbita elíptica ao redor da Terra, o que implica em variações da distância e, portanto, do potencial gerador de marés. Quando a distância Terra – Lua é mínima (apogeu lunar) o potencial gerador de maré é 20% maior que a média, enquanto na condição de distância Terra – Lua máxima (perigeu), o potencial é 20% menor que a média.

Uma configuração similar pode ser feita para o sistema Sol - Terra. Ainda que o Sol tenha uma massa muito maior que a da Lua, sua distância à Terra também é muito maior, e os deslocamentos do equilíbrio por ele produzidos são +16,2 cm para a preamar e -8,2 cm para a baixa-mar. O potencial gerador da maré solar é, portanto, cerca de 46% do potencial gerador da maré lunar.

De maneira similar à Lua, a órbita do Sol tem uma declinação (de 23°) em relação ao plano do Equador terrestre, o que também implica em desigualdades diurnas das marés geradas pelo Sol. E, assim como no caso da Lua, a órbita elíptica da Terra em torno do Sol apresenta situações de distâncias máximas e mínimas (periélio e afélio), que provocam variações do potencial gerador da maré solar, mas de apenas 2% em relação ao valor médio.

Ao considerar conjuntamente as influências do Sol e da Lua, admitindo simplificadamente declinações nulas de ambas as órbitas (como se Terra, Sol e Lua estivessem em um mesmo plano

no espaço), nota-se que o resultado da combinação dos efeitos depende fundamentalmente da fase da Lua. Quando o Sol e a Lua estão em linha em relação à Terra (Lua Nova ou Cheia), os efeitos são aditivos, daí as marés de sizígia. Quando Sol-Terra-Lua estão em quadratura (Lua crescente ou minguante), os efeitos de um tendem a cancelar o do outro e daí as marés de quadratura (Fig. 2).

Embora a Teoria do Equilíbrio das marés proporcione uma boa descrição das forças geradoras de maré e explicações qualitativas de muitas características das marés, ela não explica as amplitudes e fases das marés observadas, as quais são muito diferentes das das correspondentes marés calculadas pela Teoria do Equilíbrio. Isto se deve ao fato que a Teoria do Equilíbrio não leva em consideração: 1) A existência dos continentes; 2) A topografia do fundo dos oceanos; 3) A progressão das ondas de maré, representada pela equação característica em águas rasas $c = \sqrt{(g \cdot h)}$, onde $g$ é a aceleração da gravidade e $h$ é a profundidade); 4) A aceleração de Coriolis, que é importante neste tipo de movimento; e 5) Os modos naturais de oscilação das bacias.

Por outro lado, as frequências (e períodos) das marés são exatamente aquelas previstas pela Teoria do Equilíbrio.

As marés podem ser consideradas como ondas forçadas, uma vez que nunca alcançam equilíbrio com as forças geradoras das oscilações. Ademais, há razões dinâmicas que envolvem a existência de um intervalo de tempo para a resposta do oceano às forças geradoras de maré, uma vez que a reação não é instantânea ou estática. Por fim, ao considerar as escalas de espaço e de tempo das oscilações de maré, entende-se que o efeito de rotação da Terra exerce um papel importante na deflexão dos fluxos de maré.

## 6. A Teoria Dinâmica das marés

A **Teoria Dinâmica** das marés trata da resposta hidrodinâmica do oceano real às forças geradoras de maré, considerando os limites dos oceanos (continentais e do fundo), a progressão das ondas de maré e a aceleração de Coriolis. Devido à complexidade das equações hidrodinâmicas não lineares resultantes (que incluem o potencial de maré dado pela Teoria do Equilíbrio) e devido à dificuldade de expressão das condições de contorno, as soluções só são possíveis através de técnicas numéricas.

Modelos numéricos da propagação de maré possibilitam resolver numericamente as equações representativas da dinâmica das marés (equação da continuidade e equações do movimento, incluindo o potencial de maré calculado pela Teoria do Equilíbrio), que podem ser aplicadas a diversas escalas (global, de bacia oceânica, de plataforma, de região costeira ou mesmo estuário), sendo sujeitas a adequadas condições de contorno laterais (em geral previsões de maré baseadas em medições ou resultados de modelos de escala maior).

Na modelagem numérica das marés, as equações hidrodinâmicas são resolvidas para grades que cobrem as regiões de interesse e as equações diferenciais são substituídas por equações a diferenças finitas, a partir da discretização do espaço e do tempo.

Na Figura 9 se tem um exemplo de cálculo de elevações e correntes através um modelo numérico hidrodinâmico forçado por marés e efeitos meteorológicos, para o estuário de Santos – São Vicente; note-se a reversão de intensas correntes nas entradas dos Canais do Porto de Santos e de São Vicente, devido à predominância das correntes de maré nesta área.

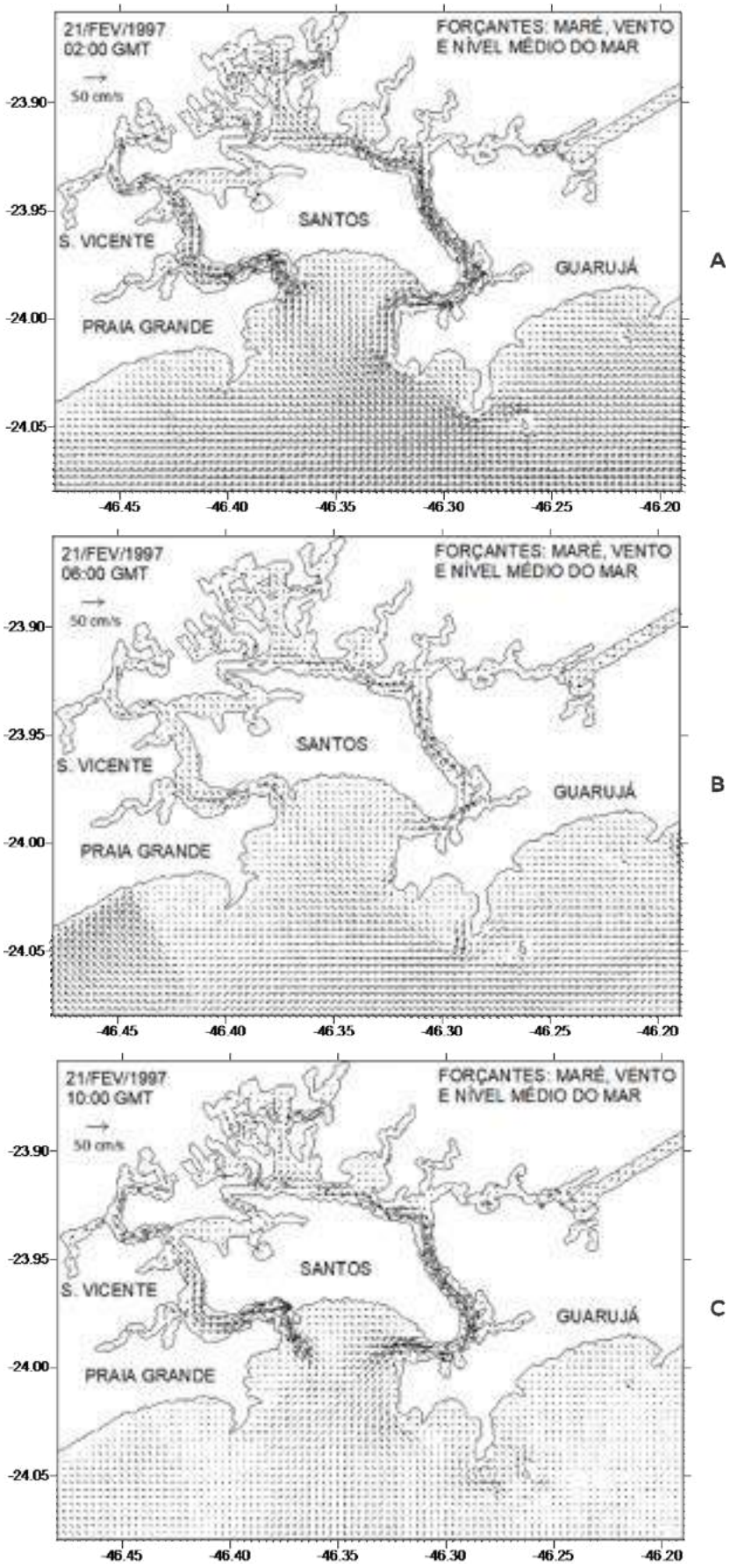



**FIGURA 9.** Simulação da circulação costeira por modelagem numérica hidrodinâmica, considerando as forçantes de maré e meteorológicas: maré enchente (A), estofa da preamar (B) e maré vazante (C).

## 7. Análise harmônica das marés

Estudos práticos de maré, com o objetivo de prever as elevações da superfície no decorrer do tempo, envolvem a **Análise Harmônica** de registros em locais de interesse, relativos a determinados períodos de tempo. Inicialmente, a Teoria do Equilíbrio determina as forças e o potencial gerador de marés nos pontos de observação, nos períodos correspondentes.

Matematicamente, o potencial pode ser resolvido num número finito de componentes periódicas. Doodson (1921) lista cerca de 390 componentes, chamadas **componentes de maré**, sendo 100 de longo período, 160 diurnas, 115 semi-diurnas e 14 ter-diurnas: 1) As componentes diurnas têm período $T_j$ em torno de 24 h solares (velocidade angular $\sigma_j = 360^\circ / T_j$ em torno de 15°/h); 2) as semi-diurnas têm período $T_j$ aproximado de 12 h ($\sigma_j$ aproximadamente igual a 30°/h); 3) as ter-diurnas possuem $T_j \approx 8$h ($\sigma_j \approx 45^\circ$/h); e 4) e as de longo período possuem períodos maiores que 1 dia. Para cada componente, há uma amplitude de equilíbrio e uma fase de equilíbrio, para cada ponto do oceano. As amplitudes de equilíbrio das componentes de maré são usualmente relacionadas com a amplitude de equilíbrio da principal componente lunar semi-diurna $M_2$. As principais componentes, seus símbolos, frequências angulares, períodos e amplitudes de equilíbrio são listadas na Tabela 1.

**TABELA 1.** Principais componentes astronômicas de maré, com seus símbolos, frequências angulares, períodos e amplitudes de equilíbrio (referentes à $M_2$, de amplitude = 100).

| Componente | Símbolo | Frequência angular (°/hora) | Período (d ou h) | Amplitude de equilíbrio |
|---|---|---|---|---|
| Solar anual | Sa | 0,04110 | 364,96 d | 1,27 |
| Solar semi anual | Ssa | 0,08210 | 182,70 d | 8,02 |
| Lunar mensal | Mm | 0,54446 | 27,55 d | 9,09 |
| Lunar quinzenal | Mf | 1,09810 | 13,66 d | 17,23 |
| Maior elíptica lunar diurna | $Q_1$ | 13,39866 | 26,87 h | 7,90 |
| Principal lunar diurna | $O_1$ | 13,94304 | 25,82 h | 41,50 |
| Principal solar diurna | $P_1$ | 14,95893 | 24,07 h | 19,40 |
| Luni-solar diurna | $K_1$ | 15,04107 | 23,93 h | 58,04 |
| Maior elíptica lunar semi-diurna | $N_2$ | 28,43973 | 12,66 h | 19,20 |
| Principal lunar | $M_2$ | 28,98410 | 12,42 h | 100,0 |
| Principal solar | $S_2$ | 30,00000 | 12,00 h | 46,60 |
| Luni-solar semi-diurna | $K_2$ | 30,08214 | 11,97 h | 12,70 |
| Lunar ter-diurna | $M_3$ | 43,47616 | 8,28 h | 1,31 |

O principal objetivo da análise harmônica do registro de maré de um local é o de poder prever a altura de maré naquele ponto do oceano. Para isso, um registro do local é analisado para componentes de determinadas frequências, usando a análise de Fourier. Utilizando também resultados da Teoria de Equilíbrio, são determinadas uma amplitude $H_j$ e uma fase $G_j$ para cada componente. $H_j$ e $G_j$ são chamadas **constantes harmônicas** de uma componente naquele local e são características de uma posição no mar. Então, a elevação $\eta$ naquele ponto do oceano pode ser prevista para um instante de tempo $t$ qualquer usando a expressão:

$$\eta = \sum_j f_j H_j \cos(\sigma_j t + v_{0j} + u_j - G_j)$$

Onde $\sigma_j$ são as velocidades angulares das diversas componentes de maré, constantes, dadas pela Teoria do Equilíbrio; $f_j$, $v_{0j}$ e $u_j$ são características de cada componente, funções do tempo $t$, sendo também determinadas pela Teoria do Equilíbrio; e, finalmente, $H_j$ e $G_j$ são as constantes harmônicas de cada componente, no local das medições; são portanto funções da posição do ponto de observação das marés no oceano, sendo fornecidos pela análise harmônica de maré (Godin, 1972; Franco, 1988).

Dessa forma, a Teoria do Equilíbrio fornece os valores de $\sigma_j$, $f_j$, $v_{0j}$ e $u_j$; e a análise harmônica da maré de um local, baseada na análise de Fourier de um registro, informa como a geometria dos continentes, a topografia do fundo dos oceanos, a progressão das ondas de maré, a força de Coriolis e os modos naturais de oscilação modificam a maré de equilíbrio naquele local, dando os valores de $H_j$ e $G_j$.

Para cada ponto do oceano, a combinação dos efeitos das componentes de maré astronômica, principalmente $M_2$, $S_2$, $O_1$, $K_1$, N2, $K_2$ e $P_1$, é a principal responsável pelas marés de sizígia e quadratura, assim como pela desigualdade diurna e desigualdade no intervalo da maré.

Deve-se notar que a determinação das forças e acelerações na Teoria Dinâmica das Marés, considerando a Terra real (com continentes e topografia do fundo dos oceanos) e demais efeitos não considerados pela Teoria do Equilíbrio, é muito difícil, devido à extrema complexidade do sistema de equações e de suas condições de contorno. Assim, a análise harmônica da maré estuda o fenômeno evitando a formulação matemática das causas e se ocupando do efeito. Nesta análise, o procedimento é de modo que a análise de Fourier dos registros de altura de maré nos pontos do oceano determina como cada componente de maré é afetada, na amplitude e fase, pelos efeitos não considerados na Teoria do Equilíbrio.

## 8. Classificação das marés

A análise harmônica de maré informa, portanto, os valores de amplitude e fase ($H_j$ e $G_j$) de cada componente de maré, as quais são constantes para cada local no oceano. Por exemplo, a Tabela 2 fornece as constantes harmônicas das componentes $K_1$, $O_1$, $M_2$ e $S_2$ para Cananéia, Santos e Ubatuba, na costa do Estado de São Paulo.

| Componente de maré | $K_1$ | | $O_1$ | | $M_2$ | | $S_2$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Local | *H* (cm) | *G* (°) | *H* (cm) | *G* (°) | *H* (cm) | *G* (°) | *H* (cm) | *G* (°) |
| Cananéia | 6,5 | 187,33 | 11,00 | 126,72 | 36,6 | 179,25 | 23,7 | 184,20 |
| Santos | 6,4 | 184,33 | 11,7 | 127,52 | 37,3 | 173,35 | 23,9 | 179,30 |
| Ubatuba | 5,9 | 183,83 | 10,9 | 128,72 | 29,7 | 165,85 | 17,2 | 171,60 |

A classificação da maré de um local requer o conhecimento das constantes harmônicas de amplitude das componentes $K_1$, $O_1$, $M_2$ e $S_2$; denotando-as como $H(M_2)$, $H(S_2)$, $H(K_1)$ e $H(O_1)$, determina-se a razão denominada **número de forma da maré**:

$$f_m = [H(K_1) + H(O_1)] / [H(M_2) + H(S_2)]$$

E o **tipo de maré** de um local é definido pelo valor de $f_m$, segundo a Tabela 3.

**TABELA 3.** Classificação do tipo de maré em função do número de forma.

| $f_m$ | Tipo de maré |
|---|---|
| $f_m \leq 0{,}25$ | Semi-diurna |
| $0{,}25 < f_m \leq 1{,}5$ | Mista, de desigualdades diurnas |
| $1{,}5 < f_m \leq 3{,}0$ | Mista, com predominância diurna |
| $f_m > 3{,}0$ | Diurna |

Nos oceanos e mares, o tipo de maré predominante é, de fato, a maré semi-diurna, na qual predominam as componentes semi-diurnas, e que se caracteriza por duas preamares (aproximadamente iguais) e duas baixa-mares (idem) num dia lunar. A maré de desigualdade diurna caracteriza-se por ser basicamente semi-diurna, mas as componentes diurnas são notáveis quando a declinação da Lua é grande; resulta então uma desigualdade diurna importante. A maré diurna é produzida principalmente pelas componentes diurnas, resultando em uma preamar e uma baixa-mar em cada dia lunar; ela ocorre principalmente nas vizinhanças do Equador, entre os trópicos, mas com marcantes exceções (devido à topografia local). Na maré mista, na parte do mês lunar em que a Lua cruza o Equador (declinação pequena), a maré é principalmente semi-diurna; e quando a declinação da Lua é grande, as componentes diurnas são suficientemente fortes para produzir uma preamar e uma baixa-mar por dia.

A partir dos dados da Tabela 2, os números de forma da maré nas posições ao longo do litoral do Estado de São Paulo foram: 0,2902 (Cananéia), 0,2958 (Santos) e 0,3582 (Ubatuba), ou seja, são marés semi-diurnas com desigualdades diurnas.

## 9. As correntes de maré

Deslocamentos de grandes volumes de água são responsáveis pelas oscilações periódicas do nível do mar, sendo então denominados **correntes de maré**. Cabe enfatizar que a atuação das correntes de maré ocorre em toda a coluna de fluido, e não apenas na camada superficial do oceano. A explicação para este fato é que as forças geradoras descritas anteriormente possuem ínfima variação de intensidade com a profundidade, fazendo com que toda a coluna de água seja submetida à mesma força e apresente o mesmo movimento; somente nas proximidades do fundo a influência do atrito das correntes de maré tende a diminuir sua intensidade. De qualquer forma, como as forças atuam igualmente ao longo da vertical, e como elas atuam igualmente para locais profundos e rasos, os deslocamentos de volumes de água estarão associados a correntes mais intensas em locais rasos do que em regiões profundas.

Em pontos de mar profundo, distante dos continentes, as correntes de maré descrevem giros periódicos ao longo dos ciclos das oscilações, formando **elipses de correntes de maré**, ou simplesmente elipses de maré. A formação das elipses de maré em oceano aberto não deve ser confundida com a propagação da onda de maré ao redor dos pontos anfidrômicos (descritos no próximo item). Exemplo de elipses da componente $M_2$ de maré na plataforma do Estado de São Paulo se encontra na Figura 10.

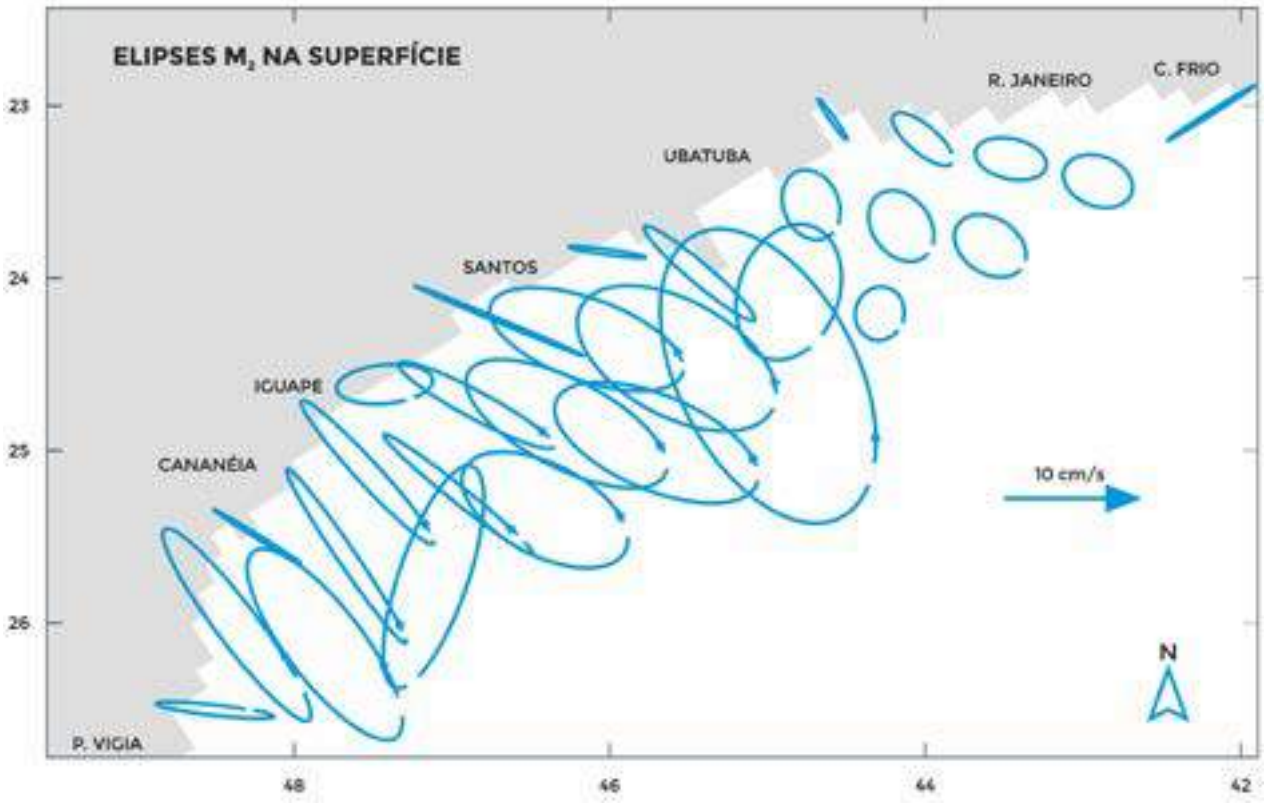



FIGURA 10. Elipses das correntes da componente de maré $M_2$, na superfície, na plataforma do Estado de São Paulo (Harari & Camargo, 1994).

As elipses de maré sobre as plataformas continentais muitas vezes possuem alta excentricidade, com intensidades bem maiores em determinada direção, caracterizando condições típicas de maré enchente e de maré vazante. O sentido de rotação das elipses de maré sobre as plataformas é normalmente controlado pela inclinação do fundo e também pela propagação das ondas em áreas rasas (incluindo baías e canais). À medida que as restrições geométricas aumentam, como em canais estreitos, por exemplo, as correntes de maré tendem a se tornar praticamente retilíneas, alternando seu sentido ao longo de um ciclo completo, do tipo vai-vém.

Registros de correntes são analisados de forma similar às elevações, considerando as componentes de corrente Leste – Oeste (EW) e Norte – Sul (NS) separadamente; a partir das análises das séries temporais das componentes de correntes, são obtidas as constantes harmônicas das correntes de maré (amplitudes e fases das componentes EW e NS), cujas combinações definem os parâmetros das elipses de maré de cada componente de corrente de maré (semi-eixos, excentricidade, orientação, etc.).

## 10. Propagação das ondas de maré

A propagação das ondas de maré ($M_2$, $S_2$, $K_1$, $O_1$, etc.) nas bacias oceânicas se dá através da formação de **sistemas anfidrômicos**, os quais resultam da combinação dos efeitos geradores de maré com o efeito de rotação da Terra e as restrições geométricas das bacias oceânicas. Esses sistemas consistem em cristas de onda circundando um ponto central, chamado ponto anfidrômico; neste ponto, a amplitude da oscilação é zero, havendo aumento da amplitude com a distância ao **ponto anfidrômico**; dessa forma, as linhas de mesma amplitude são concêntricas (a partir do ponto anfidrômico); por

outro lado, a propagação ao redor do ponto anfidrômico faz com que as linhas de mesma fase das componentes sejam radiais em relação a ele (Fig. 11). No oceano profundo, longe das influências de linhas de costa, o potencial gerador de marés e a força de Coriolis agem no sentido de induzir giros das ondas ao redor dos pontos anfidrômicos. Note-se que linhas cotidais de amplitudes correspondem a pontos com a mesma amplitude da componente de maré; linhas cotidais de fase correspondem a pontos nos quais as preamares e baixamares desta componente ocorrem simultaneamente.

Uma metodologia muito útil no estudo do fenômeno das marés se encontra na utilização de modelos numéricos para a geração de séries temporais de nível do mar e correntes, em grades que cobrem regiões de interesse, e posterior análise de maré pelo método harmônico dessas séries temporais, gerando as constantes harmônicas de nível do mar e de correntes (em diversas profundidades). Os modelos podem ser processados considerando somente as forçantes de maré (nos contornos abertos e pela inclusão do potencial de maré) ou considerando todas as forçantes da circulação conjuntamente. A partir das análises das séries em todos os pontos de grade, mapas de linhas cotidais de amplitude e fase podem ser obtidos, incluindo a localização de pontos anfidrômicos, como apresentado na Figura 11 para o Oceano Atlântico Sul e a componente $M_2$ de maré.

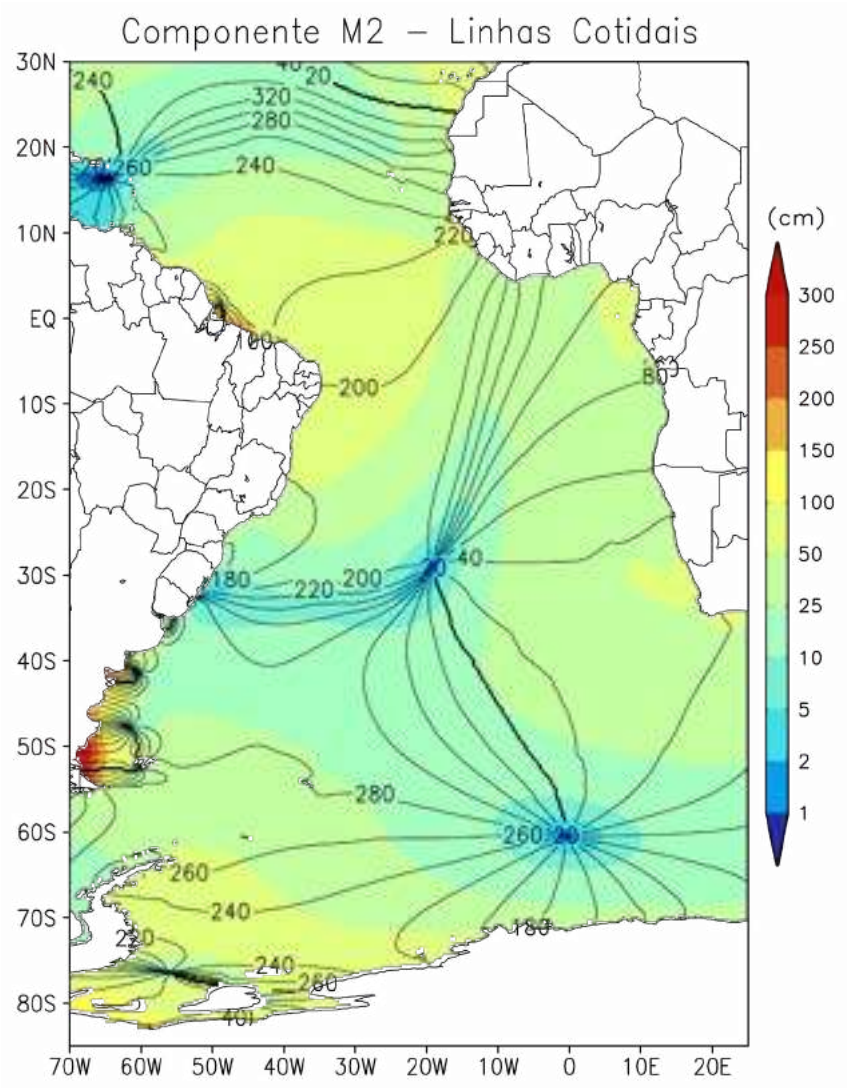



**FIGURA 11.** Mapa cotidal da $M_2$ para o Atlântico Sul, obtido a partir de resultados do modelo global de maré TPXO 7.1 (Egbert & Erofeeva, 2002), com as amplitudes ***H*** em cm e fases ***G*** em graus, referentes ao meridiano de Greenwich. Nota-se a presença de um ponto anfidrômico a 20° W 30° S e as grandes amplitudes da $M_2$ no Norte do Brasil e na Patagônia.

Através das teorias demonstradas, fica evidente o caráter determinante das fases da Lua para reger as variações de amplitude, assim como os efeitos da batimetria e da rotação da Terra nos períodos de oscilação dominantes.

Como a conformação dos continentes impõe restrições ao livre deslocamento das águas, cada bacia oceânica é dominada por alguns períodos típicos de oscilação. Além disso, o comportamento das ondas de maré é significativamente influenciado pela diminuição de profundidade nas áreas de plataforma, costeiras e estuarinas, fazendo com que cada uma dessas regiões tenha características específicas das ondas de maré.

As oscilações de maré nas plataformas continentais ocorrem através de co-oscilação com as marés do oceano profundo, dadas as restrições dinâmicas impostas à propagação das ondas de maré em função da morfologia de cada local. As características das oscilações dependem da inclinação do fundo e da extensão das regiões de plataforma; nas regiões costeiras, há também forte influência da presença de embaiamentos ou penínsulas, assim como de estuários e canais.

Na costa brasileira existe considerável diversidade de amplitudes de maré astronômica. Por um lado, o litoral do Rio Grande do Sul é caracterizado por amplitudes reduzidas da maré astronômica (menores que 50 centímetros); por outro lado, a porção oeste da costa Norte do Brasil possui oscilações que atingem 6 a 7 metros de amplitude. Essas grandes elevações se devem basicamente a ressonâncias em escala de bacia oceânica, enquanto as menores oscilações são devidas à proximidade aos pontos anfidrômicos.

## 11. Efeitos não-lineares: componentes de águas rasas

Quando as ondas de maré alcançam regiões de pequena profundidade ocorrem efeitos não-lineares de interação entre componentes de maré, tais como fricção no fundo e ressonâncias, os quais dão origem a componentes com frequências distintas das originais, denominadas **componentes de pequeno fundo** ou **componentes de águas rasas** (pode até ocorrer a interação de uma componente de maré com ela própria).

Essas componentes de pequeno fundo possuem frequências angulares (ou seja, períodos) que são combinações lineares das frequências angulares (períodos) das principais componentes que interagem; por exemplo, a interação das componentes $M_2$ e $S_2$ pode gerar uma componente $MS_4$, cujo índice 4 indica que esta componente se repete cerca de 4 vezes por dia, ou seja, seu período é em tono de 6 horas; outro exemplo: a componente $3MNS_6$, formada pela interação das componentes de maré $M_2$, $N_2$ e $S_2$, se repete cerca de 6 vezes por dia, portanto, seu período é em torno de 4 horas. Há componentes de pequeno fundo que se repetem 12 por dia, ou seja, possuem períodos em torno de 2 horas.

Os parâmetros das componentes de águas rasas (amplitudes e fases, $\boldsymbol{H}$ e $\boldsymbol{G}$) são determinados pela análise harmônica de maré de forma similar às principais componentes astronômicas.

Também de forma análoga às componentes astronômicas principais, as componentes de pequeno fundo geram **correntes de maré de pequeno fundo**, com frequências angulares correspondentes, cujos parâmetros são determinados pela análise harmônica das componentes EW e NS das correntes.

## 12. Efeitos não astronômicos no nível do mar

Além dos efeitos de marés (principais e de pequeno fundo), o nível do mar tem variações associadas a efeitos meteorológicos, do campo de densidade e influências fluviais; os rios afetam tanto os sistemas de correntes como também as distribuições de salinidade e, consequentemente, de densidade (em estuários e regiões costeiras). A fricção do vento na superfície do mar, variações espaciais de pressão atmosférica, variações espaciais da densidade da água do mar e descargas fluviais provocam acelerações e correntes que afetam a distribuição do nível do mar, nas mais variadas escalas espaço-temporais, com o efeito conjunto provocando as variações do **nível médio do mar**. Devido à combinação desses efeitos, as marés não oscilam em torno de um nível fixo e pemanente, mas em relação ao nível médio do mar, cujos períodos são em geral em torno de alguns dias, com as "**frequências de sub-maré**".

Alguns autores denominam a influência de fatores meteorológicos no nível do mar, em escala de poucos dias, como **maré meteorológica**; outros termos utilizados são **maré de tormenta**, **ressaca** ou **maré residual**; em geral, o vento é mais efetivo que a pressão atmosférica nas variações do nível médio do mar (Pugh, 1996).

As variações do nível médio do mar, geralmente entre alguns centímetros e poucos metros, algumas vezes apresentam características de oscilações periódicas, como as associadas aos ciclos diurno e sazonal de insolação e de atuação dos ventos, embora a repetibilidade dos efeitos (e das respostas do oceano) não seja tão precisa como no caso das marés. Porém, em geral, as variações do nível médio do mar são "aperiódicas" e, consequentemente, previsões das variações do nível do mar de alta precisão e grande antecedência normalmente se restringem à parte das marés astronômicas, enquanto que a previsão do nível médio do mar é limitada a poucos dias de antecedência, dependendo muito de boas previsões meteorológicas e de modelos numéricos hidrodinâmicos de boa qualidade.

De qualquer forma, como resultado final, as variações do nível do mar são devidas aos efeitos aditivos de marés (astronômicas) e dos demais efeitos acima citados, gerando resultados como a série temporal da Figura 12, que mostra a decomposição desta série no sinal periódico das marés e no sinal residual.

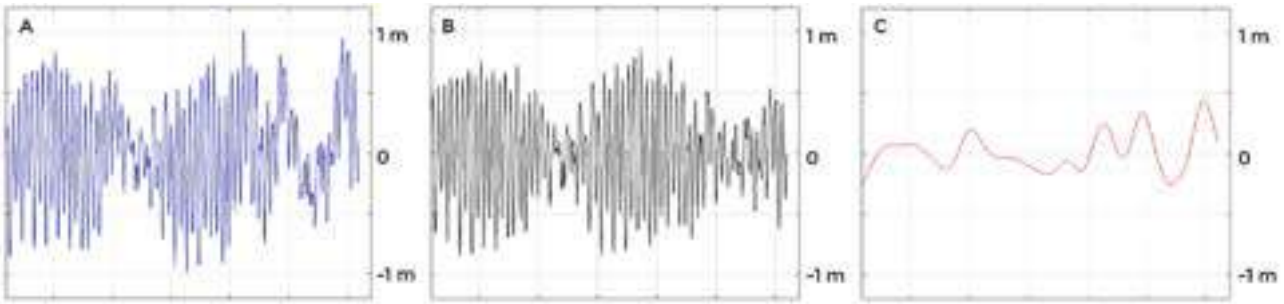



**FIGURA 12.** Decomposição da série temporal do nível do mar em Cananéia, em setembro de 2009 (A) nos sinais de maré (B) e residual (C).

De fato, a análise de longos registros de nível do mar permite a detecção e caracterização das oscilações do nível médio, desde a escala de poucos dias até a decadal e secular. Por outro lado, em algumas regiões do oceano ocorrem interações não lineares significativas entre os efeitos de maré e residuais; por exemplo, em estuários com vazão de água doce significativa, para os quais o escoamento de vazante inclui a drenagem continental, pode haver situações com correntes mais intensas de vazante ou então períodos mais longos de maré vazante, o que caracteriza uma assimetria no ciclo da maré.

Um exemplo interessante de assimetria de maré é encontrado na costa Norte do Brasil, em Bragança, Estado do Pará (Fig. 13), onde o intervalo de tempo que caracteriza a enchente é menor do que o de vazante.

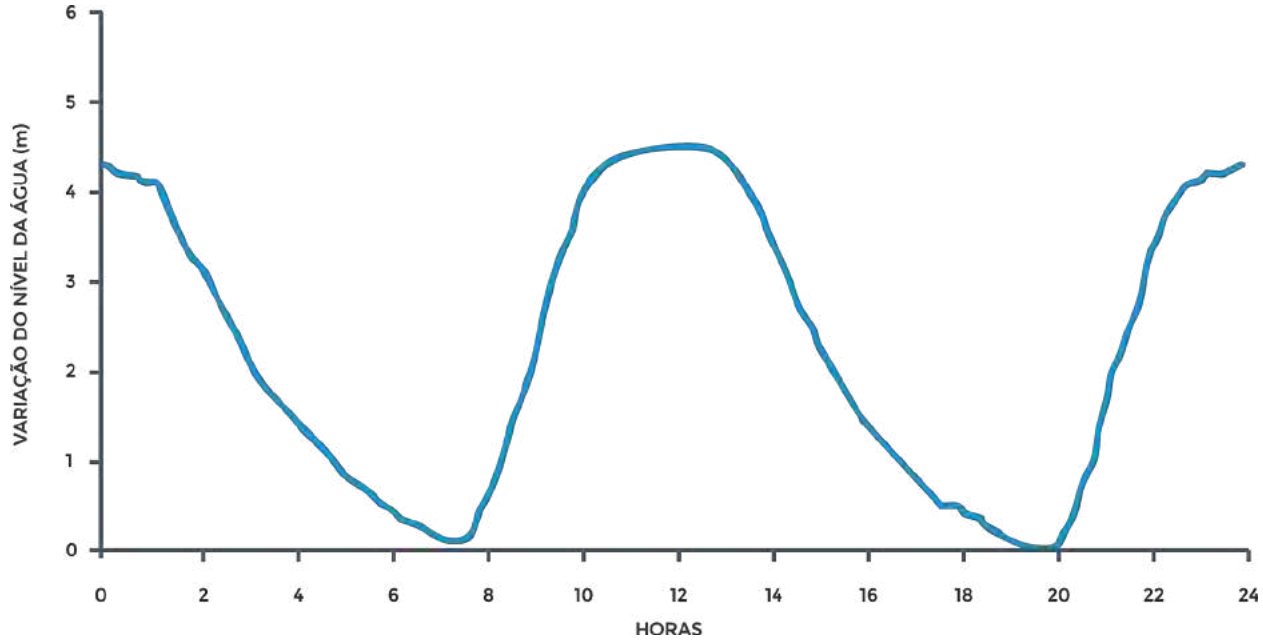



**FIGURA 13. Exemplo de maré com forte assimetria enchente - vazante na costa brasileira, na maré de sizígia, com 4 e 8 horas, respectivamente, no Rio Caeté, Município de Bragança (PA).** *Adaptado de Pereira et al, 2010).*

Também interações maré-batimetria muitas vezes provocam assimetrias na circulação de maré, como por exemplo em estuários de complexa geometria com grande variabilidade horizontal do campo de correntes de maré; nessas regiões, é comum a ocorrência de fluxos de enchente e vazante que não apresentam as mesmas intensidades em todos os pontos dos estuários, fazendo com que determinadas áreas favoreçam as correntes de enchente, enquanto outras são mais propícias à vazante. Este comportamento dá origem aos chamados vórtices de maré, que são estruturas residuais causadas pelo vaivém assimétrico ao longo de vários ciclos de maré. Situações deste tipo podem ser encontradas em estuários relativamente largos e extensos, como é o caso da Baía de Paranaguá, Estado do Paraná (Camargo & Harari, 2003).

Dentre os efeitos "aperiódicos" que mais afetam o nível do mar podem ser destacados: 1) grandes vazões fluviais; 2) o ciclo diurno de aquecimento solar e a brisa marítima; 3) sistemas frontais intensos, tempestades e furacões; 4) variações meteorológicas sazonais (pressão atmosférica, radiação solar, temperatura, vento, etc.); 5) variabilidades meteorológicas intra-sazonais; 6) oscilações atmosféricas inter-anuais e decadais em grande escala; e 7) variações climáticas globais, como as associadas ao efeito estufa.

Na composição desses efeitos com os efeitos de maré, muitas vezes condições extremas são registradas, como por exemplo na ocorrência de furacões em períodos de maré de sizígia, que podem acarretar a inundação de vastas áreas costeiras, especialmente as de baixa topografia, como planícies de maré, ou podem rebaixar demasiadamente o nível médio do mar, causando riscos à navegação.

Dentre os efeitos acima citados, o aquecimento global tem sido motivo de grande preocupação da sociedade e dos cientistas. A taxa média global de variação do nível médio do mar é de 3,42 ± 0,4 mm/ano, como demonstram observações globais de altimetria de satélite; entretanto, há uma enorme variabilidade espacial da tendência anual do nível médio do mar, com muitas áreas oceânicas experimentando inclusive redução do nível médio a longo prazo (Figs. 14 e 15).

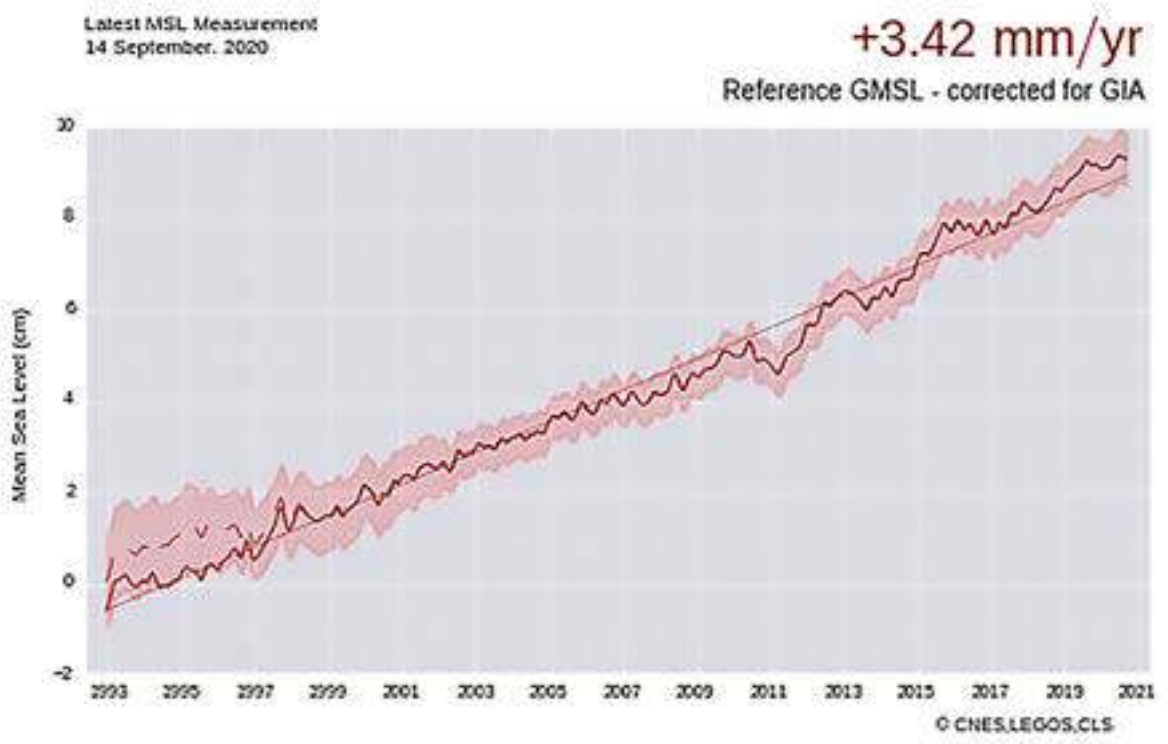



**FIGURA 14.** Tendência de elevação do nível médio do mar global a partir de medições de altimetria de satélite, de janeiro de 1993 a setembro de 2020, com valor médio de + 3,42 ± 0,40 mm/ano (com 90% de confiança). *Fonte: <https://www.aviso.altimetry.fr>.*

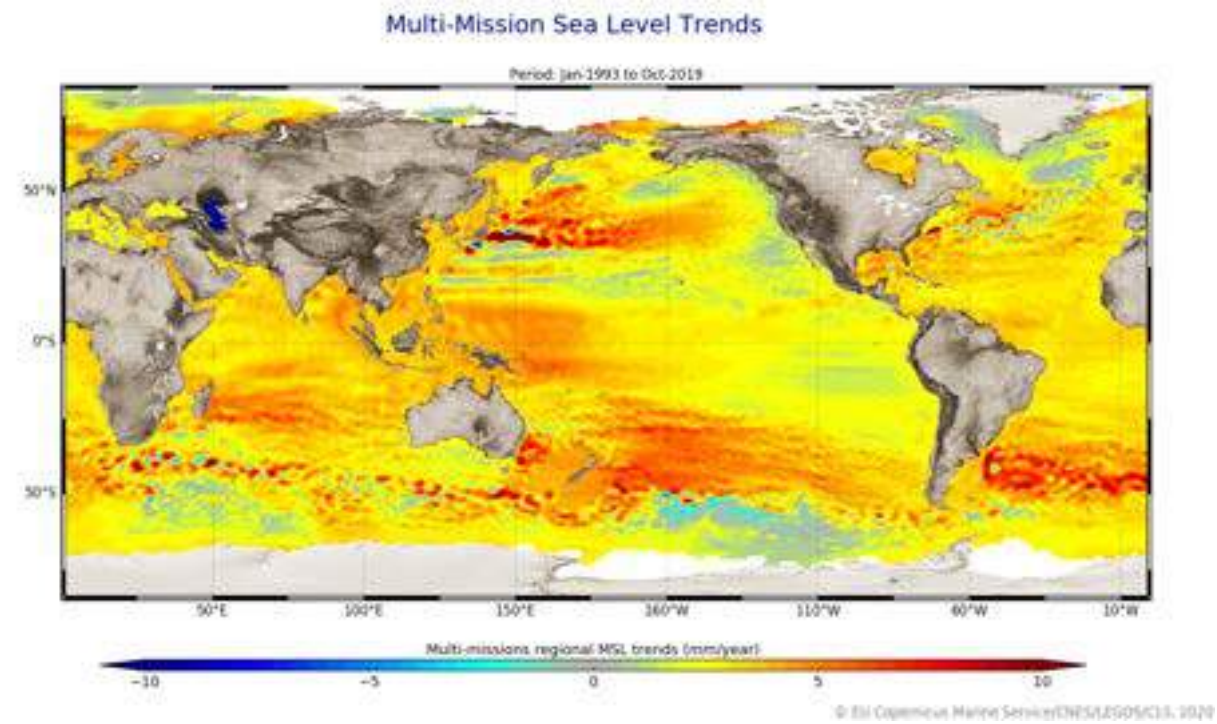



**FIGURA 15.** Distribuição das tendências de elevação do nível médio do mar em todos os oceanos (em mm/ano), para o período de janeiro de 1993 a outubro de 2019, segundo medições por altimetria de satélite. *Fonte: https://www.aviso.altimetry.fr/>.*

## 13. Energia das marés

As elevações e as correntes de maré envolvem quantidades consideráveis de energia potencial e cinética, as quais são relacionadas a diversos efeitos geofísicos importantes, como por exemplo o atrito das correntes no fundo do mar, principalmente em plataformas continentais muito extensas, que tem por consequência o atraso na rotação da Terra e o aumento da duração do dia (da ordem de 2 milissegundos por século). Por outro lado, a grande quantidade de energia associada ao fenômeno das marés se torna um desafio para a sociedade e a ciência em relação ao seu aproveitamento.

De fato, os oceanos podem produzir dois tipos de energia: a térmica, a partir do calor do sol, e a mecânica, pela ação de ondas e marés. Como os oceanos cobrem mais de 70% da superfície da Terra, constituem eficientes coletores solares: a energia do sol aquece a camada da superfície muito mais do que as águas profundas do oceano, de modo que esta diferença de temperaturas gera energia (Avery & Wu, 1994). Já no caso da energia mecânica, elevações e correntes são impulsionadas principalmente pelos ventos e as marés, envolvendo grandes quantidades de energias cinética e potencial que podem ser convertidas em eletricidade (Gorlov, 2004). Em geral, ondas e marés são fontes de energia intermitentes, enquanto a energia térmica do oceano é contínua. Estimativas do potencial energético no oceano indicam 40 bilhões de MW na exploração da energia térmica, 2,5 milhões de MW para as ondas e 2,7 milhões de MW para as marés.

A geração de eletricidade a partir das marés é semelhante à geração hidrelétrica (Gorlov, 2001), com exceção que nas marés a água flui em dois sentidos (e as pás das turbinas devem ser reversíveis). O mais simples sistema para gerar energia das marés envolve uma barragem, em geral numa enseada, com portões que regulam a vazão das águas nas marés enchentes e vazantes: na subida da maré, a água enche o reservatório, passando através das turbinas e produzindo energia elétrica, e na descida da maré, o reservatório é esvaziado e água que sai do reservatório passa novamente através das turbinas, também produzindo energia elétrica.

Para que este sistema funcione bem, são necessárias marés e correntes fortes (um desnível da água de pelo menos 5,5 metros da preamar para a baixa-mar), uma área de bacia suficientemente grande e um número de turbinas que tornem o empreendimento viável. De acordo com Pugh (1996), existem poucos locais no mundo onde se verificam estas condições (entre 20 e 40), como La Rance (França), a Baía de Fundy (Canadá) e o Estuário de Severn (Inglaterra). A Figura 16 apresenta a localização das regiões com grandes amplitudes de maré, nas quais há potencial uso da energia das marés.

Outro fator importante é a proximidade do local gerador da energia a uma área com demanda. Evidentemente, a construção de uma barragem em uma enseada pode ter impactos ambientais como, por exemplo, mudar o nível das marés na bacia e afetar os padrões de sedimentação, erosão e turbidez da água, bem como prejudicar a navegação, a recreação e a cadeia alimentar marinha local.

Outro problema com o aproveitamento da energia das marés se encontra nas variações de amplitude no tempo como, por exemplo, entre as marés de sizígia (na lua nova ou cheia), com grandes amplitudes, e as de quadratura (na lua crescente ou minguante), de pequenas amplitudes. A usina de maré de La Rance é a mais completa do seu tipo no mundo, localizada no norte da França, no rio La Rance, no Canal da Mancha. A usina foi concluída em 1967, com 24 turbinas, cada uma capaz de produzir 10 MW de potência. A barragem propriamente dita tem 750 m de comprimento e 13 m de altura. Para construir essa única planta, 25 anos de estudos e 6 anos de construção foram necessários; o local foi escolhido porque tem uma das maiores amplitudes de maré do mundo, acima de 6,5 m, e produz cerca de 550 GWh anualmente. A unidade também é equipada com bombas que permitem bombear água para a bacia, de modo a poder gerar mais eletricidade se houver aumento de demanda.

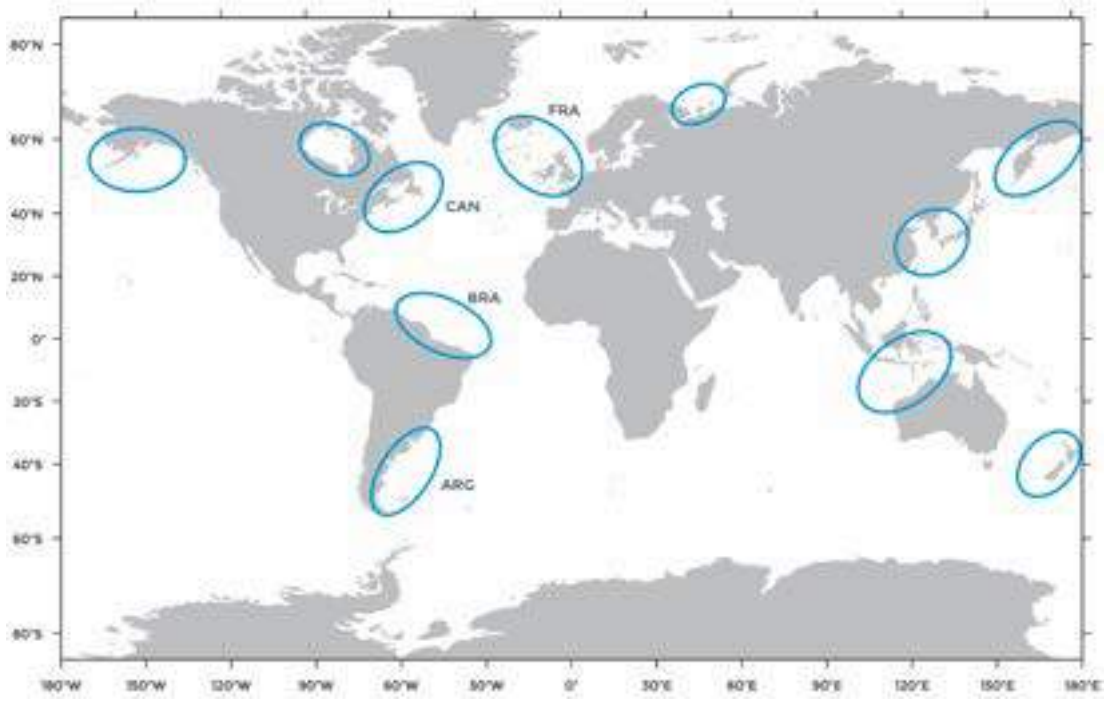



**FIGURA 16.** Localização das regiões com maiores amplitudes de maré em todos os oceanos, com destaque para as regiões da Patagônia (ARG), Norte do Brasil (BRA), Baía de Fundy (CAN) – que possui o maior range de maré do mundo com 15 metros, e Estuário de La Rance (FRA) – que possui a usina maré motriz mais conhecida no mundo.

Como alternativa às usinas com barragens, há a opção de utilizar "cercas de maré": barreiras conduzem fortes correntes de maré (algo entre 1 e 2 m/s) que passam por turbinas montadas em canais, os quais podem ser entre o continente e uma ilha vizinha ou entre duas ilhas (Gorlov, 2001). Como resultado, as cercas de marés têm menos impacto sobre o ambiente, pois não exigem a inundação de bacias, além de terem instalação significativamente mais barata.

Quanto à energia de marés no Brasil, há alguns locais adequados à construção de usinas maré-motriz, como na foz do rio Mearim (Maranhão), na foz do Tocantins (Pará) e na foz da margem esquerda do Amazonas (Amapá); nesses locais, o impacto ambiental seria mínimo, pois as águas represadas pelas barragens não inundariam terras novas, apenas aquelas que a própria maré já cobre. No país, grandes alturas (ranges) de maré são observadas em São Luís, na Baia de São Marcos (Maranhão, com 6,8 m) e em Igarapé do Inferno, na Ilha de Marajó (Amapá, com 11,5 m), mas nestas regiões a topografia do litoral não favorece a construção de reservatórios, o que exigirá dos brasileiros vencer um grande desafio científico e tecnológico para o aproveitamento econômico de sua energia.

## Referências Bibliográficas

AVERY, W. H. & WU, C., 1994. Renewable energy from the oceans: a guide to OTEC. University Press, 446p.

CAMARGO, R. & HARARI, J., 2003. Modeling the Paranagua Estuarine Complex, Brazil: tidal circulation and cotidal charts. Braz. j. oceanogr., 2003, vol.51, no.unico, p.23-31. ISSN 1679-8759 doi: 10.1590/S1679-87592003000100003.

DOODSON, A.T., 1921. Harmonic development of the tide-generating potential. Proceedings of the Royal Society of London, A100, 305-29.

EGBERT, G.D. & EROFEEVA, S.Y., 2002. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides, J. Atmos. Oceanic Technol., 19(2), 183-204.

FRANCO, A.S., 1988. Tides: fundamentals, analysis and prediction. 2ª ed., São Paulo, Instituto de PesquisasTecnológicas, 232p.

GODIN, G., 1972. The Analysis of Tides, Liverpool, Liverpool University Press, 264p.

GORLOV, A. M., 2001. Tidal Energy, in Encyclopedia of Science and Technology, 2955-2960.

GORLOV, A. M., 2004. Harnessing power from ocean currents and tides, Sea Technology, July 2004, 40-43.

HARARI, J. & CAMARGO, R., 1994. Simulação da propagação das nove principais componentes de maré na plataforma sudeste brasileira através de modelo numérico hidrodinâmico. Boletim do Instituto Oceanográfico, S. Paulo, 42 (1): 35-54, https://doi.org/10.1590/S0373-55241994000100003.

McLELLAN, H.J., 1968. Elements of Physical Oceanography. Pergamon Press, Edinburgh, Great Britain, 151 pp.

PEREIRA, L.C.C. *et al.*, 2010. Seasonal effects of wastewater to the water quality of the Caeté river estuary, Brazilian Amazon. An. Acad. Bras. Ciênc., June 2010, 82(2), p.467-478. ISSN 0001-3765. doi: 10.1590/S0001-37652010000200022.

PUGH, D.T., 1996. Tides, surges and mean sea-level, UK, John Wiley & Sons Ltd, 486p.

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 14*

# O OCEANO AUSTRAL E O CLIMA

*Marcos Tonelli, Ilana Wainer & Natália Silva*

CITAÇÃO SUGERIDA: TONELLI, Marcos; WAINER, Ilana; SILVA, Natália. O Oceano Austral e o clima. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 14: p. 299-308.

# O Oceano Austral e o Clima

*Marcos Tonelli, Ilana Wainer & Natália Silva*

O oceano que circunda o Continente Antártico (CA) é conhecido como **Oceano Austral** (OA) e, devido ao seu isolamento geográfico, possui características particulares e representa uma das regiões do globo com menor influência direta da atividade antrópica.

Limitado ao sul pelo CA, o OA não possui uma definição única para sua extensão norte, uma vez que esta varia em função dos diversos processos e mecanismos estudados pelos diferentes campos de pesquisa das ciências da Terra. Segundo o Tratado Antártico (Hanessian, 1960), o OA representa o oceano ao redor do CA que se estende até 60° de latitude sul (60°S). Contudo, baseando-se em uma definição dinâmica que considere os processos oceanográficos da região, o OA pode facilmente atingir 30°S, sendo essa a maior extensão norte da Frente Subtropical (do inglês, STF – *Subtropical Front*, Sokolov & Rintoul, 2009).

Observando-se a geometria circumpolar ao sul de 55°S, a influência global do OA se deve, basicamente, a uma característica geomorfológica da região: a Passagem de Drake (ou Estreito de Drake) se localiza na única faixa contínua por onde o oceano flui livremente conectando as três grandes bacias (Atlântico, Índico e Pacífico) e transportando anomalias climáticas através delas (Rintoul *et al.*, 2012b). A ausência de barreiras continentais possibilita a formação de uma estrutura dinâmica que limita a troca de calor meridional do OA com o oceano global: a Corrente Circumpolar Antártica (do inglês, ACC – *Antarctic Circupolar Current*, Sokolov & Rintoul 2009).

Representado a estrutura dinâmica mais importante do OA, a ACC consiste de um fluxo geostrófico forçado pelo vento fluindo ao redor da Antártica aproximadamente entre 45° e 55°S (Fig. 1; Trenberth *et al.*, 1990). A ACC transporta os maiores volumes de água no oceano comparada a qualquer outra corrente oceânica: 147 Sv ao sul da Austrália (Rintoul & Sokolov 2001) e 137 Sv ao sul da América do Sul e da África (Cunningham *et al.*, 2003).

A ACC é formada por uma complexa estrutura que consiste de múltiplos jatos frontais (*i.e.*, zonas de gradientes máximos locais de altura do nível do mar e velocidades de correntes) que definem as propriedades das massas de água e limitam os regimes da circulação ao redor do Continente Antártico. Em regiões onde a ACC se distancia do CA, ocorre a formação de grandes giros ciclônicos, dos quais se destacam o Giro de Weddell e o Giro de Ross (Fig. 1; Deacon, 1979; Rodman & Gordon, 1982; Reid, 1997).

A criosfera é um dos compartimentos do sistema climático com maior impacto sobre a dinâmica do OA e sobre o transporte global de calor pelos oceanos. Os componentes da criosfera presentes no ambiente Antártico governam a maior parte da dinâmica regional. O CA passa a maior parte do ano circundado por uma camada de água do mar congelada (gelo marinho) com espessura variando entre 1 e 2 metros (Lythe *et al.*, 2001). Em setembro, o gelo marinho cobre uma área de 19-20 · $10^6$ $km^2$, quando as primeiras camadas finas de gelo do ano alcançam 60°S ao redor do continente, e chegando a 55°S na região do Mar de Weddell. A maior parte desse gelo, contudo, derrete durante o verão e tem sua área reduzida para aproximadamente 3 · $10^6$ $km^2$ em março, ou seja, menos de 20% da extensão máxima anual (Fig. 2).

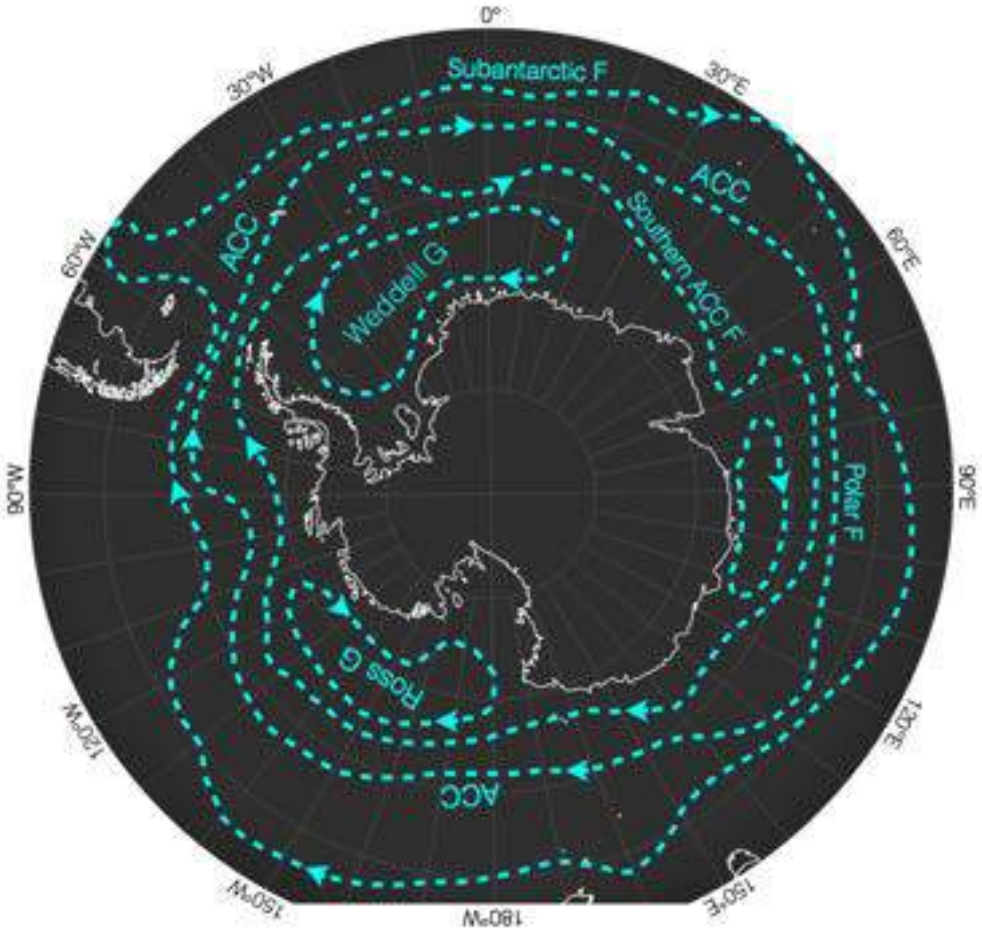



**FIGURA 1.** Representação do Sistema de correntes no Oceano Austral. A Corrente Circumpolar Antártica (ACC) flui de oeste para leste ao redor do Continente Antártico em três ramos principais: a Frente Subantártica, Frente Polar e Frente Sul da ACC. Os Giros de Weddell e Ross preenchem as bacias profundas entre a ACC e o Continente Antártico. Esses giros atuam como fontes de águas quentes, que são capturadas da ACC e advectadas para a borda da plataforma continental. *Extraída de Tonelli (2014).*

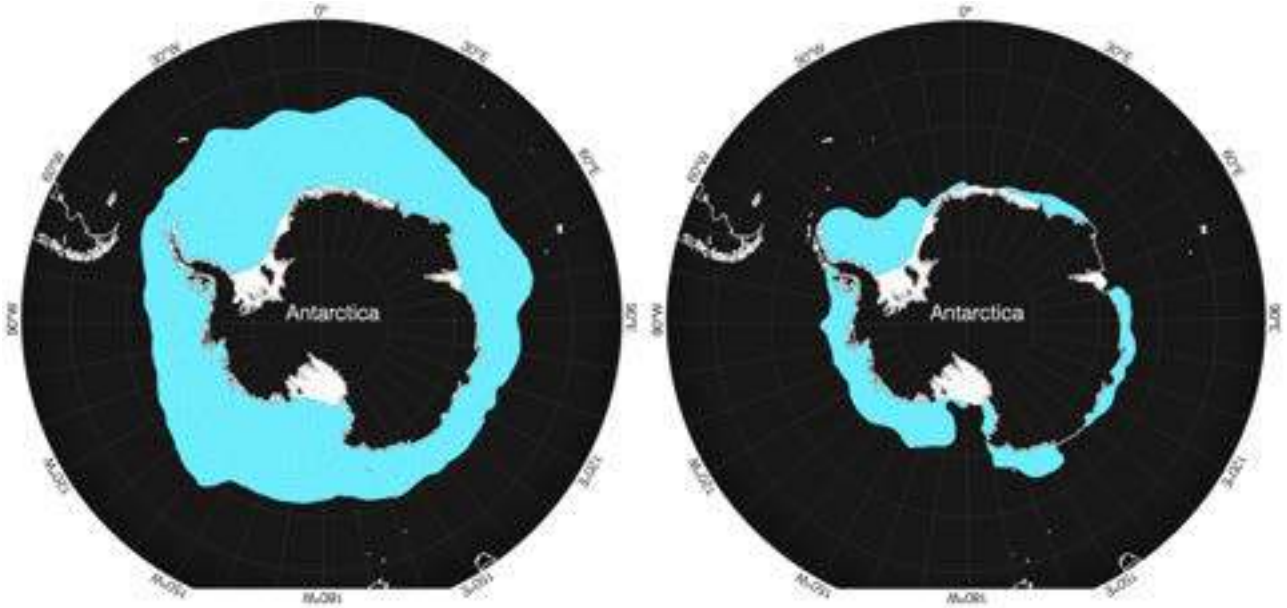



**FIGURA 2.** Mapas mostrando a extensão de gelo marinho no Oceano Austral no inverno (setembro – esquerda) e verão (fevereiro – à direita). Os mapas representam a média da extensão de gelo do período 1979 e 2002/2003, baseado nas observações de satélite (ESMR-nimbus-5). *Extraída de Tonelli (2014).*

Até mesmo uma fina camada de gelo tem impacto sobre o clima na Antártica. Com apenas 10 cm de espessura, o gelo marinho é capaz de reduzir a troca de umidade e de gases entre o oceano e a atmosfera, diminuindo a troca de calor em 90% (Rintoul *et al.*, 2012a). Além disso, o gelo marinho tem um efeito muito importante sobre o albedo da superfície. Por exemplo, enquanto a superfície livre do mar é capaz de absorver 90% da radiação solar incidente, o gelo reflete de volta para o espaço a mesma quantidade de radiação, dependendo da espessura do gelo ou cobertura de neve, isolando termicamente as águas do oceano subjacente. Por outro lado, um processo de retroalimentação ocorre quando o gelo recua: o calor absorvido pela superfície livre do oceano aquece as águas superficiais, o que intensifica o processo de derretimento do gelo marinho (Rintoul *et al.*, 2012a).

Devido às trocas de grande quantidade de energia e momento com as camadas inferiores da atmosfera (Wallace & Hobbs, 1977), o oceano redistribui a radiação solar incidente das baixas latitudes para as regiões polares através de um sistema originalmente denominado Cinturão Condutor Oceânico (Broecker, 1987). Segundo o esquema proposto por Broecker, o fluxo de calor ao redor do globo seria realizado por um grande sistema de correntes oceânicas composto por dois ramos: um ramo superior quente, responsável por absorver o excesso de calor das regiões tropicais e liberara essa energia de volta para a atmosfera nas regiões polares; e um ramos inferior frio, resultante da formação de águas densas profundas no Atlântico Norte. Por conservação de massa, as águas do ramo inferior escoariam junto ao fundo até ressurgirem na superfície da porção norte dos Oceanos Pacífico e Índico (Fig. 3).

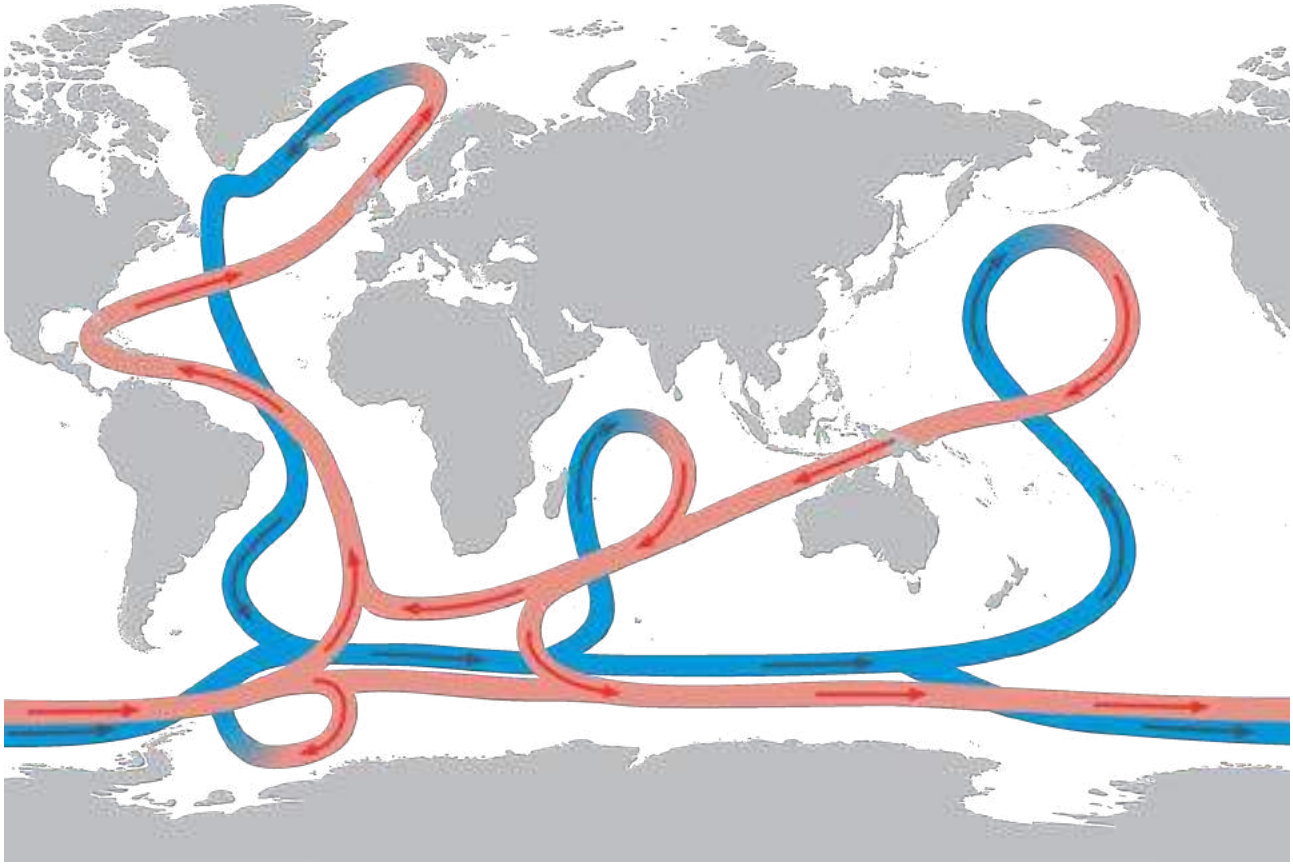


**FIGURA 3.** **Representação da Circulação de Revolvimento Meridional (MOC). O ramo superior (em vermelho) transporta águas quentes para os polos, onde afunda, formando o ramo inferior frio (em azul) responsável por ventilar o fundo dos oceanos.** *Baseada no esquema proposto por Broecker (1987) e atualizada com a participação do Oceano Austral.*

O Cinturão Condutor Oceânico é, essencialmente, a representação do efeito resultante da interação entre diversas correntes e massas de água em diferentes camadas da coluna de água, criando um padrão de circulação vertical de ventilação do assoalho oceânico conhecido como Circulação Termohalina (do inglês, THC – *Thermohaline Circulation*). Mesmo sendo uma primeira proposta para explicar o transporte de calor pelos oceanos, se considerarmos que aproximadamente 50% da radiação solar incidente no topo da atmosfera é armazenada pelo oceano, fica evidente o seu papel como o grande modulador climático da Terra.

Uma atualização para o esquema da THC foi apresentada por Schmitz (1996), evidenciando, além da interação multicamadas entre as massas de água, o papel central do Continente Antártico e do Oceano Austral no estabelecimento desse padrão global de transporte de calor. Processos de transformação que ocorrem exclusivamente sobre a plataforma continental da Antártica resultam na formação na Água de Fundo Antártica (AFA; do inglês, AABW – *Antarctic Bottom Water*; Fig 4); uma das principais componentes do ramo inferior da THC (Orsi *et al.*, 2002). Por fim, uma vez que a THC é forçada não apenas por gradientes de temperatura e salinidade (*i.e.*, densidade), mas também por processos de trocas de momento na interação oceano-atmosfera-criosfera, um termo mais abrangente foi adotado recentemente pela comunidade científica para definir essa circulação de escala planetária: Circulação de Revolvimento Meridional (do inglês, MOC – *Meridional Overturning Circulation*).

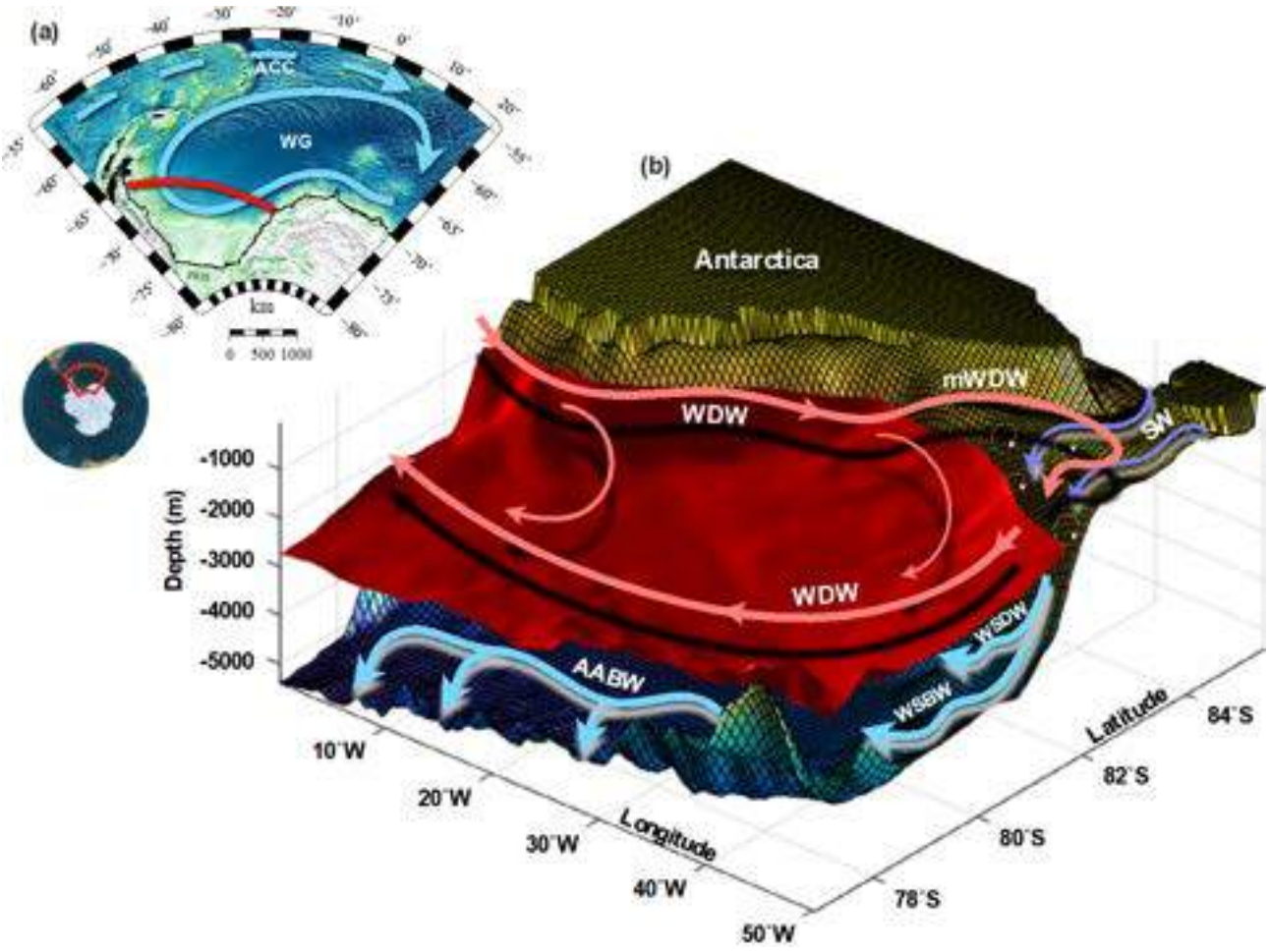



**FIGURA 4.** Representação do processo de formação da Água de Fundo Antártica. O Giro de Weddell (WG) interage com a Corrente Circumpolar Profunda (ACC) advectando águas relativamente quentes para região da quebra da plataforma do ar de Weddell (a). Essas águas formam a *Warm Deep Water* (WDW) que interage com águas de plataforma (SW) para formar a Água Profunda do Mar de Weddell (WSDW) e a Água de Fundo do Mar de Weddell (WSBW), posteriormente exportadas como Água de Fundo Antártica (AABW). *Extraída de Tonelli et al., 2014.*

Os impactos da MOC sobre o sistema climático vão muito além do balanço energético da Terra, afetando, por exemplo, os ciclos de carbono e nutrientes do planeta. Além do calor, as águas superficiais do OA carregam oxigênio e dióxido de carbono para interior do oceano durante a formação de águas densas, ventilando as camadas profundas e aumentando a capacidade do OA para sequestrar e armazenar calor e carbono. Graças à MOC, estima-se que o oceano tenha armazenado mais de 85% de todo o excesso de calor acumulado pelo sistema climático terrestre durante a segunda metade do século XX (sendo a maior parte aprisionada no OA), impedindo o aquecimento excessivo da atmosfera e o derretimento dos componentes da criosfera (Levitus *et al*., 2005). Segundo Rintoul *et al*., (2012b), quando integrada zonalmente, a quantidade de calor OA armazenada pelo OA é maior do que qualquer outra faixa de latitude do planeta.

Sobre o dióxido de carbono, Sabine *et al*., (2004) sugerem que aproximadamente 40% do inventário total de $CO_2$ antropogênico se encontra ao sul de 30°S, o que mostra a eficiência da célula superior da MOC em transportar águas com grandes concentrações de $CO_2$ da superfície para o oceano profundo. Assim, esse processo de formação de águas densas remove o $CO_2$ antropogênico da atmosfera e o aprisiona nas camadas profundas do oceano. Reciprocamente, a ressurgência de águas ricas em carbono em altas latitudes promove a liberação de $CO_2$ de volta para a atmosfera, de modo que alterações na MOC podem resultar em mudanças nos processos de sequestro e armazenamento de $CO_2$ pelo oceano (Butler *et al*., 2007; Le Quéré *et al*., 2007; Verdy *et al*., 2007).

A circulação do OA também influencia os processos químicos e biológicos do oceano global. A ressurgência de águas profundas disponibiliza nutrientes para as camadas superficiais, onde, associados à radiação solar incidente, favorecem a produtividade primária tanto no OA quanto no restante do oceano. Estudos de Sarmiento *et al*., (2004) mostraram que as águas ricas em nutrientes exportadas do OA regulam até 75% da produtividade primaria global. Essa produtividade, por sua vez, impacta diretamente os processos sequestro e armazenamento de carbono atmosférico, uma vez que a matéria orgânica produzida na superfície afunda e é decomposta no oceano profundo (Tréguer & Jacques, 1993). Assim, tanto por meio de mecanismos químicos quanto biológicos, o balanço entre os processos de ressurgência e formação de águas profundas que compõem a MOC acaba por determinar a quantidade de carbono armazenada pelo oceano.

Apesar da evidente importância da criosfera para o OA, bem como para o restante do planeta, estudar as componentes desse compartimento do sistema climático na sua própria variabilidade, interação com o oceano e impactos potenciais, como a elevação do nível do mar, não é uma tarefa fácil. A área da superfície congelada durante o inverno pode ser maior do que a área do próprio CA (Fig. 2; Convey *et al*., 2009). Variações na extensão ou no volume do gelo marinho impactam diversos processos locais: taxas de formação de águas profundas, fluxos de interface oceano-atmosfera, a cadeia trófica do fitoplâncton aos animais superiores e até mesmo no albedo da Terra em escala planetária (Rintoul *et al*., 2012a). Águas mais quentes advectadas para o interior da plataforma continental promovem o derretimento basal das plataformas de gelo, alterando o balanço de água doce em altas latitudes e a estratificação da coluna de água, pro fim, alterando o balanço de massa do manto de gelo da Antártica e a taxa em que o gelo continental flui para o oceano (Rignot *et al*., 2004).

Dentre diversas forçantes que modulam o clima antártico, a circulação atmosférica é protagonista no continente, sendo responsável por advectar calor e umidade vindos do OA para o interior extremamente frio e seco, resultando em eventos de precipitação, derretimento de gelo ou redistribuição de massa (Marshall, 2007; Schlosser *et al*., 2016; Medley & Thomas, 2019). Mais de metade da circulação atmosférica na Antártica podem ser explicados pelos três principais modos climáticos da região (Yuan *et al*., 2008).

O Modo Anular do Hemisfério Sul (do inglês, SAM) é o principal deles e corresponde à mais de um terço da variabilidade climática nas altas latitudes do hemisfério sul (Marshal, 2007). Esse fenômeno natural refere-se a uma estrutura atmosférica zonalmente simétrica ao redor da Antártica, centrada em 55° S, que se determina pelo gradiente de pressão entre médias e altas latitudes (Thompson & Wallace, 2000; Marshall, 2003). Ou seja, é estimado pela diferença de pressão entre 40° e 65°S de latitude (Gong & Wang, 1999). Devido ao aumento da concentração de gases estufa, desde 1950 um centro de baixa pressão tem se estabelecido na costa da Antártica, fazendo com que o índice do SAM migre para sua fase positiva (Hartman *et al.*, 2013). Nesse cenário, observa-se fortalecimento dos ventos de oeste que rodeiam a Antártica e intensificação no padrão de dipolo da temperatura, isto é, aquecimento na Península Antártica e no oeste do continente, oposto ao resfriamento no leste (Turner *et al.*, 2005; Silva *et al.*, 2019). Na Figura 5A, extraída de Yuan *et al.*, (2008), é possível observar o padrão espacial do modo climático SAM.

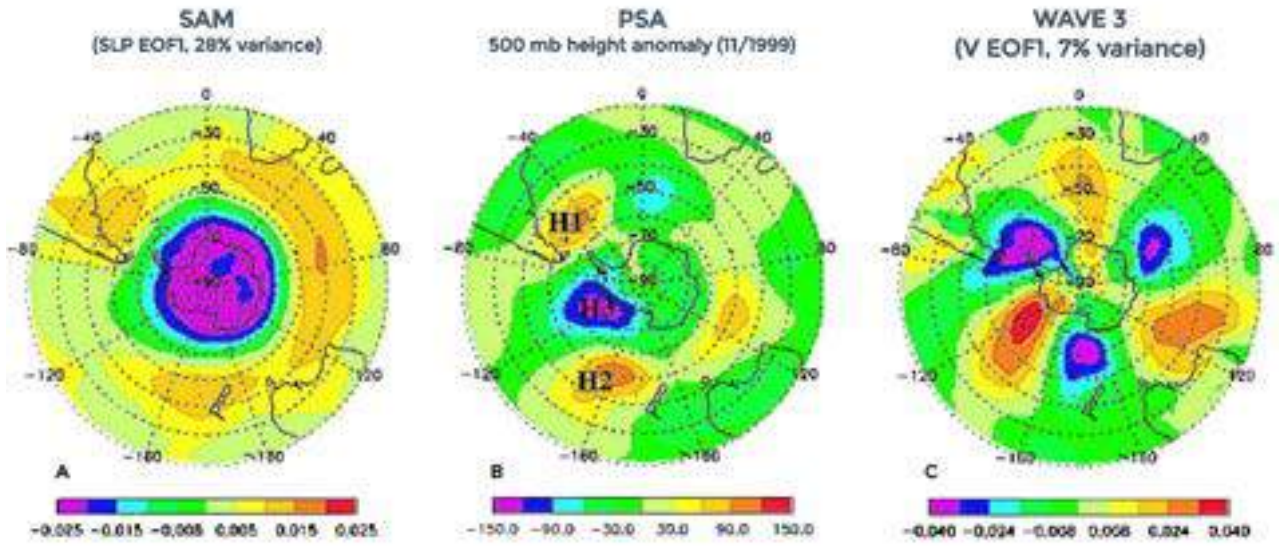



**FIGURA 5. Representação do padrão espacial dos três principais modos climáticos na Antártica: (A) SAM; B) Pacific South American (PSA); e C) Onda 3 (WAVE3).** *Adaptada de Yuan et al., 2009.*

O segundo modo que domina a região austral é o *Pacific South America* (do inglês, PSA). Relacionado com o fenômeno El Niño (do inglês, ENSO – *El Niño Southern Oscillation*) e com o trem de ondas de Rossby, esse modo de variabilidade natural resulta em um centro de baixa pressão no Mar de Amundsen-Bellingshausen, à oeste da Península Antártica, que permite a entrada de massas de ar quente e úmidas para a região oeste da Antártica (Hall & Visbeck, 2002; Yuan *et al.*, 2008; Raphael *et al.*, 2016). Esse padrão climático pode ser conferido na Figura 5B.

A Onda 3 (do inglês, WAVE 3) representa cerca de 10% do clima austral e pode ser observada como uma assimetria no padrão zonal de circulação (Yuan *et al.*, 2008). Tal assimetria diz respeito ao fluxo atmosférico que se alterna em direção ao norte ou sul, rodeando a Antártica na latitude aproximada de 60°S (Figura 5C; Raphael, 2004). Apesar de contribuir para o clima austral em menor proporção que os demais modos de variabilidade, a WAVE 3 é de fundamental importância, pois determina regiões no continente onde o fluxo atmosférico será preferencialmente meridional, guiando o transporte de calor e umidade para dentro e para fora do continente (Schlosser *et al.*, 2018).

Nesta região, observa-se um sistema complexo de interações entre oceano-atmosfera-criosfera (Swart *et al.*, 2018), que tem respondido às mudanças do clima de maneira peculiar. Oposto às tendências do oceano global, a superfície do OA tem apresentado maior extensão de gelo marinho

desde a década de 70, resultando em seu resfriamento (Spence *et al.*, 2014, Fan *et al.*, 2014, Armour *et al.*, 2016, Swart *et al.*, 2018). Por outro lado, em profundidades maiores que 700 metros o aumento de temperatura é intenso (Strass *et al.*, 2020) e, segundo Gille (2002), corresponde ao dobro do aquecimento do oceano global.

Dada a importância do global Oceano Austral, as mudanças desse ambiente tão particular devem ser monitoradas, analisadas e comunicadas. Mudanças nos mecanismos de interação oceano-atmosfera-criosfera, como o transporte de calor pela MOC, a extensão do gelo marinho e o derretimento basal das plataformas de gelo vão resultar em respostas do sistema capazes de intensificar o cenário de mudanças climáticas (Turner, 2010).

O papel do OA no balanço energético do planeta e nos ciclos de água doce, carbono e nutrientes não pode ser negligenciado. Enquanto as evidências de que o Oceano Austral está mudando se acumulam (*e.g.*, Bracegirdle *et al.*, 2020; Roach *et al.*, 2020), é fundamental que as esferas política e científica da sociedade unam forças para aperfeiçoar a pesquisa Antártica de excelência.

## Referências Bibliográficas

ARMOUR, K. C., MARSHALL, J., SCOTT, J. R., DONOHOE, A., NEWSOM, E. R., 2016. Southern ocean warming delayed by circumpolar upwelling and equatorward transport. Nature Geoscience 9 (7), 549.

BRACEGIRDLE, T.J., KRINNER, G., TONELLI, M., HAUMANN, F.A., NAUGHTEN, K.A., RACKOW, T., ROACH, L.A., WAINER, I., 2020. Twenty first century changes in Antarctic and Southern Ocean surface climate in CMIP6. Atmospheric Science Letters, p.e984.

BROECKER, W.S. 1987. Unpleasant surprises in the greenhouse? Nature. 328: 123–126.

BUTLER, J.H., KING, D.B., LOBERT, J.M., MONTZKA, S.A., YVON-LEWIS, S.A., HALL, B.D., WARWICK, N.J., MONDEEL, D.J., AYDIN, M., ELKINS, J.W. 2007. Oceanic distributions and emissions of short-lived halocarbons, Global biogeochemical cycles 21.

CONVEY, P., STEVENS, M.I., HODGSON, D.A., SMELLIE, J.L., HILLENBRAND, C.D., BARNES, D.K., CLARKE, A., PUGH, P.J., LINSE, K., CARY, S.C. 2009. Exploring biological constraints on the glacial history of Antarctica. Quaternary Sci. Rev. 28: 3035–3048.

CUNNINGHAM, S.A., ALDERSON, S.G., KING, B.A., BRANDON, M.A. 2003. Transport and variability of the Antarctic Circumpolar Current in Drake Passage. J. Geophys. Res. (Oceans). 108 (C5): 8084. doi:10.1029/2001JC001147.

DEACON, G. 1979. The Weddell Gyre. Deep-Sea Res. Part A. Oceanographic Research Papers 26: 981–995.

FAN, T., DESER, C., SCHNEIDER, D. P., 2014. Recent antarctic sea ice trends in the context of southern ocean surface climate variations since 1950. Geophysical Research Letters 41 (7), 2419–2426.

GILLE, S. T., 2002. Warming of the southern ocean since the 1950s. Science 295 (5558), 1275–1277.

GONG, D., WANG, S., 1999. Definition of antarctic oscillation index. Geophysical research letters 26 (4), 459–462.

HALL, A., VISBECK, M., 2002. Synchronous variability in the southern hemisphere atmosphere, sea ice, and ocean resulting from the annular mode. Journal of Climate 15 (21), 3043–3057.

HANESSIAN, J., 1960. The Antarctic Treaty 1959. The International and Comparative Law Quarterly, 9(3), pp.436-480.

LEQUÉRÉ,C.,RÖDENBECK,C.,BUITENHUIS,E.T.,CONWAY,T.J.,LANGENFELDS, R., GOMEZ, A., LABUSCHAGNE, C., RAMONET, M., NAKAZAWA, T., METZL, N., GILLETT, N., HEIMANN, M. 2007. Saturation of the Southern Ocean CO2 sink due to recent climate change. Science 316: 1735–1738.

LEVITUS, S., ANTONOV, J. AND BOYER, T. 2005. Warming of the world ocean, 1955–2003. Geophys. Res. Lett. 32: L02604. doi:10.1029/2004GL021592.

LYTHE, M., VAUGHAN, D., THE BEDMAP CONSORTIUM. 2001. BEDMAP: A new ice thickness and subglacial topographic model of Antarctica. J. Geophys. Res. 106(B6): 11,335–11,351.

MARSHALL, G. J., 2003. Trends in the southern annular mode from observations and reanalyses. Journal of Climate 16 (24), 4134–4143.

MARSHALL, G. J., 2007. Half-century seasonal relationships between the southern annular mode and antarctic temperatures. International Journal of Climatology 27 (3), 373–383.

ORSI, A., SMETHIE JR, W. AND BULLISTER, J. 2002. On the total input of Antarctic waters to the deep ocean: A preliminary estimate from chlorofluorocarbon measurements. J. Geophys. Res. 107: 3122.

RAPHAEL, M. N., 2004. A zonal wave 3 index for the southern hemisphere. Geophysical Research Letters 31 (23).

RAPHAEL, M., MARSHALL, G., TURNER, J., FOGT, R., SCHNEIDER, D., DIXON, D., HOSKING, J., JONES, J., HOBBS, W., 2016. The amundsen sea low: variability, change, and impact on antarctic climate. Bulletin of the American Meteorological Society 97 (1), 111–121.

REID, J.L. 1997. On the total geostrophic circulation of the Pacific Ocean: Flow patterns, tracers, and transports. Progr. Oceanogr. 39: 263–352.

RIGNOT, E., CASASSA, G., GOGINENI, P., KRABILL, W., RIVERA, A.U., THOMAS, R. 2004. Accelerated ice discharge from the Antarctic Peninsula following the collapse of Larsen B ice shelf. Geophys. Res. Lett. 31.

RINTOUL, S.R., SOKOLOV, S. 2001. Baroclinic transport variability of the Antarctic Circumpolar Current south of Australia (WOCE repeat section SR3). J. Geophys. Res. 106(C2): 2815–2832. doi:10.1029/2000JC900107.

RINTOUL, S.R., SPARROW, M., MEREDITH, M., WADLEY, V., SPEER, K., HOFMANN, E., SUMMERHAYES, C., URBAN, E., BELLERBY, R. 2012A. The Southern Ocean Observing System. Oceanography 25: 74.

RINTOUL, S.R., SPARROW, M., MEREDITH, M.P., WADLEY, V., SPEER, K., HOFMANN, E., SUMMERHAYES, C., URBAN, E., BELLERBY, R., ACKLEY, S. 2012B. The Southern Ocean observing system: initial science and implementation strategy, SCAR and SCOR 76 p.

ROACH, L.A., DÖRR, J., HOLMES, C.R., MASSONNET, F., BLOCKLEY, E.W., NOTZ, D., RACKOW, T., RAPHAEL, M.N., O'FARRELL, S.P., BAILEY, D.A., BITZ, C.M., 2020. Antarctic sea ice area in CMIP6. Geophysical Research Letters, 47(9), p.e2019GL086729.

RODMAN, M., GORDON, A. 1982. Southern Ocean bottom water of the Australian-New Zealand sector. J. Geophys. Res. 87(C8): 5771–5778.

SABINE, C.L., FEELY, R.A., GRUBER, N., KEY, R.M., LEE, K., BULLISTER, J.L., WANNINKHOF, R., WONG, C.S., WALLACE, D.W.R., TILBROOK, B., MILLERO, F.J., PENG, T.H., KOZYR, A., ONO, T., RIOS, A.F. 2004. The oceanic sink for anthropogenic CO2. Science 305(5682): 367–371.

SARMIENTO, J.L., SLATER, R., BARBER, R., BOPP, L., DONEY, S.C., HIRST, A.C., KLEYPAS, J., MATEAR, R., MIKOLAJEWICZ, U., MONFRAY, P., SOLDATOV, V., SPALL, S.A., STOUFFER, R. 2004. Response of ocean ecosystems to climate warming. Global Biogeochemical Cycles. 18 GB3003. doi:10.1029/2003GB002134.

SCHLOSSER, E., HAUMANN, F. A., RAPHAEL, M. N., 2018. Atmospheric influences on the anomalous 2016 Antarctic sea ice decay. The Cryosphere 12 (3), 1103–1119.

SCHLOSSER, E., STENNI, B., VALT, M., CAGNATI, A., POWERS, J. G., MANNING, K. W., RAPHAEL, M., DUDA, M. G., 2016. Precipitation and synoptic regime in two extreme years 2009 and 2010 at Dome C, Antarctica-implications for ice core interpretation. Atmospheric Chemistry & Physics 16 (8).

SCHMITZ, W.J. 1996. On the eddy field in the Agulhas Retroflection, with some global considerations, J. Geophys. Res. 101: 16259–16272. doi:10.1029/96JC01143.

SILVA, N., WAINER, I., TONELLI, M., 2019. Caracterização de mudanças climáticas na Antártica a partir da segunda metade do Século XX. Revista Brasileira de Geografia Física v.12.6, 2091-2107. DOI: 10.26848/rbgf.v12.6.p2091-2107.

SOKOLOV, S., RINTOUL, S.R. 2009. Circumpolar structure and distribution of the Antarctic Circumpolar Current fronts: 2. Variability and relationship to sea surface height. J. Geophys. Res. Oceans (1978–2012), 114(C11). doi:10.1029/2008JC005248.

SPENCE, P., GRIFFIES, S. M., ENGLAND, M. H., HOGG, A. M., SAENKO, O. A., JOURDAIN, N. C., 2014. Rapid subsurface warming and circulation changes of antarctic coastal waters by poleward shifting winds. Geophysical Research Letters 41 (13), 4601–4610.

STRASS, V.H., ROHARDT, G., KANZOW, T., HOPPEMA, M. AND BOEBEL, O., 2020. Multi-decadal warming and density loss in the deep Weddell Sea, Antarctica. Journal of Climate, pp.01-60.

SWART, N. C., GILLE, S. T., FYFE, J. C., GILLETT, N. P., 2018. Recent southern ocean warming and freshening driven by greenhouse gas emissions and ozone depletion. Nature Geoscience 11 (11), 836.

THOMPSON, D. W., WALLACE, J. M., 2000. Annular modes in the extratropical circulation. part i: Month-to-month variability. Journal of climate 13 (5), 1000–1016.

TONELLI, M., MARCELLO, F., FERRERO, B., WAINER, I., 2019. Warm Deep Water Variability During the Last Millennium in the CESM–LME: Pre-Industrial Scenario versus Late 20th Century Changes. Geosciences, 9(8), p.346.

TRÉGUER, P., JACQUES, G. 1993. Review Dynamics of nutrients and phytoplankton, and fluxes of carbon, nitrogen and silicon in the Antarctic Ocean. pp. 149–162. In: Hempel, G. (ed.). Weddell Sea Ecology Results of EPOS European "Polarstern" Study. Springer.

TRENBERTH, K.E., LARGE, W.G., OLSON, J.G. 1990. The mean annual cycle in global ocean wind stress. J. Phys. Oceanogr. 20: 1742–1760.

TURNER, J. 2010. The Melting of ice in the Arctic Ocean: The Influence of Double-Diffusive Transport of Heat from Below. J. Phys. Oceanogr. 40: 249–256.

TURNER, J., COLWELL, S. R., MARSHALL, G. J., LACHLAN-COPE, T. A., CARLETON, A. M., JONES, P. D., LAGUN, V., REID, P. A., IAGOVKINA, S., 2005. Antarctic climate change during the last 50 years. International journal of Climatology 25 (3), 279–294.

VERDY, A., DUTKIEWICZ, S., FOLLOWS, M., MARSHALL, J., CZAJA, A. 2007. Carbon dioxide and oxygen fluxes in the Southern Ocean: Mechanisms of interannual variability. Global Biogeochemical Cycles, 21 GB2020. doi:10.1029/2006GB002916.

WALLACE, J.M., HOBBS, P.V. 1977. Atmosphere science—an introductory survey. Academic Press (New York) 467 p.

YUAN, XIAOJUN, CUIHUA LI. 2008. Climate modes in southern high latitudes and their impacts on Antarctic sea ice. Journal of Geophysical Research: Oceans 113.C6.

# OCEANOGRAFIA QUÍMICA

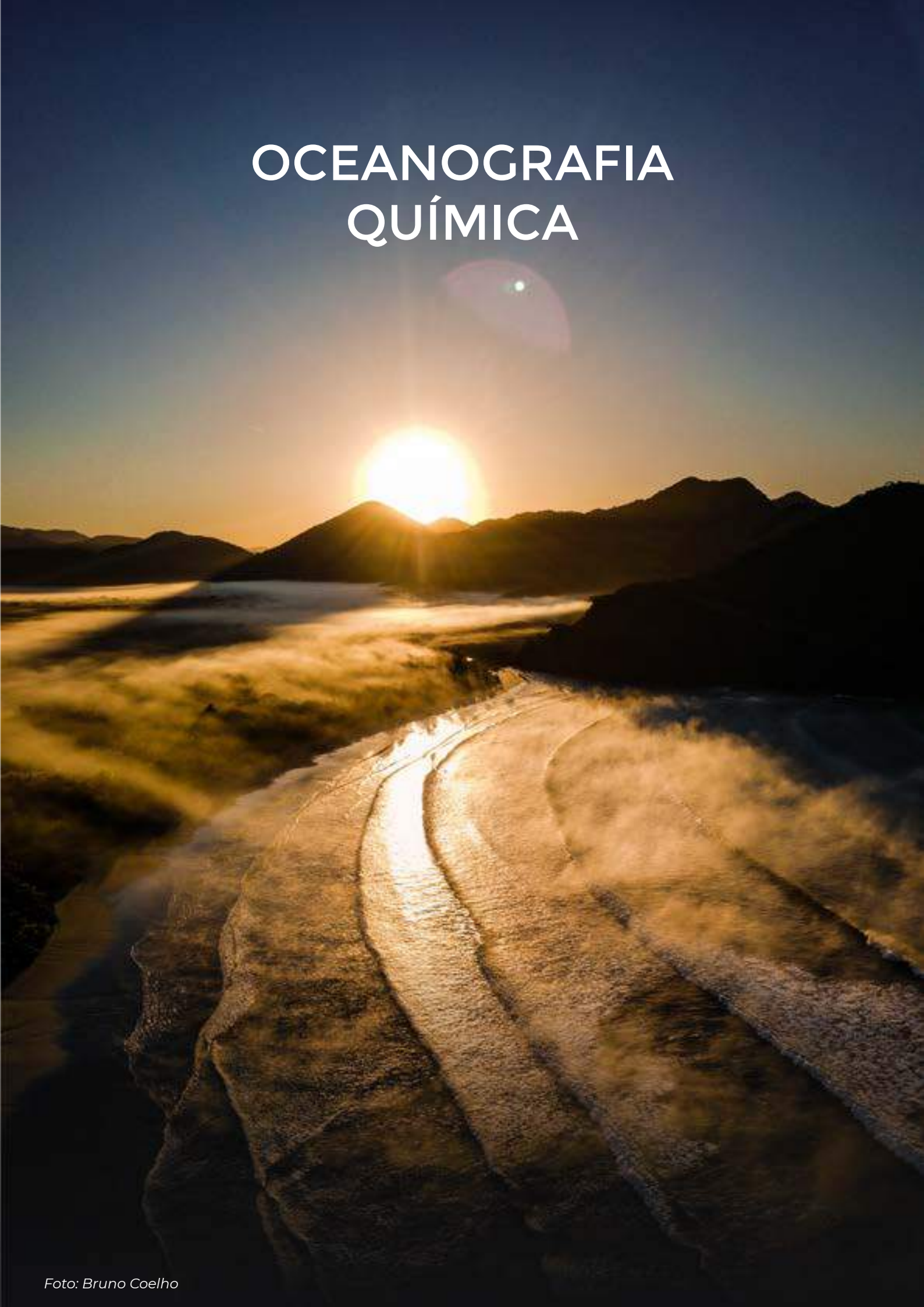


*Foto: Bruno Coelho*

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 15*

# COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ÁGUA DO MAR

*Elisabete de Santis Braga*

CITAÇÃO SUGERIDA: BRAGA, Elisabete de Santis. Composição química da água do mar. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 15: p. 313-342.

# Composição Química da Água do Mar

*Elisabete de Santis Braga*

## 1. Oceanografia Química

A Oceanografia Química ocupa uma posição central na inter-relação com as demais áreas da Oceanografia, pois possui conexão com algumas propriedades conservativas, como é caso da salinidade, muito relevante na Oceanografia Física; estabelece também ligação com a Oceanografia Biológica, mostrando as propriedades necessárias à construção de matéria orgânica no primeiro nível trófico - a produção primária; e ainda, mostra interação com a Oceanografia Geológica, junto às interações com os sedimentos e águas intersticiais. Além disso, tem ligação com a descoberta de recursos marinhos, monitoramento ambiental e indicação de processos de poluição e relação com as atividades humanas de um modo geral.

A Oceanografia Química envolve um estudo que destaca as principais propriedades da água pura, tendo em conta a estrutura da molécula de água e a adição de sais em solução, que em conjunto, formam a matriz da água marinha. Os sais que compõem a mistura, sobretudo os que estão em maior concentração, são os que mais estão relacionados à salinidade.

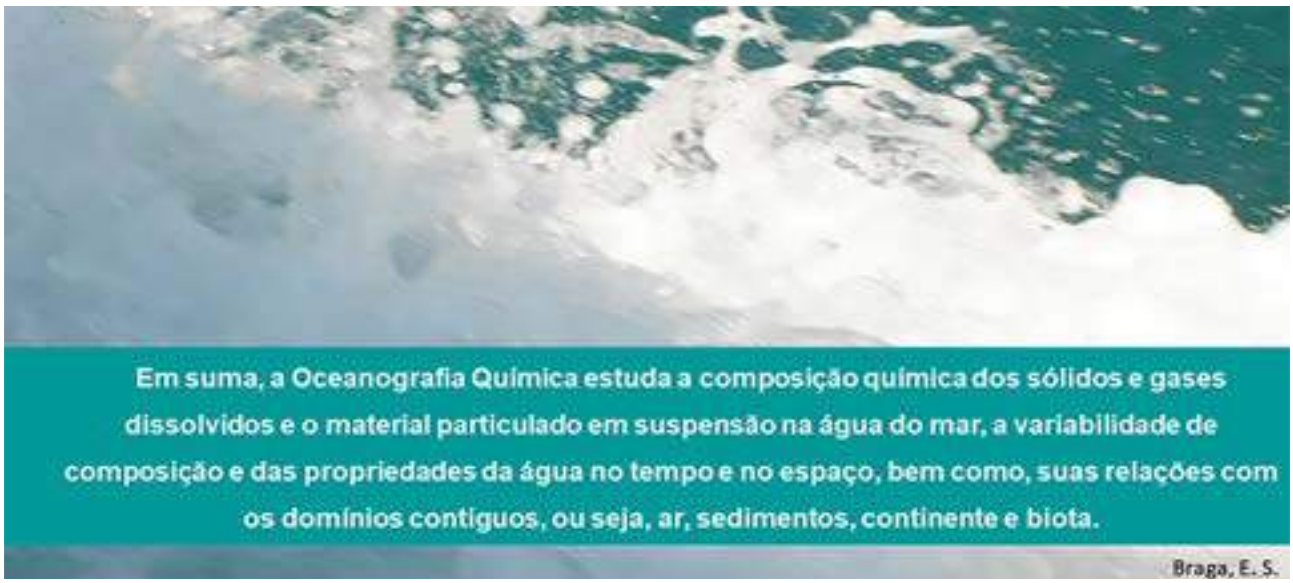
Os constituintes que estão em menores quantidades na água do mar, por sua vez, são também importantes, pois atuam como nutrientes principais na composição da matéria orgânica que forma a biota marinha, como é o caso do nitrogênio, fósforo e silício, além dos microelementos que participam do metabolismo celular, atuando como catalizadores e heteroátomos em biomoléculas. Existem ainda, elementos em quantidades muito pequenas (constituintes traços) que possuem propriedades potencialmente tóxicas, quando suas concentrações se elevam acima das relatadas como naturais. Praticamente todos os elementos da tabela periódica podem ser encontrados na composição química da água do mar, porém em quantidades diferentes.

Os gases dissolvidos na água, sem dúvida, constituem outro importante grupo que participa no ciclo da vida, tendo no gás carbônico e no oxigênio dois de seus principais representantes nos processos biológicos. Os gases também atuam nas mudanças climáticas, pois alguns deles além de estarem envolvidos em processos biológicos ou de origem antrópica possuem a capacidade de aquecer, participando do efeito estufa. Um gás, tido antigamente como gás inerte, é o nitrogênio, abundante na atmosfera e também presente na água do mar, destaca-se nos processos de fixação biológica, que ocorrem de modo mais significativo em locais com baixa disponibilidade de outras formas inorgânicas de nitrogênio como N-amoniacal, nitrito e nitrato.

O Nitrogênio é um dos elementos fundamentais da constituição da matéria orgânica viva associado ao carbono, elemento abundante na água do mar, sobretudo na forma de bicarbonato. O carbono (C) é essencial à construção de matéria orgânica, porém muitas biomoléculas necessitam de nitrogênio (N) e fósforo (P) para sua formação, como o DNA, RNA, ATP, proteínas entre outras. Assim, N e P podem atuar como limitantes nos processos de produção primária marinha tendo reflexos na cadeia trófica. A construção de matéria orgânica viva no meio marinho, ou seja, a cadeia alimentar, tem base na construção de estruturas de carbono e nutrientes principais (N, P e Si), que também necessitam participação de micronutrientes como membros estruturais e do metabolismo.

No caso dos elementos traços, presentes em quantidades ínfimas no meio marinho, devido ao baixo envolvimento em funções biológicas de modo positivo. Sua presença e comportamento podem ser usados como traçadores de massas d' água, bem como com indicadores de processos de poluição caso haja um aumento nas concentrações. Como traçadores de origem, também podem ser utilizados isótopos e razões isotópicas que mostram as contribuições de origem terrestres, atmosféricas e marinhas em sedimentos e corpos de água, identificando também emanações vulcânicas emersas e submarinas que atingem os corpos de água. Componentes radioativos e nucleares podem indicar processos localizados, enquanto radioisótopos naturais podem apresentar comportamento conservativo, indicando processos de mistura de massas d' água e movimentos de afundamento na coluna d' água, além de identificar a entrada de águas subterrâneas em fundos marinhos. Já, elementos artificiais, hoje, indicam a fragilidade dos meios aquáticos à poluição pela radioatividade.

Riquezas minerais podem ser indicadas pela presença de moléculas orgânicas nos sedimentos, como é caso do petróleo e também zonas de formação de nódulos de metais, como os de FeMn. Enfim, a Oceanografia Química tem posição de destaque nos estudos físicos, biológicos e geológicos que compõem a Oceanografia.



## 2. A água no planeta Terra

Num determinado momento da história do sistema solar, a Terra individualizou-se como uma massa de gases e partículas de poeira, girando em torno de um núcleo maior, que deu origem ao Sol. O volume da Terra nessa época era muito maior, pois os gases e as partículas de poeira não estavam separados (Fig. 1).

**FIGURA 1. Nuvem de gases e poeira cósmica.** *Imagem: Wikimedia commons*.

Pela ação do campo gravitacional do protoplaneta, foi iniciada a separação entre as partículas de poeira (mais densas) e os gases. As partículas de poeira eram constituídas principalmente de silicatos, ferro metálico e os gases, de uma mistura de Hidrogênio, Hélio, Amônia e Metano. Pela contração do protoplaneta, devido à ação da gravidade, a temperatura aumentou, podendo ter atingido 3.000°C no centro. Ao mesmo tempo, o Sol irradiava quantidades imensas de energia. O efeito do aumento de temperatura foi drástico, resultando na perda de quase todos gases da protoatmosfera (Fig. 2).

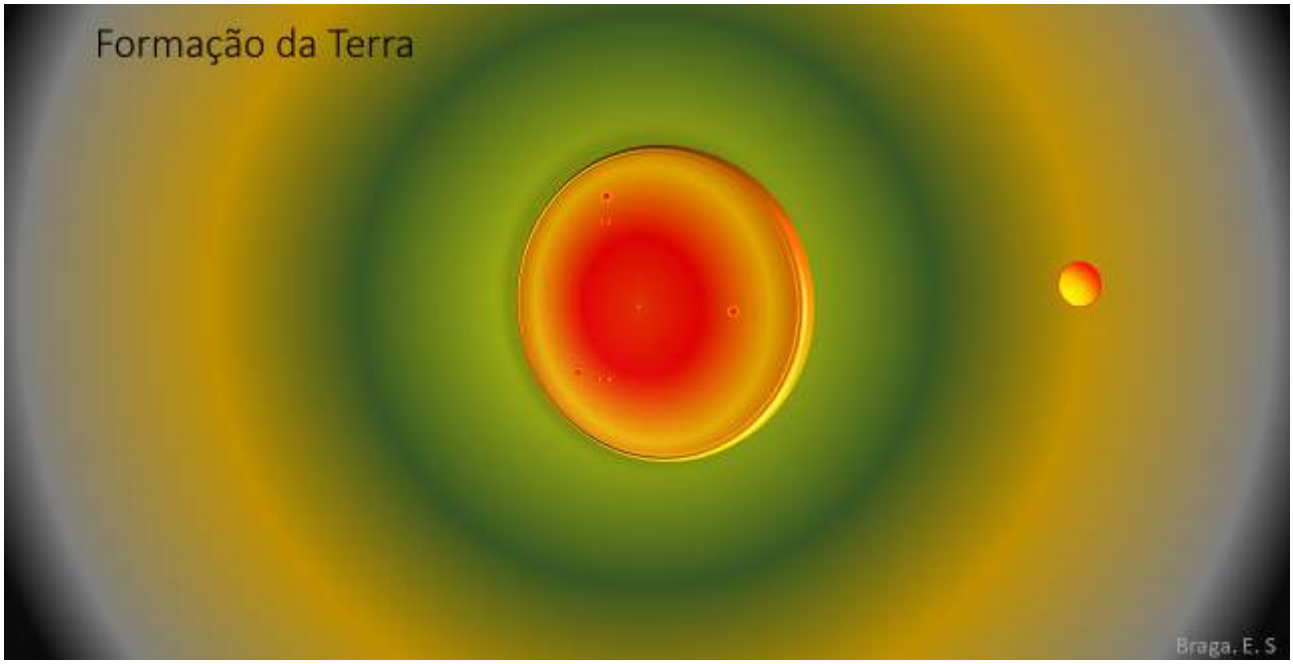



**FIGURA 2. Formação do planeta e seu satélite, protoplaneta com temperatura muito elevada e seu satélite.**

Após condensação da Terra como um corpo sólido, o que marca o início de sua história geológica, o calor gerado por radioatividade ocasionou a fusão de alguns componentes. A elevação da temperatura causou a dissociação de alguns compostos, liberando água, oxigênio e amônia. Esses dois gases, reagindo entre si e com os gases residuais da atmosfera primitiva, deram origem ao dióxido de carbono e o nitrogênio livre. Dessa forma, começou a se formar a atmosfera atual, que inicialmente, era pobre em oxigênio.

Com a diminuição das densas nuvens presentes na atmosfera e aprisionamento da água na forma líquida nas grandes bacias oceânicas, a penetração de luz favoreceu o aparecimento dos primeiros vegetais (algas unicelulares e bactérias) e parte do $CO_2$ e da água foram participando de processos metabólicos, que davam origem ao oxigênio. Assim, a Terra no início de sua história geológica se apresentava como uma massa de silicatos de ferro parcialmente fundidos e uma atmosfera constituída predominantemente por nitrogênio, dióxido de carbono, vapor d' água, oxigênio, amônia e metano.

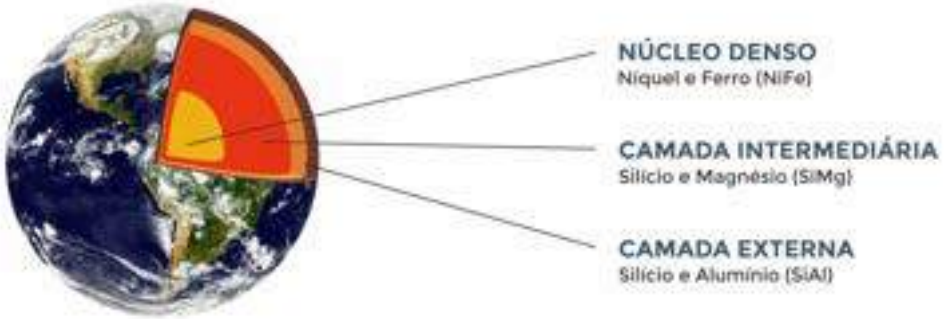



**Figura 3.** Corte mostrando o núcleo mais denso formado de níquel e ferro (NiFe), a camada mediana formada principalmente por silício e magnésio (SiMg) e a camada mais externa, crosta, formada por silício e alumínio (SiAl).

## 2.1. Inventário da água no planeta Terra

Atualmente, o inventário da água no planeta Terra pode ser resumido na Figura 4:

| COMPARTIMENTOS | QUANTIDADE ($x10^{18}$ KG) |
|---|---|
| RIOS E CACHOEIRAS | 1 |
| LAGOS DE ÁGUA DOCE | 125 |
| LAGOS SALGADOS + MARES INTERNOS | 104 |
| TOTAL NA SUPERFÍCIE | 230 |
| GELEIRAS E PICOS DE GELO | 29.300 |
| MISTURADO COM O SOLO | 70 |
| LENÇOL DE ÁGUA | 8.400 |
| TOTAL INFILTRADO E COMO GELO | 37.770 |
| TOTAL NOS OCEANOS | 1.322.000 |
| TOTAL | 1.360.000 |

**FIGURA 4.** Inventário da água no planeta Terra. *Adaptado de The Open University (1989).*

## 3. A substância água

A molécula de água é composta por dois átomos de hidrogênio e um átomo de oxigênio, sendo a presença do grupo OH na molécula um fator que confere propriedades especiais, conhecidas como propriedades anômalas da água pura. A explicação das propriedades anômalas da água pura reside na sua estrutura molecular, que consiste em um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de hidrogênio. O ângulo entre as ligações é ~105° (Fig. 5A).

A presença do oxigênio (átomo fortemente eletronegativo) na molécula, leva a uma divisão interna das cargas dos átomos de hidrogênio e de oxigênio (Fig. 5A), favorecendo a formação de um momento dipolar, que dá um balanço mais positivo ao lado dos hidrogênios e mais negativo do lado do oxigênio. Esta distribuição de cargas internas faz com que as moléculas de água apresentem atração entre elas (lado mais positivo de uma molécula com o lado negativo de sua vizinha), contribuindo à formação de grupos parcialmente ordenados, onde a ligação entre as moléculas é chamada de "ponte de hidrogênio" (Fig. 5B). As pontes de hidrogênio apresentam energia de ligação da ordem de 4,5 kcal/mol e são intermediárias entre as forças de van der Waals (0,6 kcal/mol) e as da ligação covalente normal (20 kcal/mol). Cada molécula de água tem a capacidade de formar 4 ligações do tipo dipolo-dipolo.

**FIGURA 5.** Estrutura da molécula de água, momentos dipolares e pontes de hidrogênio.

Por exemplo, os pontos de fusão e ebulição da água pura são mais elevados que os esperados para outros compostos contendo hidrogênio. Esse fato é muito importante, pois, caso contrário, a água existiria apenas sob a forma de gás na temperatura da superfície terrestre e, sendo assim, dificilmente haveria a formação dos oceanos. De fato, a água é a única substância que coexiste naturalmente como gás, líquido e sólido na superfície do nosso planeta.

A estrutura da água na forma sólida, o gelo, é bem regular e, quando se funde, apenas 15% de suas ligações são rompidas. Na água líquida, cada molécula de $H_2O$ é ligada por hidrogênio a 3,4 vizinhas, em média, com uma estrutura parcialmente ordenada. Os agregados ligados por hidrogênio estão constantemente se formando e se rompendo. As moléculas de água tem a capacidade surpreendente de ligar-se a si mesma (altamente coesiva) e sua polaridade a torna bastante reativa, sendo uma competidora efetiva nas interações polares. A coesão e a polaridade são importantes parâmetros ativos nas interações moleculares em sistemas biológicos, lembrando que todo ser vivo é um sistema hidratado.

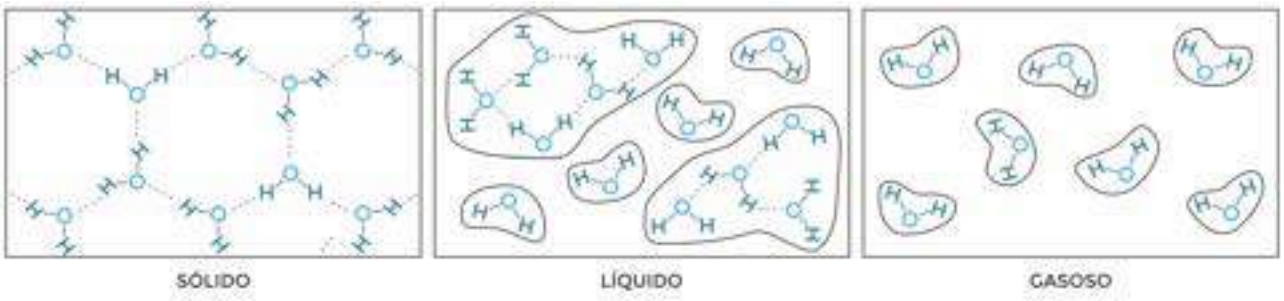



**FIGURA 6.** Distribuição das moléculas de água nos estados físicos da água pura. *Baseado no modelo de Frank-Wen Flickering em Horne, 1969.*

Desta forma, a água na forma líquida é composta por um grupo de moléculas ligadas, parcialmente ordenadas e algumas mais livres (Fig. 6). Este arranjo contendo ligações pelo hidrogênio lhe confere características similares àquelas dos líquidos associados. Configura-se assim, um caso especial onde moléculas neutras ($H_2O$) que possuem momento dipolar apresentam forte atração. Dessa forma, a melhor representação da substância água seria como um polímero $(H_2O)_n$, o que auxilia na explicação de suas propriedades físicas anômalas.

Outra propriedade da água, que a difere de outras substâncias com peso molecular próximo a 18 u.m.a, é o ponto de ebulição. O ponto de ebulição da água é 100˚C ao nível do mar, enquanto do álcool metílico é 65˚C e do álcool etílico é de 78˚C. Esses três pontos de ebulição são superiores aos previstos para massas moleculares 18, 32 e 46, respectivamente.

A explicação do ponto de ebulição anômalo da água, comparativamente com álcoois, está ligada ao fenômeno das pontes de hidrogênio, ponto fundamental para se compreender as propriedades dos líquidos "associados". Observe o caso do ponto de ebulição de hidretos do grupo VI – $H_2M$ (Tab. 1).

**TABELA 1.** Algumas substancias de baixa massa molecular e seu ponto de ebulição.

| Fórmula | Massa molecular | p.e. (°C) |
|---|---|---|
| $H_2O$ | 18 | 100 |
| $H_2S$ | 34 | -60 |
| $H_2Se$ | 81 | -42 |
| $H_2Te$ | 129,5 | 0 |

No estado sólido (0˚C), as moléculas de água estão bem ordenadas, ocupando um espaço mais expandido e apresentam uma densidade menor do que a água na forma líquida. À medida que a temperatura aumenta, a energia das moléculas também aumenta, as moléculas se aproximam umas das outras, ocupando menos espaço e aumentando a densidade da água. Quando o aquecimento continua, a expansão térmica das moléculas contribui à diminuição da densidade. Assim, entre 0 e 4˚C, o "efeito da ordenação" predomina. Por isso, em temperaturas maiores, a expansão térmica é mais significativa. A combinação dos dois efeitos torna a densidade da água pura maior a 4˚C (Tab. 2).

Os chamados líquidos associados, no caso da água com uma fórmula representada por $(H_2O)_n$, podem ter o ponto de ebulição mais adequado com sua massa molecular.

**Tabela 2.** Temperatura de máxima densidade da água pura (Pinet, 1999).

| Temperatura (°C) | Estado físico | Densidade (kg $m^{-3}$) |
|---|---|---|
| -2 | sólido | 917,2 |
| 0 | sólido | 917,0 |
| 0 | líquido | 999,8 |
| 4 | líquido | 1000,0 |
| 10 | líquido | 999,7 |
| 25 | líquido | 997,1 |

**TABELA 3.** **Propriedades físicas anômalas da água pura no estado líquido.** *Modificado de Open University,1989, Sverdrup, Johnson & Fleming, 1942).*

| Propriedade | Comparação com outras substâncias | Importância em ambiente físico e biológico |
|---|---|---|
| **Calor específico** ($-4{,}18\ 10^3\ kg^{-1}\ °C^{-1}$) | O mais alto de todos os sólidos e líquidos, exceto quando considerada a $NH_3$ líquida | Evita mudanças bruscas na temperatura; o calor transferido pela água é muito grande; possibilita a manutenção do corpo de água com temperatura uniforme por mais tempo |
| **Calor latente** ($3{,}3\ 10^5\ J\ kg\ °C^{-1}$) | O mais alto de todos os sólidos e líquidos, exceto da $NH_3$ | Oferece um efeito termostático ao ponto de congelamento devido à absorção ou liberação do calor latente |
| **Calor latente de evaporação** ($2{,}26\ 10^6\ J\ kg^{-1}$) | O mais alto de todas as substâncias | O grande calor latente de evaporação é extremamente importante para a transferência de calor e água para a atmosfera |
| **Expansão térmica** | A temperatura de densidade máxima da água diminui à medida que aumenta a salinidade. No caso da água pura, a densidade máxima ocorre a 4°C | A água doce e a água do mar diluída tem um máximo de densidade a temperaturas acima do ponto de congelamento; esta propriedade desempenha um importante papel no controle da distribuição da temperatura e da circulação nos lagos |
| **Tensão superficial** ($7{,}2\ 10^9\ Nm^{-1}$) | A maior de todos os líquidos | Importante na fisiologia celular; no controle de certos fenômenos de superfície e de formação e comportamento de gotas |
| **Poder de dissolução** | Em geral, a água dissolve mais substâncias e em maiores quantidades que qualquer outro líquido | Com isso, atua de forma importante nos fenômenos físicos, químicos e biológicos (solvente universal) |
| **Constante dielétrica** (87 a 0°C e 80 a 20°C) | A água pura tem a mais alta de todos os líquidos, a exceção do $H_2O_2$ e HCN | Máxima importância no comportamento de substâncias inorgânicas dissolvidas, porque resulta em alta dissociação |
| **Dissolução eletrolítica** | Muito pequena | Uma substância relativamente neutra ainda que possua íons $H^+$ e $OH^-$ |
| **Transparência** | Relativamente grande | Absorção de energia radiante muito intensa na região do infravermelho e ultravioleta, na faixa do visível, do espectro de energia, assim existe relativamente pouca absorção seletiva, portanto existe ausência de cor; a absorção é uma característica importante, tanto para os fenômenos físicos como para os biológicos |
| **Condução de calor** | A mais alta de todos os líquidos | Embora importante em pequena escala, como para as células vivas, os processos moleculares são controlados por condução de calor |
| **Viscosidade Molecular** ($10^{-3}\ Nsm^{-2}$)* | Menos que a maioria dos outros líquidos em temperatura comparável | Importante para as estruturas líquidas, permitindo os movimentos das moléculas no solvente |

* N = Newton ** Medida da capacidade de manter em solução, íons opostamente carregados.

O calor latente indica a aquisição de calor, mantendo a permanência do estado físico da água (Fig.7).

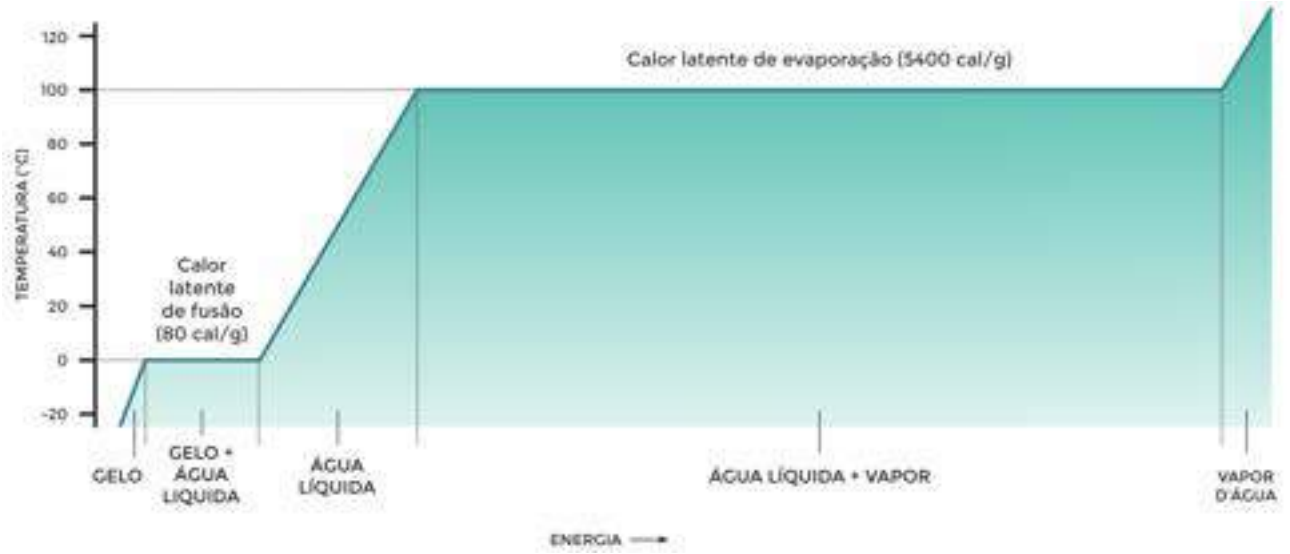



**FIGURA 7.** Calor latente da água.

A água apresenta o maior calor específico, ou seja, precisa absorver uma grande quantidade de calor para elevar em 1°C a temperatura de uma unidade de massa da substância. Isso significa que, em termos globais, a água pode absorver grande quantidade de calor sem alterar de modo acentuado a sua temperatura, possibilitando a transferência de calor entre as regiões durante a circulação. A circulação oceânica atua como grande distribuidora de calor no planeta Terra (Fig. 8), auxiliando na temperança climática, levando calor para as regiões mais frias e removendo calor das regiões mais quentes com base no calor específico de água salgada.

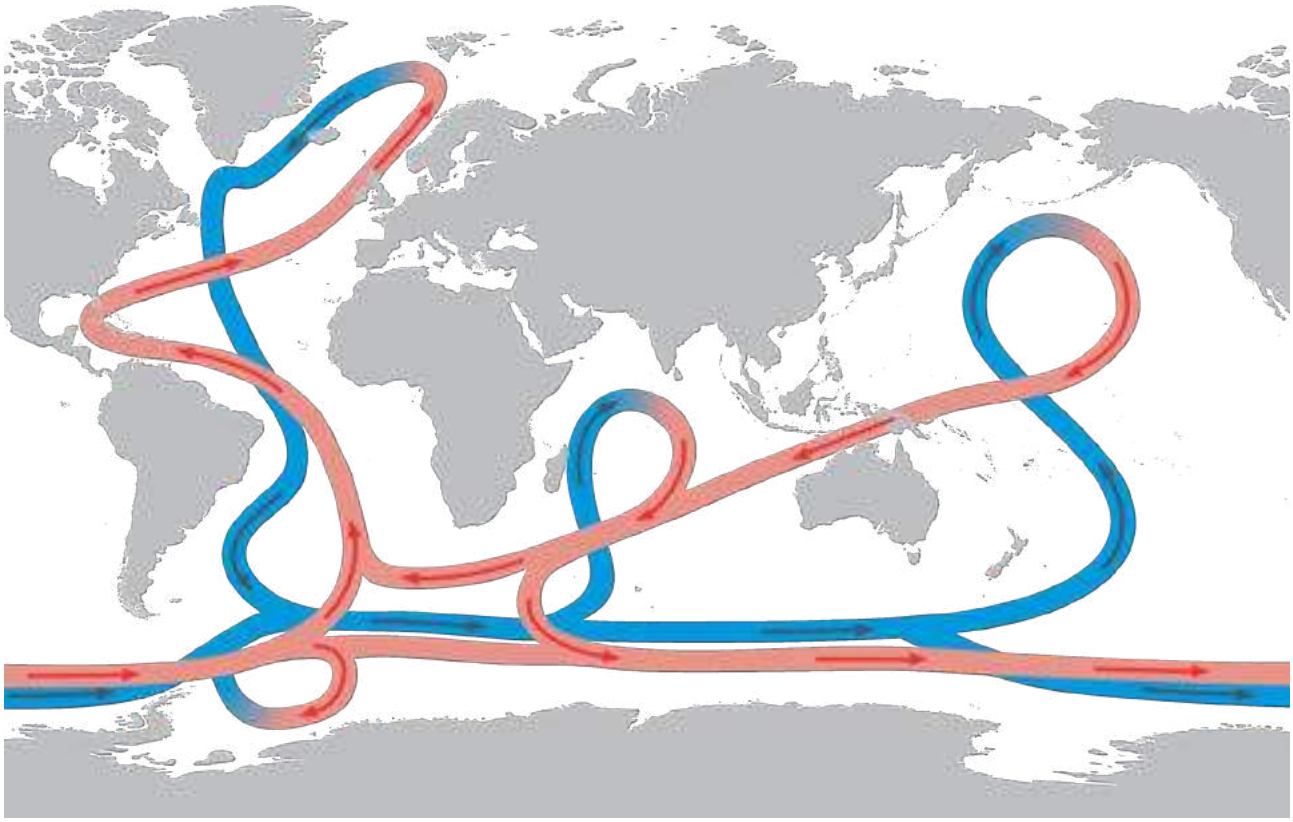


**FIGURA 8.** Padrão global de circulação (águas quentes superficiais em vermelho e águas profundas frias em azul).

A transparência da água permite a penetração da luz solar nos meios aquáticos (Fig. 9), havendo um fracionamento da penetração dos comprimentos de onda, de modo que, nos primeiros metros da coluna de água, há energia suficiente para alimentar os processos de fotossíntese, permitindo o desenvolvimento dos primeiros elos da cadeia alimentar e a participação biológica no equilíbrio dos gases vitais ($CO_2$ e $O_2$) no meio líquido.

**FIGURA 9.** Penetração da luz na água.

O poder de dissolução da água na forma líquida está associado ao seu momento dipolar, como citado anteriormente, ao seu "arranjo" na forma líquida, ou seja, com parcela de moléculas ligadas por pontes de hidrogênio e parcela de moléculas mais livres. Desse modo, na presença de um soluto, as moléculas se arranjam em torno do material, formando camadas de hidratação, sendo a primeira camada a de hidratação primária, seguida da zona de grupos de moléculas e, terminando com a água livre (Fig. 10).

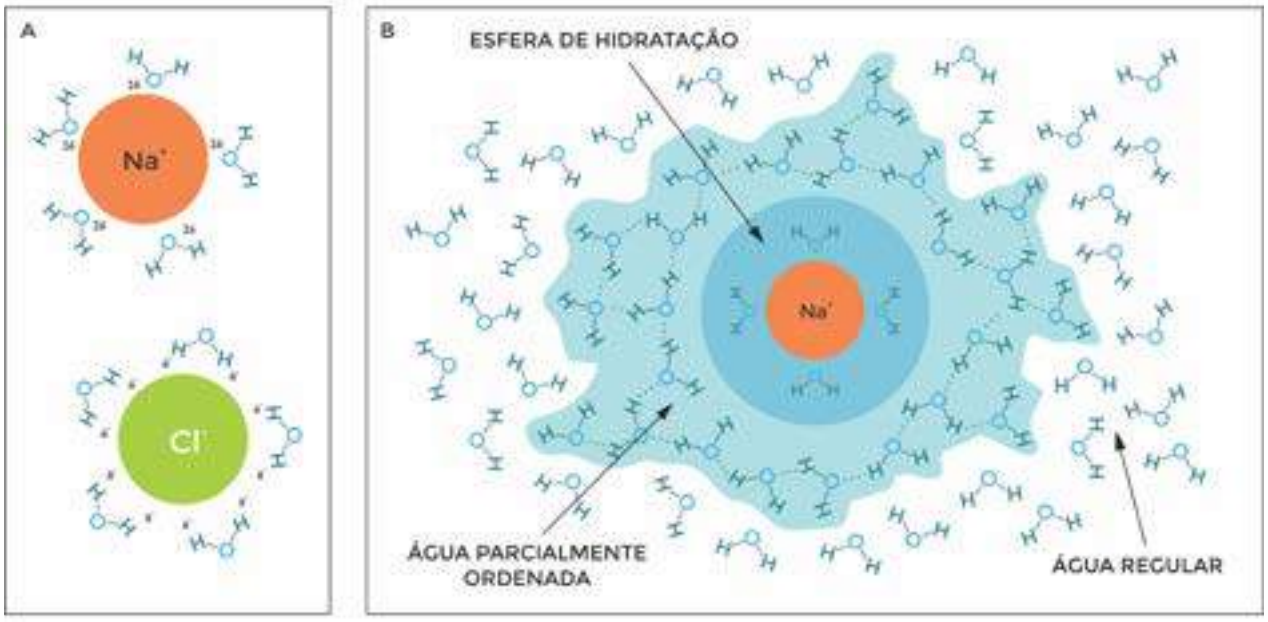



**FIGURA 10.** Íons solvatados (A); e camadas de solvatação em torno do íon $Na^+$ (B).

De um modo geral, observando as propriedades anômalas da água pura e transportando para o ambiente marinho, temos que o fato da água apresentar um alto calor específico permite que esta substância retenha muito calor e, devido à circulação, este calor pode ser distribuído à diversas regiões do planeta. Isso permite que haja temperança do clima, diminuindo as diferenças extremas de temperatura (funciona como uma espécie de radiador do planeta Terra). Ainda, sua alta capacidade de armazenar calor evita mudanças bruscas da temperatura no ambiente e previne o estresse dos organismos que vivem no ambiente aquático.

Outra propriedade importante que se destaca é a alta transparência, possibilitando a penetração de luz solar até determinadas profundidades, o que favorece a realização da reação da fotossíntese pelos organismos vegetais dotados de clorofilas e demais fotopigmentos assessórios, nas camadas mais superficiais dos oceanos.

## 4. Composição química da água do mar

A água do mar é formada pela substância água, acrescida de uma quantidade de sais que atingiram as bacias oceânicas como resultado de um longo processo geológico.

A água do mar é uma solução eletrolítica e apresenta em sua composição todos os elementos da Tabela Periódica de Elementos Químicos (Fig. 11), porém, em concentrações diversas, sendo que os elementos constituintes da água do mar podem ser divididos em dois grupos básicos:

- **Constituintes maiores:** 99,7%;
- **Constituintes menores:** 0,3%.

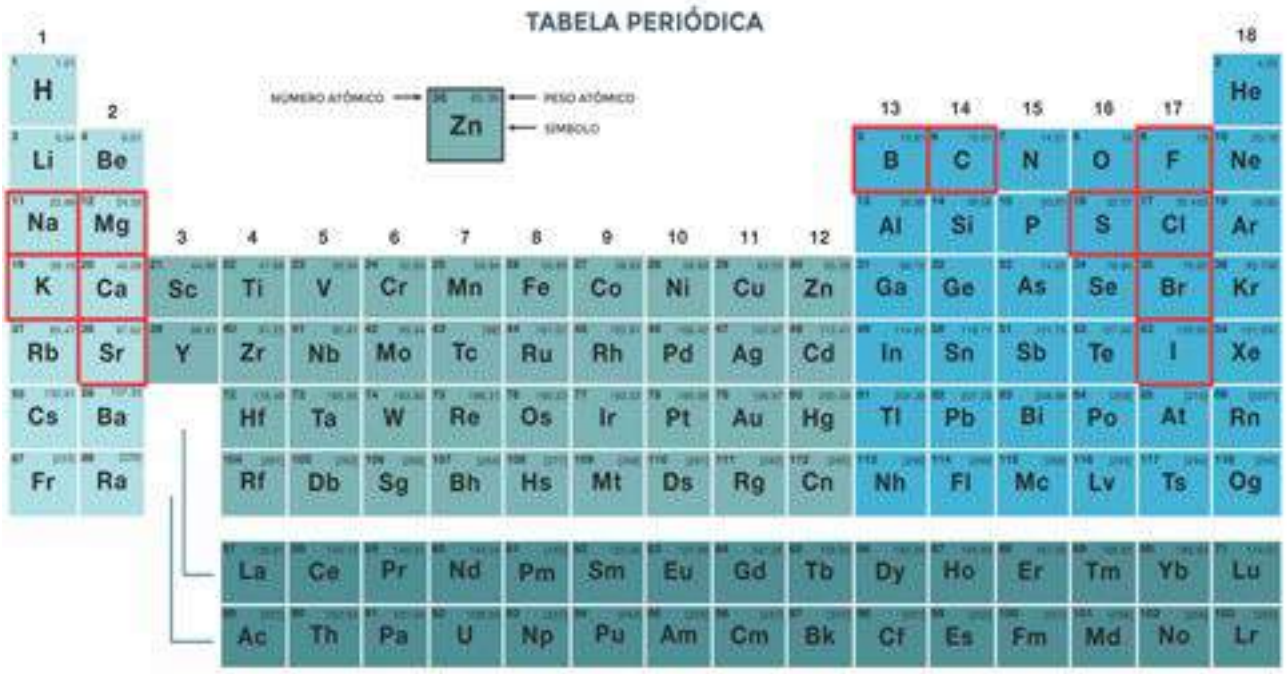



**Figura 11.** Tabela Periódica de elementos químicos. Os constituintes maiores da água do mar estão destacados em quadrados vermelhos. Tais elementos correspondem a cerca de 99% da composição da água do mar.

A maior parte das evidências atualmente disponíveis para explicar a origem da água do mar foram obtidas a partir de um balanço geoquímico, onde a comparação entre as rochas ígneas primitivas expostas ao intemperismo no passado em relação às rochas sedimentares, pois em qualquer tempo geológico, a quantidade de material originado pelo intemperismo e erosão de rochas expostas, somado ao material derivado de erupções vulcânicas e fontes termais deveria ser igual à quantidade de material depositado sobre a plataforma continental e fundos oceânicos, mais o material existente na hidrosfera e atmosfera (biosfera).

A composição da água do mar prevista pelo modelo do balanço geoquímico é similar à composição atual, com exceção dos valores de silicato e de cloreto de sódio, que estariam em excesso, pois o modelo não aponta o papel de mecanismos de remoção para os mesmos, que seja significativo no balanço.

## 4.1 Constituintes maiores

Observando-se a composição química da água do mar, nota-se a presença de íons, podendo ter carga positiva (cátions) ou negativa (ânions), cuja origem está ligada ao intemperismo de rochas ígneas primárias, seguido do transporte pela água e pelo vento, para os primeiros. Emanação por erupções vulcânicas e por fontes termais, passando para a atmosfera, posteriormente atingindo a água do mar ou por emanações submarinas, direto na água do mar, correspondem à origem dos ânions.

Amostras de água provenientes de vários oceanos mundiais e de diferentes profundidades apresentam um valor de sais (salinidade) que perfazem um valor médio de 35 g de sal por kg de água. Assim pode-se dizer que a salinidade média dos oceanos mundiais é de 35, e sua composição em constituintes maiores pode ser observada na Tabela 4.

**TABELA 4. Constituintes maiores na água do mar.** *Modificado de Sverdrup, Johnson & Fleming, 1942 e Pinet, 1999).*

| Íon | Concentração (g $kg^{-1}$) | % relativa | % acumulada* |
|---|---|---|---|
| $Cl^-$ | 19,353 | 55,07 | 55,07 |
| $Na^+$ | 10,760 | 30,61 | 85,68 |
| $SO_4^{--}$ | 2,712 | 7,72 | 93,40 |
| $Mg^{++}$ | 1,294 | 3,68 | 97,08 |
| $Ca^{++}$ | 0,413 | 1,18 | 98,26 |
| $K^+$ | 0,387 | 1,10 | 99,36 |
| $HCO_3^-$ | 0,142 | 0,40 | 99,76 |
| $Br^-$ | 0,067 | 0,19 | 99,95 |
| $Sr_2^+$ | 0,008 | 0,02 | 99,97 |
| $BO_4^{3-}$ | 0,004 | 0,01 | 99,98 |
| $F^-$ | 0,0013 | 0,003 | 99,983 |

*Somente os seis primeiros componentes já perfazem 99,36% dos sais dissolvidos na água do mar.

Em suma, pode-se dizer que a composição química da água do mar foi gerada a partir da introdução de componentes oriundos do desgaste de rochas ígneas primárias e de componentes voláteis em excesso, que foram liberados em grande quantidade e que ainda estão sendo suavemente liberados do interior do planeta. A maior parte dos cátions, como $Ca^{++}$, $K^{+}$, $Na^{+}$, $Mg^{++}$, e pequena parte dos ânions, provém do intemperismo dos silicatos, enquanto a maior parte dos ânions tem origem a partir de voláteis em excesso, como é o caso do $Cl^{-}$ e do $SO_4^{--}$.

A quantidade de sais dissolvidos em uma quantidade definida de água é conhecida como salinidade e pode ser determinada por diferentes métodos: o mais simples, que é por gravimetria (evaporação e pesagem do resíduo); por titulação química determinando o teor de cloretos (titulação com nitrato de prata dos $Cl^{-}$ $Br^{-}$ e $I^{-}$); e também, por condutividade (resistividade elétrica).

Por titulação dos íons cloretos (levando em consideração iodetos e brometos), segue-se a premissa da grande quantidade de íons cloreto estar sobretudo na forma livre e também pela sua baixa utilização em processos biológicos e geoquímicos, havendo uma tendência a esse componente ser bastante conservativo na água do mar, o que também é uma propriedade atribuída aos constituintes maiores da água do mar, ou seja aqueles que estão fortemente ligados à propriedade "salinidade" (Fig. 12).

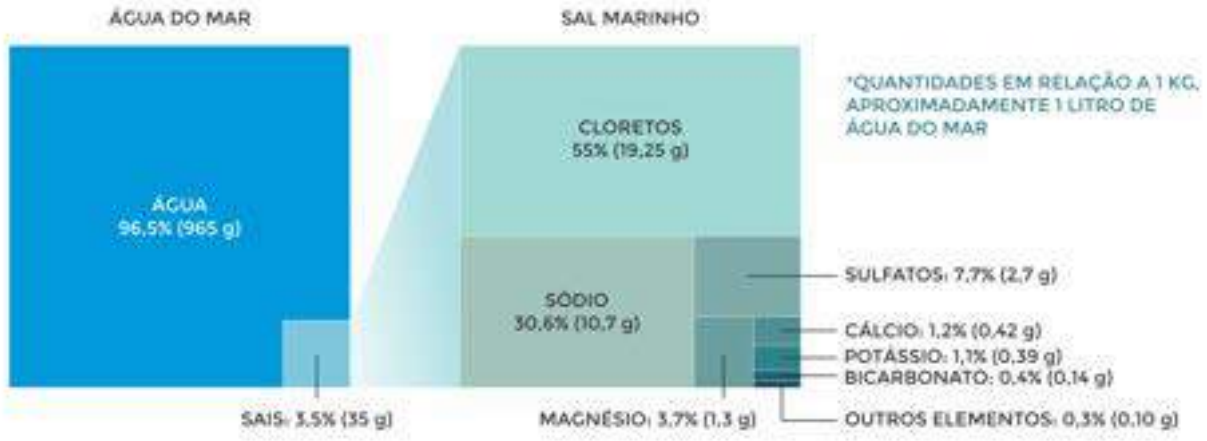



**FIGURA 12.** Representação dos constituintes maiores da água do mar.

Os elementos que estão em maior quantidade na água do mar são o cloreto e o sódio, sendo o cloreto de sódio, também conhecido como sal de cozinha, bastante abundante nos oceanos. O cloro está 100% presente na forma de íon cloreto e pouco participa de processos biológicos, sendo um elemento conservativo com alto tempo de residência na água do mar. O teor de sais dissolvidos na água do mar tem assim, importante fração de cloretos e íon sódio perfazendo 85,6% de todos os componentes da água do mar.

A abundância de NaCl na água do mar acaba conferindo-lhe o sabor, porém ela apresenta outros componentes que participam do total de sais presentes na água do mar. Associados aos dois componentes citados acrescentam-se: sulfatos ($SO_4^{--}$); magnésio ($Mg^{++}$); cálcio ($Ca^{++}$); e potássio ($K^{+}$), perfazendo 99% dos solutos presentes na água do mar. Adicionando-se os íons bicarbonato, brometo, borato, estrôncio e fluoreto, chega–se a cerca de 99,98% dos elementos dissolvidos na água do mar, os quais, além de serem conhecidos como constituintes maiores, também são conhecidos como elementos conservativos, pois dificilmente apresentam modificações em seus teores, devido ao consumo ou aporte por processos biológicos, estando apenas sujeitos a modificações via processos físicos ou abiótico (não ligados à vida). Firma-se aqui, mais uma vez, que os componentes maiores estão ligados à importante propriedade da água, a salinidade.

Assim, a presença de cátions, tais como os íons potássio, sódio, cálcio e magnésio nos oceanos, pode ser razoavelmente bem explicada pelo desgaste de rochas e subsequente transporte pelo vento e água. Por outro lado, os ânions, tais como: cloretos, brometos e bicarbonatos, estão mais associados às emanações vulcânicas que passam através da atmosfera e retornam quimicamente à água do mar, ou advindas de emanações de fumarolas e erupções de vulcões submersos (Fig. 13).

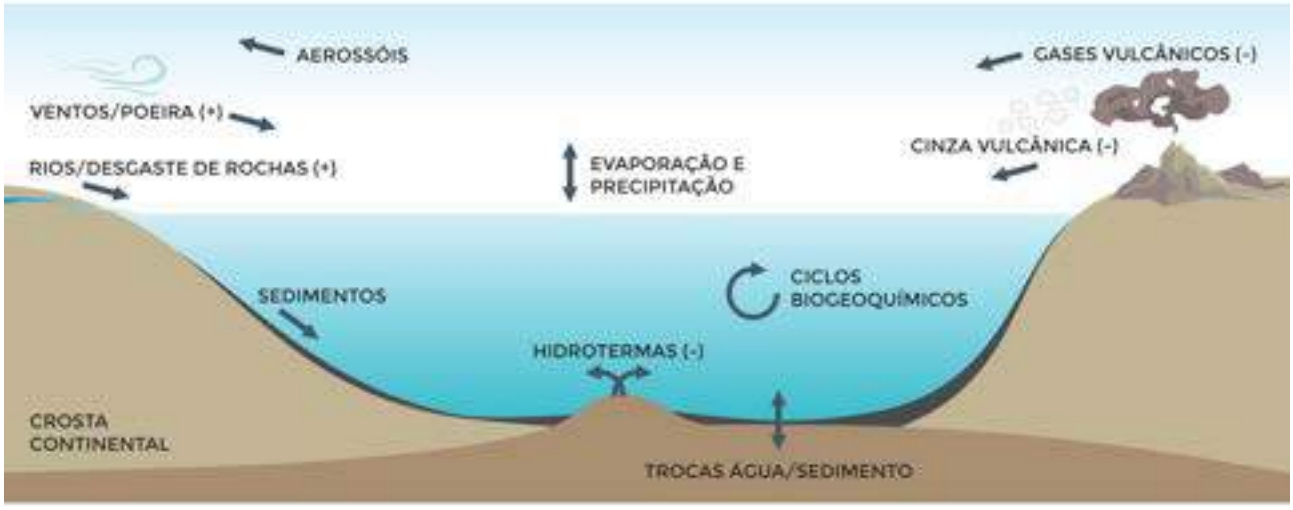



**FIGURA 13.** Aportes de cátions e ânions ao meio marinho.

Os sistemas aquáticos são classificados segundo a quantidade de sais pela Resolução CONAMA 357/2005 que segue as condições da Tabela 5, abaixo:

**TABELA 5.** Classificação de sistemas aquáticos de acordo com a quatidade de sais.

| Salinidade | Classificação |
|---|---|
| de 0 a 5‰ | Água doce |
| maior que 5 até 30‰ | Salobra |
| maior ou igual a 30‰ | Salina |

O termo salinidade deveria designar a massa total de sais dissolvidos por quilograma de água do mar. Infelizmente essa massa não é fácil de ser determinada, pois o resíduo seco obtido após a evaporação é fortemente higroscópico. Os pesquisadores Knudsen, Sorensen e Forch, em 1902, revisaram uma técnica que propunha a secagem à 480°C da água do mar até obter um peso constante (cerca de 4h30). Nessa operação, a matéria orgânica existente na água é decomposta, os carbonatos transformados em óxidos, os brometos e iodetos são considerados como parte dos cloretos.

Assim, a definição mais direta de salinidade, passou a ser considerada a massa total, expressa em gramas, de todos as substâncias dissolvidas em 1 kg de água do mar, considerando que todo carbonato tenha sido convertido em óxido, que os brometos e iodetos tenham sido substituídos por cloretos e todos compostos orgânicos tenham sido oxidados a uma temperatura de 480°C até que o peso fique constante. Esta consideração é bastante completa, pois leva em conta o comportamento químico do iodeto e do brometo, e a presença de carbono.

Na verdade, a definição de massa total de sais dissolvidos é a mais adequada, porém a metodologia analítica para a determinação da salinidade implica na inserção de explicações associadas à definição, as quais remetem às propriedades dos sais dissolvidos, mostrando a complexidade da composição da água do mar e a dificuldade de padronizar os instrumentos de leitura.

Foi observado, no início do século XIX, por Murray (1818) e Marcet (1919), que a massa total de sais dissolvidos pode variar muito de um mar para outro (mais de 40 g $kg^{-1}$ no Mar Vermelho e menos de 10 g $kg^{-1}$ em certas regiões do Mar Báltico), porém a proporção relativa dos principais sais permanece constante.

Como a salinidade pode variar, as razões entre as quantidades dos constituintes maiores nas águas dos oceanos são aproximadamente constantes. Em "uma" água do mar com salinidade 35, a quantidade de cloretos é igual a 19,353 mg $L^{-1}$ e para salinidade 34, a concentração de cloreto é igual a 18,800 mg $L^{-1}$. Assim, a relação da salinidade pela concentração do cloreto é aproximadamente constante, ou seja:

$$K = \frac{S}{Cl^-} = \frac{35}{19{,}353} = \frac{34}{18{,}800} = 1{,}8085\ 10^{-3}$$

Os constituintes maiores não são utilizados significativamente nos processos biológicos e não interagem facilmente com partículas inorgânicas, com exceção do cálcio, o qual faz parte das carapaças dos organismos marinhos. Como as taxas de reações químicas são relativamente lentas, a distribuição dos constituintes conservativos é controlada principalmente pelos processos físicos (evaporação, precipitação, congelamento, descongelamento, advecção de massas d'água, difusão molecular dos íons e misturas turbulentas entre massas d'água de diferentes salinidades). Os tipos de transporte de água podem alterar as concentrações, mas não as proporções relativas entre os constituintes maiores.

O estudo intensivo feito por Dittmar (1884), a partir de 77 amostras de água do mar coletadas durante o cruzeiro de circunavegação do *H.M.S. Challenger* (1873-1877), confirmou a veracidade da observação das proporções constantes entre os constituintes maiores (íons maiores) presentes na água do mar. Dittmar observou variação no caso da relação cálcio/cloreto, mostrando valores maiores em águas profundas, comparadas com águas da superfície. A explicação é que há um enriquecimento em cálcio nas águas de fundo, que pode ser explicado pela ação do dióxido de carbono em águas frias, sobre o carbonato de cálcio que compõe vários exoesqueletos que atingem o fundo, e também pela maior solubilidade do cálcio em águas mais frias.

## 4.2 Princípio das proporções constantes

A partir de análises realizadas sobre a composição química da água do mar em amostras provenientes da Expedição do *H.M.S. Challenger* (vide capítulo **Histórico da Oceanografia**), foi observado por Dittmar que os constituintes maiores da água do mar apresentam sempre as mesmas proporções entre si, ou seja, independentemente da salinidade total da água do mar (total de sais dissolvidos) seus elementos maiores ($Na^+$, $Cl^-$ $Ca^{++}$, $Mg^{++}$, $HCO_3^-$, $SO_4^{--}$) apresentam proporções constantes entre si (Tab. 6).

Esta relação permite o cálculo da salinidade total a partir da determinação de um de seus constituintes e do conhecimento da constante experimental de sua relação com a salinidade. O elemento normalmente escolhido para a determinação da salinidade é o cloreto, devido à sua abundância, predomínio na forma livre na água do mar e facilidade em sua determinação química via titulação com uma solução de nitrato de prata.

**TABELA 6.** Lei das proporções constantes, válida para os constituintes maiores.

| Lei das Proporções Constantes<br>Elementos conservativos [ ] g kg$^{-1}$ | | | |
|---|---|---|---|
| 35 | $[Na^+]/_{[Cl^-]} = x$ | 35 | $[Mg^{++}]/_{[K^+]} = y$ |
| 40 | $[Na^+]/_{[Cl^-]} = x$ | 40 | $[Mg^{++}]/_{[K^+]} = y$ |
| 31 | $[Na^+]/_{[Cl^-]} = x$ | 31 | $[Mg^{++}]/_{[K^+]} = y$ |
| | x ~ 0,556 | | y ~ 3,334 |

## Lei das Proporções Constantes

A constância na proporção relativa dos constituintes maiores da água do mar

Para entender a Lei das Proporções constantes, considere que será preparado um bolo para 5 convidados, com os seguintes ingredientes:

- 2 xícaras de farinha; 1 ovo; 2 colheres de manteiga; 1 copo de leite; e 1 colher de sopa de fermento.

Caso o número de convidados fosse maior, por exemplo, 10 pessoas, seria necessário fazer um bolo maior, onde usaríamos:

- 4 xícaras de farinha; 2 ovos; 4 colheres de manteiga; 2 copos de leite; e 2 colheres de sopa de fermento.

Perceba que os ingredientes, em ambos os casos, são os mesmos, assim como a proporção entre eles, mas as quantidades foram aumentadas.

O mesmo acontece com a água do mar, atendendo o princípio das proporções constantes entre os constituintes maiores (Na, Cl, K, Ca, etc.). Independente da salinidade, a proporção entre eles é constante.

Tem-se que levar em consideração algumas condições onde a Lei das Proporções Constantes entre os constituintes maiores da água do mar não é válida (Tab. 7). Locais sujeitos a processos que acabam inserindo ou removendo elementos de modo diferenciado não atendem a essa constância.

**TABELA 7.** Condições sob as quais a composição da água do mar é alterada, modificando a constância das proporções entre os constituintes maiores dissolvidos. (Braga, E. S.).

| | |
|---|---|
| | **Estuários e mares internos:** considerar as descargas de rios e o balanço evaporação-precipitação, onde geralmente as proporções $SO_4^{--}/Cl^-$, $HCO_3/Cl^-$, $K^+/Cl^-$, $Mg^{++}/Cl^-$, $Ca^{++}/Cl^-$ são muito maiores nas águas dos rios que na água do mar. *Foto: Wikimedia commons*. |
| | **Bacias anóxicas:** a utilização do oxigênio para oxidar a matéria orgânica originada na superfície confere às águas profundas características anóxicas (OD < 1,0 mL $L^{-1}$) e reduz o potencial de óxido-redução (pEh), propiciando a proliferação de bactérias redutoras de sulfato: $SO_4^{--} \rightarrow H_2S$, então, a proporção $SO_4^{--}/Cl^-$ diminui. *Foto: Wikimedia commons*. |
| | **Recifes de corais:** considerando que o carbonato precipita em temperaturas altas, como é o caso das águas rasas e quentes, estas águas propiciam a precipitação do carbonato de cálcio devido aos fatores físico-químicos e biológicos, então a proporção $Ca^{++}/Cl^-$ torna-se mais baixa nas águas mais superficiais. *Foto: Paulo Y. Sumida (Projeto ProAbrolhos)*. |
| | **Vulcanismo submarino:** a injeção de magma vulcânico na água do mar afeta, sobretudo a concentração de sílica dissolvida e, em certos casos, o fluoreto, então a proporção $F^-/Cl^-$ pode aumentar. *Foto: Wikimedia commons*. |
| | **Mistura com "salmoura geológica"**: águas muito salinas (225-326) e quentes (45-58°C), são liberadas a partir de fissuras, no fundo marinho. Nessas águas, as concentrações de $Mg^{++}$, $SO_4^{--}$, $F^-$, $Br^-$ são alteradas e existe modificação nas proporções entre elas e, delas com os demais constituintes maiores. *Foto: Pixabay*. |
| | **Entorno de *icebergs*:** A concentração dos sais em torno do gelo formado na água aumenta devido à passagem da água pura para a fase sólida, modificando assim, as proporções de entre os íons maiores. Porém, pequena quantidade de sais é geralmente removida da água e retida no gelo marinho, formando pequenos núcleos de sais, mas nem todos os íons são incorporados da mesma maneira. *Foto: Pixabay*. |
| | **Interface com a atmosfera:** as trocas com a atmosfera ocorrem quando bolhas se rompem na superfície da água do mar liberando íons na forma de aerossol e quando há transporte pelas águas de chuva. Os íons $Na^+$, $Cl^-$ e $SO_4^{--}$ participam das trocas e desempenham um papel importante no fenômeno da nucleação de nuvens de chuva. *Foto: Elisabete de Santis Braga.* |
| | **Interface com o sedimento:** a concentração do $Mg^{++}$ em águas intersticiais diminuí pela reação com o $CaCO_3$ formando a dolomita $CaMg(CO_3)_2$. A concentração do $K^+$ tende a aumentar um pouco com a hidrólise dos feldspatos ($3KAlSi_3O_8$). *Foto: Leandro Coelho*. |
| | **Formação de evaporitos:** depósitos de evaporitos ocorrem em ambientes de águas rasas devido influência restrita das águas de mar aberto. O sal é removido do mar quando a evaporação aumenta as concentrações dos íons maiores para níveis que excedem a solubilidade dos minerais tais como, NaCl (halita), $CaCO_3$ (limestone), $CaMg(CO_3)_2$ (dolomita) e $CaSO_4.2H_2O$ (anidrito). Isto altera a razão dos íons na salmoura remanescente em relação à da média da água do mar. *Foto: Pixabay*. |

### 4.3 As variações de conceito e de determinação de salinidade

A definição de salinidade com o enfoque mais químico é feita com base na determinação do teor de cloretos (clorinidade), levando em consideração que a metodologia de precipitação dos cloretos com nitrato de prata avalia íons iodeto e brometo como se fossem cloretos e, considera que a presença de compostos orgânicos e carbonatos deva ser eliminada. Dittmar sugeriu que seria possível, portanto, estimar a salinidade da água do mar pela determinação de um destes constituintes maiores e, por esta proporção, sugeriu então a estimativa do cloreto (+ brometo e iodeto). Em 1899, Knudsen desenvolveu um método de titulação bastante preciso para a determinação do cloreto e também investigou a relação entre esta quantidade e a salinidade da água do mar (Forch *et al.*, 1902).

Os oceanógrafos físicos consideram a quantidade total de sais, porém, utilizam para a medida de salinidade, a condutividade elétrica, que é uma propriedade que na água pura é mínima e na água salina é proporcional ao teor de sais. A resistividade da água acaba sendo o parâmetro mais facilmente avaliado para transformação em salinidade. Essa propriedade é dependente da temperatura da água.

Os equipamentos utilizados para a determinação da salinidade (salinômetro e salinômetro indutivo) devem ser padronizados com água normal (Standard seawater), a qual apresenta clorinidade e razão de condutividade conhecidas (***R***). Estas águas são preparadas com águas marinhas naturais e ajustadas em suas propriedades. Porém, a interferência da força iônica em cada lote de água que é selada nas ampolas para a venda é diferenciada segundo o lote, promovendo pequenas variações na resposta elétrica. Atualmente, os equipamentos avaliam a razão de condutividade, ou seja, a condutividade da amostra em relação a condutividade da água padrão, sendo assim, não se usa mais unidade nesta medida ou se coloca a indicação (unidade de salinidade prática, ***usp***) para os valores obtidos usando a razão de condutividade.

## 5. Efeitos dos sais dissolvidos nas propriedades da água

Devido ao grande número de eletrólitos dissolvidos na água do mar ocorre a alteração das propriedades coligativas da solução.

### 5.1. Ponto de congelamento

A água pura congela a 0 ˚C, sendo que, a adição de sal à solução leva ao abaixamento do ponto de congelamento, por exemplo, a água com salinidade 35, congela a -1,91 ˚C, pois a presença de sais hidratados na solução interfere junto às moléculas de água fazendo com que elas tenham "dificuldade" em se rearranjarem na forma de cristal.

### 5.2 Densidade

Os sais apresentam importantes massas atômicas quando comparados à molécula de água. Assim, em sistemas costeiros, a água doce tende a se localizar acima da água salina, pois a combinação salinidade/temperatura colabora com a menor densidade desta massa de água.

### 5.3 Pressão de vapor

Quando um líquido como a água é colocado em um recipiente fechado, algumas moléculas podem vaporizar, diminuindo a quantidade de líquido. Quando o equilíbrio é atingido, a pressão de vapor é igual à pressão exercida pelas moléculas na fase gasosa. Quando sais são adicionados à solução, a salinidade aumenta, a pressão do vapor cai, por isso a água doce evapora mais rapidamente que a água do mar. A diminuição da pressão de vapor está diretamente relacionada com o número total de moléculas de soluto. Este efeito é uma consequência dos íons hidratados, os quais "retém" as moléculas de água em solução, tornando a sua evaporação mais difícil.

### 5.4 Propriedades coligativas no meio marinho

A propriedade mais importante do ponto de vista oceanográfico é o abaixamento do ponto de fusão. Este abaixamento será diretamente proporcional à salinidade, e é dado pela expressão:

$$T_{fusão}\,(^{o}C) = -0{,}0137 - 0{,}051990S - 0{,}000072255S^{2} - 0{,}000758z$$

onde $T$, temperatura; $S$, salinidade; e $z$, profundidade.

## 6. O carbono e os gases dissolvidos

O carbono está presente no meio marinho como constituinte maior da água do mar na forma de bicarbonato. No meio marinho há um equilíbrio entre diferentes formas de carbono dissolvido inorgânico, chamado sistema $CO_2$-bicarbonato-carbonato que se relaciona com os gases dissolvidos e o pH. Aliás, o carbono é um elemento fundamental para constituição da matéria orgânica viva no nosso planeta (Fig. 14), não deixando de ter extrema importância também no meio marinho.

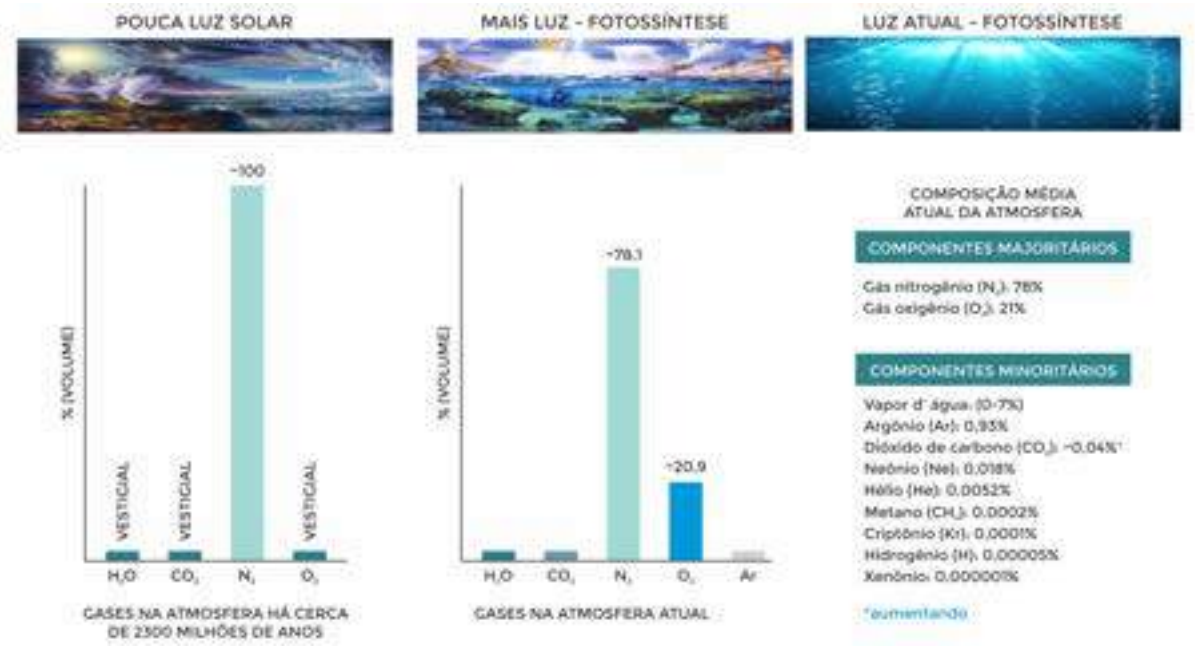



FIGURA 14. Composição da atmosfera primitiva e sua evolução com o aumento da penetração da luz solar.

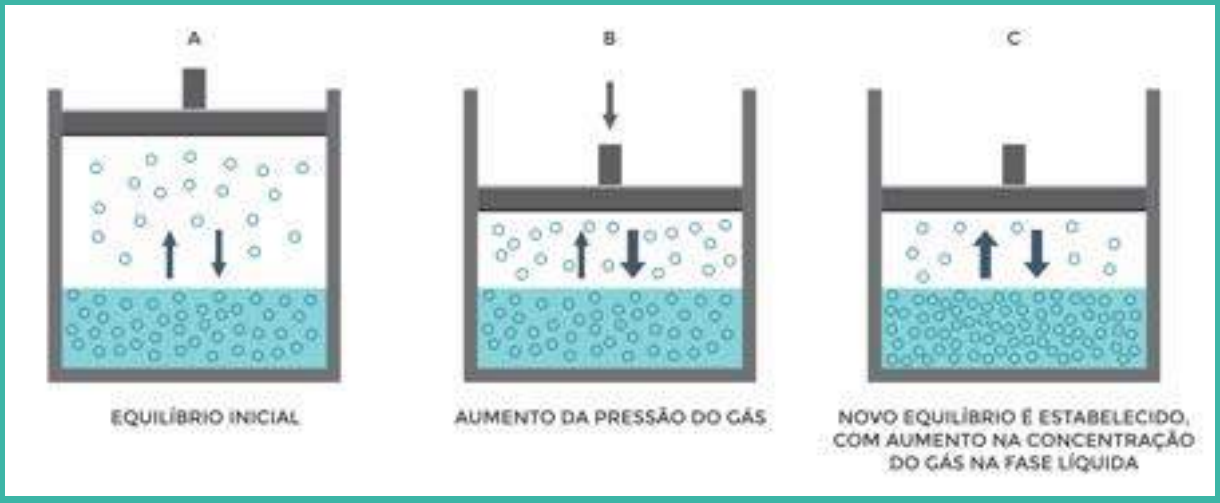
Existem gases dissolvidos na água do mar? Os gases atmosféricos podem penetrar e serem trocados através da superfície marinha com relativa rapidez, observando-se semelhança na composição gasosa atmosférica e na água.

No interior dos oceanos, os gases possuem destino que depende de sua dispersão pelos movimentos e mistura das massas d'água, bem como de sua participação em reações químicas e bioquímicas. Somente a partir do advento dos processos de fotossíntese pelos vegetais verdes é que o oxigênio passou a apresentar um excesso na atmosfera e nos oceanos, o que levou à oxidação de alguns componentes reduzidos, atingindo os valores de equilíbrio conhecidos atualmente.

Assim, a composição química atual dos oceanos resulta do balanço entre a velocidade em que a matéria dissolvida é adicionada ao oceano, a partir da terra e da atmosfera e, da velocidade com que ela é removida do oceano pela incorporação ao sedimento e à biosfera, ou devolvida à atmosfera.

## Lei de Henry

A concentração de cada gás dissolvido é proporcional à pressão do gás na atmosfera




O coeficiente de proporcionalidade, chamado de coeficiente de saturação, depende do gás e da salinidade da água do mar.

Ao considerar-se a distribuição dos gases no mar, deve-se admitir que todos os elementos de um volume de água, em um determinado momento, estiveram em contato com a atmosfera e que um equilíbrio fora estabelecido.

Os processos mais recentes também mostram a ocorrência de forte pressão antrópica modificando o equilíbrio, sobretudo nas margens dos continentes, onde a velocidade de adição da matéria dissolvida e qualidade da mesma estão sendo alteradas, modificando os equilíbrios atingidos anteriormente.

Assim, os principais gases que existem na atmosfera podem ser encontrados dissolvidos no mar. No caso dos gases nitrogênio, oxigênio e gases raros, a solubilidade segundo a Lei de Henry é atendida sem que os gases reajam com a molécula de água, enquanto no caso do gás carbônico existe uma reação formando ácido carbônico (Fig. 16).

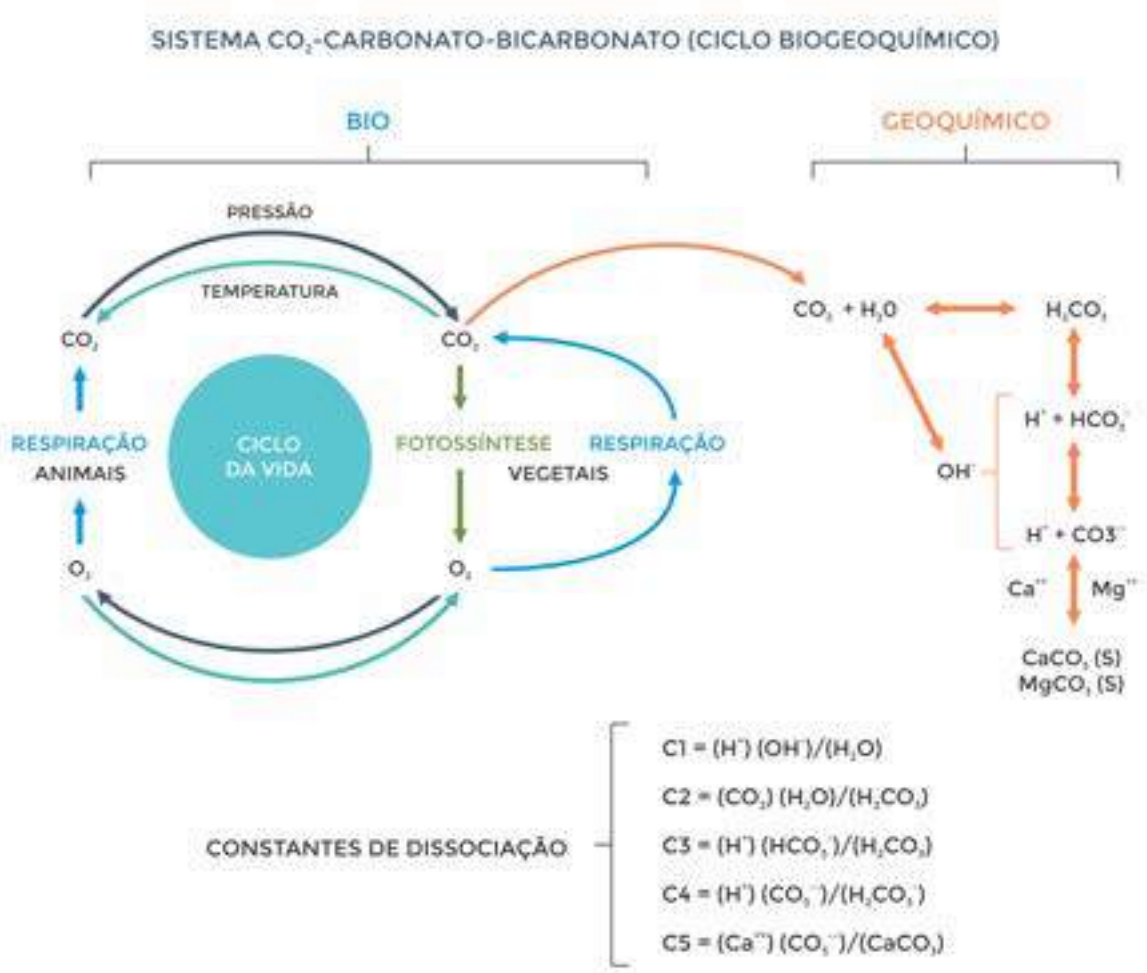



**FIGURA 15.** Envolvimento do gás carbônico dissolvido no ciclo da vida e no sistema $CO_2$-carbonato-bicarbonato, atuando no pH e, portanto, na condição tampão da água do mar.

No equilíbrio do $CO_2$-carbonato-bicarbonato há formação do ácido carbônico quando o $CO_2$ reage com a água, formando um ácido fraco, que por sua vez se dissocia em $H^+$ e bicarbonato e, o bicarbonato se dissocia em $H^+$ e carbonato. Por outro lado, a água se dissocia em $H^+$ e $OH^-$, e o conjunto destas reações, mais aquelas de outros ácidos fracos presentes na água do mar, como os ácidos ortosilícico e o ortofosfórico, estabelecem uma relação de fornecimento de íons, que auxiliam na condição tampão da água do mar.

Ou seja, a água do mar é uma solução que suporta adição de pequenas quantidades de ácidos fortes ($H^+$) e pequenas adições de bases fortes ($OH^-$) sem sofrer grandes variações em seu pH, o que é muito favorável aos organismos que vivem nesse meio que apresenta uma estabilidade (homeostase) diminuindo o gasto de energia pelos organismos com variações externas.

Lembrando que o pH é o potencial hidrogeniônico, definido como logaritmo negativo da concentração dos íons [$H^+$] na base 10, portanto:

$$pH = - \log [H^+]$$

Temos algumas relações do equilíbrio dos componentes do sistema $CO_2$-carbonato-bicarbonato em que as concentrações de $H^+$, $OH^-$ e $CO_2$ podem ser observadas, uma relação geral com o $O_2$ e pH (Fig. 16).

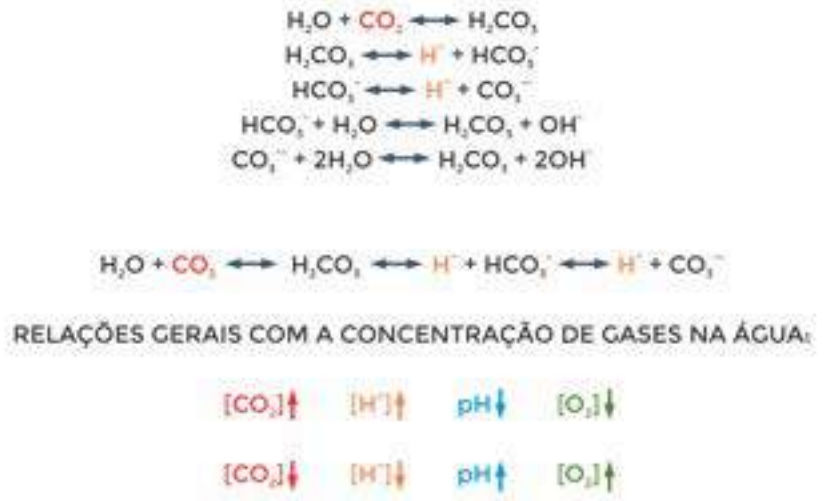



**FIGURA 16.** Esquema do $CO_2$-bicabonato-carbonato na água do mar (relação com o $O_2$ e pH).

O pH da água do mar é ligeiramente alcalino (~8), ocorrendo uma predominância de carbono inorgânico dissolvido na forma de íons bicarbonato.

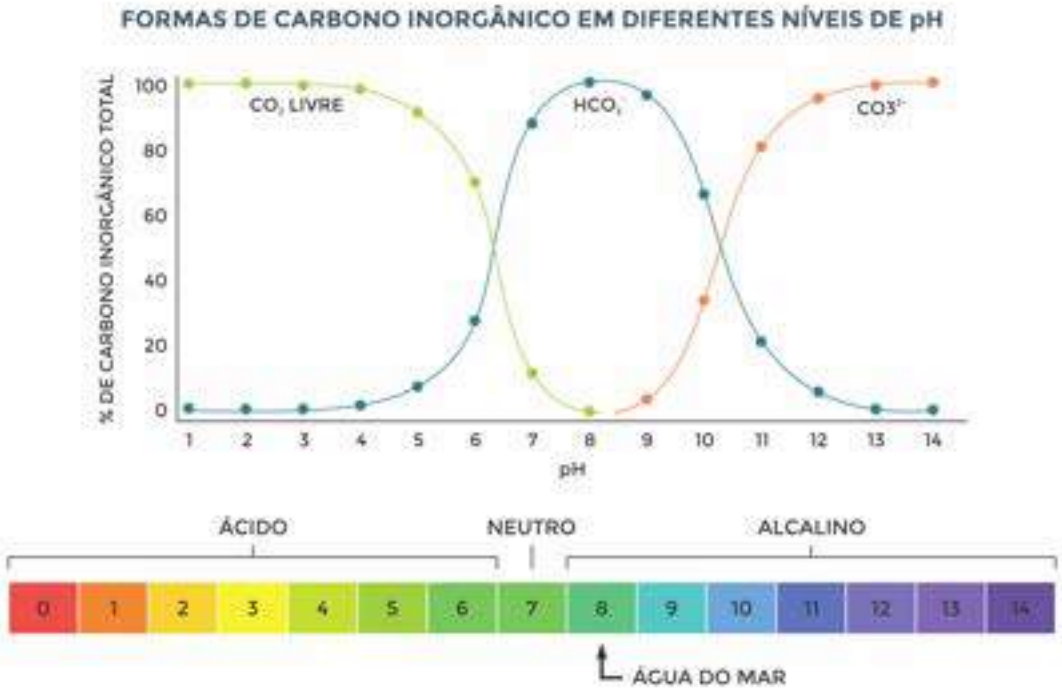



**FIGURA 17.** Especiação química de carbono inorgânico mais abundante no pH (~8) da água do mar.

Outros gases presentes no meio marinho possuem importância biológica, como o próprio nitrogênio, que considerado inicialmente como gás inerte para a vida ("azoto"- de azóico - não utilizado pelos seres vivos), passou a ser visto como de grande importância para os processos de fixação biológica em águas pobres em outras formas inorgânicas de nitrogênio dissolvido. O processo de fixação do $N_2$ envolve um grande gasto de energia (ATP) e também envolve a existência de um complexo enzimático específico para a transformação de $N_2$ em N assimilável para incorporação nas biomoléculas. Assim poucos organismos conseguem incorporar esta forma de N em moléculas orgânicas, como é o caso dos organismos fixadores como as cianobactérias.

Outros gases, como por exemplo o metano e outros, podem ser encontrados no meio marinho, considerando o equilíbrio entre as pressões parciais em interfaces e o efeito da pressão da coluna de água (a cada 10 m de aprofundamento na coluna d'água, a pressão aumenta 1 atm), além das fontes marinhas. Em conjunto com a temperatura, a pressão e a salinidade exercem influência sobre a solubilidade do gás na água do mar (Fig. 18). Quanto menos salina a água, mais fácil é a retenção do gás em solução e vice-versa. Pense na dificuldade de se manter um aquário de água salgada aerado e um de água doce! Observe que o sistema de aeração dos aquários de água salgada é mais potente.

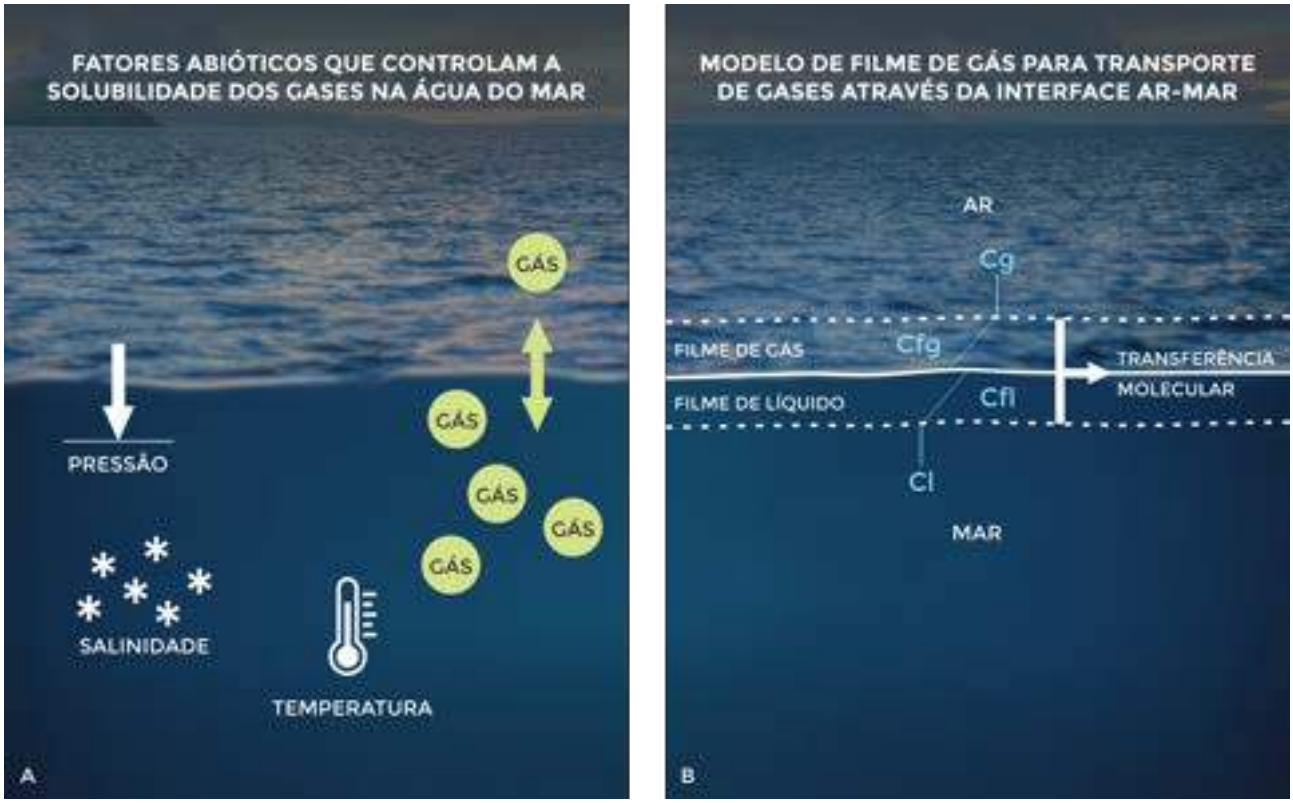



**FIGURA 18.** (A) Temperatura, pressão e salinidade são fatores abióticos que atuam solubilidade dos gases na água do mar. (B) Modelo simplificado de transporte de gás pela interface ar-mar (Cg = concentração na atmosfera, Cfg = concentração no filme de gás junto a interface, Cfl = concentração de gás no líquido junto à interface, Cl = concentração de gás no líquido).

Gases dissolvidos também são encontrados em águas profundas, pois em um "momento" eles estiveram em contato com a superfície e zonas rasas e afundaram, permanecendo aprisionados sob influência de alta pressão e baixo consumo, além de fontes de eliminação subterrânea pelo assoalho marinho. Sem dúvida os gases $CO_2$ e $O_2$ dissolvidos no meio marinho participam de importantes processos biológicos como a respiração e a fotossíntese.

A reação de fotossíntese, que consiste em mecanismos de transformação de energia luminosa em energia química armazenadas em biomoléculas como o ATP (adenosina trifosfato) $NADPH_2$ (nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato). A reação depende da transparência da água, ou melhor, da qualidade da luz que penetra na coluna de água (já visto), e da atividade dos fotossistemas I e II, que envolvem as moléculas de clorofila localizadas nas membranas do tilacoides dos cloroplastos. Para a produção de matéria orgânica pelos produtores primários marinhos (vegetais), há necessidade de C, que, como acabamos de ver, está presente na forma inorgânica dissolvida sobretudo como íon bicarbonato ($HCO_3^-$ constituinte maior) no pH 8. Assim, a produção de matéria viva no primeiro nível da cadeia alimentar necessita de uma fonte de carbono ($HCO_3^-$), água ($H_2O$), presença de luz e clorofila para formar a matéria orgânica (Fig. 19).

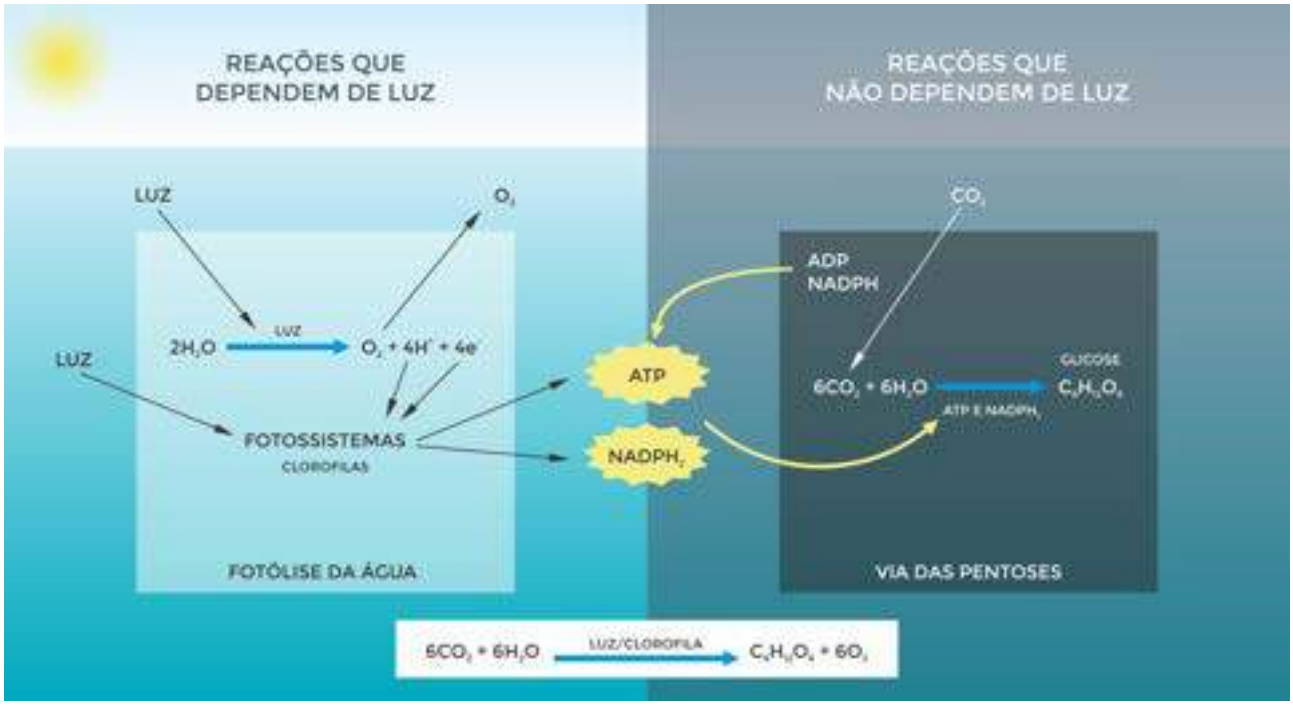



**FIGURA 19.** Esquema das fases de claro (depende de luz) e da fase de escuro (que não depende de luz) onde a incorporação do C inorgânico em molécula orgânica e a transformação de energia luminosa e biomoléculas energéticas ocorrem.

Observando essa matriz de átomos de C, H e O, faltam átomos de N e P para a construção de biomoléculas como proteínas, ácidos nucleicos e o próprio ATP, além de outros heteroátomos, para formar moléculas e para atuar como catalisadores de bioreações. De onde tirar isso?

Pois bem, outro grupo possui elementos que são essenciais na formação da matéria viva e são retirados do material dissolvido presente na água do mar – os nutrientes, os quais fazem parte dos constituintes menores da água do mar.

## 7. Constituintes menores da água do mar

Os componentes remanescentes dissolvidos na água do mar (~0,3%) são chamados de constituintes menores, e englobam importantes grupos de compostos, cuja importância biológica é destacada na construção de biomolécula e no metabolismo dos organismos. Neste grupo encontram-se os nutrientes e os elementos traço (micronutrientes e elementos não vitais).

### 7.1 Nutrientes

Os nutrientes são elementos que apresentam importância fundamental ao desenvolvimento dos organismos autótrofos, que sintetizam sua matéria orgânica principalmente pelo processo de fotossíntese, utilizando a energia da luz por meio da clorofila. Os nutrientes mais importantes são conhecidos também como nutrientes principais, destacando-se o nitrogênio, o fósforo e o silício. Esses elementos integram biomoléculas essenciais como proteínas (aminoácidos), adenosina trifosfato (ATP) e exoesqueleto de diatomáceas (sílica biogênica), dando suporte à produção primária marinha.

A deficiência, sobretudo em compostos nitrogenados (N-amoniacal, nitrito, nitrato) e fosfatados (fosfato) para a biota fotossintetizante, acarreta problemas de limitação na atividade de síntese de matéria orgânica por produção primária, interferindo nos demais níveis tróficos da cadeia alimentar, e contribuindo para a falta de fertilidade das águas de uma região e para a reserva total de alimentos no meio marinho. No caso do silício, utilizado na confecção das carapaças das diatomáceas, silicoflageladas, e outros organismos como radiolários e espículas de espongiários, dificilmente há carência no meio marinho (Fig. 20).

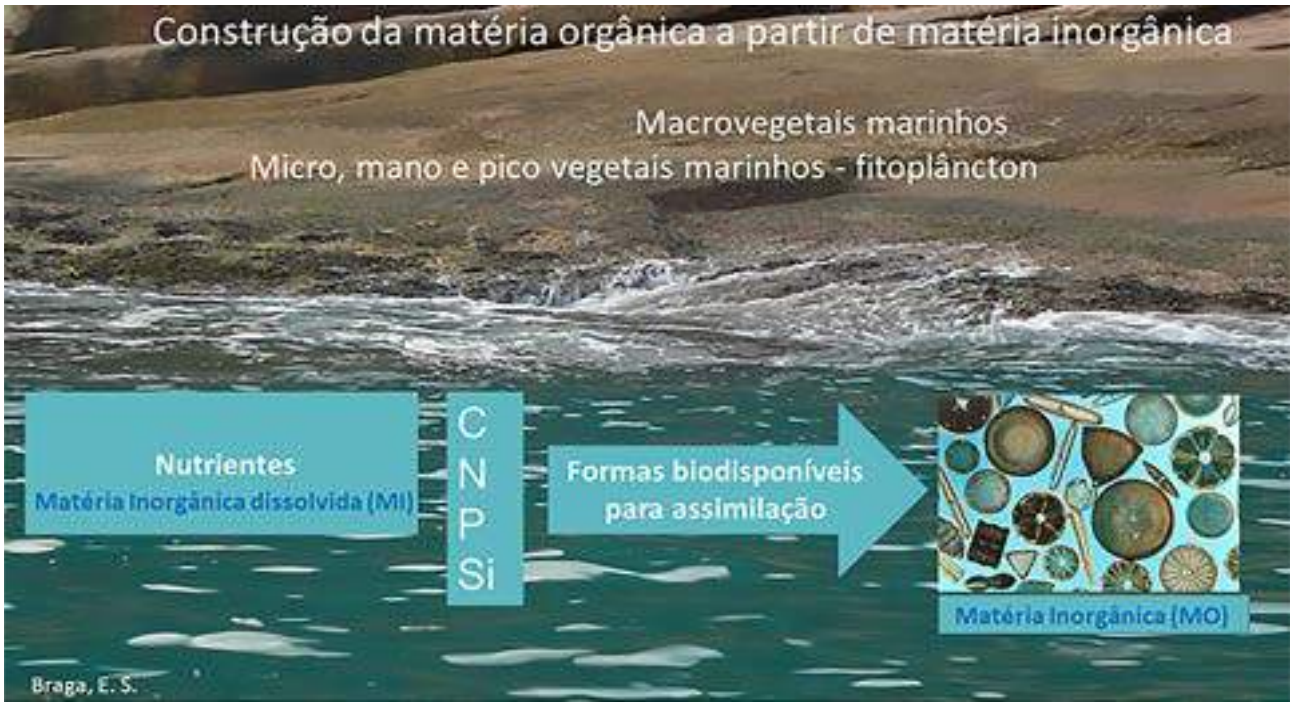



**FIGURA 20.** Esquema dos sais nutrientes sendo assimilados para a composição da matéria orgânica viva no primeiro nível trófico (produtores primários).

Os elementos nutrientes (N, P e Si) integram matéria orgânica e seguem a Lei de Lavoisier ou seja, da conservação das massas ("na natureza, nada se cria, nada se perde, tudo se transforma") de modo que esses elementos apresentam processos de ciclagem que permite que sua disponibilidade na forma orgânica e inorgânica se alterne mantendo um contínuo ciclo produção/decomposição de matéria orgânica em um sistema marinho.

Os elementos nutrientes também podem apresentar comportamento conservativo quando atingem águas mais profundas, abaixo da camada eufótica, local onde o consumo para construção de matéria orgânica é limitado pela ausência de luz e os processos de regeneração atingem seu máximo ficando suas variações sujeitas aos processos de mistura e de passagem de diferentes massas d'água, de modo que eles passam a contribuir à caracterização e identificação de massas de água em auxílio aos estudos da Oceanografia Física.

De um modo geral, quando estão na camada eufótica (camada de penetração de luz, adequada à produção primária), os nutrientes têm função trófica atuando como elementos não conservativos, com concentrações alteradas por processos biológicos de absorção; assimilação e excreção/regeneração, auxiliando os estudos da Oceanografia Biológica, enquanto as interações com os sedimentos, nos processos de troca com o fundo e com os continentes, revelam processos geoquímicos que auxiliam a Oceanografia Geológica.

A necessidade de átomos para construção de matéria orgânica viva nos primeiros níveis tróficos da cadeia alimentar envolve a disponibilidade de material inorgânico a ser absorvido e assimilado em matéria viva. O processo de fotossíntese é a principal forma de obtenção de energia para ser usada na assimilação de material inorgânico em orgânico na produção primária.

Como nos vegetais que vivem no solo, os organismos aquáticos necessitam encontrar o material construtor no meio. Portanto, na água do mar, o carbono (C), o nitrogênio (N), o fósforo (P) e o silício (Si), devem estar biodisponíveis. Redfield realizou a determinação de C, N e P da matéria orgânica de alguns organismos do primeiro e segundo níveis tróficos marinhos (fito e zooplâncton), observando uma necessidade média de 106 átomos de carbono para 16 de nitrogênio e 1 de fósforo, ficando esta relação conhecida como Relação de Redfield. Goldman repetiu o experimento quase duas décadas depois e obteve uma proporção bastante similar (Fig. 21).

**FIGURA 21.** Composição média do microplâncton marinho.

O número de átomos de Si utilizados por organismos, como diatomáceas e silicoflagelados, no primeiro nível trófico e radiolários e espongiários em outros níveis, depende da complexidade da estrutura codificadas por sua informação genética, sendo o Si analisado de uma forma diferenciada na composição dos organismos, pois nem todo organismo necessita de Si em sua estrutura, sendo diferentes do N e do P, necessários a todos organismos vivos.

**FIGURA 22.** Equação da produção primária marinha considerando a necessidade de átomos de C, N e P e o processo de síntese com a energia da fotossíntese e gerando $O_2$ e a decomposição (respiração/oxidação) reação inversa, consumindo $O_2$. Coeficientes de Redfield e de Goldman são apresentados para a composição de matéria orgânica marinha média dos dois primeiros níveis tróficos do microplâncton.

O fósforo e o nitrogênio são elementos necessários para a formação de biomoléculas como ATP, DNA, RNA entre outras, sendo que o N é muito importante na composição do anel pirrólico das clorofilas, uma molécula essencial para os vegetais.

Normalmente, os materiais atingem os oceanos por aportes continentais, entrando em formas dissolvidas e particuladas, sendo que em Oceanografia, se define material dissolvido como aquele que atravessa uma membrana de porosidade de 0,45 µm, e o material particulado, o que fica retido nessa malha, o qual pode ser inorgânico, como fragmentos de rochas e minerais ou orgânicos, derivados de organismos vivos. Os sais componentes da água do mar estão em formato dissolvido inorgânico, porém quando o material inorgânico é absorvido e assimilado por um organismo, passa a fazer parte de uma molécula orgânica, ou seja uma biomolécula, com um esqueleto de carbono. Passando a orgânico, tem-se a possibilidade desses organismos serem muito pequenos e constituir um material dissolvido (pico e nanoplâncton) e também existe a possibilidade dele ser incorporado em organismos maiores e fazer parte de uma excreção, sendo eliminados como frações menores de matéria orgânica. Por sua vez, organismos na forma particulada (> 0,45 µm) podem morrer e fazer parte do grupo de material orgânico particulado na forma de detrito. O trabalho de bactérias, e a quebra de moléculas orgânicas em inorgânica, retorna a matéria para seu estágio inicial de inorgânica dissolvida, alimentando o inicio do ciclo da matéria no meio marinho, sendo o caminho de inorgânico, particulado e dissolvido, vivo e não vivo, parte dos ciclos biogeoquímicos dos elementos. A Figura 23 indica um resumo dos ciclos biogeoquímicos dos nutrientes e da matéria no meio marinho.

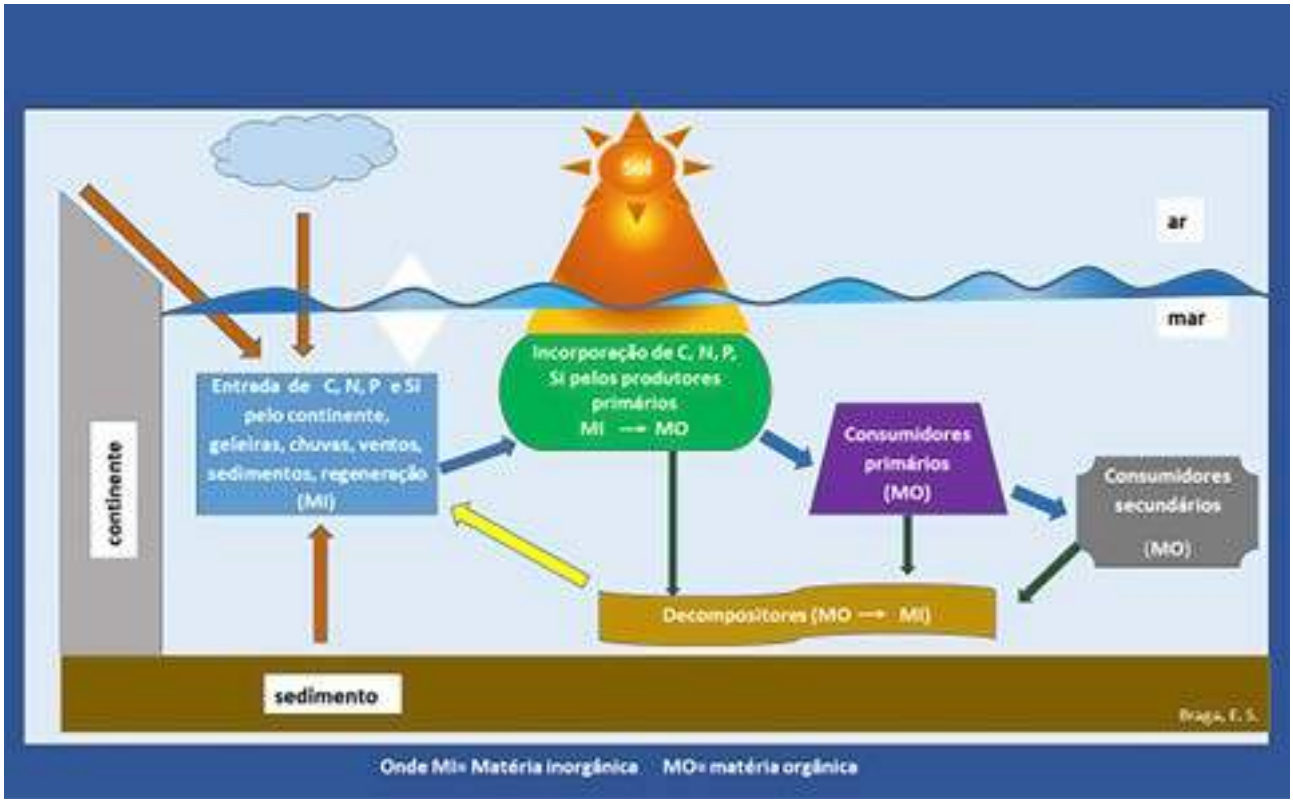



**FIGURA 23.** Esquema geral de entrada de nutrientes (MI) nos oceanos e sua passagem pela cadeia alimentar (MO) e sua ciclagem no meio marinho.

Ainda com o olhar na construção de biomoléculas, importantes para todos os seres vivos, alguns átomos são necessários em algumas biomoléculas em quantidade muito pequena, ou mesmo como catalisadores de reações metabólicas. Estes elementos como Fe, Co, Cu, Zn entre outros estão em um grupo de elementos disponíveis em menor quantidade na água, os elementos traço.

## 7.2 Elementos traço

Elementos traço são componentes que existem em pequenas concentrações (< 0,01%) os quais podem apresentar alguma função biológica positiva (micronutrientes), como é o caso do Fe, Co, Cu, Zn, entre outros.

Alguns elementos traço, não possuem função biológica positiva e, quando atingem os organismos em quantidades mais elevadas, atuam como desreguladores metabólicos, responsáveis por anomalias, processos mutagênicos e carcinogênicos diante exposições agudas ou crônicas, como o Hg, Pb, Cd e outros. Quando em quantidades acima dos níveis naturais, estes elementos participam de processos de bioacumulação e de biomagnificação, estando envolvidos em quadros de poluição nas zonas costeiras.

Os elementos traço existem na natureza em concentrações baixas, na faixa de ppb ($10^{-9}$) e ppt ($10^{-12}$), não interferindo de forma negativa nos organismos aquáticos.

Os elementos que estão presentes em pequenas quantidades na água do mar (Tab. 8) também atuam como catalisadores de reações bioquímicas e como núcleos de moléculas orgânicas vitais aos organismos vivos, como é o caso do Fe, Cu, vitamina B12 e entre outros, executando funções positivas mesmo em concentrações baixas.

**TABELA 8.** Concentração de alguns elementos traço na água do mar. *Adaptado de Pinet, 1999.*

| Elementos traço | Concentração ($10^{-9}$ ppb) |
|---|---|
| Lítio (Li) | 170 |
| Iodo (I)* | 60 |
| Molibdênio (Mo) | 10 |
| Zinco (Zn)* | 10 |
| Ferro (Fe)* | 10 |
| Alumínio (Al)* | 10 |
| Cobre (Cu)* | 3 |
| Manganês (Mn)* | 2 |
| Cobalto (Co)* | 0,1 |
| Chumbo (Pb) | 0,03 |
| Mercúrio (Hg) | 0,03 |
| Ouro (Au) | 0,004 |

* em pequenas doses, podem atuar como heteroátomos, em biomoléculas, ou catalizadores em reações metabólicas, agindo como micronutrientes.

## 8. Compostos orgânicos

Os compostos orgânicos existentes na água do mar são constituídos por moléculas de diversos graus de complexidade, as quais são produzidas por organismos vivos e por atividade antrópica. As substâncias orgânicas dividem-se em várias categorias, como: lipídeos; proteínas; carboidratos; hormônios; vitaminas, entre outras. Normalmente, elas ocorrem em pequenas concentrações na forma dissolvida e já desassociada de seres vivos, sendo que algumas delas podem ser assimiladas como fontes de nutrientes pelos organismos do fitoplâncton, como é o caso da ureia, de alguns aminoácidos livres, entre outras, que são assimiladas como material estrutural (plástico) e energético por vários grupos de heterótrofos.

Muitas moléculas orgânicas são eliminadas sob a forma de excreção, como parte do metabolismo interno dos organismos. De toda forma, a matéria orgânica, composta por átomos de C, H, O, N, P, S, etc., participa da ciclagem biogeoquímica da matéria no ambiente marinho, sendo assimilada, excretada e decomposta nesse sistema.

A decomposição da matéria orgânica requer o consumo de oxigênio, sendo assim, em sistemas onde ocorre o excesso de matéria orgânica e falta de oxigênio, dificilmente a matéria orgânica é decomposta, ou seja, retorna à sua forma inorgânica ocorrendo assim, seu acúmulo junto aos sedimentos. Os sistemas costeiros possuem maior quantidade de matéria orgânica em relação ao sistema de mar aberto, sendo que também no sistema costeiro, a entrada de material orgânico por aporte terrestre natural é grande.

Também é importante considerar a grande contribuição devida à intensa atividade antrópica, sobretudo nas margens continentais, dada a grande quantidade de esgoto doméstico despejada no sistema hídrico. Nesses esgotos existe uma grande quantidade de nutrientes oriundos da decomposição da matéria orgânica, que leva à poluição, chamada eutrofização, ocasionando um excesso de" floração" de algas, a diminuição da penetração de luz na coluna d´água, e o aumento da demanda de oxigênio dissolvido (DBO) para realizar a decomposição da matéria orgânica, comprometendo a qualidade da água (ver capítulo **Poluição Marinha**).

Além dos sais e substâncias dissolvidas, o meio marinho contém partículas em suspensão (*seston*). O *seston*, por sua vez, comporta duas grandes categorias de materiais: o plâncton (formado por componentes vivos) e os componentes não vivos, o *tripton*. O *tripton* pode atingir quantidades muito importantes, que muitas vezes pode ser observado com um aspecto de "neve marinha" (Braga, 2002). No que concerne ao *tripton*, ele pode ser proveniente de animais mortos, da agregação de partículas, ou da floculação de substâncias orgânicas, tipo coloides.

A interface matéria orgânica dissolvida/matéria orgânica particulada sofre processos de neoformação, dando origem à matéria orgânica particulada. As mudanças relacionadas à possibilidade de agregação da matéria orgânica, segundo diversos processos, são múltiplas, como: micro-variações de pH; atividade de desaminação via bactérias; e outros processos. Pode-se esperar que a água do mar filtrada permaneça isenta de partículas somente por algumas horas (Braga, 2002).

Como visão final, pode-se verificar a diversidades de componentes presentes na água do mar e os processos que eles estão envolvidos. Assim, além da própria água e dos sais existentes dissolvidos, muitos outros componentes estão presentes no corpo de água, até mesmo açúcares. Materiais dissolvidos e particulados, inorgânicos, vivos, não vivos, gases e mesmo elementos e materiais artificiais estão lá ou chegam lá, podendo permanecer intactos ou interarir com o meio, se reciclando, ou impactando os organismos.

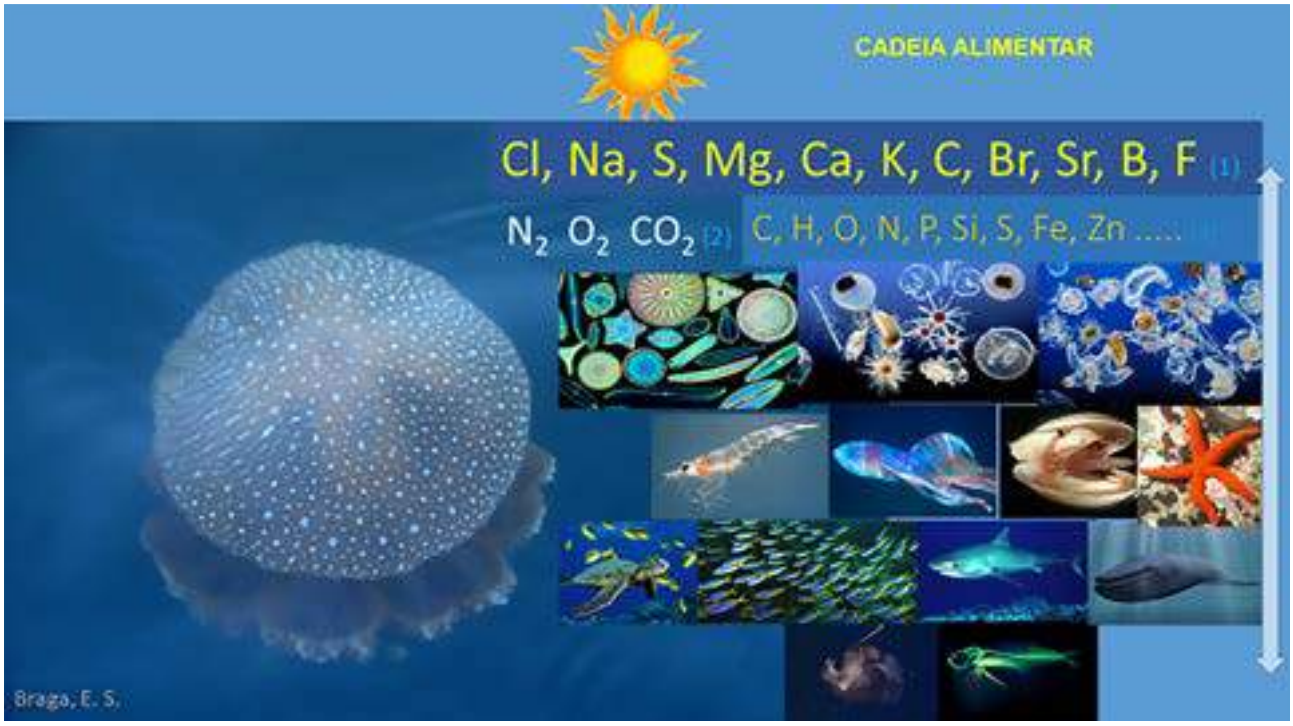



**FIGURA 24.** Figura síntese.

## 9. Conclusão

Na água do mar existem componentes inorgânicos, "sais", que são classificados como constituintes maiores, por estarem em maiores quantidades. Dentre eles, o carbono "C" tem grande importância na constituição da matéria orgânica viva, feita pelos produtores primários, no primeiro nível da cadeia alimentar, com auxílio da energia luminosa captada pelo processo de fotossíntese. Parte do carbono existente na água do mar vem das interações gasosas com a atmosfera e do equilíbrio gás carbônico-carbonato-bicarbonato, que acaba também estando envolvido no pH da água do mar.

A água do mar tem uma característica de solução tampão e apresenta um pH em torno de 8, quando considerada uma salinidade média de 35. Do processo de fotossíntese, o gás oxigênio é gerado e acaba sendo utilizado na respiração e nos processos de decomposição (oxidação da matéria orgânica).

Além do carbono, outros elementos são necessários para composição da matéria viva, como o fósforo, o nitrogênio e o silício, este último no caso de alguns organismos do fitoplâncton marinho. Esses elementos são chamados de nutrientes principais e se encontram no grupo dos constituintes menores.

Na composição da matéria orgânica existem alguns outros átomos que são necessários em pequenas quantidades e que integram o grupo dos micronutrientes. Esses elementos, juntamente com nutrientes, luz e temperatura, podem atuar como limitantes da produção primária marinha.

Outros elementos pertencentes ao grupo dos elementos traço, os quais se encontram em quantidades muito pequenas e que não possuem função biológica positivas, podem se tornar tóxicos, caso suas concentrações aumentem e os organismos acabem realizando uma bioconcentração dos mesmos.

As matérias inorgânicas e orgânicas se alternam no meio marinho, realizando ciclos biogeoquímicos, que atendem o enunciado de Lavoisier onde: "*na natureza, nada se cria, nada perde, tudo se transforma*".

## Referências bibliográficas

BRAGA, E. S., 2002. Bioquímica Marinha e efeitos da poluição nos processos bioquímicos. 2ª edição  Fundespa, São Paulo, 108pp;

CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambientes), 2005. Resolução 357, de 17 de março de 2005. Publicada no DOU nº 053, de 18/03/2005, págs. 58-63.

GARRISON, T. 2017. Fundamentos de Oceanografia. Tradução da 7ª edição norte-americana, Cengage learning 451pp.

PINET, P. R., 1999. Invitation to Oceanography. 2nd edition, USA. 555pp.

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 16*

# CARBONO ORGÂNICO E MATÉRIA ORGÂNICA NA COLUNA DE ÁGUA NOS OCEANOS

*Rafael André Lourenço & Márcia Caruso Bícego*

CITAÇÃO SUGERIDA: LOURENÇO, Rafael André; BÍCEGO, Márcia Caruso. Carbono orgânico e matéria orgânica na coluna de água nos oceanos. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 16: p. 345-353.

# Carbono Orgânico e Matéria Orgânica na Coluna de Água nos Oceanos

*Rafael André Lourenço & Márcia Caruso Bícego*

## 1. Introdução

A matéria orgânica é formada por um conjunto de compostos químicos orgânicos e exerce uma importante função na natureza, pois serve como fonte de alimento para organismos vivos e como elo de ligação entre diversos ciclos biogeoquímicos. A matéria orgânica pode transitar entre ambientes terrestres e aquáticos e passa por processos de degradação e reciclagem no ambiente, processos esses promovidos principalmente por microrganismos (Roth *et al.*, 2019).

A matéria orgânica (MO) é constituída principalmente por átomos de carbono, que representam entre 45 e 55% de sua massa total, além de outros elementos como oxigênio, hidrogênio, nitrogênio, fósforo, enxofre, potássio e outros constituintes menores (Tab. 1) (Cabaniss *et al.* 2005).

**TABELA 1.** Principais constituintes da Matéria Orgânica.

| Elemento | Massa (% da MO) |
|---|---|
| Carbono | 45 a 55 |
| Oxigênio | 35 a 45 |
| Hidrogênio | 3 a 5 |
| Nitrogênio | 1 a 4 |
| Outros | < 2 |

A massa total de carbono na Terra é estimada em $7{,}5 \times 10^7$ Gt ($1\ \text{Gt} = 10^{12}$ kg). Aproximadamente 99% desse total está armazenado em rochas sedimentares, restando apenas cerca de 1% para os demais compartimentos do planeta (Berner, 1982, Hedges *et al.*, 1997) (Fig. 1).

O ciclo do carbono contido nas rochas sedimentares é muito lento, da ordem de milhões ou bilhões de anos, portanto esse carbono se encontra imobilizado e praticamente indisponível para ciclagem (Suarez *et al.*, 2019). Cerca de 80% do carbono contido nas rochas sedimentares corresponde a carbono inorgânico. O restante, 20%, está na forma de carbono orgânico (Lee *et al.*, 2019).

A maior parte do carbono orgânico armazenado nas rochas sedimentares corresponde ao material chamado de querogênio, que é o material resultante das transformações geoquímicas da matéria orgânica. É a partir de transformações naturais do querogênio que são gerados o petróleo, o carvão e o gás natural.

A maior parte do carbono que não está armazenado nas rochas sedimentares, está na forma inorgânica, na atmosfera ou nas águas dos oceanos.

As águas dos oceanos armazenam cerca de 37.000 Gt de carbono na forma de íon bicarbonato ($HCO_3^-$) e cerca de 1.300 Gt de carbono na forma de íon carbonato ($CO_3^{-2}$). Há ainda 740 Gt de carbono que se encontram como gás carbônico ($CO_2$) dissolvido nos oceanos. Nos sedimentos marinhos, 2.500 Gt de carbono estão armazenadas na forma de carbonato precipitado (Lee *et al.*, 2019).

A atmosfera contém cerca de 770 Gt de carbono inorgânico, a maior parte na forma de $CO_2$ (760 Gt) e na forma de metano (10 Gt) (Olson *et al.* (1985).

Em relação ao carbono orgânico disponível para ciclagem, quase 2/3 residem nos continentes e estão armazenados principalmente em solos húmicos (1.550 Gt) e na biomassa terrestre (1.050 Gt). Nos oceanos, a maior parte do carbono orgânico disponível encontra-se na água na forma de carbono orgânico dissolvido (COD), cerca de 680 Gt, ou na forma de carbono orgânico particulado (COP), cerca de 20 Gt. Os sedimentos marinhos recentes armazenam cerca de 150 Gt de COP. Já a biota marinha compreende apenas cerca de 3 Gt de carbono orgânico (Hedges *et al.*, 1997, Houghton, 2007).

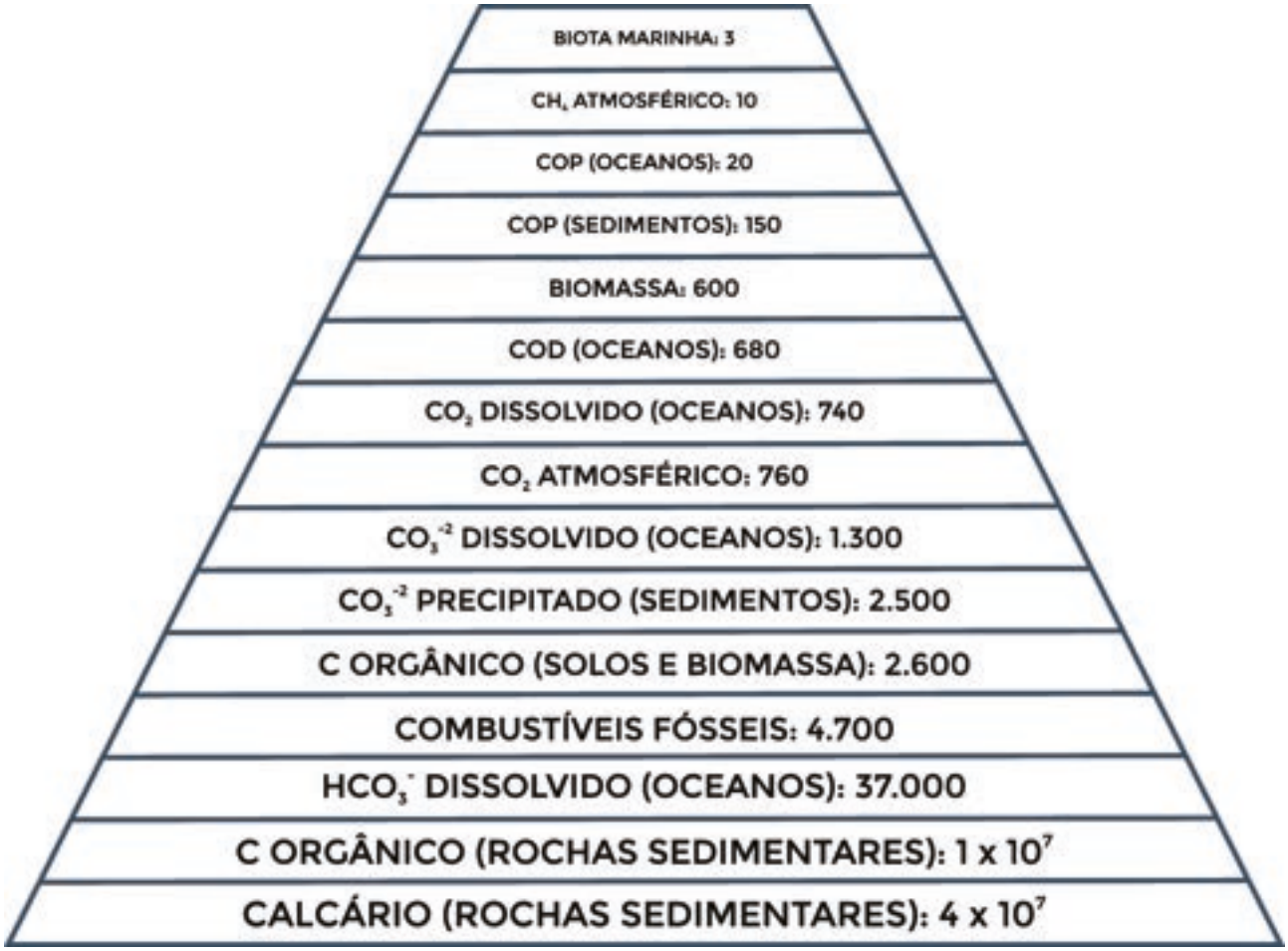



**FIGURA 1.** **Reservatórios e estoques de carbono na Terra. Quantidades em giga toneladas. (COP = Carbono Orgânico Dissolvido, COP = Carbono Orgânico Particulado).** *Hedges, 1997, Houghton, 2007.*

Dessa forma, de todo o carbono orgânico existente no planeta, apenas a pequena fração que não se encontra armazenado em rochas sedimentares participa do ciclo global do carbono.

Atualmente os fluxos naturais de carbono estão cada vez mais difíceis de serem distinguidos e identificados, uma vez que a redistribuição do carbono armazenado em combustíveis fósseis como petróleo, carvão e gás natural tem influenciado o ciclo global de carbono, alterando os fluxos e os reservatórios desse elemento (Houghton, 2007).

## 2. Decifrando o carbono orgânico nos oceanos

A maior parte do carbono orgânico reativo presente nos oceanos, ou seja, que não se encontra sequestrado em rochas sedimentares, é encontrada na coluna de água na forma dissolvida, cerca de 97% do total, ou na forma particulada, 3% do total (Berner, 1982, Hedges *et al.*, 1997).

O carbono orgânico dissolvido encontra-se principalmente na forma de proteínas, aminoácidos, carboidratos, ácidos graxos, hidrocarbonetos, esteróis, aminas, amidas, ésteres, aldeídos, cetonas, ácidos húmicos e ácidos fúlvicos, além de vírus e bactérias menores (Mannino & Harvey, 2000). A forma particulada de carbono orgânico inclui fito e zooplâncton, pólen e a maior parte das bactérias.

De forma prática, a diferenciação entre o material dissolvido e material particulado tem por base a retenção do material particulado em membranas com poros de 0,45 a 1 µm. Por uma definição prática o material dissolvido é aquele que é capaz de atravessar as membranas com essa porosidade enquanto que o material particulado é o material que fica retido. (Fig. 2). Portanto, todos os organismos vivos, com exceção de vírus e bactérias menores, são classificados como fração particulada (Chester, 1990). Em geral, quanto menor é o composto ou partícula dissolvida, maior é a sua concentração nos oceanos (Harvey, 2006) (Fig. 3).

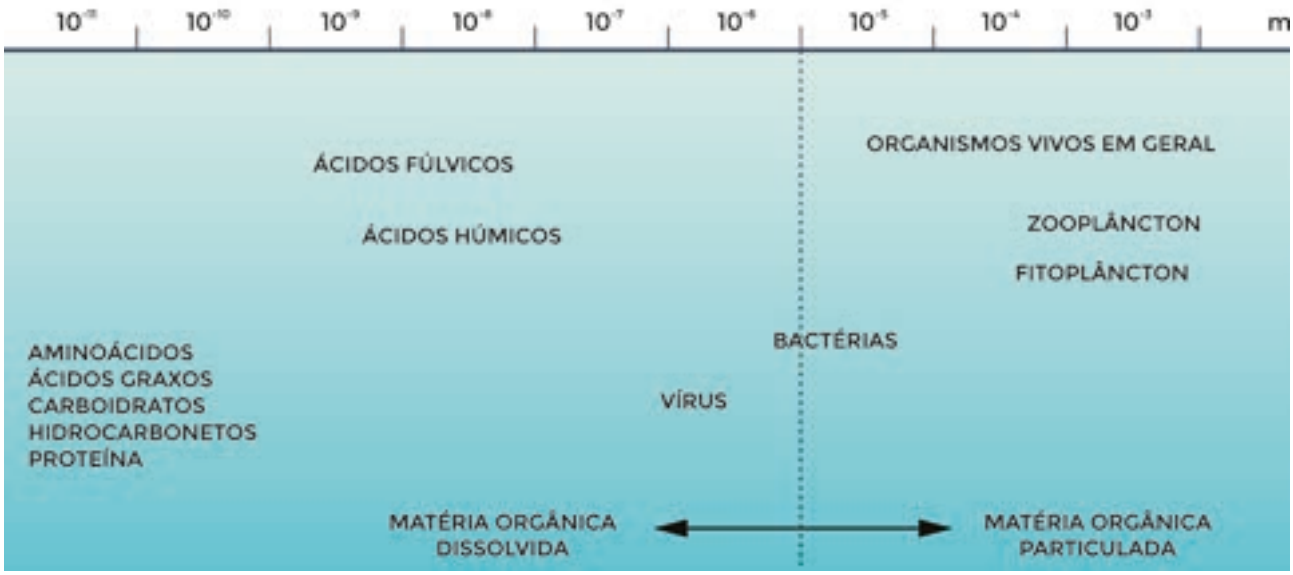



**FIGURA 2.** Diferenciação entre matéria orgânica particulada e matéria orgânica dissolvida pelo tamanho da molécula ou partícula (Chester, 1990).

**FIGURA 3.** Variação da quantidade de moléculas ou partículas com o seu tamanho (Harvey, 2006).

A principal fonte de carbono orgânico dissolvido nos oceanos é a produtividade primária marinha, que é o carbono orgânico produzido através da fotossíntese por fito e zooplâncton, além de vírus e bactérias marinhas. Dessa forma os oceanos são importantes sorvedouros de $CO_2$ atmosférico. Estima-se que de 10 a 20 % de todo o carbono inorgânico retirado da atmosfera pelo processo fotossintético em ambientes marinhos sejam fixados nos oceanos na forma orgânica (carboidratos, ácidos glicólicos, lipídeos, fosfatos orgânicos, enzimas, vitaminas, hormônios, etc.). Outras importantes fontes de carbono orgânico dissolvido nos oceanos são pelotas fecais, decomposição de organismos e autólise da matéria orgânica (Harvey, 2006; Houghton, 2007).

As fontes externas, ou alóctones, de carbono orgânico para os oceanos, como rios, transporte atmosférico e drenagem continental, apesar de significativamente menores do que as fontes locais, ou autóctones, representam também importantes fontes de COD para os oceanos (Hedges, 1997).

A concentração média de carbono orgânico dissolvidos nos oceanos varia entre 0,3 e 3 $mg \cdot L^{-1}$, contudo em regiões costeiras a concentração pode alcançar cerca de 20 $mg \cdot L^{-1}$. As maiores concentrações de COD são encontradas na zona fótica, ou seja onde ocorre a fotossíntese. Em águas mais profundas, a concentração de COD representa cerca da metade daquela encontrada em águas superficiais (Carlson & Hansell, 2015).

## 3. Carbono orgânico dissolvido

O carbono orgânico dissolvido é maior fração de carbono orgânico presente na água do mar, cerca de 680 Gt. A matéria orgânica dissolvida marinha é uma mistura complexa de moléculas orgânicas de origens diversas encontradas na água do mar em todos os oceanos da Terra. Apesar das concentrações individuais das moléculas orgânicas serem baixas, há dezenas de milhares de moléculas diferentes. Dessa forma, dado o grande volume de água, os oceanos são importantes reservatórios globais de matéria orgânica dissolvida (Hedges *et al.*, 1997).

A maior parte da matéria orgânica dissolvida na água do mar é proveniente da produção primária autóctone, principalmente na zona fótica e em regiões costeiras. Os principais mecanismos de produção e liberação de matéria orgânica dissolvida nos oceanos incluem os compostos orgânicos produzidos e liberados por fito e zooplâncton, vírus e bactérias. Entre esses compostos liberados na forma dissolvida encontram-se os carboidratos, polissacarídeos, ácidos glicólicos, lipídios, fosfatos orgânicos, enzimas, vitaminas, aminoácidos, hormônios, ureia, ácido úrico, purina, entre outros (Harvey, 2006, Carlson & Hansell, 2015).

Uma vez que a maior parte da matéria orgânica tem origem na produção primária, são observadas também variações sazonais nas concentrações da matéria orgânica dissolvida. Em períodos de verão a produtividade primária é aumentada devido à maior incidência da luz solar, o que gera um aumento na quantidade de matéria orgânica dissolvida. Em períodos de inverno a produção primária é inibida pelo menor período de luminosidade, o que resulta em uma menor concentração de matéria orgânica nas águas.

Pelo mesmo motivo, ou seja, pela maior ou menor incidência solar, os oceanos em regiões tropicais e subtropicais apresentam concentrações maiores de matéria orgânica dissolvida do que oceanos em regiões polares ou subpolares.

Muitos dos compostos orgânicos liberados na água do mar são degradados na coluna de água pela ação bacteriana, por enzimas, ou por fotólise, contudo parte dessa matéria orgânica é resistente aos processos biológicos e à degradação fotoquímica e pode se depositar no sedimento marinho sem sofrer alteração (Harvey, 2006).

Uma vez que a maior produção de COD ocorre na região fótica e que parte desses compostos são degradados ao longo da coluna de água, a concentração de COD no fundo dos oceanos é cerca de metade da concentração encontrada na superfície (Fig. 4).

Hansell *et al*. (2012) fez uma distinção em 5 frações de carbono orgânico dissolvido com base no tempo de ciclagem, ou de residência dos compostos orgânicos, são elas: **Lábil**, **Semi-Lábil**, **Semi-Refratário**, **Refratário** e **Ultra-Refratário**. As características dessas frações são apresentadas a seguir.

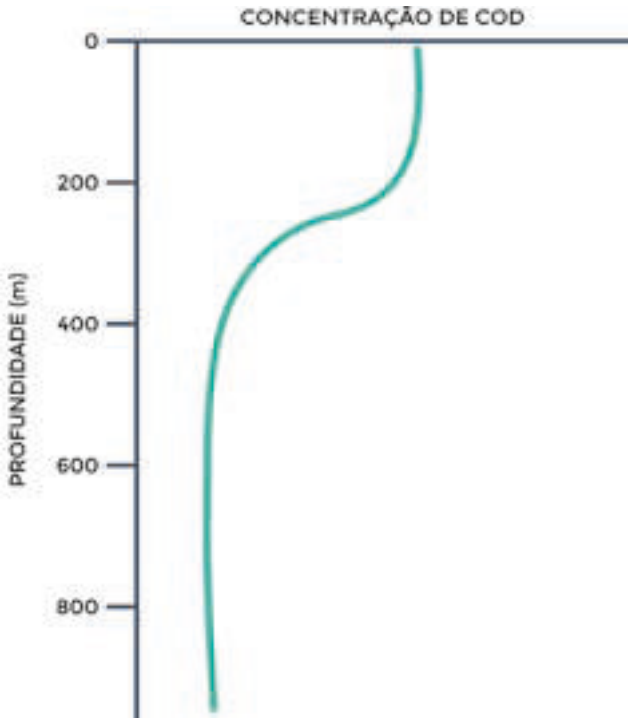



**FIGURA 4.** Perfil vertical da variação de carbono orgânico dissolvido com a profundidade oceânica (Harvey, 2006).

***COD Lábil:*** Representa de 30 a 90% de todo carbono orgânico produzido a partir da fotossíntese. São compostos que não se acumulam nos oceanos por serem rapidamente intemperizados. Esses compostos permanecem no ambiente por um período curto de horas ou dias. O COD lábil fornece um suporte autóctone para o ciclo microbiótico na zona fótica.

***COD Semi-Lábil:*** São compostos que também alimentam o ciclo micróbiotico na zona fótica. Por serem mais resistentes a degradação do que a fração lábil, esses compostos são exportados verticalmente na coluna de água (1,5 Gt de C/ano) e correspondem a fração mais importante da matéria orgânica para a bomba biológica, ou seja, para a incorporação e armazenamento de carbono no oceano profundo através de processos biológicos (fotossíntese, respiração, alimentação, decomposição e precipitação biogênica de carbonatos). Contudo, por serem pouco refratários, esses compostos possuem um papel limitado no sequestro de carbono, visto que seus produtos de mineralização retornam para a interface ar-água em questão de meses.

***COD Semi-Refratário:*** Representam compostos mais estáveis que os mencionados anteriormente e de importância secundária para a bomba biológica, contudo de muita importância no sequestro de carbono uma vez que os seus produtos de mineralização são redisponibilizados para o ciclo do carbono em um intervalo de décadas ou séculos.

***COD Refratário:*** É representado por compostos bastante estáveis e corresponde a maior porção de carbono ciclável da Terra. Uma vez que o tempo de residência desses compostos é da ordem de séculos a milênios, são importantes sequestrantes de carbono.

***COD Ultra-Refratário:*** São compostos com tempo de residência extremamente altos, representado por uma fração de moléculas orgânicas menos compreendida e menos observadas nos oceanos.

Ainda, em termos de classificação, uma parte da matéria orgânica, ou do carbono orgânico dissolvido, é chamada de cromófora, e corresponde a uma fração do COD.

O carbono orgânico dissolvido cromóforo (CODC) é caracterizado pela sua coloração amarelada e por absorver luz em um largo espectro de comprimento de onda na região do visível e do ultravioleta. A fotossíntese é também regida pela concentração de CODC na água visto que a CODC influencia na penetração da luz na água e, portanto, na extensão da zona fótica (Johannessen *et al*., 2003; Zepp *et al*., 2011).

Por estar onipresente nos oceanos, acredita-se que o CODC seja formado por compostos biologicamente refratários como as substâncias húmicas, ou seja biogeopolímeros onde se agregam pigmentos carotenoides, hidrocarbonetos e polifenóis. São compostos que possuem caráter levemente aromático com maior teor de nitrogênio e maior peso molecular em relação ao COD. Contudo, o CODC é formado por compostos fotorreativos que são rapidamente decompostos quando expostos a luz solar, produzindo carbono inorgânico e compostos orgânicos menores. (Nelson *et al*., 2004; Del Castillo & Coble, 2000; Stedmon & Markager, 2001).

A conservação da assinatura cromófora depende de processos como clareamento ou degradação fotoquímica, mineralização fotoxidante, degradação microbiana e misturas conservativas e não conservativas associadas aos processos citados (Helms *et al*., 2008; Swan *et al*., 2009).

Na zona eufótica o clareamento fotoquímico é mais eficiente e pode ocorrer produção autóctone de matéria orgânica dissolvida menos cromófora. Nestas águas, em função das temperaturas mais elevadas do que em águas de fundo, ocorre também uma maior degradação microbiana. Em águas profundas, com menor radiação solar, menor clareamento fotoquímico e temperaturas mais baixas, é possível que o metabolismo microbiano seja inibido e ocorra uma maior preservação residual de cromóforos orgânicos dissolvidos (Helms *et al*., 2008; Swan *et al*., 2009).

As fontes de CODC nos oceanos incluem zooplânctons, dinoflagelados, macroalgas, além de serem também subprodutos do metabolismo microbiano. Sedimentos costeiros e de plataformas continentais também são fontes de CODC. Pontualmente, manguezais e bancos de algas representam fontes adicionais de CODC, especialmente em áreas costeiras. Do ponto de vista antropogênico, as principais fontes de CODC derivam do lançamento de esgotos domésticos e industriais (Nelson *et al*., 2004).

Nos sistemas marinhos o CODC pode representar de 50 a 70% do total de COD e pode ser usado como ferramenta para a diferenciação de matéria orgânica autóctone e alóctone.

## 4. Carbono orgânico particulado

O carbono orgânico particulado nos oceanos, ou as partículas orgânicas  em suspensão, totalizam cerca de 20 Gt. As principais fontes de COP incluem as pelotas fecais e material não digerido de fitoplâncton associado aos carbonatos e silicatos. Essa associação do COP aos carbonatos e silicatos produz uma "chuva" de partículas que contém entre 20 e 250 mg de COP por metro quadrado do oceano e que afundam na coluna de água de 50 a 200 m por dia. Contudo a maior parte do COP é remineralizado logo nos primeiros 100 m da coluna de água por ação bacteriana e enzimática.

Em oceano aberto estima-se que apenas 1% do COP original alcance 4.000 m de profundidade. A pequena fração de COP que alcança o sedimento pode também ser degradado biologicamente (Yu *et al*., 2001; Lampitt & Antia, 1997; Wakeham & Canuel, 2005).

As principais formas de COP resistentes a remineralização ao longo da coluna de água e mais resistentes a degradação no sedimento incluem as proteínas presentes nas carapaças de invertebrados, que são protegidas pelo invólucro de carbonato, celulose de plantas superiores, que são protegidas pela capa de lignina, lipídios que se encontram encapsulados nos pólens e esporos ou cutículas de folhas (Wakeham & Canuel, 2005).

As maiores concentrações de COP nos oceanos são encontradas em regiões costeiras, onde há uma contribuição alóctone de COP através do carreamento de rios e drenagem continental, e em regiões polares no período de verão, dada a drenagem continental pelo derretimento do gelo polar (Wakeham & Canuel, 2005).

## Referências Bibliográficas

BERNER R.A., 1982. Burial of organic carbon and pyrite sulfur in the modern ocean: its geochemical and environmental significance. American Journal of Science 282, 451-473. https://doi.org/10.2475/ajs.282.4.451

CABANISS S.E., MADEY G., LEFF L., MAURICE P.A., WETZEL R., 2005. A stochastic model for the synthesis and degradation of natural organic matter. Part I. Data structures and reaction kinetics. Biogeochemistry 76, 319–347. https://doi.org/10.1007/s10533-005-6895-z

CARLSON C.A., HANSELL D.A., 2015. DOM sources, sinks, reactivity and budgets. In: Hansell D.A., Carlson C.A. (Eds.), Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter, 2nd ed Academic Press, pp. 65–126. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405940-5.00003-0

CHESTER R., 1990. The transport of materials to the oceans: The river pathway. In: Chester R. (Eds), Marine geochemistry, 1st ed. Springer, pp 14-82. https://doi.org/10.1007/978-94-010-9488-7

DEL CASTILLO C.E., COBLE P.G., 2000. Seasonal variability of the colored dissolved organic matter during the 1994–95 NE and SW Monsoons in the Arabian Sea. Deep-Sea Research Part II 47, 1563–1579. https://doi.org/10.1016/S0967-0645(99)00154-X

HANSELL D.A., CARLSON C.A., SCHLITZER R., 2012. Net removal of major marine dissolved organic carbon fractions in the subsurface ocean. Global Biogeochemical Cycles 26, GB1016, https://doi.org/10.1029/2011GB004069

HARVEY H.R., 2006. Sources and Cycling of Organic Matter in the Marine Water Column. In: Volkman J.K. (Eds), The Handbook of Environmental Chemistry Vol 2. Part N, 1st ed. Springer, pp 1-25. https://doi.org/10.1007/b11682

HEDGES J., KEIL R., BENNER R., 1997. What Happens to Terrestrial Organic Matter in the Ocean? Organic Geochemistry 27, 195–212. https://doi.org/10.1016/S0146-6380(97)00066-1

HELMS J.R., STUBBINS A., RITCHIE J.D., MINOR E.C., KIEBER D.J., MOPPER K., 2008. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter. Limnology and Oceanography 53, 955–969. https://doi.org/10.4319/lo.2008.53.3.0955

HOUGHTON R.A., 2007. Balancing the Global Carbon Budget. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 35, 313-347. https://doi.org/10.1146/annurev.earth.35.031306.140057

JOHANNESSEN S.C., MILLER W.L., CULLEN J.J., 2003. Calculation of UV attenuation and colored dissolved organic matter absorption spectra from measurements of ocean color. Journal of Geophysical Research 108, C9 3301. https://doi.org/10.1029/2000JC000514

LAMPITT R.S., ANTIA A.N., 1997. Particle flux in deep seas: regional characteristics and temporal variability. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers 44, 1377–1403. https://doi.org/10.1016/S0967-0637(97)00020-4

LEE C-TA., JIANG H., DASGUPTA R., TORRES M., 2019. A framework for understanding whole Earth carbon cycling. In: Orcutt B., Daniel I., Dasgupta R. (eds) Deep Carbon: Past to Present. Cambridge University Press, pp 313-357. https://doi.org/10.1017/9781108677950

MANNINO A., HARVEY H.R., 2000. Terrigenous dissolved organic matter along an estuarine gradient and its flux to the coastal ocean. Organic Geochemistry 31, 1611-1625. https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00099-1

NELSON N.B., CARLSON C.A., STEINBERG D.K., 2004. Production of chromophoric dissolved organic matter by Sargasso Sea microbes. Marine Chemistry 89, 273–287. https://doi.org/10.1016/j.marchem.2004.02.017

OLSON J.S., GARRELS R.M. BERNER R.A., ARMENTANO T.V., DYER M.I., TAALON, D.H., 1985. The natural carbon cycle. In: Trabalka J.R. (Eds), Atmospheric carbon dioxide and the global carbon cycle. US Department of Energy, Washington, DC, pp. 175-213.

ROTH V-N., LANGE M., SIMON C., HERTKORN N., BUCHER S., GOODALL T., GRIFFITHS R.I., MELLADO-VÁZQUEZ P.G., MOMMER L., ORAM N.J., WEIGET A., DITTMAR T., GLEIXNER G., 2019. Persistence of dissolved organic matter explained by molecular changes during its passage through soil. Nature Geoscience 12, 755–761. https://doi.org/10.1038/s41561-019-0417-4

STEDMON C.A., MARKAGER S., 2001. The optics of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the Greenland Sea: an algorithm for differentiation between marine and terrestrially derived organic matter. Limnology and Oceanography 46, 2087–2093. https://doi.org/10.4319/lo.2001.46.8.2087

SUAREZ C.A., EDMONDS M., JONES A.P., 2019. Earth Catastrophes and their Impact on the Carbon Cycle. Elements 15, 301-306. https://doi.org/ 10.2138/gselements.15.5.301

SWAN C.M., SIEGEL D.A., NELSON N.B., CARLSON C.A., NASIR E., 2009. Biogeochemical and hydrographic controls on chromophoric dissolved organic matter distribution in the Pacific Ocean. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers 56, 2175–2192. https://doi.org/10.1016/j.dsr.2009.09.002

WAKEHAM S.G., CANUEL E.A., 2005. Degradation and Preservation of Organic Matter in Marine Sediments. In: Volkman J.K. (Eds), The Handbook of Environmental Chemistry Vol 2. Part N, 1st ed. Springer, pp 295–321. https://doi.org/10.1007/b11682

YU E.F., FRANCOINS R., BACON M.P., HONJO S., FLEER A.P., MANGANINI S.J., RUTGERS VAN DER LOEFF M.M., ITTEKOT,V., 2001. Trapping efficiency of bottom-tethered sediment traps estimated from the intercepted fluxes of 230Th and 231Pa. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers 48, 865-889, https://doi.org/10.1016/S0967-0637(00)00067-4

ZEPP R.G., ERICKSON D.J., PAUL N.D., SULZBERGER B., 2011. Effects of solar UV radiation and climate change on biogeochemical cycling: interactions and feedbacks. Photochemical & Photobiological Sciences 10, 261-279. https://doi.org/10.1039/C0PP90037K

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 17*

# POLUIÇÃO ORGÂNICA MARINHA

*Rosalinda Carmela Montone, Márcia Caruso Bícego & Rafael André Lourenço*

CITAÇÃO SUGERIDA: MONTONE, Rosalinda Carmela; BÍCEGO, Márcia Caruso; LOURENÇO, Rafael André. Poluição orgânica marinha. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 17: p. 357-378.

# Poluição Orgânica Marinha

*Rosalinda Carmela Montone,*
*Márcia Caruso Bícego & Rafael André Lourenço*

## 1. Introdução

Os oceanos ocupam praticamente 71% da superfície terrestre e sempre foram utilizados pelo homem, desde os primórdios, como fonte de alimentos e posteriormente como meio de transporte e fonte de matérias-primas. A mobilização de matérias-primas e energia geram uma enorme quantidade de resíduos, a qual pode ser reciclada ou não, gerando uma grande quantidade de lixo.

Devido à crescente ocupação territorial, os oceanos sempre foram uma opção econômica para os dejetos da nossa civilização industrial, independente do aumento no rigor na legislação ambiental quanto aos critérios para disposição dos resíduos em depósitos específicos em terra ou em cursos de água. O próprio fato dos grandes polos industriais e de concentração humana terem se estabelecido próximos da zona costeira e estuarina levou ao uso indiscriminado dos oceanos como depósito final. Muitas das maiores cidades do planeta estão localizadas em áreas costeiras e 40% da população mundial do planeta vive a 60km da costa (PBMC, 2016). Desta maneira, os oceanos acabam sendo o depósito final dos descartes da nossa civilização e podem causar o que denominamos poluição marinha.

Afinal, o que é poluição marinha? O GESAMP (*Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection*), grupo de peritos sobre os aspectos científicos da poluição marinha da UNESCO, define poluição marinha como, "*a introdução pelo homem, direta ou indiretamente, de substâncias ou energia no ambiente marinho que resultem em efeitos deletérios tais como, danos para os recursos vivos, perigo para a saúde humana, obstáculo para as atividades marinhas incluindo a pesca, diminuição da qualidade da água do mar ou redução das atividades recreativas*".

Assim sendo, as substâncias ou energia constituem o que é chamado poluente, e podemos dizer que poluente é um recurso fora do local adequado. O problema da poluição está associado às características da toxicidade, persistência e bioacumulação das substâncias e as questões de custos sociais e econômicos.

Toxicidade é a capacidade de determinada substância provocar efeitos nocivos em organismos vivos, sendo geralmente proporcional à concentração dessa substância no meio (Frank & Ottoboni. 2011). Persistência é a propriedade ligada ao tempo que a substância leva para se transformar, desaparecer no meio em que se encontra. Daí falarmos em persistência na água, no ar, no solo, nos organismos, etc. Ela é avaliada pela meia-vida, ou seja, o tempo necessário para que 50% da quantidade inicial desapareça.

Bioacumulação é o termo geral que descreve um processo pelo qual substâncias (ou compostos químicos) são absorvidas pelos organismos. O processo pode ocorrer de forma direta, quando as substâncias são assimiladas a partir do meio ambiente (solo, sedimento, água) ou de forma indireta pela ingestão de alimentos que contém essas substâncias. Esses processos frequentemente ocorrem de forma simultânea, em especial em ambientes aquáticos.

Neste capítulo serão abordados os principais grupos de compostos orgânicos potencialmente danosos para o ambiente marinho e cujos problemas críticos já foram identificados: **esgotos domésticos; petróleo e derivados; poluentes orgânicos persistentes**; e **plásticos**.

## 2. Esgotos domésticos

Constituem o maior problema a nível global, seja pelo volume de material despejado, seja devido aos problemas concretos de saúde pública que causam (Weber, 1992). O esgoto doméstico consiste em uma mistura complexa de dejetos humanos, água e compostos químicos derivados de produtos de uso doméstico e/ou industrial (Kennish, 1997). Um litro de água de esgoto pode conter bilhões de bactérias, podendo tanto ser ingeridas pelo homem como absorvidas pela pele (Tommasi, 2009).

As principais doenças para o homem por águas contaminadas vinda principalmente das fezes humanas são a cólera, a febre tifóide e a hepatite virótica, entre outras listadas na Tabela 1. Além das fezes humanas, restos de alimentos, sabões e detergentes também são constituintes comuns do esgoto. Muitos poluentes como hidrocarbonetos do petróleo e metais pesados, tornam-se constituintes comuns no esgoto devido a sua facilidade para adsorção na matéria orgânica particulada (Kennish, 1997).

**TABELA 1.** Principais doenças causadas por microrganismos presentes no esgoto. *Fonte: Kennish, 1997.*

| Agente etiológico | Doença associada |
|---|---|
| *Salmonella typhi* | Febre tifóide |
| *Salmonella paratyphi* | Febre paratifóide |
| *Entamoeba histolytica* | Disentería |
| *Vibrio cholerae* | Cólera |
| *Bacillus anthracis* | Anthrax |
| *poliovírus* | Poliomielite |
| *Mycobacterium tuberculosis* | Tuberculose |
| *Leptospira icterohaemorrhagiae* | Leptospirose |

As fontes de esgoto para o ambiente marinho podem ser pontuais ou não pontuais, incluindo efluentes municipais e industriais, drenagens urbanas e agrícolas, materiais dragados e lodo de esgoto doméstico. A grande parte das descargas de esgoto em regiões costeiras é feita por córregos e canais que têm como destino final as praias (CETESB, 1996).

Os esgotos não tratados são responsáveis pela introdução de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo para os rios, estuários e zonas costeiras. As concentrações típicas de compostos presentes nos esgotos são apresentadas na Tabela 2. O nitrogênio e o fósforo orgânicos contidos no material fecal humano e nos restos de matéria orgânica lançados ao mar são normalmente reciclados pelas bactérias para as suas formas inorgânicas.

**TABELA 2.** Concentrações típicas de compostos nos esgotos. *Fonte: Metcalf & Eddy (1991).*

| | Unidade | Fraco | Médio | Forte |
|---|---|---|---|---|
| Sólidos Totais | $mg \cdot L^{-1}$ | 350 | 720 | 1200 |
| Sólidos Dissolvidos Totais | $mg \cdot L^{-1}$ | 250 | 500 | 850 |
| Compostos Voláteis | $mg \cdot L^{-1}$ | 105 | 200 | 325 |
| Sólidos Suspensos | $mg \cdot L^{-1}$ | 100 | 220 | 350 |
| Sólidos Fixos | $mg \cdot L^{-1}$ | 20 | 55 | 75 |
| Sólidos Voláteis | $mg \cdot L^{-1}$ | 80 | 165 | 275 |
| Sólidos Fixáveis | $mg \cdot L^{-1}$ | 5 | 10 | 20 |
| $DBO_5$ a 20°C | $mg \cdot L^{-1}$ | 110 | 220 | 400 |
| Carbono Orgânico Total | $mg \cdot L^{-1}$ | 80 | 160 | 290 |
| DQO | $mg \cdot L^{-1}$ | 250 | 500 | 1000 |
| Nitrogênio Total | $mg \cdot L^{-1}$ | 20 | 40 | 85 |
| Nitrogênio Orgânico | $mg \cdot L^{-1}$ | 8 | 15 | 35 |
| Amônia Livre | $mg \cdot L^{-1}$ | 12 | 25 | 50 |
| Nitritos | $mg \cdot L^{-1}$ | 0 | 0 | 0 |
| Nitratos | $mg \cdot L^{-1}$ | 0 | 0 | 0 |
| Fósforo Total | $mg \cdot L^{-1}$ | 4 | 8 | 15 |
| Fósforo Orgânico | $mg \cdot L^{-1}$ | 1 | 3 | 5 |
| Fósforo Inorgânico | $mg \cdot L^{-1}$ | 3 | 5 | 10 |
| Cloretos | $mg \cdot L^{-1}$ | 30 | 50 | 100 |
| Sulfatos | $mg \cdot L^{-1}$ | 20 | 30 | 50 |
| Alcalinidade | $mg \cdot L^{-1}$ | 50 | 100 | 200 |
| Graxas | $mg \cdot L^{-1}$ | 50 | 100 | 150 |
| Coliformes Totais | UFC 100<br>$mg \cdot L^{-1}$ | $10^6 - 10^7$ | $10^7 - 10^8$ | $10^8 - 10^9$ |
| Compostos Orgânicos Voláteis | $mg \cdot L^{-1}$ | < 100 | 100 - 400 | > 400 |

Esta introdução pontual de nitrogênio e fósforo em baías, lagunas ou ambientes costeiros de baixa circulação, pode levar a um crescimento exponencial das algas planctônicas (**eutrofização**), o qual por sua vez reduz drasticamente o conteúdo do oxigênio dissolvido.

O aumento de fertilizantes à base de nitrogênio e fósforo ou detritos de animais na agricultura tem sido apontado como um grande fator de eutrofização de ambientes aquáticos. A eutrofização acentuada pode levar ainda a uma redução da diversidade de espécies, a tal ponto que apenas algumas espécies de algas passarão a existir no ecossistema.

Outro problema associado à eutrofização é a "**maré vermelha**" devido à proliferação da microalga *Gymnodinium sanguineum*. Esse fenômeno é causado por condições especiais de descarga de esgoto, temperatura da água do mar elevada e presença de chuvas (Tommasi, 2009).

A "maré vermelha" é um fenômeno natural que provoca manchas de coloração escura na água do mar. Essas manchas são causadas pelo crescimento excessivo de algas microscópicas presentes no plâncton marinho, num processo chamado de floração. Dependendo da espécie de alga, a mancha pode adquirir coloração vermelha, marrom, laranja, roxa ou amarela. Uma vez que a água nem sempre fica vermelha, o termo "maré vermelha" vem sendo substituído por "**floração de algas nocivas**".

No Brasil, um grande evento de "maré vermelha" ocorreu na Baía de Todos os Santos, Bahia, em 2007, o qual provocou a morte de cerca de 50 toneladas de mariscos e peixes, representando uma ameaça às atividades econômicas da população local.

Outros registros na mídia incluem a Baía sul de Florianópolis, Santa Catarina (2008), Praia de Ponta Negra, Rio Grande do Norte (2008) e Praia de Piratininga, Rio de Janeiro (2011) também atingidas por floração de algas nocivas (Castro & Moser, 2012). Para resolver o problema da poluição por esgotos têm sido adotados os sistemas de tratamento de esgotos e os emissários submarinos.

## 2.1 Manejo do esgoto

No Brasil apenas 38% dos esgotos recebem algum tipo de tratamento antes de serem lançados em corpos receptores (Instituto Trata Brasil, 2021)[1]. As principais formas de manejo do esgoto se dão ou através das Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) ou através dos Emissários Submarinos.

As estações de tratamento de esgoto envolvem 4 etapas. A primeira é chamada de tratamento preliminar, onde o esgoto passa por um gradeamento e um desarenador, e tem por finalidade a remoção de areia e sólidos grosseiros. A segunda etapa, chamada de tratamento primário, tem como finalidade a remoção de sólidos sedimentáveis, para isso são adicionados floculantes que promovem o agregamento e a sedimentação de sólidos suspensos no decantador da ETE. Após a remoção dos sólidos sedimentáveis, o esgoto segue para a terceira etapa do tratamento, chamada de tratamento secundário, que visa a redução da carga de matéria orgânica e da demanda bioquímica de oxigênio. Nesse processo o esgoto passa por lodo ativado ou biofilmes, que tem a capacidade de absorver e reter a matéria orgânica. O esgoto que sai desse processo segue então para tanques de estabilização, que é o tratamento terciário, onde há incidência de luz ultravioleta, que pode ser natural (solar) ou artificial, e dessa forma ocorre a redução de micro-organismos patogênicos. O esgoto tratado é então lançado em um corpo hídrico receptor.

Os Emissários Submarinos são precedidos por uma Estação de Pré-Condicionamento de Esgoto (EPC). Nesse sistema, os esgotos municipais ou industriais são interceptados em uma estação elevatória que bombeia o esgoto para a EPC. Após chegar a EPC o esgoto passa por um tratamento primário, ou seja, gradeamento e desarenador, e segue então, por gravidade, para a tubulação do emissário submarino.

Na maior parte dos emissários submarinos existentes no mundo o tratamento primário é o único tratamento dado ao esgoto antes de seu lançamento no mar. O emissário submarino é uma canalização que transporta os efluentes desde a EPC até seu destino final, o mar. É constituído de uma parte terrestre e outra oceânica ficando, esta última, assentada no assoalho marinho onde é ancorada. Na porção final do emissário são dispostos vários orifícios que constituem a chamada tubulação difusora, através da qual o efluente é lançado nas águas marinhas. Esse lançamento difuso do efluente maximiza a dispersão da pluma, a diluição dos compostos, a degradação bacteriana dos compostos orgânicos, a evaporação de compostos voláteis e o intemperismo.

[1] Para saber mais, acesse: <http://www.tratabrasil.org.br>.

A redução de bactérias lançadas via emissário submarino no ambiente marinho é governada principalmente pela ação conjunta da salinidade, temperatura e radiação solar, sendo este último o principal fator influente na degradação bacteriana (Chamberlim & Mitchell,1978). As condições e padrões necessários para o lançamento de esgotos sanitários, seja os tratados na ETE seja aqueles lançados via emissários submarinos, são descritos na Resolução CONAMA 430/11.

No Brasil existem 20 emissários submarinos de esgoto doméstico, contudo a distribuição não é homogênea ao longo da costa brasileira. Desse total, 13 emissários estão localizados em São Paulo (8 emissários) e Rio de Janeiro (5 emissários).

Tommasi (1982) já apontava a poluição fecal como uma das formas mais generalizada de poluição no litoral brasileiro e o quadro não é muito diferente nos dias atuais. O tratamento de esgoto é sem dúvida fundamental para a qualidade das águas, tanto que em 2008 foi declarado pela ONU o Ano Internacional do Saneamento Básico. A avaliação da poluição por esgotos é de importância crucial seja por questões de saúde pública, estética ou razões ecológicas.

Os coliformes totais e fecais são o grupo de organismos tradicionalmente utilizado para o monitoramento da qualidade sanitária da água (CONAMA, 2000). Entretanto, a correlação com microrganismos patogênicos de ambientes marinhos costeiros ainda é questionada. Assim, há necessidade da análise de outros indicadores como *Enterococcus* sp., a qual foi recomendada na revisão da Resolução 20 do CONAMA em 2000 para verificar a balneabilidade das praias. Numa análise bacteriológica, a água é considerada de boa qualidade se apresentar menos de 10 bactérias do tipo coliforme por litro de água e menos de 1000 bactérias de outros tipos, não patogênicas.

Além desses indicadores biológicos podem ser usados os indicadores químicos como os esteróides (coprostanol e seus isômeros) e surfactantes de uso doméstico como os alquilbenzenos lineares (LABs). Entretanto, a análise rotineira desses indicadores químicos é cara e demorada.

## 3. Petróleo e derivados

A partir da intensificação do uso do petróleo iniciou-se um aporte de contaminação para o meio marinho a partir de diversas fontes. As fontes de compostos do petróleo para o ambiente podem ser naturais e/ou provenientes das atividades humanas.

A quantidade de petróleo e derivados que entra no ambiente marinho através de todas as fontes foi estimada em 2,35 milhões de toneladas por ano. Essas fontes incluem acidentes com grandes petroleiros e outros navios, ruptura de oleodutos, descargas crônicas de operações em refinarias, portos e plataformas de petróleo, dejetos urbanos e industriais e transporte atmosférico, além de exsudações naturais (GESAMP, 2002).

Embora a maior contribuição seja de origem crônica principalmente de origem terrestre, através de esgotos urbanos e industriais (Fig. 1), acidentes com navios petroleiros e plataformas de petróleo têm merecido destaque nas últimas décadas, principalmente devido aos impactos ambientais causados pelos grandes volumes de óleo lançados ao mar. Os hidrocarbonetos presentes no petróleo são caracterizados por sua estrutura, dividindo-se em hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos. Em média, o petróleo contém cerca de 80% de hidrocarbonetos e 15% de compostos aromáticos (Neff, 1979; Clark & Brown, 1977).

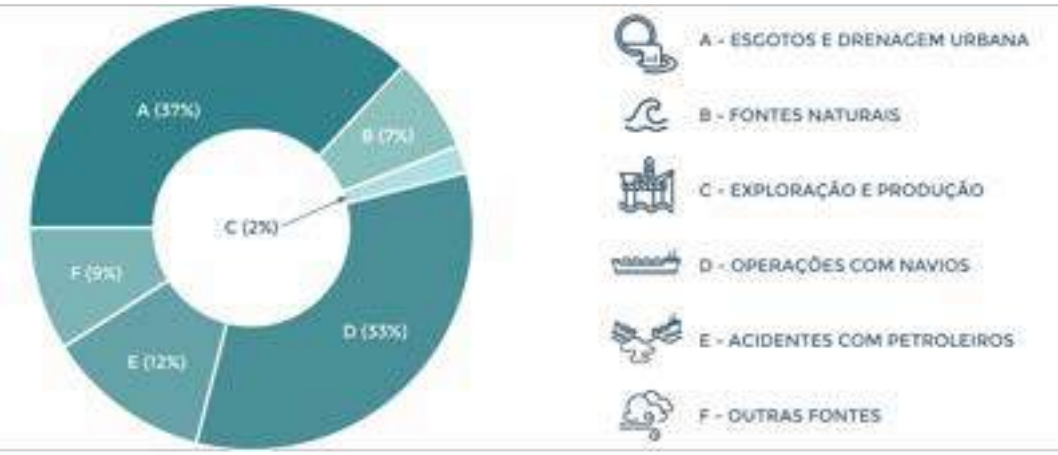



**FIGURA 1.** Principais fontes de hidrocarbonetos para o ambiente marinho. *Fonte: ITOPF, 1987.*

O restante é formado por compostos contendo outros elementos como enxofre, nitrogênio e oxigênio. O petróleo também pode conter metais como níquel, vanádio, cromo e ferro. (UNEP, 1992).

Os hidrocarbonetos alifáticos saturados presentes no petróleo podem ser de cadeia normal (parafinas), ramificada (isoprenóides) ou cíclica (naftenos). Os alcanos normais (n-alcanos), são, de forma geral, os compostos mais abundantes no petróleo e podem conter quantidades de carbono que variam de 1 a 78 átomos em alguns tipos de petróleo (NRC,1985). O grupo mais importante dos alcanos ramificados são os isoprenóides, tendo o pristano e o fitano, 19 e 20 átomos de carbono, respectivamente (Volkman *et al.*, 1992). Os nacanos presentes no petróleo normalmente apresentam uma distribuição homogênea, não havendo predominância para compostos com número par ou ímpar de carbonos (NRC, 1985).

Os hidrocarbonetos aromáticos possuem um ou mais anéis benzênicos. O grupo benzênico é muito estável e persistente no ambiente, podendo ter efeitos tóxicos para os organismos (NRC, 1985). Os compostos monoaromáticos possuem apenas um anel benzênico e são os mais voláteis encontrados no petróleo. São chamados BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno) e são muito abundantes em óleos leves (NRC, 2003).

Os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) contêm pelo menos dois anéis benzênicos condensados e representam em média 7% da composição de um óleo cru (NRC, 2003). Outros compostos aromáticos, que não são considerados hidrocarbonetos pois apresentam em sua estrutura alguns elementos como enxofre, nitrogênio e oxigênio, ocorrem nos petróleos e como são detectados pelas mesmas técnicas analíticas que os HPAs, são normalmente discutidos em conjunto.

Os HPAs podem ser provenientes da introdução direta de petróleo ou derivados, queima incompleta de combustíveis fósseis e processos diagenéticos (NRC, 1985). As diferentes fontes normalmente contêm em geral os mesmos compostos e as diferenças relativas entre alguns deles podem ser usadas como forma de identificação da sua origem.

A abundância dos HPAs no petróleo normalmente decresce com o aumento do peso molecular. Na maioria dos casos os HPAs com 1 a 3 anéis e os dibenzotiofenos compõem cerca de 90% dos hidrocarbonetos aromáticos presentes no petróleo. Os HPAs com 4 a 6 anéis estão presentes em baixas concentrações nos óleos crus (Neff, 1979; NRC,1985). Os HPAs presentes no petróleo geralmente contêm substituintes alquílicos, que como regra geral, são mais abundantes que os HPAs não substituídos (Sportsǫl *et al.*, 1983; Laflamme & Hites, 1978). Segundo Steinhauer & Boehm (1992), a presença de derivados alquilados, particularmente de 2 a 4 anéis, em amostras ambientais indica a introdução de petróleo ou derivados.

A predominância dos HPAs não alquilados sugere fontes pirológicas para esses compostos. Entretanto, estudos cuidadosos devem ser feitos para avaliar corretamente a origem desses compostos. Existem mecanismos naturais que podem modificar a distribuição dos HPAs depois que a mistura é depositada. Um dos mecanismos é a diferença de solubilidade desses compostos na água. Homólogos menos alquilados, incluindo as espécies não substituídas, continuam a ser fracionados na água de forma inversamente proporcional ao seu número de átomos de carbono (Laflamme & Hites, 1978). Tanto a foto-oxidação como a oxidação microbiológica de hidrocarbonetos dissolvidos na água do mar, ocorrem preferencialmente em compostos alquilados (Davies & Tibbets, 1987; Ehrhardt *et al*., 1992). Esses processos também influenciam o destino dos hidrocarbonetos que se depositam nos sedimentos. Os HPAs são mais resistentes à biodegradação microbiológica e bastante estáveis no ambiente. São fortemente adsorvidos nos sedimentos, persistindo por muitos anos no ambiente.

Dentre os hidrocarbonetos, os HPAs são os compostos que apresentam maior toxicidade ao ambiente sendo inclusive considerados potencialmente carcinogênicos ao homem (Neff, 1979; 1985). Segundo GESAMP (1993), há fortes evidências que os HPAs são capazes de causar câncer em peixes e moluscos. Distúrbios no fígado, no sistema imunológico, leucemia, câncer e tumores no pulmão e estômago são alguns dos efeitos reportados destes compostos. Os compostos aromáticos mais solúveis penetram na corrente sanguínea a partir da pele ou da ingestão, podendo ser filtrados pelo sistema excretor e eliminados na urina. Os aromáticos têm potencial capacidade de causar danos nas células sanguíneas, nos tecidos ósseos (medula óssea) e no sistema nervoso. Causam irritações e dermatite na pele, mucosa e olhos (Varanasi *et al*., 1989).

Baseado em suas propriedades e massas moleculares, pode-se distinguir duas classes de HPAs, aqueles com 2 a 3 anéis aromáticos (do naftaleno ao antraceno) e os de 4 a 6 anéis (do fluoran 4. eno ao indeno(1,2,3-cd)pireno). Os primeiros, de baixa massa molecular, apresentam uma significativa toxicidade aguda, enquanto alguns daqueles de massa molecular mais elevada, mostram-se dotados de alto potencial carcinogênico (Neff, 1979; Varanasi *et al*., 1989).

Apesar de sua toxicidade, os HPA são rápida e eficazmente metabolizados por organismos vertebrados. Os vertebrados possuem um desenvolvido sistema de oxigenase de função mista capaz de metabolizar os HPAs, convertendo-os em produtos hidrofílicos que são facilmente excretados pela rota biliar e renal. Dessa forma são esperadas concentrações baixas de HPAs nos tecidos biológicos desses organismos (Helm *et al*., 2015).

## 4. Poluentes orgânicos persistentes

Ao contrário dos hidrocarbonetos, estes compostos não ocorrem naturalmente no ambiente, ou seja, são compostos que foram sintetizados pelo homem.

Os poluentes orgânicos persistentes (POPs) representam um grupo de poluentes que são semivoláteis, bioacumulativos, persistentes e tóxicos (Jones & Voogt, 1999). Esses compostos têm alta estabilidade, a qual está diretamente associada a aspectos negativos de seu comportamento ambiental, ou seja, a resistência à biodegradação. Os POPs são hidrofóbicos (têm baixa solubilidade em água) e lipofílicos (têm alta solubilidade em tecidos adiposos); possuem extrema afinidade por células (membranas lipídicas) e, quando em ambientes aquáticos, tendem a se acumular nos seres vivos e na matéria orgânica.

Esses compostos apresentam bioacumulação em tecidos gordurosos e biomagnificação ao longo de cadeias tróficas, ou seja, os animais de níveis tróficos superiores podem apresentar concentrações muito mais altas que as de organismos que lhes servem de alimento. Ao contrário do observado com os HPAs, os POPs não são metabolizados pelos organismos. Devido a tais características, os POPs possuem grande potencial para causar danos aos organismos e aos ecossistemas, mesmo em baixas concentrações. Os POPs encontram-se disseminados por todo o planeta, sendo transportados por longas distâncias a partir do ponto de origem. De modo geral, apresentam alto dinamismo entre as fases; em temperatura ambiente, a maior parte encontra-se em estado sólido ou líquido, porém são voláteis.

Os POPs incluem substâncias sintéticas pertencentes a diferentes grupos químicos e dentre um grande número, a Convenção de Estocolmo estabeleceu uma lista de 12 POPs prioritários, dos mais persistentes e bioacumuláveis, sendo oito pesticidas (Aldrin, Dieldrin, Endrin, Clordano, Heptacloro, DDT (dicloro-difenil-tricloroetano), Toxafeno e Mirex), dois produtos industriais (bifenilos policlorados (PCBs) e Hexaclorobenzeno (HCB), o qual também tem ação inseticida) e dois resíduos de atividades humanas não intencionais (dioxinas e furanos). Desses compostos serão abordados os bifenilos policlorados (PCBs), DDT, HCB e também o pesticida organoclorado hexaclorociclohexano (HCH) utilizado no Brasil durante várias décadas.

## 4.1 Bifenilos policlorados

Os bifenilos policlorados (PCBs) foram sintetizados pela primeira vez no final do século XIX na Alemanha, mas a produção em escala comercial iniciou-se somente em 1929. Eles formam um grupo de 209 isômeros e congêneres (Fig. 2) teoricamente possíveis através da cloração do grupo bifenil, seguindo nomenclatura estabelecida por Ballschmiter & Zell (1980). As diversas formulações técnicas contêm entre 18% e 79% de cloro (em massa), podendo contabilizar cem ou mais compostos. Tais formulações foram produzidas em vários países do mundo com diferentes denominações, como, Aroclor (Estados Unidos), Clophen (Alemanha), Kanechom e Santotherm (Japão), Phenoclor e Pyralene (França), Genclor e Capitólio (Itália), Soval (ex-URSS) e Delor (ex-Tchecoslováquia) (Kennish, 1997). Os PCBs não chegaram a ser produzidos no Brasil, mas foram importados dos Estados Unidos e comercializados com o nome de Ascarel.

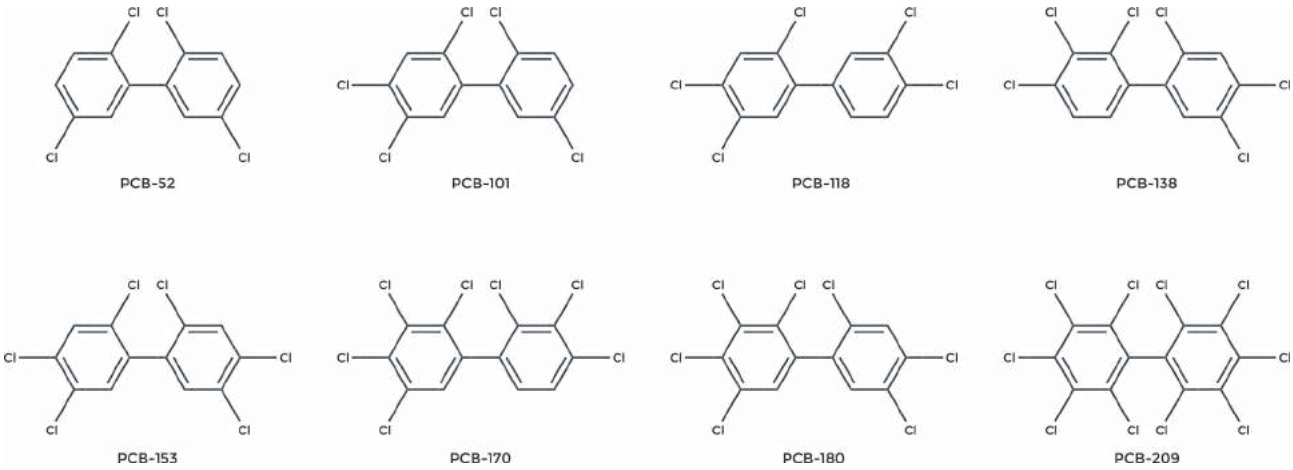



**FIGURA 2.** Estruturas químicas de alguns congêneres e isômeros de bifenil policlorado (PCB).

Entre as principais características dos PCBs podem-se destacar, a grande estabilidade química, alta constante dielétrica e resistência a temperaturas elevadas. Devido a estas propriedades eles foram usados em: transformadores e capacitores, como fluidos isolantes; tintas e vernizes, como plastificantes; borrachas e resinas de poliéster, como retardantes de chama; e aditivos de óleo lubrificante, em máquinas agrícolas. Outro importante uso dos PCBs foi como agente sinergístico para aumentar o período de vida ativa dos inseticidas organoclorados (Penteado & Vaz, 2001).

Embora amplamente utilizados na indústria desde 1929, os PCBs foram detectados em amostras ambientais apenas em 1966, pelo sueco Sören Jensen. Enquanto estudava a ocorrência de DDT em amostras de peixe, o cientista acidentalmente encontrou grandes quantidades de substâncias desconhecidas, que posteriormente foram identificadas como PCBs (Jensen, 1972). Desde então, estes compostos têm sido detectados em todos os compartimentos ambientais, mesmo em áreas onde não há registros de sua utilização, como o Ártico e a Antártica (Tanabe, 1988).

Penteado & Vaz (2001) descrevem inúmeros relatos de acidentes envolvendo PCBs, tanto no exterior quanto no Brasil. Entre eles destaca-se o caso Yusho, ocorrido no Japão em 1968, quando mais de 1.600 pessoas consumiram um óleo de arroz contaminado com esses compostos. Tal episódio marcou o reconhecimento definitivo dos PCBs como contaminantes nocivos ao homem. A repercussão negativa e as consequências sociais e ambientais dos acidentes contribuíram para a proibição do comércio e uso de PCBs em todo o planeta, embora os equipamentos contendo PCBs já instalados continuem sendo usados até o fim de suas vidas úteis.

Estudos realizados por Tanabe (1988) indicavam que a produção mundial acumulada de PCBs era da ordem de 1,2 milhão de toneladas. Deste total, 4% teriam sido degradados ou incinerados, 31% teriam entrado no ambiente e 65% ainda estaria em uso ou armazenado para futuro descarte. Segundo o autor, os níveis de PCB no ambiente, especialmente em áreas remotas, não devem decrescer em um futuro próximo e a problemática da poluição por PCBs está longe de um final, a menos que sejam feitos esforços para reduzir mais descartes na natureza. Em trabalho recente, Breivik *et al.*, 2007 estimaram que um declínio acentuado de PCBs está previsto para 2040-2050, uma vez que a última fábrica pertencente à ex-URSS fechou em 1993.

### 4.2 Pesticidas organoclorados

Os pesticidas organoclorados foram a primeira geração de praguicidas usados pelo homem em larga escala. Devido às suas propriedades inseticidas e grande efeito residual foram extensamente utilizados em todo o mundo como defensivos agrícolas e também em campanhas de saúde pública, principalmente após o início da Segunda Guerra Mundial.

Antes da introdução desses pesticidas, o controle de pragas era feito por compostos inorgânicos à base de cobre e de extratos vegetais como a rotenona e a nicotina (Larini, 1999). Dentre os pesticidas organoclorados amplamente utilizados destacam-se o DDT, HCB e HCH e suas principais características estão sumarizadas na Tabela 3.

O DDT foi sintetizado pela primeira vez em 1874 por Othmar Zeidler, mas somente em 1939 Paul Müller descobriu suas propriedades inseticidas. Pela importância da descoberta e sua posterior aplicação no combate a mosquitos transmissores de doenças, Müller recebeu o Prêmio Nobel de Química em 1948 (Zambrone *et al.*, 1986). O DDT é o inseticida mais conhecido e empregado no mundo e no início, foi considerado um pesticida ideal devido à alta toxicidade para insetos, grande

efeito residual e baixo custo financeiro. Pensou-se até que ele seria capaz de erradicar a malária de todo o planeta (Gladwell, 2001). Porém, com o tempo, os insetos passaram a desenvolver resistência à sua ação e seus impactos negativos no ambiente foram evidenciados.

Diversos países aboliram o uso do DDT a partir da década de 1970, porém, pela Conferência das Nações Unidas de dezembro de 2000, o DDT deixou a lista dos compostos totalmente proibidos, principalmente pela baixa toxicidade aos humanos, para o controle de vetores. Atualmente alguns países ainda fazem uso para controle de vetores transmissores de doenças tropicais como a malária, tifo, dengue e febre amarela. Entre eles encontram-se o México, a Venezuela, Equador e Costa Rica e outros países provenientes da África e Ásia. Dessa maneira, atualmente ainda existe a introdução de DDT nos ecossistemas. O Brasil aboliu seu uso agrícola em 1985, mas continuou sua utilização até 1997 para controle da malária e leishmaniose, sob supervisão da FUNASA (Fundação Nacional de Saúde).

O HCB foi amplamente utilizado como um protetor de sementes para prevenir fungos sobre os grãos, mas o seu uso foi interrompido na maioria dos países na década de 1970. O HCB também foi empregado na manufatura de fogos de artifício, munições e de borracha sintética. Continua a ser liberado para o ambiente principalmente durante a manufatura, combustão ou decomposição de produtos clorados como solventes e PCBs (WHO, 1997).

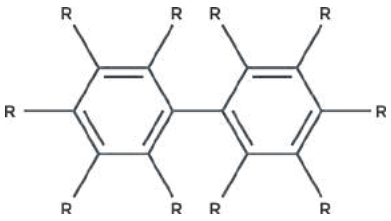
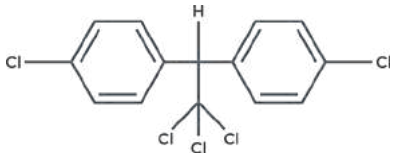
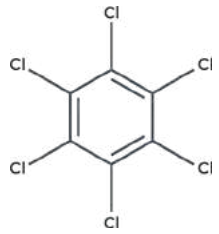
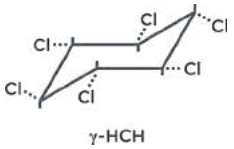
O HCH também erroneamente denominado como BHC (benzeno hexacloro), foi produzido e utilizado na mesma época que o DDT como veneno de contato para insetos. Dos cinco isômeros de HCH somente o gama ($\gamma$), denominado "lindano", e o HCH grau técnico (mistura de isômeros) possuem propriedades inseticidas e foram utilizados para tratamento de sementes e solo, tratamento de animais contra ectoparasitas e na saúde pública para controle de piolhos (WHO, 1991). No Brasil, o HCH foi especificamente usado no tratamento de culturas de café, soja e algodão, bem como no controle da doença de Chagas (Weber & Montone, 1990).

O primeiro alerta dos perigos do uso indiscriminado do DDT e outros pesticidas organoclorados foi dado pela bióloga americana Rachel Carson em seu livro "**Primavera Silenciosa**" publicado em 1962. Entretanto, foi a partir de 1970 que a maioria dos pesticidas organoclorados foram banidos ou tiveram seu uso restrito.

A persistência dos POPs ocorre em função de sua baixa degradação por processos bióticos e abióticos, acarretando em elevada meia-vida no ambiente, que pode chegar a anos ou décadas (Jones & de Voogt, 1999). Devido a sua lipofilicidade, PCBs e pesticidas organoclorados são absorvidos pelos organismos através da alimentação (membrana do trato gastrointestinal), respiração (brânquias e pulmões) e pele. Após a absorção, esses compostos são rapidamente distribuídos para vários tecidos (principalmente aqueles com alto teor de lipídios), estabelecendo-se um fluxo entre estes tecidos e o sangue (Tordoir & van Sittert, 1994). A toxicologia desses contaminantes é altamente complexa e específica para cada composto. Assim, podem existir múltiplas respostas tóxicas dependendo da espécie, sexo e órgãos atingidos (Safe, 2000).

As manifestações mais comuns da exposição de PCBs em vários animais incluem hepatotoxicidade, neurotoxicidade, problemas respiratórios e gastrointestinais, efeito dermal, anormalidades reprodutivas, efeitos mutagênicos e carcinogênicos (Tanabe *et al.*, 1994). As pessoas contaminadas por Kaneclor no Japão em 1968 por exemplo, apresentaram erupções na pele, pigmentação, dores abdominais, fadiga e perturbações visuais (Penteado & Vaz (2001).

**TABELA 3.** Características de alguns compostos orgânicos.

| | | | |
|---|---|---|---|
| PCBs | Pressão de vapor | 0,03 - 1,6 · $10^{-6}$ mmHg |  |
| | Solubilidade | 0,0001 – 0,01 ug · $L^{-1}$ (25°C) | |
| | log Kow | 4,3 – 8,26<br>5 a 7 (maioria congêneres) | |
| | Meia-vida | 6 meses a 57 anos | |
| DDT | Pressão de vapor | 0,2 · $10^{-6}$ mmHg (20°C) |  |
| | Solubilidade | 1,2 – 5,5 ug · $L^{-1}$ (25°C) em água | |
| | log Kow | 6,19 (pp'-DDT);<br>5,5 (pp'-DDD)<br>5,7 (pp'-DDE) | |
| | Meia-vida | 170 horas no ar<br>5.500 horas na água<br>17.000 horas no solo<br>55.000 horas no sedimento | |
| HCB | Pressão de vapor | 1,09 · $10^{-5}$ mmHg (20°C) |  |
| | Solubilidade | 50 ug · $L^{-1}$ (20°C) | |
| | log Kow | 5,5 | |
| | Meia-vida | 6,27 anos | |
| HCH (grau técnico) | Pressão de vapor | 3,33 · $10^{-5}$ mmHg (20°C) |  |
| | Solubilidade | 7 mg · $L^{-1}$ (20°C) | γ-HCH |
| | log Kow | 3,8 | |
| | Meia-vida | 1 ano no solo<br>2 anos na água | |

Em relação aos pesticidas organoclorados, esses compostos podem causar carcinogenia, efeitos neurotóxicos e doenças de pele no homem, além de distúrbios hepáticos e disfunções imunológicas e reprodutivas em diversos organismos. Os mamíferos marinhos estão entre os organismos mais vulneráveis à toxicidade crônica dos organoclorados, pois os concentram em grande quantidade. Esses animais estão sujeitos, portanto, ao desenvolvimento de carcinogênese, teratogênese, disfunções imunológicas e anormalidades reprodutivas nos mamíferos marinhos (Tanabe *et al.*, 1994).

Outro efeito preocupante é a transferência de organoclorados da fêmea ao filhote durante a gravidez e a lactação. Esse efeito foi observado na maioria das espécies e começa quando uma fêmea se torna sexualmente madura (Borrell *et al*, 1995).

Os POPs podem atingir os oceanos via drenagem urbana e/ou transporte atmosférico. Uma vez no oceano, os POPs são distribuídos e transferidos através da coluna d'água, biota e sedimento. Existe uma evaporação significativa da superfície do oceano para a atmosfera. Também podem sofrer processos de dispersão, degradação e concentração similar aos demais poluentes como o petróleo e os metais pesados.

Os processos de dispersão são influenciados pela circulação oceânica. A turbulência é responsável pela mistura e diluição dos organoclorados, enquanto as correntes são responsáveis pelo transporte efetivo.

Muitos POPs podem sofrer transformações através de reações fotoquímicas, degradações por ação de microrganismos ou uma combinação destes fenômenos.

Uma pequena parte dos PCBs na água do mar é dissolvida pelos processos de mistura (turbulência) e a maior parte é incorporada às micelas coloidais. Os POPs associados a estas substâncias, que formam 90% da matéria orgânica dissolvida na água do mar, são transferidos para o fitoplâncton estabelecendo um equilíbrio dinâmico entre material particulado e fitoplâncton. O material particulado não assimilado pelo fitoplâncton, e que constitui a maior fração, é incorporado ao sedimento. Consequentemente, os sedimentos de fundo, tornam-se reservatórios e fontes de POPs no oceano. A distribuição global dos POPs tem sido facilitada pelo transporte atmosférico envolvendo os processos cíclicos de deposição seca/úmida e sublimação ou evaporação, combinados com o fluxo de calor atmosférico líquido das regiões equatoriais. As regiões tropicais atuam como principais fontes de emissão dos POPs contribuindo para a contaminação global através do transporte atmosférico de longa distância. (Kennish, 1997).

## 5. Plásticos

Além desses poluentes, pode-se destacar também o plástico, principal componente do lixo marinho. Plásticos são polímeros orgânicos sintéticos derivados do petróleo e estima-se que existam há apenas um século. Os polímeros mais usados e abundantes são polietileno de alta densidade (HDPE), polietileno de baixa densidade (LDPE), cloreto de polivinila (PVC), poliestireno (PS), polipropileno (PP) e tereftalato de polietileno (PET) que juntos representam aproximadamente 90% da produção total de plástico no mundo (Li *et al*, 2016). Plásticos são materiais versáteis, leves, fortes, duráveis e baratos os que fazem com que sejam amplamente utilizados como matéria-prima para a manufatura de diversos produtos (Derraik, 2002). Devido a essas características podem causar sérios problemas para o ambiente, caso não tenham um destino final adequado.

Estima-se que 8,9 bilhões de toneladas de plásticos primários ou secundários já foram fabricados desde meados do século passado em escala industrial (Geyer *et al.*, 2017). Em 2018, a produção global de plásticos quase atingiu 360 milhões de toneladas (Plastic Europe, 2019). No Brasil são gerados mais de 78,3 milhões de toneladas de resíduos sólidos/ano, dos quais 13,5% são de plástico[2].

[2] Agência Brasil: <https://agenciabrasil.ebc.com.br>

Atualmente o Brasil é o 4º maior produtor de lixo plástico no mundo com 11,85 milhões de toneladas por ano, superado apenas por Estados Unidos, China e Alemanha[3].

A predominância dos plásticos no ambiente pode ser explicada pelo seu elevado tempo de residência, sua abundância e crescente utilização pela sociedade, capacidade de transporte por longas distâncias e programas de gerenciamento pouco eficientes.

As primeiras observações de plásticos no oceano foram feitas pelo pesquisador norueguês Dr. Thor Heyerdahl durante suas expedições científicas à Polinésia (1937-38) e Noroeste da América (1940-41) e Expedição Kon tiki (1947). Desde então, trabalhos posteriores confirmaram elevadas densidades de plásticos flutuantes nos oceanos como os conduzidos por Carpenter & Smith (1972), Thompson *et al*. (2004), e Law *et al.* (2010).

As fontes terrestres de detritos plásticos contribuem com 80% dos detritos plásticos no ambiente marinho. Os plásticos são transportados por rios e sistemas de drenagem de municípios costeiros, sendo que as maiores introduções de lixo plástico são provenientes de áreas industrializadas ou densamente povoadas, principalmente na forma de embalagens. Grande parte dos plásticos chega aos oceanos através de drenagem de rios que banham cidades costeiras que possuem sistemas de coletas insuficientes e baixa taxa de reaproveitamento e reciclagem. As fontes oceânicas respondem pelos 20% restantes de detritos marinhos de plástico, para os quais a pesca comercial é a principal contribuição da atividade humana (Derraik *et al*., 2002; Li *et al*., 2016). Por outro lado, os detritos gerados por navios são a principal fonte de detritos marinhos encontrados em margens remotas. Segundo o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP), em 2009, estimava-se que cerca de cinco milhões de detritos marinhos sólidos eram diariamente jogados ao mar ou perdidos de navios (Hammer *et al*., 2012).

Os plásticos geralmente são resistentes à biodegradação, mas podem ser fragmentados gradualmente através de ação mecânica. Muitos plásticos "biodegradáveis" são compostos com materiais como o amido que degradam, liberando numerosos fragmentos de plástico não degradáveis. (Thompson *et al*, 2004). Esses fragmentos são chamados de microplásticos (MPs) e podem ser acumulados em grandes quantidades nos oceanos.

A definição do tamanho do microplástico foi discutida no primeiro workshop internacional de pesquisa sobre a ocorrência, efeitos e destino de detritos marinhos microplásticos em 2008, hospedado pela NOAA. Os participantes adotaram uma definição pragmática, sugerindo um limite de tamanho de 5 mm. A escolha foi baseada na premissa de que incluiria uma ampla gama de pequenas partículas que poderiam ser prontamente ingeridas pela biota, e essas partículas poderiam apresentar diferentes tipos de ameaças em relação aos itens de plástico maiores, como o entrelaçamento (GESAMP, 2015).

Os MPs são classificados como MPs primários ou secundários, dependendo da fonte. Os MPs primários incluem partículas produzidas intencionalmente como os "***pellets***" (esférulas de plásticos usadas como matéria-prima para a produção de utensílios), microesferas para funções abrasivas ou microfibras que se formam a partir de tecidos sintéticos. A liberação de MPs primários pode ocorrer pelo derramamento industrial (Fig. 3) ou descarte incorreto, mas a principal fonte para o ambiente é a utilização de produtos que os contêm em suas formulações, como tinta para diferentes aplicações. Os MPs primários também são liberados a cada ciclo de lavagem, a partir de tecidos sintéticos (GESAMP, 2015, Galafassi *et al*. 2019).

[3] Para saber mais, acesse: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/plastic-pollution-by-country>.

**FIGURA 3.** **Microplásticos primários (*pellets*): A) recém-produzidos; e B) coletados em praia (cerca de 1 m²) do município de Ilha Comprida (Litoral Sul do estado de SP).** *Fotos: Leandro Coelho.*

MPs secundários, em vez disso, são formados pela degradação de artigos de plástico. A fragmentação de plásticos é um processo principalmente devido à foto-oxidação de espécies reativas de oxigênio e luz UV (Andrady, 2011), levando à quebra de ligações químicas e à perda de resistência à tração. O estresse mecânico durante o uso de itens de plástico ou intempéries também é uma fonte importante de MPs secundárias. Tensões fotoquímicas, químicas e mecânicas podem causar a fragilização do material em fragmentos menores (GESAMP, 2015, Galafassi *et al.*, 2019). Devido à necessidade de luz e oxigênio, a degradação do plástico é mais rápida nas praias e na terra, onde a luz solar pode aumentar a temperatura, acelerando ainda mais o processo, enquanto diminui à medida que a profundidade aumenta, tornando-se quase zero no fundo do mar (Andrady, 2011; GESAMP, 2015). Nos ecossistemas aquáticos, uma fonte importante de MPs secundárias é o estresse mecânico devido à interação dos MPs com os sedimentos naturais, impulsionados, por exemplo, pelo transporte turbulento nos rios (Galafassi *et al.*, 2019).

A abundância de plásticos no ambiente marinho varia espacial e temporalmente em função da distância até áreas costeiras povoadas e destinos turísticos populares, bem como a ocorrência de fortes chuvas e eventos de inundação; mas também com a velocidade e direção da corrente superficial que controla a via de transporte e acúmulo de detritos plásticos nas áreas costeiras e pelágicas (Thevenon *et al.*, 2014).

Muitos itens de plástico flutuam porque são constituídos por material polimérico leve ou porque suas formas permitem capturar o ar (por exemplo, garrafas e sacos). Esses detritos flutuantes parecem acumular-se particularmente em áreas de convergência oceanográfica, mares fechados e correntes oceânicas. O giro central do Pacífico Norte, uma área de alta pressão atmosférica com uma corrente oceânica no sentido horário, força os detritos a uma área central onde os ventos e as correntes desaparecem. Devido ao grande acúmulo de detritos plásticos, principalmente partículas meso e micro plásticas, o centro do giro do Pacífico Norte agora é conhecido como o "Grande Lixo do Pacífico" ou "Vórtice do Lixo Pacífico" (Allsopp *et al.*, 2007).

O giro do Atlântico Norte também foi monitorado para plásticos entre 1986 e 2008 pela organização educacional Sea Education Association (SEA) vinculada à Instituição Oceanográfica Woods Hole (EUA). O Mar do Caribe apresentou uma concentração média de 1.414 ± 112 peças · $km^{-2}$, enquanto que o Golfo do Maine 1.534 ± 200 peças · $km^{-2}$, ambas com uma ordem de magnitude inferior à

concentração média em torno de Latitude 30°N (20.328 ± 2324 peças · $km^{-2}$). A maior concentração de detritos plásticos foi observada nas latitudes subtropicais e associada à convergência em larga escala. Apesar de um rápido aumento na produção e descarte de plástico durante o período estudado, não foi observada tendência de concentração de plástico na região de maior acúmulo (Law *et al*., 2010). Portanto, os giros oceânicos são pontos críticos particulares de acúmulo de resíduos plásticos.

Os plásticos também são facilmente transportados pelas correntes marítimas a longas distâncias, podendo chegar até áreas remotas e distantes de ocupação humana como as regiões polares (Hubbard *et al*., 2014; Waller *et al*., 2017) e ilhas oceânicas (Monteiro *et al*., 2018).

Os objetos de plásticos, em sua maioria, flutuam até ficarem muito pesados devido ao crescimento da biota em sua superfície ou porque ficam encharcados e afundam. Assim, os detritos plásticos são encontrados no fundo do mar em todas as profundidades. Estima-se que, no mar do Norte, até 70% do lixo marinho está no fundo do mar. Os dados sobre a abundância de detritos plásticos nos ambientes bentônicos ainda são muito limitados e são restritos pelas dificuldades de amostragem e pelos custos da pesquisa em ecossistemas do fundo do mar. Portanto, boa parte das investigações de detritos no fundo do mar tem sido concentrada nas plataformas continentais (Hammer *et al*., 2012).

Tanto os macroplásticos quanto os microplásticos representam um risco para a biota. Numerosas espécies são afetadas, principalmente porque os organismos se enredam em redes de plástico ou objetos plásticos são ingeridos quando os organismos confundem resíduos plásticos com comida. Os detritos plásticos no oceano são frequentemente ingeridos por aves marinhas, mamíferos, tartarugas e peixes. A ingestão de plásticos ocorre principalmente quando são confundidos com comida, mas também pode ocorrer por ingestão acidental. O material ingerido geralmente consiste em fragmentos do tamanho de micro e meso-detritos, que às vezes são capazes de passar pelo intestino sem ferir o organismo. Na maioria dos casos, no entanto, os fragmentos ficam presos no estômago, na garganta ou no trato digestivo e causam danos (por exemplo, objetos pontiagudos) ou uma falsa sensação de plenitude, o que resultará em inanição (Hammer *et al*, 2012).

Os plásticos expostos na água do mar podem concentrar vários contaminantes ambientais como os PCBs e HPAs. Esses contaminantes orgânicos hidrofóbicos têm maior afinidade por plásticos como polietileno (PE), polipropileno (PP) e policloreto de vinil (PVC) do que pelos sedimentos. A biodegradação dos contaminantes pode ser reduzida quando absorvidos nos plásticos. Assim, os plásticos não apenas absorvem e transportam contaminantes, mas também podem aumentar sua persistência ambiental (Teuten *et al*., 2009). A adsorção de contaminantes pelos polímeros tem sido estudada principalmente em microplásticos como o *International Pellet Watch*[4], que monitora as concentrações de contaminantes em "*pellets*" encontrados nas praias de várias regiões no mundo. A durabilidade de "*pellets*" no ambiente marinho ainda é incerta, mas parece durar de 3 a 10 anos, e com os aditivos provavelmente esse período pode estender para 30 a 50 anos (Derraik *et al*., 2002).

Os microplásticos (MPs) têm recebido crescente atenção uma vez que podem ser facilmente ingeridos pelos organismos (Ryan *et al*., 2009). Além disso, os MPs também apresentam uma potencial absorção de contaminantes hidrofóbicos a partir de resíduos plásticos ingeridos pelos organismos e podem ser bioacumulados na cadeia alimentar (Teuten *et al*., 2009; Tanaka *et al*., 2013; Van der Hal *et al*., 2020). Assim a ingestão de plásticos pode desempenhar um papel significativo no acúmulo de diversos contaminantes pelos organismos marinhos.

[4] International Pellet Watch: <http://pelletwatch.org/>

De acordo com o Programa de Meio Ambiente das Nações Unidas (UNEP), há, em média, 18.000 pedaços visíveis de plástico flutuando em cada quilômetro quadrado do mar. Algumas nódoas de lixo flutuante são até mesmo visíveis em fotos de satélite. Pesquisadores da Fundação de Pesquisa Marinha Algalita avaliaram 11 sítios randomicamente escolhidos no meio do Oceano Pacífico e descobriram uma massa de plástico seis vezes maior do que a massa de plâncton. Através do tempo o plástico se desintegra em pedaços cada vez menores, mas leva séculos até que ele desapareça completamente (Bojanowski, 2010).

Leis internacionais proíbem o descarte de plástico nos oceanos, mas a aplicação desta proibição é praticamente impossível e as violações são comuns. Dentre os vários protocolos internacionais criados para a proteção dos oceanos o mais importante foi o Protocolo da Convenção Internacional para Prevenção da Poluição por Navios (MARPOL) criado em 1978. Esse protocolo reconhecia que navios representavam uma significativa, porém controlável fonte de poluição do ambiente marinho (Lentz, 1987).

O anexo V do MARPOL restringe a descarga de lixo no mar e bane o descarte de plástico e outros materiais sintéticos, tais como cordas, redes de pesca e sacos de lixo de plástico, com exceções limitadas. É a autoridade que controla o despejo de materiais por navios e entrou em vigor em 1988. Aplica-se a todas as embarcações, incluindo pequenos barcos de recreação. Até 2002, 79 países ratificaram o anexo V, inclusive o Brasil (Derraik, 2002). A maior dificuldade é garantir o cumprimento da legislação em uma área tão vasta como as dos oceanos. Portanto, é comum a violação dessa lei internacional.

*Foto: Leandro Coelho*

## 6. Conclusão

Como resolver o problema da poluição marinha uma vez que não existem fronteiras geográficas para a sua disseminação? Segundo Gonçalves (2009), a melhor ferramenta para a conservação dos oceanos é a criação de áreas marinhas protegidas (AMPs), sejam reservas ou unidades de conservação sustentável. De fato, a Organização das Nações Unidas (ONU) recomenda que, a curto e médio prazos, 20% dos oceanos sejam protegidos com a adoção de Áreas Marinhas Protegidas, subindo para 30% no longo prazo. Atualmente, apenas 0,4% das águas territoriais brasileiras estão protegidas em unidades de conservação federais.

Os órgãos internacionais, como a ONU, também são importantes na preservação dos oceanos. Um dos capítulos da agenda da Conferência das Nações Unidas para o Ambiente e Desenvolvimento (UNCED 92) tratou especificamente da proteção dos mares e zonas costeiras. Em outubro e novembro de 1995, foi discutido pelos países membros da ONU, o programa da UNEP para "Proteção do ambiente marinho da poluição marinha oriunda das atividades terrestres". Em 1996 foi criada a Comissão Mundial Independente sobre os Oceanos onde foram discutidas 30 convenções relativas à proteção dos oceanos. Em 1998 foi decretado o Ano Internacional dos Oceanos.

Em 2009, durante a Conferência Mundial dos Oceanos, um total de 64 países, incluindo os Estados Unidos, aprovou a Declaração dos Oceanos de Manado, que pede que a ONU inclua a proteção dos mares dentro de sua estratégia global contra a mudança climática. O documento também ressalta a importância de agir para "reduzir a poluição do mar e nas zonas litorâneas", e aconselha realizar "estratégias de desenvolvimento sustentável" em nível nacional e inter-regional.

Somando-se a esses documentos a participação da sociedade e organizações não governamentais também tem sido efetiva através das campanhas de conscientização ambiental relativas aos oceanos como o Projeto Lixo Marinho (*Marine Litter Project*), SOS (*Save Our Seas*), Greenpeace entre outras.

As pesquisas científicas cada vez mais crescentes nas últimas décadas têm reforçado a importância do mar e sua conservação. A Reunião Anual da SBPC em 2010 teve como tema central "Ciências do mar, herança para o futuro". Recentemente, as Nações Unidas declararam o período de 2021 até 2030 como a "Década da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável". Essa iniciativa visa ampliar a cooperação internacional em pesquisa para promover a preservação dos oceanos e a gestão dos recursos naturais de zonas costeiras.

Dessa maneira, a responsabilidade e ação simultânea de todos os segmentos da sociedade, universidades, instituições de pesquisa, organizações governamentais e não governamentais representam um compromisso importantíssimo para minimizar o problema da poluição marinha.

## Referências Bibliográficas

ALLSOPP M., WALTERS A., SANTILLO D. & JOHNSTON, P. 2007. Plastic debris in the World's oceans, Greenpeace.

ANDRADY A.L. 2011. Microplastics in the marine environment. Marine Pollution Bulletin 62(8), 1596–1605.

BALLSCHMITER, K. & ZELL, M. 1980. Analysis of polychlorinated biphenyls (PCB) by glass capillary gas chromatography. Composition of technical Aroclor and Clophen-PCB mixtures. Fresenius Zeitschrift für Analytische Chemie, 302, 20-31.

BOJANOWSKI, A. 2010. http://www.globalgarbage.org/blog/index.php/2010/02/05/global-ocean-protection-measures-have-failed/ (publicado em 05.02.2010).

BORRELL, A., BLOCH, D. & DESPORTES, G. 1995. Age trends and reproductive transfer of organochlorine compounds in long-finned pilot whales from the Faroe Islands. Environmental Pollution. 88(3), 283-292.

BREIVIK, K., SWEETMAN, A., PACYNA, J.M. & JONES, K.C. 2007. Towards a global historical emission inventory for selected PCB congeners — A mass balance approach 3. An update. Science of the Total Environment. 377, 296-307.

CARPENTER, E.J. & SMITH, K.L. 1972. Plastics on the Sargasso Sea surface. Science 175, 1240–1241.

CASTRO, N.O. & MOSER, G.A.O. 2012. Florações de algas nocivas e seus efeitos ambientais. Oecologia Australis. 16(2), 235-264.

CETESB, 1996. Relatório de balneabilidade de praias paulistas.

CHAMBERLIN, C. E. & MITCHELL, R. 1978. A decay model for enteric bacteria in natural waters. In: Water Pollution Microbiology. Edited by Ralph Mitchell. WilleyIntercience Publication. Vol. 2: 325-348.

CLARK, R.B. 2001. (5a ed) Marine Pollution. Marine Pollution. Clarendon Press, Oxford University Press. 231 p.

CLARK, R.C. & BROWN, D.W.Jr. 1977. Petroleum properties and analysis in biotic and abiotic systems. In, MALINS, D.C. (ed). Effects of petroleum on arctic and subarctic marine environments New York, Academic Press. 1–89.

CONAMA, 2000. Resolução nº 274 de 29 de novembro de 2000. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 25.jan.2001.

CONAMA, 2011. Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16.mai.2011.

DAVIES, J.M. & TIBBETTS, P.J.C. 1987. The use of In Situ benthic chambers to study the fate of oil in sublittoral sediments. Estuarine, Coastal and shelf Science, 24, 205- 223.

DERRAIK, J.G.B. 2002. The pollution of the marine environment by plastic debris, a review. Marine Pollution Bulletin, 44, 842-852.

EHRHARDT, M. G.; BURNS, K. A. & BÍCEGO, M. C. 1992. Sunlight induced compositional alterations in the seawater soluble fraction of crude oil. Marine Chemistry, 37, 53-64.

FRANK, P. & OTTOBONI, M.A. 2011. The Dose Makes the Poison, A Plain-Language Guide to Toxicology, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc, 330p.

GALAFASSI, S, NIZZETTO, L & VOLTA, P. 2019. Plastic sources: A survey across scientific and grey literature for their inventory and relative contribution to microplastics pollution in natural environments, with an emphasis on surface water. Science of the Total Environment, 693, 133499.

GESAMP (Imo/Fao/Unesco/Wmo/Iaea/Unep Joint Group Of Experts On The Scientific Aspects Of Marine Pollution), 1993. Impact of Oil and Related Chemicals and wastes on the Marine Environment. Rep. Stud. GESAMP, 50, 180pp.

GESAMP, 2002. The revised hazard evaluation procedure for chemical substances carried by ships. (2002). Rep. Stud. GESAMP, (64), 121 p.

GESAMP, 2015. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment, A global assessment. In, Kershaw, P.J. (Ed.), Rep. Stud. GESAMP No. 90. IMO/FAO/ UNESCO/ IOC/ UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection (96 pages).

GEYER, R., JAMBEK, J.R. & LAW, K.L. 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. Science advances. 3 (7) e1700782.

GLADWELL, 2001. The mosquito killer. The New Yorker, July 2, pp. 42-51.

GONÇALVES, L.R. 2009. Por que o nosso maior aliado pode mudar de lado. Special Scientific American Brasil, OCEANOS, (4), 40-47.

HAMMER J., KRAAK M.H.S. & PARSONS J.R. 2012. Plastics in the Marine Environment, The Dark Side of a Modern Gift. In: WHITACRE D. (ed.) Reviews of Environmental Contamination and Toxicology. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology (Continuation of Residue Reviews), vol 220. Springer, New York, NY, p 1-44.

HELM, R.C., COSTA, D.P., DEBRUYN, T.D., O'SHEA, T.J., WELLS, R.S., WILLIAMS, T.M. 2015. OvervIew of effects of oIl spIlls on MarIne Mammals. In: Handbook of Oil Spill Science and Technology, First Edition. Edited by Merv Fingas. John Wiley & Sons, Inc.

HUBARD, R.W., SADRI, S., WONG, Y.Q., KHITUN, A.A., BAKER, I. & THOMPSON, R.C. 2014. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. Earth's Future 2, 315–320.

ITOPF (The International Tanker Owners Pollution Federation), 1987. Response to marine oil spill. London, Whitherby & The International Tanker Owners Pollution Federation. 150p.

JENSEN, S. 1972. The PCB story. Ambio, 1(4), 123-131.

JONES, K.C. & De VOOGT, P. 1999. Persistent organic pollutants (POPs), state of the science. Environmental Pollution, 100, 209-221.

KENNISH, M.J. 1997. Practical Handbook of estuarine and marine pollution. CRC Press. Boca Raton, Florida, 524 p.

LAFLAMME, R.E. & HITES, R.A., 1978. The global distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in recent sediments. Geochimica et Cosmochimica Acta, 42, 289-303.

LARINI, L. 1999. (Ed.). Toxicologia dos praguicidas. 2.ed. São Paulo , Manole, 230 p.

LAW, K. L., MORET-FERGUSON, S., MAXIMENKO, N. A., PROSKUROWSKI, G., PEACOCK, E. E., HAFNER, J. & REDDY, C. M. 2010. Plastic Accumulation in the North Atlantic Subtropical Gyre. Science, 329 (5996), 1185-1188.

LENTZ, S.A. 1987. Plastics in the marine environment, legal approaches for international action. Marine Pollution Bulletin, 18, 361–365.

LI, W.C., TSE, H.F. & FOK, L. 2016. Plastic waste in the marine environment, A review of sources, occurrence and effects. Science of the Total Environment. 566-567,333-349.

METCALF AND EDDY. 1991. Wastewater Engineering. Treatment Disposal Reuse, G. Tchobanoglous and F.L. Burton (Eds.), 1820 pp. New York: McGraw-Hill.

MONTEIRO, R.C.P., IVAR DO SUL, J.A. & COSTA, M.F. 2018. Plastic pollution in islands of the Atlantic Ocean. Environmental Pollution. 238, 103-110.

NEFF, J.M. 1979. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Aquatic Environment, Sources, Fates and Biological Effects. Applied Science Publishers Ltd., Essex, England. 262p.

NEFF, J.M. 1985. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. In: RAND, GM. & PETROCELLI, S.R. (Eds) Fundamentals of Aquatic Toxicology, methods and applications. Hemisphere Publishing Corporation (McGraw-Hill International Book Company), Washington DC, p. 416-454.

NRC (National Research Council). 1985. Oil in the sea, inputs, fates and effects. Washington. DC., National Academy Press. 602pp.

NRC (National Research Council). 2003. Oil in the Sea III, Inputs, Fates, and Effects Washington. D.C., National Academy Press. 280p.

PÁEZ-OSUNA, F., ÁLVAREZ-BORREGO. S., RUIZ-FERNÁNDEZ, AC., GARCÍA-HERNÁNDEZ,J.,JARA-MARINI,M.E.,BERGÉS-TIZNADO,M.E.,PIÑÓN-GIMATE, A., ALONSO-RODRÍGUEZ, R., SOTO-JIMÉNEZ, M.F., FRÍAS-ESPERICUETA, M.G., RUELAS-INZUNZA, J.R., GREEN-RUIZ C.R., OSUNA-MARTÍNEZ, C.C. & SANCHEZ-CABEZA, J.A. 2017. Environmental status of the Gulf of California, A pollution review. Earth-Science Reviews. 166, 181-205.

PENTEADO, J.C.P. VAZ, J.M. 2001. O legado das bifenilas policloradas (PCBs). Química Nova, 24(3), 390-398.

PLASTICSEUROPE. 2019. Plastics – the Facts 2019. An analysis of European plastics production, demand and waste data. 42p.

PBMC, 2016: Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas [Marengo, J.A., Scarano, F.R. (Eds.)]. PBMC, COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 184 p.

RYAN, P.G., MOORE, C.J., VAN FRANEKER, J.A. & MOLONEY, C.L., 2009. Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment. Philosophical Transactions of the Royal Society B 364 (1526), 1999–2012.

SAFE, S. 2000. Toxicology of persistent organic pollutants. European Journal of Lipid Science and Technology, 102(1), 52-53.

SAKAMOTO, S., LIM, W.A., LU, D., DAI, X., ORLOVA, T. & IWATAKI, M. .2020. Harmful algal blooms and associated fisheries damage in East Asia, Current status and trends in China, Japan, Korea and Russia. Harmful Algae (in press).

SOLÉ, J., GARCÍA-LADONA, E., RUARDIJ, P. & ESTRADA, M. 2005. Modelling allelopathy among marine algae. Ecological Modelling, 183, 373-384,

SPORSTØL, S., GJØS, N., LICHTENTHALER, G., GUSTAVSEN, K., URDAL, K., ORELD, F. & SKEI, J. 1983. Source identification of aromatic hydrocarbons in sediments using GC/MS. Environmental Science & Technology, 17(5), 282-286.

STEINHAUER, M.S. & BOEHM, P.D., 1992. The composition and distribution of saturated and aromatic hydrocarbons in nearshore sediments, river sediments, and coastal peat of Alaskan Beaufort Sea, implications for detecting anthropogenic hydrocarbon inputs. Marine Environmental Research, 33, 223-253.

TANABE, S., 1988. PCB problems in the future, foresight from current knowledge. Environmental Pollution, 50,5-28.

TANABE, S., IWATA, H. & TATSUKAWA, R. 1994. Global contamination by persistent organochlorines and their ecotoxicological impact on marine mammals. Science of the total Environment, 154,163-177.

TANAKA, K., TAKADA, H., YAMASHITA, R., MIZUKAWA, K., FUKUWAKA, M.A. & WATANUKI, Y., 2013. Accumulation of plastic-derived chemicals in tissues of seabirds ingesting marine plastics. Marine Pollution Bulletin 69 (1–2), 219–222.

TEUTEN, E.L., SAQUING, J.M., KNAPPE, D.R.U., BARLAZ, M.A., JONSSON, S., BJÖRN, A., ROWLAND, S.J., THOMPSON, R.C., GALLOWAY, T.S., YAMASHITA, R., OCHI, D., WATANUKI, Y., MOORE, C., VIET, P.H., TANA T.S., PRUDENTE, M., BOONYATUMANOND, R,, ZAKARIA, M.P., ACKHAVONG. K., OGATA. Y., HIRAI, H., IWASA, S., MIZUKAWA, K., HAGINO, Y., IMAMURA, A., SAHA, M. & TAKADA, H. 2009. Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife. Philosophical Transactions of The Royal Society B, 364 (1526),2027-45.

THEVENON , F., CARROLL, C. & SOUSA, J. (eds) 2014. Plastic Debris in the Ocean, The Characterization of Marine Plastics and their Environmental Impacts, Situation Analysis Report. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUNC). 54 p.

THOMPSON, R.C., OLSEN, Y., MITCHELL, R.P., DAVIS, A., ROWLAND, S.J., JOHN, A.W.G.. MCGONIGLE, D & RUSSEL, A.E. 2004. Lost at Sea, Where is all the plastic? Science, 304 (5672),838.

TOMMASI, L.R. 1982. Poluição marinha no Brasil, uma síntese. Ciência e Cultura, 34 (3),325-332

TOMMASI, L.R. 2009. Os riscos e desafios dos esgotos. Especial Scientific American Brasil, Oceanos, (4), 56-61.

TORDOIR, W.F. & VAN SITTERT, N.J. 1994. Organochlorines. Toxicology, 91, 51-57.

UNEP (United Nations Environment Programme), 1992. Determinations of petroleum hydrocarbons in sediments. Reference methods for marine pollution studies. N° 20. 97pp

VAN DER HAL, N., YERUHAM, E., SHUKIS, D., RILOV, G., ASTRAHAN, P., & ANGEL, D.L. 2020. Uptake and incorporation of PCBs by eastern Mediterranean rabbitfish that consumed microplastics. Marine Pollution Bulletin, 150 (in press)

VARANASI, U., STEIN, J.E. & NISHIMOTO, M. 1989. Biotransformation and disposition of PAH in fish. In: VARANASI, U (ed) Metabolism of polycyclic aromatic hydrocarbons in the aquatic environment, pp. 93-150. CRC Press, Boca Raton, Florida.

VOLKMAN, J. K., HOLDSWORTH, G. D., NEILL, G. P. & BAVOR, H. J.Jr., 1992. Identification of natural, anthrogene and petroleum hydrocarbons in Aquatic Sediments. Science of Total Environment. 112, 203-219.

WALLER, C.L., GRIFFITHS, H.J., WALUDA, C.M., THORPE, S.E., LOAIZA, I., MORENO, B., PACHERRES, C.O. & HUGHES, K.A. 2017. Microplastics in the Antarctic marine system, an emerging area of research. Science of the Total Environment. 598, 220–227.

WEBER, R. R. 1992. Sistemas costeiros e oceânicos. Química Nova 15(2), 137-143.

WEBER, R.R.& MONTONE, R.C. 1990. Distribution of organochlorines in the atmosphere of the South Atlantic and Antarctic oceans. In, KURTZ D. A. (ed.). Long range transport of pesticides. Michigan, Lewis Publishers. p. 185-197.

WHO (World Health Organization), 1991. Environmental health criteria, 124, Lindane. IPCS (International Programme on Chemical Safety), Geneva, 160 p.

WHO (World Health Organization), 1997. Environmental health criteria, 195, Hexachlorobenzene. IPCS (International Programme on Chemical Safety), Geneva, 208 p.

ZAMBRONE, F. A. D., SANTIAGO, J.P.C., ALVES, A., NAIDIN, L.C., MENEZES, F.A.F., KUCINSKI, B. & LARA, W. 1986. Defensivos agrícolas ou agrotóxicos? Ciência Hoje, 4(22),42-64.

*Capítulo 18*

# POLUIÇÃO POR METAIS E ELEMENTOS RADIOATIVOS

*Bianca Sung Mi Kim, Tailisi Hoppe Trevizani,*
*Paulo Alves de Lima Ferreira & Rubens Cesar Lopes Figueira*

CITAÇÃO SUGERIDA: KIM, Bianca Sung Mi et al. Poluição por metais e elementos radioativos. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 18: p. 381-399.

# Poluição por Metais e Elementos Radioativos

*Bianca Sung Mi Kim, Tailisi Hoppe Trevizani, Paulo Alves de Lima Ferreira & Rubens Cesar Lopes Figueira*

## 1. Introdução

Os oceanos têm sido tradicionalmente e historicamente considerados como fonte segura de riqueza, oportunidade, abundância e local de despejo. O crescente conhecimento sobre os oceanos vem modificando esta visão, mostrando que a capacidade de auto regulação é grande, porém limitada. Devido a isto, em 1982, em Montego Bay, Jamaica, foi realizada a Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (UNCLOS) que definiu conceitos e estabeleceu princípios para a explotação de recursos marinhos, no qual cada Estado tem a obrigatoriedade de reduzir, prevenir e controlar a poluição proveniente de qualquer origem seja continental ou atmosférica.

Em 2015, a Assembleia Geral da ONU adotou a Agenda 2030, que define 17 novos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável Global[1] (ODS), baseado nos 8 Objetivos de Desenvolvimento do Milênio anteriormente dispostos em 2000. Esta Agenda consiste em um plano de ações mundiais que devem ser alcançadas até o ano de 2030 que visam acabar com a pobreza, reduzir a desigualdade, promover a prosperidade e o bem-estar para todos e proteger e realizar o uso sustentável dos oceanos e ecossistemas terrestres.

Dentro destes objetivos, o ODS 14 define "*Conservação e uso sustentável dos oceanos, dos mares e dos recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável*", no qual tem como meta "*Aumentar o conhecimento científico, desenvolver capacidades de pesquisas e transferir tecnologia marinha, tendo em conta os critérios e orientações sobre a Transferência de Tecnologia Marinha da Comissão Oceanográfica Intergovernamental, a fim de melhorar a saúde dos oceanos e aumentar a contribuição da biodiversidade marinha para o desenvolvimento dos países em desenvolvimento, em particular os pequenos estados insulares em desenvolvimento*".

Frente a estes desafios, este capítulo tecerá conceitos acerca da poluição marinha por metais e elementos radioativos. Dada à elevada toxicidade e efeitos deletérios associados a estes elementos, sua presença no ambiente tem sido motivo de preocupação mundial. Estas preocupações foram motivadas por grandes acidentes históricos, como exemplo o envenenamento por mercúrio ocorrido em Minamata, no Japão, a contaminação dos cursos de água e lençol freático por cromo no sul da Califórnia, ou até mesmo os acidentes nucleares de Chernobyl, na Ucrânia, e Fukushima, no Japão.

Dessa forma, o capítulo é dividido em metais e elementos radioativos. Ambos contendo conceitos acerca destes elementos no ambiente natural, somado à influência antrópica, com o objetivo de aumentar o conhecimento científico, dando suporte ao melhor entendimento da poluição dos corpos d'água através destes elementos para então, garantir a conservação e uso sustentável dos recursos marinhos.

[1] Para saber mais sobre os ODS, acesse: <https://sdgs.un.org/goals>.

## 2. Metais

Metais são elementos doadores de elétrons, condutores de eletricidade e calor, maleáveis, dúcteis e apresentam brilho metálico. Representam quase 80% de todos os elementos existentes na Tabela Periódica, sendo pertencente aos grupos de elementos representativos e/ou de transição.

O termo metal pesado refere-se a elementos que apresentam elevada massa específica, massa atômica e número atômico. O termo foi criado em 1936, definindo metais pesados como uma classe de elementos em função da densidade, na qual deveria ser maior que 4 $g \cdot cm^{-3}$ (Bjerrum & Bjerrum, 1936). Dentro de alguns critérios, alguns autores consideram qualquer tipo de metal como metal pesado e outros incluem apenas metais de transição. Além das propriedades químicas utilizadas na sua definição, alguns outros autores destacam outros aspectos na conceituação de metal pesado. Hawkes (1997) concluiu que existem outras propriedades importantes na sua definição, tais como a formação de sulfetos e hidróxidos insolúveis. Destaca-se que a precipitação é uma técnica comumente utilizada na remoção de metais no tratamento de efluentes industriais, nos quais ocorre a elevação do pH levando a formação de hidróxidos insolúveis.

De uma maneira geral, o termo metal pesado está associado a propriedades químicas e físicas que não designam seu potencial tóxico. Duffus (2002) reportou que o conceito metal pesado foi utilizado em muitos estudos como um grupo de metais e semimetais associados a contaminação e a seu potencial toxicológico. Dessa forma, as propriedades toxicológicas e efeitos ambientais foram associados a definição de metais pesados, devido aos impactos ao ambiente e a saúde humana, decorrente da disposição destes elementos no ambiente.

Devido às diferentes características químicas, alguns metais são considerados micronutrientes essenciais como Al (alumínio), Fe (ferro), Co, (cobalto), Cr (cromo), Cu (cobre), Mn (manganês), Ni (níquel) e Zn (zinco), que são essenciais às atividades metabólicas de organismos e plantas em determinadas concentrações, encontrando-se no limite entre a essencialidade e toxicidade (Elementos essenciais – Fig. 1), ou seja, são considerados benéficos até determinada concentração. Outros, como o Cd (cádmio), Pb (chumbo), e Hg (mercúrio) não possuem função biológica conhecida e, apresentam extrema toxicidade (Elementos não essenciais – Fig.1), apresentando efeitos deletérios a qualquer exposição, tornando necessário o acompanhamento de ambientes aquáticos sensíveis a contaminação.

O As (Arsênio) e o Se (Selênio) são metalóides que apresentam características de metais e não metais, porém são considerados de uma maneira geral metais pesados devido a sua toxicidade (Karadede-Akin & Unlu, 2007).

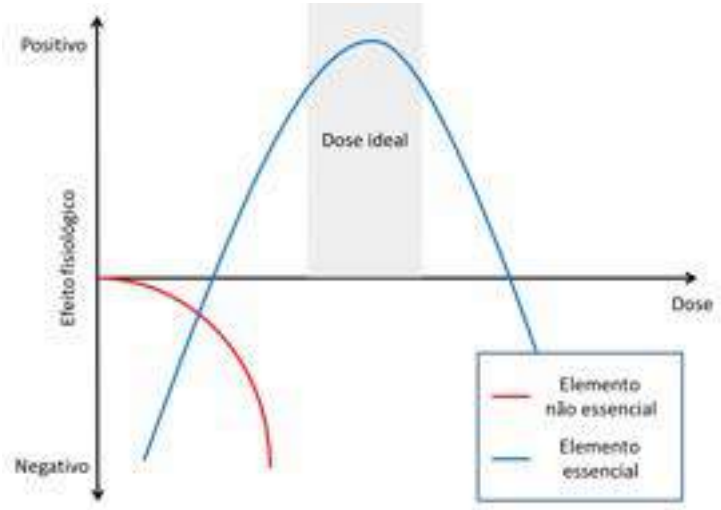



**FIGURA 1.** Relação dose-efeito de elementos não essenciais e essenciais.

No ambiente, assim como outros elementos, os metais existem em níveis naturais (*background*) na crosta terrestre derivado de xistos, arenitos, rochas metamórficas e ígneas (Kabata-Pendias & Pendias, 2001), compondo a estrutura cristalina de minerais primários e secundários. Na Tabela 1 são listados alguns metais e sua concentração média em solos. Dessa forma, a presença de metais não é um indicativo de contaminação visto que solos não contaminados apresentam concentrações naturais provenientes do material parental.

**TABELA 1. Conteúdo médio de metais/metalóides em solos.** *Adaptado de Lindsay, 1979.*

| Metal/metalóide | Média encontrada em solos ($mg \cdot kg^{-1}$) |
|---|---|
| Al | 71.000 |
| Fe | 38.000 |
| Cu | 30 |
| Cr | 100 |
| Cd | 0,06 |
| Zn | 50 |
| As | 5 |
| Se | 0,3 |
| Ni | 40 |
| Pb | 10 |
| Hg | 0,03 |

De uma forma geral, os metais são distribuídos naturalmente em diferentes compartimentos, sendo:

- Dissolvidos em solução, normalmente aquosa;
- Associados aos constituintes inorgânicos do solo;
- Adsorvidos aos constituintes inorgânicos do solo;
- Associados à matéria orgânica insolúvel;
- Precipitados puros ou sólidos misturados; e
- Na estrutura cristalina de metais primários e secundários.

Modificações físico-químicas do meio, como a hidratação, alterações no pH ou no potencial de óxido-redução e oxidação da matéria orgânica, podem mobilizar estes metais, fazendo com que atinjam os sistemas aquáticos. As principais formas de adição nestes sistemas são o intemperismo das rochas e as atividades vulcânicas, os quais são transportados, principalmente, por meio da descarga fluvial e da atmosfera. Ambas são consideradas as principais fontes de metais para os oceanos, porém as introduções por meio da atividade antrópica vêm superando a contribuição natural. Na Tabela 2 são apresentadas as estimativas de emissão de diferentes elementos para a atmosfera tanto da contribuição natural, quanto antrópica.

**TABELA 2.** Estimativa da emissão de metais e semimetais para a atmosfera. *Fonte: Pacyna et al., 1995.*

| Metais | Natural (x 1.000 ton/a) | Atividade antrópica (x 1.000 ton/a) |
|---|---|---|
| As | 1,1 – 23,5 | 12 – 25,6 |
| Cd | 0,1 – 3,9 | 3,2 – 12 |
| Cu | 2,2 – 53,8 | 19,7 – 50,8 |
| Pb | 0,9 – 23,5 | 287,5 – 376 |
| Ni | 2,9 – 56,8 | 24,2 – 87,2 |
| Zn | 4 – 85,9 | 70,4 – 793,5 |

A adição de metais pela ação humana é representada por fontes pontuais e difusas, dentre elas, a utilização de fertilizantes, o descarte de resíduos de tratamento de esgotos e as atividades industriais. Estes elementos vêm recebendo crescente atenção devido ao seu potencial tóxico e sua persistência no ambiente. São considerados poluentes prioritários pela Agência de Proteção Ambiental Americana (*US Environmental Protection Agency*) e, especialmente o As, Cd, Cr, Ni e Pb, e fazem parte da lista de elementos químicos de preocupação pública pela OMS (Organização Mundial da Saúde). Altas concentrações destes elementos no ambiente, induzidas pela introdução humana, acabam afetando a produtividade dos sistemas naturais, bem como sua biodiversidade, constituindo, então, riscos ao próprio ecossistema e a saúde humana.

A toxicidade do metal é dependente não só da concentração, mas também da espécie química que ele se encontra. O termo especiação química refere-se à forma específica em que o elemento se caracteriza isoladamente, ou seja, dependendo dos parâmetros físico químicos (principalmente, potencial óxido redução e pH), o elemento se encontrará em uma forma específica, seja com ligantes orgânicos ou com uma composição isotópica ou estado eletrônico diferente.

Como exemplo, o Fe em condições anóxicas encontra-se como $Fe^{2+}$, sendo solúvel em água, porém em condições óxicas, o $Fe^{2+}$ oxidará para $Fe^{3+}$ e precipitará. O Cr hexavalente ($Cr^{6+}$) é relativamente mais lábil, ligado fracamente aos grãos, sendo extremamente tóxico e conhecido por ser carcinogênico aos humanos, diferente do Cr trivalente ($Cr^{3+}$) que é mais estável, formando precipitados insolúveis com baixa toxicidade. Dessa forma, esta característica governará sua distribuição geoquímica, biodisponibilidade, tempo de residência, transformação metabólica preferencial e assimilação biológica e, como consequência sua toxicidade associada (Crews *et al.*, 2003).

Entre os anos 50 até o final dos anos 60, milhares de pessoas sofreram envenenamento por mercúrio, na cidade de Minamata, no Japão. Nessa região havia uma fábrica que utilizava mercúrio em seus processos químicos de produção de acetaldeído entre outros compostos. O rejeito contendo o Hg era lançado na Baía de Minamata e as pessoas comeram os peixes dessa região que estavam contaminados com esse elemento e o metil-Hg, uma forma extremamente tóxica do Hg, o que mostra que as formas químicas dos metais influenciam na sua toxicidade. Os residentes locais desenvolveram doenças neurológicas graves e problemas de desenvolvimento motor. Isso foi um alerta para o mundo dos efeitos na saúde decorrentes da contaminação por Hg. Milhares sofreram envenenamento, que em casos extremos levou à insanidade, deformação e morte. Muitas crianças cujos mães que comeram peixes contaminados nasceram com gravesdeficiências, mesmo quando suas mães não apresentavam sintomas evidentes (Weis, 2015).

Quando um elemento metálico é introduzido nos sistemas aquáticos, este pode se particionar em diversos compartimentos. Dentre eles, as principais matrizes são a água, o sedimento e os organismos. A maior parte dos contaminantes é adsorvida na matéria particulada em suspensão, que pode ser transportada para o sedimento por floculação e sedimentação, fazendo com que o sedimento seja o ponto terminal de acumulação de elementos potencialmente contaminantes.

Mesmo que o sedimento seja um repositório de contaminantes a remobilização pode predispor estes íons novamente nos ciclos, disponibilizando-os novamente para a comunidade biológica. Estes processos podem ser químicos, como por exemplo, elevação da concentração salina, variações da condição redox, diminuição do pH e oxidação da matéria orgânica, ou biológicos, através das atividades metabólicas dos organismos microbianos (Förstner, 1981, *apud* Soares, 1992).

## 2.1 Metais em água

A água apresenta um duplo papel, sendo como reativa, devido à sua hidrólise, e como solvente, dispersando em seu meio espécies químicas iônicas através da dissolução. Suas características estruturais conferem uma coesão interna excepcional, apresentando um alto calor latente de fusão e vaporização, uma alta capacidade de adsorção de íons, permitindo uma interação eletrostática entre as superfícies minerais e a molécula de água. Além disso, devido à forte polaridade e formação de $H_3O^+$ e $OH^-$, a água apresenta capacidade solvente que atua na hidratação de íons, como os metais.

Dependendo das características físico-químicas e das espécies dissolvidas, diversas interações podem ocorrer como a troca iônica e a adsorção, a precipitação e a dissolução, reações ácido-base, reações de óxido-redução e a formação de complexos tanto com elementos orgânicos como inorgânicos (Fig. 2). Dessa forma, a especiação química de metais na água é particularmente complexa devido à água ser considerada, dentre todas as matrizes, o compartimento mais reativo.

**FIGURA 2. Principais mecanismos que controlam os metais em solução.** *Fonte: Adaptado de Mattigod et al., 1981.*

Metais em água são bastante reativos, podem ser encontrados em solução de forma livre, como íons (ex. $Ca^{2+}$, $Cd^{2+}$, $Zn^{2+}$), em complexos orgânicos/inorgânicos solúveis ou associado a compostos inorgânicos lábeis e material orgânico coloidal, ou seja, o material entre 0,01 e 10 µm e, a concentração total destes elementos refere-se à soma de todas estas formas. A forma química (estado de oxidação ou Nox) desses metais também governará sua reatividade e seu transporte entre matrizes diferentes e, consequentemente, a sua toxicidade. De uma maneira geral, no meio aquoso, há vários íons em solução e, a forma livre é a mais tóxica, devido a potencial biodisponibilidade, porém apresentam-se em baixa porcentagem em relação às outras formas.

O controle da poluição está relacionado diretamente à proteção da saúde e a melhoria da qualidade de vida. Como forma de controlar o lançamento de poluentes no meio ambiente, e proibir o descarte de níveis nocivos ou perigosos para os seres humanos e outras formas de vida, a Constituição Federal estabeleceu a Resolução CONAMA N°357/2005, "*Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências*". Dessa forma, a Resolução CONAMA N°357/2005 determina níveis de aceitação máximos de metais dissolvidos em água salina (Tab. 3) e, os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados desde que obedeçam estas condições.

**TABELA 3.** Níveis máximos de metais (em mg/L) em águas salinas estabelecidos pela Resolução CONAMA N°357/2005.

| Elemento | Valor máximo (mg/L) |
|---|---|
| Al (dissolvido) | 1,5 |
| As | 0,01 |
| Ba | 1,0 |
| Cd | 0,005 |
| Pb | 0,01 |
| Cu | 0,005 |
| Cr | 0,05 |
| Fe | 0,3 |
| Mn | 0,1 |
| Hg | 0,0002 |
| Ni | 0,025 |
| Ag | 0,005 |
| Zn | 0,09 |

## 2.2. Metais em sedimento

Como já mencionado, o sedimento atua como um ponto terminal de acumulação de substâncias. De acordo com Förstner & Patchineelam (1981), a deposição de metais em sedimentos segue quatro mecanismos básicos:

- Transportados e depositados pelos minerais detríticos provenientes de rochas e solos;
- A sorção e troca de cátions recebem metais na superfície dos grãos finos;
- Aumento do pH e da salinidade promove a formação de hidróxidos de metais e carbonatos, que resulta na coagulação e precipitação ou co-precipitação destes materiais; e
- Combinação da complexação e redução em águas ricas em matéria orgânica.

Dessa forma, a incorporação de metais em sedimento envolve complexos mecanismos de adsorção, floculação, polimeração e precipitação, fazendo com que o sedimento seja uma matriz importante para estudos ambientais, tendo em vista que apresenta estabilidade maior que a coluna d'água sobrejacente (Zhou *et al.*, 2014).

Existem diversos valores guia de qualidade de sedimentos, baseado em testes ecotoxicológicos que definem dois níveis a partir das incidências encontradas, no qual separam as concentrações encontradas em três categorias acerca dos efeitos deletérios à comunidade biológica. Estes efeitos podem ser classificados em raros, ocasionais e frequentes (Long *et al.*, 1995, McDonald *et al.*, 1996). No Brasil, não há regulamentação existente para metais em sedimentos marinhos/estuarinos, apenas a Resolução CONAMA N°454/2012, que "*Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional*" que dispõe de dois níveis (Tab. 4) que se referem a limiares abaixo do qual há menor/maior probabilidade de efeitos adversos à biota.

**TABELA 4.** Valores de nível 1 e 2 (em mg/kg) para água salina/salobra da Resolução CONAMA N°454/2012.

| Elemento | Nível 1 | Nível 2 |
|---|---|---|
| As | 19 | 70 |
| Cd | 1,2 | 7,2 |
| Pb | 46,7 | 218 |
| Cu | 34 | 270 |
| Cr | 81 | 370 |
| Hg | 0,3 | 1,0 |
| Ni | 20,9 | 51,6 |
| Zn | 150 | 410 |

Avaliar a proporção da contaminação para verificar a magnitude da ação humana torna-se um estudo complexo tendo em vista que os metais de origem natural e antropogênica acumulam juntos, fazendo com que a concentração obtida represente a soma das duas contribuições Esta concentração refletirá ambas introduções em diferentes ordens de grandeza que podem variar em função da natureza, a distribuição do tamanho de grão e a proveniência do sedimento, sendo este, dependente da mineralogia da rocha fonte. (UNEP, 1995).

Os parâmetros que mais influenciam na concentração de metais em sedimentos são os atributos geoquímicos, ou seja, a granulometria, o teor de matéria orgânica e a quantidade de carbonatos. Como os metais tendem a adsorver na superfície dos grãos, é esperado que sedimentos com menor tamanho de grão apresentem maior concentração devido a sua maior superfície de contato em relação ao volume,

ou seja, para um mesmo volume de sedimento, maior a área reativa em sedimentos mais finos. Além disso, os metais também são ligados aos carbonatos, apresentando uma relação direta principalmente com metais divalentes como o $Ca^{2+}$, $Sr^{2+}$ e $Ba^{2+}$ (Kabata-Pendias, 2001). No caso da matéria orgânica, a presença em sua configuração de grupos fenólicos e carboxílicos formam sítios de adsorção que propiciam ligações iônicas e/ou agentes quelantes (Campos, 2010).

Tendo em vista que metais de origem natural são provenientes do material parental, além dos atributos geoquímicos citados, deve-se levar em consideração a mineralogia da rocha fonte. Existem diversas fontes naturais de metais, que podem exceder os limites legais, como exemplo altos valores de Cr que podem ser encontrados em cloritas, ou níveis de Ni encontrados em esmectitas (Bonifacio *et al.*, 2010). No Brasil, o As é amplamente discutido, apresentando altos teores em sedimento marinho, proveniente da erosão de rochas enriquecidas em As (exemplo: Angeli *et al.*, 2019, Mirlean *et al.*, 2012). Os valores normalmente reportados de As apresentavam-se acima da regulamentação CONAMA 344/2004 que era baseada em no guia de qualidade estabelecido nos Estados Unidos (ERL/ERM). Devido a isto, esta resolução foi revogada e a resolução CONAMA 454/2012 tomou seu lugar, modificando os níveis de aceitação de As de 8,2 para 19 mg/kg.

O sedimento é reconhecido como um indicador ambiental, refletindo as condições existentes no momento de deposição. Ademais, torna-se um repositório de contaminantes, porém modificações nas características físico-químicas do meio circundante, ou remobilização do sedimento por meio da dragagem, por exemplo, podem redisponibilizar estes elementos para o ambiente aquático, transformando-o em uma fonte de contaminação. Dessa forma, o conhecimento e o monitoramento desta matriz, tornam-se importantes na avaliação da contaminação e impactos ambientais, sociais e econômicos associados.

## 2.3 Metais em organismos marinhos

Estudar os metais, sua influência sobre os organismos marinhos e os efeitos ao longo da teia alimentar, são de grande interesse dos órgãos ambientais em todo o mundo. Em razão de suas características como persistência no ambiente e perturbação aos processos biológicos devido a sua acumulação e alta toxicidade (Islam & Tanaka, 2004).

Os organismos marinhos são capazes de integrar as variações das concentrações de poluentes ao longo do tempo e acumular metais em seus tecidos, através dos processos de bioacumulação e biomagnificação.

A bioacumulação é definida como a transferência de metais a partir de uma fonte, como a água, os sedimentos ou os alimentos, para um organismo. Estes elementos se acumulam e as concentrações obtidas nos organismos refletem a quantidade dos elementos que foi ingerida e retida em seus tecidos. Esta é calculada através do Fator de Bioacumulação (***FB***), seguindo a fórmula:

$$FB = \frac{CMO}{CMS\ ou\ CMA}$$

O ***FB*** é a razão entre a concentração do metal no organismo (***CMO***) e a concentração do metal nos sedimentos (***CMS***) ou a concentração de metal na água (***CMA***). Há bioacumulação quando ***FB*** > 1.

A biomagnificação ocorre quando há um aumento na concentração de metais, ao longo de ao menos duas posições tróficas em uma teia alimentar, sendo um processo que comprovadamente ocorre com o Hg e tem sido relatado para outros metais como Cd, Se e Zn (Cheung & Wang, 2008).

Desta forma, a bioacumulação e a biomagnificação dependem tanto da especiação dos metais, como de fatores ecológicos, que incluem hábitos alimentares e a posição que ocupam na teia alimentar. Além de características biológicas e fisiológicas, como por exemplo: sexo, fase de desenvolvimento, metabolização por diferentes tecidos e existência de proteínas como a metalotioneína, que auxilia na detoxificação de metais (Luoma & Rainbow, 2005).

Como avaliar as condições de um ecossistema por meio das concentrações de metais em todos os seus compartimentos é um trabalho difícil e intensivo, alguns organismos podem ser utilizados como bioindicadores ou sentinelas ambientais. Estes fornecem informações sobre as condições ambientais através de sua presença, abundância e condições, neste caso indicadores da contaminação por metais (Karadede-Akin & Unlu, 2007). Dentre os diversos organismos utilizados em monitoramento de metais no ambiente marinho destacam-se os invertebrados bentônicos, os peixes, os mamíferos e as aves marinhas (Fig. 3).

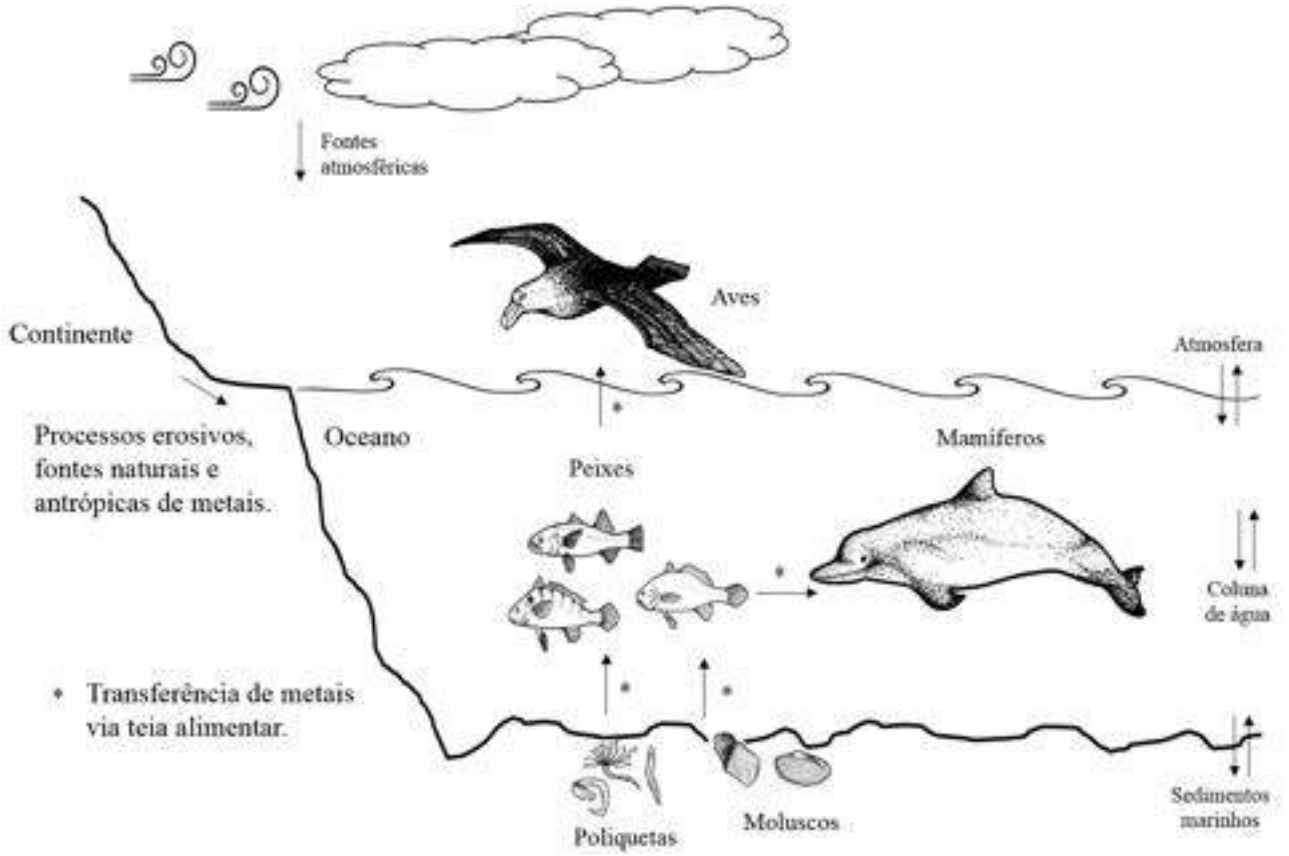



**FIGURA 3.** **Fluxograma de fontes de metais para os oceanos, bioacumulação e biomagnificação. Exemplos de organismos marinhos bioindicadores da contaminação por metais.** *Ilustração: Joana Dias Ho.*

Os invertebrados bentônicos têm sido amplamente utilizados em estudos de contaminação, devido à posição trófica que ocupam nas teias alimentares, sendo considerados ideais para monitoramento de metais (Eisler, 2010a). Dentre eles se destacam dois grupos: as poliquetas e os moluscos, pois refletem de forma integrada a carga de contaminantes a que estão expostos na água e nos sedimentos durante a alimentação. Um exemplo de biomonitor reconhecido por diversos estudos é espécie de molusco *Laternula elliptica*, organismo sentinela para o monitoramento ambiental antártico, devido sua alta densidade populacional, ampla distribuição e capacidade de tolerar altas concentrações de metais em seus tecidos (Rodrigues *et al.*, 2007).

Os peixes são importantes rastreadores da contaminação por metais, por seu ciclo de vida conhecido, por ocuparem uma variedade de habitats, e devido ao seu alto consumo por animais de topo de teia alimentar e pelo homem. Eles são recursos alimentar e econômico, portanto a avaliação da concentração de metais em peixes é de grande importância para a saúde pública e ecossistêmica (Trevizani *et al*., 2019). Por este motivo se fez necessária a criação de uma legislação especifica para regular as concentrações permitidas para consumo humano. Mundialmente a legislação é estabelecida pela FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 1983) e nacionalmente pela ANVISA (Agencia Nacional de Vigilância Sanitária, 1965, Brasil 1998), os níveis toleráveis de alguns metais em pescado para consumo humano estão expostos na Tabela 5.

**TABELA 5.** Concentrações toleráveis de metais pesados em pescado para o consumo humano de acordo com a legislação da FAO e da ANVISA em mg/kg.

| Fonte | As | Cr | Cu | Ni | Pb | Zn | Hg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| FAO | 1 | - | 30 | 5 | 2 | 50 | 0,5 |
| ANVISA | 1 | 0,1 | 30 | 5 | 2 | 50 | 0,5 |

Dentre os mamíferos marinhos, os cetáceos costeiros são considerados sentinelas ambientais (Moore, 2008), assim como as aves marinhas (Burger & Gochfeld, 2004). Como por exemplo, espécies que ocupam o Atlântico Sul: o boto-cinza (*Sotalia guianensis*) e o Petrel-Gigante-do-Sul (*Macronectes giganteus*). Ambos são predadores de topo de teia alimentar, com longo período de vida e são sensíveis na detecção de mudanças ambientais, auxiliando na compreensão dos potenciais efeitos de metais ao ecossistema (Burger & Gochfeld, 2004; Moore, 2008). Ainda, como mamíferos e aves marinhas se alimentam de espécies consideradas recursos pesqueiros pelos seres humanos, as informações obtidas quanto a biomagnificação e bioacumulação nestes animais podem refletir potenciais impactos negativos à saúde humana.

A toxicidade dos metais depende da dose e da especiação em que se encontram nos organismos marinhos. Os nuclídeos arsênio em suas formas inorgânicas ($As^{3+}$ e $As^{5+}$) são cancerígenos e teratogênicos, mas estudos reportam que em alimentos marinhos o As se apresenta predominantemente como um composto orgânico chamado arsenobetaína, que é inofensivo a estes organismos, e quando ingerido é facilmente excretado (Francesconi, 2010). O mesmo ocorre com o Cromo, embora seja um elemento essencial, na forma Cr (III), na qual participa da utilização de açúcar, proteína e gordura, na forma Cr (V) possui efeitos adversos, como redução do crescimento e mortalidade. Mesmos efeitos adversos causados pelo excesso de Ni (Eisler, 2010 a, b).

Cobre e Zn apresentam elevadas concentrações em organismos marinhos, por participarem da formação de enzimas, o primeiro em processos respiratórios e o segundo na regulação do RNA e DNA. Porém, a intoxicação aguda causa problemas nos rins e no fígado, hipóxia tecidual e morte (Eisler, 2010b; Karadede-Akin & Unlu, 2007).

Cd, Pb e Hg (especialmente na forma metil mercúrio), são os principais contaminantes de preocupação ambiental, visto que não são essenciais e causam diversos efeitos em organismos marinhos (Eisler, 2010 a, b). Entre eles distúrbios genéticos, neurológicos, congênitos, comportamentais e reprodutivos, dos quais destacam-se perda de coordenação e equilíbrio, má formação fetal, câncer e morte (Eisler, 2010 a, b).

Apesar da toxicidade e crescente exposição aos metais de fontes antrópicas, existem mecanismos de defesa dos organismos marinhos à intoxicação. Peixes e mamíferos marinhos regulam as concentrações de metais no tecido muscular, acumulando preferencialmente no fígado, órgão com maiores níveis das proteínas metalotioneínas, que desempenham um papel importante no armazenamento e desintoxicação de metais, principalmente Cd, Cu e Zn (Eisler, 2010b). O Se é um elemento essencial para atividade metabólica de todas as formas de vida que têm sistema nervoso, e atua como agente de proteção contra a toxicidade do Hg em diversos organismos marinhos (Feroci *et al.*, 2005). Ainda, as aves marinhas eliminam metais, especialmente o Hg, através de penas, ovos e excretas (Burger & Gochfeld, 2004), reduzindo a intoxicação.

Os metais apresentam um papel fundamental para o funcionamento da vida no planeta, porém são contaminantes detectados com maior frequência em ambientes marinhos costeiros, devido às atividades antrópicas. Portanto, conhecer os níveis e as fontes destes contaminantes é essencial para a conservação, recuperação e remediação dos diferentes ecossistemas, além de proporcionar segurança à alimentação e saúde pública.

## 3. Materiais radioativos

Alguns isótopos de elementos químicos são chamados de radioativos se apresentam átomos com algum tipo de instabilidade energética em seu núcleo que leva à liberação de radiação. O descobrimento da existência da radioatividade, cuja medição identifica os radionuclídeos (núcleos de átomos radioativos) em uma mistura complexa qualquer de diversos elementos, possibilitou o uso desses átomos emissores de radiação como traçadores ambientais. Dessa forma, a análise de radionuclídeos tornou-se um instrumento importante em estudos oceanográficos, pois os oceanos, ocupando a maior parte da superfície terrestre, são, consequentemente, os principais destinos desses elementos.

A radioatividade é um processo estocástico no que diz respeito à impossibilidade de prever quando um determinado átomo irá decair. Entretanto, para um grande número de átomos, a taxa de decaimento do conjunto pode ser prevista com base nas constantes de decaimento radioativo, inatas de cada nuclídeos. A constante de decaimento radioativo ($\lambda$) é a característica temporal que se refere à intensidade do decaimento radioativo de um determinado átomo, e está relacionada à sua meia-vida, que equivale ao tempo que leva para metade da quantidade inicial de átomos decair.

Tendo em vista o grande número de modos de emissões radioativas, foi criada uma classificação básica destas emissões de acordo com sua penetrabilidade na matéria (Loveland *et al.*, 2006). Essas radiações, ou raios, foram nomeadas alfa ($\alpha$, equivalente a um núcleo de $^{4}He$), beta ($\beta$, equivalente a um ***elétron/*** $\beta^-$ ou um ***pósitron/*** $\beta^+$) e gama ($\gamma$, um fóton, partícula sem massa), em ordem crescente de poder de penetração pela matéria (Fig. 4).

Além da classificação dos tipos de emissão radioativa, há também uma classificação dos radionuclídeos, de acordo com sua origem. Nela, os radionuclídeos são divididos em dois grandes grupos: naturais, ou seja, de ocorrência natural no Universo; e artificiais ou antropogênicos, isto é, aqueles produzidos pela atividade humana (Rankama, 1954).

Mesmo com a evolução do conhecimento acerca da radioatividade a partir do final do século XIX, os seus perigos não foram imediatamente percebidos. Apenas em 1927 o pesquisador Hermann Muller publicou um estudo relatando os efeitos biológicos da radiação, um dos primeiros trabalhos

do gênero. As partículas alfa não são consideradas tão deletérias, tendo em vista que são barradas facilmente pela camada de células mortas na pele, ao contrário da radiação gama, que possui energia capaz de atravessar blocos de concreto ou chumbo (Fig. 4, Mazzilli *et al.*, 2011).

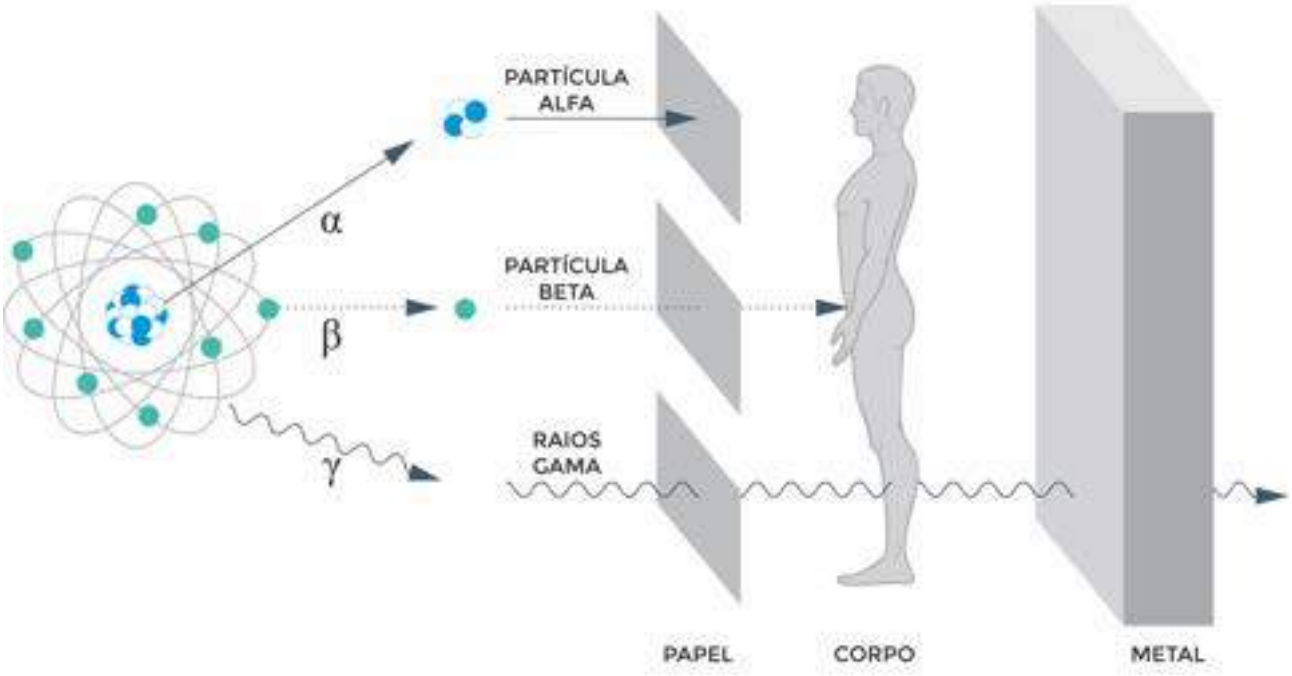



**FIGURA 4. Tipos de penetração das emissões radioativas e poder de penetração.** *Fonte: adaptado de Mazzilli et al., 2011.*

Essa nova área da ciência passou a ser aplicada nos mais diversos campos, como produção de energia nuclear (considerada limpa), fabricação de radiofármacos para tratamento de doenças (como cânceres) e construção das ogivas nucleares. Esse conhecimento foi impulsionado principalmente pelas grandes guerras e pela corrida armamentista da Guerra Fria. É justamente do uso da radioatividade em atividades humanas que ocorre a contaminação do meio ambiente por radionuclídeos, principalmente o meio marinho. A maioria dos materiais produzidos pela indústria bélica nuclear, além possuir uma alta toxicidade, tem um enorme tempo de meia-vida no meio ambiente.

Enquanto alternativa aos combustíveis fósseis, a produção de energia nuclear possui baixa emissão de $CO_2$ e alta eficiência energética por massa de combustível consumido, entretanto, há dificuldades no manejo dos rejeitos nucleares, ocorrência de acidentes e vazamentos, vida útil limitada das usinas, altas externalidades sociais e ambientais e a possibilidade de produção de armas nucleares com o reprocessamento dos rejeitos, com implicações como terrorismo e disputas geopolíticas entre nações (Dresselhaus & Thomas, 2001; Sovacool, 2008).

São quatro as principais vias de entrada de radionuclídeos no meio ambiente, todas relacionadas aos usos da radioatividade em atividades humanas: explosões de armamentos nucleares, descargas de efluentes de baixa radioatividade de usinas nucleares e de reprocessamento, disposição oceânica de tambores com rejeitos radioativos de usinas termonucleares e acidentes nucleares (envolvendo navios, submarinos e usinas nucleares, como os ocorridos em Three-Mile Island, Chernobyl e Fukushima) (Livingston & Povinec, 2000). Quando inseridos no sistema marinho, os radionuclídeos podem ser dispersos, diluídos, redistribuídos e acumulados em compartimentos específicos do ecossistema. A Figura 5 apresenta os diversos compartimentos existentes e suas vias de transferência (Figueira & Cunha, 1998).

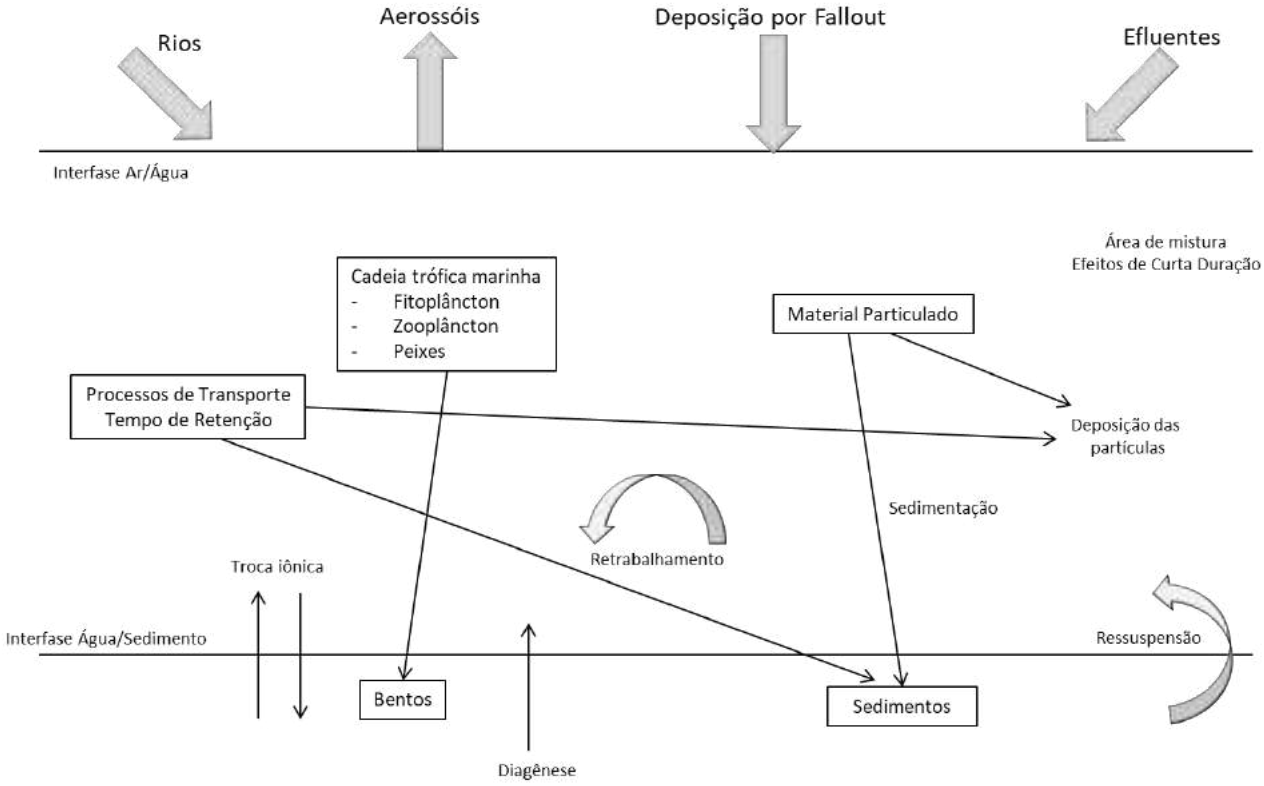



**FIGURA 5. Vias de transferência e compartimentos dos radionuclídeos no meio marinho.** *Fonte: modificado de Figueira et al., 1998.*

Os radionuclídeos artificiais são produzidos como produtos ou subprodutos de explosões de armamentos nucleares e da produção de energia elétrica em reatores eletronucleares (ex. $^{137}Cs$), aceleradores de partículas (ex. $^{18}F$) e geradores de radionuclídeos específicos (ex. $^{99m}Tc$) (Nyffeler *et al.*, 2003). Dentre os radionuclídeos artificiais, destacam-se o $^{239}Pu$ e os produtos de fissão $^{137}Cs$ e $^{90}Sr$ em relação à ao seu potencial de contaminação. Plutônio é um dos elementos radioativos mais tóxicos que se tem o conhecimento. Seu isótopo $^{239}Pu$ apresenta meia-vida de 24.000 anos e é produzido primariamente por meio da captura de nêutrons pelo $^{238}U$, que está presente no combustível nuclear do reator ou em uma bomba termonuclear, juntamente com $^{235}U$.

Nos seres humanos, o maior perigo é a incorporação pelos pulmões de partículas contendo o radionuclídeo (UNEP, 1984). Um grama de plutônio é equivalente a 100 g de urânio e uma tonelada de óleo em termos energéticos, daí a importância deste elemento nos processos de reprocessamento do combustível nuclear (Singh, 1997). $^{137}Cs$ e $^{90}Sr$ tem alto rendimento de fissão e meia-vida de aproximadamente 30 anos. Tendo em vista que ambos são semelhantes ao potássio e ao cálcio, respectivamente, $^{137}Cs$ e $^{90}Sr$ tem potencial de se depositar nos músculos e ossos (Figueira, 2000).

Dentre os diversos locais para liberação e armazenamento de rejeitos de qualquer espécie se destacam os meios fluvial e marinho. Os mares e oceanos do mundo funcionam como grandes repositórios das mais diferentes formas de poluição, destacando-se a poluição radioativa (Figueira, 2000). Existem cinco categorias de atividades humanas distintas, que foram, são e, poderão ser responsáveis pela contaminação do ambiente marinho por elementos radioativos ou radionuclídeos (Calmet & Sjoeblom, 1992):

- A explosão de armas nucleares, tanto na atmosfera como em sítios subterrâneos;
- As descargas de efluentes radioativos de baixa atividade dos reatores nucleares, usinas de reprocessamento, indústria, hospitais, centros de pesquisa e instalações de armas nucleares;
- A disposição no fundo dos oceanos de rejeitos radioativos, provenientes principalmente de instalações nucleares e que são normalmente estocados em tambores de aço e concreto;
- Acidentes nucleares, como o de Chernobyl, que causou uma deposição direta de radionuclídeos em mares locais e áreas próximas; e
- Os acidentes marinhos envolvendo materiais radioativos, navios ou submarinos nucleares naufragados, queda de aviões contendo material radioativo ou armas nucleares e a reentrada na atmosfera de satélites que contenham combustível nuclear.

Apesar da grande contribuição de radionuclídeos para os oceanos ser originário do *fallout*[2] radioativo das explosões nucleares, os acidentes nucleares sempre apresentaram um impacto maior na opinião pública, devido não somente aos problemas ambientais, mas também às questões políticas e o socioeconômicas, pois causaram graves crises sociais nos países em que ocorreram. No caso da ex-URSS, o acidente de Chernobyl foi o estopim da perestroika e de todo o processo de abertura política que levou a criação da Federação Russa.

O acidente de Chernobyl, ocorrido em 26 de abril de 1986 na cidade de mesmo nome, localizada na Ucrânia, foi o maior acidente nuclear da história. As instabilidades meteorológicas na época do acidente resultaram em uma deposição significativa de material radioativo (*fallout*) em grandes áreas do oeste da Europa, alcançando dimensões troposféricas, espalhando-se por todo o Hemisfério Norte (Aarkrog, 2003).

Aproximadamente 3,7 Ebq (exabecquerel – $10^{17}$ Bq) de materiais radioativos com diferentes características nucleares e tempos de meia-vida que variaram de minutos a milhares de anos foram liberados do núcleo do reator e se espalharam por toda Europa, Ásia e América do Norte. Os níveis de radioatividade lançados na atmosfera superaram em 400 vezes a explosão da bomba atômica em Hiroshima (IAEA, 1997). Os mares europeus próximos ao acidente foram os mais impactados, dentre eles o mais atingido foi o mar Báltico, cujo nível de contaminação por $^{137}$Cs foi da ordem de 4,5 PBq (petabecquerel – $10^{15}$ Bq). Esse mar foi a principal fonte de entrada de 137Cs no nordeste do Atlântico (Aarkrog, 2003).

Outro acidente nuclear de grande relevância ambiental foi o de Fukushima, em abril de 2011. Após o tsunami que devastou parte da região costeira do Japão, uma grande quantidade de material radioativo foi liberada no Oceano Pacífico, sendo que os mais importantes foram o $^{137}$Cs ($t_{1/2}$ = 30 anos), $^{134}$Cs ($t_{1/2}$ = 2,1 anos) e $^{131}$I ($t_{1/2}$ = 8 dias). Liberações atmosféricas de $^{137}$Cs foram da ordem de 15 PBq, enquanto que as descargas de rejeitos líquidos alcançaram níveis de até 27 PBq. Os níveis de radioatividade obtidos na água do mar do Oceano Pacífico atingiram valores próximos à epoca do fallout nuclear proveniente dos testes nucleares atmosféricos, durante os anos 60 (Povinec *et al.*, 2013).

[2] O *fallout* radioativo ou "nuvem radioativa" é uma das principais vias de contaminação dos oceanos por radionuclídeos que são distribuídos por todo o globo terrestre por movimentos de ar que ocorrem na atmosfera. Esta forma de contaminação ocorre devido aos testes de armas nucleares na atmosfera. Dependendo da potência do artefato nuclear, o *fallout* pode ser troposférico (no mesmo Hemisfério) ou estratosférico (em todo o globo terrestre).

A Figura 6 apresenta um comparativo da concentração de radionuclídeos naturais ($^{40}K$ e $^{238}U$) em relação aos níveis de $^{137}Cs$ nos oceanos do mundo. Verifica-se que em termos de atividade, a radioatividade artificial encontra-se em uma quantidade muito menor que a radioatividade de $^{137}Cs$, contudo a figura não leva em consideração os efeitos danosos da radioatividade artificial no meio ambiente e nesse caso, o ambiente marinho.

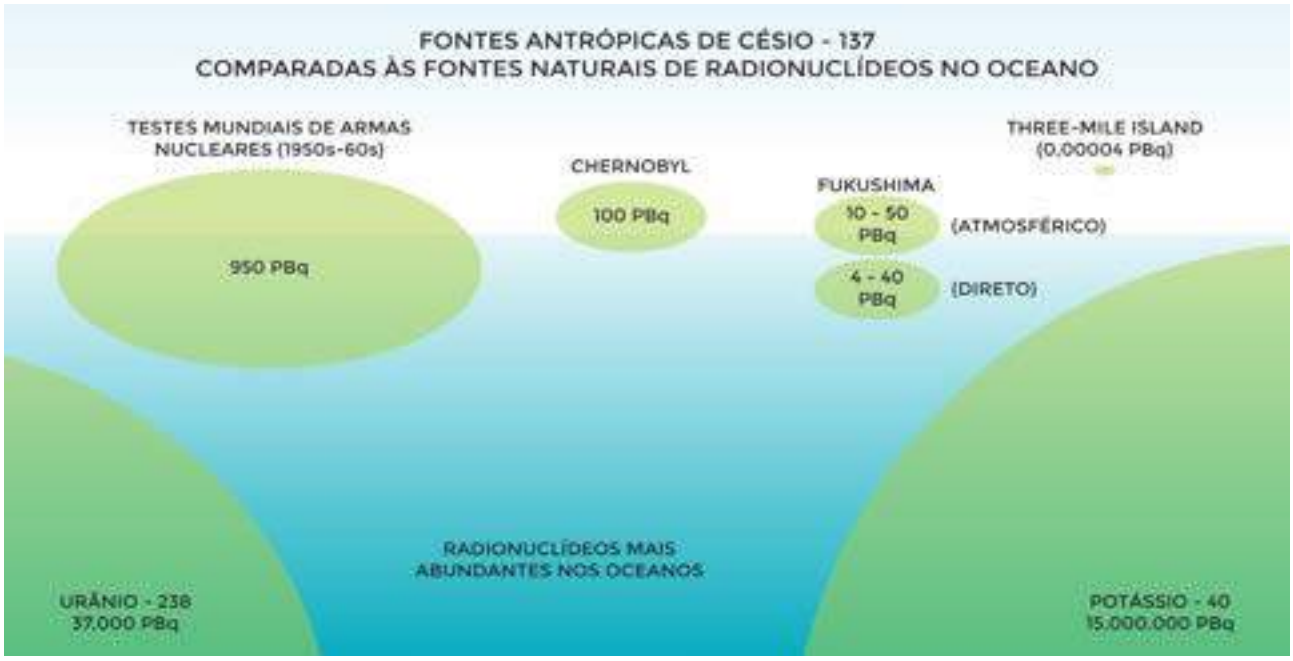



**FIGURA 6. Comparação dos inventários de dois radionuclídeos naturais (Potássio-40 e Urânio-238), com o Césio-137 produzido por diversas fontes antrópicas. Os inventários são apresentados em PBq ($10^{15}$ Becqueréis, 1 Bq = um decaimento radioativo por segundo).** *Fonte: modificado de Buesseler, 2014.*

Em consequência dos acidentes nucleares como o de Chernobyl, principalmente, o número de usinas nucleares no mundo tem sido estável, com um total aproximado de 420 instalações nucleares em funcionamento (Fig. 7). Entretanto, a quantidade de energia produzida é praticamente a mesma, desde a década de 80, mostrando sua eficiência energética deste tipo energia, além de contribuir para diminuição do aquecimento global decorrente do uso de termelétricas. A energia nuclear contribui atualmente com cerca de 15% da energia produzida no mundo.

**FIGURA 7. Capacidade de geração de energia nuclear entre 1955 a 2016 (área azul, eixo esquerdo). Adições anuais (barras vermelhas) e capacidade de reatores desativados (barras amarelas).** *Fonte: https://www.carbonbrief.org/mapped-the-worlds-nuclear-power-plants.*

A partir do que foi colocado, a energia nuclear sempre será alvo de questionamentos, apesar de ser considerada uma energia verde, ela possui problemas, principalmente quando os acidentes ocorrem, devido à alta periculosidade da radiação e ao processo de contaminação que ocorre em pequenas quantidades e atingem todo o planeta. Uma alternativa é o uso da fusão nuclear, semelhante ao que é realizado no Sol, onde dois núcleos são "fundidos" formando um novo elemento e liberando energia muito maior do que o processo de fissão. Acredita-se que ao longo da metade desse século, esse tipo de energia poderá estar disponível.

## 4. Considerações finais

- Metais existem em concentração natural na crosta e podem ser considerados micronutrientes essenciais às atividades metabólicas;
- Metais são tóxicos aos organismos e persistentes no ambiente;
- As principais fontes naturais são o intemperismo das rochas e atividades vulcânicas;
- A ação antrópica pode adicionar metais através de fertilizantes, descarte de resíduos e atividades industriais;
- A toxicidade do metal é definida pela espécie química que o elemento se encontra
- Quando introduzidos nos sistemas aquáticos, os metais participam de complexas reações físico químicas, dependendo das condições do meio;
- A concentração de metais no sedimento é dependente de atributos geoquímicos como o tamanho do grão, o conteúdo de matéria orgânica e a quantidade de carbonatos;
- Processos de bioacumulação e biomagnificação são dependentes da especiação química e de características biológicas e fisiológicas;
- Elementos radioativos são aqueles que apresentam instabilidade energética em seu núcleo;
- O tempo de meia-vida é o tempo necessário para uma certa quantidade de nuclídeos decaia para metade da quantidade inicial;
- Os radionuclídeos podem ser originários de fontes naturais e humanas;
- Devido a suas características, elementos radioativos apresentam grande utilidade, podendo ser utilizados na fabricação de material bélico, geração de energia e materiais hospitalares; e
- Quando inseridos nos sistemas aquáticos, os radionuclídeos podem ser dispersos, diluídos, redistribuídos e acumulados em compartimentos específicos do ecossistema.

## Referências Bibliográficas

AARKROG, A. 2003. Input of anthropogenic radionuclides in the World Ocean. Deep-Sea Research, 50, 2597-2606.

ANGELI, J. L. F., RUBIO, B., KIM, B. S. M., FERREIRA, P. A. L., SIEGLE, E., FIGUEIRA, R. C. L. 2019. Environmental changes reflected by sedimentar geochemistry for the last one hundred years of a tropical estuary. Journal of Marine Systems, 189, 36-49.

BJERRUM, N., BJERRUM, S. 1936. Inorganic chemistry, 3rd, London, Danish.

BONIFACIO, E., FALSONE, G., PIAZZA, S. 2010. Linking Ni and Cr concentrations to soil mineralogy: Does it help to assess metal contamination when the natural background is high? Journal of Soils and Sediments, 10(8), 1475-1486.

BUESSELER, K. 2014. O. Fukushima and ocean radioactivity. Oceanography 27(1)92-105.

BURGER, M J., GOCHFELDT, M. 2004. Marine birds as sentinels of environmental pollution. EcoHealth, 1, 263-274.

CALMET, D., SJOBLOM, K. L. 1992. Inventory of radioactive material entering the marine environment. IAEA Bull., 3, 25-28.

CAMPOS, M. C. C. 2010. Atributos dos solos e riscos de lixiviação de metais pesados em solos tropicais. Ambiência, 6 (3), 547-565.

CHEUNG, M. S., WANG, W. 2008. Analyzing biomagnification of metals in different marine food webs using nitrogen isotopes. Mar. Pollut. Bull., 56, 2082-2105.

CREWS, H., CARUSO, J., HEUMANN, K. 2003. Handbook of elemental speciation: techniques and methodology. John Wile & Sons Ltd.

DRESSELHAUS, M. S.; THOMAS, I. L. 2001. Alternative energy technologies. Nature, 414, 332-337.

DUFFUS, J. H. 2002. Heavy metals – A meaningless term? Pure and applied Chemistry, 74(5),793-807.

EISLER, T. 2010a. Compendium of trace metals in marine biota. Volume 1: Plants Invertebrates. Elsevier Publishing, 610p.

EISLER, T. 2010b. Compendium of trace metals in marine biota. Volume 2: Vertebrates. Elsevier Publishing, 500p.

FAO (Food and Agriculture Organization), Compilation of Legal Limits for Hazardous.

Substances in Fish and Fishery Products. FAO Fishery Circular No. 464, p. 5–100, 1983.

HAWKES S. J. 1997. What is heavy metal? Journal of Chemical Education, 74(11), 1374.

FIGUEIRA, R. C. L., CUNHA, I. I. L. 1998. A contaminação dos oceanos por radionuclídeos antropogênicos. Química Nova, 21:73-77.

FIGUEIRA, R. C. L., 2000. Inventário de radionuclídeos artificiais em água do mar e sedimentos da costa sul do Brasil. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 153 p.

FEROCI, G., BADIELLO, R., FINI, A. 2005. Interactions between different selenium compounds and zinc, cadmium and mercury. J. Trace-elements Med. Biol., 18: 227–234.

FÖRSTNER, U., PATCHINEELAM, S. R. 1981. Chemical associations of metals in marine deposits with special reference to pollution in the German North Sea. Reun. Cons. Int. Explor. Mer, 181:49-58.

FRANCESCONI, K. A. 2010. Arsenic species in seafood: Origin and human health implications. Pure Appl. Chem., 82:373-381.

IAEA. 1997. Ten years after Chernobyl: What do we really know? International Atomic Energy Agency – Division of Public Information, Vienna, Austria.

ISLAM, M. S., TANAKA, M. 2004. Impacts of pollution on coastal and marine ecosystems including coastal and marine fisheries and approach for management: a review and synthesis. Mar. Pollut. Bul., 48: 624–649.

KABATA-PENDIAS, A., PENDIA, H. 2001. Trace elements in Soils and Plants, 3ed. CRC Press LLC.

KARADEDE-AKIN, H., ÜNLÜ, E. 2007. Heavy metal concentration in water, sediment, fish and some benthic organisms from Tigris ricer, Turkey. Environmental Monitoring and Assessment, 131:323-337.

LINDSAY, W. L. 1979. Chemical Equilibria in soils. John Wiley and Sons. New York.

LIVINGSTON, H. D.; POVINEC, P. P. Anthropogenic marine radioactivity. Ocean & Coastal Management, 43(8-9), 689–712, 2000.

LONG, E. R. MACDONALD, D. D., SMITH, S. L., CALDER, F. D. 1995. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. Environmnetal Management, 19 (1), 81-97

LOVELAND, W. D., MORRISSEY, D. J., SEABORG, G. T. 2006. Modern nuclear chemistry. 1. ed. Hoboken: John Wiley & Sons.

LUOMA, S. N., RAINBOW, P. S. 2005. Why is metal bioaccumulation so variable? Biodynamics as a unifying concept. Environ. Sci. Technol., 39: 1921–1931.

MAPPED: The world's nuclear power plants. Nuclear, March 8, 2016. Disponível em: <https://www.carbonbrief.org/mapped-the-worlds-nuclear-power-plants> Acesso em 10/08/2020

MATTIGOD, S. V., SPOSITO, G., PAGE, A. L. 1981. Factors affecting the solubilities of trace metals in soils. In: Baker, D. E. (Ed.) Chemistry in the soil environmnet. ASA Special publication N°40 Amer. Soc. Agronomy, Madison, WI.

MAZZILLI, B. P., MÁDUAR, M. F., CAMPOS, M. P. 2011. Radioatividade no meio ambiente e avaliação de impacto radiológico ambiental, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. 92p.

MACDONALD, D. D., CARR, R. S., CALDER, F. D., LONG, E. R., INGERSOLL, C. G. 1996. Development and evaluation of sediment quality guidelines for Florida coastal waters. Ecotoxicology, 5(4), 253-278.

MIRLEAN, N., MEDEANIC, S., GARCIA, F. A., TRAVASSOS, M. P., BAISCH, P. 2012. Arsenic enrichment in shelf and coastal sediment of the Brazilian subtropics. Cont Shelf Res. 35, 129–36.

NYFFELER, F., CIGNA, A. A., DAHLGAARD, H., LIVINGSTON, H. D. 2003. Radionuclides in the Atlantic Ocean: a survey. In: GUÉGUÉNIAT, P.; GERMAIN, P.; MÉTIVER, H. Radionuclides in the ocean: inputs and inventories. 1. ed. Les Ulis: EDP Sciences, 2003. Cap. 1, p. 1-28.

PACYNA, J. M., SCHOLTZ M. T., LI, Y. F. 1995. Global budget of trace metal sources. Environmental Reviews, 3(2), 145-159.

POVINEC, P. P., GERA, M., HIROSE, K., LUJANIENÉ, G., NAKANO, M., PLASTINO, W., SYKORA, I., BARTOK, J., GAZÁK, M. 2013. Dispersion of Fukushima radionuclides in the global atmosphere and ocean. Applied Radiation and Isotopes, 81, 383-392.

RANKAMA, K. Isotope geology. 1. ed. Oxford: Pergamon Press, 1954.

RODRIGUES, E., VANI, G. S., LAVRADO, H. P. 2007. Nitrogen metabolism of the Antarctic bivalve Laternula elliptica (King & Broderip) and its potential use as biomarker. Oecol. Bras., 11, 37-49.

SINGH, N. P. 1997 Is plutonium really a threat to man and his environment ? J. Radioanal. Nucl. Chem., 226, 1/2,37-40.

SOARES, J. A. 1992. Uma contribuição ao estudo do ciclo geoquímico dos metais pesados no ambiente marinho: determinação de cromo total em sedimentos da região da Enseada do Flamengo (SP) e Saco do Mamangua (RJ). Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. Instituto Oceanográfico. São Paulo, SP. 139p.

SOVACOOL, B. K. Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: a critical survey. Energy Policy, v. 36, p. 2940-2953, 2008.

TREVIZANI, T. H., DOMIT, C., VEDOLIN, M. C., ANGELI, J. L. F., FIGUEIRA, R. C. L. 2019. Assessment of metal contamination in fish from estuaries of southern and southeastern Brazil. Environ. Monit. Assess., 191, 308.

UNEP (United Nations Environment Programme), 1984. Radioactivity in the south Pacific. UNEP Regional seas reports and studies n° 40. UNEP, 1984

UNEP (United nations Environment Programme), 1995. Manual for the geochemical analyses of marina sediments and suspended particulate matter. N° 63, 85p.

WEIS, J. Marine Pollution. What everyone needs to know? 2015. Ed: Oxford University Press, New York, NY. 273p.

ZHOU, G. SUN, B., ZENG, D., WEI, H., LIU, Z., ZHANG, B. 2014. Vertical distribution of trace elements in sediment cores from major rivers in east China and its implication on geochemical background and anthropogenic effects. Journal of Geochemical Exploration, 139, 53-67.

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 19*

# BIOLUMINESCÊNCIA MARINHA

*Gabriela Verruck de Moraes & Anderson Garbuglio de Oliveira*

CITAÇÃO SUGERIDA: MORAES, Gabriela Verruck de; OLIVEIRA, Anderson Garbuglio de. Bioluminescência marinha. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 19: p. 403-422.

# Bioluminescência Marinha

*Gabriela Verruck de Moraes & Anderson Garbuglio de Oliveira*

## 1. Introdução

A bioluminescência pode ser definida como o processo de emissão de luz fria e visível por organismos vivos. Esse fenômeno tem sido estudado em uma grande gama de grupos e táxons, tanto em termos de suas reações químicas, quanto em aspectos evolutivos e ecológicos (Haddock *et al*., 2010). Essa habilidade está presente desde bactérias e protistas unicelulares até organismos mais complexos, como cefalópodes (lulas, polvos, entre outros) e elasmobrânquios (tubarões e raias) (Haddock *et al*., 2010).

Espécies bioluminescentes são encontradas na maioria dos filos marinhos, de bactérias a peixes. Dos mais de 700 gêneros conhecidos por conter espécies capazes de emitir luz, a maioria (cerca de 80%) reside nos oceanos (Shimomura, 2006). Esses organismos ocupam uma grande diversidade de ambientes, sendo encontrados de regiões polares até tropicais, tanto em áreas superficiais como no leito oceânico (Harvey, 1957; Herring, 1987; Haddock *et al*., 2010). Entre os organismos bioluminescentes, a maioria foi observada entre 200 e 800 m de profundidade, o que inclui a zona disfótica dos oceanos (sem ou quase sem luz) (Widder, 2010), profundidade na qual acredita-se que 95% desses organismos possuam a capacidade de produzir e emitir luz (Pieribone & Gruber, 2006; Haddock, 2006).

Assim como sua distribuição diversificada, há uma impressionante gama de cores, intensidades e cinéticas. Como a bioluminescência marinha evoluiu em oceano aberto, grande parte dos organismos luminescentes emitem luz de cor azul, centrada no comprimento de onda que tem a capacidade de maior penetração na água do mar ($\lambda_{máx}$ = 475 nm) (Widder, 1999). Contudo, há também outras cores: o verde é o mais comum depois do azul, principalmente nas espécies bentônicas e costeiras, provavelmente porque a maior movimentação da água nesses ambientes favorece a dispersão do azul e, portanto, a melhor transmissão de maiores comprimentos de onda (Herring, 1983; Johnsen *et al*., 2004; Widder 2010). Por último, as cores violeta, amarelo, laranja e vermelho são as mais raras e, na maioria dos casos, com sua função e química desconhecidas (Herring, 1983; Widder *et al*., 1983; Latz *et al*., 1988; Haddock & Case, 1999; Widder, 2010; Shimomura 2006).

Diante de tamanha presença e diversificação ao longo dos organismos e da natureza, é natural pensar que esse fenômeno foi descrito há muito tempo. Os primeiros registros tratando da bioluminescência datam de mais de 3000 anos atrás, em canções, poemas e mitos chineses, como em histórias de que a "luz dos oceanos" vinha de estrelas que caíram ali (Anctil, 2018). No entanto, tais registros tornaram-se mais presentes a partir de Aristóteles (384-322 a.C.), quem notou que a luz era de fato produzida pelos organismos, não sendo um processo meramente aleatório, e que a sua emissão não vinha acompanhada de calor (Aristóteles, 350 a.C). Ele também relatou a presença de luz em carnes em putrefação, a qual hoje sabe se dar por bactérias bioluminescentes que infectam a matéria orgânica. Além disso, ele apontou vaga-lumes como seres luminescentes e descreveu a luz emitida ao agitar a água do mar, mostrando como a bioluminescência marinha já era notada desde aqueles tempos (Aristóteles, 350 a.C).

Outros registros da luminescência foram também feitos por Plínio, o Velho (23-79 a.C.) em seu livro *Naturalis Historia*, o qual, junto com diversos outros assuntos, trata também de uma grande gama de organismos e observações feitas a respeito da emissão de luz, incluindo a do molusco (bivalve) *Pholas dactylis*, um organismo que seria essencial na descoberta do processo químico da emissão de luz ao ser estudado muito posteriormente por Dubois (Anctil, 2018).

Em um salto na história, entre 1516-1565, Conrad Gesner, professor de História Natural e Medicina em Zurique, na Suíça, escreveu o primeiro livro dedicado à bioluminescência: *De Lunariis*. Situado em um contexto de Idade Média e de repúdio ao pensamento lógico e crítico, o livro, além das suas diversas observações notáveis, também tratava de rochas, plantas e aves com capacidade de produzir e emitir luz (Gesner, 1555). Diante disso, foi somente com a quebra de tais impedimentos ao criticismo e à racionalização, que a ciência começou a florescer da forma mais próxima como hoje é conhecida.

A partir do meio do século XVII, as teorias a respeito do que é luz e como ela se comporta começaram a ser mais debatidas e reformuladas, usando não só, mas também, observações feitas com organismos bioluminescentes (Lee, 2008). Em um processo análogo, o século seguinte foi banhado por descobertas como a da molécula de oxigênio, emissão de luz e combustão, fatores os quais foram essenciais para as descobertas que viriam a seguir a respeito do processo químico da bioluminescência (Anctil, 2018). Assim, foi no século XIX que a bioluminescência ganhou espaço nos estudos científicos, primeiramente com a classificação dos organismos responsáveis pela "luz dos oceanos", os dinoflagelados, e a observação de que o estímulo mecânico promovia a emissão, levando às primeiras hipóteses ecológicas de uma função da bioluminescência: uma função de proteção (Quatrefages, 1850). Assim, foi a partir da análise da função ecológica da bioluminescência marinha que outros organismos também passaram a serem observados sob esse viés, como os vaga-lumes, para os quais a bioluminescência foi proposta como forma de comunicação entre indivíduos para reprodução (Quatrefages, 1850). Associado a isso, os estudos químicos também avançaram com as primeiras observações da quimiluminescência de um composto orgânico sintético relacionado à lofina (2,4,5-trifenilimidazol).

A lofina foi preparada pela primeira vez por Radziszewski em 1877, após a qual, ele descreveu uma ampla gama de compostos orgânicos sintéticos, incluindo certos aldeídos e amidas (Radziszewski, 1877; Wiedemann, 1888). Nesta fase, em 1888, Wiedemann classificou várias formas de luminescência, incluindo quimiluminescência, e as diferenciou da incandescência (Wiedemann, 1895a; Wiedemann, 1895b; Wilson & Wilson's, 1992), o que levou à ideia de que a bioluminescência seria um processo químico de emissão de luz (quimiluminescência) ocorrendo dentro de um organismo vivo (Dubois, 1885).

Esta ideia foi comprovada por Raphaël Dubois, farmacêutico francês que no final do século estudou o bivalve luminescente *Pholas dactylis* (Dubois, 1885), observado mais de 1800 anos antes por Plínio, o Velho (Lee, 2008), além de um besouro do gênero *Pyrophorus* (Dubois, 1885). A partir de alguns desses besouros, Dubois realizou um dos mais importantes experimentos no campo da bioluminescência, que contribuiu enormemente para o início da compreensão molecular desse fenômeno. Ele preparou dois extratos usando alguns dos *Pyrophorus* coletados, de maneira que um desses extratos foi feito em água fervente, enquanto o outro em água fria. Durante o processo de preparação dos extratos ele observou apenas uma fraca emissão de luz no extrato frio, ao passo que no extrato quente nada foi observado. Em seguida, Dubois aguardou que ambos os extratos atingissem a temperatura ambiente, e misturou em um terceiro frasco uma porção do extrato frio e do extrato quente. Quando porções desses dois extratos eram misturadas a emissão de luz era restabelecida com intensidade (Dubois, 1885).

Baseado nesses resultados, Dubois concluiu que havia fatores diferentes responsáveis por essa emissão de luz. O extrato quente estava enriquecido com um fator ou substrato, que não era destruído pela alta temperatura, enquanto no extrato frio havia um fator proteico (uma enzima, inativada no extrato quente), porém mantida ativa no extrato frio. Dessa forma, ao se misturar o substrato e a enzima a emissão de luz era obtida (Dubois, 1885). À essa enzima, ele deu o nome de "luciferase" (Dubois, 1887) e ao seu substrato, "luciferina" fazendo referência à palavra latina *Lucifer* (carreador, portador da luz) indicando respectivamente enzima e substrato portadores da luz.

Dando seguimento a Dubois, Edmund Newton Harvey (1887–1959), zoólogo norte americano, Professor de Zoologia da Universidade de Princeton, EUA, se encantou com a bioluminescência marinha em uma viagem e graças às suas descobertas relacionadas a esse fenômeno, se tornou um das maiores referências mundiais no campo da bioluminescência, ganhando grande destaque a partir da década de 20 (Anctil, 2018). Harvey começou a estudar a *Cypridina*, um Ostracoda (Crustáceo) bioluminescente, além de outros organismos, incluindo o molusco marinho *Pholas dactylis*, enviado a ele pelo próprio Dubois (Anctil, 2018).

Comparando tais organismos e seus resultados com os de Dubois, ele concluiu que a "luciferina" e "luciferase", eram, na verdade nomes genéricos, ou seja, que essas substâncias não seriam iguais para todos os organismos luminosos, mas que, na verdade, cada espécie possuiria substratos e enzimas luminescentes próprias. Assim, os termos "luciferina" e "luciferase" representam estruturas com função de permitir a bioluminescência nos organismos de forma ampla. Assim, Harvey concluiu que cada espécie ou cada grupo próximo evolutivamente de organismos possui um certo tipo de luciferina e luciferase (Harvey, 1922), assim, com o tempo, surgiram nomes específicos das luciferinas e luciferases para cada espécie estudada, ou então, elas são referidas como "luciferase do vaga-lume", por exemplo.

Ainda, Harvey adentrou nas razões para a emissão de luz ter diferentes cores, além da que já era conhecida: a de que o órgão emissor de luz possuía filtros que alteravam o comprimento de onda emitido (Harvey, 1924). Não obstante, o pesquisador explorou a razão química para essa mudança quando não havia um filtro envolvido. Com isso, ele também obteve a surpreendente descoberta de que as luciferases seriam as principais responsáveis pelas diversas cores da luz emitidas (Harvey, 1925), além de ter notado a presença da fluorescência em organismos bioluminescentes, abrindo um caminho que revolucionaria a ciência anos depois, pelo farmacêutico japonês, Osamu Shimomura (Anctil, 2018).

Um pouco depois dessas suas descobertas, Harvey e um de seus alunos, Peter A. Snell, fizeram diversas observações quanto ao comportamento da emissão de luz em vários organismos, que levaram às primeiras noções evolutivas da bioluminescência (Harvey, 1932). A grande diversidade das cores e das formas de emissão, além da presença de diferentes luciferinas e luciferases, levaram-no a concluir que a bioluminescência teria evoluído independentemente muitas vezes, o que hoje se sabe ser verdade (Haddock *et al.*, 2010), e, mais do que isso, baseado no papel essencial do oxigênio no processo químico de bioluminescência, Harvey sugeriu que esse fenômeno teria se desenvolvido por meio de mudanças em um mecanismo já existente nas células (Harvey, 1932).

Durante a década de 1940, William D. McElroy, Professor na Universidade Johns Hopkins (EUA), dedicou-se ao estudo da bioluminescência em vaga-lumes. Replicando com sucesso os experimentos dos extratos quente e frio de Dubois, ele descobriu também que a adição de ATP (adenosina trifosfato) estimulava consideravelmente a emissão de luz *in vitro*. Ademais, estando a molécula de ATP envolvida no metabolismo energético, McElroy assumiu que a luciferina do vaga-lume "poderia atuar nos sistemas de transporte de fosfato e elétrons", verificando também mais tarde que magnésio era necessário, além do ATP, para que a reação da luz ocorresse (McElroy & Strehler, 1949; Anctil, 2018).

Por essa proposta, a molécula de luciferina reagiria com o ATP e luciferase na presença de $Mg^{2+}$ levando a formação de um complexo luciferase-luciferina-amp (adenosina monofosfato). Em seguida, a luciferina nesse complexo seria oxidada pela ação do oxigênio molecular com concomitante produção de luz. Com a descoberta do sistema de emissão de luz dos vaga-lumes, foi possível notar que, para esse sistema, a quantidade de ATP e luciferina presente era proporcional à luz emitida (Seliger & McElroy, 1959). Ou seja, quanto maiores as concentrações de ATP e luciferina, maior a intensidade da luz emitida. A partir disso, sendo o ATP uma molécula de energia essencial ao metabolismo dos organismos vivos, esse sistema permitiu a criação de kits para diagnósticos de doenças metabólicas, resultando em uma das primeiras aplicações advindas de estudos fundamentais da bioluminescência.

No início da década de 1960, o pesquisador japonês Osamu Shimomura, vindo do laboratório do Professor Hirata, na Universidade de Nagoya, no Japão, onde havia estudado extensivamente a bioluminescência do ostracoda *Vargula hilgendorfii*, iniciou seus trabalhos na Universidade de Princeton sob a supervisão de Frank Johnson. Johnson havia assumido o laboratório de Harvey e impressionado com as habilidades de Shimomura e com o seu sucesso em purificar e cristalizar a luciferina da *V. hilgendorfii*, convidou Shimomura para trabalhar com ele nos Estados Unidos (Shimomura, 2008; Tsuji, 2010).

Em sua carreira, Shimomura desvendou sistemas que estavam há muitos anos sem respostas e desenvolveu novas formas de realizar testes de emissão de luz (Shimomura & Johnson, 1966; Nicolas *et al.*, 1982; Anctil & Shimomura, 1984), além de ter cunhado o termo "fotoproteína" para designar um complexo estável formado pela ligação luciferina-luciferase (Shimomura & Johnson, 1966). Além disso, outro grande feito de Shimomura veio quando Johnson ofereceu a ele a possibilidade de estudar a água-viva *Aequorea victoria*, a qual renderia importantes descobertas no campo da bioluminescência.

A partir de grandes quantidades coletadas de *A. victoria*, Shimomura foi capaz de isolar a fotoproteína responsável pela emissão de luz nesse animal, que recebeu o nome de "aequorina" (Shimomura, 2005). Diante dessa descoberta, cinco anos após o isolamento da aequorina, Ridgway & Ashley (1967) desenvolveram as aplicações utilizando essa fotoproteína. De fato, a aequorina utiliza $Ca^{2+}$ como cofator, dada a atuação desse esse íon em diversas atividades fisiológicas, desde atividade muscular até a transmissão de impulsos nervosos, Ridgway e Ashley desenvolveram metodologias para medir diretamente $Ca^{2+}$ e seus efeitos nos músculos.

Paralelamente, Shimomura também notou que a água-viva *A. victoria* emitia luz verde *in vivo*, mas que, *in vitro*, seus extratos produziam luz azul. Dessa maneira, havia necessidade de um outro fator capaz de modular a luz da cor azul para a verde. Sabendo disso, quando o pesquisador descobriu, em 1961, uma proteína que ficava associada à aequorina e que fluorescia na cor verde (Shimomura *et al.*, 1962), Shimomura percebeu que ela deveria ser a responsável pela emissão final da luz verde produzida no animal vivo (Johnson *et al.*, 1962). Assim, essa proteína foi chamada de GFP (Proteína Verde Fluorescente, do inglês, *Green Fluorescent Protein*) (Morin & Hastings, 1971).

Essa proteína, a princípio, não recebeu muita atenção, mas nos anos seguintes, os trabalhos de pesquisadores como Martin Chalfie e Roger Tsien, fizeram com que essa proteína se tornasse revolucionária para a Medicina (Shimomura, 2008). A GFP passou a ser clonada e expressa em organismos vivos por Chalfie e colaboradores (1994), tornando-se então um marcador de expressão gênica extremamente utilizado atualmente (Shimomura, 2005). Tsien colaborou no processo de compreender como a GFP fluorescia (Tsien, 1998), além de ter desenvolvido

metodologias para alterar a cor da fluorescência emitida (vermelho, azul, amarelo), permitindo aos cientistas observar diferentes processos biológicos ao mesmo tempo (Matz *et al.*, 1999; Matz *et al.*, 2002). Assim, tamanha descoberta rendeu aos três estudiosos, Shimomura, Chalfie e Tsien, o Nobel de Química em 2008 (Lee, 2017).

O trabalho desenvolvido por Shimomura mostra a importância da pesquisa básica no mar, que permitiu o desenvolvimento de uma gama de utilizações, sobretudo biotecnológicas. Baseado nessas grandes descobertas e nas possibilidades de aplicações, a bioluminescência marinha tem se tornado cada vez mais um campo de estudo extremamente relevante com ainda muito a ser explorado.

## 2. Aspectos químicos da bioluminescência marinha

Quimicamente, a bioluminescência é um fenômeno produzido pela oxidação de uma molécula emissora de luz (genericamente chamada de luciferina) catalisada por enzimas (luciferases), resultando em fótons de luz visível. Em alguns organismos, o complexo enzima-substrato (luciferase-luciferina) é mais estável do que seus constituintes dissociados, e é capaz de emitir luz proporcionalmente à quantidade da enzima presente. Esse complexo recebe a denominação de fotoproteína (Wilson & Hastings, 1998).

A química de todas as reações de bioluminescência conhecidas permanece ainda com diversas questões em aberto. Isso não é surpreendente, considerando que os mecanismos de apenas algumas das reações mais simples são entendidos ao nível molecular. Na quimiluminescência e bioluminescência, o envolvimento dos processos de transferência de elétrons continua sendo uma área de discussão sem respostas definitivas. Ademais, apesar de diversas luciferases e fotoproteínas terem sido isoladas e caracterizadas para diferentes organismos bioluminescentes marinhos nas últimas décadas, ainda existem diversos sistemas bioluminescentes que carecem de estudos mais aprofundados (Wilson & Hastings, 1998).

Historicamente, o termo "luciferina" nunca foi precisamente definido, e originalmente, a palavra significou uma substância termoestável (não proteica) encontrada em extratos preparados a partir de fotóforos (órgãos especializados onde se dá o processo químico de produção e/ou emissão de luz) de organismos bioluminescentes. Entretanto, com base nas informações atualmente disponíveis, parece apropriado definir luciferina como um termo geral para designar um composto orgânico existente em um organismo luminoso, e cuja oxidação fornece energia para um processo de emissão de emissão de luz, normalmente catalisado por uma luciferase específica. Além disso, é um critério importante que uma luciferina seja capaz de emitir fótons proporcionalmente à sua quantidade em condições padronizadas (Shimomura, 2006).

Quatro diferentes moléculas de luciferinas são responsáveis pela maioria das reações luminescentes nos oceanos (Fig. 1), embora existam sem dúvidas muitos outros sistemas bioluminescentes cujos componentes químicos ainda não foram determinados. Enquanto luciferinas são conservadas, luciferases e fotoproteínas são derivadas de muitas linhagens evolucionárias. Ainda, entre os organismos marinhos bioluminescentes já estudados, destaca-se a molécula de celenterazina, que é a luciferina em ao menos nove diferentes filos, abrangendo protozoários, águas-vivas, crustáceos, moluscos, quetognatas e vertebrados (Haddock *et al.*, 2010).

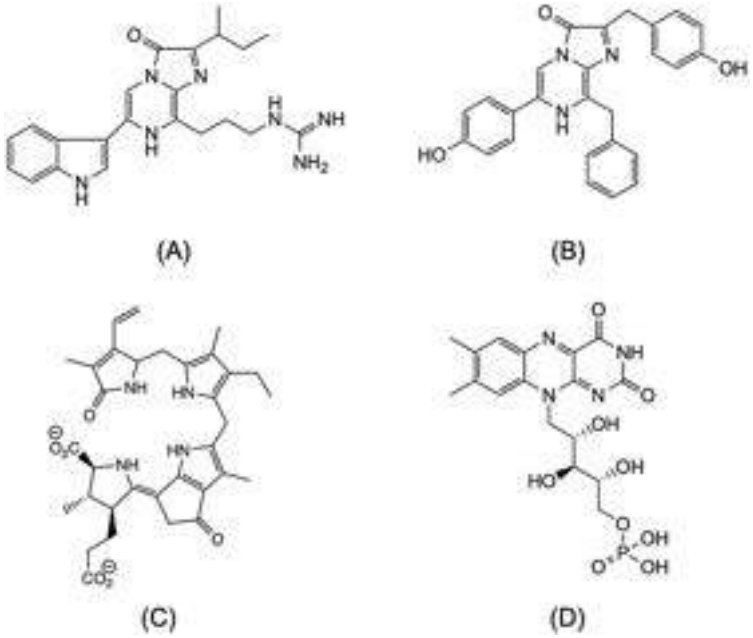



**FIGURA 1.** Estruturas dos quatro grupos de luciferinas encontradas em organismos marinhos: (A) vargulina, utilizada por ostrácodas e alguns peixes; (B) celenterazina, luciferina presente em ao menos nove filos diferentes; (C) luciferina de dinoflagelados, encontrada também em crustáceos luminescentes; e (D) FMN (flavina mononucleotídeo) utilizada por bactérias.

O nome celenterazina foi originalmente dado devido ao fato dessa molécula ter sido isolada inicialmente a partir dos celenterados bioluminescentes *Aequorea* e *Renilla* (Shimomura & Johnson, 1975), apesar de ser conhecida sua ocorrência em muitos outros organismos. A explicação para essa convergência é que nem todos esses organismos estão sintetizando a celenterazina, mas muitos deles adquirem essa molécula através de sua alimentação (Tsuji *et al.*, 1972; Harper *et al.*, 1999). Como as luciferinas estão presentes em ambos organismos marinhos não luminosos e luminosos (Shimomura *et al.*, 1980; Thompson *et al.*, 1997), elas são relativamente fáceis de serem obtidas. Porém, como não são conhecidas as rotas biossintéticas para nenhuma luciferina marinha até o presente momento, suas origens permanecem desconhecidas (Haddock *et al.*, 2010).

Quimicamente, o mecanismo geral de emissão de luz envolvendo a celenterazina é iniciado pela peroxidação dessa molécula (na posição C2, Fig. 2) através da adição de oxigênio molecular por uma luciferase. Em seguida, a celenterazina peroxidada se decompõe em celenteramida, liberando $CO_2$ e produzindo a energia necessária para a emissão de luz. Para o mecanismo de decomposição do peróxido, duas vias diferentes podem ser consideradas. Uma delas envolvendo a decomposição concertada da dioxetanona (Fig. 2), que é a proposta mais aceita para explicar a quimiluminescência/bioluminescência em diversos sistemas, como por exemplo em vaga-lumes (Hopkins *et al.*, 1967; McCapra *et al.*, 1967) e no ostrácoda Cypridina (Shimomura & Johnson, 1971). A outra possibilidade envolveria, conforme descrito por Shimomura (2006), um mecanismo de "decomposição linear" proposto inicialmente por DeLuca e Dempsey (1970) também para o sistema bioluminescente de vaga-lumes, porém esta hipótese nunca foi comprovada.

Ainda, no caso da bioluminescência do crustáceo *Oplophorus*, a investigação do seu processo de emissão de luz por experimentos de marcação isotópica usando $^{18}O$ mostrou que o átomo de oxigênio da molécula de $CO_2$ do produto derivava do oxigênio molecular, indicando que a via da dioxetanona também estava envolvida para este sistema (Shimomura *et al.*, 1978). Nas últimas décadas, o envolvimento de uma dioxetanona como intermediário tem sido demonstrado para uma série de outros organismos luminescentes (Shimomura, 2006).

Embora as luciferinas sejam conservadas através dos filos, existe uma grande diversidade em relação às luciferases, com algumas de organismos luminosos apresentando duas enzimas diferentes capazes de produzir luz em dois comprimentos de onda distintos (por exemplo, no "verme trenzinho" *Phrixothrix hirtus*) (Viviani *et al.*, 1999). As luciferases descrevem o componente enzimático da reação e, diferentemente do substrato da luciferina, tendem a ser sensíveis ao estresse térmico. Segundo Shimomura (2006), as fotoproteínas podem ser distinguidas das luciferases por dois meios gerais; não utilizando oxigênio molecular diretamente para emissão de luz e sendo capazes de emitir luz proporcional à quantidade de proteína presente (Shimomura, 1985; Mirza, 2019).

Ao contrário dos sistemas luminescentes de vaga-lumes ou dos dependentes de celenterazina, a luminescência bacteriana está presente em ambientes marinhos e terrestres, bem como em habitats de água doce. Bactérias luminescentes podem ser encontradas como simbiontes de vários organismos marinhos, como os peixes e moluscos. Além disso, eles podem também ser encontrados em peixes em decomposição, dentro da flora intestinal de alguns vertebrados marinhos e como parasitas de vários crustáceos (Wilson & Hastings, 2013). Esse sistema bioluminescente envolve a oxidação da molécula de $FMNH_2$ (flavina mononucleotídeo na forma reduzida, Fig. 1-D) junto de um aldeído de cadeia longa em uma reação catalisada por uma luciferase específica, levando à emissão de luz azul em 490 nm (Cormier & Strehler, 1953; Wilson & Hastings, 1998; Haddock *et al.*, 2010). Essa produção de luz ocorre de maneira constante (Haas, 1980). Algumas espécies de bactérias luminescentes como *Aliivibrio fischeri* também apresentam um fenômeno específico conhecido como *quorum sensing*, em que a produção de luz só é iniciada quando uma colônia luminescente atinge uma concentração suficientemente alta de indivíduos.

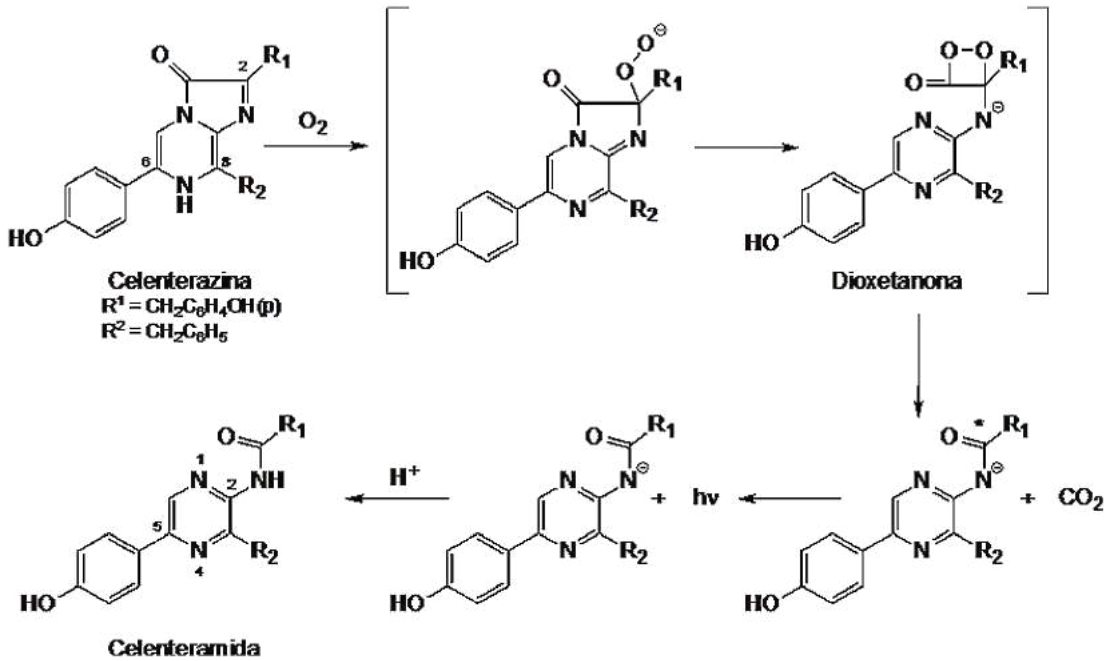



**FIGURA 2.** Mecanismo químico proposto para a emissão de luz em reações de bioluminescência que utilizam a molécula de celenterazina como luciferina. *Fonte: adaptado de Shimomura (2006).*

Outro sistema bioluminescente relativamente comum é o pertencente a várias espécies de ostracodas, como *Vargula hilgendorfii*. A luciferina de ostracodas foi a primeira luciferina a ser identificada em termos de sua estrutura química (Fig. 1-A). Essa molécula foi isolada e cristalizada pela primeira vez por Shimomura e colaboradores (Shimomura *et al.*, 1957), tendo sua estrutura determinada por Kishi e colaboradores (1966), o que permitiu o estudo detalhado da bioquímica envolvida nessa reação (Haddock *et al.*, 2010). *V. hilgendorfii* tem a capacidade de produzir luz a partir da secreção de um muco luminescente quando perturbada, emitindo uma luz azul brilhante em um comprimento de onda com pico de 455 nm (Shimomura

*et al*., 1969). Esse muco luminoso é produzido a partir de glândulas especializadas de dois tipos de células, uma produzindo a luciferina e a outra a luciferase (Shimomura & Johnson, 1970; Shimomura, 2006). Kato e colaboradores (2004, 2007) demonstraram também que a luciferina envolvida nesse processo é sintetizada a partir de triptofano, isoleucina e arginina, através de uma via que é atualmente desconhecida.

Finalmente, a outra forma comum de bioluminescência marinha ocorre em várias espécies de dinoflagelados. Os dinoflagelados são organismos unicelulares que representam a maioria da bioluminescência observada no oceano em superfície (Tett, 1971; Valiadi & Iglesias-Rodriguez, 2013). A luciferina de dinoflagelados (Fig. 1-C) não mostra semelhanças com outras luciferinas e é encontrada tanto em dinoflagelados quanto nos eufasídeos (*krill*) (Nakamura *et al*., 1989; Shimomura, 1995). Estudos mostraram também que eufasídeos luminescentes normalmente ocorrem em altas densidades em áreas que concentram grandes populações de dinoflagelados, o que sugere que talvez esses organismos adquiram luciferina através do consumo desses animais (Tett, 1971).

A estrutura desta luciferina foi originalmente determinada a partir do dinoflagelado *Pyrocystis lunula*. O composto é um tetrapirrol linear muito sensível à oxidação não enzimática e provavelmente é derivado da clorofila. A bioluminescência nos dinoflagelados é emitida a partir de mais de 400 organelas conhecidas como *scintillons*. Os compostos envolvidos nesse sistema bioluminescente são regulados por um ritmo circadiano (o período de aproximadamente 24 horas sobre o qual se baseia o ciclo biológico), juntamente com componentes fotossintéticos. Isso significa que os dinoflagelados realizam a produção primária durante o dia e produzem bioluminescência apenas à noite, período onde a luz emitida pode ser notada facilmente (Shimomura, 2006; Mirza, 2019).

De modo geral, reações bioluminescentes, especialmente como as de vaga-lumes e alguns organismos marinhos, são muito eficientes e têm rendimentos quânticos relativamente altos. Ademais, as luciferinas são relativamente não tóxicas, o que vem permitindo o desenvolvimento de uma ampla gama de aplicações e técnicas analíticas. Entre essas, podem-se destacar testes para moléculas ou metabólitos, imunoensaios, expressão gênica, triagem de medicamentos e bioimageamento. A maioria dos métodos são utilizados em estudos envolvendo o tratamento do câncer, pesquisas sobre doenças infecciosas e monitoramento ambiental de poluentes (Rosen *et al*., 2008; Hochgrafe & Mandelkow, 2013; Kaskova *et al*., 2016).

De fato, dinoflagelados e bactérias bioluminescentes também podem ser usados para avaliar a qualidade do tratamento da água para consumo humano, além de serem usados para observar os efeitos de poluentes na água do mar (Hurtado-Gallego *et al*., 2019). Por exemplo, kits de monitoramento podem ser usados para avaliar a toxicidade de sedimentos e descargas industriais. Isso é feito expondo os dinoflagelados luminescentes (por exemplo, *L. polyedrum* e *P. lunula*) a várias concentrações de contaminantes, em um intervalo de horas a até 10 dias (Rosen *et al*., 2008). Dessa maneira, o grau de inibição da atividade da luz pode ser correlacionado com a concentração relativa dos contaminantes (Hurtado-Gallego *et al*., 2019).

## 3. Funções ecológicas da bioluminescência marinha

A bioluminescência é um fenômeno bastante presente nos oceanos (Haddock *et al*., 2010), uma vez que dentre os terrestres e dulcícolas, a quantidade de representantes bioluminescentes é bastante restrita quando comparada à de representantes marinhos (Shimomura, 2006). No entanto, apesar disso, alguns exemplos de dulcícolas e terrestres podem ser apontados, como o vagalume, o milípede *Luminodesmus sequoia*, diversas espécies de fungos (Hastings & Davenport, 1957; Desjardin *et al*., 2008; Haddock *et al*., 2010; Stevani *et al*., 2013) e a lapa de água doce *Latia neritoides* (Harvey, 1952).

Assim, a maior parte dos organismos bioluminescentes está no mar e, apesar de incerto, isso deve se dar pelos fatos de que: o oceano possui condições ambientais mais estáveis; é mais transparente à luz ao comparar com lagos e rios; e, a maior parte desse ambiente não recebe luz (Haddock *et al*., 2010). Dessa forma, esse contexto marinho deve ter favorecido o aparecimento da bioluminescência por meio desses dois cenários, hoje os mais aceitos: (1) por meio da evolução da luciferase a partir de enzimas oxigenases menos específicas (Widder, 1999), as quais sofreram mutações que ofereceram vantagem em especial aos animais que migravam para águas mais profundas a fim de se camuflar na escuridão e assim, defender-se de predadores, ou se alimentar (Widder, 2010); e (2) por meio da evolução da luciferina que protegia organismos de espécies reativas de oxigênio (EROs). Nesse caso, os organismos luminosos migravam mais para o fundo, para fugir de predadores, onde já não havia estresse oxidativo significativo. Assim, a pressão seletiva pode ter mudado para favorecer o potencial comunicativo da bioluminescência (Widder, 1999).

Como havia pressuposto Harvey (1932), esse fenômeno evoluiu independentemente diversas vezes, número hoje que sabemos ser de ao menos, 40 evoluções independentes, incluindo gêneros aquáticos - marinhos e dulcícolas - e terrestres (Widder, 2010), as quais resultaram em um alcance significativo na filogenia atual, envolvendo mais de 700 gêneros em 16 filos somente no oceano (Herring, 1987; Moline *et al*., 2007, Haddock *et al*., 2010), o que representa cerca de 80% de todos os organismos bioluminescentes existentes (Widder, 2010). Esse valor alto implica que a bioluminescência deve proporcionar diversas formas de interação com o meio e com outros organismos no mar profundo (Moline *et al*., 2007), participando da comunicação predador-presa, e tendo grande influência sobre as migrações verticais diárias e no fluxo de matéria e energia pela cadeia alimentar (Haddock *et al*., 2010).

Além disso, essa habilidade possui uma enormidade de comportamentos, espécies e mecanismos químicos ainda por serem descobertos. Dentre tal variedade, pode-se citar a forma como a emissão e produção de luz é feita: há organismos com órgãos emissores de luz bastante complexos controlados pelo sistema nervoso, emitindo luz conforme a necessidade e/ou certos estímulos (Shimomura, 2006). Em contrapartida, têm-se organismos em que uma única célula contém todo o aparato de emissão de luz, brilhando continuamente (Shimomura, 2006). Por fim, têm-se os intermediários entre esses dois extremos (Shimomura, 2006).

Há também animais que apresentam diferentes mecanismos de luminescência, ou seja, além de possuir o seu próprio aparato para produzir luz, o que é chamado bioluminescência intrínseca (Haddock *et al*., 2010), eles podem, ao mesmo tempo, se associar por meio de uma relação simbiótica com outros organismos bioluminescentes, a chamada bioluminescência extrínseca. Um exemplo envolve o gênero de peixes *Linophryne*, conhecido como tamboril (Hansen & Herring, 1977). Ele possui um barbilhão (uma estrutura afilada que em sua extremidade contém o aparato e substâncias necessárias para produzir e emitir a luz), em conjunto com um fotóforo que possui bactérias bioluminescentes (Hansen & Herring, 1977).

No entanto, compreender como esse e outros organismos utilizam e interagem com o meio através de sua bioluminescência muitas vezes é um desafio, já que muitos dos organismos que emitem luz estão em regiões profundas (Haddock *et al*., 2010) e, portanto, é difícil acessá-los. Apesar disso, seu papel em diversos âmbitos ecológicos já é conhecido, tendo como grandes contribuidores nesse conhecimento, os biólogos Edith Widder (Associação de Conservação e Pesquisa dos Oceanos, ORCA) e Steven Haddock (Instituto de Pesquisa do Aquário Monterey Bay, MBARI) (Anctil, 2018). Ambos foram essenciais para compreender que a bioluminescência não era só muito comum nos oceanos, mas que também cumpria papel fundamental em seu funcionamento ecossistêmico (Widder, 2010; Haddock *et al*., 2010).

Widder realizou estudos na área de desenvolvimento de tecnologias para observar os oceanos sob formas ainda desconhecidas (Anctil, 2018). Em 1983, Widder e colaboradores elaboraram um sistema sofisticado para detectar o espectro de emissão de luz de organismos marinhos mesmo quando fossem episódios muito curtos de emissão, o que não era possível de ser feito antes de sua tecnologia (Widder *et al*., 1983). Mais do que isso, Widder foi pioneira no desenvolvimento de submersíveis equipados com ferramentas e estruturas capazes de estimular organismos, a fim de fazer com que emitissem luz, permitindo a detecção de sua bioluminescência ao mesmo tempo que o fenômeno era registrado em vídeo (Widder *et al*., 1989).

Logo após Widder, Haddock também se tornou um estudioso de destaque na área da bioluminescência marinha (Anctil, 2018). Ele começou sua carreira com a classificação de um novo filo como bioluminescente, o Chaetognatha, fato que não ocorria há mais de 50 anos (Haddock & Case, 1994). Além dessa descoberta, Haddock também foi um dos responsáveis pela descoberta de uma nova espécie de lula luminescente de grande profundidade, a Lula-Vampiro (*Vampiroteutis infernalis*) (Robison *et al*., 2003). Além disso, ele também descobriu vários outros organismos bioluminescentes, além de ter investigado funções ecológicas (Haddock *et al*., 2005; Osborn *et al*., 2009) e formas de emissão da luz nesses seres (Haddock & Case, 1999).

Entre tantas funções e diversidade da bioluminescência marinha descobertas, estão aquelas relacionadas com defesa, atração de presas, comunicação intraespecífica (entre indivíduos da mesma espécie) e na reprodução (Haddock *et al*., 2010). Alguns exemplos no meio marinho incluem o anelídeo *Chaetopterus variopedatus*. Ele habita zonas entre marés e costeiras, vivendo dentro de um tubo de muco e opaco em formato de "U", enterrado no sedimento (Enders, 1909; Thompson & Schaffner, 2001; Mirza, 2019; Mirza *et al*., 2020), característica a qual pode levar ao questionamento da função de uma bioluminescência que dificilmente seria vista por outro organismo.

Contudo, baseado nos experimentos de Branchini e colaboradores (2013), foi possível observar que uma agitação do tubo, a qual poderia ser realizada por um possível predador, levava o animal a liberar seu muco luminescente azul (Mirza *et al*., 2019) na coluna d'água, sugerindo um possível papel de distração de predadores. Essa função também foi atribuída a outro anelídeo marinho, o *Harmothoe* sp. (Livermore *et al*., 2018), que emite luz no comprimento de onda da cor verde. No caso desse animal, a bioluminescência está presente nos seus élitros (estruturas semelhantes a escamas que protegem o dorso do animal) (Bassot & Nicolas, 1995; Shimomura, 2006). Quando atacado, ele destaca uma ou mais escamas, as quais, com seu brilho, distraem o predador e permitem a sua fuga (Livermore *et al*., 2018).

Abordando uma outra função ecológica, pode-se citar os dinoflagelados do gênero *Pyrocystis* (Fig. 3). Esses organismos planctônicos emitem uma grande quantidade de luz quando estão aglomerados, após receberem algum estímulo mecânico. Assim, se um predador, como alguma ave ou um peixe, se locomover por entre esses organismos, buscando alimentar-se, por exemplo, a luminescência será disparada (Mensinger & Case 1992). Essa função ecológica foi definida como "alarme de roubo" (em uma tradução livre do inglês, *burglar alarm*) e seria uma forma de iluminar o predador que está ali para se alimentar, a fim de que o predador de seu predador o veja (Haddock *et al*., 2010).

Existem outras funções, como as relacionadas com reprodução, a qual inclui o anelídeo silídeo *Odontosyllis* que produz uma secreção luminosa quando estimulado, também responsável por atrair os machos durante a desova (Fischer & Fischer, 1995; Deheyn & Latz, 2009, Haddock *et al*., 2010). Já com relação à comunicação intraespecífica, pode-se citar a lula de Humboldt, *Dosidicus gigas*, a qual teve seu mecanismo químico de bioluminescência recentemente investigado (Galeazzo *et al*., 2019), e teve averiguado, também recentemente, o papel da luminescência nesse animal, como forma de coordenar comportamentos, facilitar decisões coletivas e manter a coesão do grupo no fundo do oceano (Burford & Robison, 2020).

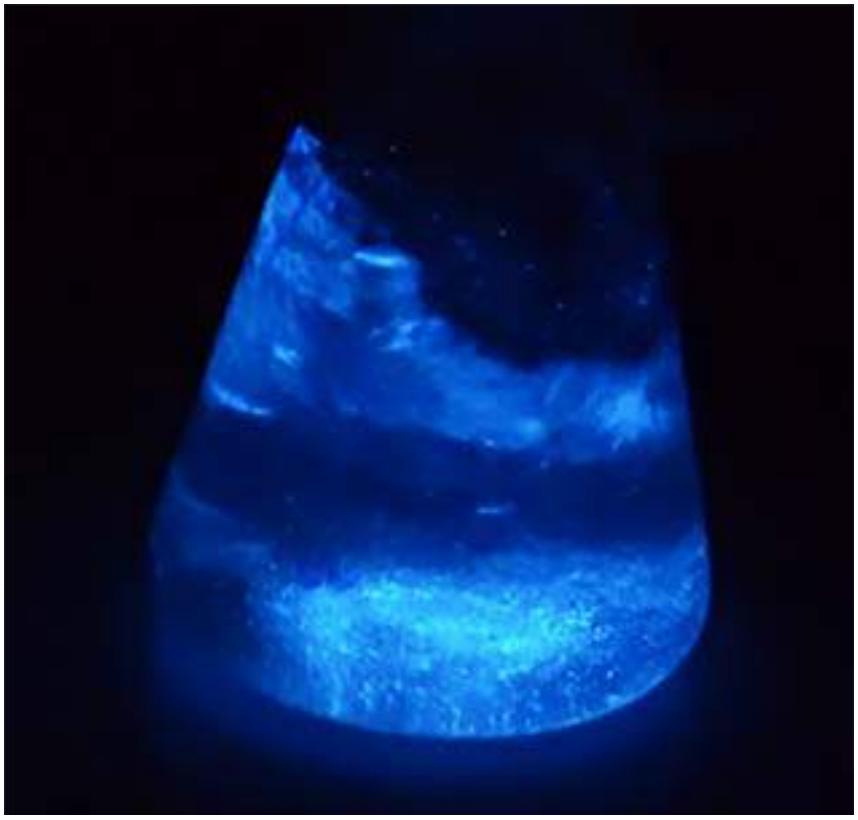


**FIGURA 3. Frasco contendo uma cultura do dinoflagelado *Pyrocystis lunula* emitindo luz após agitação mecânica.** *Créditos: Anderson G. Oliveira, 2019.*

Mais do que isso, há também algumas outras formas da bioluminescência interagir com o ambiente, sendo uma delas a chamada *sacrificial tag,* a qual envolve a autotomia (Haddock *et al.*, 2010). Nesse caso, um animal libera parte de seu corpo voluntariamente (autotomiza) ao encontrar um predador (Haddock *et al.*, 2010). Esse fragmento é liberado emitindo luz, e pode ficar horas brilhando (Robison, 1992; Herring & Widder, 2004) mesmo dentro do estômago do predador. Assim, como no fundo dos oceanos a transparência é uma característica comum (Johnsen & Widder, 1998), a parte do animal que fica emitindo luz dentro daquele que a comeu chama a atenção de outros predadores, tornando arriscado se alimentar de presas bioluminescentes (Haddock *et al.*, 2010). Assim, a bioluminescência, nesse caso, pode funcionar como uma forma de afastar, confundir e distrair predadores.

Outro grande uso da bioluminescência está relacionado à atração de presas (Haddock *et al.*, 2010. Um exemplo engloba vários peixes da ordem Lophiiformes, genericamente conhecidos como tamboril, os quais possuem uma estrutura semelhante a uma haste, a qual, em sua extremidade, possui bactérias bioluminescentes (Haygood & Distel, 1993; Pietsch, 2009). Nesse caso, não é somente o peixe que produz e emite a luz (a chamada bioluminescência intrínseca), mas também as bactérias com as quais ele se associou (a chamada bioluminescência extrínseca) (Haddock *et al.*, 2010). A partir dessa haste luminosa, esses peixes atraem presas para delas se alimentarem (Haygood & Distel, 1993).

Por fim, outra forma de predar animais utilizando a bioluminescência é usando-a para atordoar presas, como faz a lula *Taningia danae* (Kubodera *et al.*, 2007) (Fig. 4). Ela emite vários *flashes* rapidamente, permitindo confundir peixes e cefalópodes menores. Esses *flashes* também podem ter um papel na comunicação intraespecífica e reconhecimento de espécies, mas muito pouco se sabe sobre isso (Kubodera *et al.*, 2007).

Dentre a variedade dos usos da bioluminescência no meio marinho, a visão dos organismos que ali habitam é um fator de grande influência em como esse fenômeno se relaciona com o ambiente e com os outros organismos, o que se associa, entre outras formas, com o uso da bioluminescência para iluminar presas. Nesse caso, o animal possui uma forma de emitir a luz pra buscar a presa usando um comprimento de onda que ela não consiga notar, como foi visto para alguns peixes dragão, da ordem Stomiiformes, os quais utilizam a luz vermelha para essa função (Herring & Cope, 2005).

**FIGURA 4. Molusco *Taningia danae* coletado durante a expedição DEEP OCEAN II a bordo do N/Oc. Alpha Crucis do Instituto Oceanográfico da USP.** *Créditos: Gabriela A. Galeazzo, 2019.*

Outro aspecto ecológico da bioluminescência que é influenciado pela visão é o da contrailuminação (Haddock *et al.*, 2010) (Fig. 5). Essa estratégia é comum em crustáceos, cefalópodes e peixes, e envolve o uso de fotóforos ventrais emitindo uma luz que seja equivalente à luz que esteja vindo da superfície, evitando uma projeção de sombra do animal, a qual poderia servir como forma de um predador encontrá-lo (Haddock *et al.*, 2010). Ou então, ao menos, gerando uma quebra na silhueta projetada (Johnsen *et al.*, 2004).

Isso foi reportado em lulas de profundidade e de áreas rasas (Young & Mencher, 1980; Herring *et al.*, 1992; Jones & Nishiguchi, 2004), no peixe *Porichthys notatus* (Harper & Case, 1999), nos quais foi possível observar que ele buscam emitir uma luz que corresponda à intensidade, à distribuição angular ou à cor da luz que está entrando na coluna d'água.

Além deles, a luminescência como forma de contrailuminação também foi vista para os tubarões *Etmopterus spinax* (Claes *et al.*, 2010), *Squaliolus aliae* e *Etmopterus splendidus*, os quais, ao invés de variarem a intensidade da luz emitida de acordo com a quantidade da que vem da superfície, na verdade, emitem luz de forma constante e se movem para cima e para baixo na coluna d'água a fim de calibrar a luz emitida com a superficial (Claes *et al.*, 2014).

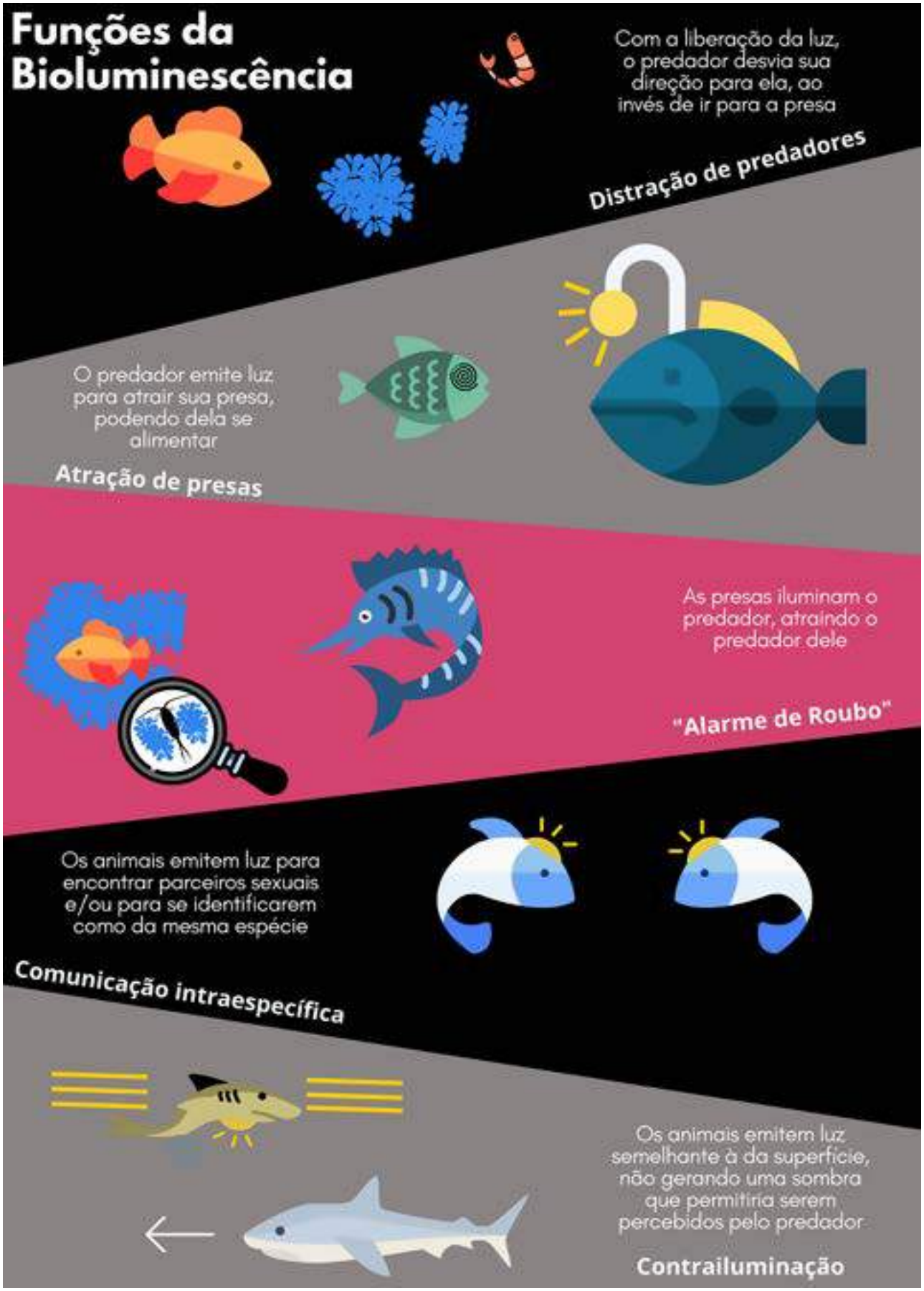



**FIGURA 5. Esquema geral das funções da bioluminescência.** *Ilustração: Gabriela Verruck de Moraes.*

## Referências Bibliográficas

ANCTIL, M. & SHIMOMURA, O. 1984. Mechanism of photoinactivation and re-activation in the bioluminescence system of the ctenophore *Mnemiopsis*. Biochemical Journal, 221, 269–72.

ANCTIL, M. 2018. Luminous creatures. The History and Science of Light Production in Living Organisms. McGill-Queen's University Press, 467 p.

ARISTOTLE. 1987. De Anima (On the soul). Tradução por Hugh Lawson-Tancred. Penguin Classics (publicado originalmente em 350 a.C).

BASSOT, J. & NICOLAS, M. 1995. Bioluminescence in scale-worm photosomes: the photoprotein polynoidin is specific for the detection of superoxide radicals. Histochem Cell Biol., 104,199-210.

BRANCHINI, B., BEHNEY, C., SOUTHWORTH, et al. 2013. Chemical analysis of the luminous slime secreted by the marine worm *Chaetopterus* (Annelida, Polychaeta). Photochemistry and photobiology, 90(1), 247-251.

BURFORD, B. & ROBISON, B. 2020. Bioluminescent backlighting illuminates the complex visual signals of a social squid in the deep sea. PNAS, 117(15), 8524-8531.

CHALFIE, M., TU, Y., EUSKIRCHEN, G., WARD, W.W. & PRASHER, D.C. 1994. Green fluorescent protein as a marker for gene expression. Science, 263,802– 805.

CLAES, J.M., AKSNES, D.L. & MALLEFET, J. 2010. Phantom hunter of the fjords: counterillumination in a shark (*Etmopterus spinax*). J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 388, 28–32.

CLAES, J.M., NILSSON, D., STRAUBE, N., COLLIN, S.P. & MALLEFET, J. 2014. Iso-luminance counterillumination drove bioluminescent shark radiation. Scientific Reports, 4 (4328).

CORMIER, M. & STREHLER, B. 1953. The identification of kce - requirement of long-chain aldehydes for bacterial extract luminescence. Journal of the american chemical society, 75, 19, 4864-4865.

DEHEYN, D. & LATZ, M. 2009. Internal and secreted bioluminescence of the marine polychaete *Odontosyllis phosphorea* (Syllidae). Inv. Biol., 1,31-45.

DELUCA, M. & DEMPSEY, M.E. 1970. Mechanism of oxidation in firefly luminescence. Biochemical and Biophysical Research Communications, 40 (1).

DESJARDIN, D. E., OLIVEIRA A.G. & STEVANI C. V. 2008. Fungi bioluminescence revisited. Photochemical & Photobiological Sciences, 7(2), 170-182.

DUBOIS, R. 1885. Fonction photogénique des Pyrophores. Comptes rendus des séances de la Société de biologie, 8(2), 559–62.

DUBOIS, R. 1887. De la fonction photogénique chez le *Pholas dactylus*. Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences, 105, 690–2.

ENDERS, H.E. 1909. A study of the life-history and habits of *Chaetopterus variopedatus*, Renier et Claparede. Journal of Morphology, 20(3), 479-531.

FISCHER, A. & FISCHER, U. 1995. On the lifestyle and lifecycle of the luminescent polychaete *Odontosyllis enopl*a (Annelida: Polychaeta). Invert. Biol., 114, 236–47.

GALEAZZO, G., MIRZA, J., DORR, F., PINTO, E., STEVANI, C., LOHRMANN, K. & OLIVEIRA, A. 2019. Characterizing the Bioluminescence of the Humboldt Squid, *Dosidicus gigas* (d'Orbigny, 1835): One of the Largest Luminescent Animals in the World. Photochemistry and Photobiology, DOI: 10.1111/php.13106.

GESNER, Conrad. 1555. De raris et admirandis herbis quae sive quod noctu luceant, sive alias ob causas, Lunariae nominantur et obiter de alias etiam rebus, quae in tenebris lucent, commentariolus. Zurich: Tiguri.

HAAS, E. 1980. Bioluminescence from single bacterial-cells exhibits no oscillation. Biophysical Journal, 31, 3, 301-312.

HADDOCK, S. 2006. Luminous marine organisms. Photoproteins in bioanalysis.

HADDOCK, S.H.D. & CASE, J.F. 1994. A bioluminescent chaetognath. Nature, 367, 225–6.

HADDOCK, S.H.D. & CASE, J.F. 1999. Bioluminescence spectra of shallow and deep-sea gelatinous zooplankton: ctenophores, medusae and siphonophores. Marine Biology, 133, 571–82.

HADDOCK, S.H.D., & CASE, J.F. 1995. Not all ctenophores are bioluminescent: Pleurobrachia. Biol. Bull, 189, 356-362.

HADDOCK, S.H.D., DUNN, C.W., PUGH, P.R. & SCHNITZLER, C.E. 2005. Bioluminescent and red-fluorescent lures in a deep-sea siphonophore. Science, 309, 263.

HADDOCK, S.H.D., MOLINE, D. & CASE, J.F. 2010. Bioluminescence in the Sea. Ann. Rev. Mar. Sci., 2,443-493.

HANSEN, K. & HERRING, P. 1977. Dual bioluminescent systems in the anglefish genus *Linophryn*e (Pisces: Ceratioidea). J. Zool., Lond., 182, 103-124.

HARPER, R.D. & CASE, J.F. 1999. Disruptive counterillumination and its anti-predatory value in the plainfish midshipman *Porichthys notatus*. Mar. Biol., 134, 529–540.

HARVEY, E. 1922. The production of light by the fishes, Photoblepharon and Anomalops. Publications of the Carnegie Institution of Washington, 312, 43–60.

HARVEY, E. 1924. Studies on bioluminescence. XVI. What determines the color of the light of luminous animals? American Journal of Physiology, 70, 619–23.

HARVEY, E. 1925. The inhibition of Cypridina luminescence by light. Journal of General Physiology, 7, 679–85.

HARVEY, E. 1932. The evolution of bioluminescence and its relation to cell respiration. Proceedings of the American Philosophical Society, 71, 135–41.

HARVEY, E. 1952. Bioluminescence. Academic Press, New York.

HARVEY, E. 1957. A history of Luminescence from the Earliest Times Until 1900. American Philosophical Society, 692p.

HASTINGS, J.W. & DAVENPORT, D. 1957. The luminescence of the millipede, *Luminodesmus sequoiae*. The Biological Bulletin, 113(1), 120-128.

HAYGOOD, M.G. & DISTEL, D.L. 1993. Bioluminescent symbionts of flashlight fishes and deep-sea anglerfishes form unique lineages related to the genus *Vibrio*. Nature, 363, 110- 11.

HERRING, J. 1983. The spectral characteristics of luminous marine organisms. Proc. R. Soc. Lond, 220,183.

HERRING, P.J. & COPE, C. 2005. Red bioluminescence in fishes: on the suborbital photophores of *Malacosteus, Pachystomias* and *Aristostomias*. Mar. Biol., 148, 383–94.

HERRING, P.J. 1987. Systematic distribution of bioluminescence in living organisms. Journal of bioluminescence and chemiluminescence, 1(3), 147-163.

HERRING, P.J., WIDDER, E.A, HADDOCK, S.H.D. 1992. Correlation of bioluminescence emissions with ventral photophores in the mesopelagic squid *Abralia veranyi* (Cephalopoda: Enoploteuthidae). Mar. Biol., 112, 293–98.

HERRING, P.J., WIDDER, E.A. 2004. Bioluminescence of deep-sea coronate medusae (Cnidaria: Scyphozoa). Mar. Biol., 146,39–51

HOCHGRÄFE, K. & MANDELKOW, E.M. 2013. Making the brain glow: in vivo bioluminescence imaging to study neurodegeneration. Mol. Neurobiol.,47, 3, 868-882.

HOPKINS, T.A., SELIGER, H.H., WHITE, E.H. & CASS, M.W. 1967. Chemiluminescence of firefly luciferin. A model for bioluminescent reaction and identification of product excited state. Journal of the american chemical society, 89(26).

HURTADO-GALLEGO, J., ROSAL, R., FERNANDEZ-PIÑAS, F. & LEGANES, F. 2019. Use of Cyanobacterial Luminescent Bioreporters to Report on the Environmental Impact of Metallic Nanoparticles. Sensors, 19, 16, 3597.

JOHNSEN, S. & WIDDER, E.A. 1998. Transparency and visibility of gelatinous zooplankton from the Northwestern Atlantic and Gulf of Mexico. Biol. Bull. 195, 337–48.

JOHNSEN, S., WIDDER, E.A. & MOBLEY, C. 2004. Propagation and perception of bioluminescence: factors affecting counterillumination as a cryptic strategy. Biol. Bull., 207, 1–16.

JOHNSON, F.H., SHIMOMURA, O., GERSHMAN, L., REYNOLDS, G. & WATERS, J. 1962. Quantum efficiency of *Cypridina* luminescence, with a note on that of *Aequorea*. Journal of Cellular and Comparative Physiology, 60, 85–103.

JONES, B. & NISHIGUCHI, M. 2004. Counterillumination in the Hawaiian bobtail squid, *Euprymna scolopes* Berry (Mollusca: Cephalopoda). Mar. Biol., 144, 1151–55.

KASKOVA, Z., TSARKOVA, A. & YAMPOLSKY, I. 2016. 1001 lights: Luciferins, luciferases, their mechanisms of action and applications in chemical analysis, biology and medicine. Chemical Society Reviews, 45, 6048-6077.

KATO, S., OBA, Y., OJIKA, M. & INOUYE, S. 2005. Biosynthesis of Cypridina luciferin from free amino acids in *Cypridina (Vargula) hilgendorfii*. Luminescence (Chichester), 19, 121-124.

KISHI, Y., GOTO, T., EGUCHI, S., HIRATA, Y., WATANABE, E. & AYOMA, T. 1966. Bioluminescence from single bacterial-cells exhibits no oscillation. Tetrahedron Letters, 29, 3437-3444.

KUBODERA, T., KOYAMA, Y. & MORI, K. 2007. Observations of wild hunting behaviour and bioluminescence of a large deep-sea, eight-armed squid, *Taningia dana*e. Proc. Biol. Sci., 274, 1029-34.

LATZ, I., FRANK, M. & CASE, F. 1988. Spectral composition of bioluminescence of epipelagic organisms from the Sargasso Sea. Marine Biology, 98, 441-446.

LEE, J. 2008. Bioluminescence: The First 3000 Years (Review). Journal of Siberian Federal University. Biology, 3, 194-205.

LEE, J. 2017. Bioluminescence, the Nature of Light. The University of Georgia.

LIVERMORE, J., PERREAULT, T. & RIVERS, T. 2018. Luminescent defensive behaviors of polynoid polychaete worms to natural predators. Marine Biology, 165, 149.

MATZ, M. et al. 1999. Fluorescent proteins from nonbioluminescent Anthozoa species. Nature Biotechnology, 17, 969-973.

MATZ, M. et al. 2002. Family of the green fluorescent protein: journey to the end of the rainbow. BioEssays, 24, 53-59.

McCAPRA, F. & CHANG, Y.C. 1967. Chemiluminescence of a Cypridina luciferin analogue. Chemical Communications, 19.

McELROY, 1976. From the precise to the ambiguous: light, bonding, and administration. Annual Review of Microbiology, 30, 1–20.

McELROY, W. & SELIGER, H.H. 1966. Firefly bioluminescence. In Frank H. Johnson & Yata Haneda, eds., Bioluminescence in Progress, 427–58.

MCELROY, W. & STREHLER, B. 1949. Factors influencing the response of the bioluminescent reaction to adenosine triphosphate. Archives of Biochemistry, 22, 3, 420-433.

MENSINGER, A.F. & CASE, J.F. 1992. Dinoflagellate luminescence increases susceptibility of zooplankton to teleost predation. Mar. Biol. 112, 207–10.

MIRZA, J. 2019. *Chaetopterus variopedatus* bioluminescence: luciferase purification and ecological roles. Tese de Doutorado Direto. Universidade Federal de São Paulo – Diadema.

MIRZA, J.D.; MIGOTTO, A.; MORAES, G.V.; YAMPOLSKY, I.; TSARKOVA, A. S.; OLIVEIRA, A.G. 2020. *Chaetopterus variopedatus* bioluminescence: A review of light emission within a species complex. Photochemistry and Photobiology, DOI: 10.1111/php.13221, [Epub ahead of print].

MOLINE, M.A., OLIVER, M.J., MOBLEY, C.D., et al. 2007. Bioluminescence in a complex coastal environment: 1. temporal dynamics of nighttime water-leaving radiance. Journal of Geophysical Research: Oceans (1978±2012), 112(C11).

MORIN, J.G. & HASTINGS, J.W. 1971. Energy transfer in a bioluminescent system. Journal of Cell Physiology, 77, 313–18.

NAKAMURA, H., KISHI, Y., SHIMOMURA, O., MORSE, D. & HASTINGS, J.W. 1989. Structure of dinoflagellate luciferin and its enzymatic and nonenzymatic air-oxidation products. Journal of the American Chemical Society, 111, 7607-7611.

NICOLAS, M., BASSOT, J. & SHIMOMURA, O. 1982. Polynoidin: a membrane photoprotein isolated from the bioluminescent system of scaleworms. Photochemistry and Photobiology, 35, 201–7.

OBA, Y., KATO, S., OJIKA, M. & INOUYE, S. 2007. Biosynthesis of cypridina luciferin in *Cypridina noctiluca*. Heterocycles, 72, 1, 673-676.

OSBORN, K.J., HADDOCK, S.H.D., PLEIJEL, F., MADIN, L.P. & ROUSE, G.W. 2009. Deep-sea, swimming worms with luminescent 'bombs'. Science, 325, 964.

PIERIBONE, V. & GRUBER, D. 2006. Aglow in the dark: The revolutionary Science of biofluorescence. Nature Cell Biology, 8(11), 1212.

PIETSCH, T.W. 2009. Oceanic Anglerfishes: Extraordinary Diversity in the Deep Sea. Berkeley: Univ. of Calif. Press. 576 pp.

QUATREFAGES, Jean Louis Armand de. 1850. Mémoire sur la phosphorescence de quelques invertébrés marins. Annales des sciences naturelles, 14 (3), 236–81.

RADZISZEWSKI, B.R. 1877. Untersuchungen über Hydrobenzamid, Amarin und Lophin. European Journal of Inorganic Chemistry, 10(1), 70-75.

RIDGWAY, E.B. & ASHLEY, C.C. 1967. Calcium transients in single musclefibers. Biochem. Biophys. Res. Commun, 29, 229–234.

ROBISON, B.H. 1992. Bioluminescence in the benthopelagic holothurian *Enypniastes eximia*. J. Mar. Biol. Assoc. UK, 72,463–72.

ROBISON, B.H., REISENBICHLER, K.R., HUNT, J.C. & HADDOCK, S.H.D. 2003. Light production by the arm tips of the deep-sea cephalopod *Vampyroteuthis infernali*s. Biological Bulletin, 205, 102–9.

ROSEN, G., OSORIO-ROBAYO, A., RIVERA-DUARTE, I. & LAPOTA, D. 2008. Comparison of Bioluminescent Dinoflagellate (QwikLite) and Bacterial (Microtox) Rapid Bioassays for the Detection of Metal and Ammonia Toxicity. Archives of environmental contamination and toxicology, 54, 606-611.

SELIGER, H.H. & MCELROY, W. 1959. Quantum yield in the oxidation of firefly luciferin. Biochemical and Biophysical Research Communications, 1, 21–4.

SHIMOMURA, O. 2008. Discovery of Green Fluorescent Protein, GFP. Nobel Lecture, 8 de Dezembro de 2008.

SHIMOMURA, O. & JOHNSON, F.H. 1966. Partial purification and properties of the *Chaetopterus* luminescence system. In Frank H. Johnson & Yata Haneda, eds., Bioluminescence in Progress, 495–521.

SHIMOMURA, O. & JOHNSON, F.H. 1970. Mechanisms in the quantum yield of *Cypridina* bioluminescence. Photochemistry and Photobiology, 12, 291-295.

SHIMOMURA, O. & JOHNSON, F.H. 1971. Mechanism of Luminescent Oxidation of Cypridina Luciferin. Biochemical and biophysical research communications, 44(2).

SHIMOMURA, O. & JOHNSON, F.H. 1975. Chemical Nature of bioluminescence systems in coelenterates. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 72, 1546-1549.

SHIMOMURA, O. 1979. Structure of the chromophore of *Aequorea* green fluorescent protein. FEBS Lett, 104, 220 –222.

SHIMOMURA, O. 2005. The discovery of aequorin and green fluorescent protein. The Royal Microscopical Society, Journal of Microscopy, 217, 3 –15.

SHIMOMURA, O. 2006. Bioluminescence. World Scientific Publishing Co. Pte.Ltd.

SHIMOMURA, O. 2008. Discovery of Green Fluorescent Protein (GFP) (Nobel Lecture). The Nobel Foundation 2008.

SHIMOMURA, O., GETO, T. & HIRATA, Y. 1957. Crystalline Cypridina luciferin. Bulletin of the Chemical Society of Japan, 30, 929–33.

SHIMOMURA, O., INOUE, S., JOHNSON, F.H. & HANEDA, Y. 1980. Widespread occurrence of coelenterazine in marine bioluminescence. Comp. Biochem. Physiol., 65B, 435-437.

SHIMOMURA, O., JOHNSON, F.H. & SAIGA, Y. 1962. Extraction, purification and properties of aequorin, a bioluminescent protein from the luminous hydromedusan, *Aequorea*. J. Cell. Comp. Physiol., 59, 223–239.

SHIMOMURA, O., MASUGI, T., JOHNSON, F.H. & HANEDA, Y. 1978. Properties and reaction-mechanism of bioluminescence system of deep-sea shrimp *Oplophorus gracilorostris*. Biochemistry, 17(6), 994-998.

STEVANI, C.V., OLIVEIRA, A.G., MENDES, L.F., VENTURA, F.F., WALDENMALER, H.E, CARVALHO, R.P. & PEREIRA, T.A. 2013. Current status of research on fungal bioluminescence: biochemistry and prospects for ecotoxicological application. Photochemistry and photobiology, 89(6), 1318-1326.

TETT, P. 1971. The Relation between Dinoflagellates and the Bioluminescence of Sea Water. Journal of the Marine Biological Association of the UK, 51,1,183 – 206.

THOMPSON, J. F., GEOGHEGAN, K.F., LLOYD, D.B., LANZETTI, A.J., MAGYAR, R.A., BRANCHINI, B.R. 1997. Mutation of a protease-sensitive region in firefly luciferase alters light emission properties. Biol. Chem, 272, 18766-18771.

THOMPSON, M.L. & SCHAFFNER, L. 2001. Population biology and secondary production of the suspension feeding polychaete *Chaetopterus c.f. variopedatus*: implications for benthic-pelagic coupling in lower Chesapeake Bay. Limnol. Oceanogr., 46, 1899-1907.

TSIEN, R. 1998.The Green Fluorescent Protein. Annu. Rev. Biochem, 67, 509-544.

TSUJI, F. I., BARNES, A. T. & CASE, J. F. 1972. Bioluminescence in the marine teleost,

TSUJI, F.I. 2010. Early history, discovery, and expression of *Aequorea* green fluorescent protein, with a note on an unfinished experiment. Microscopy Research and Technique, 73, 785–96.

VALIADI, M. & IGLESIAS-RODRIGUEZ, D. 2013. Understanding Bioluminescence in Dinoflagellates-How Far Have We Come? Microorganisms, 5;1, 1, 3-25.

VIVIANI, C., BECHARA, E. & OHMIYA, Y. 1999. Cloning, Sequence Analysis, and Expression of Active *Phrixothrix* Railroad-Worms Luciferases: Relationship between Bioluminescence Spectra and Primary Structures. Biochemistry, 38, 26, 8271–8279.

WIDDER E.A. 1999. Bioluminescence. In Adaptive Mechanisms in the Ecology of Vision, In Archer S, Djamgoz M., Loew, M, Partridge J, Vallerga, S. Eds. Kluwer Academic, Dordrecht, Netherlands, 555-581.

WIDDER, E.A. 2010. Bioluminescence in the ocean: origins of biological, chemical, and ecological diversity. Science, 328, 704–8.

WIDDER, E.A., LATZ, M. & CASE, J.F. 1983. Marine bioluminescence spectra measured with an Optical Multichannel Detection System. Biological Bulletin, 165, 791–810.

WIDDER, E.A., S.A. BERNSTEIN, D.F. BRACHER, J.F., CASE, K.R., TORRES, R.J.J. & ROBISON, B.H. 1989. Bioluminescence in the Monterey Submarine Canyon: image analysis of video recordings from a midwater submersible. Marine Biology, 100, 541–51.

WIEDEMANN, Eilhard & SCHIMDT, G.C. 1895a. Ann. Phys. Chem., 54, 604.

WIEDEMANN, Eilhard & SCHIMDT, G.C. 1895b. Ann. Phys. Chem., 56, 201.

WIEDEMANN, Eilhard. 1888. Ueber Fluorescenz und Phosphorescenz. I. Abhandlung. Annalen der Physik, 34, 446–63.

WILSON & WILSON'S. 1992. Comprehensive Analytical Chemistry. Chapter 2 Chemiluminescence: the phenomenon. Elsevier, 29, 7-52.

WILSON, T. & HASTINGS, J.W. 1998. Bioluminescence. Annual review of cell and developmental biology, 14(1), 197-230.

YOUNG, R.E. & MENCHER, F.M. 1980. Bioluminescence in mesopelagic squids: Diel color change during counterillumination. Science, 208,1286–88.

# OCEANOGRAFIA BIOLÓGICA

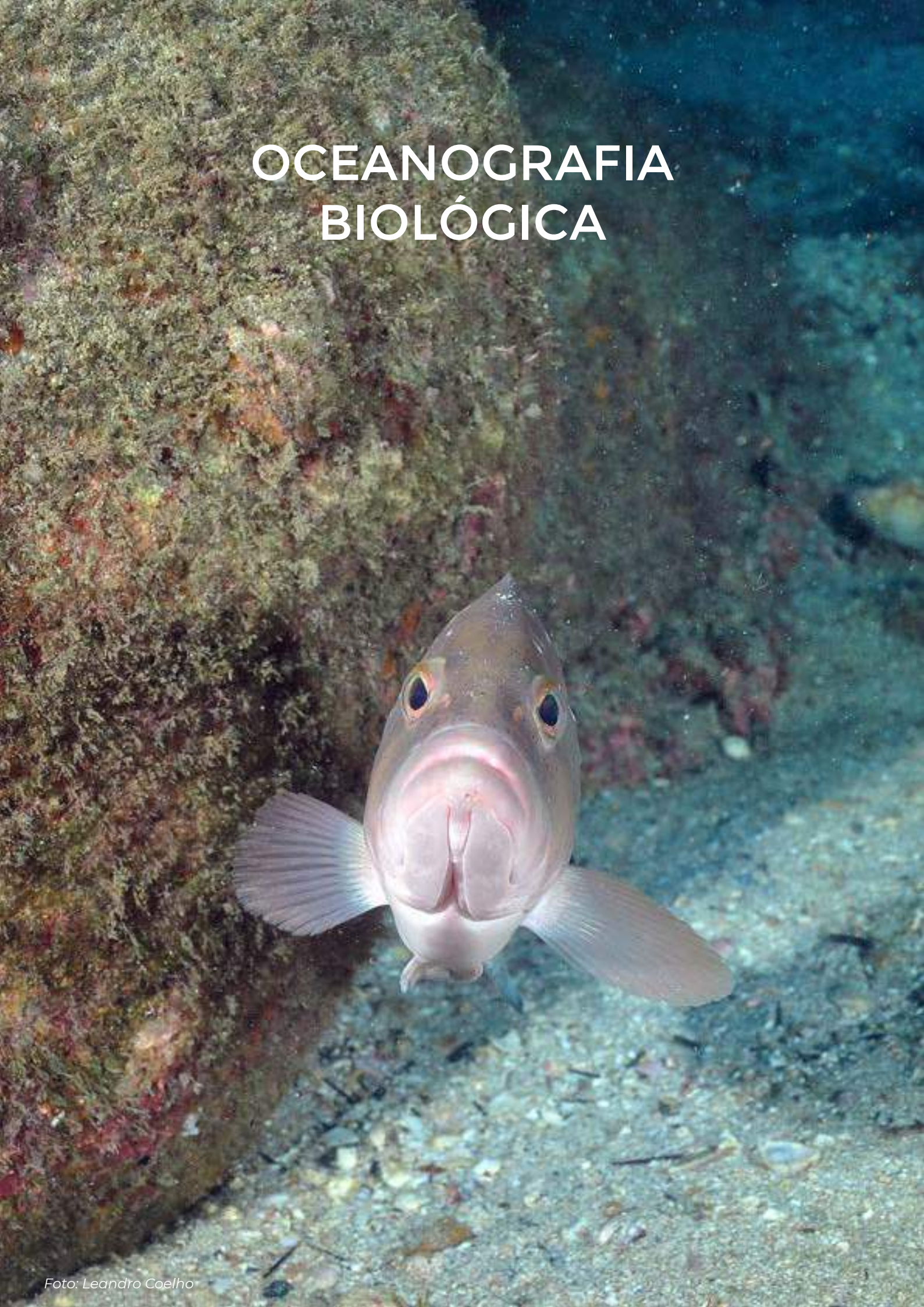


*Foto: Leandro Coelho*

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 20*

# A VIDA NO MAR

*Vicente Gomes & Flávia Saldanha-Corrêa*

REVISÃO: MARCOS CÉSAR DE OLIVEIRA SANTOS E MARCELO ROBERTO SOUTO DE MELO

CITAÇÃO SUGERIDA: GOMES, Vicente; SALDANHA-CORRÊA, Flávia. A vida no mar. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 20: p. 427-446.

# A Vida no Mar

*Vicente Gomes & Flávia Saldanha-Corrêa*

## 1. Introdução

Este capítulo inicia a seção da Oceanografia Biológica, o ramo da Oceanografia que estuda quem são, onde vivem e como vivem os organismos marinhos. A vida no mar é extremamente abundante e diversificada. O ambiente marinho apresenta habitats muito distintos e, eventualmente, condições muito particulares que demandam adaptações comportamentais, morfológicas e/ou fisiológicas dos organismos para que possam sobreviver. Apresentaremos um apanhado geral sobre a origem da vida no mar, os grandes compartimentos marinhos e as características gerais dos organismos que os habitam. Os capítulos subsequentes detalharão vários aspectos desses compartimentos e da dinâmica entre os componentes bióticos (vivos) e abióticos (não vivos), de modo que a estrutura e complexidade do ambiente marinho sejam mais bem compreendidas pelos leitores, que ficarão fascinados com a riqueza e biodiversidade oculta pelas águas!

## 2. A vida na Terra

Estima-se que a vida no planeta Terra tenha surgido entre 3,5 a 4 bilhões de anos atrás. A hipótese mais difundida é de que as primeiras formas de vida surgiram no ambiente marinho, nas fumarolas hidrotermais, protegidas da radiação ultravioleta do Sol. A partir de então, a vida se desenvolveu e evoluiu primeiramente nos ambientes aquáticos. As evidências fósseis mais antigas encontradas até hoje datam de 3,4 a 3,7 bilhões de anos, em rochas de origem orgânica, denominadas de estromatólitos, que teriam sido formadas por organismos procariotos (organismos geralmente unicelulares, sem um núcleo verdadeiro e sem organelas complexas em sua constituição).

Há cerca de 2,5 bilhões de anos, ocorreu um evento de extrema importância para a evolução da vida no nosso planeta: o oxigênio produzido por cianobactérias e outros microrganismos aquáticos fotossintetizantes começou a se acumular, modificando a composição da atmosfera. As cianobactérias também formaram estromatólitos que se preservaram em grandes quantidades como rochas fósseis de biossedimentos depositados em camadas. Curiosamente, hoje ainda existem na Austrália representantes vivos de cianobactérias que formam estromatólitos. O oxigênio produzido por esses organismos foi se dissolvendo, acumulando na água e se difundindo gradativamente para atmosfera ainda anóxica, principalmente após ter oxidado o ferro e outros compostos que estavam na forma livre. O oxigênio, por ser altamente reativo, deve ter eliminado vários tipos de organismos não resistentes à sua presença. Entretanto, ele permitiu o estabelecimento de reações metabólicas mais eficientes na utilização dos compostos orgânicos para a produção de energia, o que possibilitou a evolução de organismos mais complexos, de maior porte.

Os fósseis dos primeiros eucariotos (organismos com células complexas constituídas de núcleo e demais organelas com distintas funções) têm cerca de 1,5 bilhão de anos, e devem ter surgido, em grande parte, devido à disponibilidade de oxigênio dissolvido na água. Nos eucariotos, o DNA,

material de suma importância para a vida, está protegido pela membrana nuclear que, inclusive, atua para preservá-lo das reações de alta energia e do estresse oxidativo que ocorre nas mitocôndrias. Desde a origem da vida, e durante vários bilhões de anos, os seres vivos eram todos microscópicos. Os primeiros organismos multicelulares provavelmente surgiram entre 900 e 600 milhões de anos (M.a.), no período Algonquiano. Há cerca de 540 M.a. ocorreu a chamada "explosão" do Cambriano. Nesse período, diversas condições propícias tais como níveis de nutrientes, quantidade de oxigênio na atmosfera e o estágio de evolução genética dos seres vivos, devem ter promovido a rápida evolução e diversificação dos seres vivos marinhos. No Cambriano, já estava presente a grande maioria dos grupos de invertebrados que conhecemos, além de outros que se extinguiram. Os ancestrais dos peixes e, portanto, dos vertebrados em geral, surgiram nessa explosão do Cambriano, e tiveram uma grande expansão no Siluriano-Devoniano, há cerca de 450 M.a.

**QUADRO 1. Sumário dos principais períodos geológicos e eventos biológicos.** *Adaptado de Garrison (2016), Calijuri et al. (2013) e Portal do Professor do MEC.*

| ÉON | ERA | PERÍODO | ÉPOCA | MILHÕES DE ANOS | PRINCIPAIS EVENTOS |
|---|---|---|---|---|---|
| FANEROZÓICO | CENOZÓICA | NEOGÊNICO | ANTROPOCENO OU HOLOCENO | *11 MIL ANOS | Civilização humana<br>Fim da Era do Gelo<br>***Homo sapiens sapiens*** |
| | | | PLEISTOCENO | 1,8 | Início da Era do Gelo<br>Primeiros fósseis de hominídeos (*Australopithecus*) |
| | | PALEOGÊNICO | PLIOCENO | 5 | |
| | | | MIOCENO | 23 | Surgimento dos cães e ursos |
| | | | OLIGOCENO | 34 | Surgimento dos gatos e cervos |
| | | | EOCENO | 56 | Surgimento das baleias primitivas |
| | | | PALEOCENO | 65 | **Mamíferos se espalham pela Terra** |
| | MESOZÓICA | CRETÁCEO<br>Idade dos dinossauros | | 146 | **Extinção dos dinossauros, dos amonitas e de 75% das espécies**<br>Primeiras Aves<br>Separação total da América do Sul e África |
| | | JURÁSSICO<br>Idade dos dinossauros e dos amonitas | | 200 | Plantas com sementes (180 M.a.)<br>Expansão e desaparecimento de 75% dos amonitas e crinoides |
| | | TRIÁSSICO | | 250 | Primeiros mamíferos (230 M.a.)<br>Início da separação da Pangeia<br>**Primeiros dinossauros** |
| | PALEOZÓICA | PERMIANO<br>Idade dos anfíbios | | 299 | **Desaparecimento de 95% dos organismos (inclusive trilobitas)**<br>Formação da Pangeia, início da formação do Atlântico Sul |
| | | CARBONÍFERO | | 359 | Primeiros répteis<br>Primeiros anfíbios e insetos |
| | | DEVONIANO<br>Idade dos peixes | | 408 | **Desaparecimento da maioria dos peixes, corais e crinoides** |
| | | SILURIANO | | 444 | Expansão dos vertebrados<br>Primeiros crinoides e plantas terrestres |
| | | ORDOVICIANO | | 448 | Primeiros peixes primitivos e corais |
| | | CAMBRIANO<br>Idade dos trilobitas | | 542 | **Primeira extinção em massa (440-500 M.a.)**<br>Fósseis mais antigos de todos os filos atuais de Metazoa<br>**"Explosão do Cambriano"**<br>Primeiros eucariontes |
| PROTEROZOICO | | | | 2500 | Seres multicelulares (600-900M.a.)<br>Formas primitivas de vida<br>Primeiros fósseis (cianobactérias) |
| ARQUEANO | | | | 3600 | Primeiros microfósseis |
| HADEANO | | | | 4600 | Ausência de registros fósseis<br>Origem e formação da Terra |

Houve vários eventos naturais de extinção ao longo da história da Terra, que tiveram grande impacto sobre a evolução dos seres vivos. Os motivos podem ser muitos, tais como mudanças climáticas, grandes erupções vulcânicas, mudanças na composição da atmosfera terrestre (como a oxigenação da atmosfera), glaciações, epidemias, alterações do habitat, relações presa-predador, dentre outros. Os dados paleontológicos indicam que, de tempos em tempos, essas extinções foram de grandes proporções e, pelo menos parte delas, foram causadas por acontecimentos catastróficos, tais como impactos de meteoritos de grandes dimensões. Por volta de 250 M.a., no final do Paleozóico, período Permiano, extinguiram-se cerca de 95% das espécies existentes no planeta e, há 65 M.a., no final do período Cretáceo, cerca de 75% delas foram novamente dizimadas, incluindo os grandes dinossauros.

Na Figura 1 apresentamos exemplos de fósseis, com destaque para os exemplares A e B que são alguns dos fósseis de animais mais antigos registrados. Eles só perdem em antiguidade para os fósseis de animais do folhelho Qingjiang na China, com 518 M.a., considerados os mais antigos do planeta.

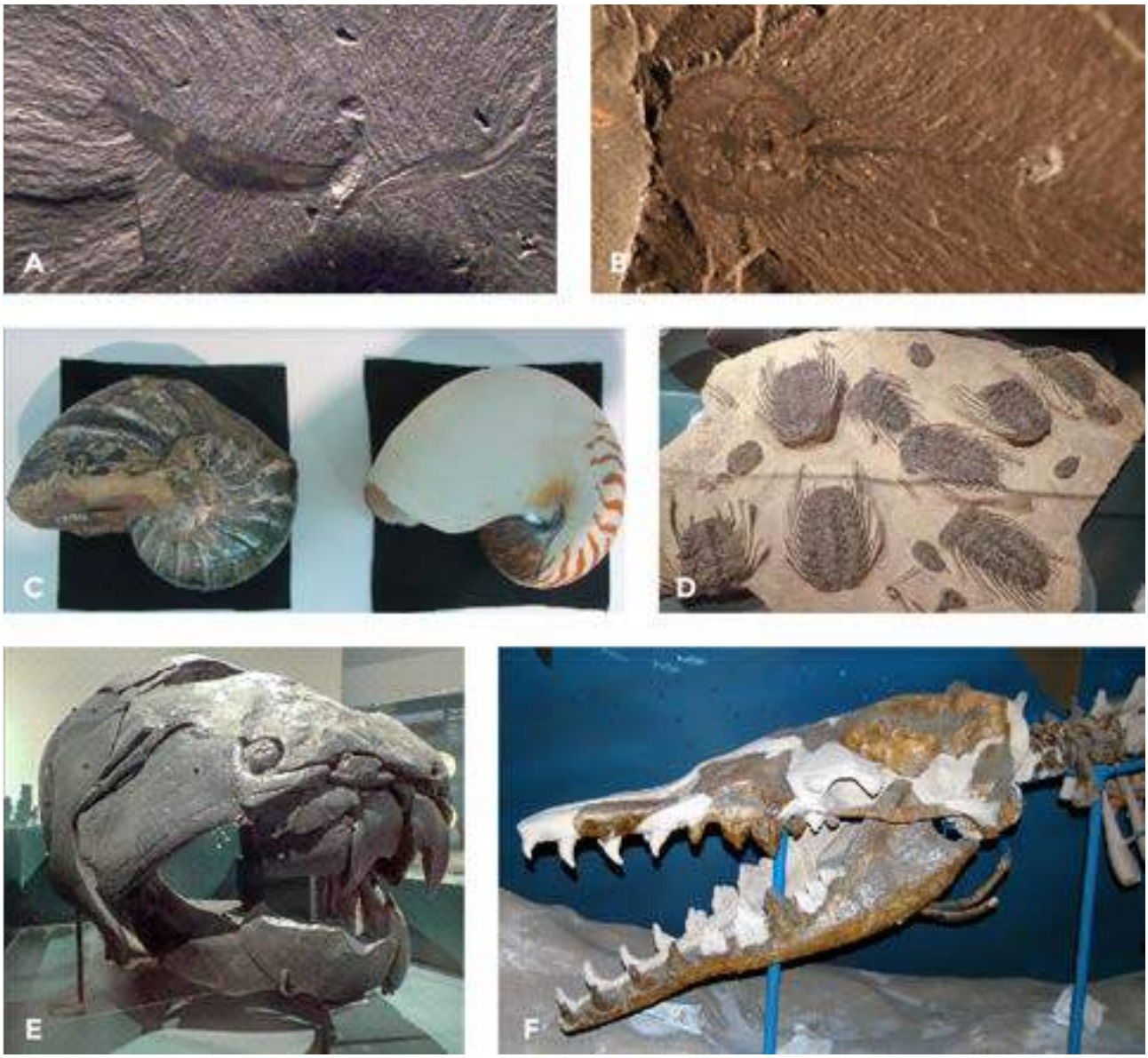



**FIGURA 1. A)** *Pikaia gracilens* **(Cordado); B)** *Burgessia bella* **(Arthropoda), fósseis da explosão do Cambriano (505 M.a. do Folhelho Burgess – Canadá); C) conchas de** *Nautilus* **fóssil e atual, respectivamente; D) Trilobitas do Paleozóico; E)** *Dunkleosteus*, **peixe do Devoniano; e F)** *Basilosaurus cetoides* **- baleia archaeoceti fóssil, do Eoceno 37-39 M.a.** *Imagens gentilmente cedidas pelo Prof. Dr. Marcelo Roberto Souto de Melo*.

A vida existe em todo o planeta, incluindo os locais mais inóspitos como fontes termais com temperaturas acima de 300°C, regiões geladas e as grandes profundidades marinhas. O número total de espécies presentes hoje na Terra ainda é desconhecido. Estão descritas, atualmente, cerca de 1,25 a 1,8 milhão de espécies, sendo que cerca de 18.000 novas espécies são identificadas todos os anos. Considerando-se a primeira estimativa, são cerca de 1 a 1,4 milhão de espécies na terra e 250.000 a 400.000, nos oceanos. Conhecemos cerca de 10.000 procariotos (bactérias e arqueias), 55.000 protozoários, 120.000 fungos, 300.000 plantas, incluindo as algas, 1.300.000 animais e 200.000 "espécies" de vírus, se os incluirmos entre os seres vivos (há controvérsias sobre isso).

As estimativas, entretanto, apontam para a possibilidade de existirem de 3 a 100 milhões de espécies, no total. Essas suposições indicam o quão pouco sabemos da biodiversidade da Terra e como as estimativas são disparatadas. Somos mais rápidos em extinguir espécies do que em estudá-las, visto que, no ritmo em que espécies novas são descritas, seria praticamente impossível reconhecer todas elas. Isto representa um grande desafio para os cientistas, especialmente no que se refere ao ambiente marinho.

## 3. O ambiente marinho

O mar cobre cerca de 70% da superfície terrestre, uma área de 361 milhões de quilômetros quadrados, contendo cinco quatrilhões de toneladas ($5.\ 10^{15}$t) de água.

No ambiente marinho, existem organismos que vivem desde a zona praticamente seca, no limite do supralitoral (existem caranguejos de terra firme, por exemplo), até aqueles que vivem nas fossas marinhas, que chegam a mais de 11 km de profundidade e que, por conta disso, são regiões ainda pouco exploradas. Em 1850, o biólogo inglês Edward Forbes lançou a hipótese de que abaixo dos 550 m de profundidade não deveria haver vida marinha, devido principalmente à ausência total de luz solar e às altas pressões (Teoria Azóica). Contudo, como já haviam sido capturados organismos a profundidades maiores do que a proposta por ele, havia um grande debate a esse respeito. A questão foi resolvida definitivamente após as expedições científicas britânicas dos navios *HMS Lightning* e *Porcupine*, em 1868 e 1869, respectivamente, e do navio *HMS Challenger*, entre 1872-1876, nas quais o cientista chefe era o escocês Sir Charles Wyville Thomson. Nessas expedições já havia tecnologia suficiente para coletar organismos em maiores profundidades e, efetivamente, eles foram coletados abundantemente. As pesquisas mais recentes, utilizando tecnologia e equipamentos avançados, permitiram o conhecimento de áreas profundas que, até pouco tempo, eram inatingíveis.

Podemos considerar como marinhas desde a região da linha d'água das marés máximas até as grandes profundidades das fossas abissais. Na linha de costa, encontramos diversas feições que determinam ecossistemas muito diferentes uns dos outros como praias, mangues, marismas, planícies de maré, estuários, lagunas costeiras, costões, recifes de arenito e de corais, alguns dos quais serão abordados nos capítulos seguintes.

A região **litorânea** ou **entremarés** é aquela que se localiza entre os limites da maré mínima e a maré máxima; a **supralitorânea** é a que normalmente recebe apenas respingos vindos do mar e raramente é recoberta por água (exceto em eventos extremos de ressaca) e a região **sublitorânea**, ou **infralitoral**, é a que fica permanentemente coberta pela água, sendo delimitada pelo nível inferior da maré mais baixa. A partir deste limite, a área submersa divide-se em grandes regiões (Fig. 2), que podem variar de extensão de acordo com a geomorfologia local.

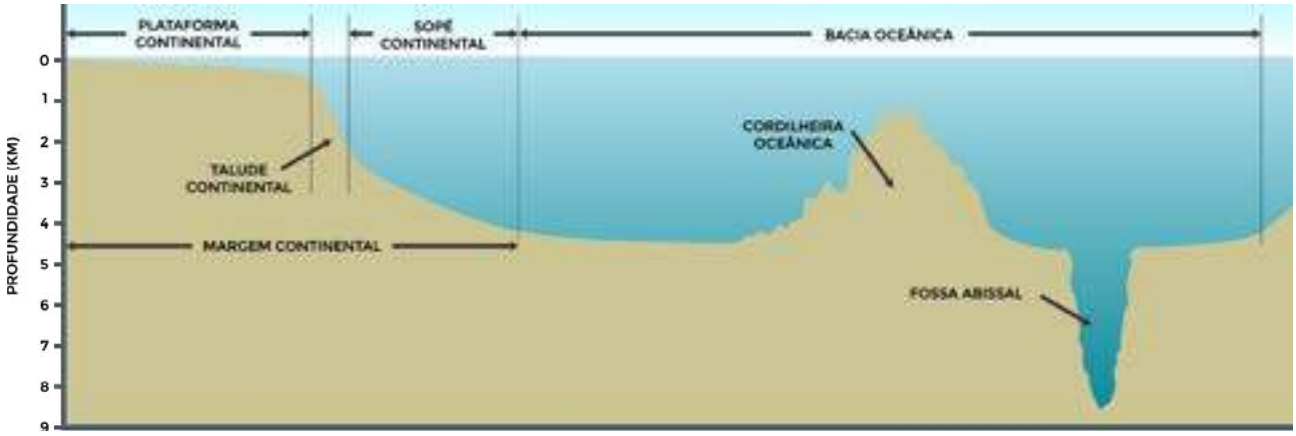



**FIGURA 2.** Representação das principais províncias do relevo submarino (exagero vertical de cerca de 50 vezes).

A borda submersa dos continentes tem declive suave e estende-se mar adentro em faixas de largura variável. É o que chamamos de **plataforma continental**, que ainda pode ser subdividida em plataforma interna e externa em relação à distância da costa e ao fato de terem características oceanográficas distintas. As plataformas continentais são áreas de grande interesse econômico e biológico porque é onde há maior abundância e diversidade de organismos. Contudo, também estão mais sujeitas aos efeitos das ações antrópicas, uma vez que grande parte da população habita zonas costeiras.

Em certo ponto, a declividade da plataforma acentua-se abruptamente como se fosse um precipício. Essa feição corresponde à região da **quebra da plataforma**, onde se inicia o **talude continental** que pode atingir grandes profundidades. O talude conecta-se ao **sopé continental**, que é o início da elevação dos continentes a partir do leito marinho, cuja inclinação é mais suave. A plataforma, talude e sopé continentais compõem a **margem continental**.

A margem continental é a região onde são estabelecidas as divisões políticas de soberania nacional dos países costeiros, como o do Mar Territorial - até 12 milhas náuticas (mn) = 22 km - e, a partir deste limite, a Zona Contígua (até 24 mn) e a Zona Econômica Exclusiva (até 200 mn). A área oceânica brasileira, juntamente com as águas interiores, compõe o que se conhece por Amazônia Azul. O Brasil possui 3,6 milhões de km$^2$ de ZEE e mais 2,1 milhões de km$^2$ de solo e subsolo marinhos podem ser acrescidos à soberania nacional, de acordo com a Convenção das Nações Unidas sobre Direito do Mar[1] (Fig. 3). No total, isso representará uma área de 5,7 milhões de Km$^2$ de águas jurisdicionais, o equivalente à 67 % do território continental. A Amazônia Azul é uma fonte riquíssima de recursos vivos (biodiversidade, pesca) e não-vivos (petróleo, gás natural, minerais e rotas comerciais), que têm um papel estratégico para o desenvolvimento do país.

A bacia oceânica constitui a porção do assoalho oceânico que se estende do sopé continental até a outra margem continental. O relevo da bacia oceânica é plano em grande parte, mas apresenta diversas feições como: cordilheiras (como a Dorsal Mesoatlântica), planícies abissais (áreas extensas e planas); montes e platôs submarinos; ilhas vulcânicas (que podem estar relacionadas às cordilheiras oceânicas ou a outras áreas de atividade vulcânica que afloram à superfície); além das fossas submarinas, que constituem zonas de convergência de placas litosféricas, com grandes profundidades e geralmente associadas a arcos insulares. A fossa das Marianas, no Pacífico Norte, é a maior depressão da crosta terrestre, com 11.035 m de profundidade, seguida pela de Mindanao, nas Filipinas, com 10.830 m. Como comparação, podemos citar o monte Mauna Kea, o ponto mais alto do arquipélago havaiano, que tem 10.203 m de altitude, dos quais 6.033 m ficam submersos e 4.170 m estão acima do nível do mar.

[1] Para saber mais, acesse: <https://www.marinha.mil.br/secirm/amazoniaazul>.

**FIGURA 3.** Área oceânica que compõe a Amazônia Azul: em azul claro, as áreas sob jurisdição nacional e em azul escuro as áreas solicitadas para ampliação do limite exterior da plataforma continental, que estão sob análise na ONU.

O ambiente marinho é dividido em domínios. Em termos de distância da costa são definidos dois domínios: o **domínio nerítico** (sobre a plataforma continental) e o **domínio oceânico** (que se estende para além dos limites da plataforma). Outra importante divisão corresponde aos **domínios pelágico**, que é constituído pela coluna de água, e o **bentônico**, que está relacionado ao fundo, ao substrato, quer seja ele raso ou profundo, natural ou artificial.

Em termos de estratificação vertical, o domínio pelágico é subdividido nas zonas: **epipelágica** (entre 0-200 m), **mesopelágica** (entre 200 e 1.000 m), **batipelágica** (entre 1.000 e 4.000 m) e a **abissopelágica** (abaixo dos 4.000 m). O domínio bentônico de mar aberto pode ser subdividido em **regiões batiais** (até cerca de 4.000 m) e **regiões abissais** (abaixo de 4.000 m). As regiões **hadais** representam as fossas submarinas.

A profundidade média dos oceanos é de cerca de 4.000 m e a luz do Sol penetra apenas em uma fina camada que, em média, chega entre 150 e 200 m de profundidade. Esta zona iluminada é chamada **zona eufótica**, que corresponde aproximadamente à zona epipelágica. Abaixo desta camada encontra-se a **zona disfótica**, onde a quantidade de luz é ínfima e só pode ser medida por equipamentos muito sensíveis. O recorde de maior profundidade da zona disfótica foi de 600 m, registrado no Oceano Pacífico (Garrison, 2016). Abaixo da zona disfótica, segue-se a imensa massa dos oceanos que é absolutamente escura (**afótica** = sem luz) e fria (a temperatura média é de 4°C). Estas características determinam importantes processos no ambiente, como veremos adiante.

## 4. Os grandes compartimentos da vida marinha

Os organismos marinhos se distribuem em três grandes compartimentos: o **Plâncton**, o **Nécton** e o **Bentos**. Estes compartimentos serão detalhados nos capítulos seguintes, mas em linhas gerais, o plâncton e o nécton constituem comunidades pelágicas, sendo que o nécton é formado pelos organismos que têm natação ativa, ou seja, vencem as correntes (como os peixes e as baleias), enquanto o plâncton é levado pelos movimentos da água. O bentos é a comunidade que vive relacionada ao substrato.

Os organismos podem viver fixos ao substrato (**sésseis**) ou locomover-se sobre o fundo (**vágeis**). Alguns vivem enterrados no sedimento, inclusive podendo formar galerias para se abrigar. Os substratos podem ser naturais (rochas, sedimento) ou artificiais (como embarcações naufragadas, estruturas que ficam submersas como ancoradouros e cascos das embarcações).

Um dos pais da oceanografia biológica, o naturalista alemão Christian Andreas Victor Hensen, criou o termo "plâncton" e Ernst Haeckel, outro naturalista alemão de grande influência, diferenciou e conceituou os termos nécton e bentos (Haeckel, 1890).

Em termos físicos, um parâmetro muito usado para distinguir os organismos do plâncton e os do nécton é o Número de Reynolds (***Re***), que é uma importante unidade adimensional usada em mecânica de fluidos. De maneira sintética, valores baixos de ***Re*** caracterizam um fluxo laminar e valores altos indicam um fluxo turbulento. Para a escala de tamanho do plâncton, a água se comporta como um fluido viscoso (pois ***Re*** < 10) o que dificulta a propulsão desses organismos no meio e, portanto, eles ficam à mercê das correntes. Uma analogia que ilustra esse fenômeno seria a de tentarmos nadar em um rio de mel. A viscosidade do meio limitaria nossos movimentos e acabaríamos sucumbindo à força da correnteza, sem conseguir vencê-la. Como o nécton é composto por organismos maiores, a interação com a água determina ***Re*** maiores que 100, ou seja, o movimento desses organismos comporta-se como um escoamento turbulento, permitindo que eles tenham capacidade locomotora suficiente para vencer as forças das correntes.

### 4.1 O Plâncton

O plâncton é composto, em sua maioria, por organismos extremamente pequenos, da ordem de **micrômetros** (1 μm = 0,001 mm), o que lhes confere características especiais no que se refere à interação com o meio. Há organismos que apresentam locomoção (por meio de cílios, flagelos e apêndices natatórios) e outros que não têm mobilidade. Contudo, nenhum deles é capaz de vencer a força das correntes de água, sendo levados por elas. Em termos funcionais, o plâncton é dividido entre **virioplâncton**, **arqueoplâncton**, **bacterioplâncton**, **fitoplâncton**, **micoplâncon**, **zooplâncton** e **ictioplâncton**.

Há uma classificação relacionada ao tamanho dos organismos, que tem estreita relação com o aparato utilizado para coletá-los e as técnicas de estudo que permitiram a descoberta e visualização das formas menores. Contudo, essa classificação também tem forte relação com a biologia e função ecológica dos grupos. De acordo com Sieburth *et al*. (1978) temos as categorias: **fentoplâncton** (menores que 0,2 μm), **picoplâncton** (0,2 a 2 μm), **nanoplâncton** (2 a 20 μm), **microplâncton** (20 a 200 μm), **mesoplâncton** (200 μm a 20 mm), **macroplâncton** (2 a 20 cm) e **megaloplâncton** (acima de 20cm).

O plâncton tem um papel importantíssimo no ambiente marinho. Além de ser a principal base das redes tróficas marinhas, a maioria dos organismos bentônicos e nectônicos tem seus estágios larvais no plâncton. Portanto, essa comunidade, tão rica e diversa, também tem a função de ser um "berçário marinho" A comunidade planctônica será apresentada com detalhes no capítulo **Plâncton Marinho**.

## 4.2 O Nécton

O nécton é constituído por animais que têm capacidade locomotora suficiente para vencer as forças das correntes. Eles podem ser classificados em **pelágicos** e **demersais**, sendo os pelágicos aqueles que vivem na coluna d'água e os demersais aqueles que vivem próximos ao fundo, mas possuem flutuabilidade neutra ou positiva.

Sua distribuição, portanto, está condicionada a diversos fatores ambientais, mas não depende diretamente do arraste físico das correntes marinhas. É o domínio com a menor diversidade em grupos taxonômicos e espécies. Cerca de 5.000 espécies dos animais nectônicos são consideradas verdadeiramente pelágicas, ou seja, vivem e se alimentam na coluna d'água. Entretanto, vários peixes considerados nectônicos, vivem mais próximos ao fundo. Essa é uma estimativa parcial, pois não conhecemos toda a biodiversidade da Terra, principalmente a de águas marinhas mais profundas. No nécton, há desde peixes muito pequenos até grandes mamíferos, como as baleias-azuis, que podem chegar aos 30 m. Alguns peixes adultos, como a *Schindleria brevipinguis* que habita recifes de corais da Austrália, têm menos de 10 mm. Apesar de esta espécie ser bento-pelágica, alguns pesquisadores a consideram como pertencente ao plâncton, uma vez que os organismos não conseguem vencer as correntes. Várias espécies formam cardumes ou agregados, mas outras vivem isoladas. Os cardumes e os agregados têm diferentes funções, como reprodução, migração, proteção dos indivíduos, entre outras. Muitas espécies nectônicas são carnívoras ou onívoras. Dentre as onívoras, há várias espécies muito abundantes que são planctófagas (que se alimentam do plâncton).

A maioria dos animais nectônicos pertence ao grupo dos vertebrados, com exceção de alguns moluscos, como as lulas, e de alguns crustáceos decápodes, como algumas espécies de camarões, "krill" e siris. Os vertebrados que conhecemos como "peixes" são os dominantes no nécton. Peixe é um termo popular usado para identificar animais aquáticos com nadadeiras e respiração aquática por brânquias (com várias exceções de peixes que respiram também no ar), e não pertencem a uma categoria taxonômica que inclua apenas a eles. Por exemplo, o grande grupo dos Osteichthyes (que em grego significa literalmente peixe ósseo) inclui não apenas os peixes com esqueleto ósseo, mas todos os vertebrados com mandíbulas, exceto os peixes cartilaginosos (os Chondrichthyes). Há cerca de 32.000 espécies que chamamos de peixes (em rios, lagos e mares), principalmente de dois grandes grupos: o dos peixes ósseos e o dos peixes cartilaginosos juntamente com as feiticeiras (Myxiniformes) e lampreias (Petromysontiformes). Os peixes ósseos podem ter nadadeiras raiadas (Actinopterygii), que correspondem à maioria dos peixes viventes, ou nadadeiras lobadas (Sarcopterygii), que podem ser os celacantos (Actinistia) ou os peixes pulmonados (Dipnoi). Os peixes cartilaginosos são os tubarões, raias e quimeras. Maiores detalhes serão apresentados no capítulo **Diversidade de Peixes Marinhos**.

Os peixes têm hábitos de vida muito diferentes uns dos outros. Eles vivem em todas as regiões marinhas, desde as costeiras até áreas oceânicas, e em todas as profundidades. Há peixes da família Gobiidae, como os saltadores-do-lodo, que caminham pela lama e podem subir em árvores para se alimentar, há peixes-voadores que podem planar distâncias curtas e outros que habitam as grandes profundidades abissais. A quantidade de peixes nos diferentes ambientes marinhos não é homogênea. Eles são mais abundantes nas regiões costeiras, estuarinas, recifais e nas áreas de ressurgência, onde há mais alimento. Existem espécies como a sardinha, que são tipicamente pelágicas, pois vivem na coluna d'água e se alimentam do plâncton. No sistema pelágico há também muitos predadores que estão no topo da teia trófica como os atuns e vários tubarões.

Além dos peixes, encontram-se no nécton organismos do grupo dos Sauropsidas (tartarugas, serpentes, crocodilos e aves) e dos Mammalia (mamíferos). Eles têm origem de tetrápodes terrestres que se adaptaram ao meio aquático. Dentre esses animais, podem ser consideradas marinhas: sete espécies de tartarugas, cinco das quais ocorrem no Brasil; uma espécie de lagarto, a iguana-marinha; duas espécies de crocodilos-marinhos e cerca de 69 de serpentes-marinhas.

As aves marinhas são bastante diversificadas, havendo cerca de 300 espécies entre aves costeiras e oceânicas, mas todas se reproduzem em terra. Dentre as cerca de 130 espécies de mamíferos aquáticos atuais, incluem-se os cetáceos, ou seja, baleias, golfinhos e orcas, compondo cerca de 87 espécies; quatro espécies de sirênios (três peixes-boi e uma de dugongo); 36 espécies pinípedes (as focas, leões-marinhos, lobos-marinhos e morsas); os mustelídeos, com cerca de seis a oito espécies, que incluem a lontra-marinha e a lontra-européia, que pode ser encontrada em regiões costeiras. O único Ursidae marinho é o urso-polar que habita o polo Norte, hoje seriamente ameaçado de extinção devido ao derretimento da calota polar Ártica. O capítulo **Mamíferos Marinhos** tratará esse assunto com maior abrangência.

As tartarugas marinhas vivem o tempo todo na água, mas todas elas desovam em terra, em ninhos escavados na areia. Somente as fêmeas saem da água para desovar. Possuem as patas modificadas em nadadeiras, o casco é mais leve do que o dos jabutis e a forma do corpo é mais hidrodinâmica para facilitar a natação. O hábito alimentar dos adultos é variado; das que ocorrem no Brasil, a tartaruga-oliva é predominantemente carnívora, alimentando-se de salpas, crustáceos, peixes e, eventualmente, algas. É a menor espécie, com cerca de 35 a 65 kg. Já a tartaruga-verde é herbívora, alimentando-se de algas e outros vegetais, e atinge 160 kg. A tartaruga-de-pente vive em corais e alimenta-se, sobretudo, de esponjas, anêmonas, lulas, camarões e tem, em média, 85 kg. A tartaruga-cabeçuda também pode ser encontrada em recifes e alimenta-se de crustáceos, moluscos, mexilhões e outros invertebrados, e tem entre 70 a 180 kg. Finalmente, a tartaruga-de-couro alimenta-se principalmente de águas-vivas e salpas, é a maior espécie com peso médio de 400 kg, podendo chegar a 900 kg. Para conhecer melhor esse assunto, leia o capítulo **Tartarugas Marinhas**.

As iguanas-marinhas estão restritas ao Arquipélago de Galápagos, no Equador; possuem a cauda achatada para nadar e patas com garras fortes para se segurar nas rochas no fundo do mar e também subir nas encostas, quando em terra. Apesar de serem consideradas como pertencentes a uma única espécie, as populações que habitam as diferentes ilhas apresentam várias diferenças morfológicas e, por isso, são agrupadas em subespécies. Elas precisam do calor do Sol para manter sua temperatura corpórea e, por isso, passam bastante tempo fora da água. Elas são herbívoras, alimentando-se de algas. Os machos maiores são bons mergulhadores, e se alimentam em águas mais profundas, enquanto que, em geral, as fêmeas e os jovens se alimentam em áreas mais rasas e na região entremarés. Um hábito interessante das iguanas é posicionar-se contra o vento e espirrar o sal concentrado em suas glândulas especiais para a osmorregulação, que se abrem nas fossas nasais.

Há duas espécies de crocodilos que podem ser consideradas marinhas: os crocodilos-marinhos (*Crocodylus porosus*), que vivem na Indonésia e Austrália, e os crocodilos-americanos (*Crocodylus acutus*), que vivem no México, América Central e norte da América do Sul. São carnívoros e agressivos. Os crocodilos-americanos podem chegar aos 800 kg e vivem principalmente nos rios e nas águas salobras de manguezais, mas podem também entrar no mar. *Crocodylus porosus* é o mais agressivo e pode atingir grandes tamanhos, chegando até 6,5 m de comprimento e pesar em torno de 1 tonelada. As fêmeas colocam os ovos em ninhos na costa, os protegem e, após a eclosão, ainda cuidam dos filhotes por vários meses. Os indivíduos de ambas as espécies podem percorrer grandes distâncias no mar e, por vezes, são encontrados fora de sua área preferencial de distribuição. Algumas espécies que não são tipicamente marinhas ocorrem nos estuários, como o jacaré-de-papo-amarelo *Caiman latirostris*, bastante comuns em áreas de manguezais brasileiros.

As serpentes-marinhas pertencem à família Elapidae, a mesma das cobras-corais, e têm distribuição restrita aos oceanos Pacífico e no Índico, portanto não ocorrem no Brasil. Elas vivem principalmente em áreas costeiras protegidas e próximas à desembocadura dos rios, mas podem ser também encontradas em recifes de coral e em mar aberto. Elas geralmente não são agressivas, mas devido à alta toxicidade da peçonha podem provocar acidentes quando provocadas. As serpentes-marinhas possuem a cauda achatada para nadar e válvulas nas narinas que fecham enquanto estão submersas. A maioria das espécies alimenta-se de peixes. Muitas são vivíparas, dando nascimento aos filhotes no mar, mas há espécies ovíparas, que colocam os ovos em fendas rochosas e outros lugares abrigados da costa. Algumas espécies de cobras semiaquáticas de outras famílias podem ser encontradas em águas salobras ou podem viver em áreas estuarinas, como *Nerodia clarkii*, conhecida como "*salt marsh snake*" do sul dos Estados Unidos, mas não podem ser consideradas como verdadeiramente marinhas. A Figura 4 apresenta alguns representantes do nécton, para além dos peixes e baleias.

**FIGURA 4. Organismos nectônicos: A)** *Nautilus* **sp., molusco cefalópode; B) tartaruga-verde (***Chelonia mydas***); C) iguana-marinha (***Amblyrhynchus cristatus***); D) serpente marinha (***Emydocephalus ijimae***); E) atobá-pardo (***Sula leucogaster***); F) tesourão (***Fregata magnificens***); G) foca-do-porto (***Phoca vitulina***); H) urso-polar (***Ursus maritimus***).** *As imagens das aves foram cedidas por Francisco Luiz Vicentini Neto e as demais imagens foram cedidas por Marcelo Roberto Souto de Melo, ambos do IOUSP.*

As duas espécies de aves apresentadas na Figura 4 são comuns na costa brasileira. Algumas aves marinhas podem passar anos no mar e virem para a terra apenas ao atingirem a maturidade, para desovar. Elas podem nadar na superfície e/ou sob a água usando as asas e os pés para isso. As asas dos pinguins são especialmente modificadas para nadar e essas aves perderam totalmente a capacidade de voo. São animais endotérmicos, os ditos de "sangue quente", e com metabolismo alto. O voo requer um grande gasto energético, por isso necessitam de áreas ricas em alimento. Os pinguins têm os corpos mais pesados e densos do que as aves que voam, além das penas curtas e imbricadas. Essas adaptações são importantes para sobrevivência e cuidados com a prole sob as baixas temperaturas onde vivem. A maioria das aves tem visão extremamente desenvolvida, mas o sentido do gosto e olfato não são tão aguçados. Muitas espécies são migratórias e podem percorrer longas distâncias, como os trinta-réis que migram do Ártico para a Antártica, em busca dos verões de ambos os hemisférios. Nas rotas migratórias, as aves precisam parar para descansar e se alimentar ao longo do caminho. A urbanização e outras mudanças provocadas pelo homem podem prejudicar enormemente esse processo e causar mortalidade em massa dos indivíduos. O capítulo **Aves Marinhas** tratará com detalhes deste grupo especial e fascinante da fauna marinha.

São poucos os invertebrados que podem ser considerados verdadeiramente nectônicos, pois a maioria das espécies tem capacidade natatória menor do que a de vertebrados em geral. Entretanto, alguns moluscos e crustáceos, principalmente, podem ser considerados do nécton. As lulas são as mais conhecidas, bastante abundantes, ótimas nadadoras e importantes comercialmente. Lulas gigantes, como a do gênero *Architeuthis*, podem chegar aos 20 m de comprimento, vivem em profundidade e são nadadoras velozes. Alguns camarões e caranguejos também têm capacidade de natação desenvolvida. O krill, um crustáceo muito abundante na Antártica, é um caso controverso. Alguns autores os consideram planctônicos, enquanto outros, como nós, os consideram nectônicos.

### 4.3 O Bentos

O domínio bentônico é muito mais diversificado, em termos de variedade de habitats e de espécies, do que o pelágico. Ele difere em muitos aspectos, tais como profundidade, tipo de substrato, grau de imersão dos organismos, etc. O tipo de substrato e a disponibilidade de alimento são fatores determinantes para a abundância de indivíduos das diferentes populações. Assim como no ambiente pelágico, a luz, a temperatura e a pressão também condicionam a distribuição das espécies.

Os organismos que compõem o bentos também são extremamente diversificados. Distribuem-se por todos os ambientes marinhos, desde as regiões supralitorais até as grandes profundidades abissais e hadais. Podem ser encontrados em substratos consolidados, como rochas e costões, ou inconsolidados, como areias e sedimentos lamosos.

Considerando-se as variações latidutinais, longitudinais e de profundidade (que serão detalhadas mais adiante), as comunidades bentônicas assumem aspectos muito particulares em termos de composição de espécies, estrutura populacional, teias tróficas, interações entre comunidades e o meio abiótico. Quando se comparam ecossistemas polares com os tropicais, ou os de águas rasas com os de mar profundo, por exemplo, as diferenças são tão grandes que a impressão é de se estar em mundos diferentes.

Os autótrofos bentônicos compõem o **fitobentos** e são representados por macroalgas, vegetais superiores e o microfitobentos (que são microalgas semelhantes às que compõem o fitoplâncton, porém com hábitos bentônicos). Dependendo da disponibilidade de luz, o ambiente bentônico

pode contribuir substancialmente para a produção primária (esse conceito será apresentado mais adiante). Em regiões profundas, as bactérias bentônicas quimiossintetizantes são as principais responsáveis pela produção primária, especialmente nas fontes hidrotermais em mar profundo.

Os animais bentônicos (**zoobentos**) que vivem enterrados no sedimento, como vários moluscos, são denominados **infauna**. Aqueles que ficam sobre o sedimento ou substrato constituem a **epifauna**, que pode ser vágil (pode se locomover) como camarões e lagostas, estrelas-do mar; ou séssil (fixo ao substrato), tais como ostras, cracas, anêmonas, esponjas, ascídias e outros. Organismos bentônicos, principalmente os sésseis e os de hábitos de vida mais restritos, são muito utilizados em trabalhos de monitoramento ambiental, por refletirem as condições do solo e/ou da água circundante.

Quanto ao tamanho, os organismos podem ser classificados como **microbentos** (menores que 0,063 mm), **meiobentos** (entre 0,063 e 0,5 mm), **macrobentos** (entre 0,5 mm até 10,0 mm) e **megabentos** (maiores que 10,0 mm).

Diferentes estratégias reprodutivas são adotadas pelos organismos bentônicos. Muitos apresentam desenvolvimento direto, mas a grande maioria apresenta estágios larvais, geralmente planctônicos, com metamorfose e mudas em alguns casos. As fases larvais planctônicas garantem a dispersão dos organismos para outras áreas, especialmente para os que são sésseis na fase adulta. No plâncton, essas numerosas larvas podem encontrar alimento em abundância, mas também sofrem grande predação.

Na região entremarés encontram-se ecossistemas bentônicos muito importantes como os manguezais, as marismas, os costões, além da comunidade que habita as areias das praias na região entremarés.

Os manguezais são áreas alagadiças de interface terra-água, que estão condicionadas à ação das marés. São ambientes muito produtivos, embora relativamente pouco diversos. Sua vegetação, no Brasil, é composta por árvores de médio porte dentre as quais têm destaque as espécies: *Laguncularia racemosa*, *Rhizophora mangle* e *Avicennia schaueriana*, que popularmente são conhecidas como mangue branco, vermelho e preto, respectivamente, devido a características das plantas (Shaeffer-Novelli, 1995). Uma fauna abundante e diversificada habita o sedimento fino sob estas árvores. Os mangues são ambientes importantes em termos de ciclagem de nutrientes, constituem área de reprodução para muitas espécies e, em termos econômicos, são muito utilizados como fonte de recursos para as populações caiçaras. Esse importante ecossistema será tratado no capítulo **Manguezal: ecossistema entre a terra e o mar**.

As marismas são ambientes planos ou com pouca declividade, periodicamente cobertos pelas marés, que são colonizados principalmente por plantas herbáceas resistentes a variações de temperatura e salinidade. Predominam o gênero *Spartina* nas áreas mais inundadas e o junco nas áreas mais secas. Esses ambientes são bastante produtivos e têm um importante papel na criação de habitats para diversos organismos bentônicos (inclusive perifíton) e aves migratórias. Além disso, atuam como estabilizadores de linha de costa evitando a erosão, uma vez que as águas perdem velocidade no contato com os talos das plantas.

Os costões rochosos são ambientes habitados por uma diversificada flora e fauna bentônicas que apresentam padrões horizontais de distribuição (**zonação**) em função da variação da maré. Esses ambientes serão apresentados no capítulo **Ecologia do Bentos Marinho**.

As areias das praias contêm uma comunidade abundante, com predomínio de nemátodas, tardígrados, bactérias, fungos e microalgas que podem ficar aderidos aos grãos de areia ou nos interstícios dos sedimentos. Esses organismos podem realizar uma migração vertical ao longo

da coluna de sedimento em função da incidência de luz ou da fase da maré. A migração do microfitobentos pode ser perceptível em algumas praias: em determinado período do dia, a areia fica esverdeada quando as microalgas estão na superfície e, quando elas migram para as camadas mais profundas, a areia volta a ter a cor natural.

No infralitoral há inúmeros tipos de habitats bentônicos, desde comunidades que habitam o sedimento do fundo, como também em feições litorâneas particulares como os recifes, as florestas de macroalgas e os bancos de fanerógamas, por exemplo. As formações recifais, ambientes marinhos de grande relevância ecológica, podem ser de três tipos principais: recifes algáceos, como o Atol das Rocas, formados por algas que secretam carbonato de cálcio; recifes rochosos ou recifes praiais, formados por arenitos conglomerados (grãos de quartzo, cimentados por calcita); e os recifes de coral ou coralinos, formados pela acumulação de esqueletos carbonáticos de colônias predominantemente de corais e também de algas calcárias.

Os recifes de coral exigem, para sua formação, temperaturas da água acima de 20°C, águas rasas e iluminadas, limpas, com pouca turbidez, salinidade constante e energia de ondas. Os pólipos dos corais abrigam zooxantelas, algas fotossintetizantes, que vivem em simbiose em seus tecidos. Os recifes, especialmente os de corais, são extremamente ricos, produtivos e importantes, ocupando, por vezes, grandes áreas nos trópicos, como na Austrália. Os recifes de coral são os ambientes com maior biodiversidade dentre os ambientes marinhos do planeta. Efeitos globais estão ameaçando esse importante, mas frágil ecossistema.

As florestas de macroalgas também estão entre os ambientes marinhos de alta produtividade e diversidade. Ocorrem em áreas rasas banhadas por águas frias, ricas em nutrientes com predomínio de algas pardas do grupo das Phaeophyceae, que podem atingir dezenas de metros de comprimento. Elas flutuam na coluna de água, mas estão fixas ao fundo por um talo. Esses ambientes são ricamente habitados por peixes, crustáceos e vários outros organismos.

Considerando as regiões mais profundas, existem ecossitemas bentônicos muito singulares como as fontes termais (onde ocorrem exsudações de material magmático por fraturas na crosta terrestre) e os respiradouros frios (do inglês "*cold-seeps*") e os lagos salgados profundos, que serão apresentados no capítulo **Oceanografia Microbiana**.

Vale ressaltar que há vários organismos que não são considerados marinhos, mas frequentam esses ambientes e utilizam seus recursos. São encontrados, sobretudo, em praias, manguezais e restingas, tais como sapos, cobras, lontras, jacarés, gambás, ratões, aves, insetos, dentre outros, além dos domésticos como cães e gatos. Da mesma forma, existem espécies marinhas que invadem outras áreas, como exemplo: os caranguejos-guaiamum, peixes marinhos que entram na água doce, como os robalos e as tainhas, e muitas aves, como o talha-mar (*Rynchops niger*), comum no Brasil Central, nos rios Araguaia e Tocantins.

Existem também várias espécies que são de água doce cujo ancestral era marinho, como os boto-tucuxi (*Sotalia fluviatilis*) e boto-cor-de-rosa (*Inia geoffrensis*), caranguejos (*Trichodactylidae*), lagostins (*Aegla* sp.) e camarões (*Macrobrachium* sp.), mexilhão-dourado (*Limnoperna fortunei*), vários peixes (manjubas, corvinas, góbios, raias), etc.

Por fim, não podemos esquecer do ser humano, que, desde os primórdios da civilização, utiliza o mar e seus recursos de muitas maneiras diferentes. Hoje, nossa influência sobre os ambientes marinhos, em especial nas regiões costeiras, é maior do que nunca e deve ser motivo de profunda reflexão e responsabilidade. A Figura 5 apresenta alguns representantes do bentos.

**FIGURA 5. Diversidade de organismos bentônicos. A) Alga-verde** *Caulerpa* **sp. (Chlorophyta); B) esponja-azul** *Mycale* **sp. (Porifera) com vários ofiuróides (Echinodermata); C)** *Schizoporella unicornis* **(Ectoprocta); D) coral-cérebro** *Mussismilia hispida* **(Cnidaria); E) ascídia-vermelha** *Symplegma rubra* **(Tunicata); F) poliqueta-tubícola** *Branchiomma luctuosum* **(Annelida); G) ouriço-roxo** *Lytechinus variegata* **(Echinodermata); H) nudibrânquio** *Flabellina marcusorum* **(Mollusca); I) caranguejo-aranha** *Stenorhynchus seticornis* **(Crustacea); e J) cavalo-marinho** *Hippocampus* **sp. (Osteichthyes).** *Fotos: Leandro Coelho.*

## 5. A teia trófica marinha

Toda cadeia trófica, seja ela marinha ou terrestre, se inicia a partir da transformação de energia em biomassa que vai conduzir a energia, na forma de ligações químicas, de um nível trófico a outro. Como as cadeias tróficas interconectam e se complementam, o termo teia (ou rede) trófica é mais adequado para descrever este imbricado sistema de fluxo de energia entre os organismos. Em termos de estratégias de obtenção de energia, os organismos podem ser divididos nas seguintes categorias: autótrofos, heterótrofos, mixotróficos e detritívoros.

Os organismos **autotróficos** (ou autótrofos) são os que sintetizam matéria orgânica a partir de substratos inorgânicos. Dentre os autotróficos, temos duas categorias de organismos: os **fotossintetizantes** e os **quimiossintetizantes**, que serão apresentados com detalhes nos próximos capítulos. Porém, em linhas gerais, os fotossintetizantes são aqueles que sintetizam matéria orgânica a partir da fotossíntese oxigênica (algas e plantas) ou anoxigênica (bactérias verdes e púrpuras). Para isso possuem clorofila-a e outros pigmentos fotossintetizantes e, portanto, são dependentes da luz. Os quimiossintetizantes são os organismos capazes de sintetizar compostos orgânicos utilizando a energia química de algumas substâncias simples, como compostos de ferro, enxofre e nitrogênio, em lugar da energia da luz.

O processo de fixação biológica de carbono a partir de substratos inorgânicos em moléculas orgânicas através da foto ou quimiossíntese é chamado **produção primária**. A **produtividade primária** representa a taxa de produção primária por unidade de tempo em um dado volume ou área (por ex.: $mgC \cdot m^{-3} \cdot h^{-1}$). A produtividade primária de uma área determina a abundância de organismos que ela pode sustentar.

Os organismos **heterotróficos** (ou heterótrofos) são os que utilizam matéria orgânica pronta disponível no meio, sendo representados pelas bactérias e protistas heterótrofos e os animais. São os "consumidores" da teia trófica. Os organismos **mixotróficos** são aqueles que podem fazer fotossíntese quando se encontram na zona eufótica, mas que são capazes de sobreviver alimentando-se de substratos complexos, como matéria orgânica dissolvida na água, quando permanecem na zona afótica. Portanto, apresentam hábitos autotróficos ou heterotróficos de acordo com as condições do meio.

Finalmente, os organismos **detritívoros**, que em última instância também são heterótrofos, alimentam-se de matéria orgânica morta fazendo o importante papel de decomposição e redisponibilização de nutrientes para a teia trófica.

Toda a energia que sustenta as regiões marinhas provém, em princípio, da produção primária. O plâncton, por conter as microalgas e bactérias autótrofas, é a principal base das redes tróficas marinhas. Entretanto, em algumas áreas rasas ou onde a luz penetra até o sedimento, o microfitobentos (comunidade de microalgas que habita o sedimento), as macroalgas e as plantas marinhas também são importantes produtores primários. O fluxo de nutrientes ao longo da coluna de água e na interface água-sedimento é um fator que condiciona a produtividade primária de uma região.

Há regiões onde a produção fitoplanctônica é alta (como nas ressurgências) e, portanto, ela se constitui na via principal de entrada de energia para teia trófica. Porém, em mar profundo, a via de entrada principal é a bentônica pela quimiossíntese das bactérias e o aporte de matéria orgânica que vem das camadas superficiais. A relação dinâmica entre coluna d'água e o fundo é chamada acoplamento bento-pelágico. A Figura 5 apresenta de modo esquemático e simplificado uma rede trófica marinha.

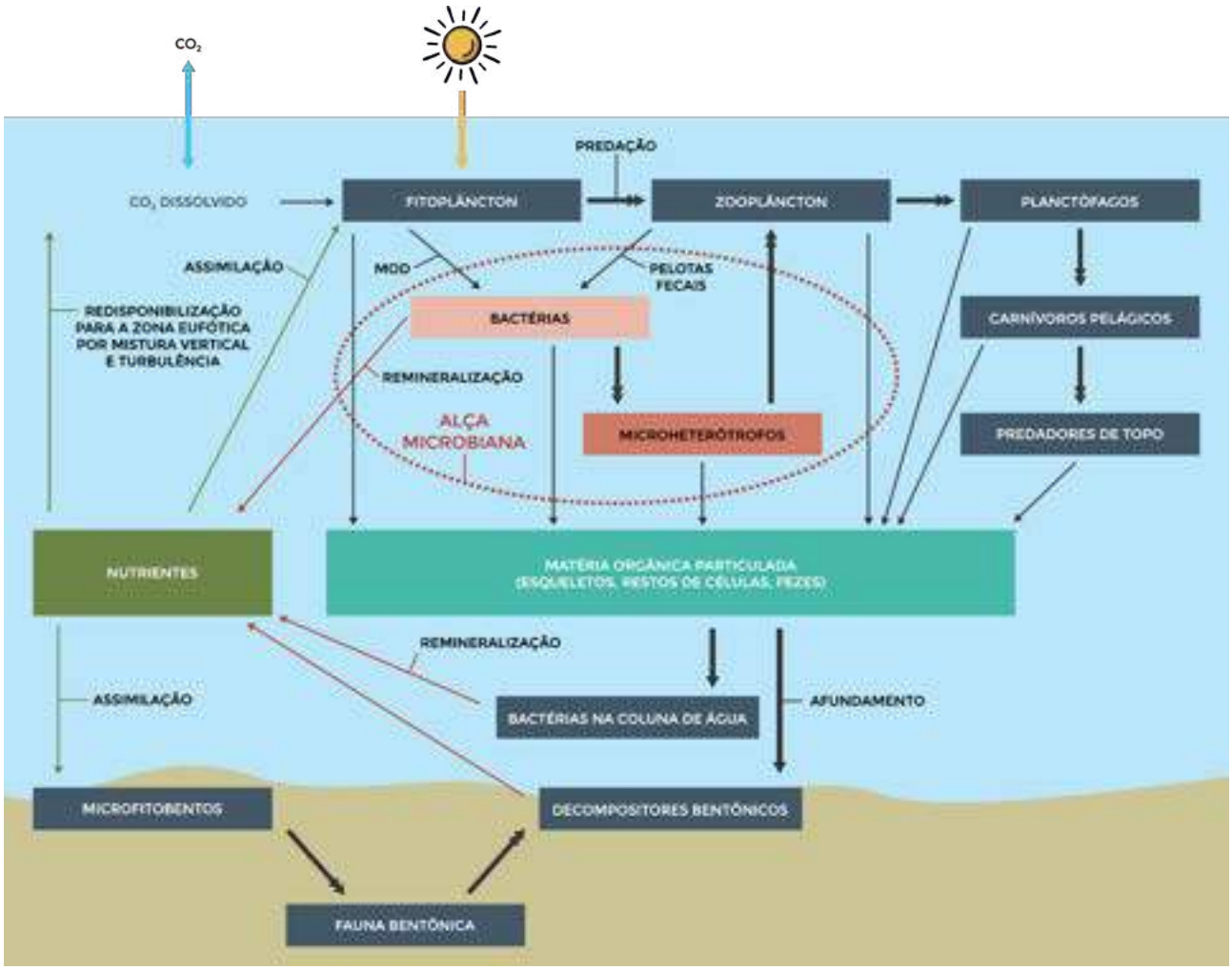



**FIGURA 5.** Esquema de uma teia alimentar marinha simplificada, com destaque para a "Alça Microbiana".

O bacterioplâncton tem um papel ecológico muito importante que só foi descoberto na década de 1980 (Azam *et al.*, 1983). Por poder utilizar a matéria orgânica dissolvida (MOD) na água, resultante da excreção do fitoplâncton, ele acaba por sintetizar biomassa suficiente para alimentar organismos nano e microheterótrofos, que por sua vez tornam-se alimento para o microzooplâncton, constituindo uma via alternativa de alimento para estes últimos organismos, em relação à cadeia trófica tradicional.

Esta MOD estaria perdida para a rede trófica tradicional, não fosse a capacidade de reaproveitamento deste material pelos microrganismos do picoplâncton (via produção heterotrófica). Criou-se, então, a expressão "**alça microbiana**" para identificar este elo adicional entre produtores e consumidores no ambiente marinho.

Em termos de fluxo de matéria e energia na teia trófica existem controles que atuam dos níveis tróficos inferiores para os superiores, os **controles ascendentes** (do inglês, "*bottom-up*"), ou dos níveis tróficos superiores para os inferiores, os **controles descendentes** (ou "*top-down*").

A deficiência de nutrientes leva a uma menor produção primária que determinará menor biomassa ao longo da teia trófica, representando um controle ascendente. Um exemplo de controle descendente é a pressão de predação que um predador de topo pode exercer sobre os organismos de níveis tróficos inferiores, diminuindo sua biomassa.

## 6. Distribuição dos organismos no mar

A biota marinha não é homogeneamente distribuída nem vertical nem horizontalmente. A composição, abundância e diversidade das comunidades são moduladas principalmente por três grandes gradientes ambientais: 1) o **gradiente latitudinal** (do Equador para os polos); 2) o **gradiente de profundidade** (ou vertical); e 3) o **gradiente longitudinal**, da região costeira para o mar aberto. A interação destes gradientes gera condições muito distintas em relação à sazonalidade, iluminação, temperatura, pressão hidrostática, aporte de nutrientes, movimentos da água, interação com o fundo, dentre outros, que determinam diferentes tipos de habitats.

A radiação solar é a principal fonte de energia do nosso planeta. A energia do Sol penetra na coluna de água e parte dela é absorvida e convertida em calor. O fator mais determinante para o **gradiente latitudinal** advém de o eixo da Terra estar inclinado em relação ao Sol, de modo que a incidência e intensidade da radiação solar não são homogeneamente distribuídas no planeta, causando as variações climáticas sazonais nos continentes e também nos oceanos. Esta distribuição desigual de calor determina padrões de estratificação da coluna de água e padrões de circulação de correntes marinhas. As águas superficiais dos oceanos são aquecidas pelo Sol, o que estabelece uma estrutura térmica vertical em três camadas principais: a camada de mistura, mais superficial e mais quente (de 50 a 150 m de profundidade), a camada intermediária, onde ocorre uma rápida redução da temperatura em função da profundidade (o que chamamos termoclina permanente), e a camada profunda que banha o leito oceânico, cujas temperaturas variam entre 0 e 4°C. Nas regiões polares, como o aquecimento superficial é pequeno, a coluna de água é homogênea. Já nas regiões tropicais, esta estratificação em camadas é bem marcante e ainda há a formação de uma termoclina sazonal na camada de mistura, especialmente no verão. A presença da termoclina é um fenômeno muito importante porque ela atua como uma barreira física para os microrganismos e para o fluxo de nutrientes ao longo da coluna de água. Isso tem consequências importantes em toda hidrodinâmica e dinâmica trófica.

Em termos de comunidades biológicas, pode-se dizer que a diversidade dos organismos tende a aumentar das altas latitudes em direção ao Equador e é notório que os ecossistemas polares são muito distintos dos tropicais, embora ambos possam ser muito produtivos e com grande abundância de organismos.

Considerando o **gradiente vertical**, além das variações de temperatura e luz já discutidas, outra forçante importante é a pressão hidrostática, gerada pelo peso da coluna de água, que condiciona limites físicos para organismos que habitam zonas profundas ou para os que nadam ao longo de diferentes profundidades. Os peixes batiais têm adaptações morfológicas e fisiológicas muito particulares para sobreviverem naquelas condições (como será visto no capítulo **Diversidade de Peixes Marinhos**).

Além da luz, um dos principais fatores que limitam a produção primária marinha é a disponibilidade de nutrientes, como nitrogênio, fósforo, potássio e sílica. Os ambientes que apresentam grande disponibilidade de nutrientes são ditos **eutróficos**, seguidos pelos **mesotróficos** (intermediários) e os **oligotróficos** (pobres em nutrientes). Os fotoautótrofos absorvem os nutrientes inorgânicos presentes na zona eufótica para a produção de biomassa. Assim, a camada de mistura tende a ficar empobrecida e a produtividade primária pode diminuir em função disto. Normalmente, as camadas mais profundas possuem uma maior disponibilidade nutricional porque o consumo é menor e também porque a matéria orgânica que sedimenta é decomposta por bactérias e outros decompositores ao longo da coluna de água (ou no fundo). Esse processo é chamado de **remineralização**: a matéria orgânica é decomposta e os nutrientes inorgânicos são redisponibilizados para o meio (Fig. 5). Cerca de 1/3 da produção primária da zona eufótica é exportada para as camadas mais profundas, por meio do

afundamento passivo das partículas, constituindo a **neve marinha**. Esta entrada de matéria orgânica que é utilizada pelas comunidades de camadas mais profundas (nas zonas disfótica e afótica) constitui um processo chamado **bomba biológica** (Longhurst & Harrison, 1989). Eventualmente, esse material que sedimenta também vai sofrendo decomposição, e os nutrientes podem voltar na forma inorgânica para a coluna de água. A comunidade picoplanctônica tem papel fundamental nesta dinâmica, por meio da alça microbiana.

Neste contexto, outro gradiente vertical é estabelecido: as camadas mais superficiais apresentam geralmente menor disponibilidade nutricional do que as camadas profundas e, para que o ciclo de produção, consumo, regeneração e reutilização se feche, é necessário que estes nutrientes voltem à zona eufótica. Muitos são os mecanismos advectivos que levam águas profundas (e ricas em nutrientes) para as camadas superficiais, como por exemplo: as ressurgências, turbulências, vórtices, zonas de divergência de células de circulação, processos que levem à desestabilização da termoclina, o revolvimento do fundo por ação de ondas ou correntes de maré.

Da mesma maneira, nutrientes "novos" entram nos mares pelo aporte de rios, drenagem continental, água intersticial continental que deságua direto na área costeira, por precipitação atmosférica (trocas ar-mar ou por dissolução de partículas do ar nas chuvas), e circulação profunda, que leva as águas frias e ricas em nutrientes das regiões polares em direção ao Equador, pelas camadas profundas da coluna de água, sofrendo interações e modificações ao longo de seu percurso. Correntes de fundo também podem interagir com o relevo submarino (como uma montanha ou uma ilha), e subir para a zona fótica, enriquecendo o ambiente com nutrientes.

A disponibilidade de oxigênio também controla a distribuição dos organismos, especialmente no sedimento. As camadas superiores dos sedimentos normalmente são oxigenadas, mas, em poucos centímetros, o ambiente pode se tornar anóxico e a biota muda completamente. O oxigênio se difunde melhor em águas mais salinas e mais frias, condições normalmente observadas em águas mais profundas. Contudo, em áreas poluídas (que recebem grande aporte de esgotos principalmente), as concentrações de oxigênio podem cair significativamente chegando até níveis incompatíveis com a vida aeróbica. Essas regiões são chamadas de **zonas mortas**, pela ausência de organismos aeróbicos e refletem desequilíbrio ambiental, com graves consequências.

O **gradiente longitudinal** é representado pelos domínios nerítico e oceânico (já apresentados). A região nerítica recebe maior aporte de nutrientes e, portanto, é onde predominam os ambientes eutróficos ou mesotróficos, em contraposição ao oceano aberto, que é oligotrófico. Os grandes giros centrais dos oceanos são ultraoligotróficos e todo o sistema se sustenta basicamente na reciclagem de nutrientes por bactérias, já que a comunidade é eminentemente picoplanctônica. A despeito do pequeno tamanho dos organismos, as populações são numerosas e, como estas áreas representam vastas porções dos oceanos, a produtividade total delas é muito significativa para os ciclos biogeoquímicos.

A salinidade é um fator importante para a distribuição dos organismos, especialmente no gradiente longitudinal, pois é na região costeira onde ocorrem as maiores variações de salinidade pela entrada de rios, despejo de efluentes e até por ação de chuvas em função da menor profundidade. Em relação ao volume do corpo de água onde se precipitam e de sua intensidade, as chuvas podem provocar variações significativas na salinidade superficial.

Considerando os organismos, é preciso que exista um equilíbrio osmótico entre o teor de sal no interior das células e no meio externo. Há vários mecanismos fisiológicos que são utilizados para manter esse controle. No entanto, há limites. Cada organismo tem uma faixa de ótimo de salinidade para sobreviver. Próximo aos extremos desta faixa começa a haver danos em estruturas celulares,

entrada ou saída excessiva de água por osmose, alterações na flutuabilidade, fatores que podem levar o organismo à morte. Os organismos que têm uma ampla faixa de tolerância à variação de salinidade são ditos **eurihalinos**, em oposição aos que têm uma tolerância mais restrita, os **estenohalinos**.

Portanto, a vida no mar é o resultado de um processo dinâmico entre as condições abióticas (o ambiente com seus diversos componentes) e as condições bióticas, que além das características biológicas do indivíduo (morfologia, fisiologia, estratégias adaptativas) envolve também suas relações tróficas nas complexas redes marinhas.

## 7. Conclusão

Quando observamos a superfície do mar, ele nos parece uma imensa massa homogênea de água. Contudo, os ambientes marinhos e as formas de vida que os ocupam são muito diversos e complexos. Os avanços recentes da tecnologia e do conhecimento humano têm nos permitido desvendar e entender melhor a imensidão compreendida pelos oceanos. No entanto, há muita coisa que ainda desconhecemos, não apenas no aspecto da biodiversidade marinha, mas também sobre os ambientes extremos, recursos naturais e processos em diversas escalas espaço-temporais, que ainda precisam ser mais bem investigados e entendidos, inclusive para que a relação do homem com os oceanos se torne mais sustentável. Sem dúvida, há um vasto campo de estudo aberto para a Oceanografia em todas as suas vertentes e com todas as suas interconexões com as outras ciências.

Foto: Leandro Coelho

## Referências Bibliográficas

AZAM, F.; FENCHEL, T.; FIELD, J. G.; GRAY, J. S.; MEYER-REIL, L. A. & THINGSTAD, F. 1983. The ecological role of water-column microbes in the sea. Mar. Ecol. Prog. Ser., 10, 257-263.

CALIJURI, M. C., CUNHA, D. G. F. & MOCCELIN, J. 2013. Fundamentos Ecológicos e ciclos naturais. Cap. 7 In: Engenharia Ambiental: Conceitos, Tecnologia e Gestão. Calijuri, M. C., Cunha, D. G. F. (eds.). Rio de Janeiro, Elsevier. 789p.

FIELD, C. B., BEHRENFELD, M. J., RANDERSON, J. T. & FALKOWSKI, P. 1998. Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components. Science, 281(10), 237-240.

GARISSON, T. 2016. Fundamentos de Oceanografia. 2ª ed. São Paulo, Cengage Learning. 480p.

HAECKEL, E. 1890 Plankton-studien. Jenaische Zeitschrift für Naturwissenschaft. 25 Bd (n.F. 18 Bd), 232-237.

LONGHURST, A.R. & HARRISON, W.G. 1989. The biological pump: profiles of plankton production and consumption in the upper ocean. Prog. Oceanog., 22:47-123.

MEC (Ministério da Educação). 2020. Portal do Professor. <http://portaldoprofessor.mec.gov.br/index.html>. Acesso em: 4 de abril de 2020.

SHAEFFER-NOVELLI, Y. 1995. Manguezal: ecossistema entre a terra e o mar. Caribbean Ecological Research, São Paulo. 64p.

SIEBURTH, J. M. C. N.; SMETACEK, V. & LENZ, J. 1978. Pelagic ecosystem structure: heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions. Limnol. Oceanogr., 23(6): 1256-1263.

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 21*

# PLÂNCTON MARINHO

*Flávia Saldanha-Corrêa & Sônia Maria Flores Gianesella*

REVISÃO: MARCOS CÉSAR DE OLIVEIRA SANTOS

CITAÇÃO SUGERIDA: SANDANHA-CORRÊA, Flávia; GIANESELLA, Sônia Maria Flores. Plâncton marinho. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 21: p. 449-470.

# Plâncton Marinho

*Flávia Saldanha-Corrêa*
*& Sônia Maria Flores Gianesella*

## 1. Introdução

O plâncton é uma comunidade constituída por uma ampla gama de organismos que vivem em suspensão na coluna de água e apresentam pouco ou nenhum poder de locomoção, sendo, portanto, transportados passivamente por correntes ou movimentos das massas de água nas quais se encontram.

O termo plâncton é originário do grego (*planktos* = errantes) e foi proposto pelo biólogo alemão Victor Hensen em 1887, designando todas as partículas orgânicas, vivas ou mortas, que flutuam livremente nos corpos de água.

Hoje, o termo se aplica apenas aos organismos que se encontram em suspensão nas águas, sejam elas doces, salobras ou marinhas. As partículas em suspensão não-vivas (organismos mortos, detritos orgânicos e minerais) recebem o nome de **trípton** e o plâncton + o trípton compõem o que se conhece por **séston**.

As primeiras observações do plâncton foram feitas em 1832 por Johannes Müller, médico e pesquisador alemão, que capturou esses organismos ao passar uma rede de seda pela superfície do mar e observar o material em um microscópio. Portanto, Müller é considerado o criador da planctologia.

Pelo tamanho diminuto, os organismos só podem ser observados com algum detalhe a partir de um aumento de cerca de 30 vezes. Entretanto, existem alguns organismos visíveis a olho nu.

O plâncton é uma comunidade muito diversificada e heterogênea em termos de composição, forma e tamanho dos organismos. Fazem parte do plâncton desde os *vírus* (seres intermediários entre ser vivo e inanimado, uma vez que não apresentam atividade metabólica exceto quando no interior de células vivas), passando por organismos *procariotos* (arqueias, bactérias, cianobactérias e proclorófitas), até *eucariotos* (células com núcleo organizado e sistema de membranas). Podem ser unicelulares (com representantes dos Domínios Archaea, Bacteria e Reinos Protista e Plantae) como pluricelulares (com representantes dos Reinos Animalia).

Dada esta grande diversidade, o plâncton é subdividido em várias categorias de acordo com características como: nível de organização celular, tipo de nutrição, tamanho do organismo, habitat e até mesmo com o tempo de permanência no ambiente planctônico ao longo do ciclo de vida.

## 2. As classificações do plâncton

De acordo com o nível de organização celular, os organismos planctônicos podem ser classificados como:

**Virioplâncton:** composto pelos vírus, que são abundantes no ambiente marinho.

**Arqueoplâncton:** composto pelas arqueias.

**Bacterioplâncton:** composto pelas bactérias marinhas.

**Micoplâncton:** é o grupo composto pelos fungos, especialmente por suas formas reprodutivas.

**Fitoplâncton:** comunidade composta pelas cianobactérias, proclorófitas e microalgas.

**Zooplâncton:** corresponde ao plâncton animal, composto pelos protistas heterótrofos e animais.

**Ictioplâncton:** constituído por ovos e larvas de peixes.

Essas categorias listadas acima serão apresentadas com maior detalhamento na seção 3 "**Componentes do Plâncton**".

Com relação ao modo de nutrição, os organismos podem ser autotróficos, heterotróficos e mixotróficos (definições já apresentadas no capítulo **A Vida no Mar**).

Outro critério bastante útil, é a divisão por classes de tamanho do organismo, que surgiu em decorrência dos aparatos utilizados para coleta e, no caso das categorias menores, graças ao desenvolvimento de novas técnicas ou aplicação à oceanografia de técnicas utilizadas em ciências correlatas (como a biologia molecular). Desse modo, temos:

**Fentoplâncton:** constituído por organismos de tamanho inferior a 0,2 μm (lembrando que 1 μm = 0,001 mm), correspondendo aos vírus, descobertos nas décadas 1980-1990 graças à aplicação de técnicas de biologia molecular aos estudos em oceanografia e limnologia.

**Picoplâncton:** organismos de tamanho entre 0,2 e 2,0 μm, composto por arqueias, bactérias, proclorófitas e organismos eucariontes de vários grupos (como as picobilifita). A descoberta destes organismos ocorreu com o desenvolvimento e aplicação de técnicas microscopia eletrônica, no fim da década de 1970. O picoplâncton corresponde à fração de organismos mais abundantes nos oceanos, especialmente em águas oligotróficas (pobres em nutrientes) como as de regiões oceânicas.

**Nanoplâncton:** organismos de tamanho entre 2,0 e 20 μm. Nesta categoria há principalmente organismos que compõem o fitoplâncton (as microalgas), com predomínio de células que têm flagelos, denominadas genericamente como "fitoflagelados".

**Microplâncton:** tamanho entre 20 e 200 μm, com representantes maiores do fitoplâncton e menores do zooplâncton.

**Mesoplâncton:** compreende organismos de tamanho entre 0,2 a 20 mm com predomínio de representantes do zoo e ictioplâncton.

**Macroplâncton:** organismos visíveis a olho nu, com tamanhos entre 2 a 20 cm.

**Megaloplâncton:** representado pelos organismos maiores (acima de 20 cm), tais como medusas e caravelas que vivem na coluna de água ou flutuando na superfície da água.

Em termos de habitat ou distribuição geográfica, o plâncton marinho também pode ser chamado de **haliplâncton**, enquanto que o plâncton de água doce é denominado **limnoplâncton**.

De acordo com a região onde habita, o haliplâncton pode ser:

**Oceânico:** presente além do limite da plataforma continental.

**Nerítico:** habita as águas sobre a plataforma continental.

**Estuarino:** Habita os estuários. Como esses ambientes apresentam grande variação de salinidade em função das marés, normalmente predominam nos estuários os organismos *eurihalinos*, que suportam essas condições, em contraposição aos organismos *estenohalinos*, que toleram pouca variação de salinidade e predominam no plâncton oceânico. As espécies que têm ampla distribuição pelos oceanos são ditas **cosmopolitas**, enquanto que as mais restritas a certos locais são ditas **endêmicas**.

Considerando a distribuição vertical do plâncton no oceano, ou seja, à faixa de profundidade onde vivem, temos as seguintes categorias:

**Plêuston:** parte do corpo fica fora da água e os ventos auxiliam no deslocamento dos organismos, como as macrocolônias de medusas dos gêneros *Physalia* e *Vellela*.

**Nêuston:** vivem na microcamada de até 10 mm na superfície da coluna de água. Este microambiente é habitado principalmente pelo ictioplâncton, como veremos adiante.

**Epipelágico:** vivem na faixa até os 200m de profundidade, que corresponde também à zona eufótica. Portanto é nesta camada onde encontramos a maioria dos organismos fotossintetizantes.

**Mesopelágico:** vivem entre 200 e 1000 m de profundidade.

**Batipelágico:** vivem abaixo de 1000 de profundidade.

**Abissopelágico:** vivem em estreita relação com o fundo, como nas fontes hidrotermais ("chaminés submarinas"). As bactérias merecem destaque nessas profundidades por serem os principais produtores primários. Em condições muito especiais, pode ocorrer uma fotossíntese muito particular, que utiliza a radiação infravermelho das exsudações quentes de material magmático como fonte de energia. Contudo, o principal processo é a quimiossíntese realizada por bactérias, como será visto no capítulo **Oceanografia Microbiana**.

Os organismos também são classificados de acordo com o tempo de permanência na comunidade planctônica. Assim, temos:

**Holoplâncton** ou **Euplâncton**: o organismo tem o seu ciclo de vida no plâncton. São exemplos: o fitoplâncton, os copépodos, os chaetognatos e os apendiculárias.

**Meroplâncton:** são os organismos que permanecem no plâncton apenas uma parte do ciclo de suas vidas. É o caso dos ovos e fases larvais dos peixes (ictioplâncton) e de vários outros animais bentônicos como os cirripédios (cracas), poliquetos, moluscos, equinodermos, decápodes (camarão, siris e caranguejos) e octópodes (polvos).

**Ticoplâncton** ou **Pseudoplâncton**: constituído por organismos de hábito bentônico ou perifítico (que vivem aderidos a substratos submersos, formando um biofilme) que vão ocasionalmente para o plâncton. Ex.: algumas microalgas bentônicas, fungos e outros organismos que são descolados do substrato pela força das correntes e ficam em suspensão na água por algum tempo.

# 3. Os componentes do plâncton

## 3.1 Virioplâncton

Os vírus são partículas extremamente pequenas variando entre 20 e 250 nm - 1 nanômetro (nm) = 0,000001 mm - que não possuem estrutura celular nem metabolismo próprio, dependem de outros organismos para se reproduzir. Por terem características que fogem aos padrões taxonômicos clássicos, muitos autores preferem referir-se a "populações" de vírus e não a espécies.

Eles são extremamente abundantes na água do mar, correspondem a 5% de toda massa viva dos oceanos. Suas concentrações variam entre 10 a 100 milhões de partículas por mL e são encontrados em todos os ambientes marinhos.

O estudo dos vírus no ambiente marinho é relativamente recente. Os primeiros trabalhos surgiram no final da década de 1980, quando foram aplicadas técnicas de biologia molecular aos estudos dos componentes do plâncton. Assim, os vírus puderam ser detectados e quantificados.

A virologia marinha é um campo fértil para novas descobertas. Até 2019 cerca de 15 mil espécies de vírus marinhos eram conhecidas, quando uma publicação assinada por dezenas de autores (Gregory *et al.*, 2019) reportou a existência de cerca de 200 mil espécies novas de vírus marinhos, distribuídos em cinco áreas bem diferenciadas: o oceano Ártico, o Antártico e nas águas temperadas próximas dos trópicos nas camadas superficiais, intermediárias (de 150 a 1.000 m) e profundas até 4.000 m. Essa publicação foi resultado de uma expedição[1] que cobriu todos os oceanos e contou com a participação de centenas de pesquisadores de vários países, contribuindo para revelar muitos organismos desconhecidos, além dos vírus.

Os autores do referido artigo relatam que a zona temperada é a que apresenta maior diversidade de vírus, seguida pelo oceano Ártico. Normalmente, a diversidade de espécies da maioria dos seres vivos é maior na região do Equador e diminui em direção aos polos.

No caso dos vírus, isso vale para o oceano Antártico, onde existe comparativamente menor diversidade do que nas regiões temperadas, mas não é o que se observa em direção ao Ártico. Os autores destacam que é precisamente este oceano que está mudando mais rápido devido à mudança climática.

Provavelmente os vírus podem infectar vários organismos, porém ainda pouco se sabe sobre estas relações. Dos 10% dos vírus marinhos melhor estudados, observa-se que há preferência por infectar organismos unicelulares: há os bacteriófagos, que infectam as bactérias e os ficovírus, que infectam o fitoplâncton. Há evidências de que uma única célula possa ser infectada por diversos tipos de vírus simultaneamente. O entendimento destas relações ainda demanda muito estudo de metagenômica.

De acordo com Fuhrman (1999), os vírus sofrem rápidas flutuações em suas populações e desempenham um papel ecológico importante, porque influenciam muitos processos biogeoquímicos e biológicos, incluindo os ciclos de nutrientes, respiração do sistema, distribuição de partículas e taxas de afundamento, diversidade e distribuição de bactérias e algas, controle de florações algáceas e transferências genéticas. Portanto é um campo bastante promissor para importantes descobertas e entendimento da dinâmica marinha.

[1] Fondation Tara Océan: <https://oceans.taraexpeditions.org/>

### 3.2 Arqueoplâncton

As arqueias são uma categoria de organismos procariontes, que até pouco tempo pertenciam ao bacterioplâncton. Contudo, com a evolução dos estudos e o entendimento de suas características e funções, verificou-se a existência de características singulares que as diferenciam das bactérias, por isso foram propostos dois Domínios distintos: Domínio Archea e Domínio Bacteria. As arqueias são organismos muito antigos, encontrados em ambientes de condições extremas, por isso são considerados organismos extremófilos. Podem viver em ambientes com altas salinidades (halófitas) ou altas temperaturas (termófilas). Muitas são anaeróbicas obrigatórias, outras produzem metano. Podem apesentar metabolismo autotrófico ou heterotrófico e também podem ser encontradas no sedimento, compondo nesse caso, a comunidade bentônica. As arqueias serão melhor exploradas no capítulo **Oceanografia Microbiana**, que tratará também do bacterioplâncton.

### 3.3 Bacterioplâncton

O que se considera atualmente bacterioplâncton é a comunidade composta pelas ditas "eubactérias", ou seja, as bactérias verdadeiras pertencentes ao Domínio Bactéria. Este é um grupo cujas descobertas são relativamente recentes, dadas as dificuldades de estudo pelo tamanho diminuto.

As bactérias marinhas apresentam uma grande diversidade de espécies e, consequentemente, de estratégias fisiológicas e adaptativas. As bactérias podem ser autótrofas (por fotossíntese oxigênica e anoxigênica e quimiossíntese) e heterótrofas. São organismos importantíssimos para a manutenção dos ciclos biogeoquímicos e no acoplamento bento-pelágico por sua participação nas alças microbianas, na decomposição de matéria orgânica (formando agregados em torno de partículas orgânicas mortas), nos processos fermentativos e na quimiossíntese. Elas podem viver livres na coluna de água ou aderidas a detritos em suspensão.

O bacterioplâncton é muito abundante nas águas superficiais. As concentrações variam entre $10^5$ a $10^6$ células por mililitro de água e vão se tornando menos abundantes com o aumento da profundidade. As bactérias podem ser anaeróbicas ou aeróbias e algumas se adaptaram bem a ambientes extremos, como, por exemplo, as termófilas (que vivem até 110˚C de temperatura) ou ultramicrobactérias. Estas são bactérias que tiveram seu tamanho reduzido para cerca de dez vezes menor que o diâmetro natural (que varia entre 1 a 5 μm), para sobreviver em condições de extrema carência nutricional, como as observadas nos giros oceânicos. Essa plasticidade é fundamental para manter a conexão dos ciclos biogeoquímicos nessas vastas áreas dos oceanos, via processos na Alça Microbiana (apresentada no capítulo anterior).

As cianobactérias e as proclorófitas também fazem parte do domínio Bacteria. Contudo, como estes organismos realizam fotossíntese oxigênica, eles serão considerados como pertencentes ao fitoplâncton, por desempenharem o mesmo papel funcional dos demais organismos fitoplanctônicos, em termos ecológicos.

### 3.4 Micoplâncton

Os fungos, de um modo geral, são encontrados nos substratos compondo o bentos ou perifíton, ou associados a outros organismos, estabelecendo relações simbióticas ou parasitárias com animais, plantas e algas. No entanto, existem fungos em suspensão na água, compondo o que se conhece por

micoplâncton. Eles são encontrados no plâncton como meroplâncton (as formas de reprodução sexuada ou assexuada como esporos e conídios) ou como ticoplâncton, quando hifas e micélios vão acidentalmente para a coluna de água (quando descolados de seu substrato por ação de ondas ou correntes, por exemplo).

A grande maioria dos fungos é **sapróbia** (se alimenta de matéria orgânica morta) e por isso têm grande importância na ciclagem de nutrientes, especialmente pela produção de enzimas como celulases, amilases, lipases e proteases que decompõem a matéria orgânica. Vários bioativos produzidos pelos fungos têm aplicação biotecnológica, talvez o mais popular deles seja a penicilina, produzida pelos fungos do gênero *Penicillium*.

Os fungos ocorrem em elevada quantidade e diversidade, com ampla distribuição geográfica. São resistentes às condições hidrológicas adversas, como amplas variações de pH, temperatura, saturação de oxigênio e eutrofização (Moreira & Schoenlein-Crusius, 2010).

A Figura 1 apresenta imagens ao microscópio de fungos isolados em amostras de água de Baía do Araçá (Doi *et al.*, 2018). Neste estudo, as autoras identificaram 68 espécies de fungos na água (contra 140 no sedimento), com predominância dos gêneros *Aspergilus* e *Penicillium*. Representantes dos gêneros *Paecilomices*, *Rhizophus* e *Sporothrix* foram encontrados apenas na água.

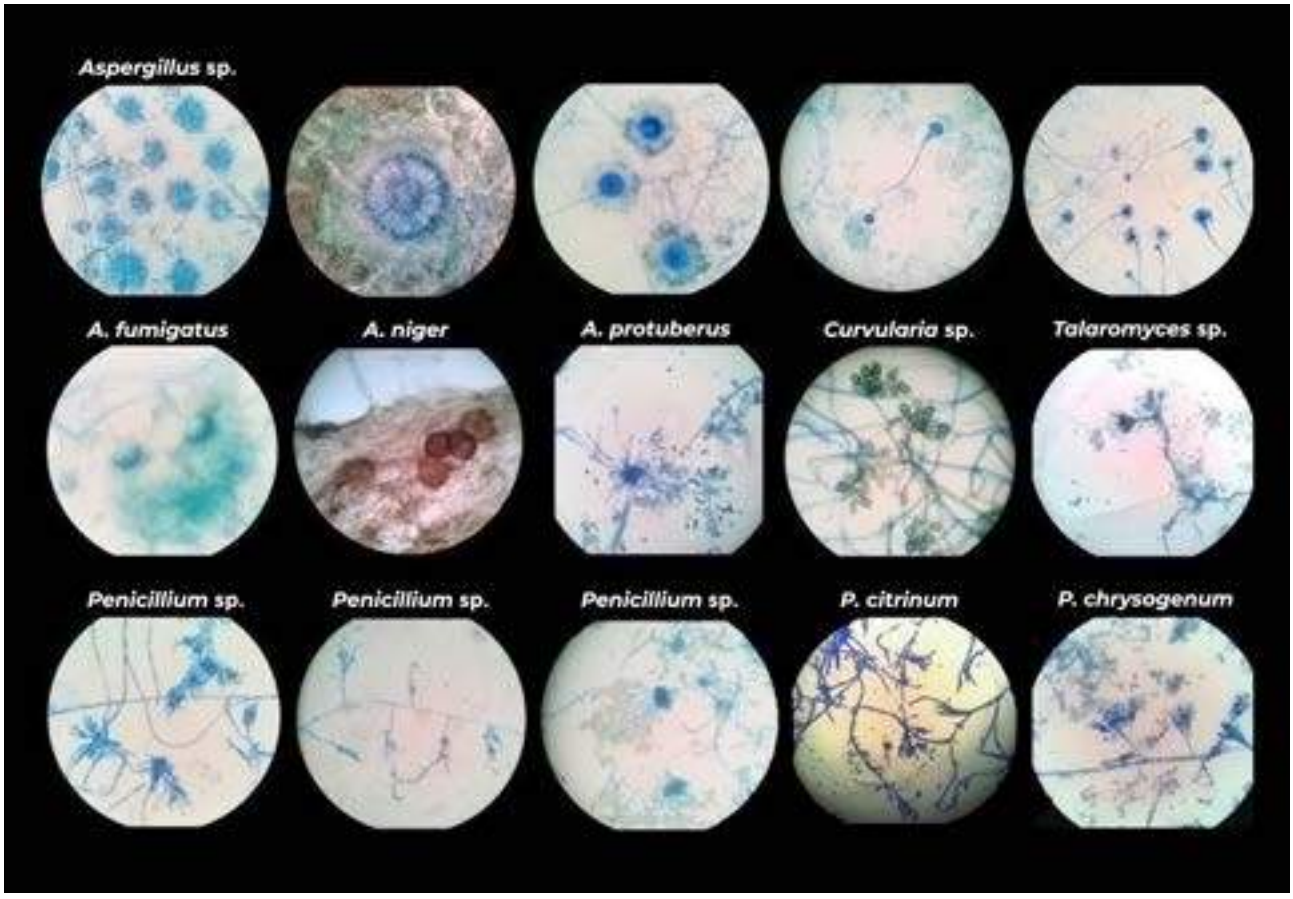



**FIGURA 1.** Imagens microscópicas de fungos isolados na Baía do Araçá (SP) onde predominam os gêneros *Aspergillus* e *Penicillium*. *Imagem retirada do artigo de Doi et al. (2018).*

Os fungos têm grande importância também para a biorremediação de ambientes poluídos, especialmente em relação a metais, por terem ampla resistência a eles. Tais observações demonstram a grande importância destes organismos na dinâmica trófica marinha.

## 3.5 Fitoplâncton

O fitoplâncton é a comunidade planctônica que congrega os organismos autótrofos fotossintetizantes, unicelulares e microscópicos do plâncton. Portanto, fazem parte dele as cianobactérias, as proclorófitas e as microalgas do Reino Cromista e do Reino Plantae. No entanto, alguns destes organismos têm hábitos mixotróficos e até mesmo heterotróficos. Popularmente, os organismos do fitoplâncton são denominados microalgas. Este termo tem uma conotação funcional e não tem validade taxonômica, justamente por representar organismos de vários Reinos.

O tamanho das microalgas varia em quatro ordens de magnitude, desde menores que 1 µm até 2000 µm (2 mm), incluindo, portanto, organismos pertencentes ao pico, nano, micro e mesoplâncton. As frações menores são coletadas por meio de garrafas e as maiores podem ser coletadas por redes de poros de 20 ou 30 µm (Fig. 2).

**FIGURA 2.** **A) Garrafa de Van Dorn utilizada para a coleta de água contendo a comunidade planctônica total; B) Rede cônico-cilíndrica para coleta de plâncton. O diâmetro da boca da rede e o tamanho do poro do tecido variam de acordo com a classe de tamanho do organismo que se deseja coletar; e C) Rede tipo bongô para coleta de ictioplâncton. Os fluxômetros acoplados à boca das redes permitem análises quali-quantitativas do material coletado, por registrarem o volume de água que passou pelas redes.** *Fotos: Leandro Coelho (A), Luiz Vianna Nonato (B) e Francisco Vicentini (C).*

A maioria dos organismos fitoplanctônicos se reproduz por mitose, mas pode haver também reprodução sexuada. As taxas de crescimento variam desde algumas duplicações por dia (prolorófitas e algumas cianobactérias) até uma duplicação a cada dez dias (como as grandes diatomáceas). De modo geral, quanto maior é a célula, maior é o tempo para a duplicação. As formas reprodutivas têm morfologia muito diferente das formas vegetativas. Algumas formam esporos de resistência para sobreviver a condições adversas, que também são bem diferentes da célula original (ver adiante Fig. 6).

Os organismos fitoplanctônicos são os principais produtores primários do ambiente marinho, sendo responsáveis por 98% da produção primária nos oceanos. Além disso, cerca de 48% de todo oxigênio produzido no planeta provém da produção primária do fitoplâncton (Field *et al.*, 1998).

### *3.5.1 Considerações sobre a produção primária*

Como apresentado no capítulo anterior, a produção primária é o processo pelo qual ocorre formação de matéria orgânica a partir de substratos inorgânicos com energia da luz (fotossíntese) ou da quebra de compostos químicos simples (quimiossíntese).

A fotossíntese pode ser oxigênica ou anoxigênica. Para isso, os produtores primários possuem clorofila-a ou bacteriocloriofila-a e outros pigmentos fotossintetizantes (e.g. clorofilas b, c, ficocianina, ficoeritrina, diversos carotenos e carotenoides) e são dependentes da luz. São representados pelo fitoplâncton e bacterioplâncton autótrofo.

Equação básica da fotossíntese oxigênica:

$$CO_2 + H_2O \xrightarrow[clorofila\text{-}a]{luz\ solar} [CH_2O] + O_2$$

Equação básica da fotossíntese anoxigênica:

$$CO_2 + (H_2S \text{ ou ácidos orgânicos}) \xrightarrow[bacterioclorofila]{luz\ solar} [CH_2O] + S_2$$

Portanto, para que a fotossíntese ocorra é preciso que haja disponibilidade de luz e nutrientes. O fitoplâncton encontra um ponto ótimo de crescimento quando consegue obter luz e nutrientes suficientes para isso.

A radiação solar que é utilizada na fotossíntese é chamada de radiação fotossinteticamente ativa e compreende a faixa de radiação de comprimentos de onda entre os 400 e 700 nm (do azul ao vermelho). Ao penetrar na água, a intensidade da luz decai exponencialmente e a qualidade da luz também se altera. Os comprimentos de onda mais longos (vermelho) são absorvidos logo nos primeiros metros, ao passo que os mais curtos (luz azul) são menos absorvidos pela água pura e penetram mais na coluna de água. Essa absorção pode variar de acordo com as partículas e substâncias dissolvidas na água. Por isso água do mar é azul, mas pode variar de tonalidade, dependendo destes fatores..

No oceano aberto, a zona eufótica (Zeu) pode variar de 150 a 200 m de profundidade. Em regiões costeiras, com alto teor de material em suspensão na água, a Zeu pode se restringir a poucos metros (ou centímetros no caso de estuários). Considerando-se que os oceanos têm uma profundidade média de 4000 m, a zona eufótica representa um diminuto compartimento deste ambiente. Em termos práticos, o limite da Zeu é definido como a profundidade onde chega apenas 1% da luz que atinge a superfície do mar. Essa profundidade também corresponde ao **Ponto de Compensação**, que representa a profundidade na qual toda energia química convertida pela fotossíntese é consumida pelo próprio organismo para manutenção de seus processos vitais. Portanto, não há produção primária líquida abaixo desta profundidade.

Uma forma rápida e simples de se estimar a profundidade da Zeu é por meio do Disco de Secchi (Fig. 3). O disco é mergulhado na água até a profundidade na qual deixamos de enxergá-lo. Essa profundidade (em metros) é anotada e usada na equação:

$Iz = I_0 \cdot e^{-kd \cdot z}$, assim, é possível, estimar a Zeu considerando:

$I_0$: radiação disponível na superfície da água;

***Iz*:** a quantidade de luz na profundidade ***z*** (neste caso $Iz = 0{,}01 \cdot I_0$)

***k*:** coeficiente de extinção da luz na água (1,7);

***d*:** profundidade na qual o Disco de Secchi desaparece;

Por exemplo, para ***d*** = 15 m temos que o limite da Zeu é de 40,5 m.

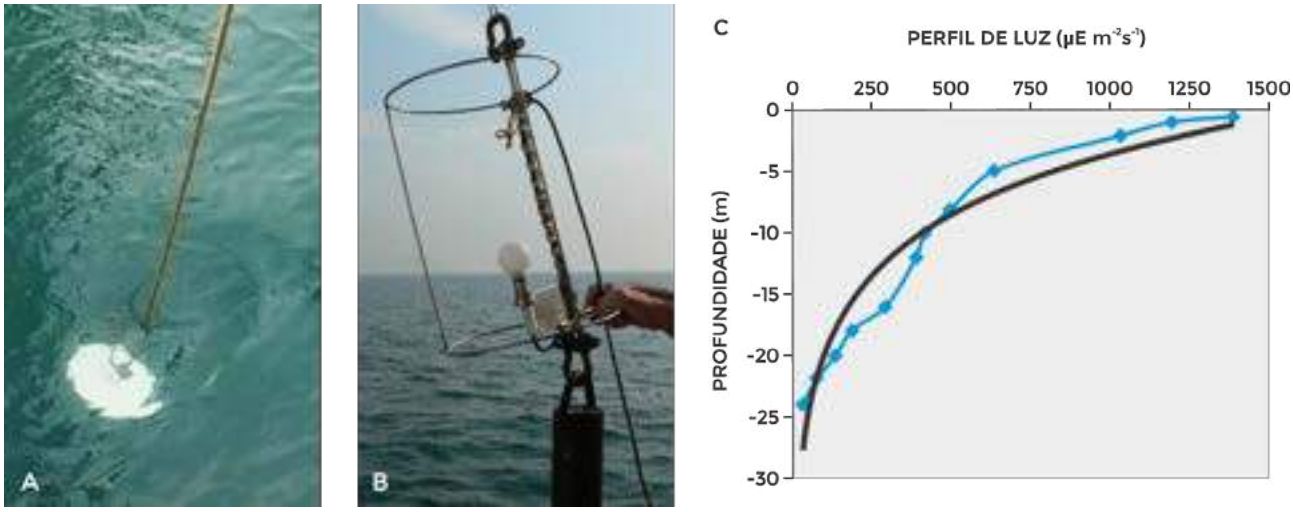



**FIGURA 3.** A) Disco de Secchi sendo lançado a partir do convés do N/Oc. Prof. W. Besnard; B) Radiômetro submersível com sensor de luz esférico; e C) perfil subaquático de extinção da luz realizado com o radiômetro (em azul) e a linha de ajuste da função exponencial (em preto). Neste ponto, a zona eufótica se estendia até os 45 m, mas as medidas foram feitas até os 25 m, onde ainda havia 2,5% da luz incidente na superfície. *Imagens de Flávia Saldanha-Corrêa*.

Os sensores de luz subaquáticos, como o da Figura 3, indicam a quantidade de luz total que chega em cada profundidade. Os espectrorradiômetros permitem que essas medidas sejam feitas para cada comprimento de onda de interesse.

Além da luz, os produtores primários necessitam de macro e micronutrientes, (tais como nitrogênio, fósforo, sílica, ferro, cobre, zinco, dentre outros), que estão dissolvidos na água e que serão o substrato para síntese de biomassa nova. Contudo, o consumo pelo fitoplâncton leva ao esgotamento desses nutrientes na Zeu. A reposição é feita por processos de mistura entre águas mais profundas (mais ricas em nutrientes) com as águas superficiais, ou pelo aporte de material novo através da drenagem continental, precipitação atmosférica ou por decomposição de matéria orgânica na água por bactérias e outros decompositores.

As células absorvem os nutrientes que estão na microcamada de água ao seu redor. Como o transporte difusivo de substâncias no meio líquido é muito lento (por exemplo, o tempo de difusão de um sal na água em repouso é da ordem de 3 cm por dia), o fitoplâncton precisa de mecanismos ativos que promovam a recirculação de água no seu entorno para evitar o esgotamento nutricional na sua camada de contato com o meio externo. Isso é possível por meio do batimento de cílios e flagelos e pequenos deslocamentos na coluna de água graças a variações na composição e disposição do citoplasma na célula, que permitem que a célula se desloque por poucos milímetros. O pequeno tamanho, por aumentar a razão superfície /volume, favorece a absorção de nutrientes e também de luz, devido ao menor sombreamento dos cloroplastos pelas demais organelas intracelulares e menor absorção pelo próprio citoplasma.

### *3.5.2 Os principais grupos que compõem o fitoplâncton*

As **Cianobactérias** foram os primeiros organismos a realizar fotossíntese oxigênica, liberando $O_2$ como produto, favorecendo assim o acúmulo deste gás na atmosfera primitiva, que se tornou altamente oxidante, causando a morte de vários organismos que estavam adaptados à atmosfera redutora. As cianobactérias são muito importantes por serem capazes de fixar o nitrogênio atmosférico, disponibilizando-o para a rede

trófica marinha. Elas possuem clorofila-a e ficobilinas (ficoeritrina ou ficocianina) cuja cor pode se sobrepor ao verde da clorofila, conferindo-lhes uma coloração vermelha ou azul-esverdeado, bem característica. As cianobactérias podem viver isoladas ou formando colônias ou filamentos (os tricomas). Muitas espécies apresentam um envoltório mucilaginoso comum a várias células. Um gênero bastante abundante de cianobactérias em águas oligotróficas é o *Synechococcus* cujas células são extremamente pequenas, da ordem de 1 µm. Alguns exemplos de cianobactérias são apresentados na Figura 4.

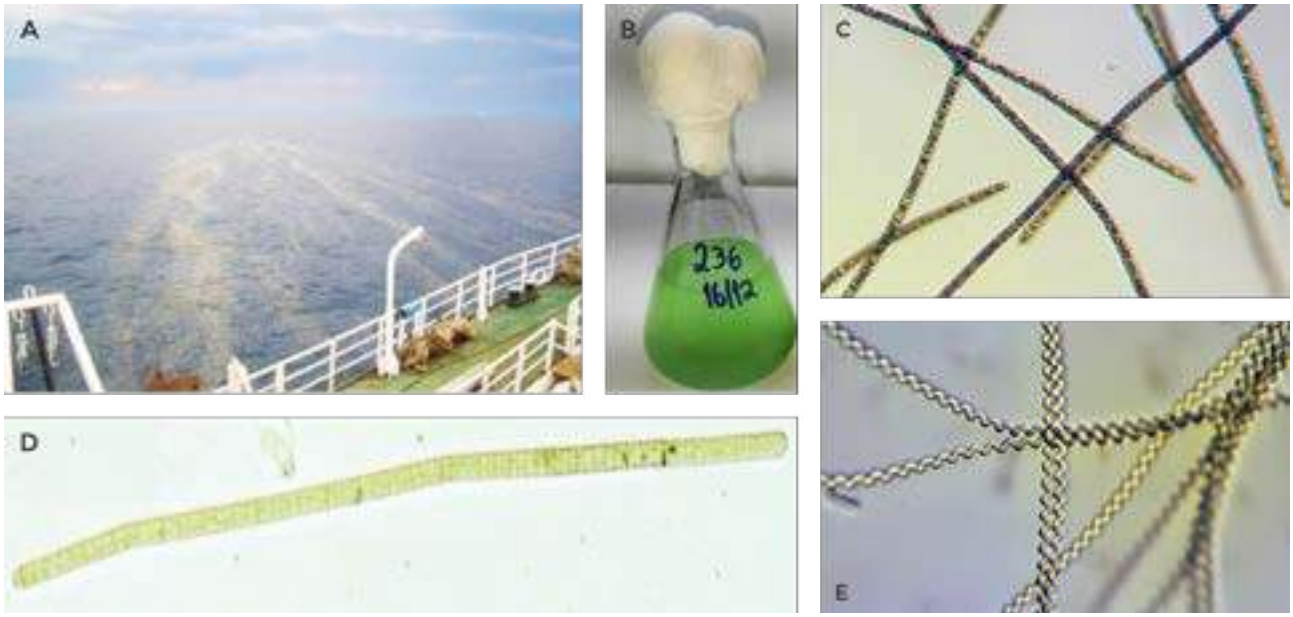



**FIGURA 4. A) Floração da cianobactéria** *Trichodesmium erythraeum* **no litoral de Santos (SP). Essas florações são comuns quando o mar está calmo e os tricomas se acumulam na superfície da água, formando faixas amarronzadas; B) aspecto de uma cultura de** *Chroococcus*, **com verde-azulado característico das cianobactérias. C) Tricomas de** *Spirulina platensis;* **e D) Tricoma de** *Trichodesmium erythraeum*. *S. platensis* **e** *T. erythraeum* **são dois exemplos de cianobactérias filamentosas.** *Imagens de Flávia Saldanha-Corrêa*.

Há cerca de 30 anos apenas, verificou-se que dentre as cianobactérias há um grupo muito particular, que além da clorofila-a, possui clorofila-b em lugar das ficobilinas. Foi proposto o grupo das **Proclorófitas**, composto por três gêneros. O representante mais conhecido é o gênero *Prochlorococcus*, cuja célula é da ordem de 0,6 µm de tamanho, correspondendo ao menor ser vivo já catalogado. Estes organismos são bastante abundantes em todos os oceanos e mares tropicais. A identificação destes organismos foi possível com a introdução da citometria de fluxo, uma técnica desenvolvida para análise de células sanguíneas, que permitiu identificar estas pequenas células pelo seu padrão de fluorescência.

As **Diatomáceas** são seres unicelulares e eucariotos cuja principal característica é a presença de uma carapaça de sílica que envolve a célula, a frústula. Este envoltório é composto por duas valvas que se encaixam e contém uma série de poros e aberturas, que são vias de troca de materiais entre os meios interno e externo. O formato das valvas e o padrão das ornamentações (aréolas, poros, estrias, setas, prolongamentos, rafe) são muito variados e constituem os principais caracteres utilizados na identificação das diatomáceas. A frústula, quando vista de cima (vista valvar) apresenta-se muito diferente de quando observada pela lateral (vista conectival), onde há o encaixe das valvas. A Figura 5 apresenta vários exemplos de diatomáceas.

Existem dois grupos básicos de diatomáceas: as **Penatas** e as **Cêntricas**. As diatomáceas penatas têm simetria bilateral (Fig. 5A, A2), enquanto as cêntricas apresentam simetria radial (Fig. 5B até 5K). Algumas penatas apresentam rafe, que é um sulco na frústula por onde circulam correntes de material citoplasmático que permitem movimento às células, deslizando sobre superficies (detalhe na figura

5A2). Ainda na figura 5 temos a diatomácea *Coscinodiscus wailesii* fotografada em vista valvar (I), conectival (J) e o detalhe da lígula (K), uma estrutura semelhante a uma lingueta, cuja função é manter as valvas unidas. Essas imagens demonstram bem como o aspecto da célula é diferente dependendo da posição na qual ela é observada. Observe a ornamentação das aréolas (pequenos poros) que se distribuem em raios do centro para a margem da valva (I) e cobrem metade da superfície valvar na lateral (J). Nesta espécie, na área de encaixe das valvas não há aréolas. Note os pequenos cloroplastos em grande número e dispersos por toda a célula. Esse padrão é típico para esta espécie e permite sua identificação. Outra curiosidade interessante na imagem 5J é a presença de uma vorticela (na valva de baixo), um simbionte que se fixa à superfície celular.

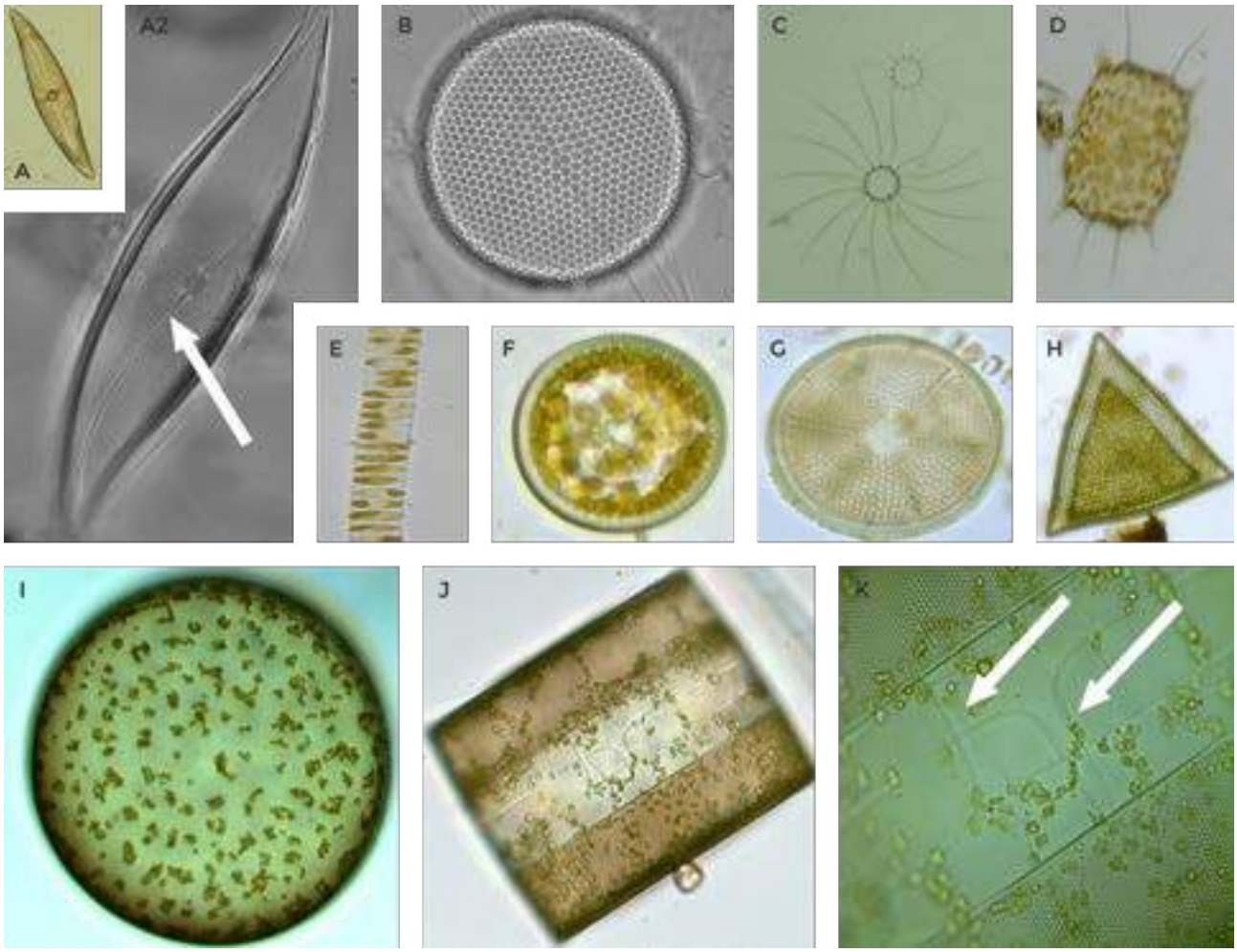



**FIGURA 5.** **Imagens de várias espécies de diatomáceas planctônicas: A)** *Pleurosigma* **sp; A2) frústula da mesma espécie porém sem o conteúdo celular, permitindo observar detalhes da ornamentação da valva, especialmente a rafe na parte central; B e C) frústulas sem conteúdo celular das espécies** *Coscinodiscus* **e** *Bacteriastrum*, **respectivamente. As imagens seguintes correspondem a células com todo conteúdo interno, sendo possível observar os cloroplastos e as ornamentações da frústula em alguns casos: D)** *Odontella mobiliensis*; **E)** *Paralia sulcata* **(forma cadeia); F)** *Cyclotella* **sp; G)** *Actinopticus* **sp; H)** *Triceratium* **sp; e detalhes da diatomácea cêntrica** *Coscinodiscus wailesii*: **I) vista valvar; J) vista conectival; e K) detalhe da lígula.** *Imagens de Flávia Saldanha-Corrêa*.

As diatomáceas são o grupo mais abundante no microfitoplâncton e são encontradas em todos os ambientes aquáticos e em todas as regiões do oceano. Atualmente existem mais de 16 mil espécies descritas (Guiry, 2021) habitando águas marinhas, salobras e doces. Elas podem viver isoladas ou formar cadeias (como a *Paralia sulcata* da Figura 5E). No mar, as diatomáceas são encontradas tanto no plâncton como no bentos (nos sedimentos e também em biofilmes), compondo o microfitobentos.

Na fase vegetativa, as diatomáceas não apresentam flagelos. Algumas podem apresentar hábitos mixotróficos, embora a maioria seja autótrofa contendo clorofilas a e c além de vários carotenoides. Algumas espécies produzem toxinas que podem provocar mortalidade de outros animais marinhos.

Os **Dinoflagelados** compõem outro grupo muito importante do fitoplâncton. Caracterizam-se por possuir dois flagelos desiguais e perpendiculares entre si: um deles corre por dentro de uma fenda transversal ao corpo, o **cíngulo**, e outro parte de um sulco, em posição longitudinal à célula (Figura 6). O batimento destes dois flagelos confere um padrão de natação rotatório, característico do grupo. Contudo, algumas espécies não possuem flagelos e são imóveis (Fig. 6 A, B, C). Alguns possuem uma carapaça celulósica, composta por várias placas, enquanto outros são nus.

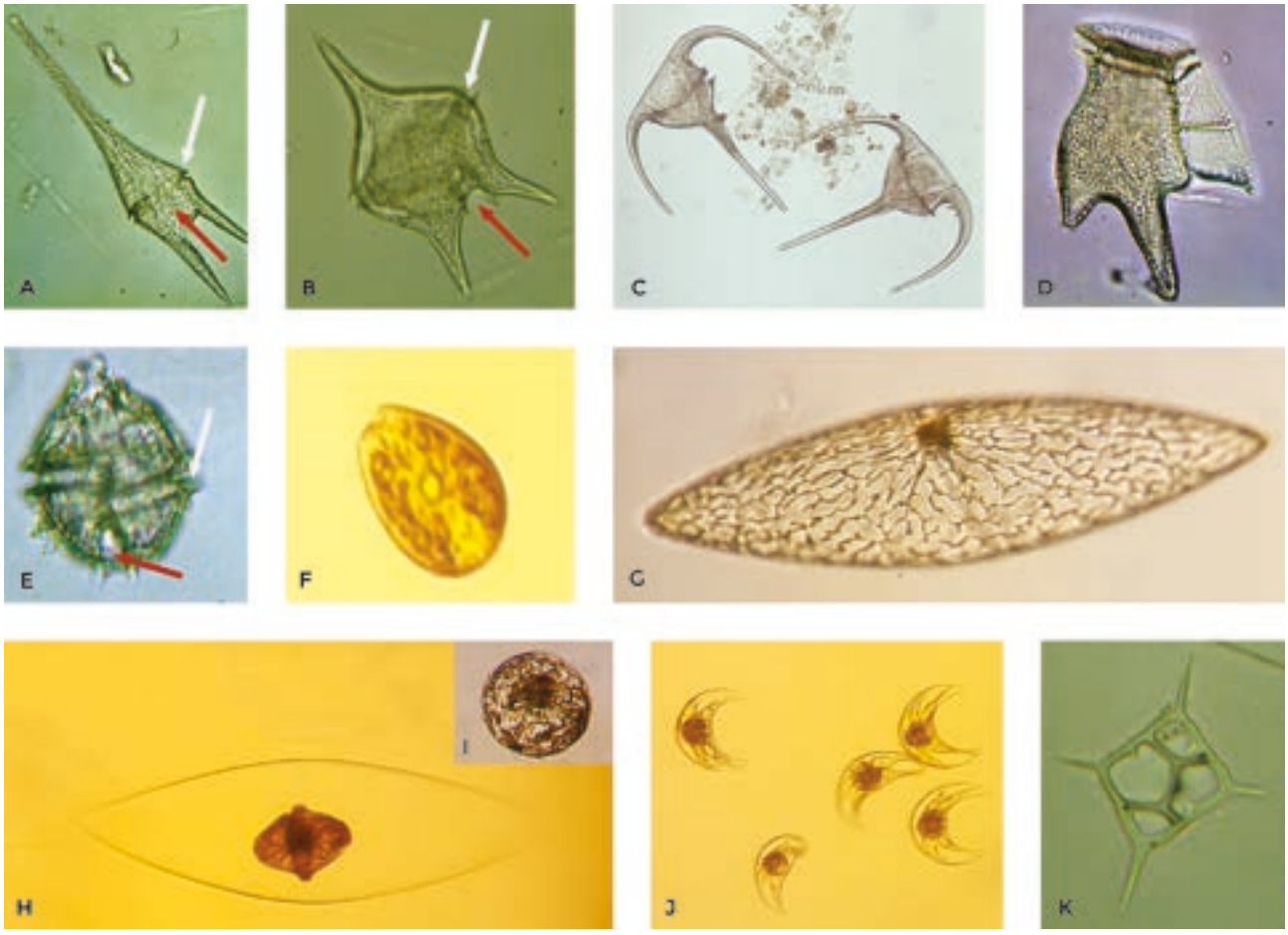



**FIGURA 6. Alguns exemplos de dinoflagelados móveis (A-E): A)** *Tripos furca*; **B)** *Protoperidinium* **sp; C)** *Tripos tripos*; **D)** *Dinophysis caudata* **e E)** *Peridinium* **sp. A seta branca indica o cíngulo e a vermelha o sulco, de onde sai o flagelo perpendicular à célula. Dinoflagelados sem movimento: F)** *Prorocentrum lima*; **e G)** *Pyrocystis fusiformis* **(célula vegetativa) e, respectivamente, H e I a fase móvel de reprodução e um cisto de resistência desta espécie; J)** *Pyrocystis lunula*. **Estas duas espécies de** *Pyrocystis* **são bioluminescentes. K) esqueleto de um silicoflagelado da espécie** *Dictyocha fibula*. *Imagens de Flávia Saldanha-Corrêa*.

Dentre as cerca 3.600 espécies de dinoflagelados descritas (Guiry & Guiry, 2020), a maioria vive isolada, mas algumas formam colônias, como a espécie *Gymnodiniun catenatum*. São encontradas nos oceanos, estuários e águas continentais. Apresentam hábitos autotróficos, mas muitos são mixotróficos e até heterotróficos, como a *Noctiluca* sp., o maior dinoflagelado conhecido (com cerca de 2 mm), que possui um tentáculo em lugar dos flagelos. Tanto a *Noctiluca* sp. como a *Pyrocystis lunula* e a *P. fusiformis* apresentam uma bioluminescência azulada, que é ativada por ação mecânica. Essa luz é bem visível à noite com a movimentação da água, quando alguma destas espécies está presente em grande quantidade.

Um importante grupo de dinoflagelados é representado pelas zooxantelas, com destaque para a família Symbiodiniaceae, que vivem em simbiose com anêmonas, nudibrânquios e corais. Quando estes organismos abandonam o tecido coralíneo, por alterações de pH ou da temperatura da água, o coral sofre o que se conhece por branqueamento, pois a cor é devida aos pigmentos das zooxantelas. Se o coral não reestabelecer a simbiose, ele morre. O branqueamento dos corais tem se intensificado por conta da acidificação das águas do oceano, decorrente do aumento de $CO_2$ na atmosfera. Esse é um tópico que gera preocupação e muitos pesquisadores têm se dedicado ao estudo desse fenômeno, inclusive no IOUSP.

Várias espécies de dinoflagelados produzem toxinas, que podem causar as marés vermelhas se esses organismos atingirem altas densidades na água (florações). Dentre alguns gêneros potencialmente tóxicos podemos citar: *Alexandrium*, *Gonyaulax*, *Prorocentrum*, *Gymnodinium*, *Scripsiella* e *Pfisteria*. Alguns, no entanto, podem ser nocivos mesmo em baixas concentrações na água, como o gênero *Dinophysis*.

Os **Fitoflagelados** constituem um grupo artificial, polifilético, que reúne organismos principalmente do nanoplâncton, mas também do picoplâncton (ex. *Micromonas pusilla*), que apresentam um ou mais flagelos (2, 4, 8 até 16). A identificação destes flagelados é muito difícil tanto pelo seu pequeno tamanho como também pelo fato de terem que ser examinados em amostras frescas, uma vez que os flagelos normalmente se perdem quando a célula é fixada com um preservante (como formol, lugol ou outro fixador), para análise posterior.

Os fitoflagelados são muito importantes porque ocorrem em todos os ambientes marinhos e, nos ambientes oligotróficos, representam normalmente mais de 50% da biomassa do fitoplâncton total. A Figura 7 apresenta alguns dos principais grupos.

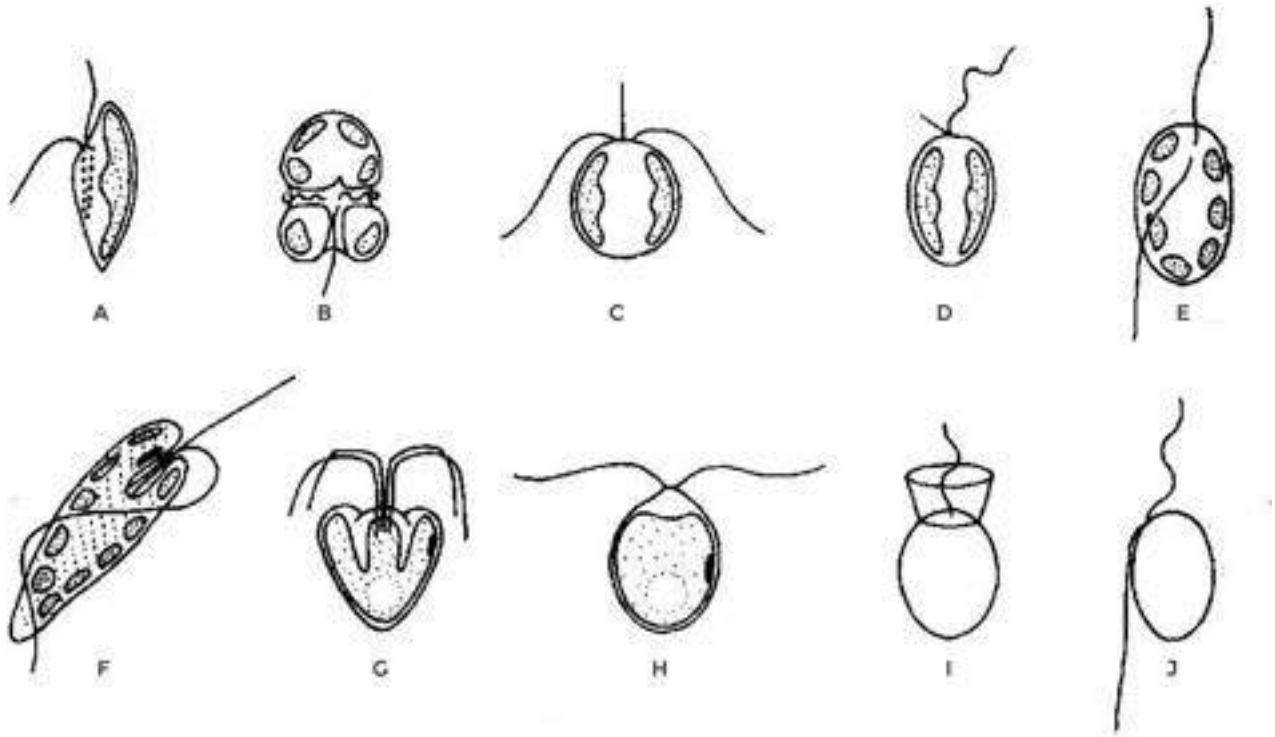



**FIGURA 7. Flagelados nus de diferentes classes presentes no plâncton marinho: A) Cryptophyceae; B) Dinophyceae; C) Haptophycea; D) Chrysophyceae; E) Raphidophyceae; F) Euglenophyceae; G) Prasinophyceae; H) Chlorophyceae; I) Choanoflagellidea; e J) Kinetoplastidea.** *Figura modificada de Tomas, 1997.*

Dentre os fitoflagelados há os **Silicoflagelados** (**Classe Dictiochophyceae**) que se distinguem por possuir um endoesqueleto bastante característico, de forma hexagonal ou octogonal (Fig. 6K). A célula é arredondada ou piriforme, nua ou coberta por escamas que podem ser de celulose ou sílica, alguns podem ter uma lórica de quitina.

Outro grupo que se distingue é o dos **Cocolitoforídeos** (**Classe Prymnesiophyceae**). Eles apresentam as células biflageladas recobertas por placas calcáreas, os cocólitos. São nanoplanctônicos e importantes produtores primários em áreas oceânicas. Uma espécie bastante comum é a *Emiliania huxleyi*. Quando ocorrem florações de cocolitoforídeos, a água fica com um aspecto leitoso, que pode ser detectado por imagens de satélites.

## 3.6 Zooplâncton

O zooplâncton, ou plâncton animal, é um grupo extremamente variado e compreende representantes de quase todos os filos de animais marinhos, além de protistas como as amebas e os ciliados. Contudo, o grupo mais abundante no zooplâncton é composto pelos crustáceos, particularmente pelos copépodos.

O zooplâncton compreende organismos do nano, micro, meso e macroplâncton, podendo apresentar hábitos herbívoros (que consomem os produtores primários, ou seja, o fitoplâncton e bacterioplâncton autótrofo), carnívoros, onívoros e detritívoros.

Assim, o zooplâncton ocupa vários níveis da teia alimentar aquática, o que lhes confere uma grande importância ecológica uma vez que têm papel fundamental na transferência de energia química para animais de níveis tróficos superiores.

### *3.6.1 Organismos que compõem o zooplâncton*

**Protistas:** são as amebas, foraminíferos, radiolários, acantários, tintinídeos e outros ciliados, que geralmente compõem a fração microplanctônica. Os protistas alimentam-se de organismos do pico, nano e microplâncton e também de partículas orgânicas em suspensão na água. Dessa maneira eles fazem a conexão entre a alça microbiana e a teia trófica tradicional (conceitos apresentados no capítulo **A Vida no Mar**), tendo grande importância no fluxo de energia entre esses compartimentos.

**Cnidários** ou **celenterados:** são representados pelas hidromedusas, sifonóforos e sifomeduzas. São deste grupo os maiores organismos presentes no plâncton: as colônias como a *Physalia* e *Vellella* (de hábitos pleustônicos), que chegam a vários centímetros ou até metros de comprimento. Estes organismos apresentam células urticantes (nenatocistos) que causam queimaduras em banhistas. Estas estruturas são utilizadas para facilitar a captura de alimento e também para a defesa do organismo contra predadores. Existem cerca de 12 mil espécies de cnidários descritas, a maioria vivendo na faixa entre os trópicos (Worms, 2020).

**Ctenóforos:** são organismos que têm o corpo gelatinoso de forma globosa ou achatada apresentando placas ciliadas dispostas em oito fileiras meridionais. Existem 306 espécies catalogadas, todas marinhas, holoplanctônicas e carnívoras. A maioria dos ctenóforos é luminescente. Ex.: *Beroe* sp. e *Pleurobrachia* sp.

**Moluscos:** apesar de existirem moluscos holoplanctônicos, como os Pterópoda e Heterópoda, a maioria é meroplanctônica, composta pelos estágios larvais de moluscos bentônicos. Dessa maneira, o plâncton é um compartimento fundamental para a dispersão desses organismos de hábito bentônico.

**Poliquetos:** os poliquetas são animais bentônicos em sua maioria, porém apresentam uma fase larval que é planctônica (larva trocófora). As larvas têm hábitos carnívoros e podem ser encontradas em ambientes estuarinos, costeiros e pelágicos em regiões tropicais e subtropicais. A liberação de grande massa de gametas na superfície da água em certas fases da lua é um fenômeno bastante comum em mares tropicais.

**Crustáceos:** constituem um grupo dominante no plâncton, tendo representantes holo e meroplanctônicos, divididos em duas grandes Classes Hexanauplia e Malacostraca. Os copépoda são o grupo mais abundante da Classe Hexanauplia e também são os organismos dominantes no zooplâncton marinho, com cerca de 12.000 espécies descritas. No plâncton, são representados por organismos das ordens Calanoida, Cyclopoida e Harpacticoida. Estão presentes em todos os ambientes oceânicos e em todas as profundidades. Estes animais apresentam o corpo dividido em três partes: cabeça, tórax e abdômen cujo último segmento termina como uma furca. Dentre os copépodes encontram-se organismos herbívoros, carnívoros, onívoros e detritívoros. Eles apresentam sexos separados e fecundação cruzada. Os ovos podem ser lançados no meio ou ficarem nos sacos ovígeros. Os náuplios eclodem dos ovos em períodos de horas a dias (dependendo da espécie) e passam por algumas mudas até que o indivíduo jovem (copepodito) se forme. Os estágios naupliares são totalmente diferentes do indivíduo adulto, já o copepodito é semelhante. O ciclo completo pode ter até 11 estágios de muda. A variabilidade morfológica desses estágios larvais dificulta o estudo destes animais, exigindo bastante conhecimento e prática do pesquisador.

A Classe Malacostraca abrange cerca de 40.000 espécies, com indivíduos apresentando o corpo recoberto por uma carapaça. Os decápodes, como as larvas de camarão, lagosta, lagostin, siri, caranguejo, são os principais representantes dos Malacostraca que também conta com organismos de outras ordens como os Mysida, Cumacea, Tanaidacea, Amphipoda, Isopoda e Euphausiacea. A maioria é meroplanctônica e apresenta vários estágios larvais, com hábitos herbívoros, carnívoros, onívoros e detritívoros.

**Filo Chaetognatha:** os quetognatos são organismos transparentes e a forma do corpo lembra um torpedo provido de nadadeiras que permitem um rápido deslocamento, já que estes são predadores vorazes. Eles capturam suas presas com o auxílio de ganchos localizados na cabeça. São exclusivamente marinhos e holoplanctônicos (com exceção apenas de um gênero que é bentônico), cosmopolitas e encontrados ao longo de toda a coluna de água. Ex. *Sagitta* sp.

**Filo Chordata:** os cordados são representados no plâncton marinho por animais dos subfilos Urochordata, Cephalochordata e Vertebrata.

**Cephalochordata:** representados pelos estágios larvais dos anfioxos, que são animais marinhos, bentônicos, cujo indivíduo adulto tem até de 8 cm de tamanho, vive enterrado no sedimento, mas é capaz de nadar ativamente por pequenas distâncias. Existem cerca de trinta espécies.

**Urochordata:** são representados pelas apendiculárias, salpas e dolíolos (que são animais filtradores, holoplanctônicos, com corpo transparente e gelatinoso) e pelas larvas das ascídias, cujo adulto é bentônico. As apendiculárias apresentam um envoltório na cabeça e o restante do corpo é uma longa cauda que cujo batimento propulsiona o animal. As salpas da espécie *Thalia democratica* são indicadoras de águas frias e são capazes de se reproduzir rapidamente em resposta à abundância de fitoplâncton do qual se alimentam. Eventualmente estas florações são

levadas pela água até a praia e os organismos ficam depositados na areia, como umas bolinhas gelatinosas que podem ser confundidas com celenterados.

**Vertebrados:** os vertebrados são representados no plâncton pelos ovos e larvas de peixes, constituindo o Ictioplâncton.

A Figura 8 apresenta organismos do zooplâncton coletados com rede de plâncton no canal de São Sebastião (litoral norte do estado de São Paulo), com exceção da larva de briozoário, que foi obtida em laboratório a partir de colônias férteis.

**Figura 8. Exemplos de animais encontrados no zooplâncton: A)** *Arcatia sp.*; **e B)** *Centropages velificatus* **(ambas imagens são de copépodos adultos do grupo Calanoida). Os copépodos são os organismos geralmente mais abundantes do zooplâncton e são considerados euplanctônicos. Representantes do meroplâncton: C) Larva coronada do briozoário** *Bugula neritina*; **D) Larva veliger (de moluscos gastrópode); E) Larva pediveliger (de moluscos bivalve); F) Larva pilídio (de Nemertídeo); G) Larva de poliqueta da família Terebellidae; H) Náuplio de craca (um dos estágios larvais destes crustáceos cirripédios); I) Ofioplúteus (estágio larval de ofiúro, Echinoderma); J) Zoea; e K) Megalopa, estágios larvais de caranguejo (crustáceo, Decapoda). L) Larva tornaria (do grupo Hemichordata).** *Imagens gentilmente cedidas pelo Prof. Dr. Álvaro Migotto (CEBIMar/USP).*

### 3.7 Ictioplâncton

Uma característica particular do ictioplâncton é ser uma comunidade neustônica, ou seja, concentra-se nos primeiros milímetros da coluna de água, onde a incidência de radiação UV é alta. Para se proteger dos danos desta alta radiação, apresentam adaptações específicas, como produção de gotas de óleo e colorações iridescentes.

O estudo do **ictioplâncton** é de suma importância para avaliação dos estoques pesqueiros, ciclos reprodutivos dos peixes, das variações espaciais e temporais nesta comunidade, bem como para os estudos de impactos ambientais sobre a biota marinha. O tamanho dos ovos varia de 0,5 a 5,5 mm e o período de eclosão varia entre dias a poucas semanas, de acordo com a espécie. A identificação dos ovos utiliza critérios como: tamanho (diâmetro externo), forma (esférica ou elíptica), presença (ou não) de gotas de óleo e suas características (número e tamanho), espaço vitelínico (largo ou estreito), tipo de córion (liso ou ornamentado), características do vitelo (homogêneo ou segmentado).

Após a eclosão dos ovos e total absorção do vitelo, surgem as larvas propriamente ditas, que também são planctônicas, mas nesse caso não se restringem mais à região da película superficial. Os estádios larvais duram de alguns dias até meses, também de acordo com a espécie. A identificação baseia-se em características morfológicas, morfométricas e merísticas, como por exemplo: forma do corpo, relação largura/comprimento, forma dos olhos, número de raios das nadadeiras, dentre outros. Maiores detalhes são apresentados no capítulo **Biologia e Ecologia do Ictioplâncton Marinho**.

## 4. A vida planctônica

O principal problema que o hábito planctônico acarreta é a tendência ao afundamento, uma vez que os organismos são mais densos que a água do mar. A densidade da água do mar varia entre 1,02 e 1,04 $g \cdot L^{-1}$, enquanto a densidade média do citoplasma dos organismos planctônicos varia entre 1,03 a 1,10 $g \cdot L^{-1}$. A situação se agrava naqueles que possuem o corpo recoberto por carapaças como as diatomáceas, os cocolitoforídeos, tintinídeos e copépodos, dentre outros. Este é um problema particularmente crítico para o fitoplâncton que precisa manter-se na zona eufótica para realizar a fotossíntese. A diminuição do peso pela redução do tamanho do corpo é uma regra geral para os organismos planctônicos.

O aumento da relação superfície/volume eleva a superfície de atrito e desacelera o afundamento. Por exemplo: um organismo com 1 µm de diâmetro afunda cerca de 2,5 cm/dia. Se o diâmetro do corpo for de 10 µm, a taxa de afundamento aumenta dez vezes. O aumento da superfície em relação ao volume é obtido com a diminuição do tamanho do corpo. Entretanto, a formação de cadeias (às vezes com espaços grandes entre as células ou formando cadeias espiraladas), a presença de setas, prolongamentos, espículas (ex. radiolários e acantários), espinhos (ex. dinoflagelados, larvas de equinodermos e decápodes), apêndices plumosos (ex. larvas de crustáceos), pelos e cerdas (ex. copépodes e poliquetos), corpo achatado (ex. diatomáceas, alguns dinoflagelados e salpas), também são estratégias para aumentar a relação superfície/volume e diminuir o afundamento. A vibração dos túbulos que unem as células nas cadeias da diatomácea *Skeletonema costatum*, é um mecanismo bastante interessante para evitar o afundamento.

Apesar de os organismos do plâncton não serem capazes de vencer as correntes de água, o fato de possuírem cílios, flagelos, apêndices natatórios ou nadadeiras (como a *Sagitta* sp) permite que eles mantenham sua posição em uma dada profundidade ou que efetuem alguns deslocamentos, porém com gasto energético.

A diminuição da densidade por meio de corpos gelatinosos (ex. cnidários, ctenóforos), presença de gotículas de óleo (ex. diatomáceas e ovos de peixes), vacúolos gasosos (ex. diatomáceas) e capas de mucilagem (ex. cianobactérias, clorofíceas) são outras estratégias adotadas. A densidade citoplasmática também pode ser diminuída por meio de trocas iônicas, com a substituição de cátions e ânions mais pesados por outros mais leves (por exemplo: íons sulfato e magnésio são respectivamente substituídos por íons cloreto e potássio), como ocorre em diatomáceas. Os crustáceos planctônicos apresentam carapaças mais delicadas do que os bentônicos e, no caso dos moluscos, as conchas são reduzidas podendo até ser suprimidas.

O afundamento também pode ser evitado através do posicionamento dos organismos nas células de convecção (ou células de Lagmuir) que se formam na água devido à ação de correntes e do vento. Entre essas células, formam-se zonas de subida de água (ressurgência) e de descida (subsidência) que carregam os organismos consigo. Alguns organismos conseguem se manter em uma determinada profundidade valendo-se desses movimentos da água.

A viscosidade da água também interfere na flutuabilidade. Assim, é interessante ressaltar que indivíduos de uma mesma espécie que vivem em águas mais frias, têm o corpo geralmente maior que os seus semelhantes que vivem em águas mais quentes. Isso porque a água fria é mais densa, portanto o afundamento é menor nesses ambientes.

### 4.1 Adaptações à luminosidade

Os autótrofos fotossintetizantes são capazes de sintetizar maior ou menor quantidade de clorofila-a e pigmentos acessórios (clorofilas b, c, ficobilinas e carotenoides) de acordo com a quantidade e qualidade espectral da luz que estão recebendo na profundidade em que se encontram, maximizando a captação de luz para a fotossíntese. Muitos carotenoides têm também função fotoprotetora, caso as células fitoplanctônicas sejam submetidas a altas intensidades luminosas, que podem danificar o aparato fotossintético. Nessas situações eles atuam como "filtros-solares", absorvendo a luz e dissipando a energia na forma de calor.

Os organismos do zooplâncton que vivem próximo à superfície tendem a ser transparentes ou apresentarem cores suaves, a fim de se mimetizar com a água e escapar aos predadores. Os que vivem em regiões mais profundas, num ambiente mais escuro, geralmente apresentam coloração mais intensa, porque os organismos ficam menos visíveis.

Pigmentos com cores metálicas e iridescentes são típicos de organismos do nêuston e plêuston, auxiliando na reflexão da luz que atinge as células como proteção à radiação ultravioleta que pode causar danos ao DNA.

A bioluminescência, produção de luz pelos seres vivos, é encontrada em grande número de organismos marinhos planctônicos. Há exemplos dentre os dinoflagelados (*Noctiluca* e a *Pyrocystis*), radiolários (*Collzoum*), hidromeduzas (*Obelia*, *Liriope*), sifonóforos (*Hipopodius*), sifomedusas (*Pelagia*), anelídeos (*Tomopteris*), moluscos (*Phyllirhoe*). A luz emitida pelo ctenóforo *Beroe ovata*, pode ser percebida a vários metros de distância. Dentre os crustáceos, o exemplo mais notável é

o da *Cypridina hilgendorfi*, que descarrega na água pequenas nuvens luminescentes e que, mesmo muito tempo depois de expostas ao ar, quando umedecidas com água ainda produzem luminescência. Os eufausiáceos apresentam numerosos órgãos luminosos e muito diferenciados. Os *Pyrosoma* são tunicados que formam grandes colônias gelatinosas e planctônicas que devem seu nome justamente à sua luminescência (*pyros* = fogo).

O mecanismo da bioluminescência é baseado num composto oxidável, a luciferina, que é oxidado sob a ação de uma enzima, a luciferase, com emissão de luz azulada. Sua emissão não é contínua e pode ser desencadeada por diversos processos: estimulação mecânica, estimulação luminosa, ou mesmo excitação térmica. As hipóteses para explicar a bioluminescência sugerem que ela seja um mecanismo para afastar o predador e facilitar a evasão da presa, além de um papel de atração entre indivíduos da mesma espécie para facilitar a reprodução. Este reconhecimento seria efetuado através de comprimentos de onda da luz, específicos para cada espécie, e seria fundamental para aqueles organismos que vivem em regiões escuras do oceano (vide capítulo **Bioluminescência Marinha**).

## 4.2 Distribuição do plâncton nos oceanos

O plâncton não apresenta uma distribuição homogênea nos oceanos. O padrão geral é a ocorrência em manchas ou aglomerados. Há também variações verticais e horizontais nesta distribuição. Em termos de distribuição vertical, os principais gradientes que se impõem aos organismos planctônicos estão relacionados à luz, temperatura, pressão e disponibilidade de nutrientes. Uma feição bem característica nos perfis de distribuição vertical do fitoplâncton é o "máximo profundo de clorofila" (ou DCM de *Deep Chlorophyll Maximum*, no inglês). Esse máximo normalmente está associado à presença da termoclina que atua como uma barreira física para o afundamento das células, que acabam se acumulando nestas imediações.

Alguns organismos planctônicos apresentam um padrão de distribuição vertical que varia ao longo do dia, devido às **migrações verticais**. Apesar de serem incapazes de vencer o movimento de correntes de água, vários destes organismos têm a capacidade de se deslocar até centenas de metros ao longo da coluna de água. Esta migração é menos intensa e frequente no fitoplâncton, mas muito ativa no caso do zooplâncton. As migrações verticais apresentam uma periodicidade muito regular, correspondente à alternância de dias e noites, as migrações nictemerais (do grego *nuctoss* = noite e *heméra* = dia). O padrão geral é o deslocamento para camadas mais profundas durante o dia (que lhes protege contra os predadores) e a subida para perto da superfície durante a noite, para se alimentar. Esses deslocamentos verticais permitem que os organismos encontrem outras correntes de água que os levem para outras áreas, auxiliando na sua dispersão pelo oceano.

Em termos de distribuição horizontal, pode-se dizer que a maior abundância de organismos encontra-se nas regiões costeiras (neríticas), especialmente nas regiões onde ocorrem ressurgências, enquanto o plâncton oceânico é mais escasso em termos de biomassa, mas não em importância ecológica. Considerando as diferenças latitudinais e variações ambientais associadas, a distribuição geográfica do plâncton pode ser caracterizada com base em províncias oceânicas. Assim, há espécies tropicais, temperadas e polares. Em função das ligações entre os oceanos, é comum a ocorrência de espécies cosmopolitas no plâncton, como a diatomácea *Skeletonema costatum*.

Uma espécie típica de uma região pode ser transportada para outra que não seja o seu habitat natural. Ela pode não se adaptar às condições deste novo local e morrer. Porém, há também a possibilidade de se adaptar e prosperar. Se a população desta nova espécie passar a ser dominante,

causando danos à biota natural ela será considerada uma "**espécie invasora**". Muitas vezes, esta espécie alóctone, por não possuir predadores naturais, acaba aumentando muito sua população, muitas vezes excluindo organismos da biota nativa por predação ou competição. O exemplo mais conhecido que temos no Brasil, é o do mexilhão-dourado, oriundo da China, que penetrou pelas águas do rio da Prata e hoje ameaça a fauna do Pantanal e prejudica o funcionamento de usina hidrelétrica de Itaipú.

Algumas espécies apresentam grande vínculo com as massas de água que habitam e por esse motivo são consideradas "**espécies indicadoras**". Um exemplo clássico são as salpas (*Thalia* sp.) que são indicadoras de águas frias. Este conceito pode também ser aplicado para espécies que se adaptam e se desenvolvem em algumas condições específicas do ambiente, como em situações de poluição ou eutrofização.

## 5. Importância do plâncton

Os organismos planctônicos têm um papel fundamental no equilíbrio da Terra. A presença de oxigênio livre na atmosfera deve-se a organismos planctônicos que passaram a realizar a fotossíntese oxigênica, causando uma grande mudança nas características da atmosfera e biosfera pretéritas (há cerca de 2,5 bilhões de anos). Atualmente, têm função decisiva no balanço de gases na atmosfera, sendo um dos controladores de gases estufa como o gás carbônico. Muitos organismos fitoplanctônicos são capazes de produzir o dimetil sulfonil propionato (DMSP) que origina o dimetilsulfato (DMS), gás volátil que passa para a atmosfera e que atua como núcleo de condensação de nuvens. Desta maneira, o fitoplâncton pode afetar o clima da terra, através da variação no albedo terrestre em função da sua contribuição para a formação de nuvens.

Apesar de o fitoplâncton corresponder a cerca de 1% da biomassa autotrófica terrestre, contribui com 46% da fixação de carbono na Terra (Field *et al.*, 1998). No ambiente aquático, a produção de matéria orgânica pelo fitoplâncton corresponde a 98% do total, sendo o principal produtor primário das redes tróficas marinhas. Portanto, a produção primária fitoplanctônica estabelece os limites superiores para captura pesqueira sustentável. Anualmente, cerca de 16 milhões de toneladas de carbono orgânico são exportados para as camadas mais profundas do oceano (Berger *et al.*, 1989), fenômeno conhecido como "bomba biológica". A biomassa produzida na zona eufótica é exportada para camadas mais profundas e sustentam as comunidades das regiões escuras dos oceanos. Este processo também contribui para a regulação da concentração de $CO_2$ atmosférico porque, em última instância, o gás carbônico está sendo exportado para camadas profundas aumentando o seu tempo de retorno para a atmosfera, contribuindo para mitigar o "efeito estufa" antropogênico. Por outro lado, muitas espécies que apresentam esqueletos ou carapaças de carbonato de cálcio são sensíveis aos processos de acidificação das águas marinhas, decorrentes do aumento de $CO_2$ atmosférico. Em pHs mais baixos, as carapaças sofrem dissolução e os organismos morrem, causando queda na biodiversidade e desocupação de nichos, que podem ser ocupados por organismos oportunistas, causando ainda maiores desequilíbrios. Nesse sentido, a acidificação dos oceanos também impede o papel de sequestro de $CO_2$ que ocorre através da deposição dos esqueletos carbonáticos desses organismos no sedimento oceânico, podendo, portanto, ser considerado um efeito de retroalimentação negativo sobre o processo de regulação de gases atmosféricos que é exercido pelo fitoplâncton.

O despejo de esgotos e outros dejetos nas águas costeiras causam o aumento de nutrientes orgânicos e inorgânicos nas águas. Isto pode favorecer o desenvolvimento excessivo (florações) de algumas microalgas e cianobactérias que acarretam a perda de qualidade de água (através da alteração

da cor ou cheiro). Em alguns casos, as algas podem produzir toxinas que podem causar a morte da biota marinha natural ou cultivada, atingindo inclusive o homem. Estas florações de algas nocivas têm causado problemas econômicos e de saúde pública no mundo inteiro. Dada a importância do assunto, a Comissão Oceanográfica Intergovernamental da UNESCO criou em 1993 o Programa de Floração de Algas Nocivas[2], visando promover o manejo eficaz e a pesquisa científica relacionados às florações algáceas nocivas a fim de entender suas causas, prever suas ocorrências e mitigar os seus efeitos.

A comunidade planctônica constitui os "berçários" de grande parte da fauna oceânica. Então, é fácil entender que os processos deletérios sobre essas comunidades estarão comprometendo imediata e diretamente os estoques de peixes e outros animais marinhos. Fica claro que, apesar de constituir uma comunidade microscópica, aparentemente "invisível", o plâncton é absolutamente fundamental para o equilíbrio da vida na Terra.

## SITES RECOMENDADOS

CIFONAUTA. Banco de imagens de biologia marinha: <http://cifonauta.cebimar.usp.br/>

WORMS. Registro mundial de espécies marinhas: <http://www.marinespecies.org>

ALGAE BASE. Banco de dados global de algas: <https://www.algaebase.org/>

HAB. Programa de Floração de Algas Nocivas: <http://hab.ioc-unesco.org/>

THE OCEANS. <http://ark.cdlib.org/ark:/13030/kt167nb66r/>

## Referências Bibliográficas

AZAM, F.; FENCHEL, T.; FIELD, J. G.; GRAY, J. S.; MEYER-REIL, L. A. & THINGSTAD, F. 1983. The ecological role of water-column microbes in the sea. Mar. Ecol. Prog. Ser.,10: 257-263.

BERGER, W. H.; SMETACEK, V. S. & WEFER, G. 1989. Ocean productivity and paleoproductivity: an overview. In: Productivity of the ocean: present and past (W.H. Berger, V.S. Smetacek & Wefer,G., eds). Wiley-Interscience, Berlin.1-34.

DOI, S.A.; PINTO, A.B.; CANALI, M.C.; POLEZEL, D.R; CHINELLATO, R.A.M. & OLIVEIRA, A.J.F.C. 2018. Density and diversity of filamentous fungi in the water and sediment of Araçá bay in São Sebastião, São Paulo, Brazil. Biota Neotropica 18(1): e20170416.

FIELD, C.B.; BEHRENFELD, M.J.; RANDERSON, J.T. & FALKOWSKI, P. 1998. Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components. Science, 281(10): 237-240.

FUHRMAN, J.A. 1999. Marine viruses and their biogeochemical and ecological effects. Nature, 399: 541–548.

[2] Harmfull Algal Bloom Programme - IUCN: <http://hab.ioc-unesco.org/>

GREGORY, A.C., ZAYED, A.A., CONCEIÇÃO-NETO, N., TEMPERTON, B., BOLDUC, B., ALBERTI, A., ARDYNA, M., ARKHIPOVA, K., CARMICHAEL, M., CRUAUD, C., DIMIER, C., DOMÍNGUEZ-HUERTA, G., FERLAND, J., KANDELS, S., LIU, Y., MAREC, C., PESANT, S., PICHERAL, M., PISAREV, S., POULAIN, J., TREMBLAY, J.E., VIK, D., ACINAS, S.G., BORK, P., BOSS, E., BOWLER, C., COCHRANE, G., FOLLOWS, M., GORSKY, G., GRIMSLEY, N., GUIDI, L., HINGAMP, P., IUDICONE, D., JAILLON, O., KANDELS-LEWIS, S., KARP-BOSS, L., KARSENTI, E., NOT, F., OGATA, H., , POULTON, N., RAES, J., SARDET, C., SPEICH, S., STEMMANN, L., BABIN, M., CULLEY, A.I., DE VARGAS, C., DUTILH, B.E., ROUX, S., SUNAGAWA, S., WINCKER, P., SULLIVAN. M.B. 2019. Marine DNA Viral Macro- and Microdiversity from Pole to Pole. Cell, 177(5):1109-1123. DOI: 10.1016/j.cell.2019.03.040.

GUIRY, M.D. & GUIRY, G.M. 2020. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. <https://www.algaebase.org>. Acesso em 15 de abril de 2020.

MOREIRA, C.G. & SCHOENLEIN-CRUSIUS, I.H. 2010. Fungos em ambientes aquáticos continentais. <http://www.biodiversidade.pgibt.ibot.sp.gov.br/Web/pdf/Fungos_em_ambientes_aqu%C3%A1ticos_Carolina_Gasch_Moreira.pdf>. Acesso em 15 de abril de 2020.

SIEBURTH, J.M.C.N.; SMETACEK, V. & LENZ, J. 1978. Pelagic ecosystem structure: heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions. Limnol. Oceanogr., 23(6): 1256-1263.

TOMAS, C.R. 1997. Identifying marine phytoplankton. Academic Press, San Diego, CA, USA. 858p.

WORMS EDITORIAL BOARD 2020. World Register of Marine Species. <http://www.marinespecies.org>. doi:10.14284/170. Acesso em 25 de abril de 2020.

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 22*

# OCEANOGRAFIA MICROBIANA

*Camila Negrão Signori & Vivian Helena Pellizari*

REVISÃO: MARCOS CÉSAR DE OLIVEIRA SANTOS

CITAÇÃO SUGERIDA: SIGNORI, Camila Negrão; PELLIZARI, Vivian Helena. Oceanografia microbiana. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 22: p. 473-488.

# Oceanografia Microbiana

*Camila Negrão Signori & Vivian Helena Pellizari*

## 1. Introdução

Oceanografia Microbiana é uma disciplina recente, com termo proposto nos anos 2000, que integra os princípios e conceitos de Microbiologia Marinha, Ecologia Microbiana e Oceanografia, que visa observar e compreender a vida microbiana, seu papel na estrutura e funcionamento dos ecossistemas marinhos em um sentido abrangente e inter- e multidisciplinar. A diversidade taxonômica e funcional, e os processos microbianos que suportam diferentes metabolismos são, por sua vez, influenciados pelo ambiente oceanográfico e suas forçantes ambientais, físicas, químicas, geológicas e biológicas.

As pesquisas nessa área englobam diferentes abordagens, desde experimentos em laboratório (ex. micro- e mesocosmos), observações de campo e coletas de amostras de biomas marinhos representativos com escalas de tempo e espaço relevantes, até experimentos *in situ* para o enfoque ecossistêmico. As coletas de amostras no mar são fundamentais para entender a distribuição, abundância, diversidade e atividades metabólicas de micro-organismos e usar esta informação para desenvolver e testar hipóteses ecológicas sobre o papel que os micro-organismos desempenham nos ciclos biogeoquímicos, possibilitando até previsões ecológicas, como por exemplo sobre o impacto das mudanças climáticas nos processos microbianos no oceano global.

Os experimentos *in situ* ainda são menos efetivos em relação às demais abordagens, já que ainda nos falta o total conhecimento dos biomas marinhos a ponto de desenharmos experimentos com boas respostas do ecossistema, especialmente em escalas espaciais e temporais adequadas, que de fato influenciem nos processos microbianos.

O campo da Oceanografia Microbiana começou há muitos anos, em 1677, com a descoberta do micro-organismo marinho pelo holandês Antonie van Leeuwenhoek, através de um microscópio feito por ele próprio. No entanto, somente há algumas décadas, a identificação dos micro-organismos, assim como o melhor entendimento de seu papel nos ecossistemas marinhos foram possibilitados através do uso de técnicas mais apropriadas de amostragens e análise laboratorial.

Dentre as informações mais básicas e relevantes sobre os micro-organismos marinhos, incluem-se sua distribuição e abundância, a estrutura da comunidade, atividades metabólicas *in situ*, assim como os reguladores ecológicos. Para o acesso ao mar e a coleta de amostras para aquisição dessas informações, os navios de pesquisa devidamente equipados são fundamentais, principalmente para estudos de oceano aberto. No entanto, fatores como a baixa disponibilidade de navios adequados, o alto custo por dia de um navio e a dificuldade de se agendar as expedições estão entre as causas da variação da intensidade de estudos em diferentes regiões do oceano global. Como exemplo, o Oceano Pacífico e o Atlântico Norte são muito mais estudados do que o Atlântico Sul sob diferentes aspectos. É importante considerar que cada expedição científica representa uma fotografia da comunidade microbiana naquele momento de coleta, sem levar em conta sua dinâmica espacial e temporal.

Tão importante quanto o acesso ao mar é um desenho experimental que considere a aquisição de dados físicos e biogeoquímicos que complementem os dados biológicos. Esses dados são necessários para a interpretação da estrutura e dinâmica das comunidades microbianas e devem incluir fatores como temperatura, salinidade, nutrientes inorgânicos e orgânicos (ex. o carbono orgânico dissolvido tem sido considerado o principal fator regulador de comunidades microbianas marinhas), e gases dissolvidos.

Anteriormente, as pesquisas em Microbiologia Marinha tinham um foco no estudo de bactérias heterotróficas que eram isoladas de amostras de água do mar e colocadas em placas com meios de cultura para sua contagem (Fig. 1). Hoje se sabe que os micro-organismos marinhos são muito diversos taxonomicamente e complexos metabolicamente, e que a grande maioria não é cultivável em laboratório. Com o surgimento de novos métodos e tecnologias, foi possível avançar nos estudos com enfoque na importância ecológica dos micro-organismos, e também em sua aplicação biotecnológica.

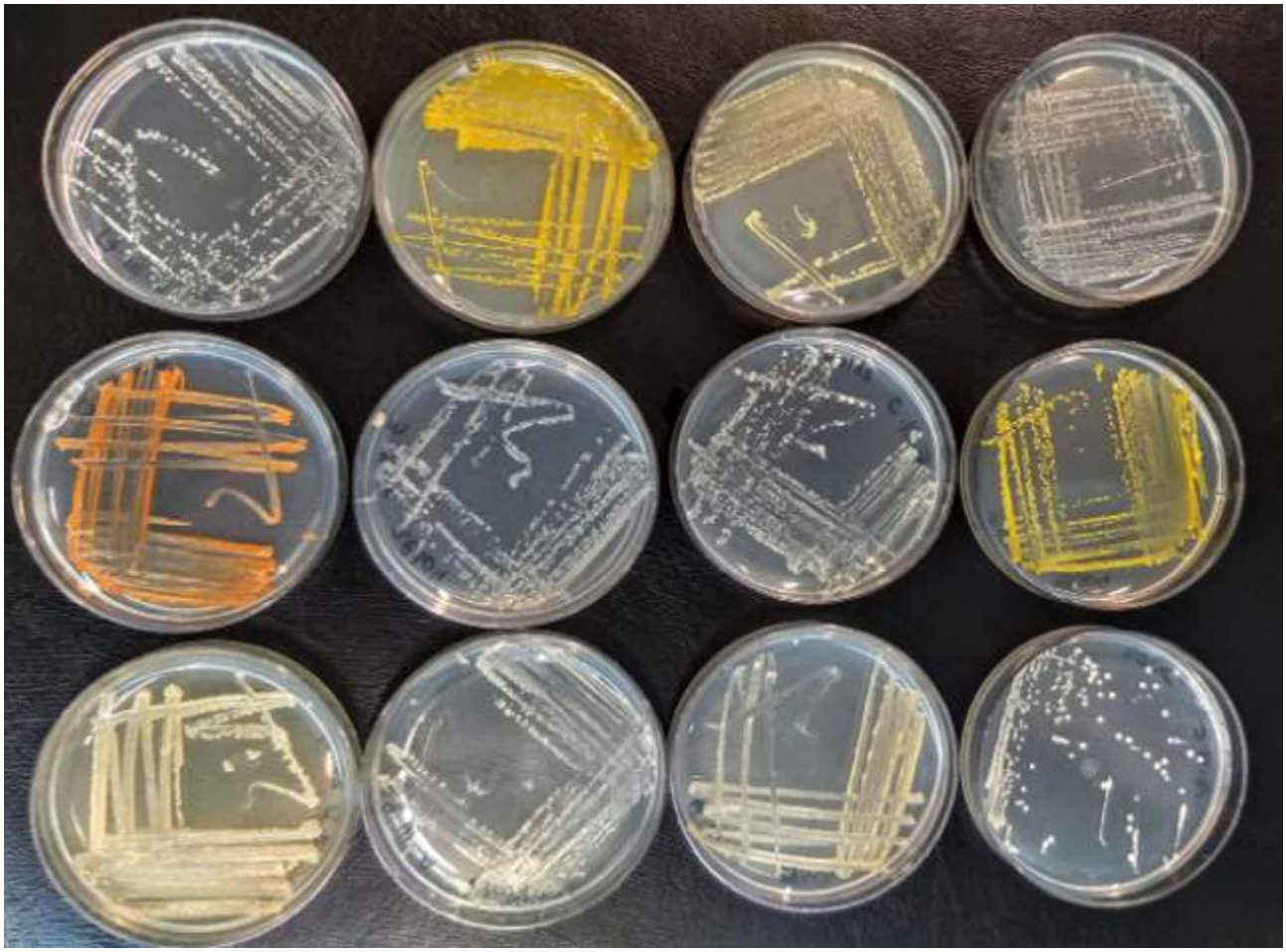


**FIGURA 1. Placas com bactérias marinhas isoladas (manchas coloridas) do biofilme associado a polímeros plásticos coletados no Saco da Ribeira, Ubatuba, São Paulo, Brasil.** *Foto: Maria Carolina Kmit.*

A biotecnologia marinha, também conhecida como a biotecnologia azul, refere-se ao uso da extensa diversidade microbiana para o desenvolvimento de novos produtos, contribuindo de maneira eficaz e sustentável para a economia global. Neste caso, a ciência e a tecnologia são aplicadas para transformar recursos biológicos marinhos (matérias-primas derivadas de micro-organismos) através de processos biotecnológicos para uso nos setores da saúde, cosméticos, têxteis, alimentos, aquicultura, agricultura, energia e serviços ambientais marinhos.

A adaptação para sobreviver em ambientes extremos, com condições distintas (temperatura, salinidade, pressão, luz, pH, oxigênio etc) e competição por recursos, resultou na seleção de micro-organismos com um potencial genético amplo para a síntese de moléculas bioativas potentes.

O termo micro-organismo é utilizado para descrever qualquer organismo vivo e pequeno (máximo de 100-150 µm), invisível a olho nu e inclui representantes dos três domínios da vida (Bacteria, Archaea e Eukarya) e os vírus acelulares (que não pertencem a nenhum domínio da vida, mas que são considerados entidades biológicas), que dominam o ambiente marinho, tanto em termos de biomassa como de metabolismo. Bacteria e Archaea compreendem os micro-organismos com estrutura celular procarionte, ou seja, as células não possuem envoltório nuclear delimitando o material genético, nem organelas membranosas e citoesqueleto. Apesar dessa semelhança, esses domínios apresentam diferenças citológicas, bioquímicas e ecológicas que os distinguem claramente. Como exemplos, a parede celular com peptideoglicano é presente apenas em Bacteria; a enzima RNA polimerase é simples com quatro polipetídeos em Bacteria *versus* RNA polimerase complexa com mais de oito polipeptídeos em Archaea; há prevalência de arqueias em ambientes extremos. Quanto ao domínio Eukarya, normalmente associado aos organismos maiores, onde se inserem animais, macroalgas e muitos fungos, vale ressaltar que a maioria dos eucariotos são na verdade os micro-organismos (protozoários). No entanto, classificar os organismos somente pelo tamanho, exclui suas diferenças históricas e capacidades metabólicas. Os termos bactéria e bacterioplâncton eram anteriormente relacionados aos procariotos heterotróficos, o que não é mais aceito atualmente, visto que nem todas as bactérias são heterotróficas, e nem todos os procariotos heterotróficos são bactérias.

Quanto à sua versatilidade metabólica, alguns micro-organismos marinhos utilizam, por exemplo, a energia derivada da luz solar para fixar o dióxido de carbono e transformar em matéria orgânica (micro-organismos fotoautotróficos, como bactérias e algas unicelulares), enquanto outros utilizam material orgânico como fonte de carbono e energia, e produzem dióxido de carbono como produto final da respiração (heterotróficos). Outros ainda podem usar a luz solar e matéria orgânica de forma simultânea ou intermitente como sua estratégia metabólica de sobrevivência, ou ainda a oxidação de um ou mais substratos inorgânicos (ex. gás hidrogênio e amônio) para produção de matéria orgânica sem a energia solar (quimiolitoautotróficos).

## VOCÊ SABIA?

**Os micro-organismos podem ser classificados de acordo com a fonte de energia, elétrons e carbono como indicativo de seu metabolismo.** *Adaptado de Karl (2009).*

CLASSIFICAÇÃO DO METABOLISMO MICROBIANO

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| FONTE DE ENERGIA<br>QUÍMICA<br>LUZ | QUIMIO-<br>FOTO- | | | |
| DOADOR DE ELÉTRONS<br>INORGÂNICO<br>ORGÂNICO | | -LITO-<br>-ORGANO- | | |
| FONTE DE CARBONO<br>INORGÂNICO ($CO_2$)<br>ORGÂNICO<br>AMBOS | | | -AUTO-<br>-HETERO-<br>-MIXO- | |
| | | | | -TRÓFICO |

## 2. Microbioma marinho

O microbioma marinho desempenha um papel de destaque no ciclo biogeoquímico dos elementos (ex. C, N, S, P) e na base da teia alimentar marinha, sendo, portanto, fundamental para a ecologia do mar e para a regulação do clima. Descobertas de compostos bioativos de interesse biotecnológico e industrial também motivam as pesquisas no tema. Micro-organismos são onipresentes no oceano. Eles existem como organismos individuais ou como comunidades, livres na coluna d`água ou presos a substratos, fora ou dentro de outros organismos, e exibem diferentes tipos de interações entre si e com o ambiente oceanográfico.

De um total de cerca de 1 x $10^{30}$ células de bactérias e arqueias na Terra, existem cinco grandes habitats que somam 99% do total de células microbianas, sendo quatro habitats marinhos: sedimento superficial 5 x $10^{28}$ (4%), oceano 1 x $10^{29}$ (9%), subsuperfície continental profunda 3 x $10^{29}$ (26%) e subsuperfície oceânica profunda 4 x $10^{29}$ (34%). Estima-se ainda que, em uma gota de água do mar, haja 10 milhões de vírus, um milhão de bactérias, 10 mil protozoários e mil células fitoplanctônicas. Com base neste cenário, pode-se dizer que, além de vivermos em um "Planeta Azul" ou "Planeta Água" (>70% cobertos pelo oceano), vivemos em um "Planeta Microbiano" (Fig. 2)!

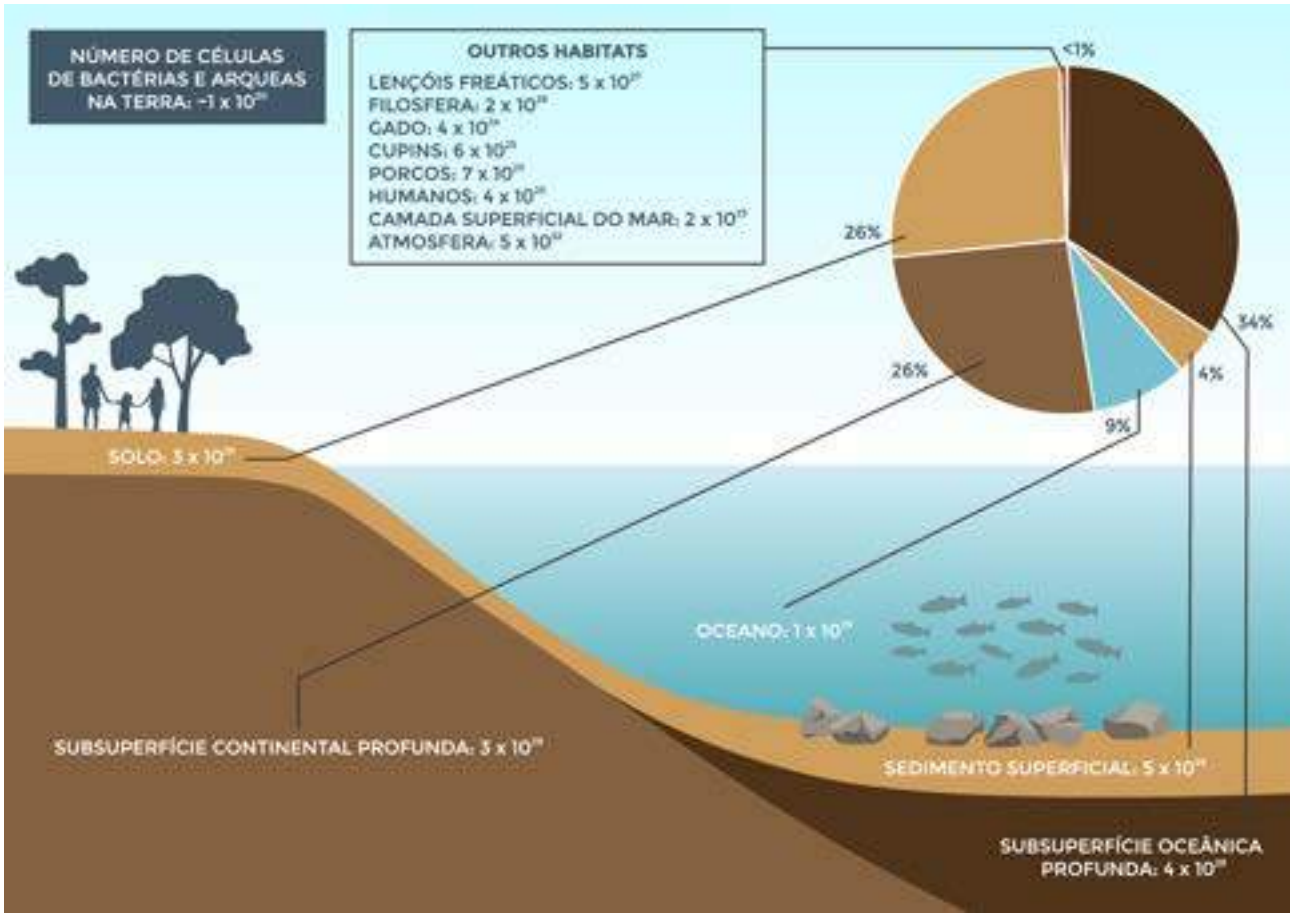



**FIGURA 2.** **Abundância de bactérias e arqueias em diferentes habitats da Terra, com estimativa de cerca de 1,2 x $10^{30}$ células microbianas no total. Os cinco maiores habitats ocupados por bactérias e arqueias (99%) são representados por: oceano, sedimento superficial (até 50 cm de profundidade), subsuperfície oceânica profunda, solo (até 8 m de profundidade) e subsuperfície continental profunda. Outros habitats, exemplificados na caixa à direita, têm abundância de cerca de 5 x $10^{27}$ células de bactérias e arqueias, correspondentes a 1% do total.** *Adaptado de Flemming & Wuertz (2019).*

Para estudar os micro-organismos marinhos, é necessário identificar se são de vida livre, associados a partículas ou em simbiose com outro organismo, além de seu estilo de vida - pelágico (na coluna de água) ou bentônico (ligado a um substrato). Os domínios e as zonas do ambiente marinho, ocupadas pelos micro-organismos, foram definidas de acordo a localidade, profundidade e luz e são explicadas em detalhes no capítulo **A vida no Mar**. Cada uma dessas províncias ou zonas do ambiente oceanográfico são caracterizadas por fatores abióticos e bióticos, que por sua vez, formam diversos nichos adequados para a vida microbiana, e que determinam sua distribuição vertical (na coluna d`água ou no sedimento), espacial e temporal.

Como exemplo, as algas fotossintéticas e cianobactérias são, obviamente, restritas à zona eufótica devido à incidência da energia luminosa, enquanto que bactérias e arqueias quimiotróficas e heterotróficas podem ocupar os ambientes mais hostis e extremos, como o oceano profundo, suportando altas pressões hidrostáticas e menor aporte de nutrientes, ou as fontes hidrotermais, tolerando altas temperaturas, ou o gelo marinho e as águas polares, sob baixíssimas temperaturas (Fig. 3). Da mesma forma, os fungos marinhos heterotróficos têm sido encontrados de águas costeiros à subsuperfície. Esses são apenas alguns exemplos de que a vida microbiana está presente em todo o ambiente marinho.

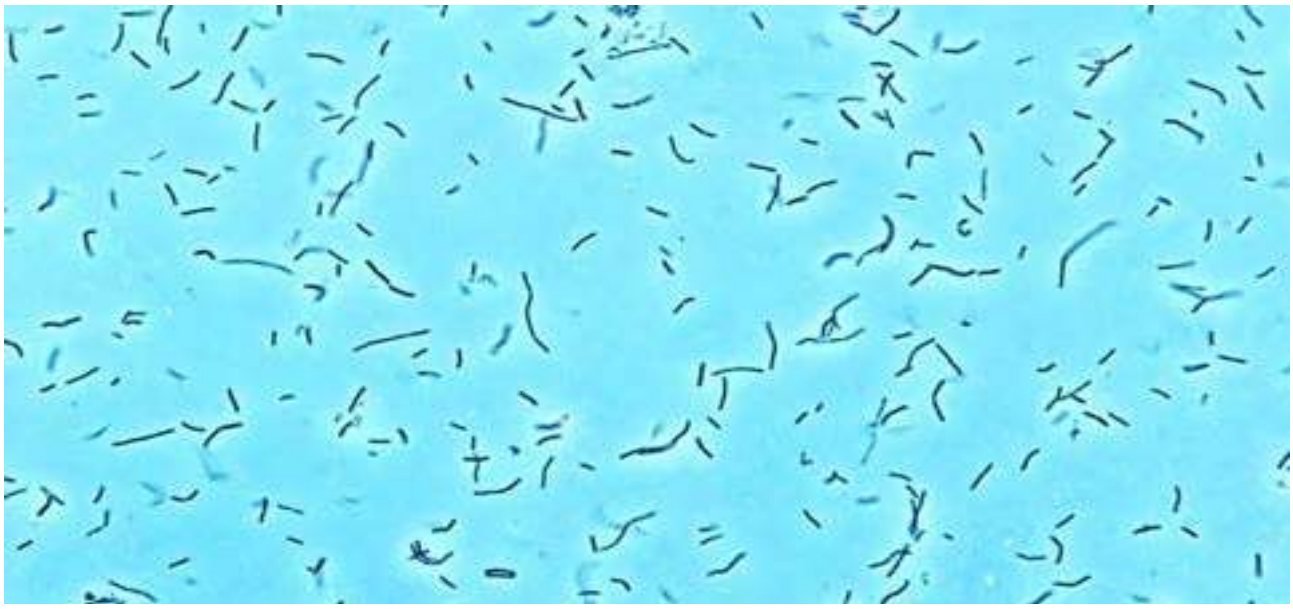


**FIGURA 3.** Bactérias pertencentes ao gênero *Exiguobacterium* (filo Firmicutes), isoladas do degelo marinho, Antártica, e observadas em microscópio óptico com aumento de 1000 vezes. Projeto MICROPOLAR/ PROANTAR. *Foto: Vivian Pellizari*.

Imaginando um transecto da terra para o mar, tem-se as zonas costeiras e estuarinas, que recebem a influência de água marinha através do movimento de marés, e principalmente do aporte continental das bacias hidrográficas adjacentes. Juntamente com a plataforma continental, esses ecossistemas são movidos pela fotossíntese, que depende da disponibilidade de luz e nutrientes, e é realizada tanto pelos grupos fitoplanctônicos, como por algas marinhas, plantas maiores como os *kelps* (ex. *Laminaria* sp.) e gramíneas (ex. *Posidonia oceanica* e *Zostera marina*). Praias e rochas, de ambientes rasos a profundos, são por vezes cobertas pelos tapetes microbianos (também chamados de biofilmes), que estão entre os ecossistemas microbianos mais ricos do planeta (Fig. 4). São conhecidos por serem ecossistemas pequenos e autossustentáveis, abrangendo comunidades fotolitoautotróficas, quimiolitoautotróficas e quimioorganotróficas que formam uma teia alimentar complexa em uma camada de apenas alguns milímetros. No sedimento, cianobactérias e diatomáceas são os principais produtores na camada superficial, enquanto que imediatamente abaixo (<5 mm), micro-organismos redutores de sulfato prevalecem em sedimentos de mar profundo.

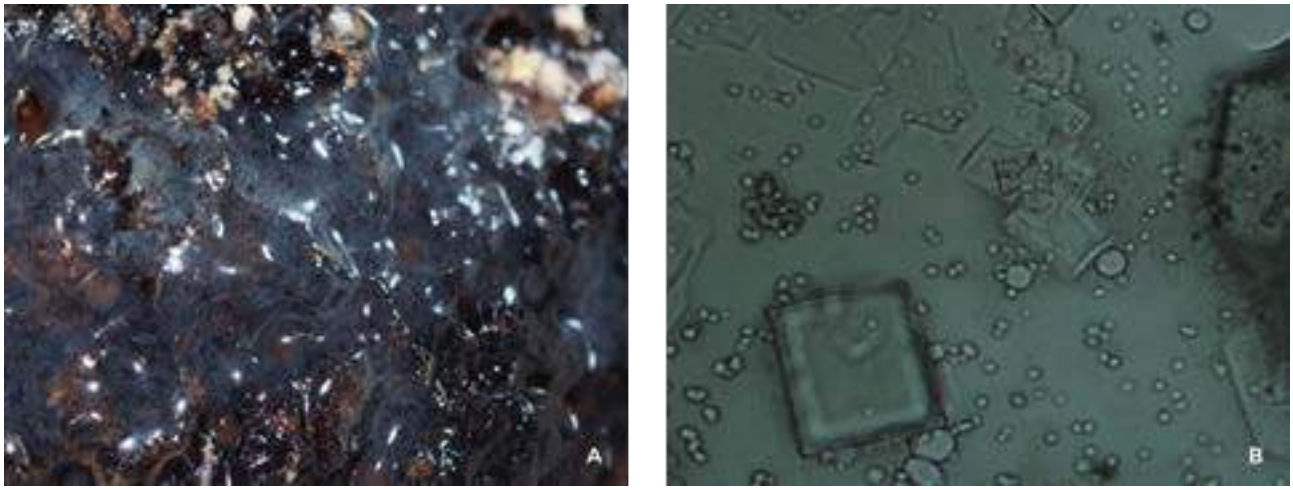



**FIGURA 4.** **A) Presença de biofilme de micro-organismos ("gosmas" transparentes) na crosta oceânica coletada a 881 m de profundidade na Elevação do Rio Grande, Oceano Atlântico Sudoeste, Projeto Marine Etech.** *Foto: Paulo Vinicius Corrêa*. **B) Micro-organismos observados em microscópio óptico, com aumento de 1000 vezes.** *Foto: Natascha Bergo*.

Os principais contribuintes fotossintéticos, em termos de abundância e biomassa de carbono, são as pico-cianobactérias *Synechococcus* spp. e *Prochlorococcus* spp. (totalizando $10^{27}$ células), que são responsáveis por pelo menos 20% da fixação de carbono global (Fig. 5). Esses micro-organismos abastecem grande parte da teia alimentar marinha através dos diferentes níveis tróficos, até os grandes predadores, e desempenham um papel crítico na produção global de oxigênio e no sequestro de carbono da atmosfera. A distribuição microbiana na zona eufótica, que corresponde a aproximadamente 10% do volume total do oceano, depende da época e disponibilidade de luz solar. Características como a intensidade da luz podem influenciar a distribuição vertical de uma comunidade, com base em sua tolerância à luz ultravioleta.

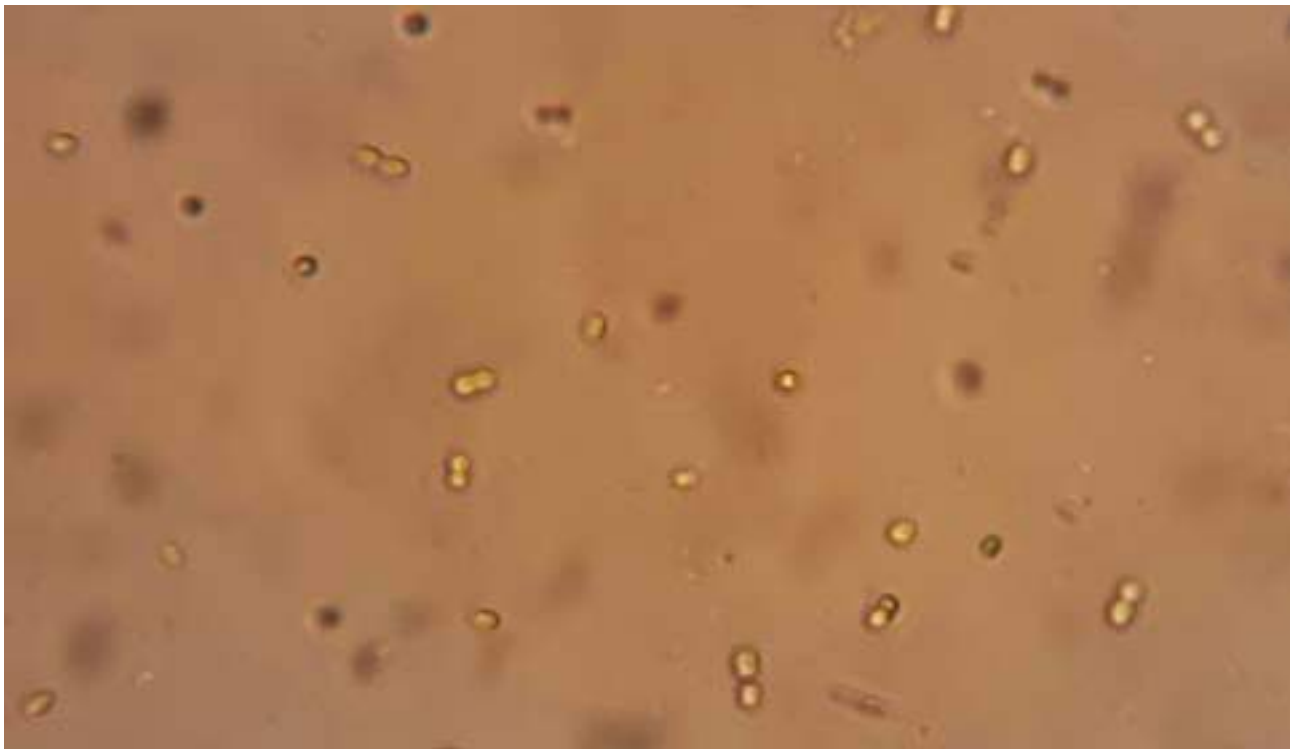


**FIGURA 5.** **Células de** *Synechococcus subsalsus*, **coletadas em Ubatuba e observados em microscópio óptico, com aumento de 400 vezes. Cepa BMAK 164, cultivada no Banco de Microrganismos Aidar e Kutner, Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo.** *Foto: Flávia Saldanha-Corrêa*.

A matéria orgânica produzida fotossinteticamente é transportada desde a superfície até as camadas mais profundas sob a forma de partículas, como pelotas fecais, fitodetritos e neve marinha. A neve marinha é um mini-ecossistema marinho único, um agregado de comunidades de bactérias, protistas e outros micro-organismos, cuja densidade supera em 2-5 ordens de magnitude a densidade microbiana na água do mar circundante. Apesar de representar cerca de 4% da biomassa microbiana marinha total, a neve marinha fornece alimento para flagelados bacteriófagos e outros protozoários, além de liberar a matéria orgânica dissolvida que será utilizada por bactérias de vida livre. Membros de diversos filos foram encontrados em estudos moleculares da composição da neve marinha no Oceano Atlântico Norte: Bacteroidetes, Cyanobacteria, Gammaproteobacteria (Alteromonas e Pseudoalteromonas), Alphaproteobacteria (Roseobacter) e Planctomycetes.

Na coluna d`água, as comunidades microbianas mudam com a profundidade. Representantes de Archaea, como Crenarchaeota, Euryarchaeota e Thaumarchaeota, juntamente com representantes de Bacteria, Actinobacteria, Firmicutes, Beta-, Delta- e Gammaproteobacteria aumentam em número e importância, enquanto se observa a diminuição de Bacteroidetes e Alphaproteobacteria. Ainda se necessitam mais estudos para desvendar como essas mudanças na composição da comunidade microbiana estão relacionadas aos fatores abióticos e bióticos. Mas já se sabe que as comunidades microbianas podem ser reguladas ou até determinadas por controles *bottom-up* e/ou *top-down*. Os controles *bottom-up*, como os parâmetros físicos (temperatura, salinidade, pH, luz ultravioleta, pressão hidrostática) e químicos (oxigênio, nutrientes orgânicos e inorgânicos) muitas vezes podem explicar, direta ou indiretamente, grande parte da variação nas propriedades de toda a comunidade microbiana. Outro fator muito importante é a matéria orgânica, tanto em termos quantitativos (concentrações e taxas de suprimentos), como qualitativos (composição dos componentes orgânicos), que pode ter um impacto sobre as taxas de crescimento de bactérias heterotróficas e fungos, embora haja pouca evidência de estudos de campo. O controle *top-down* por herbívoros (*grazers*) e vírus limita os estoques de micro-organismos e pode afetar suas taxas de crescimento em ambientes naturais.

Características do mar profundo como a ausência de radiação solar, baixa temperatura e elevada pressão hidrostática tornam este ambiente fisicamente uniforme, e em sua maioria, abrigando baixa abundância e diversidade de micro-organismos. Com exceção de habitats especiais, como as fontes hidrotermais, carcaças de baleias (Fig. 6 e 7), bacias hipersalinas anóxicas e exsudações frias (*cold seeps*), que são considerados *hotspots* de diversidade e atividade microbiana.

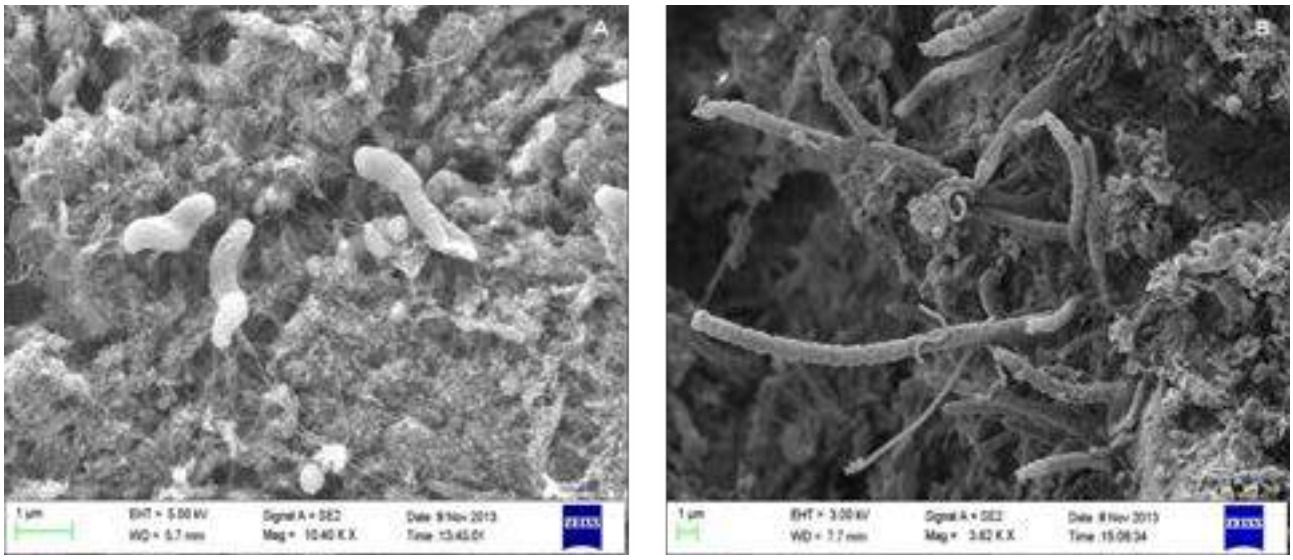


**FIGURA 6.** A e B) Bactérias marinhas associadas ao osso de baleia coletado na Antártica, Projeto LARISSA. Imagens obtidas com uso da microscopia eletrônica de varredura (MEV). *Foto: Ulisses Lins*.

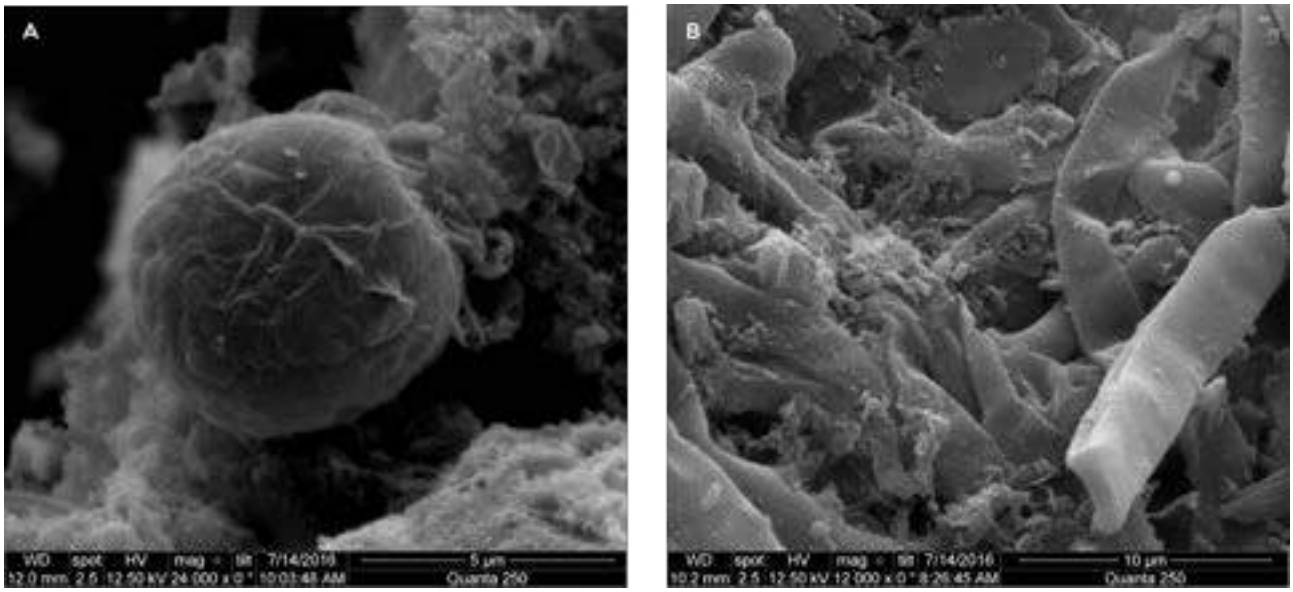



**FIGURA 7.** A) Micro-organismo no interior de biofilme formado em uma vértebra de baleia em processo de decomposição. B) Micro-organismo no interior de biofilme formado em uma parcela de madeira em processo de decomposição. Amostras coletadas em 3300 m de profundidade na Bacia de Santos, Oceano Atlântico Sudoeste. Imagens obtidas com uso da microscopia eletrônica de varredura (MEV). Projeto: BIOSUOR. *Foto: Ulisses Lins*.

As zonas profundas correspondem a cerca de 90% do ambiente marinho, e são marcadas por uma separação física das massas d'água determinada pela temperatura e densidade (denominada termoclina). Os corpos d'água diferentes e separados devido à termoclina possuem sistemas de circulação e comunidades microbianas distintas. Como exemplo, sabe-se que as comunidades microbianas polares de águas profundas são diretamente relacionadas à dispersão por correntes marinhas.

Embora a fotossíntese ainda possa contribuir de forma indireta para a teia alimentar dessas regiões profundas, através do afundamento de partículas provenientes da zona eufótica, o metabolismo nessas regiões é dominado pela quimiossíntese, definida pela produção biológica de compostos orgânicos (glicose = alimento) a partir da incorporação de gás carbônico e nutrientes, usando a energia química (ao invés da luminosa) gerada pela oxidação de moléculas inorgânicas (ex. amônia, hidrogênio, ferro, enxofre) ou orgânicas (ex. metano, metanol).

Na interface entre a água e o sedimento forma-se uma zona de transição bem demarcada que permite a coexistência e interação de diversos micro-organismos. A parte superior é constituída principalmente de sedimento fino e lamoso, com altos percentuais de matéria orgânica acumulada da zona eufótica.

As bactérias heterotróficas inicialmente transformam essa matéria orgânica e usam o oxigênio disponível, resultando em condições anóxicas em apenas alguns milímetros de profundidade no sedimento. No sedimento anóxico, o metabolismo anaeróbico irá prevalecer e pode persistir a mais de cem metros abaixo do fundo do mar. Em regiões com baixa atividade microbiana, o oxigênio não é completamente metabolizado e pode penetrar muito mais profundo no sedimento, favorecendo a respiração aeróbica (mesmo que em taxas baixíssimas).

As bactérias heterotróficas que são comumente encontradas incluem membros das classes Gamma-, Delta-, Epsilonproteobacteria, Firmicutes e Bacteroidetes, capazes de realizar a fermentação e redução de sulfato simultaneamente e criar as condições para a metanogênese.

Os micro-organismos heterotróficos também possuem um papel fundamental na alça microbiana, ao degradar a matéria orgânica, tornando os nutrientes disponíveis ao ambiente para serem usados por células fitoplanctônicas para a fotossíntese, e por quimioautotróficos para a quimiossíntese, possibilitando a continuidade da produção primária na zona eufótica, mesmo na ausência de novas entradas de nutrientes.

Também não se pode deixar de mencionar os vírus marinhos, que são provavelmente o maior reservatório de novos genes da biosfera, e desempenham um papel importante na história natural e dinâmica populacional naturais da maioria dos organismos vivos e, principalmente para as bactérias, arqueias e protozoários, contribuindo para o funcionamento do ecossistema marinho e para a estabilidade e desempenho das comunidades microbianas. Abordagens independentes de cultivo permitiram rápidos avanços na compreensão da diversidade e da funcionalidade dos vírus marinhos, mas ainda não excluem a necessidade de medições da taxa de lises virais in situ, bem como estudos experimentais de interações vírus-hospedeiro.

## 3. Biogeografia e dinâmica espacial e temporal

A biogeografia pode ser brevemente definida como a distribuição espacial e temporal dos táxons, ou mais detalhadamente, como o estudo da biodiversidade no espaço e no tempo, revelando onde os organismos vivem, em que abundância e por qual razão. Embora diversos organismos maiores e multicelulares tenham sido mais amplamente estudados quanto à sua biogeografia, pesquisas mais recentes têm incluído os micro-organismos como bactérias, arqueias e protistas.

Como já visto anteriormente, as comunidades microbianas na coluna d`água e nos sedimentos têm um papel essencial nos ciclos biogeoquímicos marinhos e até mesmo globais, assim como na cadeia alimentar e na formação de nichos ecológicos e de ecossistemas. E o entendimento dessas importantes funções está diretamente relacionado à identificação e caracterização dos micro-organismos presentes na comunidade e suas capacidades fisiológicas e metabólicas. Dessa maneira, a biogeografia microbiana marinha é um aspecto importante para nossa compreensão dos ciclos biogeoquímicos e do funcionamento do ecossistema como um todo.

No entanto, estudos de biogeografia microbiana são complexos por uma série de fatores e limitações metodológicas. Primeiramente, o ambiente de estudo é aberto, tridimensional, muito dinâmico e sujeito aos processos de pequena (ex. turbulências), média (ex. vórtices) e larga escala (ex. correntes oceânicas). Portanto, sempre existe a possibilidade de ocorrer a subamostragem, quando os movimentos físicos de correntes, vórtices, frentes, advecção e ressurgência proporcionam diferentes condições ambientais diferentes daquelas normalmente encontradas, favorecendo diferentes comunidades microbianas, mesmo em pequenas escalas espaciais ou até em um único local durante curtos períodos de tempo. Em escalas maiores, as correntes de superfície podem limitar a estrutura biogeográfica da comunidade microbiana ao afetar seus limites físicos e, portanto, contribuir para a dispersão microbiana nas camadas superiores dos oceanos.

Em segundo lugar, quando comparados aos organismos multicelulares, os micro-organismos são mais complexos de se estudar, tanto por seu pequeno tamanho, quanto pela ausência de caracteres morfológicos que facilitem sua identificação. Nos primeiros dias da microbiologia marinha, a identificação de células foi baseada normalmente no isolamento e cultivo de estirpes e sua caracterização por meio de características morfológicas e capacidades metabólicas.

Nos séculos XIX e XX, a maioria dos estudos sobre diversidade foi realizada para grupos específicos, em micro-organismos marinhos cultiváveis e com características morfológicas ou metabólicas bem definidas, que permitiram sua identificação taxonômica através do cultivo e microscopia de luz simples. Como exemplo, as bactérias do gênero *Photobacterium* foram das primeiras a serem descritas, por serem facilmente cultiváveis e identificadas. Ainda entre 1960 e 1990, outros grupos de bactérias foram isolados e classificados com base em suas habilidades metabólicas ou características morfológicas (ex. bactérias metilotróficas, diazotróficas nitrificantes). Micro-organismos eucarióticos do fitoplâncton, por possuírem caracteres morfológicos visíveis ao microscópio de luz (ex. flagelos em dinoflagelados, paredes celulares de silicato em diatomáceas, revestimento de carbonato de cálcio em cocolitoforídeos) eram mais facilmente identificados e descritos.

Mais recentemente, os avanços tecnológicos e metodológicos, como por exemplo a microscopia de fluorescência e métodos de contagem direta, a microscopia de varredura, a citometria de fluxo e as técnicas de biologia molecular, revolucionaram os estudos em Microbiologia, possibilitando pesquisas mais aprofundadas sobre a biogeografia microbiana marinha. Destacam-se o sequenciamento de nova geração (NGS), capaz de gerar milhões de sequências a partir de uma amostra ambiental, e as ferramentas de bioinformática, necessárias para as análises das sequências e da diversidade e estrutura das comunidades microbianas. Atualmente, a maioria das publicações em biogeografia microbiana utiliza o sequenciamento do gene RNA ribossomal 16S para Bacteria e Archaea (procariotos), 18S ou ITS para Eukarya (eucariotos), servindo como padrão na identificação taxonômica molecular e nas análises filogenéticas.

Pesquisas em Oceanografia Microbiana devem ser reforçadas com mais estudos comparando as comunidades microbianas de diferentes localidades para avaliar a relativa extensão da biodiversidade, as tendências sazonais para os mesmos grupos de procariotos e suas distintas distribuições geográficas, além da coleta de amostras investindo em escalas temporais, desde variações diárias à interanual. Como exemplo, estudos pretéritos sobre a estrutura das comunidades microbianas polares mostraram que a amostragem de frequência sazonal é fundamental para a compreensão de sua ecologia, por estar diretamente vinculada ao metabolismo funcional e suas estratégias de adaptação às mudanças das condições ambientais em altas latitudes, auxiliando consequentemente, na melhor compreensão da estrutura e funcionalidade do ecossistema polar como um todo e na determinação dos efeitos das mudanças climáticas na base da cadeia alimentar do Oceano Austral.

Diferentes escalas de espaço e tempo podem e devem ser utilizadas em Ecologia Microbiana para melhor compreensão da variação das comunidades microbianas, tanto naturalmente, quanto pela intervenção de fenômenos naturais (ex. climáticos, oceanográficos) ou pela intervenção do homem (ex. mudanças climáticas).

Uma abordagem bem direta de se observar a dinâmica das comunidades microbianas marinhas é através do uso de estudos oceanográficos de séries temporais que analisam a sua composição. Estudos com abordagens temporais são mais raros do que estudos com abordagens espaciais, apesar de serem fatores igualmente importantes para a variação das comunidades microbianas aquáticas, podendo oferecer conhecimentos ecológicos únicos sobre a estabilidade da comunidade e sua resposta a perturbações que não se conseguem obter de outras maneiras. Informações combinadas a partir de análises temporais de múltiplas escalas podem melhorar a inferência das interações observadas nas comunidades.

Acredita-se que a abordagem mais indicada para se observar a dinâmica microbiana marinha é através de estudos de séries temporais oceanográficas que avaliam a composição da comunidade microbiana. Existem alguns estudos de longo prazo nos principais locais de séries temporais e

muitos estudos em média e pequena escalas, para os quais normalmente se mensuram em conjunto as características abióticas (ex. temperatura, salinidade e concentrações de nutrientes) e bióticas (ex. clorofila), que têm uma forte influência sobre a dinâmica microbiana.

Para exemplificar o uso de diferentes escalas em estudos para melhor compreensão da dinâmica temporal das comunidades microbianas, sabe-se que em microbiomas marinhos determinados por características sazonais, os intervalos de amostragem variam de semanas a meses normalmente. Diferentes frequências de amostragem podem ser usadas para quantificar propriedades diferentes e complementares de um sistema, e podem até modificar as associações inferidas a partir de dados obtidos por uma série temporal mais longa, como demonstrado por estudos sobre representantes de SAR11 (um clado da classe Alphaproteobacteria, o micro-organismo mais abundante dos oceanos) - que foram correlacionados com uma escala diária e não mensal.

Os mais conhecidos estudos temporais de longa escala que avaliam a composição da comunidade microbiana são: - em Bermuda (BATS - *The Bermuda Atlantic Time-series Study*) a norte do Mar de Sargasso, em águas superficiais e zonas eufóticas; - no Havaí (HOT - *The Hawaii Ocean Time-series*), no Giro do Pacífico Norte, cuja comunidade microbiana se mostra mais estratificada em função da temperatura e apresenta menos variação sazonal do que em BATS; - no Sul da Califórnia (SPOT - *The San Pedro Ocean Time-series*), no canal de San Pedro, cujas amostragens ao longo de uma década mostraram forte sazonalidade para amostras superficiais e a 890 m de profundidade; - no Canal Inglês Ocidental, em que a comunidade microbiana foi monitorada ao longo de seis anos, com grandes mudanças observadas interanualmente, e com maior diversidade no inverno; - no Mar Mediterrâneo Noroeste, onde se encontram dois observatórios microbianos, em que foram estudadas as comunidades bacterianas por seis anos, e as comunidades de arqueias, por quatro anos e meio, mostrando um padrão de variação sazonal. De uma maneira geral, os estudos de longa duração conduzidos para microbiota marinha revelaram, dentre outras coisas, forte dinâmica sazonal de membros individuais da comunidade.

Estudos que abordam outras escalas temporais (com variações mensais a sazonais, ou interanuais) não deixam de ser importantes e de mostrar a estabilidade e/ou alterações das comunidades microbianas marinhas. As forçantes que mais variam entre os anos incluem, por exemplo, o El Niño Oscilação Sul; a variabilidade climática ou de tempo interanual; a mudança climática (ex. aquecimento global antropogênico e acidificação dos oceanos); outras variações ambientais regionais antropogênicas (ex. hipoxia e anoxia causadas pela eutrofização); os efeitos cascata da cadeia alimentar devido a variações em organismos maiores. Vale ressaltar que as variações sazonais das comunidades microbianas são ainda mais evidentes em maiores latitudes.

Já a escala temporal diária a semanal é conveniente para observar a variação microbiana em resposta a alterações ambientais, como o tempo, os processos oceanográficos de mesoescala, as interações com organismos maiores (de protistas a peixes), os efeitos cascata da teia trófica, e as interações microbianas envolvendo vírus, bactérias, arqueias e protistas. Essa escala também é apropriada para o estudo da dinâmica associada com *blooms* fitoplanctônicos, que têm influência direta e indireta na composição de bactérias e arqueias.

Sabe-se que a amostragem contínua e a longo prazo é de grande dificuldade logística e financeira, ainda mais se considerando locais de difícil acesso e condições climáticas extremas, como é o caso da Antártica. Ao mesmo tempo, sabe-se também da necessidade da condução de estudos a longo prazo para distinguirmos melhor as variações naturais daquelas decorrentes das mudanças climáticas, especialmente em ambientes complexos e muito dinâmicos.

## 4. Perspectivas e desafios futuros

Os estudos de genômica e o avanço tecnológico da Oceanografia contemporânea representam um amadurecimento da Oceanografia Biológica descritiva. Faz-se necessário definir os grupos funcionais-chave através de suas assinaturas genômicas para comparação entre os ecossistemas marinhos (de genomas a biomas). Uma tendência para o futuro é a análise do metaboloma marinho, que incorpora o conhecimento do potencial metabólico de componentes individuais para diferentes espécies e comunidades.

A combinação de abordagens metodológicas distintas, incluindo a modelagem e experimentos de laboratório, observações e coletas de amostras no oceano, permitirá uma visão mais ampla que relacione observações descritivas e funcionais e melhore a capacidade preditiva da Oceanografia em um cenário de constantes mudanças. Também possibilitará esclarecer as propriedades em sistemas microbianos que determinam a transferência de energia e fluxo de matéria orgânica nos ecossistemas marinhos.

Precisamos desenvolver e explorar novas estratégias para completar as lacunas entre genômica microbiana, metagenômica, bioquímica, fisiologia, genética populacional, biogeoquímica, oceanografia e biologia ecossistêmica. A diversidade microbiana, seu potencial metabólico, a caracterização biogeoquímica e oceanográfica da área de estudo está interligada através de múltiplas escalas de espaço e tempo (Fig. 8). Portanto, colaborações internacionais e estudos multidisciplinares e de multi-escalas (de genomas a biomas, com abordagens espaciais e temporais) são essenciais para que esses objetivos e necessidades sejam alcançados.

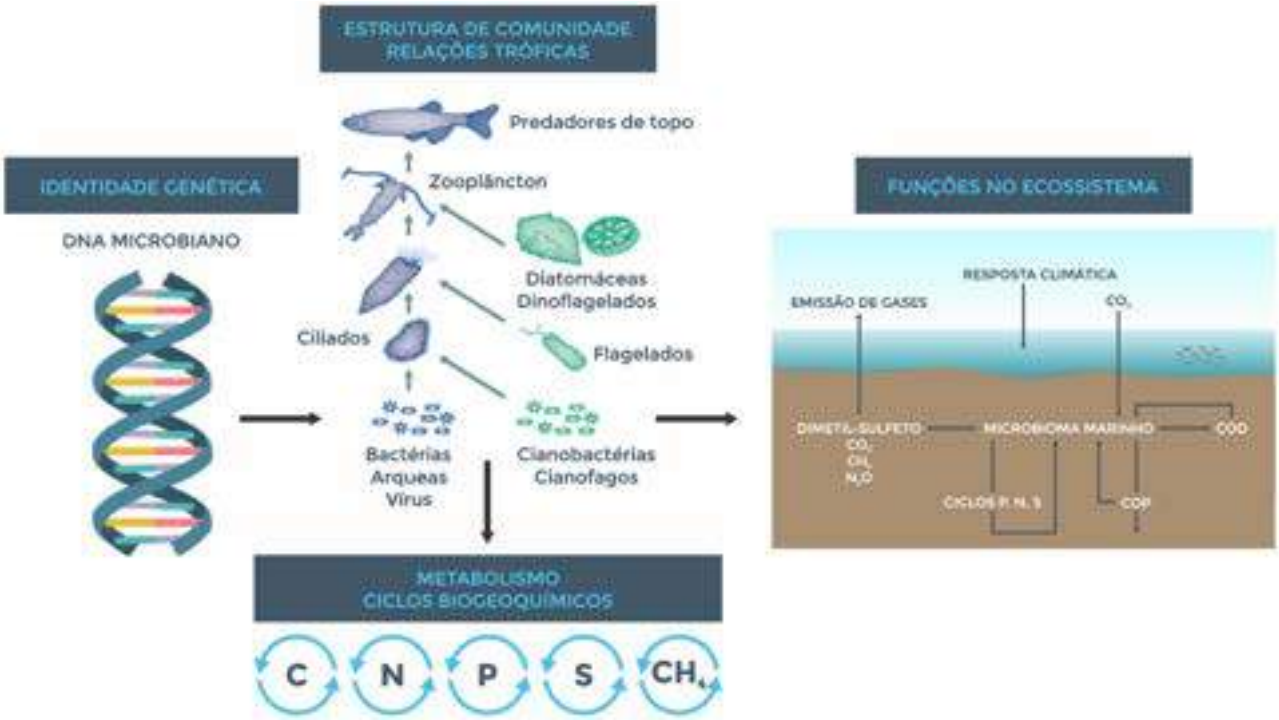



**FIGURA 8.** Ligações entre a informação genética (identidade) da comunidade microbiana, as interações ecológicas (relações tróficas) e o metabolismo da comunidade, que em parte regula e sustenta os processos biogeoquímicos e as funções ecossistêmicas. O DNA microbiano (à esquerda) representa a identidade genética de cada micro-organismo marinho. A coocorrência de micro-organismos que habitam o mesmo ambiente forma coletivamente um pool de genes amostrados nos estudos metagenômicos. C=carbono, N=nitrogênio, S=enxofre, P=fósforo, COD=carbono orgânico dissolvido, COP=carbono orgânico particulado, $CO_2$=gás carbônico, $CH_4$=metano, $N_2O$=óxido nitroso. *Adaptado de DeLong (2009). Arte: Camila Signori.*

Técnicas de sequenciamento de nova geração (NGS) podem ser aprimoradas e se tornarem ainda menos caras e mais acessíveis, favorecendo o avanço das análises da estrutura da comunidade microbiana marinha, especialmente considerando sua biogeografia. A contribuição da biosfera rara (presença e papel de micro-organismos raros) deve ser considerada, assim como estudos envolvendo modelagem e previsões sobre a biogeografia microbiana e as atividades dos micro-organismos, em resposta às mudanças climáticas globais.

Ainda é necessário melhorar nossa compreensão dos fatores que determinam a biogeografia microbiana marinha, tanto através dos mecanismos de dispersão (ex. correntes, vento, transporte antropogênico) como de sua adaptação às condições ambientais (ex. nutrientes, temperatura, luz, matéria orgânica). Dada a importância dos micro-organismos marinhos para os ciclos biogeoquímicos globais e cadeias alimentares, é de extrema importância a compreensão dos mecanismos de adaptação, dispersão e os padrões biogeográficos resultantes, a fim de sermos capazes de prever e talvez até atenuar os efeitos negativos das mudanças climáticas e outras influências antropogênicas sobre as comunidades microbianas marinhas.

Hoje reconhecemos que as mudanças climáticas globais, incluindo, mas não se limitando ao aquecimento superficial e à acidificação dos oceanos, afetam a estrutura e a dinâmica das comunidades microbianas. No entanto, ao menos que saibamos a biodiversidade microbiana atual, incluindo os inúmeros simbiontes da macrofauna, nunca seremos capazes de reconhecer quais e quando as mudanças ocorreram e ocorrem. Extinções microbianas já devem estar acontecendo em ritmo alarmante.

Resumidamente, os desafios selecionados para as pesquisas futuras em Oceanografia Microbiana incluem: compreender como a informação codificada em genomas microbianos marinhos manifesta-se em nível do ecossistema; entender as funções interligadas de micro-organismos na incorporação e dissipação/transferência de energia (ex. carbono, macro e micro nutrientes); determinar a diversidade e atividade viral, considerada uma das últimas fronteiras do conhecimento a serem superadas nessa área; desenvolver novas teorias ecológicas para lidar com as características únicas de micro-organismos, incluindo, o conceito de espécie e transferência lateral de genes; utilizar modelos ecológicos abrangentes que são baseados em e comparados com as observações multidisciplinares do oceano em uma ampla gama de escalas para compreender e prever mudanças na estrutura e funcionalidade da comunidade microbiana marinha (ex. influências antropogênicas); estudar novos compostos bioativos para aplicação biotecnológica através de incentivos públicos e privados, aliados à pesquisa básica e aplicada; estabelecer colaborações entre cientistas de várias disciplinas que não se comunicam rotineiramente para conceber soluções criativas para problemas de escala ecossistêmica a longo prazo; finalmente, preparar e educar a próxima geração de cientistas para enfrentar os futuros desafios da ciência e sociedade, incluindo a política ambiental, responsabilidade social e educação pública em todos os níveis.

Foto: Leandro Coelho

## Referências Bibliográficas

AZAM, F., MALFATTI, F. 2007. Microbial structuring of marine ecosystems. Nature Reviews Microbiology 5, 782–791. doi: 10.1038/nrmicro1747.

BREITBART, M. 2012. Marine viruses: truth or dare. Annual Review of Marine Science 4:425–448. doi:10.1146/annurev-marine-120709-142805.

BROWN, M. V., OSTROWSKI, M., GRZYMSKI, J. J., LAURO, F. M. 2014. A trait based perspective on the biogeography of common and abundant marine bacterioplankton clades. Marine Genomics 15:17– 28. doi:10.1016/j.margen.2014.03.002.

CAVICCHIOLI, R. 2015. Microbial ecology of Antarctic aquatic ecosystems. Nature Reviews Microbiology 13: 691-703. doi:10.1038/nrmicro3549.

DA SILVA, M. A. C. 2014. Microbiologia Marinha. Univali Editora. 286 p.

DEBNATH, M., PAUL, A. K., BISEN, P. S. 2007. Natural bioactive compounds and biotechnological potential of marine bacteria. Current Pharmaceutical Biotechnology 8:253–260.

DeLONG, E. F., PRESTON, C. M., MINCER, T., RICH, V., HALLAM, S. J., FRIGAARD, N. U., MARTINEZ, A., SULLIVAN, M. B., EDWARDS, R., BRITO, B. R., CHISHOLM, S. W., KARL, D. M. 2006. Community genomics among stratified microbial assemblages in the ocean's interior. Science 311 (5760) :496–503. doi:10.1126/ science.1120250.

DeLONG, E. F. 2009. The microbial ocean from genomes to biomes. Nature 459: 200–206.

ENRICH-PRAST, A., BASTVIKEN, D., CRILL, P., SANTORO, A. L., SIGNORI, C. N., SANSEVERINO, A. M. 2014. Chemosynthesis. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-409548-9.09054-0.

FAUST, K., LAHTI, L., GONZE, D., de VOS, W. M., RAES, J. 2015. Metagenomics meets time series analysis: unraveling microbial community dynamics. Current opinion in Microbiology 25:56-66.

FLEMMING, H.-C., WUERTZ, S. 2019. Bacteria and archaea on Earth and their abundance in biofilms. Nature Reviews Microbiology 17:247-260. doi:10.1038/s41579-019-0158-9.

FOISSNER, W. 2006. Biogeography and dispersal of micro-organisms: a review emphasizing protists. Acta Protozoologica 45(2):111–136.

FUHRMAN, J., CRAM, J. A., NEEDHAM, D. M. 2015. Marine microbial community dynamics and their ecological interpretation. Nature Reviews Microbiology 13: 133-146.

GILBERT, J. A., STEELE, J. A., CAPORASO, J. G., STEINBRÜCK, L., REEDER, J., TEMPERTON, B., HUSE, S., MCHARDY, A. C., KNIGHT, R., JOINT, I., SOMMERFIELD, P., FUHRMAN, J. A., FIELD, D. 2012. Defining seasonal marine microbial community dynamics. The ISME Journal 6, 298–308. doi: 10.1038/ismej.2011.107.

GIOVANNONI, S. J., VERGIN, K. L. 2012. Seasonality in ocean microbial communities. Science 335, 671–676. doi: 10.1126/science.1198078.

HOSHINO, T., DOI, H., URAMOTO, G.-I., WÖRMER, L., ADHIKARI, R. R., XIAO, N., MORONO, Y., D'HONDT, S., HINRICHS, K.-U., INAGAKI, F. 2020. Global diversity of

microbial communities in marine sediments. Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America 3, 27587–27597. doi:10.1073/pnas.1919139117.

HUBER, J. A., WELCH, D. B. M., MORRISON, H. G., HUSE, S. M., NEAL, P. R., BUTTERFIELD, D. A., SOGIN, M. L. 2007 Microbial population structures in the deep marine biosphere. Science 318(5847):97–100.

JONES, S. E., CADKIN, T. A., NEWTON, R. J., MCMAHON, K. D. 2012. Spatial and temporal scales of aquatic bacterial beta diversity. Frontiers in Microbiology 3:318. doi: 10.3389/fmicb.2012.00318.

KARL, D. M. 2007. Microbial oceanography: paradigms, processes and promise. Nature Reviews Microbiology 5: 759-769.

KIRCHMAN, D. L. 2008. Microbial Ecology of the Oceans. 2nd. edition. John Wiley & Sons, Inc., 593 p.

KIRCHMAN, D. L. 2012. Processes in Microbial Ecology. Oxford University Press, 312 p.

MADIGAN, M. T., MARTINKO, J. M., DUNLAP, P. V., CLARK, D.P. 2010. Microbiologia de Brock. 12aEd. Artmed, 1128 p.

MARTINY, J. B. H., BOHANNAN, B. J. M., BROWN, J. H., COLWELL, R. K., FUHRMAN, J. A., GREEN, J. L., HORNER-DEVINE, M. C., KANE, M., KRUMINS, J. A., KUSKE, C. R., MORIN, P. J., NAEEM, S., OVREAS, L., REYSENBACH, A. L., SMITH, V. H., STALEY, J. T. 2006. Microbial biogeography: putting microorganisms on the map. Nature Reviews Microbiology 4(2):102–112. doi:10.1038/nrmicro1341.

NEEDHAM, D. M., CHOW C.-E. T., CRAM, J. A., SACHDEVA, R., PARADA, A., FUHRMAN, J. A. 2013. Short-term observations of marine bacterial and viral communities: patterns, connections and resilience. The ISME Journal 7(7):1274–1285. doi:10.1038/ismej.2013.19.

ORCUTT, B. N., SYLVAN, J. B., KNAB, N. J., EDWARDS, K. J. 2011. Microbial ecology of the dark ocean above, at, and below the seafloor. Microbiology and Molecular Biology Reviews 75:361-422.

RICHARDS T. A., JONES, M. D. M., LEONARD G., BASS, D. 2012. Marine fungi: their ecology and molecular diversity. Annual Review of Marine Science 4(1):495–522. doi:10.1146/annurev-marine-120710-100802 .

SIEVERT, S. M., VETRIANI, C. 2012. Chemoautotrophy at deep-sea vents: Past, present, and future. Oceanography 25(1):218–233. doi: 10.5670/oceanog.2012.21.

SIGNORI, C. N., LIMA, A. O. S., NAKAYAMA, C. R., PELLIZARI, V. H. 2020. Deep-sea microbes in the Southwestern Atlantic. In: SUMIDA, P. Y. G., BERNARDINO, A., De LÉO, F.C (ed.). Brazilian Deep-Sea Biodiversity. Brazilian Marine Biodiversity. Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-030-53222-2_6.

STAL, L. J., CRETOIU, M. S. 2016. The marine microbiome. Springer. 498 p.

STOCKER, R. 2012. Marine microbes see a sea of gradients. Science 338:628–633.

SUNAGAWA, S., COELHO, L. P., CHAFFRON, S., KULTIMA, J. R., LABADIE, K., SALAZAR, G., DJAHANSCHIRI, B., ZELLER, G., MENDE, D. R., ALBERTI, A.,

CORNEJO-CASTILLO, F. M., COSTEA, P. I., CRUAUD, C., D'OVIDIO, F., ENGELEN, S., FERRERA, I., GASOL, J. M., GUIDI, L., HILDEBRAND, F., KOKOSZKA, F., LEPOIVRE, C., LIMA-MENDEZ, G., POULAIN, J., POULOS, B. T., ROYO-LLONCH, M., SARMENTO, H., VIEIRA-SILVA, S., DIMIER, C., PICHERAL, M., SEARSON, S., KANDELS-LEWIS, S. TARA OCEANS COORDINATORS, BOWLER, C., DE VARGAS, C., GORSKY, G., GRIMSLEY, N., HINGAMP, P., IUDICONE, D., JAILLON, O., NOT, F., OGATA, H., PESANT, S., SPEICH, S., STEMMANN, L., SULLIVAN, M. B., WEISSENBACH, J., WINCKER, P., KARSENTI, E., RAES, J., ACINAS, S. G., BORK, P. 2015. Ocean plankton. Structure and function of the global ocean microbiome. Science 348(6237):1261359. doi: 10.1126/science.1261359.

WHITMAN, W. B., COLEMAN, D. C., WIEBE, W. J. 1998. Prokaryotes: the unseen majority. Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America 95:6578–6583.

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 23*

# BIOLOGIA E ECOLOGIA DO ICTIOPLÂNCTON MARINHO

*Mario Katsuragawa, Cláudia Namiki,*
*Maria de Lourdes Zani-Teixeira & Tulia Martinez*

REVISÃO: FLÁVIA SALDANHA-CORRÊA

CITAÇÃO SUGERIDA: KATSURAGAWA, Mário et al. Biologia e ecologia do ictioplâncton marinho. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 23: p. 491-518.

# Biologia e Ecologia do Ictioplâncton Marinho

*Mario Katsuragawa, Cláudia Namiki, Maria de Lourdes Zani-Teixeira & Tulia Martinez*

## 1. Introdução e histórico

A maioria dos peixes actinopterígeos marinhos possui ovos e/ou larvas planctônicas, independentemente da afinidade sistemática, hábito pelágico ou demersal, distribuição costeira ou oceânica, tropical ou temperada. Assim como os demais organismos do plâncton, os ovos e as larvas de peixes ficam à deriva na coluna d'água, pois a pequena capacidade natatória das larvas não é suficiente para que elas consigam vencer as correntes e as marés. Os ovos e as larvas de peixes (Fig. 1) são coletivamente chamados de **ictioplâncton** (*ictio* = peixes) e são classificados como meroplâncton (*mero*= parte), já que passam apenas uma parte do seu ciclo de vida no plâncton.

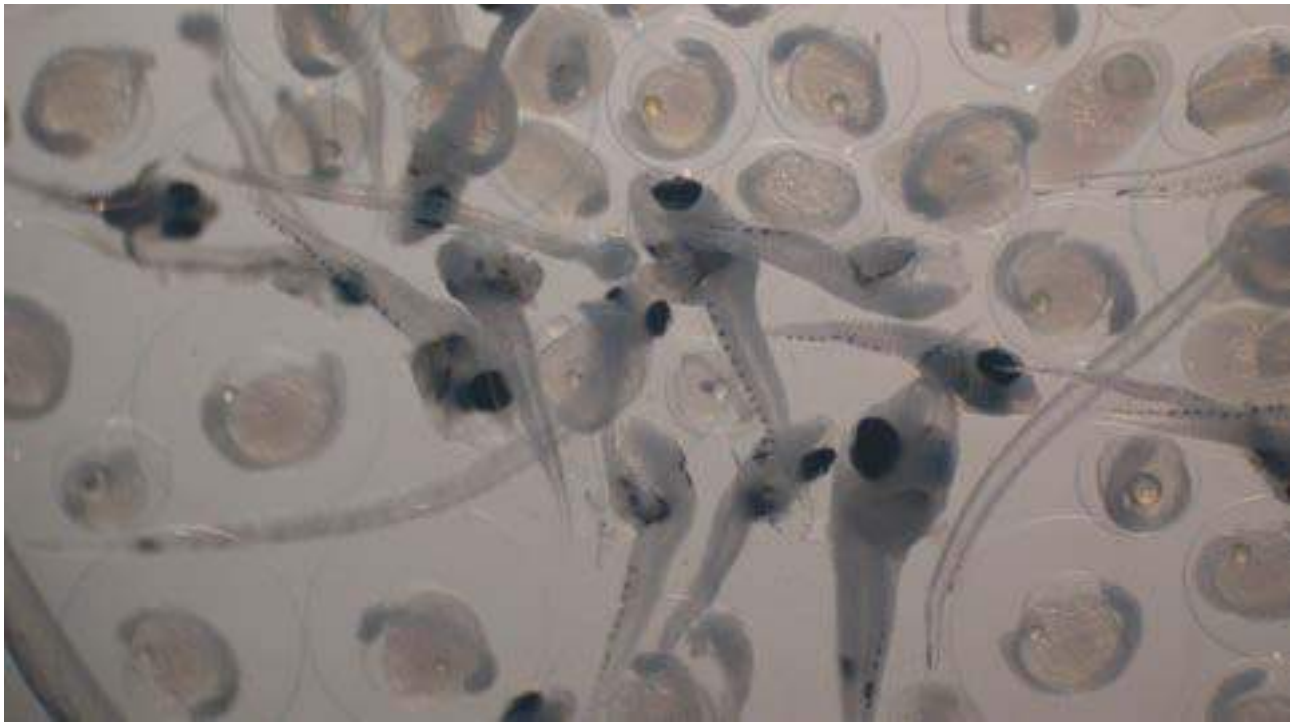


**FIGURA 1.** Ovos e larvas de peixes marinhos vistos sob o microscópio estereoscópio.

O estudo do ictioplâncton envolve diversas áreas, tanto das ciências básicas, como sistemática, taxonomia, fisiologia, relações tróficas etc., quanto das ciências aplicadas, como biologia pesqueira e aquicultura. Na realidade, todas essas áreas se misturam, pois as informações dos estudos básicos sobre alimentação e crescimento das larvas, por exemplo, podem ser utilizados para o desenvolvimento da aquicultura e também na previsão da duração dos estágios larvais e taxas de mortalidade, muito importantes para as estimativas de recrutamento de espécies de peixes pescadas comercialmente (Ciechomski, 1981). O recrutamento se refere ao número de indivíduos de uma espécie que a cada

ano entra pela primeira vez na área de pesca (Cadima, 2000), passando a fazer parte da população disponível à pesca. Os estudos de distribuição, que identificam a presença e a abundância de ovos e larvas de uma espécie de peixe numa determinada área, são utilizados para indicar a presença e estimar a abundância de cardumes de adultos, fornecendo estimativas independentes da pesca sobre a flutuação do estoque adulto e indicando mudanças na área e época de desova, causadas por variações nas condições ambientais.

As primeiras pesquisas com o ictioplâncton foram realizadas a partir da segunda metade do século XIX, quando o pesquisador norueguês George Ossian Sars foi designado para estudar a biologia do bacalhau, com o objetivo de entender as flutuações na pesca desse peixe. Em 1865, ele descobriu ovos de bacalhau flutuando próximo à superfície e descreveu a fase de ovo como sendo uma das etapas mais importantes do ciclo de vida dos peixes marinhos. Nesta mesma época emergia lentamente o conceito de Oceanografia como ciência multidisciplinar.

Entre 1880 e 1900 foram realizados vários estudos pioneiros por investigadores ingleses (J.T. Cunningham, W.C. M'Intosh & A.T. Masterman, W.C. M'Intosh & E.E. Price, E.W.L. Holt), alemães (E. Ehrenbaum) e italianos (F. Raffaele). Através de fecundações artificiais, eles descreveram os ovos e estágios larvais iniciais de cerca de 80% dos teleósteos de interesse econômico da Europa na época. Em 1895, o alemão Victor Hensen começou a desenvolver um sistema de amostragem do plâncton com redes especialmente desenvolvidas para sua coleta e equipamentos para medir a eficiência de filtração das mesmas (Wiebe & Benfield, 2003). Isso propiciou o início dos estudos quantitativos do plâncton e permitiu determinar a época e a extensão da desova, assim como estimar a biomassa dos estoques de peixes através da abundância do ictioplâncton.

No Brasil, até aproximadamente fins da década de 1960, estudos sobre o ictioplâncton marinho eram raros. Os primeiros registros foram um relatório sobre ocorrência de ovos e larvas em amostras de zooplâncton na região entre as ilhas Vitória e Trindade (Vannucci & Almeida Prado, 1959) e a descrição de uma pequena coleção de larvas obtidas durante o cruzeiro do R/V "Calypso" entre janeiro e fevereiro de 1962 (Aboussouan, 1969).

Somente em 1967 o ictioplâncton marinho começou a ser estudado sistematicamente em águas brasileiras, com amostragens contínuas a bordo do Navio Oceanográfico Prof. W. Besnard realizadas pelo pesquisador Yasunobu Matsuura que se dedicou intensamente às pesquisas relacionadas ao ictioplâncton e à biologia pesqueira.

Foto: Leandro Coelho

## YASUNOBU MATSUURA (1942-2003)

*In memoriam*

Nasceu em Yokohama, Japão, em 20 de fevereiro de 1942. Graduou-se como Bacharel em Biologia Pesqueira pela "*Tokyo University of Fisheries*", em 1964.

No início de sua carreira profissional, ingressou na Estação Experimental de Pesca da Província de Gunma, no Japão, onde se concentrou em estudos de fecundidade artificial de peixes de água doce e doenças de peixes.

Após três anos, foi convidado para trabalhar no IOUSP e admitido como funcionário em 1967. Iniciou assim uma carreira acadêmica de sucesso, que incluiu o Doutorado em 1976. Professor Associado em 1986 e Professor Titular em 1988.

Sua tese de Ph.D. (baseada em análises de ovos e larvas de sardinha-verdadeira) foi elaborada sob orientação do Dr. Shoichi Tanaka, do "*Ocean Research Institute*" da Universidade de Tóquio.

Desde o início da sua atuação até o seu falecimento dedicou-se intensamente às pesquisas relacionadas ao ictioplâncton e à biologia pesqueira. A sua atuação foi decisiva para a consolidação e expansão do estudo do ictioplâncton no Brasil, contribuindo especialmente em: estudos biológicos de ovos e larvas; estudo do ictioplâncton como elemento da cadeia trófica na comunidade planctônica; estudos de dinâmica populacional de peixes marinhos, variação de recrutamento, idade, crescimento e mortalidade em larvas de peixes; distribuição e abundância em relação aos processos oceânicos; e estimativa do tamanho da população através do método do ictioplâncton. Os resultados obtidos por Matsuura fornecem a base para uma administração do estoque pesqueiro da sardinha.

Além da pesquisa, Matsuura também contribuiu substancialmente em atividades de Ensino, Extensão e Gestão. A sua atuação como presidente da comissão encarregada do planejamento e instalação do curso de bacharelado em Oceanografia no IOUSP foi fundamental para que esse curso se tornasse uma realidade a partir de 2002. Exerceu atividades como especialista consultor ou como membro de comitês e comissões nacionais e internacionais, destacando-se que nos últimos anos da sua vida ele participava ativamente do GLOBEC ("*Global Ecosystem Dynamic Project*") do "*International Geosphere-Biosphere Program*". Foi Chefe do Departamento de Oceanografia Biológica e vice-diretor do IOUSP, e desempenhou importantes papéis em colegiados e comissões da instituição, dentre os quais como Editor-Chefe do "*Brazilian Journal of Oceanography*".

## 2. Métodos de coleta

Os estudos do ictioplâncton, especialmente na região oceânica, geralmente utilizam embarcações oceanográficas de grande porte para a coleta das amostras. Assim, é necessário um planejamento prévio rigoroso para minimizar os erros de amostragem, otimizar o tempo de coleta e diminuir os custos da expedição. Normalmente se consideram as seguintes etapas em um planejamento: A) estabelecimento dos objetivos da viagem, relacionados ao projeto em desenvolvimento; B) elaboração do plano de cruzeiro que inclui a definição da área geográfica a ser coberta, a plotagem em um mapa das posições das estações oceanográficas ou locais dos arrastos a serem realizados, decisão sobre a estratégia de amostragem, que inclui o rumo da

navegação, o cálculo do tempo de cruzeiro, levando em consideração todas as atividades planejadas, uma estimativa dos recursos necessários e o custo da expedição; C) listagem dos equipamentos e materiais em geral para uso durante a expedição; e D) escolha da equipe que executará os trabalhos. A amostragem do tipo sistemática ou em grade é a forma mais adequada para um plano de cruzeiro visando estimar a abundância de ovos e larvas de peixes sobre uma área extensa, como por exemplo a Plataforma Continental Sudeste, localizada na Bacia de Santos (Fig. 2).

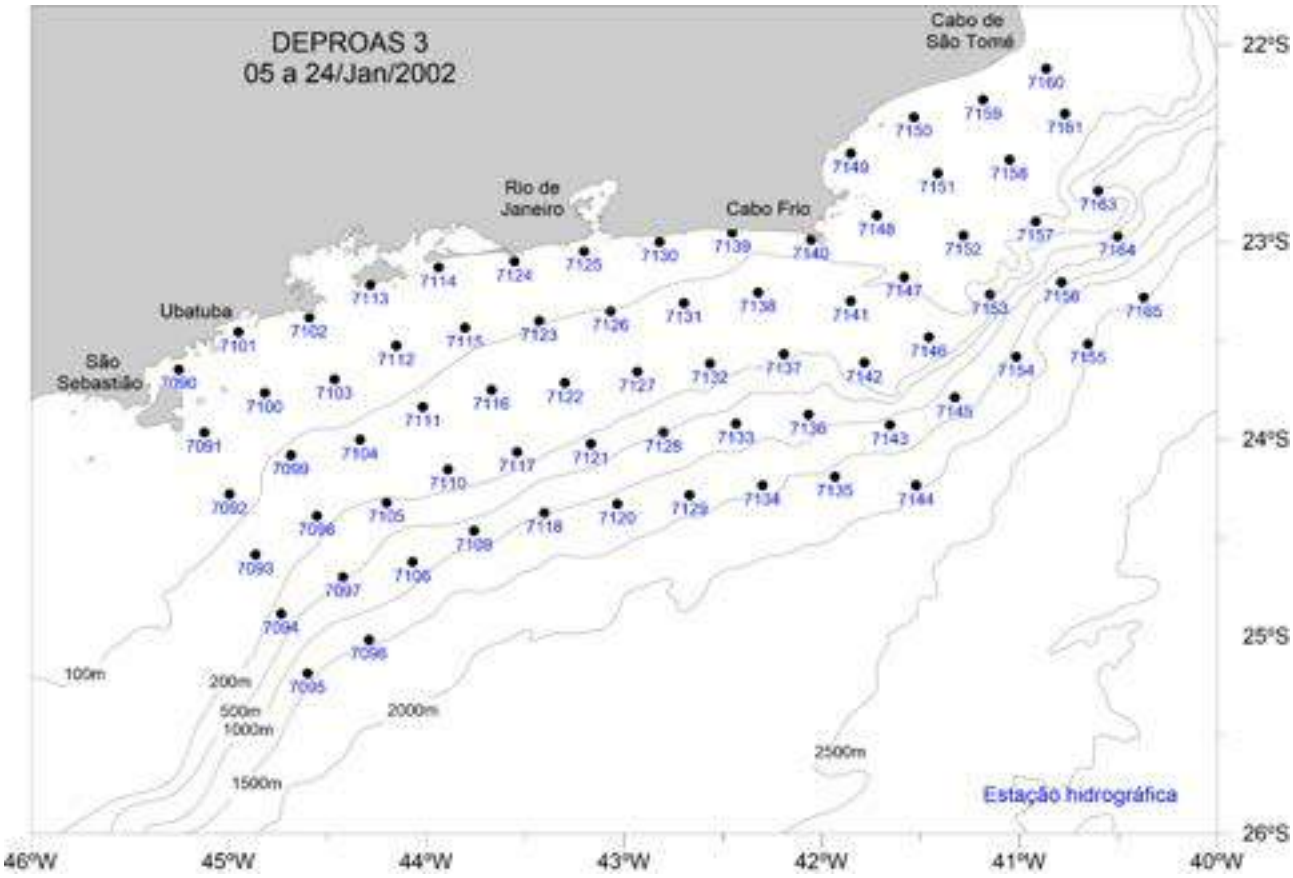



**FIGURA 2.** Plano de estações do cruzeiro oceanográfico realizado na Plataforma Continental Sudeste, entre Cabo de São Tomé e São Sebastião, no projeto Dinâmica do Ecossistema de Plataforma da Região Oeste do Atlântico Sul (DEPROAS), para amostragem do tipo sistemática.

Raramente se realiza um cruzeiro oceanográfico somente para a coleta de ictioplâncton. Devido principalmente ao alto custo de uma campanha, procura-se organizar o cruzeiro no sentido de atender a diferentes áreas da oceanografia (física, química, geológica e biológica), procedendo-se os trabalhos de bordo para as coletas de dados e amostras de forma integrada. Dessa forma é assegurada também a possibilidade de se conseguir quase que simultaneamente dados ambientais e biológicos do mesmo local, os quais são imprescindíveis para análises ecológicas.

Caso a área de estudo esteja localizada em um local mais próximo à costa, como os estuários e regiões próximas a recifes por exemplo, o porte da embarcação pode ser menor, como uma traineira ou uma lancha, mas os cuidados com os planos de amostragem e preparação do material de coleta devem ser os mesmos.

Embora na literatura se encontrem descrições de vários equipamentos para a coleta de ictioplâncton, tais como bombas de sucção, garrafas e armadilhas, são as redes de plâncton, em diversos formatos e dimensões, os equipamentos mais conhecidos e difundidos em todo o mundo. A abertura da malha de redes de plâncton varia entre 20 μm e 500 μm, mas para o ictioplâncton as aberturas entre 300 μm e 500 μm são as mais utilizadas.

Os arrastos com redes de plâncton podem ser basicamente de três tipos: vertical – com um arrasto de baixo para cima na coluna de água; horizontal - junto à superfície ou em outras profundidades determinadas da coluna de água de forma a obter amostras estratificadas; ou oblíquo – arrasto que integra a coluna de água a partir da superfície até uma profundidade desejada. Os arrastos horizontal e oblíquo são realizados com a embarcação em movimento, enquanto no arrasto vertical a embarcação se mantém parada no ponto de amostragem.

A rede do tipo cônica ou cilíndrico-cônica (Fig. 3A) é a mais simples, sendo constituída por uma boca geralmente circular, feita de metal ou outro material rígido, um corpo de forma cônica ou cilíndrico-cônica, confeccionado com panagem de rede feita de material resistente, principalmente nylon, e um copo coletor de plástico ou metal, rosqueado no final da rede. O conjunto recebe um reforço externo por um sistema de amarração com cabos de nylon desde o final da rede até a boca e finalizados em forma de tirantes, para permitir o seu arrasto. Dependendo da sua dimensão, pode ser lançada a partir de qualquer tamanho de embarcação, em arrastos horizontais ou verticais.

Para fazer arrastos verticais é necessário o uso de um lastro abaixo da rede. Instalando-se um sistema com um laço no corpo da rede e um gatilho na junção dos tirantes com o cabo que arrasta a rede, que possibilitam o fechamento da rede antes de sua chegada à superfície, é possível efetuar amostragens estratificadas.

Ao longo do tempo houve um aprimoramento das redes de plâncton, com o objetivo de se encontrar a melhor hidrodinâmica e minimizar os principais erros de amostragem inerentes a esses amostradores (fuga da rede, extrusão e colmatação). Acompanhando a evolução dos equipamentos oceanográficos e eletrônicos em geral, foram desenvolvidos sistemas de redes de plâncton mais sofisticados (Omori & Ikeda, 1984; Wiebe & Benfield, 2003).

A rede Bongô (Fig. 3B) consiste em duas redes cilíndrico-cônicas instaladas de forma paralela numa armação dupla de metal ou outro material rígido. Possui alto coeficiente de filtração e possibilita o uso de redes com diferentes aberturas de malha num mesmo lance. Por não possuir tirantes na boca da rede, minimiza-se o problema de fuga de organismos. Essa rede foi desenvolvida por McGowan & Brown (1966) e apresentada como equipamento padrão para amostragem quantitativa de ovos e larvas de peixes pela FAO - *Food and Agriculture Organization of the United Nation* (Smith & Richardson, 1977) e desde então tem sido o amostrador mais utilizado para a coleta de ictioplâncton em todo o mundo. As dimensões padrão da rede Bongô são: boca de 60 cm de diâmetro, redes de 300 cm de comprimento (150 cm na parte cilíndrica e 150 cm na parte cônica) e malhas de 333 μm e 505 μm. Mais detalhes sobre os procedimentos para amostragem quantitativa com essa rede estão descritos no trabalho de Smith & Richardson (1977).

Para a coleta de ovos de pequenos peixes pelágicos na camada epipelágica foi desenvolvida a rede CalVET (CalCOFI-*Vertical Egg Towl*) (Fig. 3C) que possui o mesmo formato da rede Bongô, porém com menor dimensão. Essa rede foi desenvolvida para a aplicação de um método conhecido por EPM (*Egg Production Method*) para a avaliação de estoque de anchovetas e sardinhas.

A rede de nêuston (Fig. 3D) foi desenvolvida para ser arrastada junto à superfície da água, até cerca de 5,0 cm de profundidade. Esta camada é habitada por diversos grupos de organismos, incluindo ovos e larvas de peixes, que podem ocorrer ocasionalmente ou habitar exclusivamente essa região. Além de ser uma ótima complementação na amostragem do ictioplâncton, a rede de nêuston tem se tornado importante também para a coleta de microplásticos que se encontram espalhados sobre a superfície do mar (Day *et al.*, 1990).

**FIGURA 3.** **Tipos de rede utilizadas para a coleta do ictioplâncton. A) Rede cônica; B) rede Bongô; C) rede CalVET; D) rede de nêuston; E) rede Motoda (MTD); F)** *Multi Plankton Sampler* **(MPS); G)** *Multiple Opening Closing Net Environmental Sensing System* **(MOCNESS); e H) picaré para coleta de larvas em estuários.**

Para coletas estratificadas foram desenvolvidos os amostradores MTD (rede Motoda) (Fig. 3E), MPS (*Multi Plankton Sampler*) (Fig. 3F) e MOCNESS (*Multiple Opening Closing Net Environmental Sensing System*) (Fig. 3G) que possuem sistemas compostos por um conjunto de redes que podem ser operadas para amostrar diferentes camadas de profundidade numa mesma estação oceanográfica.

A rede MTD é a mais simples, sendo cada unidade constituída por uma rede simples acoplada a uma armação triangular que permite o arrasto horizontal na coluna de água com a embarcação em movimento. Várias redes podem ser instaladas num mesmo cabo e, após o arrasto, é realizado seu fechamento sequencial por um sistema de mensageiros de metal que escorregam pelo cabo de aço.

As redes MPS e MOCNESS são aparelhos sofisticados, compostos por um conjunto de redes e controles eletrônicos de bordo para abertura e fechamento das redes. Para o lançamento destes equipamentos é necessário um cabo eletromecânico. O sistema comporta também outros equipamentos, como um CTD (*Conductivity*, *Temperature and Depth*) ou um profundímetro, que permitem a obtenção de dados ambientais simultaneamente às coletas biológicas.

Em estuários, a rede do tipo picaré (Fig. 3H) é bastante utilizada para coleta das larvas de peixes que habitam as margens.

As estimativas de abundância ou biomassa do ictioplâncton são obtidas através do cálculo do volume de água filtrado pela rede em cada amostragem. Para obter essa informação, um fluxômetro é instalado na boca da rede.

O fluxômetro é um aparelho de formato hidrodinâmico que possui uma hélice na sua parte traseira que é acoplada diretamente a um contador digital que regista o número de rotações durante o arrasto (Fig. 4). O volume de água filtrado é calculado através da fórmula:

$$V = a \cdot n \cdot c$$

Onde:

***V*:** volume de água filtrada pela rede ($m^3$);

***a*:** área da boca da rede ($m^2$);

***n*:** número de rotações do fluxômetro; e

***c*:** taxa de calibração do fluxômetro ($m \cdot rot^{-1}$).

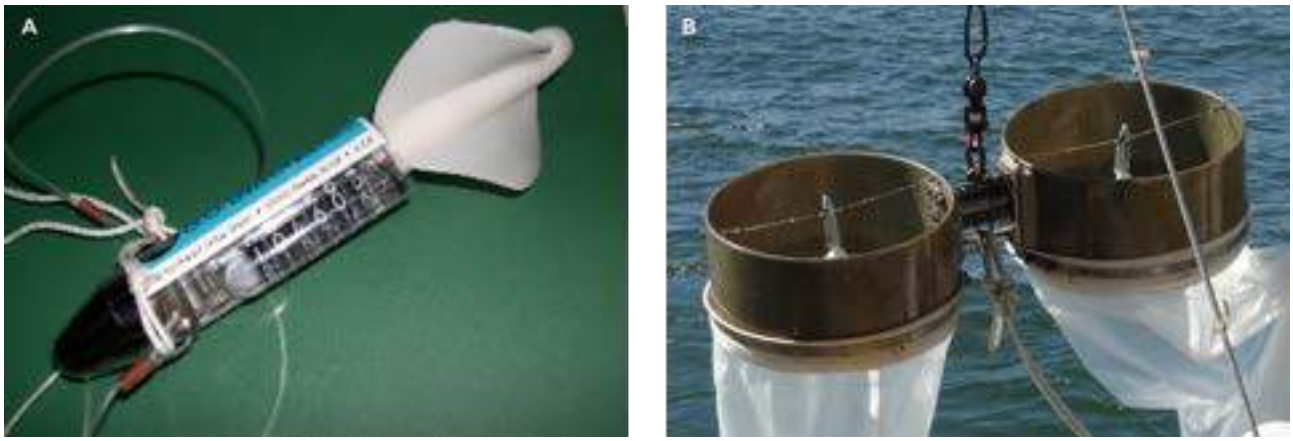



**FIGURA 4.** A) Fluxômetro mecânico digital; e B) Fluxômetros instalados (rede Bongô) para o cálculo do volume de água filtrado.

As larvas de peixes também podem ser coletadas através de armadilhas luminosas, que podem ser feitas de diversos materiais, baseando-se no princípio de que as larvas de peixes serão atraídas pela luz. Este é um equipamento bastante seletivo, pois nem todas as espécies são atraídas pela luz, isto é, possuem fototaxia positiva, e normalmente as larvas já estão em estágios avançados, com o sistema visual bastante desenvolvido.

Outros métodos permitem a observação *in situ*, e consistem em filmar e fotografar os organismos através de equipamentos com sistemas de câmeras e sensores, como o *In situ Ichthyoplankton Imaging Ssystem* (ISIIS) (Cowen & Guigand, 2008), ou até mesmo por observação direta de mergulhadores (Leis & Carson-Ewart, 2003).

Seja qual for o objetivo do estudo ou tipo de coleta, é fundamental registrar o máximo de informações possíveis sobre as atividades realizadas. Neste caso é aconselhável elaborar documentos chamados de "fichas de coleta" ou "fichas de bordo".

As informações mais importantes que devem constar nessas fichas são: nome do projeto, nome do responsável pela coleta; número da estação, número da amostra, geoposicionamento da estação oceanográfica, data e horário, profundidade local, profundidade de coleta, dados do fluxômetro e numeração dos frascos de armazenamento das amostras (Fig. 5).

**INSTITUTO OCEANOGRÁFICO DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**
**Ficha de Bordo – Laboratório de Ictioplâncton**

**Responsável pela coleta:**_____

| | | |
|---|---|---|
| Nº da Estação: | Est. Hidrográfica: | Nº da Amostra: |
| Lat.: | Long.: | Prof. local (m): |
| Data: / / | Hora (início st.): | Hora (término st.): |
| Cond. meteorológicas: | Nuvens: | Estado do mar: |

**Bongô – 1º lance**

| *Comp. do cabo (m)* | *Ângulo* | *Tempo total de reboque* | *Prof. coleta* | *Hora (início)* | *Hora (término)* |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |

| *Redes* | *FLUXÔMETRO* | | | *Nº dos frascos* |
|---|---|---|---|---|
| | *Leitura final* | *Leitura inicial* | *Nº de rotações* | |
| *Regular* | | | | |
| *Fina* | | | | |

**Bongô – 2º lance**

| *Comp. do cabo (m)* | *Ângulo* | *Tempo total de reboque* | *Prof. coleta* | *Hora (início)* | *Hora (término)* |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |

| *Redes* | *FLUXÔMETRO* | | | *Nº dos frascos* |
|---|---|---|---|---|
| | *Leitura final* | *Leitura inicial* | *Nº de rotações* | |
| *505 µm* | | | | |
| *333 µm* | | | | |

**Rede de Nêuston**

| *Rede* | *Nº do frasco* | *Hora (início)* | *Hora (término)* |
|---|---|---|---|
| *Superior* | | | |
| *Inferior* | | | |

**Rede Mult-Plankton Sampler (MPS)**

| *Comp. do cabo (m)* | *Ângulo* | *Tempo total de reboque* | *Hora (início)* | *Hora(término)* |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |

| *Redes* | *FLUXÔMETRO* | | | *Nº dos frascos* | *Range de profundidade* | *Tempo* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *Leitura final* | *Leitura inicial* | *Nº de rotações* | | | |
| *Rede 1* | | | | | | |
| *Rede 2* | | | | | | |
| *Rede 3* | | | | | | |
| *Rede 4* | | | | | | |
| *Rede 5* | | | | | | |

OBSERVAÇÕES:

**FIGURA 5.** Ficha de campo utilizada para anotar todas as informações referentes à coleta de amostras de ictioplâncton. *Laboratório de Ictioplâncton (IOUSP).*

## 2.1 Fixação das amostras

Os organismos planctônicos são, em geral, muito frágeis e tendem a se deteriorar rapidamente, assim as amostras devem ser fixadas imediatamente após a coleta. Existem várias substâncias que podem ser utilizadas na fixação, como formol, solução de Bouin, álcool etílico etc. A escolha da substância utilizada vai depender do objetivo de cada estudo, já que suas propriedades variam. O fixador mais amplamente utilizado é o formol em uma solução 4% (uma parte de formaldeído tamponado com tetraborato de sódio e nove partes de água do local de coleta).

Quando o estudo requer análises moleculares, como nos estudos da identificação através do código genético ou da análise de condição larval pelo método da proporção RNA/DNA (Dias *et al.*, 2004), as amostras devem ser fixadas em álcool etílico ou congeladas em nitrogênio líquido.

### VOCÊ SABIA?

**Para estudos de crescimento larval através da análise de otólitos (estruturas compostas de carbonato de cálcio presentes na cápsula auditiva dos peixes ósseos relacionadas ao seu equilíbrio e audição) é recomendável fixar as amostras em álcool imediatamente após a coleta, conforme mostra o protocolo apresentado abaixo.**

**Como preservar amostras de ictioplâncton em álcool para estudos de otólitos:**

- Concentrar a amostra do plâncton;
- Remover os organismos gelatinosos (medusa, salpas, etc.);
- Fixar em solução de álcool 80% (ou puro);
- Manter nessa solução por 12 a 24 horas;
- Filtrar a amostra usando uma malha de abertura igual ou menor à utilizada na coleta;
- Transferir a amostra para uma solução tamponada de álcool 80%;
- Retirar os otólitos das larvas dentro de poucos meses após a fixação da amostra.

**Para a preparação da solução tamponada de álcool 80%:**

- Adicionar 8 mL da solução saturada de Tris (hidroximetil) aminometano em 1000 mL de álcool 80%.

**Para preparação da solução saturada de Tris (hidroximetil) aminometano 99%:**

- Adicionar 100 g de Tris (hidroximetil) aminometano em 250 mL de água destilada.

Após a fixação, o material coletado é guardado a bordo em local abrigado, longe de fontes de calor, em frascos de plástico resistente, apropriadamente etiquetados, de forma que cada amostra possa ser relacionada com o local de coleta e dados ambientais associados.

# 3. Processamento, preservação e armazenamento

## 3.1 Obtenção de biovolume e biomassa

O processamento em laboratório começa pela determinação do volume de plâncton (biovolume) ou da biomassa (peso seco ou peso úmido) de cada amostra. O método mais simples e rápido para medir de volume é conhecido por "Método de Deslocamento de Líquido" conforme a Figura 6.

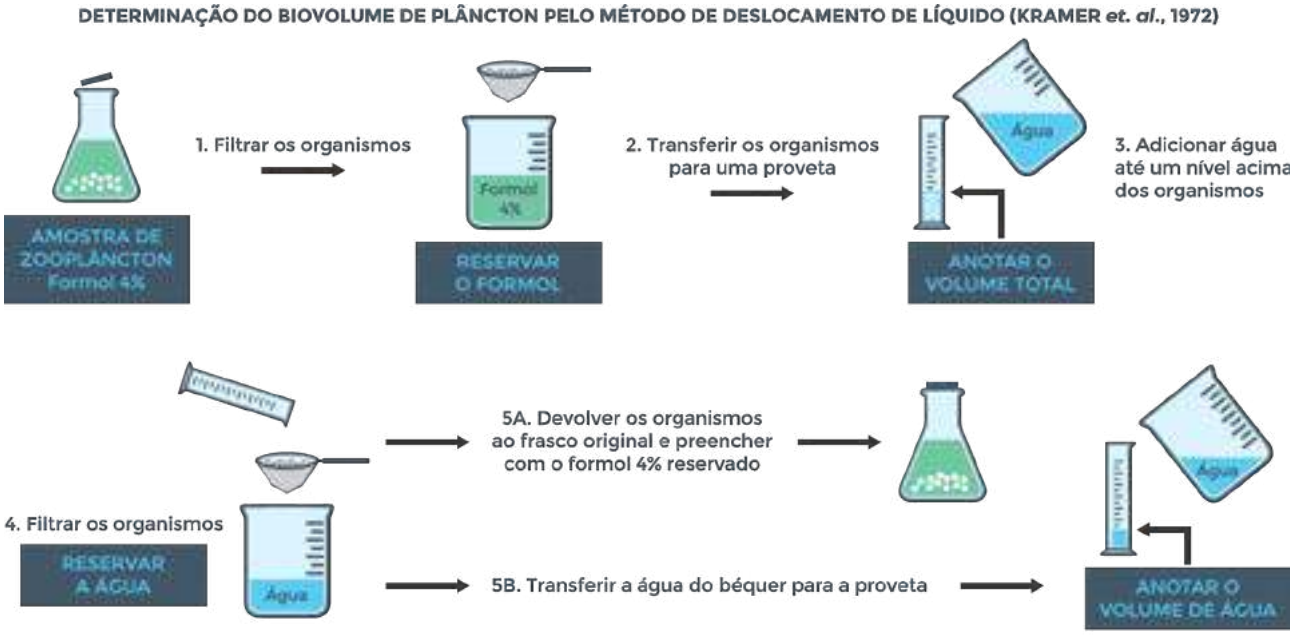



**FIGURA 6.** Passo a passo para a determinação do volume de plâncton pelo método do deslocamento de líquido. *Ilustração: Leandro Coelho, adaptado de Kramer et al., 1972).*

Para a obtenção da biomassa (peso úmido) as amostras são pesadas em balanças de precisão, após a retirada do excesso de líquido da amostra. O excesso de líquido é retirado deixando a amostra concentrada em uma rede com malha de abertura menor ou igual àquela utilizada na rede de coleta, repousando por alguns minutos sobre um papel absorvente. Deve-se tomar cuidado para não secar a amostra completamente, sob o risco de danificar os organismos. Após esses procedimentos, a amostra é estocada em frascos definitivos, geralmente potes de vidro, recebendo uma numeração que permita a obtenção de todos os dados relacionados à coleta (número da amostra, data, geoposicionamento etc.).

## 3.2 Triagem dos ovos e larvas de peixes

A triagem dos ovos e das larvas de peixes é uma das partes mais demoradas do processamento das amostras de plâncton, pois exige muita atenção e paciência do triador, além de conhecimento mínimo sobre organismos do zooplâncton. As amostras devem ser diluídas e analisadas pouco a pouco, em placas de Petri ou de Bogorov, sob um microscópio estereoscópico binocular. Os ovos e as larvas são armazenados em frascos (normalmente pequenos, de vidro, e sempre com boa vedação), devidamente etiquetados e estocados, aguardando o passo seguinte da análise.

### 3.3 Cuidados com a manutenção do acervo

As amostras podem ser preservadas na mesma solução utilizada para sua fixação. No entanto, como o formaldeído é extremamente tóxico, muitas instituições têm optado por substituir a solução de formol utilizada para a fixação das amostras e preservá-las em álcool etílico 70%, diminuindo o risco de intoxicação das pessoas, principalmente durante a manutenção em acervo.

As amostras de ictioplâncton podem ser preservadas por prazo indeterminado, o que leva a necessidade de cuidados especiais para que sejam mantidas de forma mais adequada e segura possível. Vários problemas podem ocorrer caso não haja uma manutenção adequada das amostras, sendo o ressecamento das amostras um dos mais graves.

Os fixadores evaporam com facilidade e quando isso acontece, o material é definitivamente perdido. A perda dos registros, perda de etiquetas dos frascos, entre outros, também inutilizam as amostras para a pesquisa.

Desta forma, é fundamental que as amostras sejam armazenadas em um local específico e adequadamente aparelhado, para garantir sua constante manutenção, que requer muitas pessoas e recursos materiais. Podemos citar como exemplo a Coleção Biológica "Prof. Edmundo F. Nonato" do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (ColBIO), que desde 2012, sob coordenação da Dra. Mônica V. Petti, recupera, organiza e cataloga as amostras biológicas coletadas pelo IOUSP há mais de 50 anos (Fig. 7A).

O acervo da ColBIO representa talvez a maior coleção brasileira de ictioplâncton marinho, incluindo resultados de inúmeros projetos de pesquisa realizados ao longo da costa brasileira, desde áreas costeiras até águas profundas (Fig. 7B) e com mais de 45.000 amostras catalogadas de larvas de peixes de diversas espécies (Fig. 8).

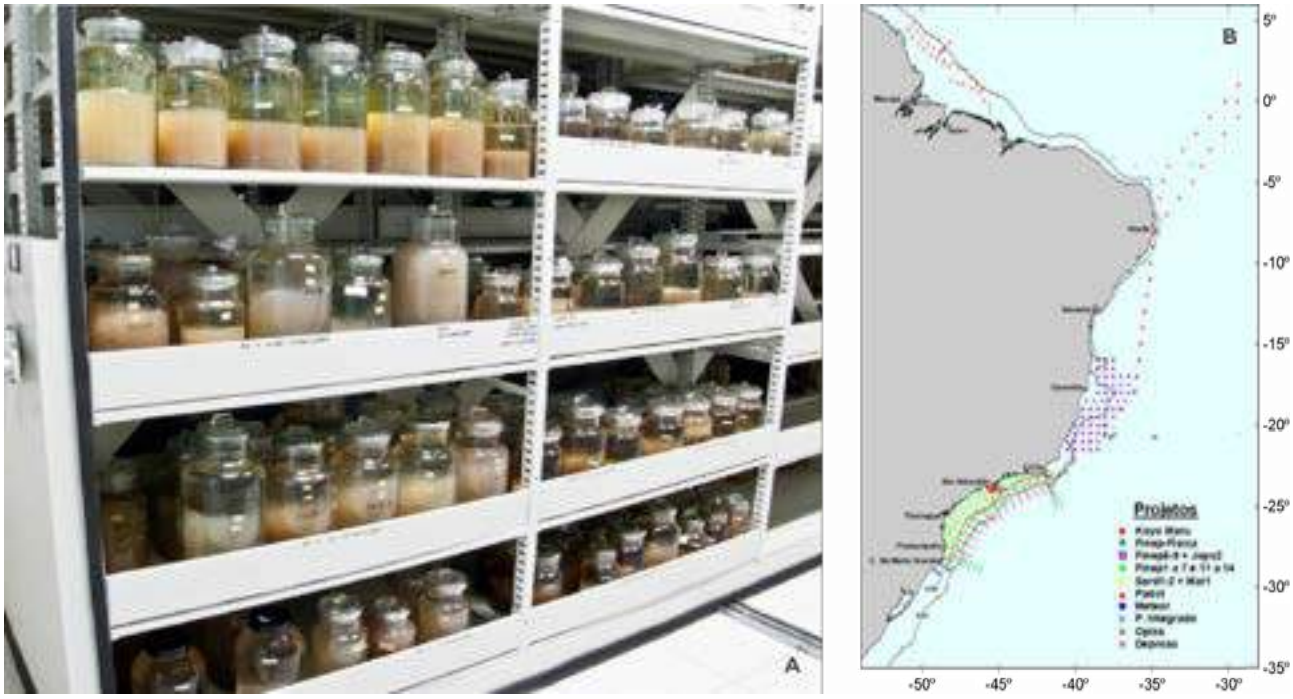



**FIGURA 7.** Coleção Biológica "Prof. Edmundo F. Nonato" do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (ColBIO). A) Amostras de plâncton; e B) mapa das estações oceanográficas realizadas em cruzeiros conduzidos pelo IOUSP. *Foto: Gabriel Monteiro*.

**FIGURA 8.** Larvas de peixes depositadas na Coleção Biológica "Prof. Edmundo F. Nonato" do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (ColBIO). *Fotos: Gabriel Monteiro.*

As amostras de ictioplâncton depositadas na ColBIO, possuem dados de localização (latitude, longitude), projeto, expedição, aparelho de coleta, profundidade, data, hora da coleta e outras variáveis ambientais (salinidade, temperatura etc.). Vale ressaltar que esses dados são muito preciosos por representarem informações pretéritas, necessárias, por exemplo, em estudos sobre mudanças de longo prazo. Nenhum modelo de predição funciona sem esse tipo de dado.

## 4. Identificação de ovos e larvas de peixes

Após a triagem das amostras, os ovos e as larvas de peixes passam a ser efetivamente analisados, iniciando pela identificação em nível de família e, em seguida, fazendo um refinamento até o menor nível taxonômico possível, em gênero ou espécie. Trata-se de uma atividade das mais importantes e interessantes, porém com alto grau de dificuldade, por exigir do pesquisador muita experiência e conhecimento sobre as características taxonômicas que permitem identificar os ovos e as larvas de peixes.

O elevado nível de dificuldade na identificação das fases iniciais do desenvolvimento de peixes está na grande semelhança morfológica existente entre diferentes grupos e nas mudanças morfológicas que ocorrem nas larvas com o crescimento. Assim, poucas espécies de peixes têm seus ovos e larvas descritos na literatura, principalmente se comparado com o número de descrições de peixes adultos.

Por exemplo, em águas brasileiras são conhecidas pelo menos 1155 espécies de actinopterígeos (Menezes *et al.*, 2003), mas na bibliografia específica apenas 227 dessas espécies possuem descrição das fases iniciais de desenvolvimento até o momento (Bonecker *et al.*, 2014; 2006; Richards 2006a, 2006b; Itagaki *et al.*, 2007; Matsuura & Katsuragawa, 1981; Sinque, 1980).

### 4.1 Características dos ovos de peixes

Na maioria das espécies de peixes actinopterígeos a fecundação é externa. Após fêmeas e machos liberarem seus gametas (ovócitos e espermatozoides) no ambiente, o ovócito é fecundado pelo espermatozoide dando origem ao ovo no qual se desenvolve o embrião, que começa como uma única célula e passa por diversas transformações até se tornar um organismo complexo.

O **embrião** está ligado ao **saco vitelínico**, que contém o **vitelo**, sua reserva nutritiva, e é envolto pelo **córion**, que é a membrana protetora externa. Entre o córion e o embrião está o espaço **perivitelino** ou **perivitelínico**, que além de proteger também auxilia na regulação osmótica (Fig. 9). Os ovos de peixes podem ou não possuir **gotas de óleo**, que variam em número e tamanho, de acordo com a espécie e o estágio de desenvolvimento.

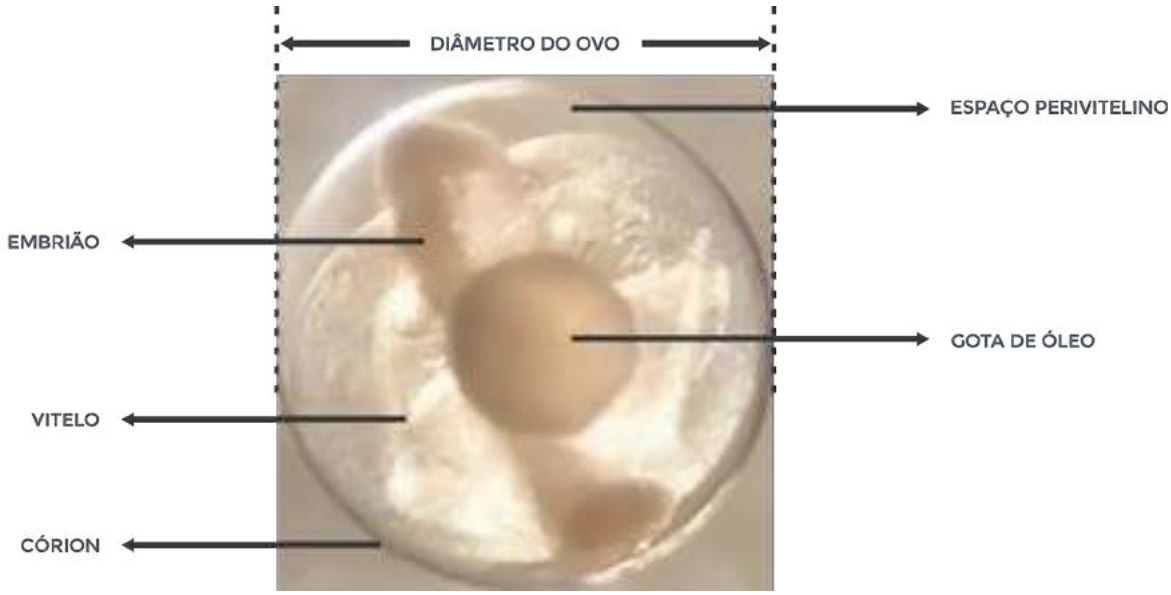



**FIGURA 9.** Estrutura do ovo de peixe.

Os **ovos pelágicos** flutuam na coluna de água, especialmente devido à presença das gotas de óleo e do vitelo (composto principalmente por lipídios), que são menos densos do que a água. Esses ovos são geralmente **transparentes** e **pouco pigmentados** (características que possivelmente dificultam serem vistos por predadores), apresentam diâmetro variável e são providos de uma membrana fina e não adesiva.

A maioria dos ovos de peixes possui **forma esférica**, mas outras formas podem ser observadas, como no caso das manjubas (Família Engraulidae) e algumas espécies de peixe-papagaio (Scaridae), cujos ovos são **elípticos** (Ishihara *et al.*, 2011).

Os caracteres utilizados na identificação de ovos, de acordo com Matarese e Sandknop (1984) são: 1) formato do ovo – esférico ou elipsoide; 2) tamanho do ovo – geralmente entre 0,5 mm a 5,5 mm (com a maioria das espécies variando entre 0,7 e 1,6 mm); 3) gotas de óleo – presença ou ausência, número, tamanho, cor, posição e pigmentação; 4) vitelo – segmentado ou homogêneo, cor, pigmentação e, em estágios mais avançados, o padrão das veias e artérias; 5) córion – liso ou ornamentado, tipo de ornamentação, espessura, cor, presença ou ausência de película de cobertura; 6) dimensões do espaço perivitelino; e (7) características embrionárias – características morfológicas, padrões de pigmentos, presença de estruturas especiais (Fig. 10).

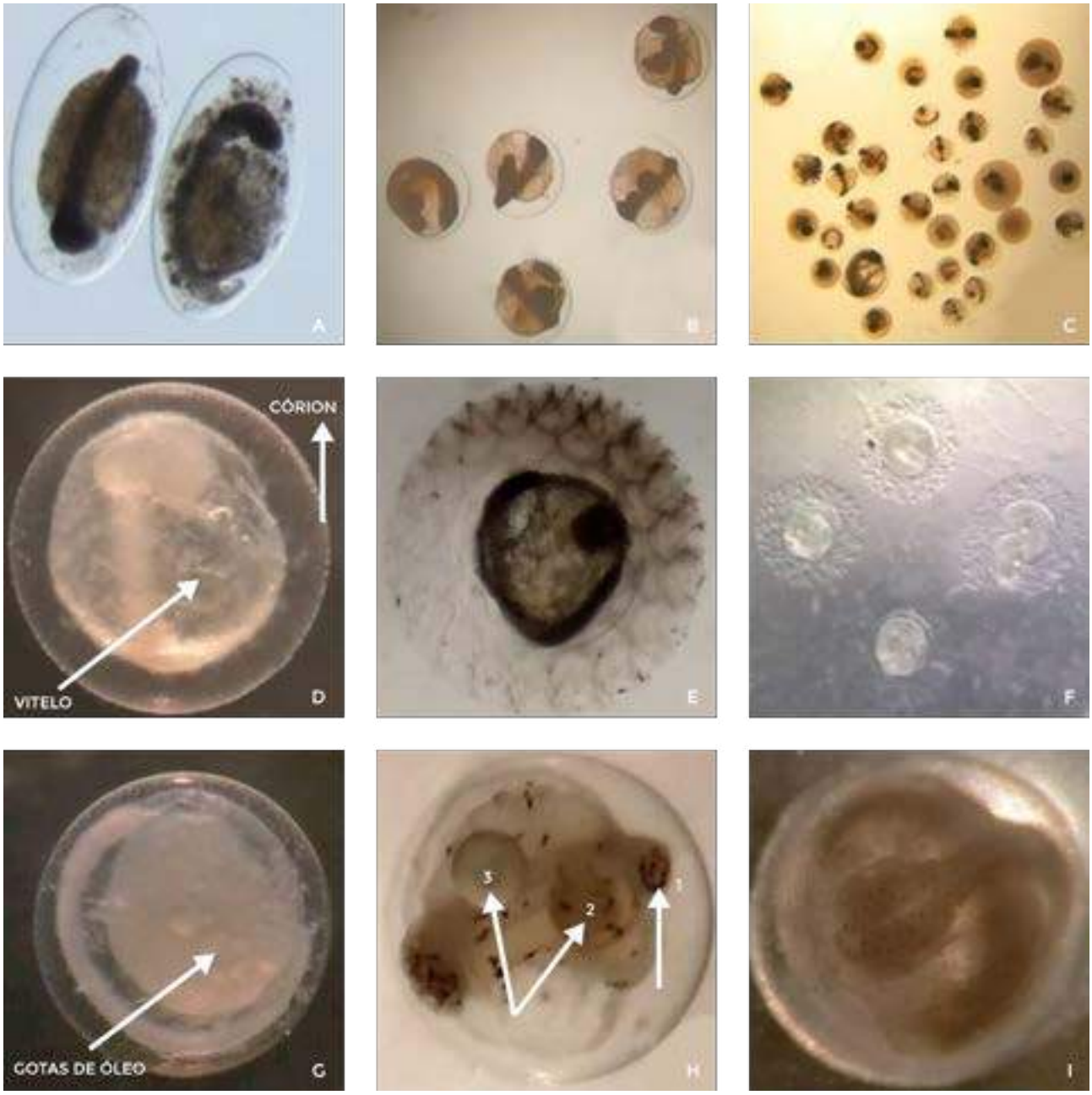



**FIGURA 10.** Caracteres utilizados na identificação de ovos: A) formato elipsoide de *Engraulis anchoita* (*Foto: Jana M. del Favero*); B) esférico; C) diferentes tamanhos de ovos; D) vitelo e córion; E, F) córion ornamentado *Maurolicus* sp.; G) gotas de óleo; H) pigmentos no embrião (1) e na gota de óleo (2), e gota de óleo sem pigmento (3); e (I) Pigmentos no embrião.

## 4.2 Características das larvas de peixes

A larva de peixe recém eclodida de um ovo pelágico geralmente possui menos de 5,0 mm de comprimento, é transparente e possui uma nadadeira primordial contínua, conhecida também como nadadeira vitelínica. Além disso é possível notar a presença do saco vitelínico e, por isso, esse estágio de desenvolvimento é chamado de **saco vitelínico**, ou **larva vitelínica**. Os estágios posteriores são classificados, principalmente, de acordo com a flexão da região final da notocorda, que se volta para cima ao longo do desenvolvimento, devido à formação dos ossos hipurais da nadadeira caudal (Fig. 11).

Dessa forma, os estágios larvais seguintes são: **pré-flexão**, que começa no momento da absorção total do vitelo e vai até o início da flexão da notocorda; **flexão**, período em que a notocorda está se flexionando, ao mesmo tempo em que elementos da nadadeira caudal estão se formando; **pós-flexão**, começa quando a notocorda já está totalmente flexionada e termina quando todos os raios das nadadeiras estão formados. Depois da pós-flexão a larva passa por um estágio de **transição** ou de **metamorfose**, na qual os indivíduos mantêm caracteres larvais e ao mesmo tempo em que desenvolvem algumas características dos adultos, como escamas. Este estágio pode ser abrupto ou prolongado, dependendo da espécie, e antecede a fase juvenil. Os juvenis já possuem a forma dos adultos e passam a ter hábito pelágico, na coluna d'água, ou demersal, junto ao fundo, dependendo da espécie (Fig. 11).

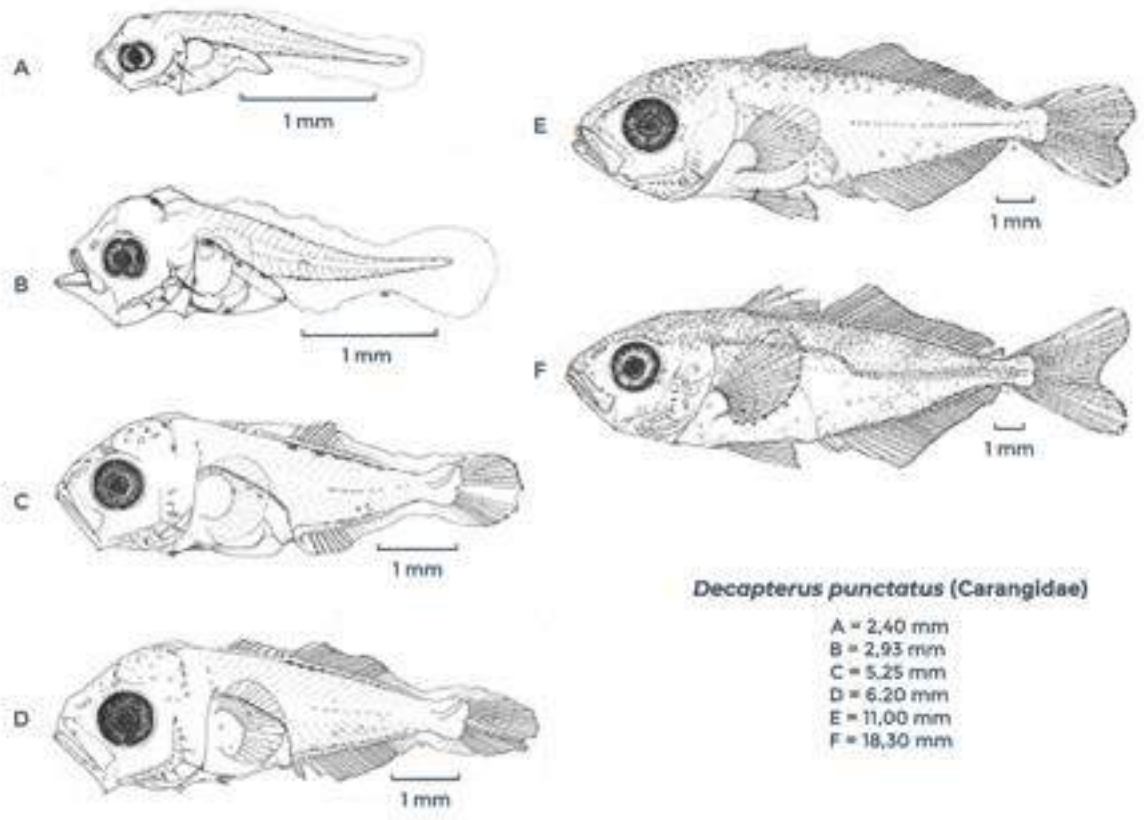



**FIGURA 11.** **Estágios iniciais de desenvolvimento de** *Decapterus punctatus* **(Carangidae).** *Fonte: Katsuragawa, 1990.*

As larvas de peixes são identificadas com base em **características merísticas** (que podem ser contadas) como número de raios e espinhos das nadadeiras, número de miômeros, número de pigmentos, presença e número de espinhos e cristas na cabeça etc. (Fig. 12); **características morfométricas** (que podem ser medidas) como comprimento total, comprimento da cabeça, altura do corpo e proporções entre essas medidas (ex: relação do comprimento da cabeça em relação ao comprimento do corpo) (Fig. 13) e outras **características morfológicas**, como nadadeira caudal arredondada ou pontuda, olhos elípticos ou arredondados, intestino estriado ou liso, posição relativa das nadadeiras.

Os miômeros são blocos de fibras musculares estriadas, dispostos ao longo de ambos os lados do corpo, e são mais óbvios em peixes (Pough *et al.*, 2003). O número de miômeros é um caractere muito importante para a identificação das larvas, pois é igual ao número de vértebras dos peixes adultos na maioria das espécies.

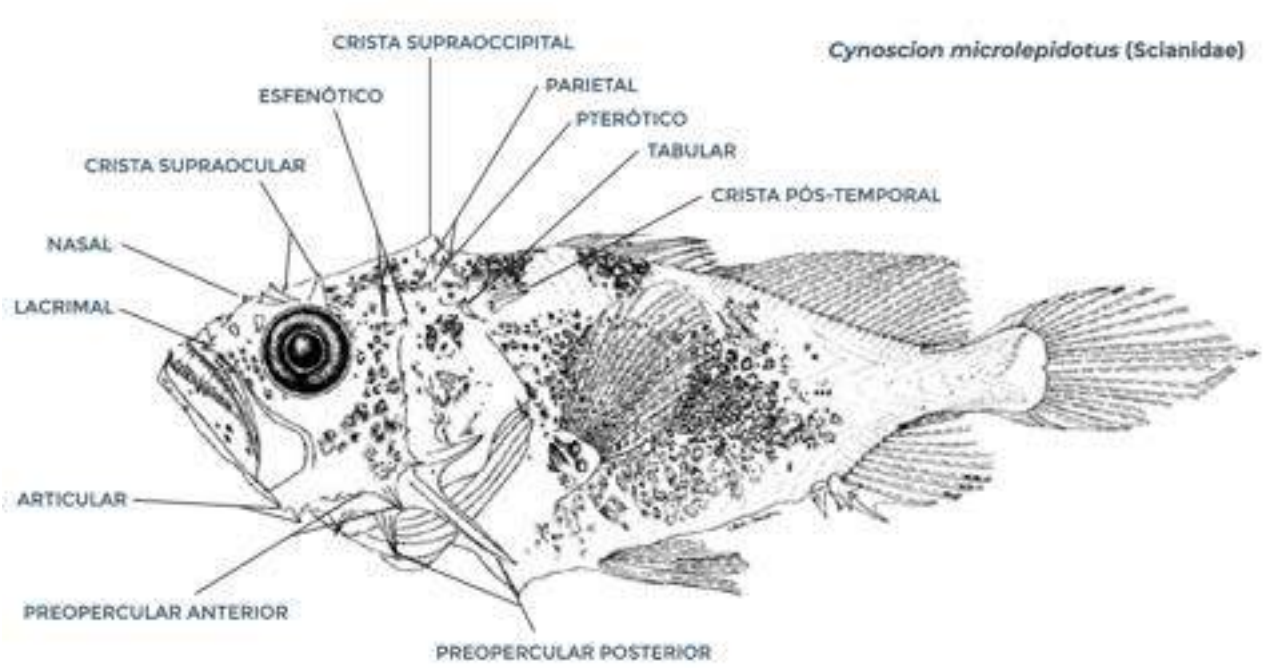



**FIGURA 12.** Nomenclatura das cristas e dos espinhos da cabeça. Larva de *Cynoscion microlepidotus* (Scianidae) no estágio de pós-flexão. Os espinhos da cabeça recebem o nome do osso onde se encontram. *Fonte: Gonsales, 2012*.

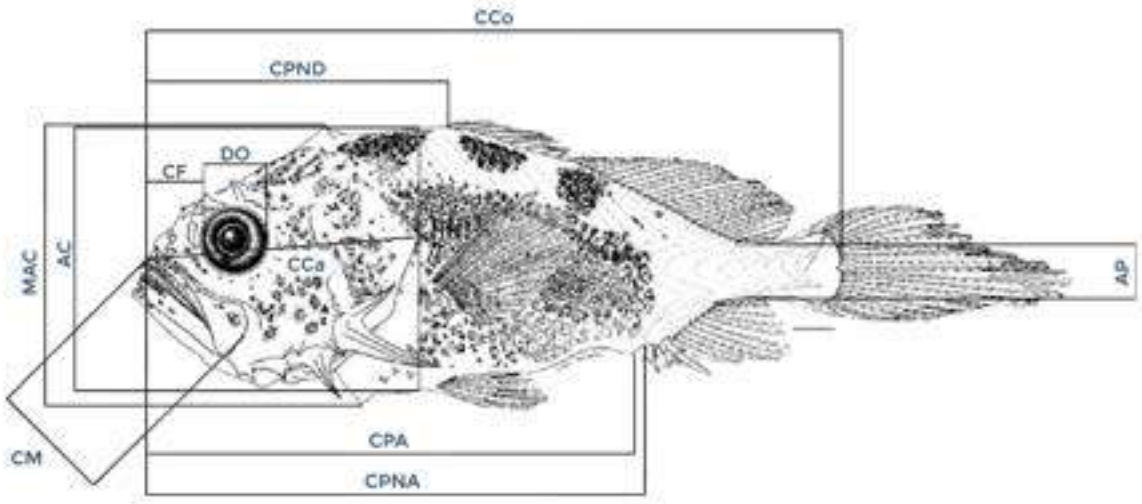



**FIGURA 13.** Principais medidas utilizadas para caracterização morfológica. CCo: Comprimento do Corpo; CPND: Comprimento Pré-nadadeira Dorsal; DO: Diâmetro do Olho; CF: Comprimento do Focinho; AC: Altura do Corpo; MAC: Máxima Altura do Corpo; CM: Comprimento da Mandíbula; CPA: Comprimento Pré-anal; CPNA: Comprimento Pré-nadadeira Anal. *Fonte: Gonsales, 2012*.

Conforme Leis & Rennis (1983), existem basicamente três métodos para identificar as larvas de peixes: 1) Utilizando a literatura e/ou aproveitando a experiência de outros especialistas; 2) criando uma série de desenvolvimento na qual se compara as características de um grupo de indivíduos, desde o estágio de transformação, que possui características de adulto e larva até as menores larvas coletadas; e 3) através de cultivo em laboratório, a partir de desovas de adultos conhecidos. Evidentemente, a

terceira opção nem sempre é viável, sendo as duas anteriores usualmente adotadas. É importante também fazer um levantamento prévio das espécies que ocorrem na área de estudo e se há descrição dos estágios iniciais.

### 4.3 Ilustrações de fases de desenvolvimento

As ilustrações são de fundamental importância para estudar as fases iniciais do ciclo de vida de peixes, especialmente servindo como guias de identificação para toda a comunidade de pesquisadores da área de ictioplâncton. Embora atualmente os recursos fotográficos estejam bem desenvolvidos, os desenhos podem evidenciar detalhes dos caracteres de um organismo que muitas vezes são imperceptíveis numa foto.

Os desenhos são feitos utilizando-se uma câmara clara acoplada a um estereomicroscópio. É uma atividade trabalhosa e demorada, que depende muito do treinamento e principalmente da habilidade que poucas pessoas possuem.

Um grande exemplo de dedicação e habilidade foi o da bióloga Kazuko Suzuki, integrante da equipe do Prof. Y. Matsuura no IOUSP, que entre as décadas de 1970 e 2000 fez inúmeras ilustrações de inestimável valor (Fig. 14), além de outras atividades, que contribuíram para o desenvolvimento das pesquisas com o ictioplâncton. Diversas de suas ilustrações estão arquivadas na ColBIO e muitas delas já foram publicadas em artigos científicos e outros trabalhos acadêmicos (e.g. Matsuura & Suzuki, 1997, 2000; Katsuragawa, 1997).

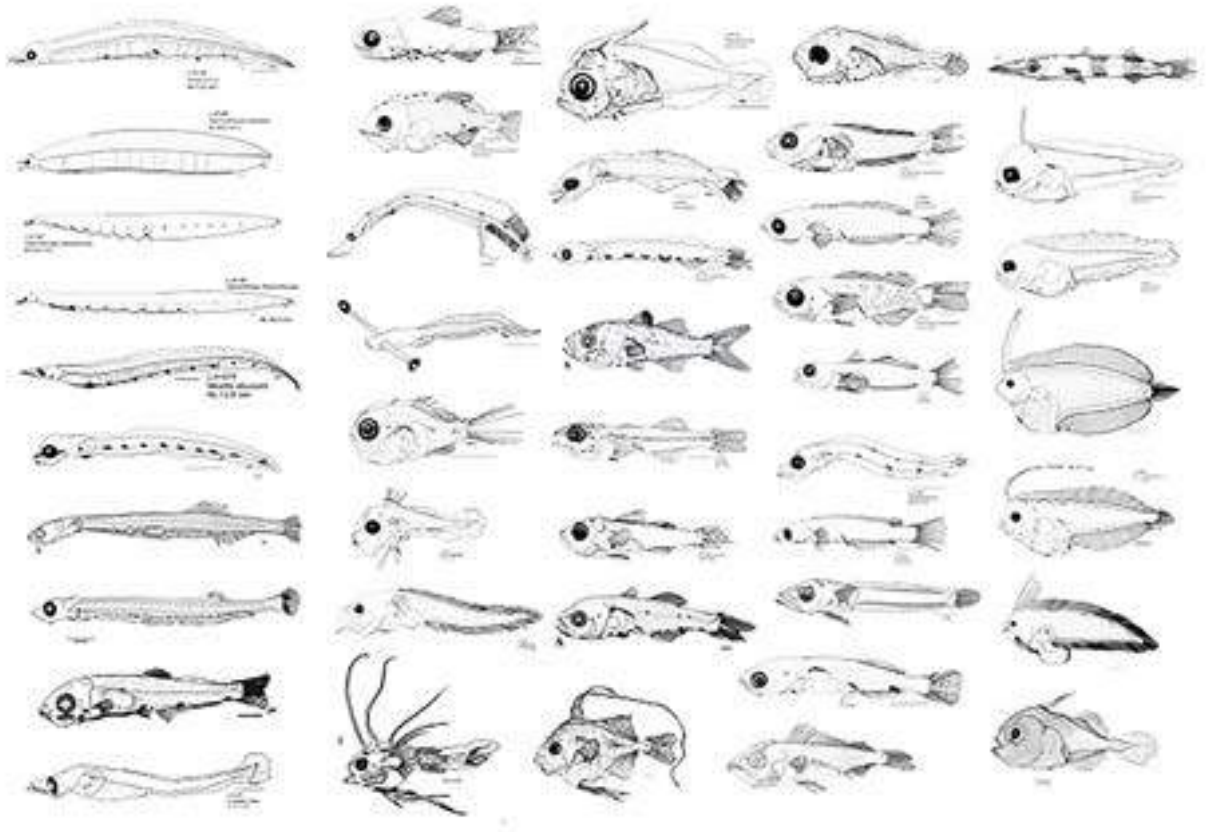


**FIGURA 14.** **Ilustrações de larvas de peixes do Laboratório de Ictioplâncton do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo.** *Ilustrações: Kazuko Suzuki*.

# 5. Contribuições do estudo do ictioplâncton

## 5.1 Taxonomia e Sistemática

A partir da comparação de estágios iniciais de desenvolvimento já descritos de um grande número de espécies de peixes foi observado que as larvas de espécies mais relacionadas, por exemplo, espécies pertencentes a uma mesma família ou a um mesmo gênero, são mais semelhantes entre si do que com espécies mais distantes filogeneticamente, ou seja, do que com espécies de outras famílias ou gêneros. Isso significa que o conjunto de características merísiticas e morfométricas utilizados para identificar as larvas podem auxiliar também na elucidação da taxonomia e sistemática filogenética dos peixes (Ahlstrom & Moser, 1976, Dunn, 1983).

As características das larvas de peixes foram utilizadas como fonte de informação para a taxonomia e a sistemática de diversos grupos. Por exemplo, a relação filogenética e a classificação dos diferentes gêneros da família Scopelarchidae (conhecida como *pearleye fishes*, mas sem nome comum em português) foi proposta com base em informações genéticas somadas a diversas características dos adultos e das larvas, como pigmentação, posição da nadadeira peitoral em relação à nadadeira dorsal, tamanho da cabeça e tempo de metamorfose prolongado ou curto (Johnson, 1974, Davis, 2015). Na análise da sistemática da família Myctophidae (peixes-lanterna) foram utilizadas 59 características, das quais 13 eram de larvas (Paxton *et al.*, 1984). Interessantemente, as larvas das espécies de peixes-lanterna podem ser separadas em dois grupos distintos de acordo com o formato dos olhos, e esta divisão é compatível com a classificação sistemática das subfamílias Lampanyctinae, composta por espécies com larvas de olhos redondos e Myctophinae, composta por espécies com larvas de olhos elípticos (Moser & Ahlstrom, 1974).

## 5.2 Biologia e Ecologia

Ao longo do seu desenvolvimento as larvas de peixes passam por **mudanças estruturais** e fisiológicas que têm grande significado funcional para a vida planctônica. Os sistemas (neurológico, digestório, circulatório etc.) tornam-se mais complexos ao longo de seu desenvolvimento, mas muitos órgãos são funcionais logo no início da fase larval.

Por exemplo, nas larvas de *Engraulis mordax*, uma espécie pelágica bastante estudada no Atlântico Norte e congênere da anchoita (*E. anchoita*) que ocorre na costa brasileira, a linha lateral é funcional assim que a larva eclode e tem um papel importante na detecção de predadores durante a noite enquanto o sistema visual da larva não está totalmente desenvolvido. Os olhos se tornam funcionais quando a larva tem apenas 4,0 mm de comprimento, coincidindo com o início da alimentação exógena, mas os bastonetes (células da retina dos olhos dos vertebrados que detectam os níveis de luminosidade) só iniciam sua diferenciação nas larvas com aproximadamente 10,0 mm de comprimento (O'Connel, 1981). Nessa fase as larvas de *E. mordax* começam a realizar migrações verticais e apresentam maior atividade, mesmo em baixa luminosidade (Hunter & Sanchez, 1976). Também é possível notar que nesse estágio de desenvolvimento, a vesícula gasosa das larvas de *E. mordax* fica inflada durante a noite, com um volume significativamente maior do que o observado durante o dia. As larvas com a vesícula gasosa inflada afundam mais lentamente do que as larvas que não inflam as vesículas, indicando que o desenvolvimento desse órgão é muito importante para que as larvas de peixes mantenham a sua posição na coluna d'água (Hunter & Sanchez, 1976).

Com o crescimento também surgem mudanças nas **necessidades nutricionais** das larvas, que são acompanhadas pelo desenvolvimento do trato digestório e de sua capacidade de digerir diferentes tipos de alimentos. No caso das larvas de *E. mordax*, a digestão de proteína tem início do meio para o final do desenvolvimento larval. Nas larvas do olhete (*Seriola lalandi*) a boca se abre e o trato digestório já está preparado para receber alimentos no segundo dia após a eclosão (Hunter & Sanchez, 1976). Nas larvas dessa espécie, após o início da alimentação exógena surgem glândulas gástricas, ligadas à digestão de lipídios e proteínas. No quinto dia as partes do trato digestório já estão bem diferenciadas em cavidade bucofaringeana, esôfago, estômago, intestino anterior e posterior. Os dentes faringeanos, papilas gustativas e a língua aparecem no oitavo dia. Os cecos pilóricos, que aumentam a área para digestão e absorção sem aumentar o comprimento do intestino, se formam no 18º dia e indicam a transição para a fase juvenil (Chen *et al*., 2006).

Com a expansão do conhecimento sobre o desenvolvimento dos estágios iniciais dos peixes, surgiram teorias relacionando a **mortalidade das larvas** com a **variabilidade no recrutamento** e sua influência direta nos estoques pesqueiros. Johan Hjort, pesquisador norueguês, propôs duas hipóteses: a **Teoria do Período Crítico** (Hjort, 1914), na qual as principais causas da mortalidade das larvas seriam a falta de alimento adequado no início da alimentação exógena, levando à inanição, e a teoria do **Transporte de Larvas pelas Correntes** (*Aberrant Drift*) a lugares com condições inadequadas para o recrutamento (Hjort, 1926). A primeira hipótese de Hjort lançou luz sobre a alimentação e a segunda sobre a hidrodinâmica, e foram as bases para estudos subsequentes, que têm mostrado a importância da interação dos processos físicos e biológicos sobre a variabilidade do recrutamento (Houde, 2008). A teoria de **Encontros e Desencontros** (*Match-Mismatch*) (Cushing, 1974, 1990) considera que deve haver uma janela de tempo ideal entre a desova e a produção máxima de zooplâncton (presas), para que as larvas de peixes tenham alimento em abundância. Caso contrário, as larvas podem sofrer de inanição, o que causaria maior mortalidade e baixo nível de recrutamento.

Ruben Lasker (1978), por sua vez elaborou a hipótese do **Oceano Estável** (*Stable Ocean*), na qual as larvas de peixes dependeriam de uma maior estabilidade da coluna de água para conseguir capturar o alimento. Nesse caso, a sobrevivência das larvas em regiões de ressurgência, seria maior em períodos de calmaria, devido à estratificação temporária da coluna de água, a qual permitiria que larvas de peixes e suas presas ficassem agregadas na interface entre as diferentes massas de água, garantindo maior sucesso na alimentação. Esta hipótese foi estendida para o conceito de **Janela Ambiental Ótima** (*Optimum Environmental Window*) (Cury & Roy, 1989) ao considerar que ventos moderados controlariam as perdas por advecção e o sucesso da predação através da microturbulência.

As hipóteses para explicar as causas da mortalidade das larvas de peixes e da variabilidade do recrutamento foram aumentando sua complexidade ao longo do tempo. Sinclair (1988), por exemplo, considerou que o local de desova de uma espécie deveria estar associado a condições oceanográficas que permitissem a retenção das larvas em locais apropriados para o recrutamento, passando assim a englobar o comportamento de migração dos adultos, o local de desova e as correntes oceânicas.

Outras explicações para a variabilidade no recrutamento estão relacionadas à própria biologia e fisiologia das larvas de peixes, como o **tamanho** e o **crescimento**. A **taxa de crescimento**, um dos principais parâmetros que define a duração de cada estágio do desenvolvimento de uma espécie, tem sido estimada para as larvas de várias espécies de peixes com base nos anéis de crescimento diário em otólitos e contribuem para o conhecimento de outros parâmetros vitais, como idade e mortalidade (Jones, 1986; Simms *et al*., 2008; Grote *et al*., 2012). As estimativas das taxas de crescimento são importantes para o manejo pesqueiro devido à sua relação direta com o recrutamento. Por exemplo, Katsuragawa & Ekau (2003) analisando otólitos de larvas de *Trachurus lathami* (Fig. 15) estimaram

uma taxa média de crescimento de 0,44 ± 0,008 mm por dia e, com esse dado, foi possível estimar a taxa de mortalidade diária de 17,2%. O tamanho máximo atingido no período larval varia entre as espécies, desde menos de 5,0 mm em alguns linguados da família Achiridae, até mais de 100 mm no caso de moréias. O tamanho larval máximo da maioria das espécies está entre 10 e 30 mm de comprimento. O período larval pode durar poucas horas ou até alguns anos. No caso da enguia do Atlântico a duração é de 18 a 22 meses (Moser, 1996).

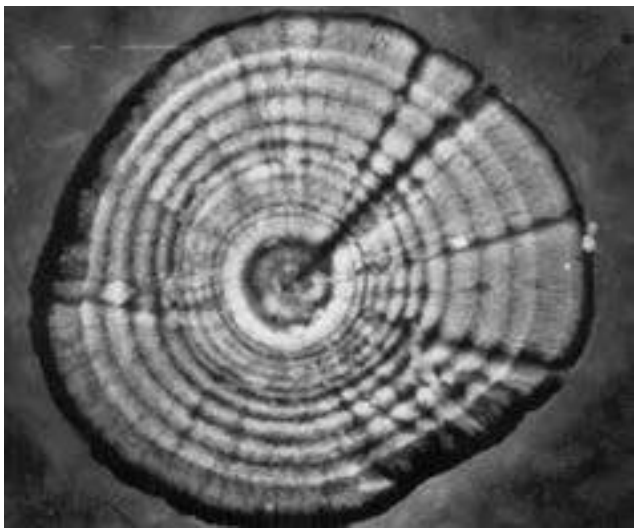


**FIGURA 15.** Otólito com 13 anéis de uma larva de *Trachurus lathami* no estágio de pré-flexão e 4,6 mm de comprimento (Katsuragawa & Ekau, 2003).

O tamanho da larva pode determinar os possíveis predadores e presas, sendo que no caso das presas o tamanho da abertura da boca da larva é mais importante. Com base nesse conceito de tamanho levantou-se a hipótese de que quanto maior fosse a larva, maior seria a sua chance de sobreviver (*Bigger is better*), pois ao mesmo tempo que o espectro de tamanho de suas presas aumentasse, o número de possíveis predadores diminuiria. No entanto, essa teoria foi contestada por não considerar que, embora diversos predadores deixem de ser uma ameaça, as larvas de peixes maiores se tornam mais visíveis e, portanto, mais suscetíveis a predação por outros predadores que antes não conseguiam enxergá-las. Passou-se então a considerar a própria taxa de desenvolvimento como um fator importante da sobrevivência (*Faster is better*). Nesse caso, quanto mais rápido a larva se desenvolve, maior é a sua chance de capturar presas e fugir de predadores, devido ao aumento da capacidade de enxergar e perceber os movimentos ao seu redor, bem como de nadar e se movimentar com mais eficiência (Houde, 2002).

Vale ressaltar que, as taxas de crescimento e desenvolvimento em geral consideram a influência da temperatura, pois ela controla diversos processos biológicos, como o metabolismo celular e por isso tem relação direta com a taxa de crescimento, o desenvolvimento e a duração dos estágios de ovo e larva (Pepin, 1991). Até mesmo o comportamento das larvas de peixes pode ser influenciado pela temperatura (Hunt von Herbing, 2002).

## 5.3 Alimentação e condição nutricional

A alimentação das larvas pode ser estudada através da identificação das presas presentes no trato digestório e do grau de importância de cada presa através de alguns índices. Associados a outros dados, como horário da coleta e composição da comunidade planctônica, podemos avaliar a preferência e horário de alimentação das larvas de peixes.

No entanto, a simples presença, ou ausência, de alimento no trato digestório da larva não indicam se as demandas nutricionais das larvas estão sendo ou não atendidas. Para isso é necessário avaliar a **condição nutricional**, utilizando-se de medidas morfométricas, do cálculo da proporção entre RNA/DNA ou de índices histológicos, que consiste no estabelecimento de um sistema de classificação baseado na análise de células e órgãos (Ferron & Leggett, 1994; Catalán, 2003). As larvas em inanição normalmente exibem degenerações nos tecidos, especialmente do trato digestório e glândulas associadas, como o fígado, que é um dos órgãos que responde mais rapidamente a privação de alimento (O'Connell & Paloma 1981; Margulies 1993; Chen *et al.*, 2007).

A alimentação das larvas de peixes pode ser diferente para cada espécie e varia ao longo do desenvolvimento. Em geral, as larvas de peixes se alimentam do zooplâncton até a fase de transformação, mas os atuns (Scombridae) possuem um desenvolvimento extremamente rápido e passam a se alimentar de outras larvas de peixes, incluindo indivíduos da mesma espécie ainda na fase larval (Young & Davis, 1990; Shoji & Tanaka, 2001).

## 5.4 Distribuição

Os estudos de **caracterização espacial** e **sazonal** são os primeiros a serem realizados quando não se conhece o ambiente, podendo ser uma vasta área como a plataforma continental, ou uma área mais restrita como um estuário ou um recife. A distribuição do ictioplâncton, principalmente dos ovos, pode ser a associada ao habitat do adulto durante a desova. Por exemplo, espécies de habitat costeiro, como anchoita e sardinha-verdadeira são mais abundantes nas plataformas interna e média e as espécies mesopelágicas, como peixes-lanterna, são mais abundantes nas regiões oceânicas. Nos estuários as larvas estão associadas a diferenças no gradiente de salinidade. Assim, consegue-se identificar assembleias de larvas de peixes relacionadas a ambientes com diferentes características.

Através da análise da distribuição espacial também é possível notar que muitas vezes as larvas se desenvolvem em locais muito diferentes daquele onde vive o peixe na fase adulta. Um bom exemplo é o da enguia americana, uma espécie que passa a fase adulta vivendo na água doce e que migra para o meio do oceano, no Mar do Sargassum para desovar. Os ovos e as larvas se desenvolvem na coluna d'água ao mesmo tempo que são transportados pelas correntes. Depois de muitos meses as larvas alcançam a região costeira e adentram os estuários na forma conhecida como "enguias de vidro".

Outra espécie bastante conhecida é o mero (*Epinephelus itajara*) que passa a fase adulta junto a recifes e parcéis, e a fase larval sendo transportado até alcançar, na fase de transformação, os manguezais, onde passará toda a fase juvenil antes de migrar novamente para o habitat dos adultos.

A maioria das espécies de peixe desova em limites bem definidos de temperatura. Dessa forma, pode-se estabelecer uma relação entre a época do ano e o seu período de reprodução, principalmente em ambientes temperados, onde as estações do ano são mais bem definidas (Ré, 2005). Já em ambientes tropicais, muitas espécies desovam ao longo de todo o ano, com períodos nos quais a desova é mais intensa, refletindo numa maior abundância de ovos e larvas, principalmente no verão. Outro fator importante são as áreas de ressurgência, nas quais as águas profundas afloram trazendo os nutrientes para a superfície e aumentando a produtividade planctônica.

Algumas espécies estão bastante relacionadas com esse fenômeno, como por exemplo a sardinha-verdadeira (*Sardinella brasiliensis*) que depende do acúmulo de alimento nos máximos subsuperficiais de clorofila, associado à estabilidade da coluna d'água e ao enriquecimento de nutrientes causado

pela intrusão da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) na plataforma continental sudeste brasileira (Brandini, 1990, 2006; Castro *et al.*, 2006; Moraes *et al.*, 2012; Brandini *et al.*, 2013). Em anos de fraca intrusão da ACAS sobre a plataforma durante o período de desova da sardinha-verdadeira nota-se um declínio do estoque desovante nos anos seguintes (Castello *et al.*, 1991; Matsuura *et al.*, 1992; Cergole, 1995; Matsuura, 1998).

## 5.5 Cálculo da densidade ou abundância do ictioplâncton

Para realizar estudos quantitativos de ovos e larvas de peixes, como em análises de distribuição de uma espécie numa determinada região, é necessário transformar os valores de número de indivíduos em dados relativos de densidade ou abundância, em termos de área ou volume. Normalmente, para amostras coletadas com a rede Bongô, a estimativa é feita seguindo Tanaka (1973) e Smith & Richardson (1977), sendo os resultados expressados em área, conforme a fórmula abaixo:

$$Y = (d \cdot x) / V$$

Onde:

***Y*:** nº de indivíduos · $m^{-2}$;

***d*:** profundidade máxima de coleta (m);

***x*:** número total de indivíduos coletados na estação;

***V*:** volume de água filtrado pela rede ($m^3$).

Para a obtenção da estimativa da densidade em $m^3$, basta dividir o número de indivíduos coletados pelo volume de água filtrado pela rede estimado a partir do registro do fluxômetro.

## 5.6 Biologia Pesqueira

O conhecimento sobre a população de peixes e sua exploração no ponto ótimo pode ser ampliado utilizando os ovos e as larvas como indicadores do futuro recrutamento, localização, viabilidade e tamanho do estoque parental. Estes estudos podem auxiliar na diferenciação entre o efeito natural e o efeito da pesca sobre o estoque de peixes e detectar tendências a longo prazo na distribuição, composição e abundância das populações de espécies de peixes.

Em termos de estudos de dinâmica de população, pode-se delinear a flutuação do estoque desovante pela estimativa da abundância de ovos e larvas no início do desenvolvimento, ou prever o vigor da classe etária, baseando-se em abundância das larvas mais desenvolvidas (Ahlstrom, 1965). O ictioplâncton pode ser usado numa avaliação direta, em termos de número ou biomassa, das populações explotáveis. Em algumas populações de peixes pode haver uma relação entre a abundância ou distribuição de ovos e/ou larvas no estágio saco vitelínico e a abundância ou distribuição dos peixes adultos desovantes. Os estudos com ictioplâncton também podem auxiliar na compreensão da relação entre ecossistema e dinâmica de população. As ligações entre níveis tróficos e entre os componentes físicos e biológicos no oceano são mais facilmente estudadas seguindo o desenvolvimento de coortes, principalmente em águas temperadas, onde muitas espécies produzem apenas uma geração sincronizada por ano. Coortes são conjuntos de indivíduos de uma espécie que nasceram em um mesmo período de

desova (Cadima, 2000). Portanto os estágios iniciais de peixes tornam-se matérias para avaliação de ideias sobre regulação e dinâmica de sistemas biológicos marinhos.

Outra contribuição seria na determinação dos processos básicos que afetam a sobrevivência e então o recrutamento ao estoque parental. As flutuações no tamanho das populações de peixes podem ser consequência de mudanças no influxo anual de jovens ou recrutas. Às vezes o efeito da explotação humana pode contribuir para a ocorrência destas variações do recrutamento, e uma pedra fundamental da administração de população de peixes é a suposição de uma relação básica entre biomassa desovante e o subsequente recrutamento. Na realidade, tais relações são de difícil demonstração e o implícito processo "dependente da densidade" pobremente definido. A grande variação no recrutamento que geralmente apaga qualquer relação "dependente de densidade" é atribuído ao efeito de variações ambientais na sobrevivência de ovos e larvas. Consequentemente, uma substancial proporção da pesquisa de campo com ovos e larvas de peixes têm se justificado em termos de aumentar o conhecimento dos fatores naturais que afetam o recrutamento.

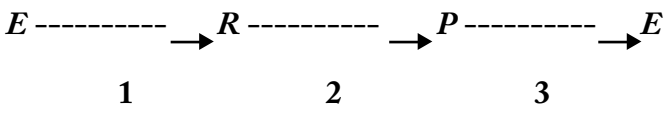
### *5.6.1 Método do ictioplâncton para estimativa do estoque pesqueiro*

O esforço de pesca pode destruir uma população de peixes em pouco tempo, pois a pesca moderna é muito agressiva. Desta forma é necessário levantar informações que propiciem a explotação ótima dos recursos vivos aquáticos e fazer um dimensionamento da potencialidade pesqueira.

O conhecimento da abundância de peixes comercialmente importantes é de vital interesse para os pescadores. Com os dados de abundância e peso pode-se estimar a produção, que fornece as bases para o desenvolvimento de uma administração estratégica.

A avaliação dos estoques é feita através de modelos matemáticos que requerem, além das informações sobre os processos biológicos, dados sobre o esforço de pesca e sobre o desembarque. Através deles pode-se fazer previsões sobre o desempenho da captura e o impacto de mudanças no esforço de pesca (número de barcos, tipo de redes etc.) visando principalmente subsidiar as medidas de gerenciamento no sentido de conservar os estoques pesqueiros.

O princípio do uso do ictioplâncton para fazer uma estimativa de estoques parte dos seguintes pressupostos considerando as seguintes etapas do ciclo de vida de peixes: Abundância de ovos (***E***), Recrutamento (***R***) e Estoque desovante (***P***).




Isto é, entre ***E*** e ***R*** **(1)** naveria correlação devido à alta taxa de mortalidade larval; entre ***R*** e ***P*** **(2)** há correlação, porque após o recrutamento a taxa de mortalidade torna-se constante; e entre ***P*** e ***E*** **(3)** há correlação, pois podemos calcular o estoque desovante através de ovos.

Desta forma, uma estimativa do estoque desovante através de ovos pode ser feita através da seguinte fórmula: $B = E / R \cdot F$, onde ***B*** = biomassa desovante em número; ***E*** = abundância de ovos depositados numa determinada área; ***R*** = proporção sexual ("*sex ratio*"); e ***F*** = fecundidade (número de ovócitos produzidos por fêmea num período de desova). Observa-se que ***E*** é obtido através do estudo do ictioplâncton, enquanto que ***R*** e ***F*** são parâmetros de adultos. A descrição completa dessa metodologia pode ser vista em Matsuura (1983).

## Referências Bibliográficas

ABOUSSOUAN, A. 1969. Sur une petite collection de larves de teleosteens recoltes au large du Bresil (Campagne "Calypso"1962). Vie et Milieu, 20 (3A), 595-610.

AHLSTROM, E.H. 1965. A review of the effects of the enviroment of the Pacific sardine. Special Publication. ICNAF. 6, 53-74.

AHLSTROM, E.H. & MOSER, H.G. 1976. Eggs and larvae of fishes and their role in systematic investigations and in fisheries. Revue des Travaux de l'Institut des Pêches Maritimes.40, (3/4), 379-398.

BONECKER, A.C.T., CASTRO, M.S. 2006. Atlas de larvas de peixes da região central da Zona Econômica Exclusiva brasileira. Série Livros/Documentos REVIZEE Score Central, 214p.

BONECKER, A.C.T., NAMIKI, C.A.P., CASTRO, M.S., CAMPOS, P.N. 2014. Catálogo dos estágios iniciais de desenvolvimento dos peixes da bacia de Campos. Série Zoologia, Guias e manuais de identificação. Curitiba. 295p. Disponível em: http://static.scielo.org/scielobooks/q7vqn/pdf/bonecker-9788598203102.pdf.

BRANDINI, F.P. 1990. Hydrography and characteristics of the phytoplankton in shelf and oceanic waters off southeastern Brazil during winter (July/August 1982) and summer (February/March 1984). Hydrobiologia. 196, 111-148.

BRANDINI, F.P. 2006. Hidrografia e produção biológica na região sudeste sul do Brasil no contexto do Programa Revizee. In: Rossi–Wongtschowski C.L.D.B., Madureira. L.S.P. (Org.), O Ambiente Oceanográfico da Plataforma Continental e do Talude na Região Sudeste-Sul do Brasil. São Paulo: EDUSP. 459-466.

BRANDINI, F.P., Nogueira, M., Simião, M., Codina, J.C.U., Noernberg, M.A. 2013. Deep chlorophyll maximum and plankton community response to oceanic bottom intrusions on the continental shelf in the South Brazilian Bight. Continental Shelf Research. 89, 61-75.

CADIMA, E.L. 2000. Manual de avaliação de recursos pesqueiros. FAO Documento Técnico sobre as Pescas. No. 393. Roma, FAO. 162p.

CASTELLO, J.P., HABIAGA, R.P., AMARAL, J.C., LIMA JR., I.D. 1991. Prospecção Hidroacústica e Avaliação da Biomassa de Sardinha e Anchoíta na região Sudeste do Brasil (Outubro/Novembro de 1988). Publicação Especial Boletim do Instituto Oceanográfico. 8, 15-29.

CASTRO, B.M., LORENZZETTI, J.A., SILVEIRA, I.C.A., MIRANDA, L.B. 2006. Estrutura Termohalina e Circulação na Região entre o Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS). In: Rossi–Wongtschowski C.L.D.B., Madureira. L.S.P. (Org.), O Ambiente Oceanográfico da Plataforma Continental e do Talude na Região Sudeste-Sul do Brasil. São Paulo: EDUSP. 2006. 11-120.

CATALÁN, I.A. 2003, Conditional indices and their relationship with environmental factors in fish larvae. 2003. Tesis (Doctorado: Ciencias del Mar) – Facultat de Biología Departament D' Ecología, Universitat de Barcelona, Barcelona.

CERGOLE, M.C.1995. Stock assessment of the Brazilian Sardine, *Sardinella brasiliensis*, of the Southeast Coast of Brazil. Scientia Marina. 59 (3-4), 17-43.

CHEN, B.N.; QIN, J. G.; KUMAR, M.S.; HUTCHINSON, W.; CLARKE, S. 2006. Ontogenetic development of the digestive system in yellowtail kingfish *Seriola lalandi* larvae. Aquaculture. 256, 489-501.

CHEN, B.N., QIN, J.G., CARRAGHER, J.F., CLARKE, S.M., KUMAR, M.S., HUTCHINSON, W.G. 2007. Deleterious effects of food restrictions in yellowtail kingfish *Seriola lalandi* during early development. Aquaculture. 271, 326-335.

CIECHOMSKI, J.D. 1981. Ictioplancton. In: Atlas del Atlanctico Sudoccidental y métodos de trabajo con el zooplancton marino. BOLTOVSKOY, D. (Ed.) Mar del Plata: INIDEP. 829-860.

COWEN, R.K. & GUIGAND, C.M. In situ ichthyoplankton imaging system (ISIIS): system design and preliminary results. 2008. Limnology Oceanography Methods. 6, 126–132.

CURY, P. & ROY, C. 1989. Optimal environmental window and pelagic fish recruitment suceess in upwelling areas. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science. 46 (4), 670-680.

CUSHING, D.H. 1974. The natural regulation of fish populations. In: Sea fisheries research. F. R. Harden-Jones (Ed.). New York: John Wiley and Sons. 399-412.

CUSHING, D.H. 1990. Plankton production and year-class strength in fish populations: an update of the match/mismatch hypothesis. Advances in Marine Biology. 26, 249-293.

DAVIS, M.P. 2015. Evolutionary Relationships of the Deep-Sea Pearleyes (Aulopiformes: Scopelarchidae) and a New Genus of Pearleye from Antarctic Waters Jones, 1986. Copeia. 103 (1), 64–71.

DAY, R.H., SHAW, D.G., IGNELL, S.E. 1990. In: R. S. Shomura.; M.L. Godfrey (Eds.), Proceedings of the Second International Conference on Marine Debris, 2-7 April 1989. Honolulu, Hawaii. Memo. NHFS. NOM-TM-NMFS-SWFSC-154.

DIAS, J.F., CLEMMESEN, C., UEBERSCHÄR, B., ROSSI-WONGTSCHOWSKI, C.L.D.B., KATSURAGAWA, M. 2004. Condition of the Brazilian sardine, *Sardinella brasiliensis* (Steindachner, 1879) larvae in the São Sebastião inner and middle continental shelf (São Paulo, Brazil). Brazilian Jorunal Oceanography. 52, 81–87.

DUNN, J.R. The utility of developmental osteology in taxonomic and systematic studies of teleost larvae: a review. 1983. NOAA Technical Report NMFS CIRC. 450, 1-19.

FERRON, A. & LEGGETT, W.C. 1994. An appraisal of condition measures for marine fish larvae. In: Blaxter, J. H. S.; Southward, A. J. (Eds.), Advances in Marine Biology. 30, 217–303.

GONSALES, S.A. 2012. Descrição e caracterização morfológica das fases larval e de transformação de *Cynoscion microlepidotus* (Sciaenidae: Teleostei). Monografia de Bacharelado, Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. 45p.

GROTE, B., EKAU, W., STENEVIK, E.K., CLEMMESEN, C., VERHEYE, H.M., LIPINSKI, M.R., HAGEN, W. 2012. Characteristics of survivors: growth and nutritional condition of early stages of the hake species *Merluccius paradoxus* and *M. capensis* in the southern Benguela ecosystem. ICES Journal Marine. Science. 69, 553-562.

HJORT, J. 1914. Fluctuations in the great fisheries of northern Europe viewed in the light of biological research. Rapports et Procès-Verbaux Réunion Conseil International L' Exploration de la Mer. 20, 1-22.

HJORT, J. 1926. Fluctuations in the year classes of important food fishes. Journal Conseil International L' Exploration de la Mer. 1, 5-38.

HOUDE, E.D. 2002. Mortality. In: Fuiman, L.A. & Werner, R.G. (Eds.), Fishery Science: The unique contributions of early life stages. Oxford: Blackwell Science Ltd. 64-87.

HOUDE, E.D. 2008. Emerging from Hjort's Shadow. Journal of Northwest Atlantic Fishery Science. 41, 53-70.

HUNT VON HERBING, I. 2002. Effects of temperature on larval fish swimming performance: The importance of physics to physiology. Journal Fish Biology. 61, 865-876.

HUNTER, J.R. & SANCHEZ, C. 1976. Diel changes in swim bladder inflation of the larvae of the northern anchovy *Engraulis mordax*. Fishery Bulletin. 74 (4), 847-855.

ISHIHARA, T. & TACHIHARA, K. 2011. Pelagic Larval Duration and Settlement Size of Apogonidae, Labridae, Scaridae, and Tripterygiidae Species in a Coral Lagoon of Okinawa Island, Southern Japan. Pacific Science. 65 (1), 87-93.

ITAGAKI, M.K., OHKAWARA, M.H., DIAS, J. F., KATSURAGAWA, M. 2007. Description of larvae and juveniles of *Bairdiella ronchus* (Sciaenidae: Teleostei) in southtern Brazil. Scientia Marina. 71 (2), 249-257.

JOHNSON, R.K. 1974. A revision of the alepisauroid family Scopelarchidae (Pisces: Myctophiformes). Fieldiana Zoology. 66, 1-249.

JONES, C. 1986. Determining age of larval fish with the otolith increment technique. Fishery Bulletin ll. 84, (1), 91-103.

KATSURAGAWA, M. 1990. Estudo sobre o desenvolvimento, a distribuição e a abundância de larvas de carangídeos da costa sudeste do Brasil. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico. São Paulo. 155 p.

KATSURAGAWA, M. 1997. Larval development of the Atlantic moonfish *Selene setapinnis* (Osteichthyes, Carangidae) from southeastern Brazil. Bulletin of Marine Science. 61 (3), 779-789.

KATSURAGAWA, M. & EKAU, W. 2003. Distribution, growth, and mortality of young rough scad, *Trachurus lathami*, in the south-eastern Brazilian Bight. Journal of Applied Ichthyology. 19, 21–28.

KRAMER, D., KALIN, M.J., STEVENS, E.G., TREIKILL, J.R., ZWEIFEL, J.R. 1972. Collecting and processing data on fish eggs and larvae in the California Current region. U.S. Department of Commerce. NOAA Technical Report NMFS CIRC. 370, 1-38.

LASKER, R. 1978. The relation between oceanographic conditions, and larval anchovy food in the California Current: identification of factors contributing to recruitment failure. Rapports et Procès-Verbaux Réunion Conseil International L' Exploration de la Mer. 173, 212-230.

LEIS, J.M. & CARSON-EWART, B.M. 2003. Orientation of pelagic larvae of coral-reef fishes in the ocean. Marine Ecology Progress and Series. 252, 239-253.

LEIS, J.M. & RENNIS, D.S. 1983. The larvae of Indo-Pacific coral reef fishes. Sydney: New South Wales University Press; Honolulu: University of Hawaii Press.

MARGULIES, D. 1993. Assessment of the nutritional condition of larval and early juvenile tuna and Spanish mackerel (Pisces: Scombridae) in the Panamá Bight. Marine Biology. 115, 317-330.

MATARESE, A.C. & SANDKNOP, E.M. 1984. Identification of Fish Eggs. In: Ontogeny and Systematics of Fishes. Special Publications American Society of Ichthyology and Herpetology. 1, 27-31.

MATSUURA, Y. 1983. Estudo comparativo das fases iniciais do ciclo de vida da sardinha-verdadeira, *Sardinella brasiliensis* e da sardinha-cascuda, *Harengula jaguana* (Pisces: Clupeidae) e nota sobre a dinâmica da população da sardinha verdadeira na região Sudeste do Brasil. Tese de Livre Docência. Universidade de São Paulo, São Paulo.

MATSUURA, Y. & KATSURAGAWA, M. 1981. Larvae And Juveniles Of Grey Triggerfish '*Balistes capriscus*' (Pisces: Balistidae) From Southern Brasil.. Jpn. Japanese Journal of Ichthyology. 28 (3), 267-275.

MATSUURA, Y. & SUZUKI, K. 1997. Larval development of two species of barracuda, *Sphyraena guachancho* and *S. tome* (Teleostei: Sphyraenidae), from southeastern Brazil. Ichthyological Research. 44 (4), 369-378.

MATSUURA, Y. & SUZUKI, K. 2000. Early developement of the ftathead, *Percophis brasiIiensis* (Teleostei: Percophididae), from southeastern Brazil. Ichthyological Research. 47 (1), 81-87.

MATSUURA, Y., SPACH, H.L., KATSURAGAWA, M. 1992. Comparison of spawing patterns of the brazilian sardine (*Sardinella brasiliensis*) and anchoita (*Engraulis anchoita*) in Ubatuba region, Southern Brazil during 1985 through 1988. Boletim do Instituto Oceanográfico. 40, (1/2), 101-115.

MATSUURA, Y. 1998. Brazilian Sardine (*Sardinella brasiliensis*) spawning in the Southeast Brazilian Bight over the period 1976-1993. Revista Brasileira de Oceanografia. 46 (1), 33-43.

McGOWAN, J.A. & BROWN, D.M. 1966. A new opening-closing paired zooplankton net. California: University of California, Scripps Institution of Oceanography.

MENEZES, N.A., BUCKUP, P.A., FIGUEIREDO, J.L., MOURA, R.L. (Org.), 2003. Catálogo das espécies de peixes marinhos do Brasil. São Paulo: Museu de Zoologia.

MORAES, L.E.D.S., GHERARDI, D.F.M., KATSURAGAWA, M., PAES, E.T. 2012 Brazilian sardine (*Sardinella brasiliensis* Steindachner, 1879) spawning and nursery habitats: spatial-scale partitioning and multiscale relationships with thermohaline descriptors. ICES Journal of Marine Science. 69, 939-952.

MOSER, H.G. & AHLSTROM, E.H. 1974. Role of larval stages in systematic investigations of marine teleosts: The Myctophidae, a case of study. Fishery Bulletin. 72, 39-413.

MOSER, H.G. 1996. Introduction. In: Moser, H. G. (Ed.). The early stages of fishes in the California current region CalCOFI Atlas 33. California: Allen Press, Lawrence. 1-72.

O'CONNELL, C.P. 1981. Development of organ systems in the northern anchovy, *Engraulis mordax*, and other teleosts. American Zoologist. 21, 429-446.

O'CONNELL, C.P. & PALOMA, P.A. 1981. Histochemical indications of liver glycogen in samples of emaciated and robust larvae of the northern anchovy, *Engraulis mordax*. Fishery Bulletin. 79, 806-812.

OMORI, M. & IKEDA, T. 1984. Methods in Marine Zooplankton Ecology. New York: John Wiley & Sons.

PAXTON J.R., AHLSTROM E.H., MOSER, H.G. 1984. Myctophidae: relationships. In: Ontogeny and Systematics of Fishes. American Society of Ichthyologist and Herpetologist Special Publication. 1, 27-31.

PEPIN, P. 1991. Effect of Temperature and Size on Development, Mortality, and Survival Rates of the Pelagic Early Life History Stages of Marine Fish. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 48 (3), 503-518.

POUGH, F.H.; JANIS, C.M.; HEISER, J.B. 2003. A vida dos vertebrados. Terceira Edição. Coord. Editorial: Ana Maria de Souza. São Paulo: Atheneu Editora.

RÉ, P., AZEITEIRO, U., MORGADO, F. 2005. Ecologia do ictioplâncton. In: Ecologia do plâncton marinho e estuarino. Ré, P.; Azeiteiro, U.; Morgado, F. (Org.). Portugal: Edições Afrontamento, 111-140.

RICHARDS, W.J. ed. 2006a. Early Stages of Atlantic Fishes. An identification guide for the Western Central North Atlantic. Boca Raton Florida: CRC Press. Taylor & Francis, 1, 1335p.

RICHARDS, W.J. ed. 2006b. Early Stages of Atlantic Fishes. An identification guide for the Western Central North Atlantic. Boca Raton Florida: CRC Press. Taylor & Francis, 2, 2640p.

SHOJI, J. & TANAKA, H. 2001. Strong piscivory of Japanese Spanish mackerel larvae from their first feeding. Journal of Fish Biology. 59, 1682-1685.

SIMMS, J.R., ROOKER, J.R., HOLT, S.A., HOLT, G.J., BANGMA, J. 2008. Distribution, growth, and mortality of sailfish (*Istiophorus platypterus*) larvae in the northern Gulf of Mexico. Fishery Bulletin. 108, 478-490.

SINCLAIR, M. 1988. Marine populations. An essay on population regulation and speciation. Washington Sea Grant Program. Seattle: University of Washington Press.

SINQUE, C. 1980. Larvas de Sciaenidae (Teleostei) identificadas na região estuarino-lagunar de Cananéia. Boletim de Zoologia Universidade de São Paulo. 5, 39-77.

SMITH, P.E. & RICHADSON, S.L. 1977. Standard techniques for pelagic fish egg and larvae surveys. FAO Fisheries Technical Papers. 175, 1-100.

TANAKA, S. 1973. Stock assessment by means of ichthyoplankton surveys. FAO Fisheries Technical Papers. 122, 33-51.

VANNUCCI, M. & ALMEIDA PRADO, M.S. 1959. Sobre as coletas de plâncton na III e IV viagens do N/OC "Almirante Saldanha". Contribuições Avulsas do Instituto Oceanográfico. Oceanografia Biológica. 1, 1-16.

WIEBE, P.H. & BENFIELD, M.C. 2003. From the Hensen net toward four-dimensional biological oceanography. Progress in Oceanography. 56, 7-136.

YOUNG, J.W. & DAVIS, T.L.O. 1990. Feeding ecology of larvae of southern bluefin, albacore and skipjack tunas (Pisces, Scombridae) in the eastern Indian Ocean. Marine Ecology Progress and Series. 61, 17-29.

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 24*

# DIVERSIDADE DE PEIXES MARINHOS

*Marcelo Roberto Souto de Melo & Amanda Alves Gomes*

REVISÃO: FLÁVIA SALDANHA-CORRÊA

CITAÇÃO SUGERIDA: MELO, Marcelo Roberto Souto de; GOMES, Amanda Alves. Diversidade de peixes marinhos. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 24: p. 521-542.

# Diversidade de Peixes Marinhos

*Marcelo Roberto Souto de Melo*
*& Amanda Alves Gomes*

## 1. Introdução

Os peixes representam mais da metade da diversidade de vertebrados, com mais de 35.400 espécies conhecidas, classificadas em 365 famílias e mais de 85 ordens (Nelson *et al.*, 2016; Fricke *et al.*, 2020). Essa diversidade fantástica, é o resultado de uma complexa e bem sucedida história evolutiva com mais de 400 milhões de anos, que resultou em adaptações morfológicas, fisiológicas, comportamentais e ecológicas que permitiram aos peixes colonizar praticamente todos os ambientes aquáticos disponíveis, incluindo regiões extremas como os polos, lagos hipersalinos e hiperalcalinos, poças temporárias, cavernas, regiões com déficit de oxigênio e o oceano profundo. O termo peixes tem origem no latim *Pisces*, já o ramo da ciência que estuda os peixes é chamado de ictiologia (do grego *Ikthus*-, peixe + -*logos*, estudo), e cultivo de peixes é chamado de piscicultura (do latim *Pisces*-, peixe + -*cultura*, ato de cultivar).

Os peixes são vertebrados aquáticos que respiram através das brânquias, um órgão especializado em realizar trocas de oxigênio ($O_2$) e dióxido de carbono ($CO_2$) com a água, se locomovem por movimento das nadadeiras e, na maioria dos casos, possuem o corpo revestido por escamas. Entretanto, algumas dessas características não são exclusivas dos peixes, não estão presentes em todos os peixes, ou possuem apenas semelhança superficial. Por exemplo, as brânquias funcionais também estão presentes em alguns invertebrados aquáticos, como as ascídias e anfioxos e nos estágios larvais dos anfíbios; além disso, as estruturas derivadas das brânquias formam as cartilagens e ossos da boca, arco hióide, base do crânio, faringe e foram parar até mesmo dentro do crânio, como os ossículos estribo e martelo da orelha interna (Kardong, 2011). A nadadeira caudal também está presente naqueles mesmos invertebrados, além dos girinos de sapos e nas salamandras (Amphibia), e as nadadeiras peitorais e pélvicas, que são ausentes nas lampreias e peixes-bruxas, se modificaram para formar nossos braços e pernas, respectivamente. Finalmente, as escamas também são ausentes nas lampreias e peixes-bruxas, são compostas por dentículos dérmicos nos peixes-cartilaginosos, ossos dérmicos nos peixes-ósseos e foram substituídas por placas ósseas nos cavalos-marinhos, peixes-cascudos e baiacus, e são embriologicamente distintas das escamas dos répteis.

Mas afinal, por que é tão difícil definir e classificar os peixes? Essa é uma discussão interessante que se estende desde Aristóteles (384–322 a.C.), considerado o pai da zoologia e biologia marinha, até os dias de hoje (Nelson *et al.*, 2016). Linnaeus (1735), na primeira edição do *Systema Naturae*, classificou todos os vertebrados aquáticos na Classe Pisces, inclusive as baleias e golfinhos (Cetáceos), e os peixes-boi (Sirenia). Atualmente, as classificações são baseadas em grupos naturais, ou seja, refletem hipóteses testadas por métodos científicos e incluem todos os descendentes do mesmo ancestral. Seguindo esta metodologia, os cetáceos e peixes-bois são agrupados na Classe Mammalia, junto com os cachorros, gatos e seres humanos e todos os descendentes do ancestral mais antigo, que possuía glândulas mamárias e pelos. Desta forma, apesar de ainda ser muito popular, o termo Pisces caiu em desuso, por reunir as espécies em um grupo artificial, pois não possuem um ancestral único e exclusivo.

A classificação atual dos peixes é bastante complexa e envolve diversos nomes derivados do grego e latim que parecem difíceis à primeira leitura (Fig. 1). Os peixes são classificados em cinco grupos naturais: Cyclostomata; Chondrichthyes; Actinopterygii; Dipnoi; e Cladistia. Esses grupos são organizados a partir de hipóteses de relações de parentesco em grupos mais inclusivos. A Clado Cyclostomata (do grego *cyclo-*, redondo + *-stoma*, boca), inclui os peixes-bruxas e lampreias, é o grupo irmão do Clado Gnathostomata (do grego *gnatho-*, mandíbula + *-stoma*, boca), que são os vertebrados com arco mandibular e nadadeiras pares – peitorais e pélvicas, ou braços e pernas, respectivamente. Gnathostomata inclui as Classes Chondrichthyes (do grego *chondro-*, cartilagem + *-ichthyes*, peixes), ou seja, os peixes-cartilaginosos, e Osteichthyes (do grego *osteo-*, osso + *-ichthyes*, peixes).

O termo Osteichthyes foi proposto originalmente para incluir todos os peixes-ósseos e diferenciá-los dos tetrápodes. Porém, a hipótese atual é de que os tetrápodes formam um grupo natural com celacantos e os peixes pulmonados. Desta forma, o termo foi expandido para incluir também os tetrápodes e possui como principal característica a presença de ossos dérmicos e endocondrais. A Classe Osteichthyes é dividida nas Subclasses Actinopterygii (do latim *actino-*, raios + *-ptery*, nadadeira ou asa), os peixes com nadadeiras pares (peitoral e pélvica) unidas ao corpo por vários ossos pterigiais (atuns, robalos, lambaris, etc.), e Sarcopterygii (do latim *sarco-*, carne + *-ptery*, nadadeira ou asa), os vertebrados que possuem as nadadeiras pares (peitoral e pélvica) unidas ao corpo por um único osso, úmero e fêmur, respectivamente. A subclasse Sarcopterygii é composta pelos celacantos (Actinistia, do grego *actni-*, raios + *-istia*, teia, vela), peixes-pulmonados (Dipnoi, do grego *di-*, dois + *-pnoi*, respiração), e vertebrados com quatro pernas (Tetrapoda, do latim *-tetra*, quatro + *-poda*, pernas).

Neste capítulo, os nomes científicos das espécies são apresentados junto com os nomes comuns e um nível hierárquico mais abrangente entre parênteses – a terminação "-dae", indica família (ex. Cichlidae, Carangidae) e "-formes", indica ordem (ex. Cichliformes, Carangiformes).

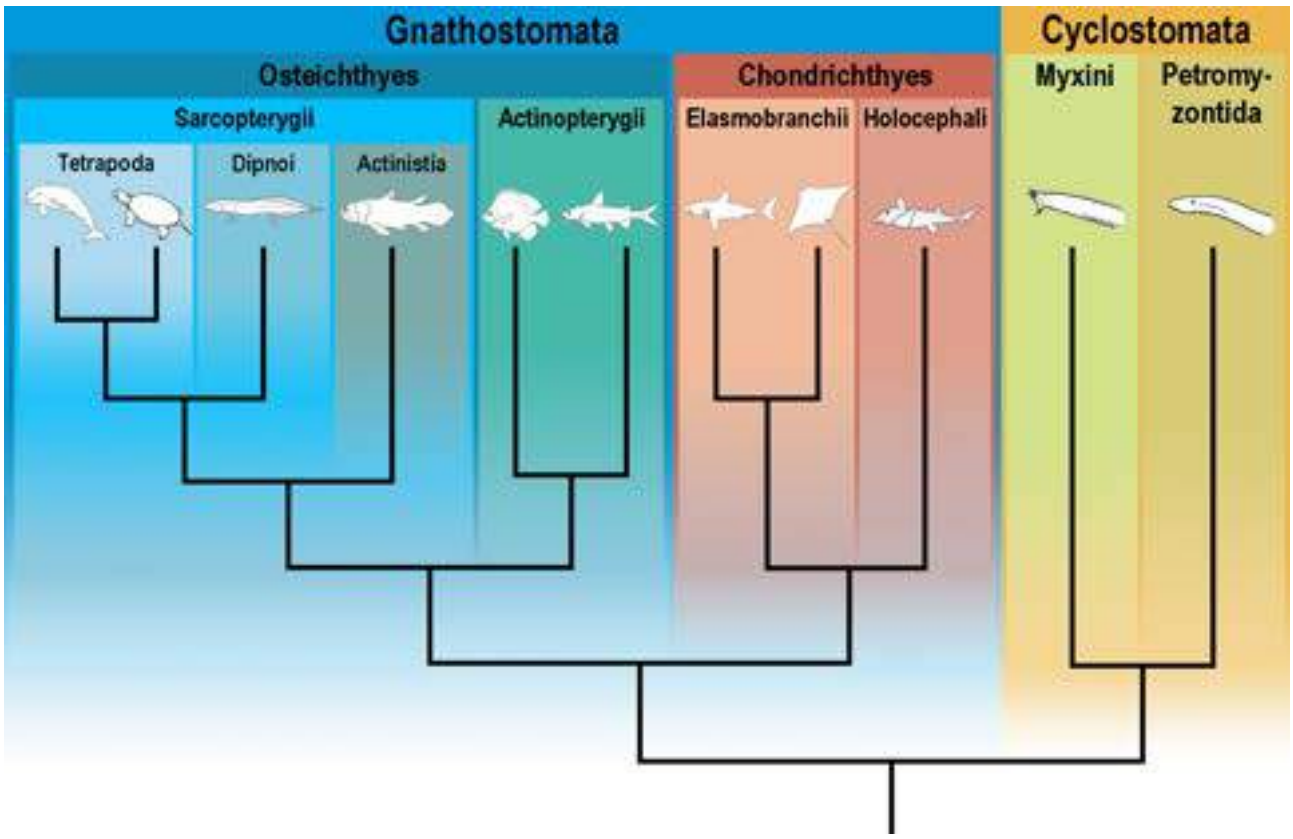



**FIGURA 1. Filogenia e classificação dos vertebrados, com ênfase nos grupos de peixes atuais.** *Baseado em Nelson et al. (2016) e Fricke et al. (2020).*

## 2. Cyclostomata - lampreias e peixes-bruxas

O Clado Cyclostomata inclui os peixes-bruxas ou feiticeiras (Myxiniformes) e lampreias (Petromyzontiformes). Esses dois grupos de peixes evoluíram em habitats muito diferentes, o que resultou em morfologias e histórias de vida bastante distintas. A maior parte das semelhanças entre eles são devido à retenção de características primitivas em vertebrados, como as ausências de estruturas de mastigação na boca, nadadeiras peitorais e pélvicas, e estruturas de revestimento do corpo. As poucas estruturas derivadas em comum entre esses grupos são relacionadas ao desenvolvimento da boca, que acabaram sendo minimizadas em detrimento às enormes diferenças entre eles. Assim, até bem pouco tempo eles eram classificados em grupos distintos até que a hipótese de eles compartilharem um ancestral único ganhou força com os adventos de técnicas moleculares (Heimberg *et al.*, 2010). O termo Cyclostomata não deve ser confundido com Agnatha (do grego *a-*, negação + *-gnatho*, mandíbula), que caiu em desuso por incluir vários grupos fósseis não relacionados, que também não possuem mandíbula.

A ordem Myxiniformes é composta por 80 espécies, pertencentes à uma única família, popularmente conhecidas como peixes-bruxas ou feiticeiras. Os peixes-bruxa possuem entre 18 cm (*Myxine kuoi* e *Myxine pequenoi*) e 1,27 metro (*Eptatretus goliath*). Todas as espécies são marinhas, habitam águas geladas das regiões temperadas e oceano profundo e possuem hábitos fossoriais, ou seja, vivem em tocas ou buracos no fundo dos mares. No Brasil, são conhecidas cinco espécies, todas de oceano profundo (Mincarone, 2000). Os peixes-bruxa são caracterizados por possuírem corpo alongado e liso (sem escamas), olhos rudimentares ou ausentes, apenas uma narina localizada acima da boca, e três ou quatro pares de tentáculos orais. A característica mais marcante deste grupo é a presença de células mucosas especializadas ao longo do corpo, capazes de produzir um muco de polissacarídeos que se expande em grandes volumes ao entrar em contato com a água e serve como mecanismo de defesa contra predadores como chernes e tubarões (Zinztel *et al.*, 2011).

Os peixes-bruxas são carniceiros, alimentando-se de restos de animais marinhos mortos que chegam ao fundo dos oceanos. Seu nome popular está relacionado com o hábito de entrarem nas carcaças de peixes fisgados em espinhéis que, eventualmente, morrem antes de serem retirados do mar pelos pescadores. Assim, os pescadores têm a desagradável surpresa de encontrar o pescado com suas entranhas comidas pelos peixes-bruxas. Apesar disto, os peixes-bruxas possuem um importante papel na cadeia alimentar do oceano profundo, por reciclar nutrientes provenientes de camadas superficiais e disponibilizá-los na teia trófica.

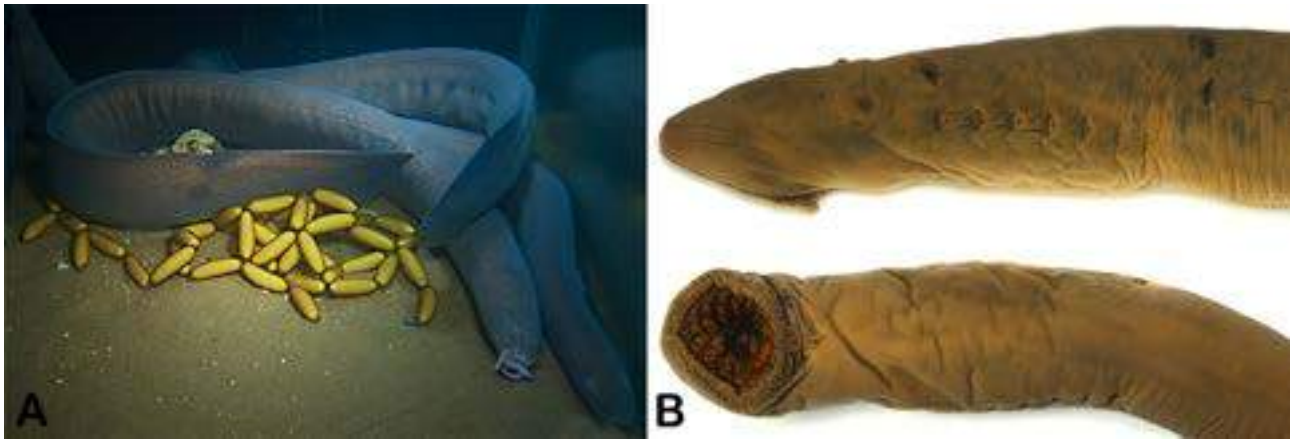



**FIGURA 2. Diversidade de Cyclostomata: A) peixe-bruxa,** *Eptatretus multidens* **(Myxiniformes); e B) lampreia-marinha,** *Petromyzon marinus* **(Petromyzontiformes).** *Fotos: Marcelo Melo.*

Os Petromyzontiformes são popularmente conhecidos como lampreias. Existem 40 espécies válidas que variam entre 13 cm (*Ichthyomyzon gagei*) e 1,2 metro (*Petromyzon marinus*). A maioria das espécies encontra-se distribuída em regiões temperadas do hemisfério Norte (Europa, Ásia e América

do Norte) e apenas duas espécies no hemisfério Sul, no Sul do Chile e Argentina – portanto, nenhuma espécie ocorre no Brasil (Renaud, 2011). As lampreias também possuem corpo alongado e liso, têm apenas uma narina localizada na parte dorsal da cabeça, além da ausência de nadadeiras pares e estruturas de mastigação. Os adultos possuem a boca em forma de ventosa, munida de numerosos e afiados dentes córneos, que é a principal característica do grupo. Várias espécies de lampreias são parasitas externos e se fixam temporariamente em peixes e cetáceos enquanto se alimentam da carne e fluidos corpóreos.

As lampreias possuem o ciclo de vida complexo, que envolve a utilização de diferentes habitats ao longo do desenvolvimento e a migração por grandes distâncias entre o ambiente dulcícola e marinho. As lampreias nascem nas cabeceiras de rios de médio e grande porte. As larvas, chamadas de amocete, são filtradores de zooplâncton, vivem enterradas no substrato e necessitam de água pura, corrente e com grande oxigenação. Ao longo do desenvolvimento, os amocetes descem o rio até que, ao atingirem a fase adulta, se metamorfoseiam nos adultos e migram para o ambiente marinho. Durante o período reprodutivo, as lampreias adultas param de se alimentar e migram novamente para as cabeceiras dos rios, onde desovam e, depois, morrem, completando ciclo em cerca de quatro anos.

Na América do Norte, a introdução não intencional da lampreia-marinha, *Petromyzon marinus*, nos grandes lagos causou um enorme impacto ambiental. A invasão ocorreu após a abertura do Canal do Erie, em 1825, para contornar as cataratas de Niágara, uma barreira natural, e possibilitar a navegação ao conectar os Lagos Superior, Michigan, Huron e Erie ao Lago Ontário e, consequentemente, ao oceano Atlântico (Smtih & Tibbles, 1980). Além de viabilizar a navegação, o Canal do Erie possibilitou também a passagem da lampreia-marinha, que conseguiu colonizar todos os Grandes Lagos Norte-Americanos, causando grandes impactos nas comunidades nativas de peixes e prejuízos financeiros estimados em U$7 bilhões anuais. Atualmente, os governos dos Estados Unidos e Canadá mantêm um programa de controle de pragas para minimizar esses danos[1].

## 3. Chondrichthyes

A Classe Chondrichthyes inclui cerca de 1.200 espécies organizadas em 192 gêneros, 54 famílias e 14 ordens distribuídas em todos os mares e oceanos do mundo (Nelson, 2016). No Brasil, existem mais de 90 espécies de tubarões, 90 de raias e cinco de quimeras, algumas delas descritas recentemente. Os Chondrichthyes são subdivididos em Elasmobranchii (do grego *elasmo-*, chapa metálica + *-branchii*, brânquia, em alusão às brânquias lamelares), que inclui os tubarões (Selachii) e raias (Batoidea), e Holocephali (do grego *hólos*, completa + *-képhalos*, cabeça, devido ao formato da cabeça), que inclui as quimeras. Diversas especializações morfológicas únicas entre os vertebrados caracterizam os Chondrichthyes, tais como a calcificação prismática do esqueleto cartilaginoso, dentes arranjados em fileiras com reposição contínua, corpo coberto por dentículos dérmicos, um órgão especializado em detectar campo elétrico composto pelas ampolas de Lorenzini, e as nadadeiras pélvicas dos machos modificadas em uma estrutura para fecundação interna, denominada clasper ou mixopterígio (Nelson *et al.*, 2016).

Entre os tubarões, as maiores espécies são o tubarão-baleia (*Rhincodon typus*), que pode chegar a medir 12 metros e pesar mais de 20 toneladas, o tubarão-peregrino (*Cetorhinus maximus*), com até 8 metros e 4,6 toneladas, e o tubarão-branco (*Carcharodon carcharias*), com até 6 metros e 6,6 toneladas. Entre as raias, as maiores espécies são a raia-manta (*Mobula birostris*), com até 7 metros de diâmetro de disco (entre uma ponta e outra das nadadeiras peitorais) e 3 toneladas e a raia-gigante-de-água-

[1] Para saber mais, acesse: <http://www.glfc.org/sea-lamprey.php>.

doce (*Urogymnus polylepis*), a mais longa, com 6 metros entre a ponta do focinho e a cauda e peso de 600 Kg. A maior espécie conhecida é o megalodon (*Carcharocles megalodon*), uma espécie já extinta que viveu entre 2,3 e 3,6 milhões de anos atrás, e tinha o tamanho estimado entre 13 e 20 metros e peso de 12 a 37 toneladas. A maioria das espécies, entretanto, não ultrapassa 1,5 metro de comprimento, sendo as menores o tubarão-lanterna (*Etmopterus perryi*), com apenas 18 cm de comprimento, e a raia-elétrica-colombiana (*Diplobatis colombiensis*), com 17 cm de comprimento (Compagno, 1984a, b).

De maneira geral, os Chondrichthyes são alvo constante de informações erradas e crendices populares, que serão desmistificadas neste capítulo. A primeira delas, é que são erroneamente tidos como peixes primitivos por causa do esqueleto cartilaginoso. De acordo com o registro fóssil, estima-se que o ancestral comum entre Chondrichthyes e Osteichthyes divergiu no Devoniano Inferior (400 milhões de anos) e, desde então ambos os grupos estão evoluindo até chegar nas espécies atuais, que possuem novidades evolutivas únicas de diversidade, morfologia, reprodução e hábitos de vida.

Outro mito é a "má reputação" devido a incidentes com seres humanos. Os Chondrichthyes possuem uma posição elevada na cadeia alimentar dos mares e, eventualmente, dos rios. Contudo, a maioria das espécies alimenta-se de peixes, lulas e crustáceos. Poucas espécies de tubarões incluem regularmente na dieta grandes vertebrados, como focas, lobos marinhos e tartarugas e, entre essas, apenas três são reconhecidas por causar incidentes fatais não provocados à seres humanos: o tubarão-branco (*Carcharodon carcharias*), o tubarão-tigre (*Galeocerdo cuvier*) e o tubarão-cabeça-chata (*Carcharhinus leucas*). Isso corresponde a menos de 0,25% de todos os Chondrichthyes! Outro tipo de acidente que é ainda mais comum, é causado por várias espécies de raias, alguns tubarões e pelas quimeras, que possuem ferrões ou espinhos como estruturas de defesa e podem causar uma experiência bastante dolorosa quando molestadas ou pisadas. De qualquer forma, esses incidentes acontecem apenas quando o homem invade o ambiente em que esses animais vivem. Por outro lado, os peixes-cartilaginosos são alvo de pesca implacável que está levando várias espécies ao desaparecimento.

Todas as espécies de quimeras, a maior parte dos tubarões e das raias são marinhos, mas cerca de 170 espécies de tubarões e raias utilizam os estuários ou são obrigatoriamente de água doce (Compagno & Cook, 1995). Entre as raias obrigatoriamente de água doce, a família Potamotrygonidae é a mais diversificada com 33 espécies distribuídas nas bacias Amazônica e do rio Paraná, mas algumas espécies da família Dasyatidae ocorrem nos rios entre o Sul da Ásia e Austrália (Carvalho *et al.*, 2003; Compagno, 2002). Entre os tubarões, apenas uma espécie, *Glyphis gangeticus*, que ocorre no sudeste asiático (Bangladesh, Índia, Mianmar e Bornéo) é exclusiva de água doce, mas há várias espécies que usam os estuários para alimentação, reprodução e crescimento dos jovens. O tubarão-cabeça-chata (*Carcharhinus leucas*), é a espécie marinha com maior tolerância à água doce, sendo frequentemente encontrada em estuários, grandes rios e lagos em várias partes do mundo, como em Angola, África do Sul, Austrália, Brasil, Irã, Estados Unidos, Nicarágua e, até mesmo, em Iquitos, no Peru, e Letícia, na Bolívia, cerca de 4.000 Km à montante da foz do rio Amazonas (Carvalho & McEachran, 2003; Li *et al.*, 2015).

Todas as espécies de Chondrichthyes realizam fecundação interna. Existem espécies ovíparas, ou seja, que depositam ovos coriáceos, e vivíparas, quando embrião é gerado dentro do útero da mãe. Nos dois casos, o desenvolvimento é direto e o filhote já nasce com as características de adulto. A forma com que o embrião obtém alimento durante o desenvolvimento é bastante diversificada e reflete a complexa história evolutiva do grupo. O embrião lecitotrófico alimenta-se apenas dos nutrientes do saco vitelínico (gema do ovo), como em todas as espécies ovíparas (quimeras, tubarões Heterodontiformes e raias Rajidae) e algumas espécies vivíparas (pelo menos um representante de cada ordem de raia ou tubarão, exceto nos tubarões Heterodontiformes e Lamniformes e nas raias Rajiformes).

Para a maior parte das espécies vivíparas, a mãe fornece alimento para o embrião após ele consumir o saco vitelínico, das seguintes maneiras: macrófito (todos os tubarões Lamniformes e

alguns Carcharhiniformes) o embrião alimenta-se de ovos não fecundados (oofagia) e, até mesmo, de outros embriões menores (embriofagia), como é o caso do tubarão-mangona (*Carcharias taurus*); histotrófico (tubarões Squaliformes e Carchariniformes e raias Myliobatiformes), o embrião alimenta-se de secreções produzidas pelo útero da mãe; ou placentotrófico (vários tubarões Carcharhiniformes), o saco vitelínico se transforma em uma placenta conectada ao útero da mãe através de um cordão umbilical, similar ao dos mamíferos placentários (Musick & Ellis, 2005).

## 3.1 Tubarões - Selachii

Atualmente, são conhecidas mais de 400 espécies de tubarões, também conhecidos como cações, pertencentes à 33 famílias e nove ordens (Nelson *et al.*, 2016). Os tubarões são caracterizados por possuírem de cinco a sete pares de fendas branquiais, localizadas lateralmente laterais no corpo, e as nadadeiras peitorais não fusionadas à cabeça, como nas raias. A maioria das espécies possui duas nadadeiras dorsais, às vezes com um espinho em cada nadadeira, e uma nadadeira anal, embora esta seja ausente em algumas espécies. A boca é normalmente ventral ou subterminal. O corpo, normalmente, é fusiforme e bastante hidrodinâmico, mas os cações-anjos (Squatiniformes), por exemplo, possuem o corpo achatado dorso-ventralmente, semelhante às raias. São amplamente distribuídos em todos os oceanos, do Ártico às ilhas subantárticas, nas regiões costeiras próximas a recifes, praias e em baías rasas e fechadas, em águas oceânicas distantes da costa, e em grandes profundidades, sendo que algumas espécies podem ocorrer abaixo dos 2.000 m de profundidade. São mais diversos em águas costeiras de mares tropicais e de clima quente, sendo que a maior diversidade do grupo se encontra no Oeste dos oceanos Índico e Pacífico.

Todos os tubarões são predadores, porém existe uma grande variedade de tipos de presas que fazem parte da dieta de diferentes espécies. Curiosamente, as maiores espécies, o tubarão-baleia (*Rhincodon typus*) e o tubarão-peregrino (*Cetorhinus maximus*), são oceânicos e pelágicos e se alimentam de plâncton e pequenos organismos pelágicos. Várias espécies, como o tubarão-lixa (*Ginglymostoma cirratum*) e o tubarão-azul (*Prionace glauca*), têm suas dietas compostas principalmente por pequenos peixes, crustáceos e moluscos. Os tubarões-charutos (Etmopteridae) conseguem arrancar pequenos pedaços de animais maiores, como cetáceos e lulas-gigantes, deixando cicatrizes características. Já os grandes predadores, como o tubarão-tigre (*Galeocerdo cuvier*), o tubarão-cabeça-chata (*Carcharhinus leucas*) e o tubarão-branco, (*Carcharodon carcharias*), são generalistas e se alimentam de outros elasmobrânquios, peixes-ósseos, tartarugas-marinhas, cetáceos e focas.

## 3.2 Raias - Batoidea

As raias, ou arraias, compõem o grupo mais diversificado entre todos os Chondrichthyes, com mais de 530 espécies, em 17 famílias e quatro ordens. As raias são fáceis de distinguir por possuírem o corpo achatado dorso-ventralmente, cinco ou seis fendas branquiais localizadas na região ventral do corpo, nadadeiras peitorais conectadas ao crânio, e nadadeira anal ausente (Nelson *et al.*, 2016). As raias possuem uma grande diversidade morfológica com diversas características únicas, tais como a cauda afilada, sem a nadadeira caudal e com um ou mais espinhos serrilhados que são utilizados para defesa nas raias-manta, raias-de-água-doce e raias-prego (Myliobatiformes); grandes projeções labiais nas raias-manta (Mobulidae); um órgão especializado em produzir descargas elétricas nas raias-elétricas (Torpediniformes); e o rostro com grandes espinhos laterais nos peixes-serra (Pristiformes).

As raias também são amplamente distribuídas em todos os mares e oceanos, em diversos tipos de habitat. Assim como os maiores tubarões, as gigantescas raias-manta (Mobulidae) são pelágicas oceânicas e se alimentam de pequenos organismos pelágicos. A maioria das raias, entretanto, possui

hábitos demersais na plataforma continental, a boca é ventral, os dentes achatados especializados em triturar animais que vivem no substrato, como moluscos e crustáceos (Helfman *et al.*, 2009).

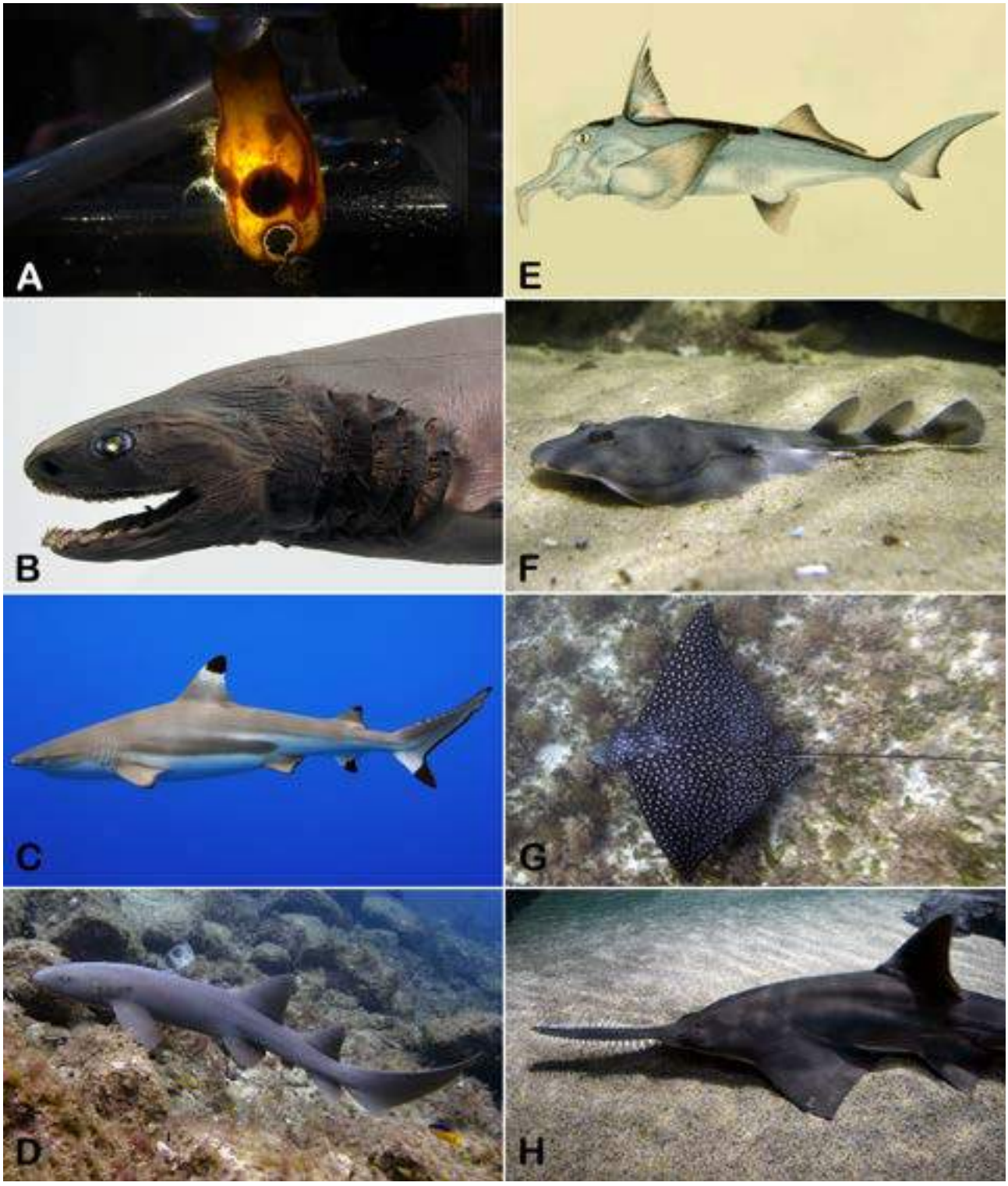



**FIGURA 3. Diversidade de Chondrichthyes: A) ovo de tubarão-gato,** *Scyliorhinus* **sp. (Carcharhiniformes); B) tubarão-cobra,** *Chlamydoselachus anguineus* **(Hexanchiformes); C) tubarão-galha-preta-de-recife,** *Carcharhinus melanopterus* **(Carcharhiniformes); D) tubarão-lixa,** *Ginglymostoma cirratum* **(Orectolobiformes); E) quimera-elefante-do-pacífico,** *Callorhinchus milii* **(Chimaeriformes); F) raia-torpedo,** *Narcine bancroftii* **(Torpediniformes); G) raia-chita-pintada,** *Aetobatus narinari* **(Myliobatiformes); e H) peixe-serra-de-dentes-grandes,** *Pristis microdon* **(Pristiformes).** *Fotos: A-D, F-H, Marcelo R. S. Melo; E, modificado de McCoy, 1886.*

### 3.3 Quimeras

As quimeras, também chamadas de peixe-coelho ou tubarão-fantasma, pertencem à um grupo pouco conhecido que inclui cerca de 50 espécies. As quimeras são fáceis de serem diferenciadas dos demais elasmobrânquios por possuírem um opérculo cobrindo as brânquias, cartilagens da boca não protráteis e uma placa dentígera dorsal e ventral na boca. As quimeras habitam mares temperados e oceano profundo, o que faz com elas raramente sejam capturadas no Brasil (Nelson *et al.*, 2016; Helfman *et al.*, 2009).

## 4. Sarcopterygii - peixes de nadadeira lobada

Sarcopterygii, também conhecidos como peixes de nadadeira lobada, incluem apenas dois grupos de peixes viventes, os celacantos e os peixes-pulmonados. A maior parte das espécies incluídas neste grupo são os tetrápodes – anfíbios, tartarugas, lagartos, cobras, crocodilos, aves e mamíferos.

Os fósseis mais antigos dos celacantos e dos peixes-pulmonados são do Devoniano Superior (350 milhões de anos atrás) e a maior diversidade de fósseis é do Cretáceo (145-66 milhões de anos atrás). Acreditava-se que os celacantos estivessem extintos até que, em 1938, um exemplar foi pescado na África do Sul. A espécie foi batizada pelo ictiólogo sul-africano James B. Smith como *Latimeria chalumnae* e é considerada até hoje como uma das maiores descobertas na história da ictiologia (Weinberg, 2001). Para surpresa de todos, 60 anos depois, em 1998, uma segunda espécie foi descoberta na Indonésia, desta vez descrita como *Latimeria menadoensis*.

Os peixes-pulmonados são os peixes viventes mais próximos dos tetrápodes, chamados então de grupo-irmão. São reconhecidas seis espécies, todas de água doce: uma na América do Sul; uma na Austrália; e quatro na África.

No Brasil, a pirambóia (*Lepidosiren paradoxa*) é relativamente comum no Pantanal Mato-Grossense e em outras partes da bacia do rio Paraná e na bacia Amazônica (Nelson *et al.*, 2016).

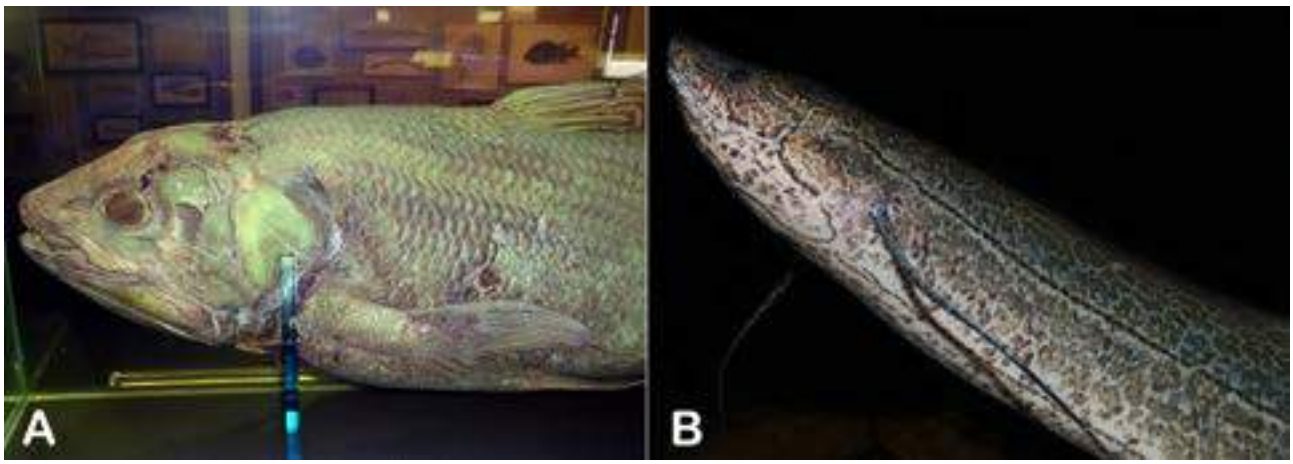



**FIGURA 4. Diversidade de peixes da Classe Sarcopterygii: A) celacanto,** *Latimeria chalumnae* **(Actinistia); e B) peixe-pulmonado-africano,** *Protopterus aethiopicus* **(Dipnoi).** *Fotos: Marcelo Melo.*

## 5. Actinopterygii - peixes de nadadeira com raios

Quando se pensa em um peixe, normalmente se pensa em um peixe actinopterígeo. Este é o maior grupo de vertebrados, com mais de 30.000 espécies organizadas em 4.440 gêneros, 469 famílias e entre 67 e 72 ordens, dependendo da classificação (Nelson *et al.*, 2016, Betancur *et al.*, 2017).

O maior peixe-ósseo é o peixe-remo (*Regalecus glesne*), com até 8 metros de comprimento. Os mais pesados são os peixes-lua (*Mola mola* e *Mola alexandrini*), que chegam até 3,3 metros e 2,8 toneladas. Merecem menção honrosa os esturjão-beluga (*Huso huso*), com até 7,2 metros e duas toneladas, e o pirarucu (*Arapaima gigas*), a maior espécie de peixe de água doce brasileira, com até 4,5 metros e 300 Kg. Por outro lado, os Actinopterygii também abrigam algumas das menores espécies de vertebrados conhecidos, dentre os quais estão o pequeno peixe asiático *Paedocypris progenetica*, com até 10,3 mm, e o macho do peixe-pescador (*Photocorynus spiniceps*), com apenas 6,2 mm – curiosamente, as fêmeas desta espécie são muito maiores, podendo medir até 50 mm.

A maior parte dos peixes actinopterígeos realiza fecundação externa, ou seja, gametas masculinos e femininos são liberados na água, onde acontece a fecundação. Os ovos planctônicos são carregados pela água, mas várias espécies possuem cuidado parental elaborado. Várias espécies produzem e cuidam de ninhos que podem ser feitos de bolha de ar (peixes-de-briga, *Betta splendens*), areia (acarás, família Cichlidae), rocha (peixes-donzelas, família Pomacentridae), algas e plantas (alguns góbios, família Gobiidae) e até mesmo dentro de mexilhões (família Cyprinidae).

Os machos de cavalos-marinhos e peixes-cachimbo (Syngnathidae) possuem estruturas especiais para guardar os ovos após a fecundação. Algumas espécies de acarás, bagres-marinhos, aruanã e apogons guardam os ovos e os filhotes na boca. Além de cuidar do ninho, o casal de acará-disco produz um muco rico em lipídios no corpo que "amamenta" a ninhada durante o desenvolvimento.

Os barrigudinhos e guppies (Poeciliidae) e algumas espécies de brótulas (Ophidiiformes) realizam fecundação interna e os embriões lecitotróficos se desenvolvem no útero da mãe. A maior parte das espécies possuem desenvolvimento indireto, mas a larva possui denominações específicas apenas em alguns grupos, como alevino para os salmões (Salmoniformes) e leptocéfala nos peixes Elopomorpha, um grupo que compreende as enguias (Anguilliformes), ubaranas (Albuliformes) e tarpões (Elopiformes). Por um erro de tradução, o termo alevino acabou sendo amplamente difundido no Brasil, como a larva de qualquer espécie de peixe e é bastante utilizado na piscicultura.

A determinação do sexo em peixes pode ter controle genético ou ambiental, com genes localizados nos cromossomos sexuais XY (como em mamíferos), ZW (como em aves) ou em cromossomos autossômicos. A temperatura de incubação dos ovos influência na determinação do sexo de várias espécies, como por exemplo a tilápia-do-nilo (*Oreochromis niloticus*).

Muitas espécies trocam de sexo após a maturação inicial, ou seja, são hermafroditas. O hermafroditismo protogínico, quando o indivíduo nasce fêmea e se transforma em macho, é comum entre os como os peixes-palhaços (*Amphiprion* spp., Pomacentridae). O hermafroditismo protândrico, quando o indivíduo nasce macho e se transforma em fêmea, é comum nos badejos, garoupas, mero (Epinephelidae e Serranidae) e bodiões (Labridae). A tilápia-do-nilo (*Oreochromis niloticus*, Cichlidae), possui sexo determinado pelos cromossomos XY, mas pode ser revertido em qualquer direção por condições ambientais e hormonais, e no michole-de-areia, (*Diplectrum radiale*, Serranidae), o hermafroditismo é simultâneo, com as gônadas feminina e masculina funcionais ao mesmo tempo (Devlin & Nagahama, 2002; Kobayashi *et al.*, 2008).

## 6. Habitats e diversidade dos peixes

Os peixes estão distribuídos em ambientes de água doce, salobros e marinhos. Os peixes dulcícolas representam cerca de 40% das espécies e a maior parte das espécies está concentrada nos rios e lagos tropicais da bacia Amazônica e do rio Paraná na América do Sul, sudeste asiático, e região meridional da África, incluindo os lagos Malawi, Tanganyika e Victoria. Os rios intermitentes e brejos temporários são alguns dos ambientes mais hostis para a vida na água doce. Para sobreviver nesses ambientes os peixes desenvolveram adaptações anatômicas, fisiológicas e de estratégia de vida: a piramboia hiberna em um casulo de lama; o bagre-africano possui respiração aérea; e os peixes-anuais possuem um ciclo de vida que dura de 4-6 meses e, antes de morrer durante a estiagem, depositam os ovos resistentes ao ressecamento na lama. Outros ambientes críticos são as cavernas e lençóis freáticos, onde não há penetração de luz, o alimento é escasso e a temperatura é fria. Várias espécies de bagres e lambaris evoluíram para sobreviver nesse tipo de ambiente, desenvolvendo mais os sentidos do olfato e percepção de vibração na água para capturarem o alimento, e normalmente são cegos e sem pigmentação.

O ambiente marinho possui cerca de 58% das espécies de peixes. A maior diversidade das espécies está concentrada em regiões tropicais de água rasa, como os recifes de corais e manguezais no triângulo da biodiversidade do Indo-Pacífico, grande barreira de corais da Austrália, Mar Vermelho e Mar do Caribe. Apenas 1% das espécies, chamadas de eurialinas, possuem mecanismos de regulação osmótica que as permitem transitar entre os ambientes marinhos, dulcícolas ou viver em água salobra. Alguns dos ambientes marinhos são críticos para a vida, como o oceano profundo, onde a penetração de luz é mínima ou ausente e a pressão da água é até 1.300 vezes maior do que a atmosférica. Os peixes de oceano profundo possuem adaptações fisiológicas para aguentarem essas condições e, em diversas espécies, desenvolveram fotóforos que produzem bioluminescência. Outros ambientes extremos são o Ártico e Antártica, onde os períodos sem luz podem chegar a 6 meses e a temperatura da água é de até -1,9°C. As espécies que vivem nesses ambientes possuem proteínas anticongelantes no sangue. Nas próximas seções, serão abordados alguns desses ambientes.

### 6.1 Peixes dulcícolas

Estima-se que apenas 0,0093% de toda água do planeta esteja disponível nos rios, lagos, arroios, igarapés, pântanos, brejos e veredas que compõem os ecossistemas dulcícolas. Apesar do pequeno volume quando comparado aos oceanos, esses ambientes possuem uma complexa história geológica, grande heterogeneidade de habitats e alto grau de isolamento, que possibilitaram a diversificação de mais de 17.800 espécies de peixes. Dessas, cerca de 3.000 espécies ocorrem no Brasil, que é considerado o país com maior riqueza de peixes dulcícolas no mundo (Reis *et al.*, 2016).

Os peixes primários de água doce são aqueles que estão confinados nos rios e lagos, cujo ancestral evoluiu nesses ambientes e, fisiologicamente, não possuem tolerância à água salgada, por exemplo os lambaris e piranhas (Characiformes), cascudos e mandis (Siluriformes) e as carpas (Cypriniformes). Os peixes secundários de água doce, possuem alguma tolerância à água salgada, e normalmente derivam de grupos marinhos que secundariamente invadiram a água doce, como as raias (Potamotrygonidae), os guarus (Poeciliidae) e os ciclídeos (Cichlidae) (Myers, 1938).

A diversidade de peixes da América do Sul é resultado da presença de grandes bacias hidrográficas dos rios Amazonas, Paraná, Orinoco e São Francisco, aliado aos complexos eventos geológicos causados pelo movimento das placas litosféricas que resultaram na separação entre América do Sul e África e soerguimento da Cordilheira dos Andes.

No Brasil, os ambientes dulcícolas são dominados por três ordens pertencentes à um grupo chamado Ostariophysi, que possui as quatro primeiras vértebras modificadas para conectar a bexiga natatória à orelha interna: Siluriformes (cascudos, bagres, mandis), com cerca de 1.300 espécies; Characiformes (lambaris, piranhas e curimbatás), com cerca de 1.000 espécies; e Gymnotiformes (turviras, ituís e poraquês), com cerca de 300 espécies. Além dessas três ordens, merecem destaque pela diversidade os Cyprinodontiformes (peixes-anuais e barrigudinhos), com 307 espécies; os Cichliformes (acarás e tucunarés), com 270 espécies; e, pelo tamanho e importância ecológica, os Osteoglossiformes (pirarucu e aruanã), com sete espécies (Buckup *et al.*, 2007; Menezes *et al.*, 2020).

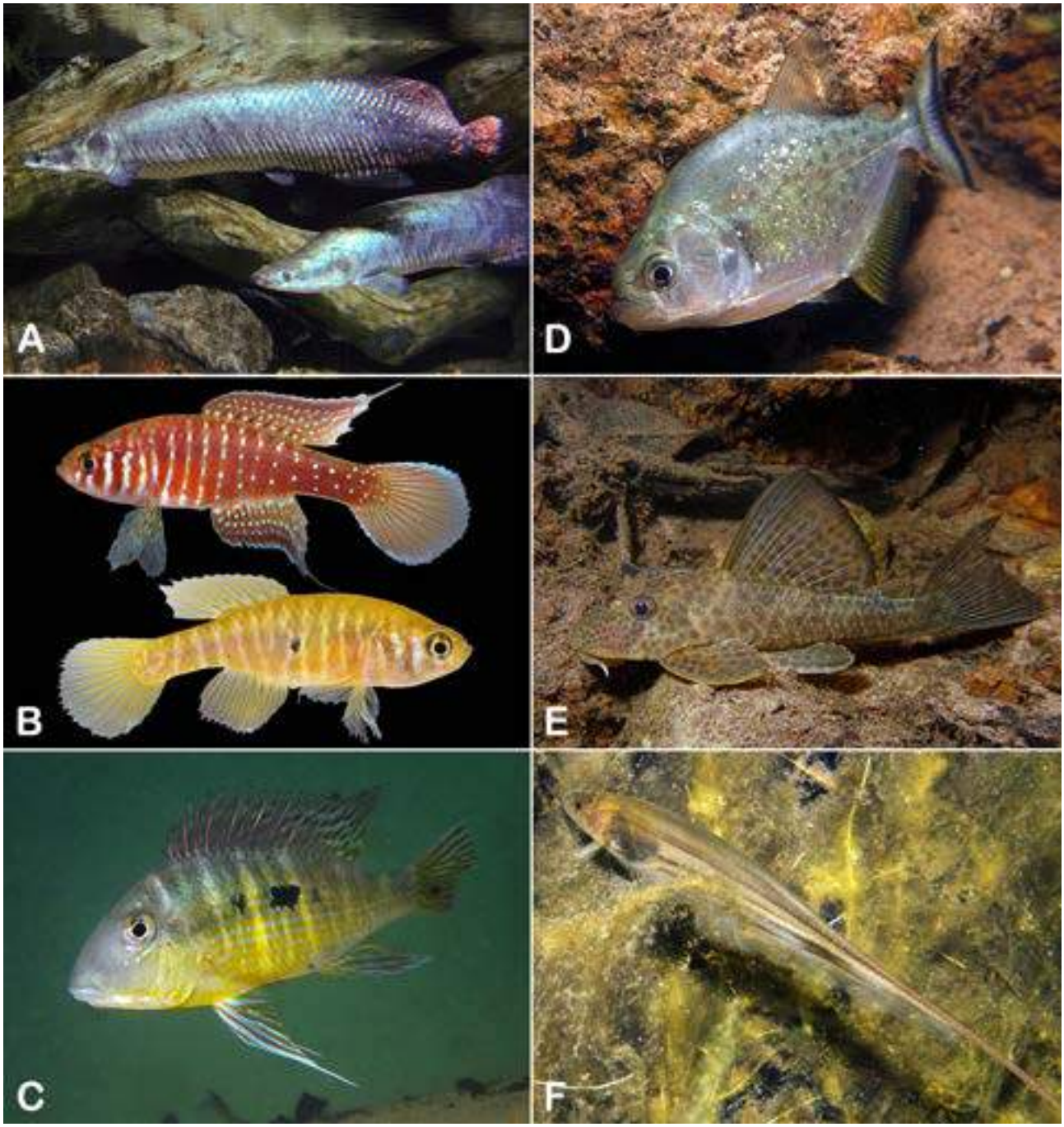



**FIGURA 5. Diversidade de peixes dulcícolas da Classe Actinopterygii: A) pirarucu,** *Arapaima gigas* **(Osteoglossiformes); B) peixe-anual,** *Simpsonichthys boitonei* **(acima macho, abaixo fêmea; Cyprinodontiformes); C) acará,** *Geophagus meambi* **(Cichliformes); D) piranha-catirina,** *Pygocentrus maculatus* **(Characiformes); E) cascudo,** *Hypostomus* **sp. (Siluriformes); e F) ituí-transparente,** *Eigenmania trilineata* **(Gymnotiformes).** *Fotos: Marcelo Melo.*

Algumas espécies não nativas foram introduzidas no Brasil e acabaram se tornando invasoras, causando prejuízos à fauna brasileira: a carpa (*Cyprinus carpio*), originária da China; a tilápia-do-nilo (O*reochromis niloticus*) e a tilápia-saint-peter (*Coptodon rendalli*), da África; a truta-arco-íris (*Oncorhynchus mykiss*), da América do Norte; e o guppy ou lebiste (*Poecilia reticulata*), da Venezuela.

## 6.2 Peixes costeiros

Os peixes costeiros são aqueles que habitam a região nerítica, ou seja, a zona marinha localizada acima da plataforma continental, entre 0 e 200 metros de profundidade. No Brasil, a largura da plataforma continental é extremamente variável, com cerca de 200 km nas regiões Sul, Sudeste, no Banco de Abrolhos e ao largo da foz do Rio Amazonas a até apenas 6–10 km, na maior parte do Nordeste. A plataforma continental é uma região que combina a alta incidência de luz solar com grande aporte de nutrientes, portanto possui alta produtividade primária que dá suporte à grande biomassa de peixes. Também é uma região com grande heterogeneidade de habitats, como os estuários, fundos arenosos ou lamosos, poças de maré e recifes (Helfman *et al*., 2009).

Metade da diversidade de peixes marinhos é costeira, incluindo diversas espécies comerciais. As espécies pelágicas vivem coluna d'água e podem ser planctófagas, como as manjubas (Engraulidae), sardinhas (Clupeidae) e as raias-manta (Mobulidae), ou predadoras, como a barracuda (*Sphyraena barracuda*, Scombriformes) e o peixe-espada (*Trichurus lepturus*, Scombriformes). Muitas espécies oceânicas pelágicas também ocorrem nas áreas mais profundas da plataforma continental (ver a seguir). As espécies demersais são aquelas que vivem próximo ao fundo e, normalmente, são predadoras como a merluza (*Merluccius hubbsi*, Gadiformes), corvinas e pescadas (várias espécies da família Sciaenidae) e os linguados (várias espécies da ordem Pleuronectiformes).

## 6.3 Peixes estuarinos

Os estuários são ecossistemas costeiros de transição entre os rios e o mar. Esses ambientes estão sob influência diária das marés e sazonal de chuvas no continente, o que faz com que tenham grande variação de salinidade, pH, sedimentos em suspensão, oxigênio dissolvido e temperatura. O manguezal é um dos principais biomas tropicais estuarinos de alta produtividade e estão distribuídos, no Brasil, entre o Amapá e Santa Catarina (ICMBio, 2018a).

Apenas as espécies diádromas possuem especializações fisiológicas que as possibilitam viver neste ambiente, várias delas possuem importância econômica. Existem três tipos diferentes de peixes diádromos: anádromo, catádromo e anfídromo. Os peixes anádromos nascem e se desenvolvem na água doce ou salobra, passam a vida adulta no mar e depois voltam para se reproduzir, como os salmões (Salmoniformes) e lampreias (Petromyzontiformes). No Brasil, a entrada das manjubas ou pilombetas (*Anchoa* spp. e *Anchoviella* spp.) nos estuários durante o período reprodutivo representa uma importante fonte de renda para as comunidades de pescadores tradicionais. As espécies catádromas fazem o caminho contrário, nascem no mar, entram nos estuários e rios para se desenvolver, e depois voltam para o mar durante a reprodução, como os robalos (*Centropomus* spp.), tainhas e paratis (*Mugil* spp.). As espécies anfídromas possuem maior flexibilidade e transitam bem entre os ambientes marinhos e dulcícolas, porém várias são residentes nos estuários, como o peixe-rei (*Atherinella brasiliensis*), o aimoré (*Dormitator maculatus*) e o cavalo-marinho (*Hippocampus reidi*) (Helfman *et al*., 2009).

## 6.4 Peixes recifais

Os peixes recifais são aqueles que vivem em fundos consolidados de origem abiótica (costões rochosos, rochas vulcânicas e arenitos) ou biótica (corais e hidrocorais, esponjas e algas calcáreas). Os recifes estão amplamente distribuídos em mares tropicais de água rasa e oligotrófica, porém ocupam uma área de menos de 1% dos oceanos. Estima-se que os recifes abriguem cerca de 25% de toda a diversidade marinha, incluindo 4.000 espécies de peixes e 800 espécies de corais. Do ponto de vista econômico, também é um ambiente extremamente relevante, com 1 bilhão de pessoas se beneficiando dos recifes como fonte de alimento e de renda por meio do turismo (Mora, 2015).

**FIGURA 6. Diversidade de peixes marinhos da Classe Actinopterygii: A) moreia,** *Echidna catenata* **(Anguilliformes); B) sardinha-cascuda,** *Harengula clupeola* **(Clupeiformes); C) aimoré,** *Dormitator maculatus* **(Gobiiformes); D) cavalo-marinho,** *Hippocampus reidi* **(Syngnathiformes); E) garoupa-verdadeira,** *Epinephelus marginatus* **(Perciformes); e F) peixe-anjo-rainha,** *Holacanthus ciliaris* **(Perciformes).** *Fotos: Marcelo Melo.*

Algumas espécies de peixes recifais chamam a atenção pelo colorido exuberante, que é importante para a camuflagem em meio ao colorido das algas, esponjas e corais, pode indicar dimorfismo sexual, ou ser utilizado para atrair a atenção de outras espécies, no caso dos peixes limpadores, como os peixes-borboleta (Chaetodontidae), peixes-anjo (Pomacanthidae), peixes-donzela e peixes-palhaço

(Pomacentridae), bodiões e peixes-papagaio (Labridae), peixes-cirurgião (Acanthuridae) e góbios (Gobiidae) (Sazima *et al.*, 2013).

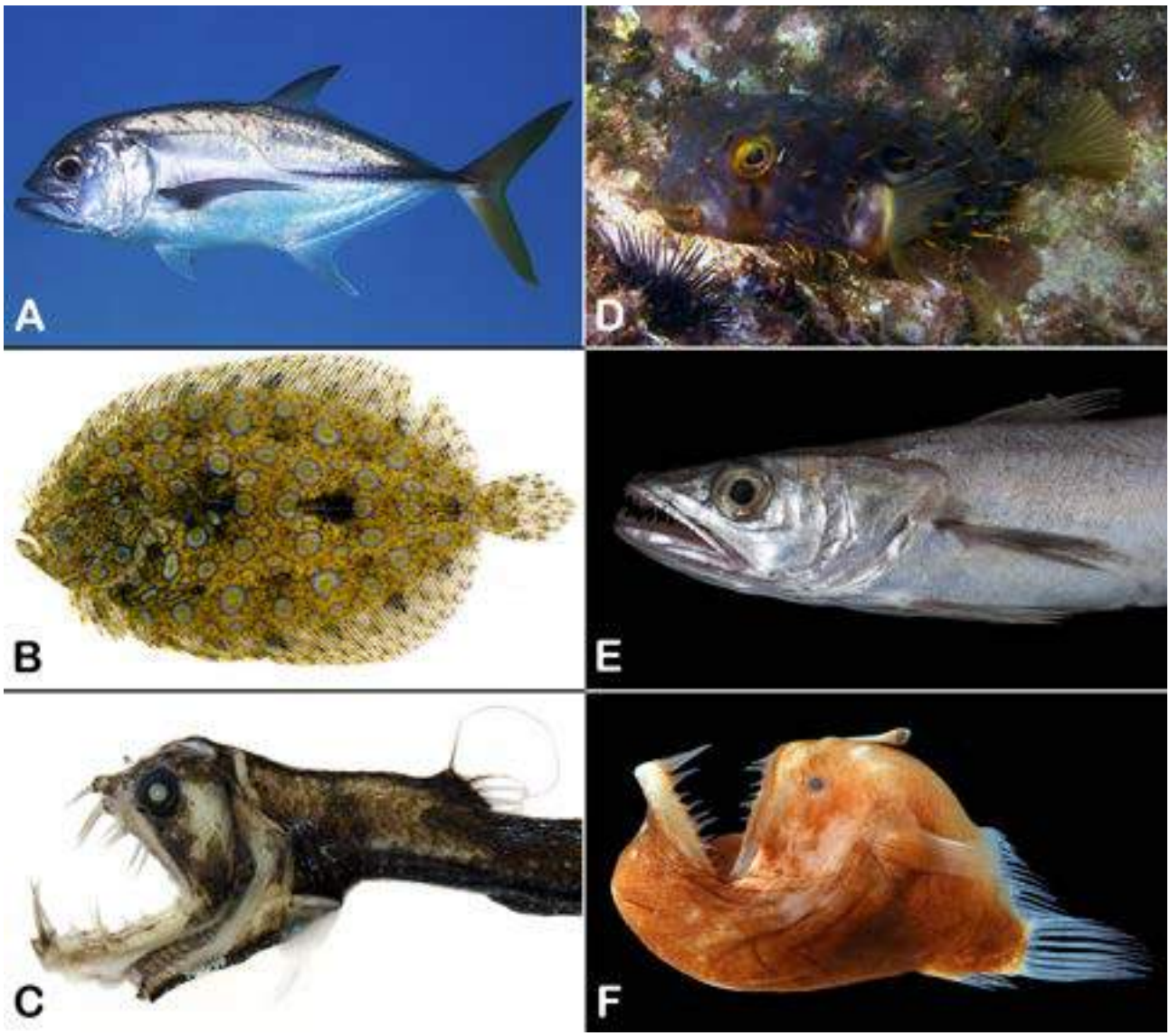



**FIGURA 7. Diversidade de peixes marinhos da Classe Actinopterygii: A) xaréu-branco,** *Caranx hippos* **(Carangiformes); B) linguado,** *Bothus ocellatus* **(Pleuronectiformes); C) peixe-dragão,** *Chauliodus sloani* **(Stomiiformes); D) baiacu-de-espinho,** *Diodon hystrix* **(Tetraodontiformes); E) merluza,** *Merluccius hubbsi* **(Gadiformes); e F) peixe-pescador,** *Melanocetus johnsonii* **(Lophiiformes).** *Fotos: Marcelo Melo.*

O Brasil abriga todos os recifes do Atlântico Sul ocidental, distribuídos desde o Amapá até Santa Catarina, incluindo o Atol das Rocas e os arquipélagos de Fernando de Noronha, São Pedro e São Paulo e Vitória-Trindade. Nesta área, foram registradas 733 espécies de peixes recifais, sendo 27% endêmicas, ou seja, possuem distribuição restrita.

As famílias mais diversificadas são Carangidae (35 espécies, como pampos e xaréus), seguida de Gobiidae (31 espécies, como os góbios e dormidores), Epinephelidae (25 espécies, como as garoupas e o mero) e Serranidae (25 espécies, como as garoupas e micholes). Por ser um ambiente complexo, os recifes compreendem espécies de todos os níveis e nichos tróficos. No Brasil, 60% das espécies alimentam-se de pequenos invertebrados, como esponjas, corais, crustáceos e moluscos (peixes-anjo, bodiões e peixes-borboleta), 14 % é planctófagas (sardinhas, manjubas e peixes-sargentinho), 12% é herbívora (peixes-cirurgião, marias-da-toca e algumas espécies de peixes-donzela), e 12 % macrocarnívoras (garoupas e barracudas) (Pinheiro *et al.*, 2018).

## 6.5 Peixes oceânicos epipelágicos

A província oceânica epipelágica está localizada a partir da quebra da plataforma continental e compreende a porção da coluna de água até 200 metros de profundidade (vide capítulo 1 - **A Vida no Mar**). Essa região corresponde à zona fótica dos oceanos, onde a luz solar consegue penetrar em níveis suficientes para a produção de fotossíntese pelas algas. A região oceânica também é caracterizada pelo baixo aporte de nutrientes e, portanto, baixa produtividade primária. A diversidade de peixes também é menor quando comparada às outras regiões, há pouco mais de 360 espécies, equivalente a 1,3% dos peixes marinhos, pertencentes à cinco famílias de elasmobrânquios e 20 de peixes-ósseos. Algumas das adaptações das espécies oceânicas incluem o corpo hidrodinâmico, de formato fusiforme com nadadeira caudal lunada ou furcada, capaz de nadar em grandes velocidades, taxa metabólica alta e, em algumas espécies, endotermia (opah, atuns e tubarão-mako) (Bond, 1996; Helfman *et al.*, 2009). Várias espécies oceânicas possuem bom valor comercial e são alvo de pesca direcionada.

As espécies oceanódromas são pelágicas e realizam grandes migrações durante a vida. As espécies planctófagas são filtradoras e alimentam-se principalmente de como as sardinhas e anchovas (Clupeidae) e peixes-voadores (cerca de 70 espécies da família Exocoetidae). Algumas espécies alimentam-se exclusivamente águas-vivas (Cnidaria), como os peixes-lua (cinco espécies da família Molidae), o peixe-remo (*Regalecus glesne*, Lampriformes), e o opah (*Lampris guttatus*, Lampriformes). A maioria das espécies, entretanto, é predadora incluindo o tubarão-azul (*Prionace glauca*, Carcharhinidae), tubarão-raposa (*Alopias vulpinus*), e tubarão-mako (*Isurus oxyrinchus*), cerca de 10 espécies de marlins e agulhões (Istiophoridae), a meca (*Xiphias gladius*, Xiphiidae), os atuns, bonitos, cavalas e cavalinhas (Scombridae) e o dourado-do-mar (*Coryphaena hippurus*, Coryphaenidae).

## 6.6 Peixes de oceano profundo

O oceano profundo é delimitado pela quebra da plataforma continental e profundidades maiores que 200 metros. Essa região representa 95% do volume dos oceanos, que têm profundidade média de 3.800 metros, e é o maior e menos conhecido de todos os ecossistemas da Terra. O oceano profundo possui condições extremas à vida, como a pressão hidrostática que aumenta 1 atmosfera a cada 10 metros de profundidade, podendo chegar até 1.100 vezes maior do que no nível do mar nas fossas abissais; a temperatura baixa, entre 0–4˚C; e ausência de parcial, zona da penumbra, ou total de luz, zona afótica. Nas fontes hidrotermais e fumarolas, o nível de enxofre é altíssimo e a água pode ferver, enquanto nas zonas de déficit de oxigênio, o nível de $O_2$ dissolvido na água é próximo de zero.

Para poder viver nessas condições, os peixes de oceano profundo desenvolveram diversas adaptações morfológicas e fisiológicas únicas. Várias espécies possuem órgãos bioluminescentes que são utilizados para reconhecimento interespecífico, isca, mecanismo de fuga e lanterna (Rees *et al.*, 1998). Diversas espécies de peixes-pescador (Lophiiformes) possuem dimorfismo sexual acentuado e os machos se fixam permanentemente nas fêmeas, tornando-se um apêndice produtor de gametas (Pietsch, 2005).

Estima-se que de 10 a 15% das espécies de peixes ocorram no oceano profundo: duas espécies de celacanto; 78, de Myxini; 1.140, de Chondrichthyes; e mais de 15.000, de Actinopterygii (Pride & Froese, 2013; Linley *et al.*, 2016). No Brasil, são conhecidas 715 espécies de peixes que habitam essa região, pertencentes à 145 famílias e 37 ordens (Melo *et al.*, 2020). Os peixes de oceano profundo podem ser classificados de acordo com o habitat que ocorrem, sendo pelágicos, aqueles que vivem na coluna d'água, e demersais, os que vivem próximos do fundo.

As espécies mesopelágicas, que vivem entre 200 e 1.000 metros e normalmente fazem migração vertical diária para buscar comida em águas rasas durante a noite e se esconderem na escuridão das profundezas durante o dia, incluem mais de 250 espécies de peixes-lanterna (Myctophiformes), 400 espécies peixes-víbora (Stomiiformes) e os tubarões-lanterna (Etmopteridae).

As espécies batipelágicas ocorrem entre 1.000 e 4.000 m, como o peixe-ogro (*Anoplogaster cornuta*, Anoplogasteridae), peixes-diabo (Lophiiformes), peixes-lagarto (Aulopiformes) e o tubarão-duende *(Mitsukurina owstoni*, Laminiformes).

Os peixes batidemersais ocorrem próximos ao fundo, no talude e elevação continental, entre 200 e 4.000 metros, incluindo diversas espécies de moréias (famílias Synaphobranchidae, Congridae, Nettastomidae), grenardeiros (Macrouridae), quimeras (Holocephali), raias-torpedo e raias-emplastro (Torpediniformes e Rajiformes), e tubarões-gato (Scyliorhinidae).

As espécies abissais vivem próximas à planície abissal, o assoalho submarino, entre 4.000 e 6.000 m, como as brótulas (Ophidiiformes) e peixes zoarcídeos (Zoarcidae). As espécies hadais vivem em fossas oceânicas, com profundidades maiores do que 6.000 metros. O peixe-caracol (*Pseudoliparis swirei*, Liparidae), e a brótula-abissal (*Abyssobrotula galatheae*, Ophidiidae), coletadas em 8.145 metros e 8.370 metros, respectivamente, são os recordistas de profundidade entre todos os vertebrados.

## 6.7 Ambientes polares – Ártico e Antártica

Os ambientes polares estão localizados nos hemisférios Norte e Sul, em latitudes maiores do que 60°. Esses ambientes são caracterizados pela baixa temperatura da água, que pode chegar à -1,9°C e ampla variação da duração do dia de acordo com a estação do ano. Portanto, é um dos ambientes com condições mais extremas para a vida.

Para sobreviverem nesses ambientes, os peixes polares possuem proteínas anticongelantes que se juntam aos cristais de gelo impedindo o seu crescimento (Cziko *et al*., 2014). Os peixes-gelo (família Channichthyidae) são os únicos vertebrados que não possuem glóbulos vermelhos nem hemoglobina no sangue como adaptação contra o congelamento (Ruud, 1954).

A Antártica, localizada no hemisfério Sul, está separada dos demais continentes desde a formação do Oceano Austral, há cerca de 30 milhões de anos, o que possibilitou o isolamento e separação de grupos endêmicos. São conhecidas 320 espécies de peixes e várias ainda não descritas, sendo a maioria formada pelos peixes-caracol (Liparidae), peixes-gelo (Nototheniidae) e zoarcídeos (Zoarcidae) (Gon & Heemstra, 1990).

Localizado no hemisfério norte, o Ártico não possui esse tipo de isolamento e serve de conexão entre as massas d'água do Atlântico Norte e Pacífico Norte. A fauna de peixes é semelhante às das áreas adjacentes e formada por espécies migratórias que se movem para outras áreas com o inverno.

No Oceano Atlântico, algumas espécies comuns são o arenque (*Clupea harengus*, Clupeiformes), o bacalhau-do-atlântico (*Gadus morhua*, Gadiformes) e o salmão-do-atlântico (*Salmo salar*, Salmoniformes). Já no lado do Oceano Pacífico, algumas espécies são o bacalhau-do-pacífico (*Gadus macrocephalus*, Gadiformes), tubarão-dorminhoco (*Somniosus pacificus*, Squaliformes) e a enguia-lobo (*Anarrhichthys ocellatus*, Perciformes) (Helfman *et al*., 2009).

## 7. Importância social e econômica

Culturalmente, os peixes são muito importantes e constantemente retratados em diferentes civilizações como símbolo do cristianismo; astro do Zodíaco; personagens da mitologia grega; deuses na cultura polinésia; boa sorte e prosperidade na China e Japão; e como gente entre os povos Tukano, na Amazônia oriental.

É como fonte de alimento, entretanto, que os peixes têm a principal importância para os homens, servindo também de identidade cultural como prato típico de diversos países e regiões e, principalmente, como importante fonte de nutricional – por exemplo, os peixes representam mais de 70% da proteína animal consumida na região Norte do Brasil. Estima-se que a pesca e aquicultura sejam responsáveis pelo emprego de 59 milhões de pessoas e movimentam um mercado de U$150 bilhões (FAO, 2018). No Brasil, é uma importante atividade econômica, tanto em termos financeiros quanto socioambientais.

Dentre as principais espécies marinhas comerciais no Brasil encontra-se espécies demersais, tais como a merluza (*Merluccius hubbsi*), a corvina (*Micropogonias furnieri*) e as pescadas (*Cynoscion* spp.); espécies pelágicas, tais como a sardinha-verdadeira (*Sardinella brasiliensis*), o bonito-listrado (*Katsuwonus pelamis*) e o atum-do-rabo-amarelo (*Thunnus albacares*); e espécies recifais, tais como o pargo (*Pagrus pagrus*), os vermelhos, dentões e ciobas (*Lutjanus* spp.), as garoupas (*Epinephelus* spp.) e os badejos (*Mycteroperca* spp.). Várias espécies de tubarões também são alvo de pesca, porém são comercializadas genericamente como cação (FAO 2018).

Com um mercado global estimado em U$270 milhões, os peixes ornamentais também representam importante fonte de renda para comunidades ribeirinhas nos rios da bacia Amazônica, pescadores tradicionais no Nordeste e Sudeste do país, ou provenientes de aquicultores. Além de abastecer o mercado interno, estima-se que o Brasil exporta anualmente mais de 40 milhões de indivíduos retirados na natureza para países como Alemanha, Estados Unidos e Japão (Gasparini *et al*., 2005; dos Anjos *et al*., 2009).

## 8. Espécies ameaçadas de extinção

Recentemente, foi publicado o Livro Vermelho da Fauna Brasileira Ameaçada de Extinção (ICMBio, 2018), que é composto por sete volumes, sendo o Volume 6 dedicado integralmente aos peixes. A elaboração contou com a participação de 293 pesquisadores e uma consulta aberta ao público e principais representantes dos setores público e privado.

O risco de extinção é a chance que uma espécie tem de desaparecer da natureza e discriminado em três categorias, de acordo com o grau de ameaça: Vulnerável; Em Perigo; e Criticamente Ameaçada. A categoria Quase Ameaçada é aquela quando já existem evidências de um declínio populacional, mas o desaparecimento da espécie ainda não é eminente. Já as espécies consideradas extintas são aquelas que desapareceram de uma determinada área (Regionalmente); desapareceram da natureza, mas ainda existem indivíduos mantidos em criadouros (Extinta na Natureza); ou desapareceu por completo (Extinta).

Os resultados apresentados são bem alarmantes, com 410 espécies, ou 9,1% da fauna de peixes brasileiros corre risco de extinção. Entre os peixes continentais (dulcícolas) 312 espécies foram

consideradas ameaçadas de extinção (9,9% do total), sendo 101 categorizadas como Criticamente em Perigo (3,2%); 112, Em Perigo (3,5%); e 99, Vulnerável (3,1%). Entre as espécies marinhas, 98 foram consideradas ameaçadas de extinção (7,1% do total), sendo 34 categorizadas como Criticamente em Perigo (2,5%); 14, Em Perigo (1%); 50 Vulnerável (3,6%); além de duas espécies de tubarões consideradas regionalmente extintas.

No ambiente dulcícola, as principais ameaças são causadas por destruição de habitats através de atividades de agropecuária (125 espécies), construção de hidrelétricas (104 espécies), expansão urbana (87 espécies) e poluição (61 espécies). Já entre as espécies marinhas, as principais ameaças estão relacionadas à captura pela pesca (90 espécies) e destruição de habitats por poluição (21 espécies).

Entre os grupos mais ameaçados, destacam-se os peixes Actinopterygii de água doce, que representam 75% das espécies ameaçadas, com 100 delas categorizadas como Criticamente Ameaçadas. As espécies mais ameaçadas são os peixes-anuais, cujos habitats estão sendo aterrados ou transformadas áreas de pasto e agricultura, espécies endêmicas que foram dizimadas pela construção de grandes hidrelétricas, como Belo Monte no Pará, e espécies que ocorrem na bacia e estuário do rio Doce, no Espírito Santo, e foram impactadas pelo lançamento de dejetos de mineradora.

Proporcionalmente, o grupo com o maior número de espécies ameaçadas é o dos Elasmobranchii marinhos, com mais de um terço das espécies (37%) categorizadas como ameaçadas. Os tubarões e raias possuem um ciclo de vida bastante longo, algumas espécies levam mais de 10 anos para atingir a maturidade sexual, possuem longo tempo de gestação e produzem poucos filhotes por ninhada. A pesca é direcionada para os tubarões com uso de espinhel, que são comercializados como cação, mas várias espécies de tubarões e raias, são capturadas nas redes de emalhe, de arrasto simples ou parelhas. Duas espécies de peixe-serra, (*Pristis pristis* e *Pristis pectinata*) eram amplamente distribuídas ao longo do litoral brasileiro, mas estão criticamente ameaçadas de extinção e duas espécies de tubarão (*Carcharhinus isodon* e *Schroederichthys biviusi*) foram categorizadas como regionalmente extintas, por não haver mais registros no Brasil, mas ainda ocorrerem em outras regiões.

## SITES RECOMENDADOS

Catálogo Taxonômico da Fauna do Brasil: <http://fauna.jbrj.gov.br/>

Projeto FISHBASE. <https://www.fishbase.de/home.htm >

ICMBio - Fauna Brasileira: <https://www.icmbio.gov.br/portal/faunabrasileira>

ICMBio - Livro Vermelho 2018: <https://www.icmbio.gov.br/portal/component/content/article/10187>

International Shark Attack File (ISAF): <www.floridamuseum.ufl.edu/shark-attacks/>

DEEP Lab. Laboratório de Diversidade, Ecologia e Evolução de Peixes do IOUSP: <http://deeplab.io.usp.br/>

Portal da Biodiversidade: <https://portaldabiodiversidade.icmbio.gov.br/portal/>

## Referências Bibliográficas

Dos ANJOS, H.D.B.; AMORIM, R.M.S.; SIQUEIRA, J.A.; DOS ANJOS C.R. 2009. Exportação de peixes ornamentais do estado do Amazonas, Bacia Amazônica, Brasil. Boletim do Instituto de Pesca, 35: 259-274.

BETANCUR-R, R.; WILEY, E.O.; ARRATIA, G.; ACERO, A.; BAILLY, N.; MIYA, M.; LECOINTRE, G. & ORTI, G. 2017. Phylogenetic classification of bony fishes. BMC Evolutionary Biology, 17: 162. DOI: 10.1186/s12862-017-0958-3.

BUCKUP, P.A.; Menezes, N.A.; Ghazzi, M.S. 2007. Catálogo das Espécies de Peixes de Água Doce do Brasil, Rio de Janeiro, Museu Nacional, 195 p.

BOND, C.E. 1996. Biology of fishes. 2nd Ed. Nova Iorque, Saunders College Publishing. 750p.

CARVALHO, M.R. & MCEACHRAN, J.D. 2003. Family Carcharhinidae (Requien Sharks). Pp. 13-21. In: Reis, R.E.; Kullander, S.O; & Ferraris, C.J. (Orgs.) Check List of the Freshwater Fishes of South and Central America. EDIPUCRS, Porto Alegre, 742 p.

CARVALHO, M.R., LOVEJOY, N.R. & ROSA, R.S. 2003. Family Potamotrygonidae (River Stingrays). Pp. 22-28. In: Reis, R.E.; Kullander, S.O; & Ferraris, C.J. (Orgs.) Check List of the Freshwater Fishes of South and Central America. EDIPUCRS, Porto Alegre, 742 p.

COMPAGNO, L. 1984a. FAO species catalogue. Vol. 4. Sharks of the world. An annotated and illustrated catalogue of sharks species known to date. Part 1. Hexanchiformes to Lamniformes. FAO Fisheries Synopsis N. 125. Vol.4, Pt.1, Pp. 1-249 p. Publicação on-line disponível em: http://www.fao.org/3/ad122e/ad122e00.htm.

COMPAGNO, L. 1984b. FAO species catalogue. Vol. 4. Sharks of the world. An annotated and illustrated catalogue of shark species known to date. Part 2. Carcharhiniformes. FAO Fisheries Synopsis N. 125. Vol.4, Pt.2, Pp. 251-655. Publicação on-line disponível em: http://www.fao.org/3/ad123e/ad123e00.htm.

COMPAGNO, L.J.V. & COOK, S.F. 1995. Exploitation and conservation of freshwater elasmobranchs: status of taxa and prospects for the future. Journal of Aquaculture and Aquatic Sciences, 7: 62-90.

COMPAGNO, L.J.V. 2002. Freshwater and estuarine elasmobranch surveys in the Indo-Pacific region: threats, distribution, and speciation. Pp. 168-180. In: Fowler, S.L.; Reed, T.M. & Dipper, F. A. (eds.) Elasmobranch Biodiversity, Conservation and Management. Proceedings of the conference on Shark and Ray Biodiversity, Conservation and Management, Sabah, Malaysia, July 1997. IUCN, Gland, Switzerland 168 p.

CZIKO, P.A., DEVRIES, A.L., EVANS, C.W., CHENG, C.-H.C. 2014. Antifreeze protein-induced superheating of ice inside Antarctic notothenioid fishes inhibits melting during summer warming. Proceedings of the National Academy of Sciences, 111: 14583-14588. DOI: 10.1073/pnas.1410256111.

DEVLIN, R.H.; NAGAHAMA, Y. 2020. Sex determination and sex differentiation in fish: an overview of genetic, physiological, and environmental influences. Aquaculture, 208:191-364. DOI: 10.1016/S0044-8486(02)00057-1.

FAO 2018-2020. The State of World Fisheries and Aquaculture (SOFIA). Publicação on-line disponível em: http://www.fao.org/3/ca0191en/ca0191en.pdf.

FRICKE, R.; ESCHMEYER, W.N. & VAN der LAAN, R. (eds) 2020. Eschmeyer's Catalog of Fishes: Genera, Species, References. Publicação on-line disponível em: http://researcharchive.calacademy.org/research/ichthyology/catalog/fishcatmain.asp.

GASPARINI, J. L.; FLOETER, S.R.; FERREIRA, C.E.L.; SAZIMA, I. 2005. Marine Ornamental Trade in Brazil. Biodiversity & Conservation, 14:2883–2899.

GON, O. & HEEMSTRA, P.C. 1990. Fishes of the Southern Ocean. J.L.B. Grahamstown, Smith Institute of Ichthyology. 462 p.

HEIMBERG, A.M.; COWPER-SAL-LARI, R.; SÉMON, M.; DONOGHUE, P.C.J. & PETERSON, K.J. 2010. MicroRNAs reveal the interrelationships of hagfish, lampreys, and gnathostomes and the nature of the ancestral vertebrate. Proceedings of the National Academy of Sciences, 107: 19379-19383. DOI: 10.1073/pnas.1010350107.

HELFMAN, G.S.; COLLETTE, B.B.; FACEY, D.E.; BOWEN, B.W. 2009. The Diversity of Fishes: Biology, Evolution, and Ecology. 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd. 738p.

ICMBio (2018a) Atlas dos Manguezais do Brasil. Brasília, Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 178 p. Publicação on-line disponível em: https://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/manguezais/atlas_dos_manguezais_do_brasil.pdf.

ICMBio (2018b) Livro Vermelho da Fauna Brasileira Ameaçada de Extinção Volume VI – Peixes. Brasília, Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade / Ministério do Meio Ambiente. 1232 p. Publicação on-line disponível em: https://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/comunicacao/publicacoes/publicacoes-diversas/livro_vermelho_2018_vol6.pdf.

KARDONG, K.V. 2011 Vertebrates: Comparative Anatomy, Function, Evolution. Nova Iorque, McGraw-Hill. 794 p.

KOBAYASHI, T.; KAJIURA-KOBAYASHI, H.; GUAN, G. & NAGAHAMA Y. 2008. Sexual dimorphic expression of DMRT1 and Sox9a during gonadal differentiation and hormone-induced sex reversal in the teleost fish Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Developmental Dynamics, 237: 297-306. DOI: 10.1002/dvdy.21409.

LI, C.; CORRIGAN, S.; YANG, L.; STRAUBE, N.; HARRIS, M.; HOFREITER, M.; WHITE, W.T. & NAYLOR, G.J.P. 2015. DNA capture reveals transoceanic gene flow in endangered river sharks. Proceedings of the National Academy of Sciences, 112: 13302–13307. DOI: 10.1073/pnas.1508735112.

LINNAEUS, C. 1735. Systema Naturae, Sive Regna Tria Naturae Systematice Proposita per Classes, Ordines, Genera, & Species. Leiden, Theodorum Haak. 12 p.

LINLEY, T. .; GERRINGER, M.E.; YANCEY, P.H.; DRAZEN, J.C.; WEINSTOCK, C.L. & JAMIESON, A.J. 2016. Fishes of the hadal zone including new species, in situ observations and depth records of Liparidae. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 114: 99-110. DOI: 10.1016/j.dsr.2016.05.003.

McCOY, F. 1886 Natural history of Victoria. Prodromus of the zoology of Victoria; or, Figures and descriptions of the living species of all classes of the Victorian indigenous animals. Decade XII. Melbourne, J. Ferres government printer. Pp. 47-78.

MELO, M.R.S.; CAIRES, R.A.; SUTTON, T.T. 2020. The Scientific Explorations for Deep-Sea Fishes in Brazil: The Known Knowns, the Known Unknowns, and the Unknown Unknowns. In: SUMIDA, P.Y.G.; BERNARDINO, A.F.; De LEO, F.C. Brazilian Deep-Sea Biodiversity. Pp. 153-216. DOI: 10.1007/978-3-030-53222-2_7.

MENEZES, N.A.; WOSIACKI, W.B.; MELO, M.R.S. 2020. Actinopteri. In: BOEGER, W.A.; ZAHER, H.; RAFAEL, J.A. & VALIM, M.V. (Orgs.) Catálogo Taxonômico da Fauna do Brasil. PNUD. Publicação on-line, disponível em: http://fauna.jbrj.gov.br/fauna/faunadobrasil/23.

MINCARONE, M.M. 2000. *Eptatretus menezesi*, a new species of hagfish (Agnatha, Myxinidae) from Brazil. Bulletin of Marine Science, 67: 815-819.

MORA, C. (ed.) 2015. Ecology of Fishes on Coral Reef. Cambridge, Cambridge University Press. 388p.

MUSICK, J.A. & ELLIS, J.K. 2005. Reproductive evolution of Chondrichthyans. In: HAMLETT, W.C. (ed.) Reproductive Biology and Phylogeny of Chondrichthyes: Sharks, Batoids and Chimaeras, Pp. 45–79. Science Publishers, Enfield, NH.

MYERS G.S. 1938. Fresh-water fishes and West Indian zoogeography. Annual report of the Smithsonian Institution, 1937:339-364.

NELSON, J.S.; GRANDE, T.C. & WILSON, M.V.H. 2016 Fishes of the World. 5ª ed. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, NJ. 752p.

PIETSCH, T.W. 2005. Dimorphism, parasitism, and sex revisited: modes of reproduction among deep-sea ceratioid anglerfishes (Teleostei: Lophiiformes). Ichthyological Research, 52: 207–236. DOI: 10.1007/s10228-005-0286-2.

PINHEIRO, H.T.; ROCHA, L.A.; MACIEIRA, R.M.; CARVALHO-FILHO, A.; ANDERSON, A.B.; BENDER, M.G.; DI DARIO, F.; FERREIRA, C.E.L.; FIGUEIREDO-FILHO, J.; FRANCINI-FILHO, R.; GASPARINI, J.L.; JOYEUX, J.C.; LUIZ, O.J.; MINCARONE, M.M.; MOURA, R.L.; NUNES, J.A.C.C.; QUIMBAYO, J.P.; ROSA, R.S.; SAMPAIO, C.L.S.; SAZIMA, I.; SIMON, T.; VILA-NOVA, D.A.; & FLOETER, S.R. 2018. South-western Atlantic reef fishes: zoogeographical patterns and ecological drivers reveal a secondary biodiversity centre in the Atlantic Ocean. Diversity and Distributions, 24: 951-965. DOI: 10.1111/ddi.12729.

PRIDE, I.G. & FROESE, R. 2013. Colonization of the deep-sea by fishes. Journal of Fish Biology, 83: 1528-1550. DOI: 10.1111/jfb.12265.

REES, J.F.; WERGIFOSSE, B.; NOISET, O.; DUBUISSON, M.; JANSSENS, B. & THOMPSON, E.M. 1998. The origins of marine bioluminescence: turning oxygen defence mechanisms into deep-sea communication tools. The Journal of Experimental Biology., 201: 1211-1221.

REIS, R.E.; ALBERT, J.S.; DI DARIO, F.; MINCARONE, M.M.; PETRY, P.& ROCHA, L.A. 2016. Fish biodiversity and conservation in South America. Journal of Fish Biology, 89: 12-47. DOI: 10.1111/jfb.13016.

RENAUD, C.B. 2011. Lampreys of the world. An annotated and illustrated catalogue of lamprey species known to date. FAO Species Catalogue for Fishery Purposes. No. 5. Roma, FAO. 109 p. http://www.fao.org/3/i2335e/i2335e.pdf.

RUUD, J.T. 1954. Vertebrates without Erythrocytes and Blood Pigment. Nature, 173: 848-850. DOI:10.1038/173848a0.

SAZIMA, I.; KRAJEWSKI, J.; BONALDO, R. & SAZIMA, C. 2013. A vida dos peixes em Fernando de Noronha. Campinas, Editora Terra da Gente. 275 p.

SMITH, B.R., & TIBBLES, J.J. 1980. Sea Lamprey (*Petromyzon marinus*) in Lakes Huron, Michigan, and Superior: History of Invasion and Control, 1936–78. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 37: 1780-1801. DOI:10.1139/f80-222.

WEINBERG, S. 2001. A Fish Caught in Time: The Search for the Coelacanth. Nova Iorque, Harper Perennial. 240 p.

ZINTZEN, V.; ROBERTS, C.D.; ANDERSON, M.J.; STEWART, A.L.; STRUTHERS, C.D. & HARVEY E.S. 2011. Hagfish predatory behaviour and slime defence mechanism. Scientific Reports, 131: 1-6. DOI: 10.1038/srep00131.

*Capítulo 25*

# ECOLOGIA DE PEIXES MARINHOS

*June Ferraz Dias, Francesco Silveira Machado Chioatto, Giovana de Assis Garcia, Leandro Fernandes Patrício, Maria Luiza Flaquer da Rocha, Maria Luiza Leal-de-Paula, Natasha Travenisk Hoff, Renata Ramos Gomes & Thamíris Christina Karlovic de Abreu*

REVISÃO: FLÁVIA SALDANHA-CORRÊA

CITAÇÃO SUGERIDA: DIAS, June Ferraz et al. Ecologia de peixes marinhos. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 25: p. 545-570.

# Ecologia de Peixes Marinhos

*June Ferraz Dias, Francesco Silveira Machado Chioatto, Giovana de Assis Garcia, Leandro Fernandes Patrício, Maria Luiza Flaquer da Rocha, Maria Luiza Leal-de-Paula, Natasha Travenisk Hoff, Renata Ramos Gomes & Thamíris Christina Karlovic de Abreu*

## 1. Introdução

A distribuição das quase 20.000 espécies de peixes marinhos depende de fatores ambientais bióticos e abióticos. Fatores bióticos, como disponibilidade de alimento adequado, presença de predadores e doenças, influenciam diretamente as relações intra- e interespecíficas. Fatores abióticos, como o tipo de substrato ou de *habitat*, condicionam a existência de abrigo ou de determinado alimento.

Por outro lado, fatores abióticos físicos e químicos, como temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido e pressão hidrostática, afetam a tolerância e a fisiologia dos organismos e, portanto, sua distribuição. Essa diversificação de fatores leva a que os peixes marinhos sejam um grupo diferenciado em sua anatomia funcional, comportamento, fisiologia e ecologia.

Este capítulo tratará da ecologia de peixes marinhos, ou ictiofauna marinha, com ênfase em exemplos da costa do estado de São Paulo. A região servirá como base para a descrição da estrutura da ictiofauna e de seu papel funcional nas costas norte, central e sul do estado.

A costa de São Paulo, com seus quase 700 km, apresenta uma grande variedade de ambientes e habitat, como estuários, praias arenosas, costões rochosos, formações recifais e ilhas. Em virtude da posição da Serra do Mar em relação à zona costeira, que resulta numa planície costeira estreita na porção norte, ampliando-se em direção ao sul do estado, tanto ilhas quanto costões rochosos estão presentes em maior número na costa norte.

Foto: Leandro Coelho

Localizada na Província Biogeográfica Argentina (Figueiredo, 1981) ou na Província Biogeográfica Brasileira (Pinheiro *et al*., 2018), a costa do estado de São Paulo faz parte de uma região de transição faunística que se estende desde o cabo Frio (22° – 24°S) até a península Valdéz (Argentina, 41° - 43°S), apresentando uma comunidade ictíica constituída por espécies de zonas tropicais e temperadas (Figueiredo, *op. cit*.). Por esta razão, a riqueza da ictiofauna da costa de São Paulo é relativamente alta quando comparada à documentada nos 8.000 km da costa brasileira, desde o cabo Orange (4°30'N) até o arroio Chuí (34°45'S), com aproximadamente 1.300 espécies de peixes marinhos e estuarinos (Menezes *et al*., 2003).

Levantamentos realizados na última década apontam um crescente número de registros de espécies na região: 481 espécies de actinopterígios e 107 de elasmobrânquios registradas por Menezes (2011), lista acrescida por Rocha & Dias (2015) em 27 espécies e, finalmente, 113 espécies, sendo apenas uma de elasmobrânquio, adicionadas à lista por Bachur (2018), resultando em um total de 701 espécies marinhas e estuarinas registradas na costa de São Paulo, um aumento de quase 20 % em 7 anos. Destaca-se o fato de que aproximadamente 10% dessas espécies são endêmicas, apresentando hábito demersal em sua maioria (Rossi-Wongtschowski *et al*., 2009).

Entretanto, esses números poderiam ser ainda maiores, havendo amostragens padronizadas e mais eficientes nos microambientes de praias, costões e fundos rochosos (Menezes *et al*., 2003; Rossi-Wongtschowski *et al*., 2009), além das regiões mais profundas, fora da plataforma continental.

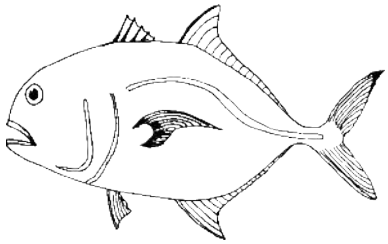
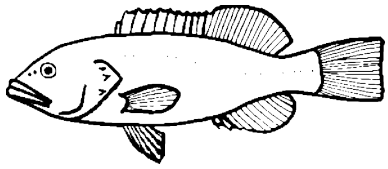
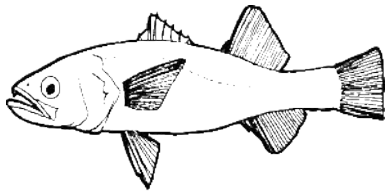
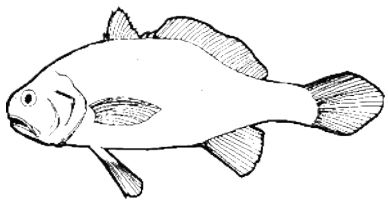
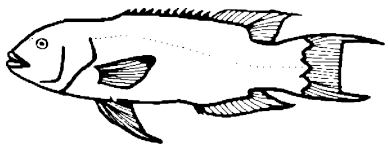
A ictiofauna pode ser classificada de acordo com o padrão de ocupação da coluna de água ou na superfície de fundo. Espécies pelágicas ocupam a coluna de água, enquanto as demersais podem ocupar a coluna de água mas mantêm alguma relação com a superfície de fundo. Assim, enquanto as pelágicas se alimentam e se reproduzem no pelagial, espécies demersais podem se alimentar ou se reproduzir no fundo, enquanto as bentônicas podem se enterrar no substrato. Espécies bentopelágicas vivem e se alimentam tanto na coluna de água como próximas da superfície do fundo.

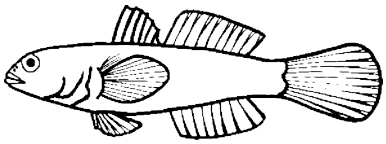
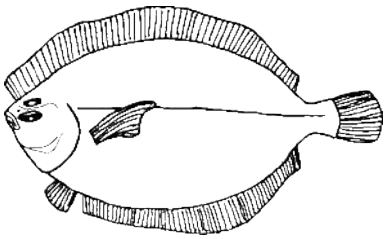
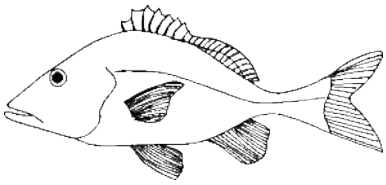
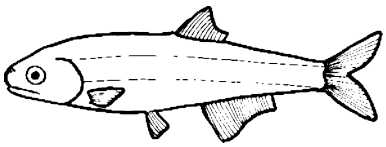
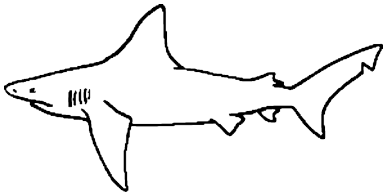
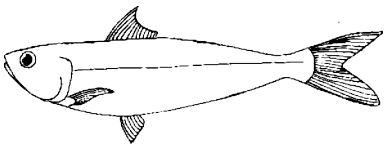
Foto: Leandro Coelho

## 2. Principais famílias de actinopterígios e elasmobrânquios da costa do estado de São Paulo

As principais famílias de actinopterígios e elasmobrânquios, que ocorrem na costa do estado de São Paulo, com maior número de espécies, suas características, hábitos e exemplos, podem ser conferidas no Quadro 1. Foram incluídos os nomes científicos dos peixes junto ao seu nome comum, porque um único nome comum pode designar espécies diferentes, a depender da região, enquanto um nome científico é atribuído a apenas uma espécie.

**QUADRO 1.** **Principais famílias de peixes da costa paulista.** *Desenhos de Joana Dias Ho e Natasha Travenisk Hoff.*

| | |
|---|---|
| **Carangídeos (Carangidae)**<br><br>Peixes pelágicos, que geralmente formam cardumes, podendo estar relacionados a recifes de corais ou ambientes estuarinos. Várias espécies têm importância econômica, por sua carne. São representantes dessa família o xaréu (*Caranx hippos*), o chicharro (*Trachurus lathami*) e o pampo (*Trachinotus carolinus*) (Menezes & Figueiredo, 1980). |  |
| **Serranídeos (Serranidae, Epinephelidae)**<br><br>Serranídeos (Serranidae, Epinephelidae): habitantes de águas costeiras tropicais, geralmente sobre fundos rochosos e coralinos, estes peixes são representados pelos badejos (*Mycteroperca bonaci*), garoupas (*Epinephelus marginatus*), e mero (*Epinephelis itajara*). Todas as espécies destas famílias são hermafroditas, sendo que algumas produzem gametas masculinos e femininos simultaneamente, como *Diplectrum formosum* e *D. radiale* (micholes-de-areia), ou hermafroditas protogínicos, que são fêmeas funcionais por algum tempo, mudando de sexo a partir de um determinado volume corporal, como as garoupas, badejos e mero (Figueiredo & Menezes, 1980). |  |
| **Cienídeos (Sciaenidae)**<br><br>Peixes costeiros, comumente encontrados em águas rasas, sob fundos de areia e lama. São importantes nas capturas comerciais do sudeste do Brasil, sendo a corvina (*Micropogonias furnieri*), o goete (*Cynoscion jamaicensis*) e as pescadas (*Macrodon ancylodon*, *Cynoscion spp.*) encontrados em abundância nos mercados (Figueiredo & Menezes, 1980). |  <br>  |
| **Labrídeos (Labridae)**<br><br>Peixes coloridos de águas tropicais, costeiros, associados a recifes de coral, recifes rochosos e costões. Apresentam hábitos diurnos e quase todas as espécies são hermafroditas protogínicas. Exemplo: peixe-papagaio (*Bodianus pulchellus*) (Menezes & Figueiredo, 1985). |  |

| | |
|---|---|
| **Gobiídeos (Gobiidae)**<br><br>Peixes de pequeno porte que vivem em águas rasas, quase sempre em contato direto com o substrato, onde comumente se enterram. São comuns em regiões de recifes de coral e poças de maré, podendo ser encontrados em águas salobras dos manguezais e estuários. Exemplos: emborê (*Bathygobius soporator*) e maria-da-toca (*Coryphopterus glaucofraenum*) (Menezes & Figueiredo, 1985). |  |
| **Paralictídeos (Paralichthyidae)**<br><br>Linguados que possuem os olhos do lado esquerdo do corpo. São predadores que vivem junto ao fundo, enterrados na areia ou disfarçados pela sua coloração. Espécies do gênero *Paralichthys* alcançam tamanho médio a grande, sendo as de maior interesse comercial, como *P. patagonicus* e *P. isosceles* (Figueiredo & Menezes, 2000). |  |
| **Hemulídeos (Haemulidae)**<br><br>De pouca importância comercial, são peixes tropicais e subtropicais. Produzem um som característico, resultante do atrito entre as placas de dentes faringeanos e amplificado pela vesícula gasosa. Ex. corcoroca (*Haemulon aurolineatum* e *Pomadasys crocro*) (Menezes & Figueiredo, 1980). |  |
| **Engraulídeos (Engraulidae)**<br><br>Pequenos peixes pelágicos costeiros, que habitam águas de baixa salinidade. *Anchoviella lepidentostole* (manjuba) é a principal espécie de valor comercial desta família (Figueiredo & Menezes, 1978). |  |
| **Carcarrinídeos (Carcharhinidae)**<br><br>Família de elasmobrânquios de distribuição ampla em águas tropicais e subtropicais, representada por cações de tamanho médio e grande. Pescarias comerciais de cação se baseiam em espécies desta família, como o cação-galhudo (*Carcharhinus plumbeus*) e o galha-preta (*Carcharhinus limbatus*) (Figueiredo, 1977). |  |
| **Clupeídeos (Clupeidae)**<br><br>Pequenos pelágicos, costeiros, mas que entram em baías e estuários, principalmente em sua fase juvenil. Formam grandes cardumes e são alvo de capturas comerciais. Exemplos: sardinha-verdadeira (*Sardinella brasiliensis*), sardinha-bandeira (*Opisthonema oglinum*) (Figueiredo & Menezes, 1978). |  |

Na região costeira do estado de São Paulo as principais espécies demersais capturadas podem ser agrupadas cinco famílias com maior abundância em número de indivíduos. A família Sciaenidae apresenta 17 espécies mais abundantes, seguida pelos bagres da família Ariidae (7 espécies), pelos linguados da família Paralichthyidae (5 espécies), por Pomacentridae (5 espécies), e as raias da família Arhyncobatidae (4 espécies).

A distribuição dos organismos que compõem a ictiofauna pode ser controlada por fatores abióticos, como pressão hidrostática, penetração de luz, temperatura, salinidade e oxigênio dissolvido; e fatores bióticos, como as interações interespecíficas, a disponibilidade de alimento e a produtividade da região. A região costeira do estado de São Paulo apresenta relativa uniformidade ambiental, com a presença de dois estuários, o estuário de Santos e o sistema estuarino-lagunar de Cananéia-Iguape, e uma ampla plataforma continental com substrato lamoso e arenoso (Mahiques *et al.*, 2004), proporcionando a existência de habitat diferenciados, e tendo como consequência a predominância de peixes demersais (Menezes *et al.*, 2003; Rossi-Wongtschowski *et al.*, 2009).

Na plataforma continental de São Paulo é observada a ocorrência de três diferentes massas d'água, com características distintas de temperatura (T) e salinidade (S), descritas em Castro & Miranda (1998). A Água Tropical (AT, T > 20°C, S > 36,4) e a Água Central do Atlântico Sul (ACAS, T < 18°C, 35 < S > 36,4) são transportadas pela Corrente do Brasil ao largo da plataforma, enquanto a Água Costeira (AC, T > 20°C, S < 35) resulta da mistura de águas oriundas da drenagem continental com as águas da plataforma continental. Na região norte do estado de São Paulo, eventos de intrusão da ACAS sobre a plataforma continental média e interna são comumente observados (Castro, 2014). Há, ainda, na plataforma, a influência da Corrente Costeira do Brasil, que traz águas frias e sedimentos provenientes do Rio da Prata (Uruguai) e da Lagoa dos Patos (RS), atingindo até a região da Ilha de São Sebastião (Souza & Robinson, 2004; Mahiques *et al.*, 2011).

Avaliando as 111 espécies demersais que compõem a ictiofauna da região de Ubatuba, as massas d'água e a composição sedimentar da área, Rocha & Rossi-Wongtschowski (1998) observaram diferentes associações entre espécies de cienídeos, como o goete (*Cynoscion jamaicensis*), betara (*Menticirrhus americanus*) e tortinha (*Isopisthus parvipinnis*), com águas mais quentes, como da AC, enquanto os actinopterígios pescada-olhuda (*Cynoscion guatucupa*), castanha ou papa-terra (*Umbrina canosai*), mariquita (*Dules auriga*), os linguados *Etropus longimanus* e *P. patagonicus*, e as espécies de elasmobrâquios raia-santa (*Atlantoraja cyclophora*), raia-emplastro-mirim (*Psammobatis extenta*), cação-anjo (*Squatina guggenheim*) e raia-chita (*Atlantoraja castelnaui*) acompanham os movimentos da ACAS, além de ocorrem em fundos arenosos e lamosos. O pargo (*Pagrus pagrus*), a corcoroca (*Orthopristis ruber*) e o carapicu (*Eucinostomus argenteus*) apresentaram maior relação com sedimentos de maior granulometria, como areia e cascalho. Por sua vez, cabrinha (*Prionotus punctatus*) e mamangá-liso (*Porichthys porosissimus*) apresentaram ampla distribuição na região, sendo a segunda uma das poucas espécies euribáticas (que suportam ampla variação de pressão hidrostática), atingindo profundidades maiores que 100 m. As espécies corvina, raia-santa, cabrinha e mamangá-liso são descritas por Rossi-Wongtschowski & Paes (1993) como espécies estruturais do ecossistema de plataforma continental de Ubatuba, assim como mariquita, goete, cangoá, betara e raia-emplastro-mirim são descritas como sazonais nas diferentes porções da plataforma continental.

A ocorrência de espécies de algumas famílias, como Serranidae, Pomacentridae, Labridae, Scaridae e Blenniidae, apresenta relação com a presença de recifes de corais, recifes rochosos, costões e áreas de fundos rochosos, ambientes de alta complexidade estrutural que restringem a ocupação local a uma fauna de alto grau de especialização, tanto para sua reprodução quanto para sua alimentação (Luiz Jr *et al.*, 2008; Gibran & Moura, 2012; Rolim *et al.*, 2017).

Muitas são as espécies que utilizam os ambientes estuarinos, atingindo até mesmo ambientes de águas interiores e salinidade próxima de 0, em diferentes momentos de seu ciclo de vida, como juvenis ou para reprodução, ou durante toda sua vida. Espécies de tainhas (Mugilidae), manjubas (Engraulidae), bagres (Ariidae) e robalos (Centropomidae) são exemplos de organismos frequentemente capturados em ambientes estuarinos, dentre as 223 espécies de actinopterígios e 23 de elasmobrânquios para a região de Cananéia, costa sul do estado (Contente, 2013).

Uma intensa pesca advinda de diversas frotas pesqueiras incide sobre a ictiofauna paulista, sendo tradicionalmente a sardinha-verdadeira (*Sardinella brasiliensis*) e a corvina (*M. furnieri*) importantes pelo volume descarregado. Outras espécies também são intensamente explotadas na região, tais como a tainha (*Mugil liza*), a palombeta (*Chloroscombrus chrysurus*), a pescada-foguete (*Macrodon atricauda*), o peixe-porco (*Balistes capriscus*), o chicharro (*Trachurus lathami*), a cavalinha (*Scomber colias*), e outros pequenos pelágicos (Rossi-Wongtschowski *et al.*, 2009, Ávila-da-Silva *et al.*, 2019).

Os arrastos de porta dirigidos à pesca do camarão-sete-barbas (*Xiphopenaeus kroyeri*), camarão-branco (*Penaeus schmitti*) e camarão-rosa (*P. brasiliensis* e *P. paulensis*) capturam uma alta diversidade de espécies não-alvo, conhecida como captura acidental ou *by-catch*, sendo alto o descarte dessas espécies a bordo. Entretanto, a captura de algumas espécies é aproveitada (*by-product*), sendo vendidas individualmente ou na forma de mistura, como é o caso da corvina (*M. furnieri*), linguados (*Paralichthys spp.*), cabrinha (*Prionotus punctatus*), trilha (*Mullus argentinae*), abrótea (*Urophycis brasiliensis*) e betara (*M. americanus*) (Graça-Lopes *et al.*, 2002; Rossi-Wongtschowski *et al.*, 2009).

## 3. Ambientes insulares

Ilhas representam ambientes muito peculiares, cobrindo apenas 5% da área terrestre global. De alta prioridade para a conservação da biodiversidade, pois são refúgios de espécies ameaçadas e de importância comercial, encontram-se expostas a diversas ameaças, incluindo a perda de habitat, a pesca predatória e ilegal, a ocorrência de espécies invasoras e as mudanças climáticas (Fonseca *et al.*, 2006), devido a seu pequeno tamanho e isolamento.

As ilhas da costa do estado de São Paulo estão alinhadas em dois grupos: um mais raso, na isóbata de 15 m, e um mais profundo, na isóbata dos 40 m. A incidência de ilhas na costa de São Paulo diminui do norte para o sul: enquanto são observadas mais de 70 ilhas e ilhotas na costa norte, na costa sul se encontram as ilhas do Bom Abrigo, Cardoso, Cananéia e Comprida.

Podemos destacar as ilhas de São Sebastião, Búzios e Vitória, em que, pelo menos, 106 espécies ocorrem (Gibran & Moura, 2012); a ilha Anchieta, com 97 espécies demersais de fundo inconsolidado (Nonato *et al.*, 1993) e 103 espécies recifais (Souza *et al.*, 2018), o arquipélago dos Alcatrazes, onde foram registradas 140 espécies, entre elasmobrânquios e actinopterígios (Hoff, 2015; Rolim *et al.*, 2017); a laje de Santos, com 196 espécies registradas (Luiz Jr. *et al.*, 2008), e a ilha da Queimada Grande, com o registro de 40 espécies (Pivetta *et al.*, 2012).

A Figura 1 ilustra a distribuição das principais espécies de peixes, a partir da isóbata dos 20 metros, na região do arquipélago de Alcatrazes, costa norte do estado de São Paulo. É possível identificar espécies de ampla distribuição, bem como outras de áreas específicas, como zona rasa, costeira e profunda com espécies características.

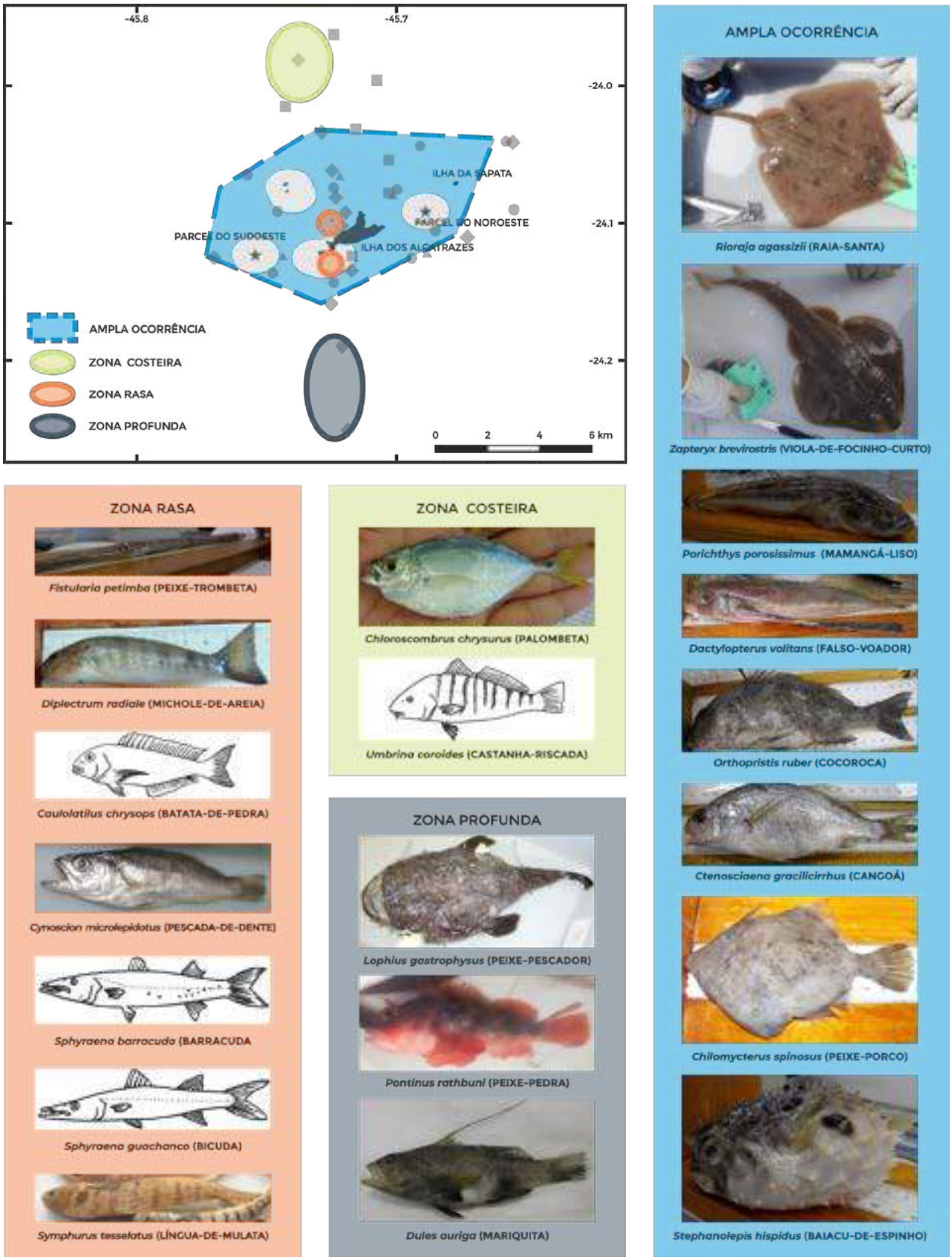



**FIGURA 1. Distribuição das principais espécies encontradas no arquipélago de Alcatrazes, entre 20 e 50 m (espécies de zonas costeiras; espécies de zona rasas, próximas à ilha; espécies de ampla distribuição; e espécies de zonas profundas).** *Fotos de Natasha Hoff, Francesco Chioatto, Thamíris Abreu e June Dias; desenhos de Natasha Hoff.*

## 4. Ictioplâncton marinho

Ao longo do último século, o estudo do ictioplâncton, constituído por ovos e larvas de peixes (Fig. 2), acumulou conhecimento sobre sua identificação, alimentação, causas de mortalidade e dispersão, e consequentemente, seu efeito na composição e distribuição das comunidades ictíicas. Mais recentemente, esse grupo também vem sendo estudado em relação à conectividade genética e populacional, mudanças climáticas e aos efeitos da pesca e de estressores antropogênicos (Llopiz *et al.*, 2014). A grande mortalidade nas fases iniciais do ciclo de vida dos actinopterígios, tanto por predação como por inanição, é a responsável, em parte, pela flutuação dos estoques pesqueiros, principalmnte das espécies de pequenos pelágicos, como as sardinhas e as anchovetas. O capítulo **Biologia e Ecologia do Ictioplâncton Marinho** apresenta mais informações sobre o ictioplâncton.

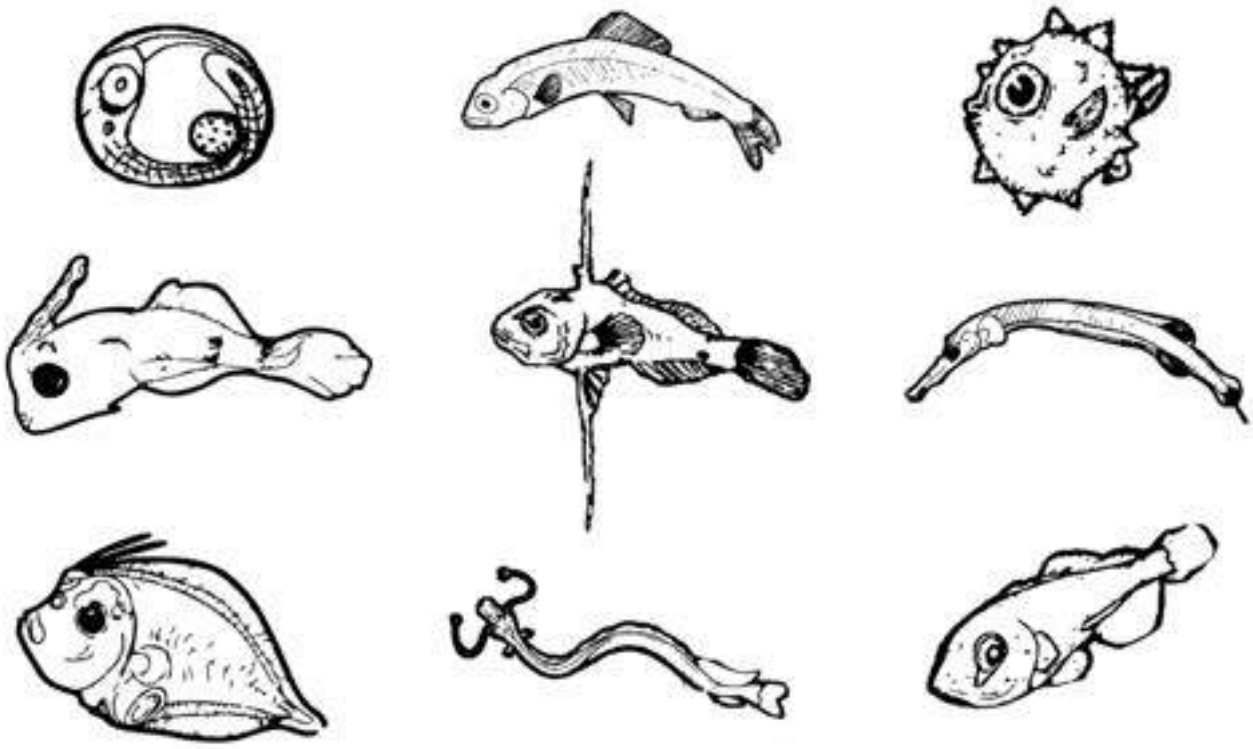


**FIGURA 2.** Ovo e larvas de peixes marinhos de diferentes espécies (fora de escala, todos menores que 1 cm), ilustrando formas de corpo. *Desenhos de Joana Dias Ho.*

## 5. Indicadores ecológicos da ictiofauna

A Convenção sobre Diversidade Biológica (CDB) define biodiversidade como *"a variabilidade de organismos vivos de todas as origens, compreendendo: - os ecossistemas terrestres, marinhos e outros ecossistemas aquáticos; - a diversidade dentro de espécies, entre espécies e seus conjuntos de genes; - a diversidade de ecossistemas"*. A importância da biodiversidade reside na função de manter o ecossistema e responder às mudanças no ambiente: a manutenção dessa diversidade de organismos favorece a capacidade de recuperação dos meios de subsistência, dos serviços ecossistêmicos, dos habitat naturais e da segurança alimentar (Hiddink *et al.*, 2008).

Há várias maneiras de se estudar e avaliar a biodiversidade de uma área ou região. No ambiente marinho, as principais formas de acesso à ictiofauna são: o censo visual da superfície e subaquático, em que se observa e registra as espécies; o acesso ao descarregamento das pescarias; e as prospecções de pesquisa, em que cruzeiros oceanográficos são organizados para a captura dos exemplares. A principal diferença entre as amostragens dos descarregamentos e as da prospecção de pesquisa é que a as pescarias buscam regiões com maior ocorrência de espécies de importância comercial, enquanto que a prospecção de pesquisa trabalha com amostragem padronizada, de acordo com os objetivos do estudo.

Para descrever a estrutura das comunidades de peixes é especialmente útil o uso de expressões matemáticas que permitam estimativas da diversidade e da riqueza que podem ser comparadas em diversas escalas espaciais e temporais, a partir das espécies coletadas. Dentre tais ferramentas destacam-se os índices ecológicos, que reúnem informações de todas as espécies encontradas no local. Exemplos desses indicadores ecológicos podem ser os índices de diversidade e de riqueza, sendo esta última, uma das métricas mais simples e mais utilizadas.

Além do entendimento da estrutura, o uso dos índices facilita a interpretação dos resultados e a visualização de padrões. A frequência relativa acumulada (***F%***), que identifica as principais espécies em termos de abundância em número, também auxilia na indicação das espécies consideradas dominantes (Yáñez-Arancibia, 1986). A riqueza de espécies pode ser estimada pela simples contagem do número de espécies (***S***), ou calculada através de índices. A riqueza estimada somente pelo número de espécies em uma área privilegia as espécies raras, já que estas têm o mesmo peso das espécies mais abundantes numa lista. Já a riqueza estimada por índices considera o número de espécies em função do número total de indivíduos capturados.

Os índices mais comumente utilizados (Begon *et al.*, 2006) são:

**Diversidade de Shannon (*H*):** assume que se tenham amostras ao acaso de uma comunidade infinita; - atribui um peso maior às espécies raras e é um dos mais utilizados em trabalhos sobre ecologia de comunidades, cujo cálculo é feito pela fórmula: $H = -\Sigma (p_i \cdot ln\, p_i)$, onde $p_i$ é a proporção de indivíduos da espécie ***i***;

**Dominância de Simpson (*D*):** considera não só o número de espécies e o número total de indivíduos, mas também a proporção do total que ocorre em cada espécie, tornando esse índice particularmente sensível a mudanças nas espécies mais abundantes. O cálculo é feito pela fórmula $D = (1 / \Sigma p_i^2)$, onde $n_i$ é o número de indivíduos da espécie ***i*** e ***N*** é o número total de indivíduos; e

**Equidade ou Equabilidade (Equitatividade) de Pielou (*J*):** mede a uniformidade das espécies dentro de uma comunidade. É calculado pela fórmula $J = H / ln\, S$, em que ***H*** é a diversidade (de Shannon) e ***S*** o número total de espécies.

Como as comunidades são dependentes da integridade do ambiente, na maioria dos índices os valores aumentam de acordo com a qualidade deste (Whitfield & Elliott, 2002; Elliott & Quintino, 2007). Exceção a estes índices é o de Dominância: uma comunidade com dominância de poucas espécies com muitos indivíduos pode indicar baixa integridade ambiental.

Esses métodos de análise são muito importantes devido à grande diversidade de peixes na zona costeira e áreas adjacentes, a qual está distribuída de forma desigual por seus diversos ecossistemas. O fator mais importante na distribuição de peixes marinhos é a temperatura, mas outros fatores que formam o habitat também desempenham papel relevante.

Em estudos sobre comunidade de peixes demersais (peixes que têm alguma forma de associação com a superfície de fundo) o tipo de fundo é claramente um fator fundamental no controle da distribuição dos peixes: fundos arenosos, lamosos ou consolidados, cada um abrigando comunidades características de invertebrados ou macroalgas, que são importantes itens alimentares para peixes demersais (Lowe-McConnell, 1999). Dessa maneira, a distribuição e abundância das diferentes espécies se caracteriza pelo ambiente onde vivem, como por exemplo, espécies que são associadas a fundos não consolidados, espécies associadas a costões rochosos ou a recifes de coral, espécies estuarinas e pelágicas (Eschmeyer *et al.*, 2010).

O desenvolvimento de projetos de pesquisa permitiu que medidas de diversidade fossem calculadas, para seis importantes áreas costeiras do estado de São Paulo, assim nomeadas: Costa Norte (Ubatuba), Ilhas Costeiras (isóbata de 15 m - Anchieta, das Palmas e Cabras), Ilhas Costeiras (isóbata de 40 m - Arquipélago de Alcatrazes), Costa Central (baía de Santos e canal de Bertioga), Plataforma Continental Interna (compreendida entre a costa e a isóbata de 100 m, entre Bertioga e Itanhaém) e Costa Sul (estuário de Cananéia). Para avaliar a ictiofauna dessas áreas foi feita uma compilação de todos os dados por área, o que implicou numa análise simultânea de processos que ocorreram em tempos diferentes. Os valores de abundância foram padronizados usando-se a **Captura Por Unidade de Esforço** (**CPUE**), que é uma maneira de representar a abundância dos organismos, considerando a forma de captura, as características do equipamento de coleta e o tempo de operação de pesca. Essa padronização, contudo, deve permear a interpretação desses resultados (Tab. 1).

**TABELA 1.** Métricas para o total da captura nas seis áreas ao longo da zona costeira paulista. As letras representam os indicadores ou índices ecológicos calculados: ***H*** = Diversidade de Shannon; ***D*** = Dominância de Simpson; ***J*** = Equidade de Pielou; ***S*** = Riqueza numérica e ***F*** = frequência relativa acumulada (%) = número de espécies que compõem 80% de captura.

| Localidade/métrica | *H* | *D* | *J* | *S* | *F %* |
|---|---|---|---|---|---|
| Plataforma Continental Interna | 2,9 | 0,1 | 0,7 | 113 | 13 |
| Costa Norte | 2,9 | 0,1 | 0,6 | 108 | 12 |
| Ilhas Costeiras (40 m) | 2,5 | 0,1 | 0,7 | 89 | 10 |
| Ilhas Costeiras (15 m) | 2,4 | 0,2 | 0,6 | 93 | 8 |
| Costa Central | 2,0 | 0,3 | 0,4 | 99 | 5 |
| Costa Sul | 2,0 | 0,3 | 0,4 | 87 | 4 |

Apesar de os índices aplicados parecerem simples na sua concepção e leitura, eles envolvem um grande e importante volume de dados coletados, juntando evidências observáveis, mensuráveis e empíricas (baseadas na experiência), além de resultados elaborados através de métodos específicos, que permitem produzir e desenvolver um novo conhecimento, bem como reproduzir, prever, corrigir e integrar conhecimentos obtidos anteriormente.

Padrões podem ser observados nos valores dos índices estimados e apresentados na tabela acima. Algumas áreas apresentam uma semelhança maior entre si: o primeiro grupo observado é formado pela Plataforma Continental Interna e Costa Norte. Em relação à ictiofauna, esse grupo apresentou maior diversidade (***H***) e equidade (***J***), menor dominância (***D***) e grande número de espécies em ambas as áreas. Observa-se, também, um maior número de espécies mais abundantes nas duas áreas, onde se destaca a presença dos cienídeos, com nove representantes nas duas áreas: cangoá (*Ctenosciaena gracilicirrhus*), betara (*Menticirrhus americanus*), oveva (*Larimus breviceps*),

tortinha (*Isopisthus parvipinnis*), pescada-olhuda (*Cynoscion guatucupa*), maria-luisa (*Paralonchurus brasiliensis*), goete (*Cynoscion jamaicensis*), corvina (*Micropogonias furnieri*) e a castanha (*Umbrina canosai*). As duas áreas têm em comum o fundo inconsolidado, com predomínio de areia e lama, e em ambas as amostragens ocorreram com maior espaçamento e em maiores profundidades de coleta, até os 100 metros. Como há espécies abundantes que se alimentam no fundo, como o cangoá, a betara, a corvina e a castanha, a semelhança na composição e abundância de espécies indica a importância desse tipo de habitat para os cienídeos, cujas espécies são tanto estruturadoras da comunidade, como importantes recursos pesqueiros.

O cangoá (*C. gracilicirrhus*), a espécie que apresentou maior abundância numérica nas duas áreas, apresenta comportamento sazonal ao mudar sua distribuição no verão, associado à movimentação da Água Central do Atlântico Sul (ACAS), quando se aproxima da costa (Rocha *et al.*, 2010; Rossi-Wongtschowski & Paes, 1993). Essa espécie e a tortinha (*I. parvipinnis*) foram apontadas como espécies tropicais que ocorreram com maiores abundâncias em associação com águas rasas (12 a 41 m), quentes, costeiras e de fundos areno-lodosos (Rossi-Wongtschowski *et al.*, 2008).

A corvina (*M. furnieri*), outra espécie relevante, também apresenta deslocamentos, mas no sentido norte-sul ao longo das estações do ano e, além disso, realiza movimentos para as regiões estuarinas e lagunares para alimentação e crescimento; quando atingem a maturidade voltam para a plataforma continental para reprodução (Vazzoler, 1993).

A cabrinha (*Prionotus punctatus*) e o pargo (*Pagrus pagrus*), pertencentes às famílias Triglidae e Sparidae, também são recursos pesqueiros no sudeste-sul da costa brasileira e estão entre as espécies mais abundantes. A cabrinha é encontrada em fundos de areia e lama, e é capturada, predominantemente, com arrasto-de-fundo entre 10 e 80 m (REVIZEE, 2006). O pargo tem importância comercial e sua carne é muito apreciada. É relativamente comum no litoral brasileiro e os mais jovens concentram-se em águas de pouca profundidade, em praias arenosas e rochosas, mas os adultos frequentemente formam pequenos grupos em águas mais profundas (Froese & Pauly, 2019).

Dessa maneira, a partir das medidas de diversidade, as populações que habitam essas áreas próximas à costa, associadas ao tipo de fundo, podem: obedecer a regimes sazonais das condições oceanográficas; realizar migrações para mais perto da costa, dependendo da fase do seu ciclo de vida; concentrar importantes estoques pesqueiros.

Com base nos resultados dos indicadores de diversidade, o segundo padrão observado de maior semelhança entre si é formado pelos entornos das ilhas costeiras dos 15 e dos 40 m que, embora sejam separadas em função da distância e profundidade, apresentam em comum um ambiente mais heterogêneo devido à proximidade de costões rochosos, fundos com sedimento mais grosso e que apresentam valores intermediários de diversidade (Prates *et al.*, 2012). Esse grupo apresenta valores muito próximos quanto à diversidade (***H***), equidade (***J***) e dominância (***D***). O número de espécies que compõe 80% de frequência e a riqueza numérica também mostram um padrão semelhante.

As áreas presentes no entorno de ilhas e de costões rochosos são de grande relevância para a comunidade ictiofaunística, desde que há uma maior complexidade estrutural da superfície de fundo, como um grande número de abrigos e mais interações entre espécies nesse tipo de habitat, como mudanças comportamentais mais notáveis em função do ciclo noite-dia (Bertoncini *et al.*, 2018; Rocha *et al.*, 2010).

Devido a essas características, observa-se a presença mais frequente de representantes de famílias não tão expressivas em outros habitat como corcoroca-boca-larga (*Haemulon steindachneri*), trilha

(*Mullus argentinae*), linguados (*Etropus longimanus*), carapicu (*Eucinostomus gula*), carapeba (*Diapterus rhombeus*) etc., além da presença da raia-viola de focinho curto (*Zapteryx brevirostris*), representando os peixes cartilaginosos, entre os mais abundantes.

As corcorocas (Haemulidae) estão associadas a áreas rochosas com fundos de areia contendo fragmentos de conchas e fundos de pedras; vive em águas costeiras, mas também comum em áreas de praias abertas, baías e lagunas costeiras. Os gerreídeos (Gerreidae), representados pelos carapicus e carapebas, são peixes costeiros comumente encontrados no litoral paulista e podem se mover para áreas mais rasas nas diferentes fases do seu ciclo de vida. Apesar de não serem recursos pesqueiros, são frequentemente capturados em alguns tipos de arrastos (Froese & Pauly, 2019).

O terceiro grupo formado pelas semelhanças dos indicadores ecológicos é composto pela Costa Central e Sul do estado, que são representativos de um habitat muito singular, o sistema estuarino. Regiões estuarinas e costeiras proporcionam condições ideais para o desenvolvimento do ciclo de vida de diversas espécies, principalmente por atuarem como áreas de alimentação, reprodução, berçário e infantário, sendo fundamentais para a manutenção das pescarias em toda a região marinha adjacente.

Apesar das diferenças dos aspectos fisiográficos e hidrológicos, as duas áreas têm em comum, condições exigentes para os peixes: as áreas estuarinas apresentam os valores mais baixos de diversidade, embora representem os habitat considerados mais produtivos dentro do nosso exemplo. Os estuários apresentam um alto dinamismo, como grandes variações da salinidade e das marés. Assim, a diversidade é mais baixa, pois a quantidade de espécies capazes de tolerar as variações extremas de salinidade também é menor (Whitfield & Elliott, 2002).

Importante observar o padrão do índice de dominância: os valores são opostos aos dos índices de diversidade. A ictiofauna típica de regiões estuarinas ou de baías influenciadas por estuários é caracterizada por um número reduzido de espécies dominantes, mas muito abundantes (Haedrich, 1983). Os valores de riqueza numérica são semelhantes ao de riqueza encontrada no grupo das ilhas, entretanto, o número de espécies mais abundantes é consideravelmente menor.

Dentre as poucas espécies que compõe 80% de abundância, destacam-se duas: o cienídeo cangoá (*Stellifer rastrifer*) e o ariídeo bagre-amarelo (*Cathorops spixii*). O cangoá é encontrado em águas litorâneas, de 1 a 40 metros de profundidade, sobre fundos de areia ou lama, mas principalmente em regiões estuarinas, onde é muito abundante, mas sem valor comercial.

Os bagres são comuns no litoral brasileiro e o bagre-amarelo (*C. spixii*) é uma espécie dominante nas regiões estuarinas do litoral paulista (Schmidt *et al.*, 2008), ocorrendo em águas pouco profundas, em fundo de lama ou areia e, em geral, procuram a desembocadura dos rios e regiões estuarino-lagunares na época de desova (Froese & Pauly, 2019).

Com esses exemplos verifica-se que a diversidade e a distribuição dos peixes, além de serem regidas pelas condições oceanográficas, são fortemente associadas ao tipo de ambiente onde são encontrados. Os agrupamentos ilustrados para a ictiofauna da costa paulista na Figura 3 indicam semelhanças entre a plataforma continental central e norte, entre as ilhas de regiões das isóbata de 15 e 40 m, e entre a baía de Santos e o sistema estuarino de Cananéia, a partir das espécies mais abundantes. A observação de padrões consistentes da ictiofauna, através de algumas medidas de diversidade, mostra que estudos ecológicos utilizando ferramentas numéricas simples são importantes quando o objetivo é caracterizar as comunidades de peixes e seus habitat.

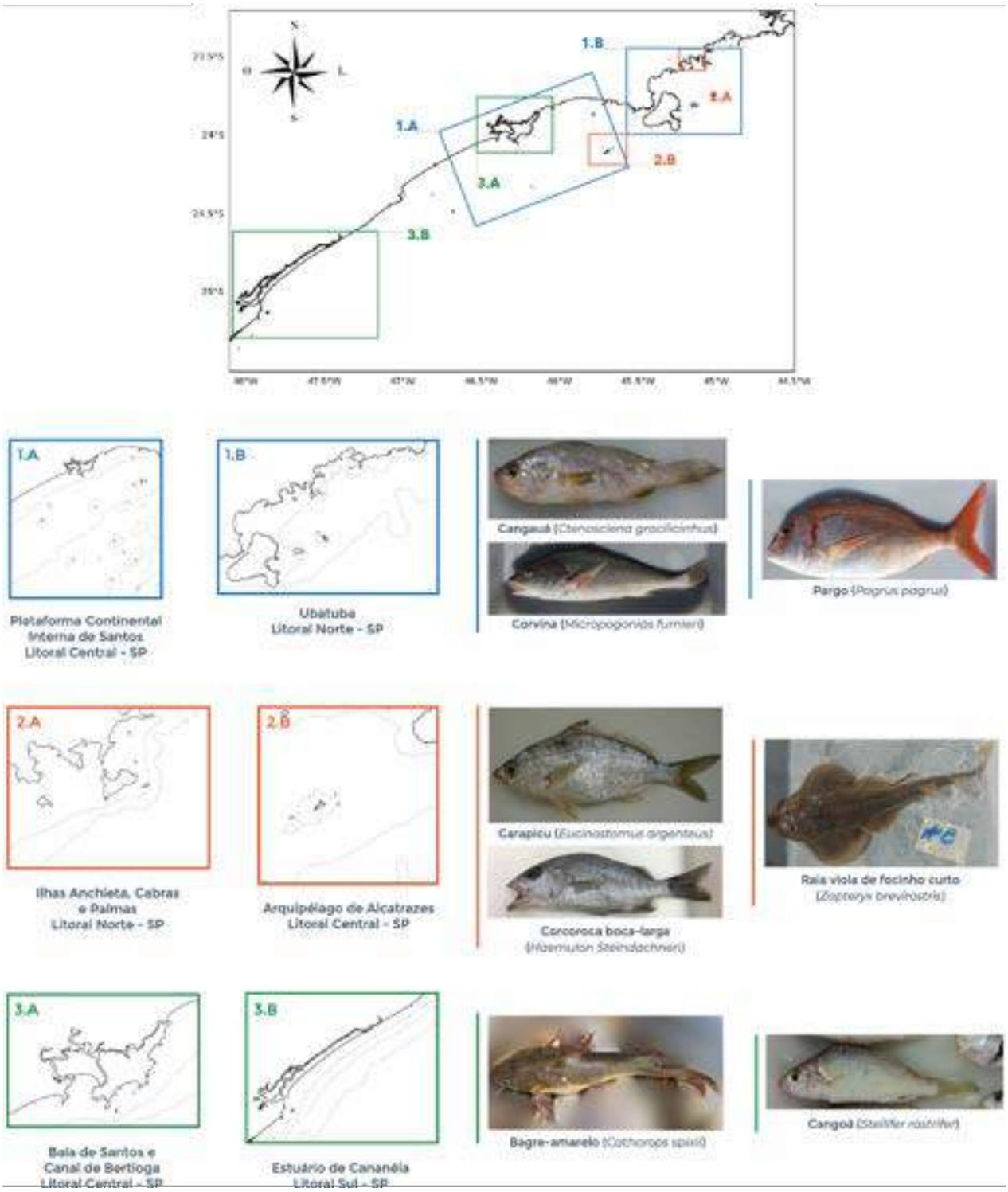



**FIGURA 3.** Esquema dos agrupamentos das áreas da costa paulista onde foram encontradas semelhanças nos resultados dos índices de diversidade (H; J e D) e riqueza numérica (S). As figuras são exemplos dos peixes mais abundantes, segundo o cálculo da frequência relativa acumulada (F %).

Apesar de os índices apresentarem restrições importantes, que devem ser consideradas, como o tamanho das amostras, o uso de diferentes amostradores, a sensibilidade à presença de espécies raras, e se o inventário das espécies está completo, o uso adequado das ferramentas também possibilita comparações entre áreas. Ao favorecer o melhor entendimento sobre a biodiversidade, é possível monitorar e proteger os ecossistemas e as espécies, garantindo os serviços ecossistêmicos.

## 6. Grupos funcionais das espécies de actinopterígios e elasmobrânquios marinhos

Para compreender a ecologia e o funcionamento das comunidades biológicas é importante se ter definido como os organismos se relacionam, tanto entre si quanto com o ambiente em que vivem: devem ser considerados aspectos como os hábitos alimentares, a reprodução e uso de habitat, por exemplo, uma vez que estes estão intimamente ligados com a diversidade dos organismos (Bone & Moore, 2008). Nesse contexto, o conceito de guilda estabelecido por Root em 1967 (Simberloff & Dayan, 1991) define que, ao contrário do agrupamento taxonômico, que utiliza as relações filogenéticas para juntar espécies próximas, as guildas consideram o uso que os organismos fazem dos recursos ambientais, agrupando espécies que fazem usos semelhantes em mesmas guildas (Elliot *et al*., 2007).

Além de fornecer um meio de simplificar interações ecossistêmicas, a organização em guildas também é um meio de tornar os ambientes mais facilmente comparáveis entre si (Passos, 2012). Este tópico tem foco nos grupos funcionais da ictiofauna marinha, com relação às guildas tróficas e reprodutivas.

### 6.1 Aspectos tróficos

As guildas tróficas designam grupos de espécies que têm como preferência os mesmos recursos alimentares e podem compartilhar adaptações anatômicas (Bemvenuti & Fischer, 2010) e comportamentais que otimizam o consumo de uma determinada presa. Existem diversas propostas de guildas ou grupos funcionais de alimentação. Uma possível divisão apresenta oito categorias de guildas alimentares para a ictiofauna: **planctívoros**, **nectívoros**, **zoobentívoros**, **herbívoros**, **detritívoros**, **onívoros**, **saprófvoros** e **oportunistas/com dieta mista**. Esta proposta mistura tanto o tipo de presa (heterótrofos, autótrofos, matéria orgânica), bem como onde são capturadas (coluna de água –plâncton ou nécton, ou superfície-subsuperfície de fundo -bentos). Nem sempre é simples classificar as espécies, uma vez que, em situações adversas os organismos podem se tornar oportunistas, alimentando-se de itens de maior abundância nos locais (Elliot *et al*., 2007).

São consideradas como espécies planctívoras aquelas que possuem sua dieta baseada em micro- e macroplâncton (Batista, 2016). Organismos planctófagos podem ser divididos em dois subgrupos, os fitoplanctívoros, que se alimentan principalmente de diatomáceas, dinoflagelados, cianobactérias, organismos mixotróficos etc., e os zooplanctívoros que consomem principalmente hidróides, crustáceos planctônicos, moluscos, ovos e larvas de peixe. Por se alimentarem de organismos planctônicos, algumas características são comuns nos diversos grupos de peixes, como por exemplo, olhos muito desenvolvidos, de modo a aumentar a percepção do alimento, e a maior quantidade de rastros brânquias alongados e cerdosos, de modo a proporcionar uma melhor filtragem da água (Pavlov & Kasumyan, 2002). A sardinha-verdadeira (*Sardinella brasiliensis*) e a manjuba (*Anchoviella lepidentostole*) são planctófagas.

Os peixes que se alimentam predominantemente de animais invertebrados associados ao substrato, sejam da meio-, macro- ou da megafauna, são chamados de zoobentívoros. As presas capturadas podem compor três categorias: o hiperbentos, no qual os animais vivem logo acima do substrato; - a epifauna, de animais que vivem sobre o substrato; - e a infauna, com organismos que vivem no substrato (Elliot, 2007). Apesar de compartilhar essa classificação, os peixes que compõem a guilda dos zoobentívoros apresentam grande diversificação quanto à morfologia bucal, que permite o consumo de invertebrados bentônicos, de forma que se pode observar desde boca protrátil para sucção

de organismos intersticiais, como é o caso do carapicu (*Eucinostomus gula*) (Zahorksac *et al.*, 2000), até adaptações nos dentes para quebrar carapaças e conchas, como os incisivos fusionados em bico dos Tetraodontiformes (baiacus, peixes-porco), ou os molariformes com forma de pavimento de raspagem como na raia-viola *Pseudobatos horkelii* (Bemvenuti & Fischer, 2010) ou ainda com forma de placas faríngeas dos esparídeos como o pargo (*Pagrus pagrus*) (Lowe-McConnell, 1989).

Herbívoras serão as espécies que se alimentam principalmente pastejando macroalgas vivas e/ou macrófitas. Por pastarem as macroalgas, esses organismos também consomem detritos e fauna fital. Apesar destes itens serem encontrados no estômago das espécies herbívoras, não são os itens alimentares que buscam (Ferreira & Gonçalves, 2006). Uma importante característica dos organismos deste grupo é o tamanho do intestino, que é comparativamente maior que o dos organismos carnívoros (Pavlov & Kasumyan, 2002), permitindo que o alimento ingerido fique mais tempo em contato com as secreções, para aumentar a eficiência da digestão. Um exemplo de herbívoro encontrado na costa de São Paulo é a espécie de peixe-cirurgião *Acanthurus bahianus*.

A categoria dos detritívoros engloba os peixes que se especializaram no consumo de detritos e sedimentos, que podem conter matéria orgânica animal ou vegetal em decomposição com bactérias e fungos associados, além de microfitobentos (Elliot *et al.*, 2007). Para o processamento desses materiais, essas espécies podem contar com peculiaridades morfológicas, como a presença de moela e um intestino longo, que são adaptações para moer e quebrar material não facilmente digerível. Além disso, há adaptações comportamentais, exemplificadas pela prática desses peixes de levantar uma nuvem de partículas de substrato e aproveitarem-se das mais leves que flutuam por mais tempo e que possuem componente orgânico mais rico (Hickling, 1970). Os mugilídeos, representados pelas tainhas e paratis (*Mugil spp.*), apresentam esse padrão que, nesse caso específico, pode ser chamado de iliófago.

Nectívoras são as espécies que se alimentam de organismos nectônicos. Nesta categoria se incluem piscívoros, que se alimentam de peixes, e teutófagos, que se alimentam de lulas. Exemplos de espécies nectívoras são as enchovas (*Pomatomus saltatrix*), a bicuda (*Sphyraena guachancho*), o bonito (*Eutynnus alleterattus*) e o xaréu-branco (*Alectis ciliaris*).

São classificadas como onívoras as espécies que não possuem um item alimentar principal, podendo variar sua dieta de acordo com alterações ambientais, sazonais ou históricas no ciclo de vida, consumindo tanto organismos de origem vegetal quanto animal (Ferreira *et al.*, 2004; Medeiros, 2011; Batista, 2016), e tanto os que estão na coluna de água quanto os que se encontram no bentos (Silva, 2009). As espécies onívoras também apresentam intestino maior, quando comparado com o das espécies das demais dietas (Santos *et al.*, 2011). Na costa de São Paulo são encontradas diversas espécies onívoras, sendo o peixe-rei (*Atherinella brasiliensis*), uma das mais comuns.

Algumas espécies apresentam a capacidade de se adaptar às mudanças de dieta, chamada de adaptabilidade ou plasticidade trófica. Essa adaptabilidade é limitada pelo aparato alimentar, pela capacidade digestiva e pelo comportamento alimentar característico (Gerking, 1994). Os peixes que apresentam maior plasticidade na alimentação são reunidos na guilda dos oportunistas. Essas espécies têm suas dietas relacionadas com a disponibilidade de presas do local que habitam, de modo que não há diferença entre os valores de abundância da presa na dieta do oportunista e no local (Jaksic, 1989).

Em situações de degradação ambiental, os peixes que possuem essa flexibilidade na dieta possuem maior sucesso (Flores-Lopes *et al.*, 2010). Assim, observa-se algumas espécies que assumem o comportamento oportunista quando suas preferências não estão disponíveis (Elliot *et al.*, 2007). Um exemplo dessa categoria é o tubarão-tigre (*Galeocerdo cuvier*) presente na costa paulista, que se alimenta de uma vasta variedade de peixes, actinopterígios e elasmobrânquios, atacando inclusive indivíduos

presos em redes e anzóis de pescadores. Tartarugas, arcossáuros-aves e mamíferos marinhos também estão presentes nessa dieta, além de cefalópodes, outros invertebrados, e itens curiosos como carniça de animais terrestres. É capaz de regurgitar uma série de resíduos orgânicos ou sintéticos dispensados por humanos (Compagno, 1984).

As espécies de peixes que se alimentam, principalmente, da carcaça de organismos marinhos, como peixes ósseos, elasmobrânquios, baleias etc. são classificados como saprófovoras (Drazen & Sutton, 2016). A maioria das espécies se alimentam facultativamente de carcaças, porém as que são especialistas nesse tipo de alimentação apresentam, em sua maioria, bocas pequenas e com dentição muito afiada (Drazen & Sutton, 2016). Como exemplo dessa guilda pode ser citado o cação-português (*Centroscymnus spp.*).

Segundo a dieta, as 701 espécies consideradas para a região costeira do Estado de São Paulo, do norte de Ubatuba a Cananéia, até 50 metros de profundidade, foram classificadas nas 8 guildas aqui apresentadas, das quais apenas uma não apresentaram correspondentes, os saprófovoros. Em toda essa faixa litorânea, nas Áreas de Proteção Ambiental Marinhas (APAM) do Litoral Sul, Centro e Norte, observou-se uma maior frequência de espécies pertencentes aos grupos de zoobentívoros e nectívoros, totalizando em torno de 70% das espécies, sendo o primeiro mais expressivo que o segundo. Contudo, a análise da dieta das espécies consideradas no Parque Estadual Marinho (PEM) da Laje de Santos mostrou que nessa área há maior frequência de nectívoros, e além disso, os herbívoros são mais frequentes do que nas demais áreas (Tab. 2). Outro padrão é apresentado na Refúgio da Vida Silvestre (REVIS) de Alcatrazes, com alta porcentagem de zoobentívoros; porém, a ausência de representantes de herbívoros e a baixa porcentagem de planctívoros podem estar relacionadas com a forma de captura: neste caso foi usada uma rede de arrasto de fundo, que não prospecta fundos com rochas e macroalgas, e subamostra a coluna de água.

**TABELA 2.** Porcentagem de ocorrência de grupos funcionais tróficos por espécies para cada região da costa do estado de São Paulo, a partir da análise da dieta das espécies levantadas por Bachur (2018) e Hoff (2015). As letras representam as guildas: DV = Detritívora; HV = Herbívora; NV = Nectívora; OP = Oportunista; OV = Onívora; PV = Planctívora; SV = Saprófovora; ZB = Zoobentívora.

| Região/ Guilda | APAM Litoral Norte | APAM Litoral Centro | APAM Litoral Sul | PEM Laje de Santos | REVIS Alcatrazes |
|---|---|---|---|---|---|
| DV | 1,0 | 0,5 | 1,4 | 0,0 | 0,0 |
| HV | 6,6 | 0,5 | 1,0 | 10,3 | 0,0 |
| NV | 27,9 | 33,8 | 30,7 | 40,0 | 11,1 |
| OP | 3,5 | 3,6 | 4,8 | 0,0 | 0,0 |
| OV | 7,7 | 7,2 | 11,0 | 5,6 | 1,1 |
| PV | 10,4 | 12,9 | 12,5 | 12,3 | 4,4 |
| SV | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| ZB | 42,8 | 41,1 | 38,5 | 31,8 | 83,3 |

A ecologia alimentar dos peixes estabelece interações entre as espécies que participam na determinação da estrutura da comunidade desses animais. A competição por recursos alimentares pode levar a ajustes na distribuição espacial ou então no rearranjo de presas consumidas: espécies diferentes podem consumir presas de tamanhos diferentes numa mesma área (Wootton, 1992).

Outras interações são observadas e beneficiam todos os envolvidos, como é o caso dos peixes limpadores que se alimentam dos ectoparasitas da cavidade bucal de outros peixes, e que se não o fizessem, como demonstrado em experimentos de remoção dos limpadores, ocorre uma queda drástica nas populações de seus clientes observada em poucos dias (Lowe-McConnell, 1989). Facilitações para predação são geradas por espécies que ao se alimentarem disponibilizam recursos para outras, como as trilhas (*Mullus argentinae*) zoobentívoras que, procurando por invertebrados da infauna, levantam nuvens de sedimentos das quais outras espécies se alimentam (Lowe-McConnell, 1989). Outras interações se formam para reduzir o risco de predação, como a organização dos peixes em cardumes (Moyle & Cech, 1988).

Estudos sobre ecologia trófica dos peixes podem utilizar abordagens diferentes, além do conhecimento da dieta, como o uso de isótopos estáveis de carbono e nitrogênio, medidos na musculatura dos peixes, para o entendimento de seu nível trófico (Corbisier *et al.*, 2006).

## 6.2 Aspectos reprodutivos

As guildas reprodutivas agrupam espécies que apresentam padrões semelhantes de modos de reprodução. A reprodução envolve recorrência, ou seja, ela se repete ao longo do tempo, na maioria das espécies.

A reprodução é um processo pelo qual os indivíduos, que representam uma espécie, se perpetuam, transmitindo a seus descendentes todas as mudanças ocorridas nas células germinativas.

Como os peixes são animais vertebrados, o padrão principal reprodutivo é o sexuado, que envolve a produção de dois tipos de gametas, um feminino e um masculino, por indivíduos diferentes (gonocorismo) ou pelos mesmos indivíduos (hermafroditismo). Mas existem casos de reprodução unisexual em peixes, sendo ginogênese e hibridogênese (Vazzoler, 1996), reconhecidas em laboratório, e a partenogênese confirmada em animais mantidos em aquários. Nesses três casos não ocorre a participação do gameta masculino da mesma espécie, e os ovócitos se desenvolvem sem sua contribuição gênica. Outros aspectos reprodutivos relacionados à sexualidade dos peixes são apresentados nos Quadros 2 e 3.

O Quadro 2 traz alguns conceitos importantes sobre sexualidade, fecundação, período reprodutivo e tipo de desova. Tais conceitos são úteis, principalmente para a biologia pesqueira, uma vez que a identificação de áreas e épocas de desova auxiliam o estabelecimento de defesos de área e de época, em que a atividade pesqueira é interrompida. Por outro lado, o conhecimento da sexualidade é fundamental para que se conheça a época e o tamanho dos indivíduos em mudança de sexo, regulamentando e evitando a captura durante a transição ou antes da produção e eliminação de gametas.

No caso das espécies hermafroditas simultâneas (Sadovy de Mitcheson & Liu, 2008), em que ocorre o desenvolvimento e a maturação de gametas masculinos e femininos no ovotestes ao mesmo tempo, existem mecanismos de defasagem temporal na eliminação dos gametas para prevenir a autofecundação.

Dentre as espécies que ocorrem na região costeira do estado de São Paulo, 85,5% são gonocoristas, 1,7% hermafroditas protogínicas e 0,5% hermafroditas protândricas. Ainda não é conhecida a sexualidade de 9,3% das espécies.

**QUADRO 2.** Conceitos sobre reprodução de peixes.

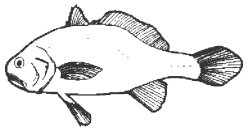
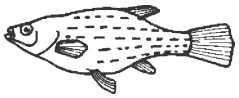
| Atributos | Nomenclatura, conceitos e definições | | |
|---|---|---|---|
| **Sexualidade** | Bissexual, dióica ou gonocorista | Machos ou fêmeas | Gônadas = testículos ou ovários |
| | Monóica ou hermafrodita | Simultâneo | Produção de gametas masculinos e feminino ao mesmo tempo; gônada = ovotestes |
| | | Sequencial (com mudança de sexo) | Ptotogínico - porção ovariana do ovotestes amadurece primeiro |
| | | | Protândrico - porção testicular do ovotestes amadurece primeiro |
| | | | Bidirecional - mais de uma mudança de sexo tanto para macho como para fêmeas |
| **Período reprodutivo** | Semélparo | Reprodução apenas uma vez na vida | Um ciclo reprodutivo |
| | Iteróparo | Reprodução várias vezes na vida | Vários ciclos reprodutivos |
| **Fecundação** | Interna | Cópula | Estrutura para transferência de espermatozoides |
| | Externa | Pareamento | Gametas na água |
| **Tipo de desova** | Total | Eliminação de ovócitos em curto período | Desova individual e populacional delimitada em curto espaço de tempo |
| | Parcelada | Eliminação de ovócitos em períodos sucessivos | Desova individual e da população dispera em longo período |

O Quadro 3 apresenta informações sobre os padrões de desenvolvimento e a relação trófica entre mãe e embrião. Para os actinopterígios teleósteos, os ovocíparos apresentam fecundação externa e os vivíparos fecundação interna. Para os elasmobrânquios o desenvolvimento embrionário inicia-se com o consumo do vitelo, proveniente dos ovócitos. Mas, no caso das espécies vivíparas aplacentárias, o vitelo se esgota e se estabelece alguma forma de nutrição especializada, como a fusão de ovócitos ou ovos na parede do saco vitelínico, ou a ingestão de ovos ou embriões irmãos no útero (ovofagia ou adelfofagia), ou a produção de uma substância gordurosa conhecida como "leite uterino", que chega ao embrião por filamentos uterinos (trofonemas) que adentram sua cavidade oral ou fendas branquiais.

O padrão vivíparo placentário caracteriza-se pela formação de uma ligação entre a parede do saco vitelínico do embrião e a parede uterina da mãe, denominada placenta. Do total dos elasmobrânquios conhecidos, 43% das espécies são ovíparos, enquanto 57% são vivíparos, sendo 27% lecitotróficos, 2% ovofágicos e adelfofágicos, 19% trofonemáticos e 9% placentários.

Informações sistematizadas sobre o ciclo de vida e, principalmente, sobre modos de reprodução dos peixes marinhos da costa do Brasil são raras na literatura nacional, sendo os de Dias (1989), Vazzoler (1996) e Trindade-Santos & Freire (2015), as principais.

**QUADRO 3. Padrões de partejo.** *Desenhos de Joana Dias Ho e Natasha Travenisk Hoff.*

| Grupo | Padrão de partejo | Fecundação/ desenvolvimento | Consumo do vitelo | Relação mãe-embrião | Exemplos |
|---|---|---|---|---|---|
| **Actinopterígios** | Ovocíparo | Externa/ externo | Completo ou não na eclosão | Nenhuma |  *Stellifer rastrifer* |
| | Vivíparo | Interna/ interno | Completo | Proteção |  *Jenynsia multidentata* |
| **Elasmobrânquios** | Ovíparo estendido | Interna/ externo | Completo | Nenhuma | *Atlantoraja cyclophora* |
| | Ovíparo retido | Interna/ interno | Completo | Proteção | *Scyliorhinus sp.* |
| | Vivíparo aplacentário lecitotrófico | Interna/ interno | Completo | Proteção; casca que envolve o embrião bastante fina | *Squallus spp.* |
| | Vivíparo aplacentário matrotrófico ovofágico/ adelfofágico | Interna/ interno | Completo, insuficiente | Embriões mais velhos predam ovos ou embriões irmãos | *Isurus oxyrinchus* |
| | Vivíparo aplacentário matrotrófico trofonemático | Interna/ interno | Completo, insuficiente | Filamentos produzem leite uterino | *Hypanus americanus* |
| | Vivíparo placentário/ placentotrófico | Interna/ interno | Completo, insuficiente | Saco vitelínico se funde à parede uterina (placenta) | *Sphyrna lewini* |

A primeira proposta de classificação dos peixes em guildas funcionais dos modos de reprodução foi proposta por Balon (1975), idealizada para peixes actinopterígios de águas interiores. A classificação é hierarquizada em graus de complexidade e apresenta três guildas principais para as espécies: não-guardadoras, guardadoras e carregadoras de prole. Neste capítulo tal proposta foi simplificada e adaptada para as espécies de actinopterígios marinhos.

A classificação das espécies em guildas reprodutivas deve ser vista em um contexto amplo, que subsidie o entendimento sobre qual o papel funcional das áreas de ocorrência e permanência das espécies: nas áreas de desova, ou berçários, ocorrem ovos e larvas das espécies; nos locais de retenção de jovens, ou infantários, há disponibilidade de alimento e proteção que asseguram seu crescimento. As estratégias reprodutivas identificadas são respostas à dinâmica ambiental.

A guilda das espécies não-guardadoras compreende a maioria das espécies de actinopterígios que eliminam gametas na coluna de água, com fecundação externa e alta fecundidade (milhares de ovócitos). Os ovos são pelágicos e, portanto, facilmente transportados e dispersos pelas correntes marinhas. Outras características desses ovos incluem transparência, tamanho pequeno (a maioria <3 mm), e com a presença de uma ou mais gotas de óleo para assegurar sua flutuação. Esses ovos constituem parte importante do ictioplâncton.

Apesar de consideradas não-guardadoras, a alta fecundidade assegura a sobrevivência de um número significativo de descendentes para essas espécies. Exemplos de espécies não-guardadoras são a sardinha-verdadeira, a corvina, o atum, as pescadas, entre muitas outras. Na costa do estado de São Paulo, 86,2% das espécies são não-guardadoras de prole.

As espécies guardadoras compõem 10,3% das espécies da região costeira paulista. Tais espécies apresentam fecundação externa e graus diferentes de cuidado com a prole. Ao contrário das espécies não-guardadoras, a guarda da prole inclui a retenção de ovos em locais protegidos e que evitem dispersão.

Nessa guilda são incluídas espécies que apresentam diversas estratégias: -deposição de ovócitos em substratos específicos, que assentam na superfície de fundo e são fecundados, como alguns baiacus-lisos (*Sphoeroides testudineus*); -produção de ovócitos com substâncias adesivas (donzela- *Stegastes fuscus*) ou filamentos adesivos (peixe-rei- *Atherinella brasiliensis*), que os mantêm presos a macroalgas ou fundos com determinada granulometria; -construção de ninhos, cavando o substrato, empilhando areia (alguns baiacus), aglutinando diferentes materiais, ou cavando e limpando uma área (peixe-porco- *Balistes capriscus*); -manutenção de os ovos em densas trilhas de muco flutuantes produzidas pela mãe durante a desova (peixe-diabo- *Lophius gastrophisus*), ou em massas gelatinosas (peixe-pedra/mangangá- *Scorpaena spp*.), entre outras. Em muitos casos o macho cuida da prole, utilizando comportamentos agonísticos, como a abertura da boca, movimentos bruscos, e a produção de sons e de luz (bioluminescência), como o macho de mamangá-liso (*Porichthys porosissimus*), além de retirar sedimento depositado nos ovos, como o peixe-sargentinho (*Abudefduf saxatilis*).

Espécies carregadoras de prole podem manter ovos, larvas ou jovens na boca, como os bagres (Ariidae) e os bocões-de-boca-amarela (Opistognathidae), ou em bolsas especiais fora da cavidade do corpo, como é o caso do peixe-cachimbo (*Syngnathus folletti*) e do cavalo-marinho (*Hippocampus erectus*). Nestes dois últimos, a fecundação é externa e a bolsa incubadora não apresenta ligação com a cavidade abdominal dos machos, mas é feita a partir de uma projeção da pele. Como o nome sugere, as espécies carregadoras de prole apenas transportam os ovos ou larvas e juvenis: a nutrição dos embriões é suprida pelo vitelo dos ovos, proveniente dos ovócitos. Um total de 3,5% das espécies da costa paulista são carregadoras de prole.

### 6.3 Ameaças à ictiofauna

A estrutura da comunidade ictíica é regulada pela complexa interação entre fatores abióticos e bióticos. Reconhecer e compreender os processos que atuam na organização funcional da ictiofauna, como a disponibilidade de habitat, a fisiologia, as relações ecológicas e os padrões reprodutivos, entre outros, subsidiam previsões sobre o futuro das comunidades de peixes frente à pressão pesqueira, à contaminação e às mudanças globais. Os efeitos isolados ou combinados dessas ameaças trazem alterações como o encolhimento dos habitat, alterações no limite de distribuição das espécies, mudanças fenológicas e colapso dos estoques pesqueiros, que afetarão as populações humanas. Estudos sobre a integridade biótica dos ecossistemas permitem identificar e ordenar ações de recuperação da ictiofauna. A criação de áreas marinhas protegidas, reconhecidas como berçários e infantários, a eliminação de práticas pesqueiras destrutivas, e o controle da contaminação da zona costeira, no contexto da adoção dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODSs) da Organização das Nações Unidas, são os principais enfrentamentos, baseados em conhecimento científico, para que as comunidades de peixes possam ser preservadas.

Foto: Leandro Coelho

## Referências Bibliográficas

ANDRADE, A.B.; VIAGGI, J.C.; FRANCO, A.C.S.; SEIXAS, L.; CRUZ, L.R.; SANTOS, L.N. 2018.Ictiofauna de costões rochosos. In: VALENTIN, J.L.; PAIVA, P.C.; SALOMON, P.S. (org.). A Baía de Guanabara: passado, presente e futuro de um ecossistema ameaçado. Curitiba: Editora CRV. Cap. IV-3, p. 213-234.

ÁVILA-DA-SILVA, A.O.; CARNEIRO, M.H.; MENDONÇA, J.T; BASTOS, G.C.C.; MIRANDA, L.V.; RIBEIRO, W.R.; SANTOS, S. 2019. Informe Pesqueiro de São Paulo, nº 112. São Paulo: Instituto de Pesca. 21p.

BACHUR, J.A. 2018. A ictiofauna costeira do Estado de São Paulo: uma compilação bibliográfica comentada. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo. 34p.

BATISTA, A.A. 2017. Peixes tropicais no seu limite de distribuição: dinâmica temporal da ictiofauna recifal no sul do Brasil. 2016. Tese (Doutorado em Ecologia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 203p.

BEGON, M.; TOWNSEND, C.R.; HARPER, J.L. 2006. Ecology: from individuals to ecosystem, 4th ed. UK: Blackwell Publishing. 737 p.

BEMVENUTI, M.A.; FISCHER, L.G. 2010. Peixes: morfologia e adaptações. Cadernos de Ecologia Aquática, v. 5, p. 31-54.

BONE, Q.; MOORE, R. 2008. Biology of Fishes, 3rd ed. Taylor and Francis. 478p.

CASTRO, B.M. 2014. Summer/winter stratification variability in the central part of the South Brazil Bight. Cont. Shelf Res., v. 89, p.15-23, 2014.

CASTRO, B.M.; MIRANDA, L.B. 1998. Physical oceanography of the Western Atlantic continental shelf located between 4ºN and 34ºS. In: ROBINSON, A.R.; BRINK, K.H. (org.). The Sea, Vol. 11. John Wiley & Sons, Inc. Cap. 8, p. 209–251.

COMPAGNO, L.G.V. 1984. Sharks of the world: an annotated and illustrated catalogue of shark species known to date. Food & Agriculture Org., v. 4, part. 2, p. 503-506.

CONTENTE, R.F. 2013. Padrões ecológicos locais e multidecadais da ictiofauna do estuário Cananéia-Iguape. Tese (Doutorado em Oceanografia) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CONVENÇÃO SOBRE DIVERSIDADE BIOLÓGICA (CDB). 2020. The Convention on Biological Diversity. World Wide Web electronic publication: https://www.cbd.int/, version (12/04/2020).

CORBISIER, T.N.; SOARES, L.S.H.; PETTI, M.A.; MUTO, E.Y.; SILVA, M.H.C.; MCCLELLAND, J. & VALIELA, I.J.A.E. 2006. Use of isotopic signatures to assess the food web in a tropical shallow marine ecosystem of Southeastern Brazil. Aquatic Ecology, v. 40, n. 3, p. 381-390.

DIAS, J.F. 1989. Padrões reprodutivos em teleósteos da costa brasileira: uma síntese. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo.

DRAZEN, J.C.; SUTTON, T.T. 2016. Dining in the deep: the feeding ecology of deep-sea fishes. Annu. Rev. Mar. Sci., v. 9, p. 337-366.

ELLIOTT, M.; QUINTINO, V. 2007. The estuarine quality paradox, environmental homeostasis and the difficulty of detecting anthropogenic stress in naturally stressed areas. Mar. Pollut. Bull., v. 54, p. 640–645.

ELLIOTT, M.; WHITFIELD, A.K.; POTTER, I.C.; BLABER, S.J.M.; CYRUS, D.P.; NORDLIE, F.G.; HARRISON, T.D. 2007. The guild approach to categorizing estuarine fish assemblages: a global review. Fish Fish., v. 8, p. 241-268.

ESCHMEYER, W.N.; FRICKE, R.; FONG, J.D.; POLACK, D. 2010. Marine fish biodiversity: A history of knowledge and discovery (Pisces). Zootaxa, v. 2525, p. 19-50.

FERREIRA, C.E.L.; FLOETER, S.R.; GASPARINI, J.L.; FERREIRA, B.P.; JOYEUX, J.C. 2004. Trophic structure patterns of Brazilian reef fishes: a latitudinal comparison. J. Biogeogr., v. 31, p. 1093-1106.

FERREIRA, C.E.L.; GONÇALVES, J.E.A. 2006. Community structure and diet of roving herbivorous reef fishes in the Abrolhos Archipelago south-western Atlantic. J. Fish Biol., v. 69, p. 1533-1551.

FIGUEIREDO, J.L. 1977. Manual de peixes marinhos do sudeste do Brasil. I. Introdução. Cações, raias e quimeras. São Paulo: Museu de Zoologia da Universidade de São Paulo. 104p.

FIGUEIREDO, J.L. 1981. Estudo das distribuições endêmicas de peixes da Província Zoogeográfica Marinha Argentina. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) - Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo. 121p.

FIGUEIREDO, J.L.; MENEZES, N.A. 1978. Manual de peixes marinhos do sudeste do Brasil. II. Teleostei (1). São Paulo: Museu de Zoologia da Universidade de São Paulo. 110p.

FIGUEIREDO, J.L.; MENEZES, N.A. 1980. Manual de peixes marinhos do sudeste do Brasil. III. Teleostei (2). São Paulo: Museu de Zoologia da Universidade de São Paulo. 90p.

FIGUEIREDO, J.L.; MENEZES, N.A. 2000. Manual de peixes marinhos do sudeste do Brasil. VI. Teleostei (5). São Paulo: Museu de Zoologia da Universidade de São Paulo. 116p.

FLORES-LOPES, F.; CETRA, M.; MALABARBA, L. R. 2010. Utilização de índices ecológicos em assembléias de peixes como instrumento de avaliação da degradação ambiental em programas de monitoramento. Biota Neotrop., v. 10, n. 4, p. 183–193.

FONSECA, G.A.B.; MITTERMEIER, R.A.; MITTERMEIER, C.G. 2006. Conservation of island biodiversity: importance, challenges, and opportunities. Center for Applied Biodiversity Science, A Conservation International Publication. 16p.

FROESE, R.; PAULY, D. Editors. 2019. FishBase. World Wide Web electronic publication: www.fishbase.org, version (12/2019).

GERKING, S.D. 1994. Feeding Ecology of Fish. California: Academic Press. 416 p.

GIBRAN, F.Z.; MOURA, R.L. 2012. The structure of rocky reef fish assemblages across a nearshore to coastal islands' gradient in Southeastern Brazil. Neotrop. ichthyol., v. 10, n. 2, p. 369–382.

GRAÇA LOPES, R.; TOMÁS, A.R.G.; TUTUI, S.L.S.; RODRIGUES, E.S.; PUZZI, A. 2002. Fauna acompanhante da pesca camaroeira no litoral do estado de São Paulo, Brasil. B. Inst. Pesca, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 173–188.

HAEDRICH, R.L. Estuarine Fishes. In: KETCHUM, B.H. 1983. (Ed.) Estuaries and Enclosed Seas. Amsterdam: Elsevier Publishing Company (Ecosystems of the World, 26), p. 183- 207.

HICKLING, C. F. 1970. A contribution to the Natural History of the English Grey Mullets [Pisces, Mugilidae]. J. Mar. Biolog. Assoc. U.K., v. 50, n. 3, p. 609-633.

HIDDINK, J.G.; MACKENZIE, B.R.; RIJNSDORP, A.; DULVY, N.K.; NIELSEN, E.E.; BEKKEVOLD, D.; HEINO, M.; LORANCE, P.; OJAVEER, H. 2008. Importance of fish biodiversity for the management of fisheries and ecosystems. Fish. Res., v. 90, n. 1–3, p. 6-8.

HOFF, N.T. 2015. Integridade biótica dos ecossistemas na região do Arquipélago dos Alcatrazes, São Sebastião – SP. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo. 150p.

JAKSIC, F.M.; MEDEL, R.G. 1989. Objective recognition of guilds: testing for statistically significant species clusters. Oecologia, v. 82, p. 87-92.

LLOPIZ, J.K.; COWEN, R.K.; HAUFF, M.J.; JI, R.; MUNDAY, P.L.; MUHLING, B.A.; PECK, M.A.; RICHARDSON, D.E.; SOGARD, S.; SPONAUGLE, S. 2014. Early life history and fisheries oceanography: new questions in a changing world. Oceanogr., v. 27, n. 4, p. 26-41.

LOWE-McCONNELL, R.H. 1999. Estudos ecológicos de comunidades de peixes tropicais. São Paulo: EDUSP. 536p.

LUIZ JR., O.J.; CARVALHO-FILHO, A.; FERREIRA, C.E.L.; FLOETER, S.R.; GASPARINI, J.L.; SAZIMA, I. 2008. The reef fish assemblage of the Laje de Santos Marine State Park, Southwestern Atlantic: annotated checklist with comments on abundance, distribution, trophic structure, symbiotic associations, and conservation. Zootaxa, v. 1807, n. 1, p. 1-25.

MAHIQUES, M.M.; SOUSA, S.H.M.; BURONE, L.; NAGAI, R.H.; SILVEIRA, I.C.A.; FIGUEIRA, R.C.L.; SOUTELINO, R.G.; PONSONI, L.; KLEIN, D.A. 2011. Radiocarbon geochronology of the sediments of the São Paulo Bight (Southern Brazilian Upper Margin). An. Acad. Bras. Cienc., v. 83, n. 3, p. 817–834.

MAHIQUES, M.M.; TESSLER, M. G.; CIOTTI, A.M.; SILVEIRA, I.C.A.; SOUSA, S.H.D.M.; FIGUEIRA, R.C.L.; TASSINARI, C.C.G.; FURTADO, V.V.; PASSOS, R.F. 2004. Hydrodynamically driven patterns of recent sedimentation in the shelf and upper slope off Southeast Brazil. Cont. Shelf Res., v. 24, n. 15, p. 1685-1697.

MEDEIROS, P.R. 2011. Distribuição e uso de habitat por peixes recifais e sua relação com a complexidade ambiental no arquipélago Fernando de Noronha, Nordeste do Brasil. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) – Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba. 124p.

MENEZES, N.A. 2011. Checklist dos peixes marinhos do Estado de São Paulo, Brasil. Biota Neotrop., v. 11, Supl. 1, p. 33-46.

MENEZES, N.A.; BUCKUP, P.A.; FIGUEIREDO, J.L.; MOURA, R.L. (Eds.). 2003. Catálogo das espécies de peixes marinhos do Brasil. São Paulo: Museu de Zoologia da Universidade de São Paulo. 159p.

MENEZES, N.A.; FIGUEIREDO, J.L. 1980. Manual de peixes marinhos do Sudeste do Brasil. IV. Teleostei (3). São Paulo: Museu de Zoologia da Universidade de São Paulo. 96p.

MENEZES, N.A.; FIGUEIREDO, J.L. 1985. Manual de peixes marinhos do Sudeste do Brasil. IV. Teleostei (4). São Paulo: Museu de Zoologia da Universidade de São Paulo. 105p.

MOYLE, P.B.; CECH, J.J. 1988.Fishes: An introduction to ichthyology. 2nd ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall. 612p.

NONATO, E.F.; AMARAL, A.C.Z.; FIGUEIREDO, J.L. 1983. Contribuição ao conhecimento da fauna de peixes do litoral norte do estado de São Paulo. Bolm. Inst. oceanogr., S. Paulo, v.32, n. 2, p. 143-152.

PASSOS, A.C. 2012. Ictiofauna do complexo estuarino de Paranaguá e áreas adjacentes. Dissertação (Mestrado em Sistemas Costeiros e Oceânicos) – Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná. 120p.

PAVLOV, D.; KASUMYAN, A.O. 2002. Feeding diversity in fishes: trophic classification of fish. J. Ichthyol., v. 42, p. 137-159.

PINHEIRO, H.T.; ROCHA, L.A.; MACIEIRA, R.M.; CARVALHO-FILHO, A.; ANDERSON, A.B.; BENDER, M.G.; DARIO, F.D.; FERREIRA, C.E.L.; FIGUEIREDO-FILHO, J.; FRANCINI-FILHO, R.; GASPARINI, J.L.; JOYEUX, J.-C.; LUIZ, O.J.; MINCARONE, M.M.; MOURA, R.L.; NUNES, J.A.C.C.; QUIMBAYO, J.P.; ROSA, R.S.; SAMPAIO, C.L.S.; SAZIMA, I,; SIMON, T.; VILA-NOVA, D.A. & FLOETER, S. 2018. South-western Atlantic reef fishes: zoogeographycal patterns and ecological drivers reveal a secondary biodiversity centre in the Atlantic Ocean. Diversity and Distributions, 24:951-965.

PIVETTA, A.P.D.; MORAIS, M.M.; COMIN, E.J. 2012. Caracterização preliminar quantitativa e qualitativa da estrutura de assembleias de peixes recifais da Ilha da Queimada Grande – SP. Revta Ceciliana, v. 4, n. 2, p. 77-83.

PRATES, A.P.L.; GONÇALVES, M.A.; ROSA, M.R. 2012. Panorama da conservação dos ecossistemas costeiros e marinhos no Brasil. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. 152p.

REVIZEE. 2006. Avaliação do Potencial Sustentável de Recursos Vivos na Zona Econômica Exclusiva. Relatório executivo, Ministério do Meio Ambiente. 303p.

ROCHA, G.; ROSSI-WONGTSCHOWSKI, C.L.D.B. 1998. Demersal fish community on the inner shelf of Ubatuba, southeastern Brazil. Revta Brasil. oceanogr., v. 46, n. 2, p. 93-109.

ROCHA, M.L.F.; DIAS, J.F. 2015. Inventory of Chondrichthyes and Actinopterygii species collected in the central coast of São Paulo State, Brazil. Biota Neotrop., v. 15, n. 2, p. 1-9.

ROCHA, M.L.F.; FERNANDEZ, W.S.; PAIVA FILHO, A.M. 2010. Spatial and temporal distribution of fish in Palmas bay, Ubatuba, Brazil. Braz. J. Oceanogr., v. 58, n.1, p. 31-43.

ROLIM, F.A. RODRIGUES, P.F.C.; GADIG, O.B.F. 2017. Peixes de recife rochoso: Estação Ecológica de Tupinambás – São Paulo. 1ª. Ed. São Paulo: Anolis Books. 80p.

ROSSI-WONGTSCHOWSKI, C.L.D.B.; PAES, E.T. 1993. Padrões espaciais e temporais da comunidade de peixes demersais do litoral norte do Estado de São Paulo - Ubatuba, Brasil. Publção esp. Inst. oceanogr., S Paulo, v. 10, p. 169-188.

ROSSI-WONGTSCHOWSKI, C.L.D.B.; SANTOS, A.M.V.; COSTA, M.R.; FIGUEIREDO, J.L.; SILVA, A.D.A.; MOURA, R.L.; MENEZES, N.A. 2009. Peixes Marinhos. In: BRESSAN, P.M.; KIERULFF, M.C.M.; SUGIEDA, A.M. (Coord.) Fauna ameaçada de extinção no Estado de São Paulo: vertebrados. São Paulo: Fundação Parque Zoológico de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente. p. 427 -567.

ROSSI-WONGTSCHOWSKI, C.L.D.B.; SOARES, L.S.H.; MUTO, E.Y. 2008. Ictiofauna. In: PIRES-VANIN, A.M.S. (Org.). Oceanografia de um ecossistema subtropical: plataforma de São Sebastião, SP. São Paulo: EDUSP. Cap. IV-4, p. 381-404.

SADOVY DE MITCHESON, Y,; LIU, M. 2008. Functional hermaphroditism in teleosts. Fish Fisheries, v. 9, p. 1–43.

SILVA, A.T. 2009. Estrutura trófica da comunidade de peixes de riachos da bacia do rio Itanhaém, litoral sul do estado de São Paulo, Brasil. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas, Zoologia) – Instituto de Biociências de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista. 97p.

SIMBERLOFF, D.; DAYAN, T. 1991. The guild concept and the structure of ecological communities. Annu. Rev. Ecol. Syst., v.22, n. 1, p. 115-143.

SOUZA G.R.S.; GADIG, O.B.F.; MOTTA, F.S.; MOURA, R.L.; FRANCINI-FILHO, R.B.; GARRONE-NETO D. 2018. Reef fishes of the Anchieta Island State Park, Southwestern Atlantic, Brazil. Biota Neotropica, 18(1).

SOUZA, R.B.; ROBINSON, I.S. 2004. Lagrangian and satellite observations of the Brazilian Coastal Current. Cont. Shelf Res., v. 24, n. 2, p. 241–262.

TRINDADE-SANTOS, I.; FREIRE, K.M.F. 2015. Analysis of reproductive patterns of fishes from three Large Marine Ecosystems. Front. Mar. Sci., v, 2, n. 38, doi: 10.3389/fmars.2015.00038.

VAZZOLER, A.E.A.M. 1991. Síntese de conhecimentos sobre a biologia da corvina *Micropogonias furnieri* (Desmarest, 1823) da costa do Brasil. Atlântica, Rio Grande, 13 (I): 55-74.

VAZZOLER, A.E.A.M. 1996. Biologia da reprodução em peixes teleósteos: teoria e prática. Maringá: EDUEM; São Paulo: SBI. 169p.

WHITFIELD, A.K.; ELLIOTT, M. 2002. Fishes as indicators of environmental end ecological changes within estuaries: a review of progress and some suggestions for the future. J. Fish Biol., n. 61, Supl. A, p. 229-250.

WOOTTON, J.T. 1992. Indirect effects, prey susceptibility, and habitat selection: impacts of birds on limpets and algae. Ecology, v. 73, n. 3, p. 981-991.

YÁÑEZ-ARANCIBIA, A. 1986. Ecología de la zona costera - Análisis de siete tópicos. México: AGT Editor. 189p

ZAHORCSAK, P.; SILVANO, R.A.M.; SAZIMA, I. 2000. Feeding biology of a guild of benthivorous fishes in a sandy shore on south-eastern Brazilian coast. Revta. Bras. Biol., v. 60, p. 511-518.

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 26*

# TARTARUGAS MARINHAS

*Marcos César de Oliveira Santos*

REVISÃO: CAMILA NEGRÃO SIGNORI

CITAÇÃO SUGERIDA: SANTOS, Marcos César de Oliveira. Tartarugas marinhas. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 26: p. 573-597.

# Tartarugas Marinhas

*Marcos César de Oliveira Santos*

## 1. Introdução

Apesar de serem representadas por apenas sete espécies remanescentes de uma longa história evolutiva, as tartarugas marinhas, junto aos elasmobrânquios (tubarões e raias), as aves marinhas e os mamíferos aquáticos (baleias, golfinhos, focas, lobos e leões marinhos e peixes-boi), são vertebrados que costumam encantar as sociedades humanas globalmente. Dada essa característica, costumam ser incluídos em um grupo popular conhecido por "megafauna carismática".

Esses vertebrados constituem o seleto grupo não taxonômico dos organismos marinhos que são utilizados como espécies-bandeira de proteção aos oceanos pela empatia que geram aos humanos. Em função de uma alta popularidade, consequente de uma ultra exposição de imagens e informações, esses organismos costumam atrair um número considerável de pessoas a participar de cursos técnicos e/ou de nível superior nas áreas da Oceanografia, da Biologia (marinha) e da Ecologia, com o anseio de se dedicar à pesquisa e/ou à conservação de espécies e de seus ecossistemas, ou simplesmente para apreciar a beleza e a natureza dessas formas de vida. Para atender a esse público, este livro apresenta aos leitores três capítulos específicos sobre as tartarugas, as aves e os mamíferos marinhos. Informações sobre esses grupos de vertebrados são dificilmente encontradas nos livros-texto adotados em cursos superiores em língua portuguesa e, muitas vezes, estão ausentes em cursos técnicos ou acadêmicos. Nos três casos, o objetivo é tratar cada um dos grupos com enfoque técnico, deixando de lado seus altos "índices de fofulência".

Tartarugas, aves e mamíferos marinhos têm histórias evolutivas ímpares, adaptações incríveis aos meios em que vivem, e desempenham papéis ecológicos únicos nos sistemas ecológicos onde podem ser encontrados. E são essas particularidades que precisam ser melhor conhecidas pelo público. Objetiva-se que esses textos sirvam como um alicerce a quem deseja conhecer mais detalhes sobre esses organismos mencionados, e que deste primeiro contato surja interesse em procura de mais referências bibliográficas, atualmente mais facilmente acessíveis pelos meios digitais de procura. Como consta no título, neste capítulo serão apresentadas as tartarugas marinhas.

## 2. Quem são as tartarugas marinhas

É preciso, neste momento, apresentar a definição popular do grupo não taxonômico das "tartarugas marinhas", que ganhou força de uso nas sociedades modernas. Em seguida, é necessário apresentar a caracterização taxonômica das sete espécies atualmente viventes. *Tartarugas marinhas são quelônios que utilizam estuários e/ou oceanos em seu ciclo de vida*.

O termo quelônio deriva-se do grego "*kelone*", que significa "armadura", que é uma referência ao casco ou carapaça, uma estrutura única e exclusiva na história evolutiva dos vertebrados. Já o termo "tartaruga", em uma das versões etimológicas, vem do francês "*tortoise*", que originalmente relacionou-

se a "*marine tortoise*" por volta dos anos 1600, derivado de "*tortue*" ou "*tortre*", da própria língua francesa do século XIII, associado frequentemente a "besta diabólica". Que diferença de ótica após sete séculos, não? Certamente pode ter sido centrada em desconhecimento sobre a maior parte das formas de vida naqueles tempos. Há outra versão etimológica do termo que descreve uma origem latina oriunda da palavra "testa", que significaria proteção e, supostamente, a partir desse termo se originaria o termo "*tortoise*" em língua francesa, e "*turtle*" em língua inglesa.

Assim, faz mais sentido compreender a origem da terminologia que define taxonomicamente o grupo que inclui todas as tartarugas terrestres e as espécies de águas doce, salobra e marinha: os "Testudines". Eles são representados atualmente por pouco mais de 300 espécies de ocorrência concentrada em zonas tropicais, subtropicais e temperadas, com tamanho total variando entre 10 cm a 2,5 m quando adultas.

Junto com as serpentes, os lagartos, a iguana marinha e a tuatara – um pequeno lagarto endêmico da Nova Zelândia ("Lepidosauria", 7.800+ espécies), os jacarés e crocodilos ("Archosauria Crocodilia", 23+ espécies) e as aves ("Archosauria Aves", 11.000+ espécies), compõem o clado "Sauropsida" (Fig. 1), que significa "face de lagarto". "Sauropsida" são dioicos e, com exceção de algumas espécies de serpentes, são todos ovíparos.

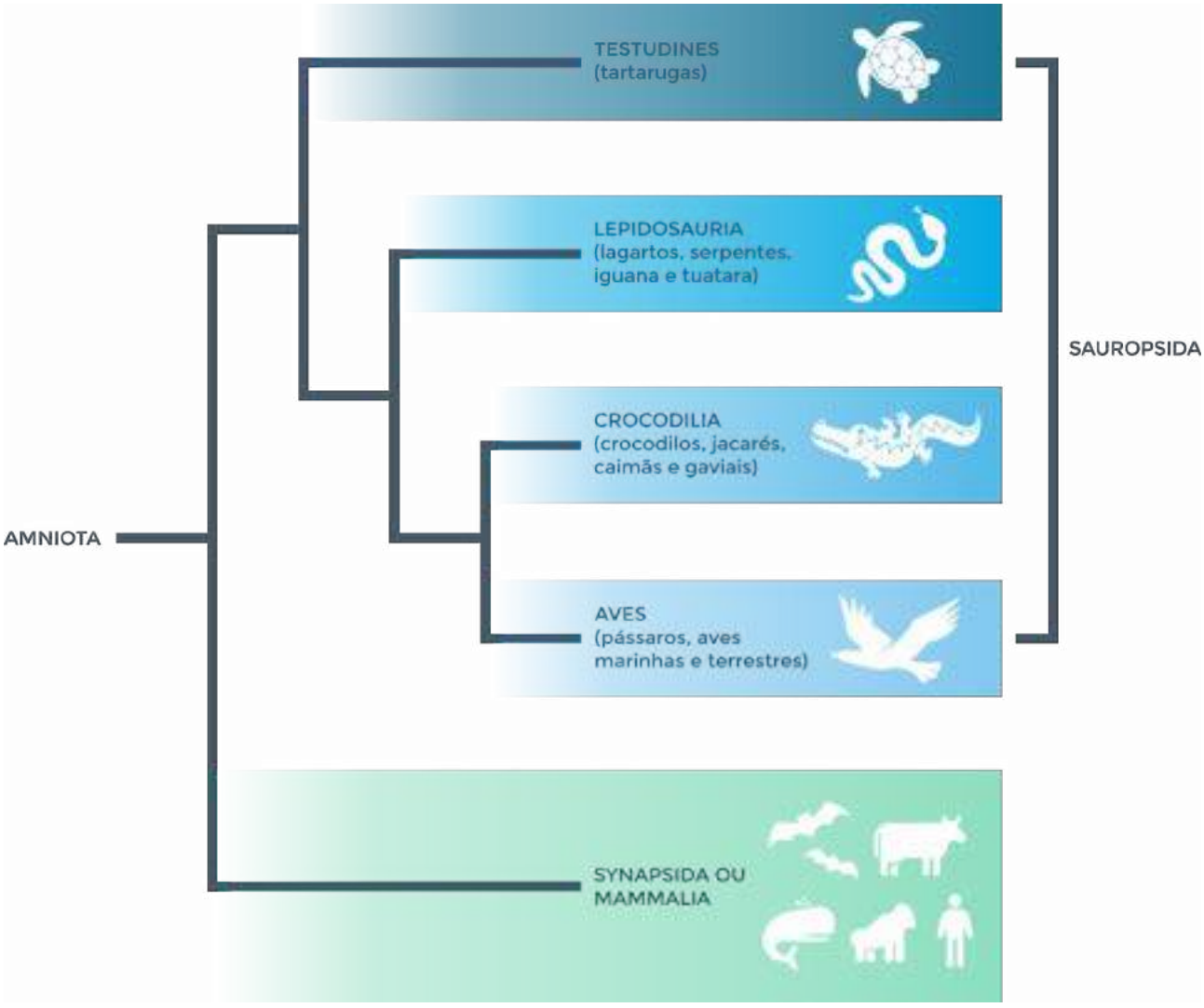



**FIGURA 1. Cladograma simplificado dos clados Sauropsida e Synapsida.** *Adaptado de Liem et al. (2013). Arte: Marcos Santos.*

## 3. Origem, evolução e diversidade de espécies

Os primeiros fósseis dos testudíneos são registrados para 220 milhões de anos, no Triássico, que é o período datado para a origem do grupo até este momento. O primeiro quelônio tratava-se de um organismo de cerca de 1 metro de comprimento total do gênero *Proganochelys*. Esse testudíneo transitava entre os meios terrestre e de água doce, e apresentava pequenos dentes que foram perdidos ao longo do processo evolutivo.

Nos dias atuais, a Ciência apresenta cada vez mais novidades sobre os possíveis ancestrais dos quelônios, que deveriam se tratar de lagartos que não apresentavam casco, que por sua vez passariam a se desenvolver por mutações dos genes HOX relacionados ao desenvolvimento embrionário, há cerca de 220 milhões de anos.

Até o presente momento, o primeiro registro fóssil de uma tartaruga marinha é vinculado a uma espécie encontrada na bacia do Araripe, no norte-nordeste do Brasil, datado de 206 milhões de anos: *Santanachelys graffneyi*, com até 20 centímetros de comprimento total. As maiores tartarugas marinhas existentes pertenceram à família Protostegidae e ao gênero *Archelon*, atingindo até 4,6 metros de comprimento total e pesando cerca de 2,8 toneladas. Suas nadadeiras peitorais chegavam a ter quase 5 metros de comprimento, e sua cabeça tinha cerca de 1 metro de comprimento. Esses organismos apresentavam uma forte mandíbula, e deveriam se alimentar de invertebrados dotados de fortes carapaças.

As sete espécies viventes nos dias atuais pertencem a apenas duas famílias: **Dermochelyidae**, composta por uma espécie apenas, a tartaruga-de-couro, *Dermochelys coriacea*, e **Cheloniidae**, composta por seis espécies, a tartaruga-cabeçuda, *Caretta caretta*, a tartaruga-de-pente, *Eretmochelys imbricata*, a tartaruga-verde, *Chelonia mydas*, a tartaruga-olivácea ou tartaruga-oliva, *Lepidochelys olivacea*, a tartaruga-de-Kemp, *Lepidochelys kempii*, e a tartaruga-de-casco-achatado, *Natator depressus*. Apenas as duas últimas espécies não contam com registros em águas brasileiras, com a tartaruga-de-Kemp ocorrendo apenas no Atlântico Norte Ocidental, e a tartaruga-de-casco-achatado ocorrendo apenas na Oceania, com maior incidência na plataforma continental da Austrália.

Antes de apresentar as características principais diagnósticas das cinco espécies que ocorrem em águas brasileiras, torna-se necessário apresentar suas principais características anatômicas das tartarugas marinhas.

## 4. Aspectos básicos de morfologia

De uma maneira geral, é bastante simples caracterizar morfologicamente uma tartaruga marinha. Em um sentido antero-posterior, elas apresentam a cabeça, o pescoço, o casco ou carapaça, as nadadeiras ou membros anteriores (2), as nadadeiras ou membros posteriores (2), e a cauda.

Na cabeça é importante destacar a presença de um par de narinas e um par de olhos. A maxila e a mandíbula são recobertas por um anexo tegumentário, chamado de ranfoteca, que auxilia todas as espécies a capturar e macerar seus itens alimentares, com exceção da tartaruga-de-couro que não a apresenta.

Ainda na cabeça, um conjunto de escamas dérmicas revestem a mesma em todas as espécies, com exceção da tartaruga-de-couro. As escamas ou placas pré-frontais indicadas na Figura 2 servem como uma das principais ferramentas diagnósticas para identificar as seis espécies remanescentes de tartarugas

marinhas. Elas variam numericamente entre um (tartaruga-verde e tartaruga-de-casco achatado) e dois (tartaruga-de-pente, tartaruga-cabeçuda, tartaruga-olivácea e tartaruga-de-Kemp) pares. Elas recebem essa nominação por se localizarem externamente sobre os ossos pré-frontais do crânio, posteriores à ranfoteca da maxila e às narinas, e situadas entre os olhos.

**FIGURA 2.** **Morfologia geral de uma tartaruga-cabeçuda,** *Caretta caretta*. **As escamas pré-frontais e as placas laterais (PL) são as principais ferramentas diagnósticas para identificar as espécies encontradas em águas brasileiras.** *Foto: Marcos Santos*.

O casco das tartarugas marinhas tem como principal função a proteção dos órgãos internos. É formado por vértebras modificadas com costelas fusionadas, associados a placas ou escudos queratinizados com terminologia relacionada ao seu posicionamento, com as seguintes nominações: nucal ou cervical, marginal, lateral ou costal, central ou vertebral, e suprapigal (Fig. 2). As placas queratinizadas laterais do casco de todas as tartarugas marinhas, exceto as tartarugas-de-couro, são as outras principais ferramentas usadas como diagnóstico para identificar espécies.

Com o conhecimento prévio de que a tartaruga-de-Kemp e a tartaruga-de-casco-achatado não ocorrem em águas brasileiras, e de que a tartaruga-de-couro não apresenta escamas pré-frontais e nem placas laterais, apenas com acesso aos dados associados aos números de escamas pré-frontais e de placas laterais, é possível identificar as quatro demais espécies de tartarugas marinhas que ocorrem em águas brasileiras.

A tartaruga-de-pente (*Eretmochelys imbricata*) e a tartaruga-verde (*Chelonia mydas*) apresentam quatro pares de placas ou escudos dérmicos laterais (mas a tartaruga-de-pente apresenta dois pares de escamas pré-frontais e a tartaruga-verde apenas um par), a tartaruga-cabeçuda (*Caretta caretta*) apresenta cinco pares, e a tartaruga-olivácea (*Lepidochelys olivacea*) apresenta mais do que cinco pares de placas laterais que são assimétricas, sendo geralmente entre seis e oito. Já houve para esta espécie registro de cinco placas laterais, que pode ser uma exceção à regra.

A porção ventral do casco é chamada de plastrão, que está associado às costelas abdominais. A cobertura do plastrão também é formada por placas ou escudos queratinizados com terminologia relacionada ao seu posicionamento, com as seguintes nominações no sentido antero-posterior: intergular, gular, humeral, peitoral, abdominal, femoral e anal (duas de cada), e as inframarginais

abaixo das marginais da porção superior do casco (várias). As nadadeiras são constituídas por ossos comumente encontrados na maioria dos vertebrados, e são anatomicamente estruturadas para as atividades de locomoção em meio aquático e terrestre, para escavar e cobrir ninhos em praias onde são depositados os ovos pelas fêmeas, para ancoragem ao substrato, e até para cobrir os olhos quando o reflexo do sol interfere em seu campo de visão do substrato marinho.

Nos machos, as unhas nas nadadeiras são proporcionalmente maiores, e são importantes para agarrarem-se às fêmeas nos momentos de cópula. Para ambos os sexos, as unhas podem auxiliá-los na ancoragem no substrato marinho. O úmero dos membros anteriores de tartarugas marinhas encontradas mortas é utilizado pelos cientistas para determinar a idade daqueles indivíduos após preparação histológica. Há deposições anuais de camadas de crescimento, que auxiliam os investigadores a realizar estudos de crescimento e reprodução, além de avaliar as classes etárias mais afetadas por mortalidade.

Tanto machos quanto fêmeas apresentam uma cauda com estrutura óssea em sua sustentação. Na cauda se encontra a cloaca, que é a cavidade onde se abrem o trato intestinal, o sistema urinário, e o sistema reprodutivo; ou seja, via por onde são eliminadas as fezes e a urina, e são liberados o esperma dos machos e os ovos pelas fêmeas. A cauda dos machos adultos é proporcionalmente maior do que das fêmeas adultas, e a cloaca dos machos se encontra em uma posição mais distal quando comparada à posição da cloaca das fêmeas.

Foto: Diogo Barcellos

## 5. Identificando as espécies que ocorrem na costa brasileira

São cinco as espécies de tartarugas marinhas que podem ser encontradas em águas estuarinas, costeiras, oceânicas e em ilhas da costa brasileira. Elas serão apresentadas a seguir de forma padronizada para facilitar as comparações, com as nominações em português, inglês e nomes científicos.

## Tartaruga-de-couro (*Dermochelys coriacea*)
### *Leatherback sea turtle*

**Coloração:** dorso negro ou cinza-escuro com pintas arredondadas claras, e ventre claro.

**Características diagnósticas da cabeça:** dois entalhes laterais na maxila e um entalhe frontal. Sem placas pré-frontais.

**Características diagnósticas do casco:** sem placas ósseas. Origem do seu nome científico – "*dermo*" = pele; "*chelys*" = quelônio/tartaruga; "*corium*" = couro; "*acea*" = natureza. Apresentam cinco cristas dorsais na carapaça.

**Tamanho de casco e peso máximos de adultos:** 1,8 metros e 900 kg.

**Hábitos alimentares:** águas-vivas e outros organismos planctônicos. Papilas esofágicas formam espinhos de queratina voltados para o interior do esôfago para evitar que presas escorregadias escapem durante a captura. Uma ação muscular do esôfago auxilia na expulsão de água salgada ingerida.

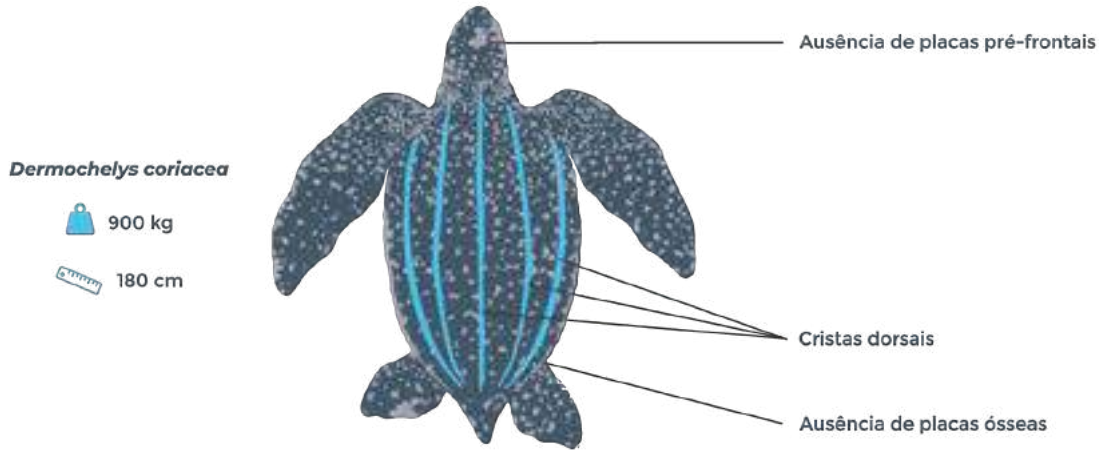


**FIGURA 3.** Tartaruga-de-couro, *Dermochelys coriacea*, em praia de desova. Sua morfologia é bastante distinta das seis demais espécies de tartarugas marinhas. *Foto: Irin717 – banco de imagens.*

## Tartaruga-cabeçuda (*Caretta caretta*)
### *Loggerhead sea turtle*

**Coloração:** dorso marrom ou marrom-avermelhado. Ventre claro, amarelado.

**Características diagnósticas da cabeça:** cabeça robusta com dois pares de placas pré-frontais.

**Características diagnósticas do casco:** cinco pares de placas laterais.

**Tamanho de casco e peso máximos de adultos:** 1,4 metros e 300 kg.

**Hábitos alimentares:** onívora - crustáceos, moluscos (gastrópodes, bivalves, cefalópodes), equinodermos, esponjas, corais, poliquetas, anêmonas, ouriços, peixes, algas, etc. Recebe a nominação de "*crushing jaw*" em inglês (mandíbula/maxila esmagadoras), pela alta capacidade de capturar, processar e moer presas.

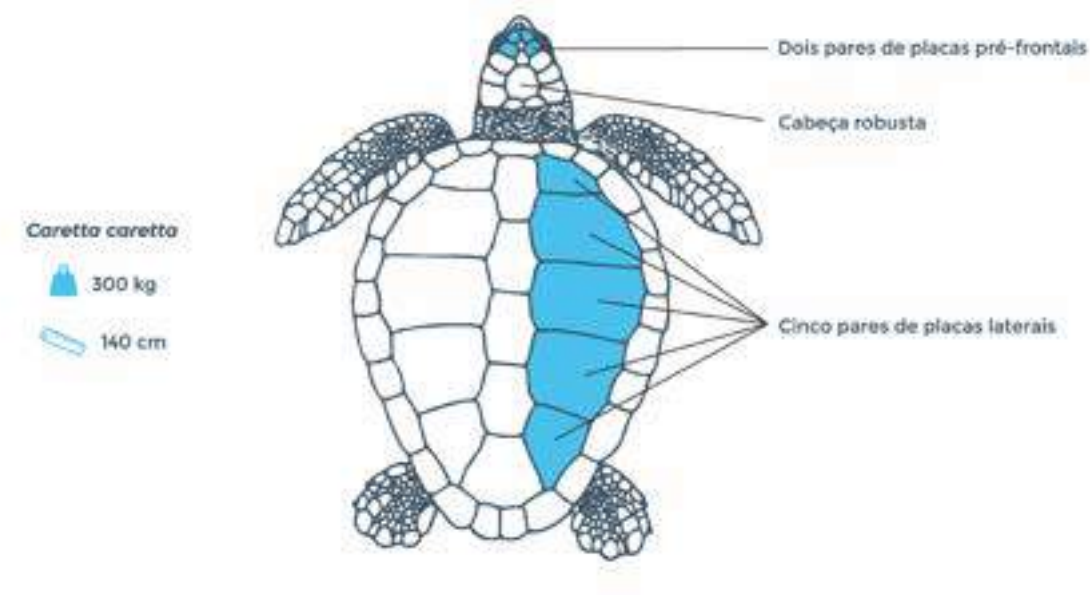


**FIGURA 4. Tartaruga-cabeçuda,** *Caretta caretta*, **em reabilitação.** *Foto: Marcos Santos.*

## Tartaruga-de-pente (*Eretmochelys imbricata*)
### *Hawksbill sea turtle*

**Coloração:** dorso âmbar a marrom escuro, com matizes amareladas. Ventre claro, amarelado.

**Características diagnósticas da cabeça:** cabeça com dois pares de placas pré-frontais. Ranfoteca pronunciada lembra um bico de ave, de onde se originou seu nome popular em língua inglesa: "*hawksbill*" = bico de falcão.

**Características diagnósticas do casco:** quatro pares de placas laterais. Placas dorsais se encontram imbricadas = uma peça é parcialmente coberta pela anterior e assim cobre a subsequente; de onde se origina seu nome específico. As placas marginais são serrilhadas.

**Tamanho de casco e peso máximos de adultos:** 1 metro e 100 kg.

**Hábitos alimentares:** onívora. Muitas vezes chamadas de "*sponge eaters*" em língua inglesa pelas preferências em se alimentarem de esponjas. Algas e cnidários também fazem parte desta lista preferencial.

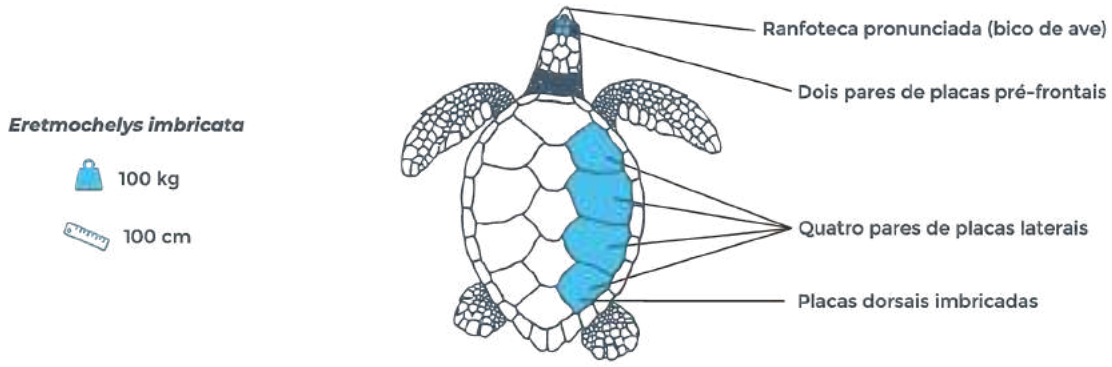


**FIGURA 5.** Tartaruga-de-pente, *Eretmochelys imbricata*, no substrato marinho de Fernando de Noronha. *Foto: Marcos Santos*.

## Tartaruga-verde (*Chelonia mydas*)
### *Green sea turtle*

**Coloração:** dorso com diversos padrões de cores; variam com idade. Filhotes com casco escuro, juvenis variando entre marrom escuro a verde-oliva, e adultos variando entre marrom, marrom com pintas/machas/raios claros. Ventre claro, amarelado. O componente de coloração "verde" dos nomes populares em português e inglês é proveniente da cor de sua gordura subcutânea, e não do casco.

**Características diagnósticas da cabeça:** cabeça com um par de placas pré-frontais.

**Características diagnósticas do casco:** quatro pares de placas laterais.

**Tamanho de casco e peso máximos de adultos:** 1,2 metros e 200 kg.

**Hábitos alimentares:** adultos são herbívoros e juvenis tendem a ser onívoros.

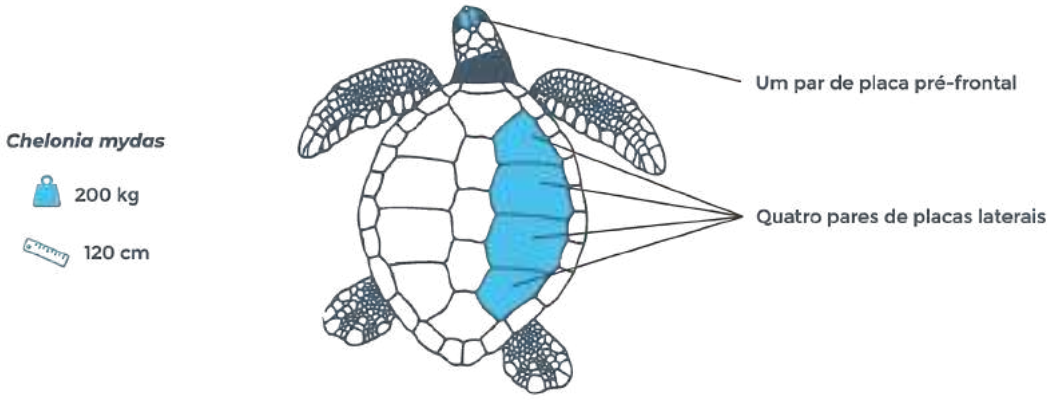


**FIGURA 6.** Tartaruga-verde, *Chelonia mydas*, forrageando em banco de algas no píer da base de pesquisas do Instituto Oceanográfico da USP em Ubatuba, SP. *Foto: Marcos Santos*.

### Tartaruga-oliva/olivácea (*Lepidochelys olivacea*)
### *Olive Ridley sea turtle*

**Coloração:** dorso marrom escuro a verde-oliva. Ventre claro, amarelado.

**Características diagnósticas da cabeça:** cabeça robusta com dois pares de placas pré-frontais.

**Características diagnósticas do casco:** seis a oito pares de placas laterais.

**Tamanho de casco e peso máximos de adultos:** 80 centímetros e 45 kg.

**Hábitos alimentares:** onívora - crustáceos, moluscos, equinodermos, cnidários, peixes.

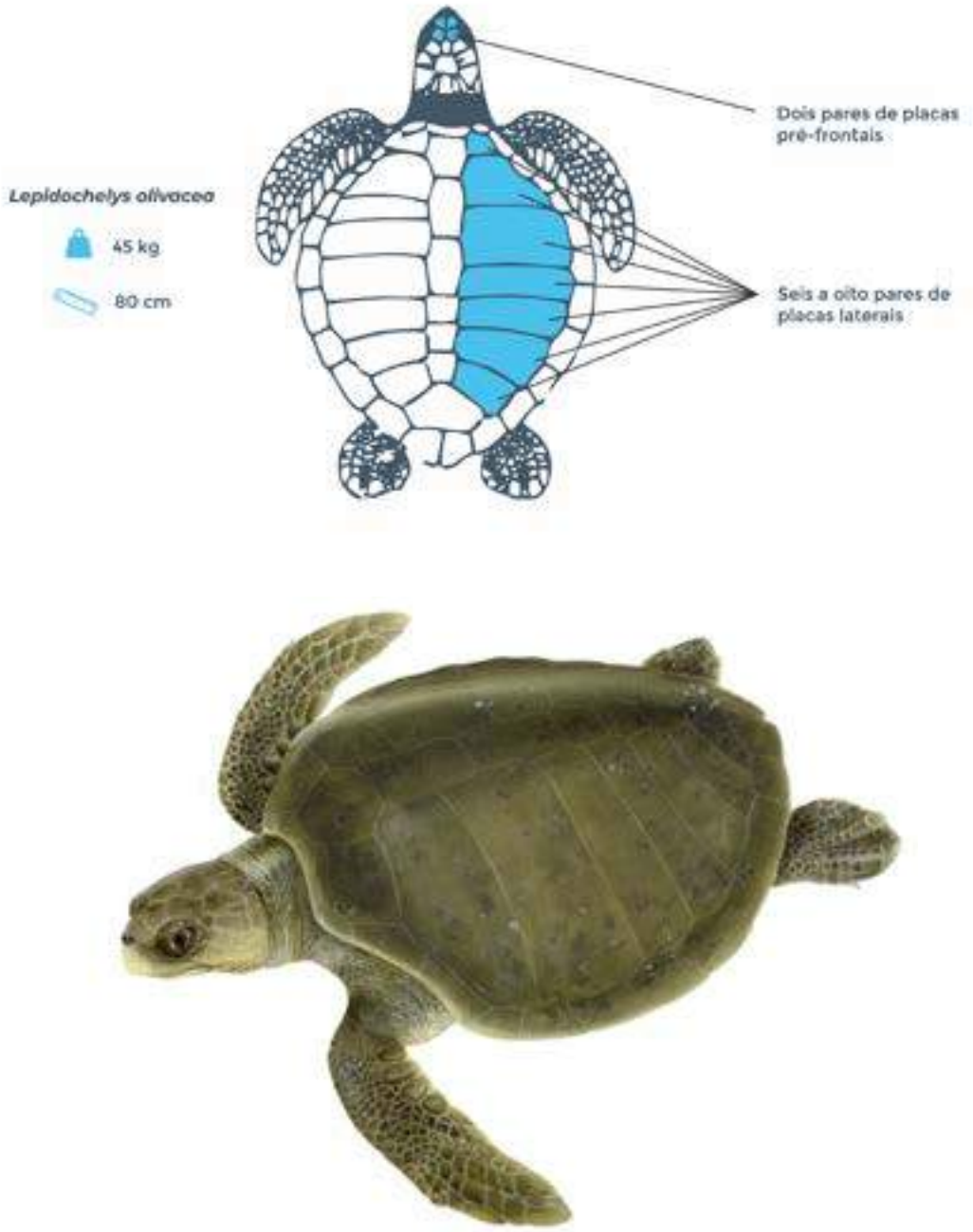



**FIGURA 7.** Ilustração de tartaruga-oliva, *Lepidochelys olivacea*. *Editado de:festivalclaca.cat*.

## 6. Adaptações aos meios aquático e terrestre

Ao longo do processo evolutivo de todos os organismos vivos, o meio em que eles são encontrados funciona como importante fator que implica em diversas adaptações morfofisiológicas para atenderem aos seus ciclos de vida. No caso das tartarugas marinhas, é importante destacar as adaptações para utilizarem tanto o meio terrestre, onde principalmente as fêmeas visitam para a ovoposição ou desova, quanto o meio aquático, onde passam praticamente toda a sua vida. No meio terrestre, há a necessidade de se evitar o aquecimento em excesso e a desidratação corpórea. No meio aquático, há principalmente as ações da temperatura, pressão, salinidade e transparência da água.

A morfologia previamente descrita das tartarugas marinhas não as habilita a se movimentarem com rapidez em meio terrestre. A força da gravidade sobre essa superfície, associado ao peso de cada indivíduo, torna esses movimentos relativamente lentos. No meio aquático, porém, a morfologia das tartarugas marinhas as capacita realizar movimentos mais rápidos. Há o uso crucial das nadadeiras anteriores, que têm maior destaque na função de propulsão, e das nadadeiras posteriores mais associadas ao auxílio no direcionamento e equilíbrio do movimento. Quanto maior a área de contato das nadadeiras com o meio aquático, maiores as habilidades de deslocarem água e, em consequência se movimentarem. Isso faz com que as tartarugas-de-couro, que quando adultas chegam a apresentar nadadeiras anteriores com até 2,7 metros de comprimento, mergulhem a profundidades de até 1.200 metros. As demais espécies de tartarugas marinhas mergulham ao máximo no intervalo aproximado entre 50 e 300 metros, dependendo da espécie. Em mergulhos mais profundos e em maiores intervalos de tempo, seus órgãos vitais são resistentes à variação de pressão, há o apoio das trocas gasosas efetuadas pela cloaca, e o gerenciamento do oxigênio pelo corpo se concentra principalmente em músculos.

Além da direta relação com os sistemas excretor e reprodutivo, a cloaca também tem uma função importante no auxílio em trocas gasosas, em uma proporção menor do que aquela realizada pelos pulmões ao subirem à superfície da água para obterem oxigênio (Fig. 8). Uma estrutura altamente vascularizada encontrada na cloaca de tartarugas marinhas, e denominada **bursae**, efetua as trocas de oxigênio e gás carbônico em meio aquático, contribuindo com o tempo de permanência das mesmas em meio aquático. O tempo máximo dos mergulhos das tartarugas marinhas pode variar entre 40 e 80 minutos, a depender da espécie. Esse intervalo longo de tempo de mergulho é importante às tartarugas para que elas otimizem ao máximo a procura e a captura de alimento, assim como para os períodos de descanso realizados junto ao substrato.

**FIGURA 8. Tartaruga-verde, *Chelonia mydas*, visitando a superfície da água para respirar ao largo de Fernando de Noronha.** *Foto: Marcos Santos*.

Com relação à temperatura corpórea, a vida em meio aquático fez com que as tartarugas marinhas concentrassem seus padrões de distribuição em águas tropicais, subtropicais e temperadas. A literatura tradicional trata todos os quelônios marinhos como ectotérmicos, ou seja, aqueles organismos cuja temperatura corpórea é regulada pela temperatura do ambiente, com limites de tolerância definidos para cada espécie. Entretanto, interessantes estudos mais recentes têm indicado uma terceira possível adaptação fisiológica de alguns organismos intermediária à ectotermia e à endotermia – essa última compartilhada por aves e mamíferos modernos que regulam sua temperatura corpórea em um ótimo fisiológico. Dinossauros terrestres como o tiranossauro rex, e formas viventes como atuns e tartarugas-de-couro se encaixariam na categoria de adaptação fisiológica chamada de mesotermia. Basicamente ela seria uma mescla entre as duas outras categorias de adaptações à temperatura do meio. Essa adaptação habilitaria as tartarugas-de-couro a visitarem águas mais frias tanto latitudinalmente em zonas temperadas frias, como em profundidades maiores como mencionado anteriormente. Quanto mais profundo o mergulho, mais fria estará a água pela ausência da influência do aquecimento proveniente dos raios solares e da atmosfera restrito às camadas superficiais.

A visão das tartarugas marinhas é considerada boa para águas superficiais claras. Elas contam com o apoio de sensores químicos para a detecção de características na água que as levem às presas/zonas de alimentação. O balanço osmótico é regulado pela atuação conjunta de um par de rins, bem como com o suporte de glândulas de sal situadas atrás dos olhos. Essas glândulas também lubrificam os olhos das tartarugas marinhas quando elas visitam os substratos terrestres continentais e insulares. Essas visitas ocorrem, de forma generalizada, nos momentos de desova por parte das fêmeas, que em sua maioria de ocasiões ocorrem no período noturno. Dessa forma, evita-se a desidratação provocada pelos raios solares durante o dia, bem como a fácil detecção por parte de predadores em potencial.

A tendência evolutiva de se deslocarem em meio terrestre no período noturno também se aplica aos filhotes após eclodirem dos ovos. Dessa forma eles tendem a encontrar mais facilmente o mar que estará mais claro do que a faixa costeira (quando esta não está artificialmente iluminada), e também deverão evitar a detecção por parte de predadores como aves marinhas e caranguejos, geralmente mais ativos durante o dia.

## 7. História de vida: ciclo reprodutivo

Para compreender a complexidade que envolve a história de vida das tartarugas marinhas, torna-se necessário efetuar a leitura do ciclo de vida das mesmas, e generalizado para as sete espécies viventes (Fig. 9). Variações intra- e interespecíficas devem ocorrer e não serão trabalhadas de forma refinada neste texto pela limitação de espaço, e pelo foco do mesmo ser introdutório ao grupo-alvo de quelônios.

Iniciando pela eclosão dos ovos, na porção esquerda da Figura 9, é importante destacar o tamanho da prole em cada ninho, representada por numerosas crias geradas após a eclosão de cerca de 50 até 130 ovos, a depender da espécie. Ao nascerem, os filhotes tendem a se deslocar geralmente em períodos de ausência de luz em sentido ao mar. Como mencionado anteriormente, a missão de vencer este desafio com a luminosidade diária incidente sobre o caminho entre os ninhos e o mar é mais difícil com predadores à espreita. Esses filhotes nascem com menos de 10 cm de comprimento total, um porte consideravelmente menor do que os adultos. Aqueles filhotes que chegam à zona de águas rasas, seguem o desafio contra a ação de predadores em meio aquático (ex.: peixes cartilaginosos e ósseos).

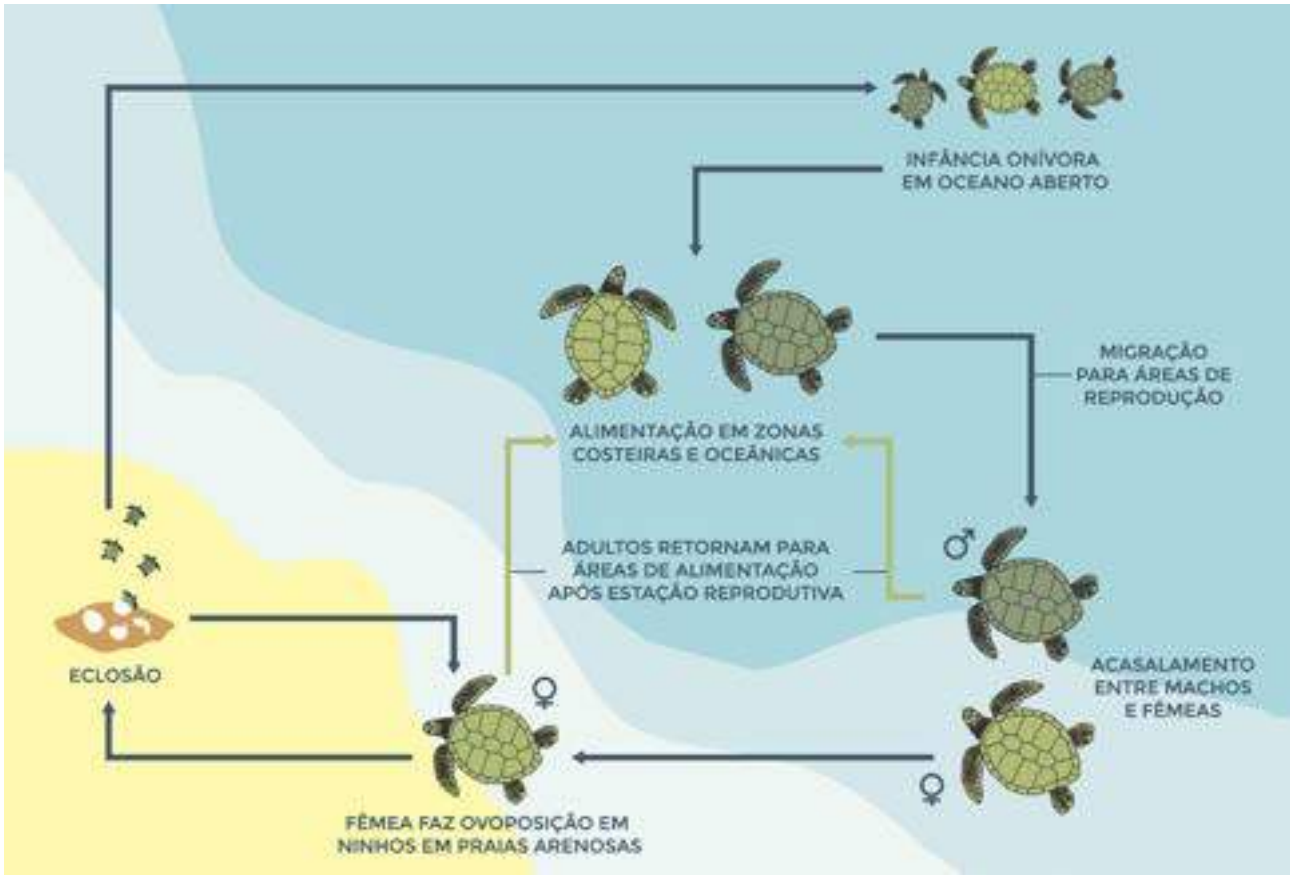



**FIGURA 9.** Ciclo de vida generalizado das tartarugas marinhas. *Ilustração Leandro Coelho.*

A etapa seguinte ficou conhecida como "anos perdidos" por décadas, em função de não haver indícios dos caminhos percorridos pelas crias, e onde elas permaneciam em seus anos de infância. Havia um consenso generalizado de que esses filhotes eram levados por fortes correntes marinhas, a quilômetros de distância dos seus ninhos de origem, sem executar escolhas ou apresentar preferências de áreas de uso.

A tecnologia de telemetria satelital, que é responsável por mapear os caminhos percorridos por qualquer organismo vivo que leve consigo um sensor que emita sinais constantes e captados por satélites, passou a mudar os conhecimentos referentes à história de vida das tartarugas marinhas.

Filhotes recém-nascidos acompanhados por sinais emitidos a satélites de populações de uma parte das espécies de tartarugas marinhas seguiram padrões específicos de salinidade e de temperatura superficial da água. Esses padrões estão associados a alta produtividade primária, que é responsável por manter esses filhotes saudáveis ao longo da infância, ao fornecer recursos em abundância aos mesmos. Geralmente, as áreas onde esses filhotes passam o período de sua infância estão associadas a águas oceânicas e com forte influência de correntes marinhas convergentes.

O crescimento em tartarugas marinhas é lento. Após o período de infância, jovens de diversas populações de espécies estudadas de tartarugas marinhas dirigem-se às zonas costeiras continentais e insulares, onde permanecem por alguns anos se alimentando. As tartarugas-de-couro tendem a se manter em águas pelagiais por praticamente todo o seu ciclo de vida, havendo visitas sazonais das fêmeas às praias de ovoposição. Ainda estão sendo mapeados globalmente os caminhos das distintas classes sexuais e etárias de muitas populações de tartarugas marinhas que usam águas das plataformas continentais após o período da infância.

As idades de maturação sexual variam amplamente inter- e intra-especificamente. Por exemplo, tartarugas-de-couro começar a se reproduzir entre nove e 15 anos de idade, enquanto, em um outro extremo, distintas populações de tartarugas-verde chegam à maturidade sexual entre 26 e 40 anos. As idades de primeira reprodução das populações das demais espécies se encaixam neste intervalo.

Nota-se, portanto, que a ciência aplicada em longo prazo à investigação do ciclo de vida das tartarugas marinhas evidenciou uma alta plasticidade nos dados de história de vida, a depender da espécie, bem como do estoque populacional de cada espécie. E ainda há muitas lacunas de conhecimentos a serem preenchidas; praticamente da maior parte das populações de tartarugas marinhas viventes.

Por influência hormonal e sensibilidade à temperatura da água, machos e fêmeas sexualmente maduros se encontram em áreas reprodutivas, geralmente situadas em águas de plataforma continental próximas às praias onde ocorrerão as ovoposições das fêmeas. Nessas águas e por algumas semanas ocorre a cópula em que o macho se agarra ao casco da fêmea com o apoio de suas unhas. Em muitas ocasiões, dois ou mais machos lutam pelo disputado espaço do casco de uma fêmea, com embates que podem levar alguns dias. Após o período em que ocorrem as cópulas, os machos adultos retornam às áreas de alimentação, e as fêmeas irão se dirigir às praias para as desovas.

A depender da espécie e do estoque populacional de cada espécie, as fêmeas poderão retornar à praia para mais uma a sete ovoposições: em média são dois a três ninhos por temporada por fêmea que visita as praias de desova. As fêmeas irão efetuar suas visitas preferencialmente no período noturno, para evitar desidratação e insolação. Nessas visitas, elas darão preferência à faixa de areia mais afastada da zona de contato do mar com a praia. Ali, irão preparar com o apoio das nadadeiras a área onde será escavado o ninho. Todo o processo de desova pode durar de uma a duas horas, após as quais a tartaruga retorna ao mar. Em um intervalo de nove a 45 dias, a depender da espécie e do estoque populacional, aquela mesma fêmea pode retornar à mesma praia para outra(s) desova(s). Após as desovas, ao final do processo de ovoposição, as fêmeas seguirão para as áreas de alimentação, assim como fizeram os machos adultos. A partir do momento em que as fêmeas cobriram o ninho e começaram a se deslocar de volta ao mar, o futuro dos filhotes dependerá deles próprios. Não há cuidado parental à prole.

Um aspecto bastante interessante relacionado ao ciclo de vida das tartarugas marinhas é a determinação do sexo dos filhotes pela temperatura. Por cavarem ninhos de até cerca de 1 metro de profundidade em média, as fêmeas de tartarugas marinhas fazem com que haja uma distribuição desigual do calor gerado pela exposição dos raios solares entre a porção superior e a inferior do ninho nos meses de incubação.

Em quelônios, as temperaturas mais elevadas na incubação de ovos em ninhos subterrâneos resultam em filhotes do sexo de maior porte. No caso das tartarugas marinhas, são as fêmeas para todas as espécies. Investigações com foco em determinar os valores de temperaturas que geram machos e fêmeas para diversas populações das sete espécies de tartarugas marinhas foram e ainda são comuns e importantes. Há uma profundidade dos ninhos em que há 50% de produção de filhotes de cada sexo. Neste ponto, o valor de temperatura que estabelece o nascimento de porcentagens iguais de machos e fêmeas é conhecido como temperatura pivotal. Há uma sensível variação intra- e interespecífica com relação aos valores conhecidos até o presente momento. A depender da espécie investigada e apenas a título de curiosidade, os valores de temperatura de ninho conhecidos em literatura que definiram machos variaram entre 28,2 e 30,5˚C, entre 29,8 e 32˚C para fêmeas, e entre 26 e 29˚C como valores observados para temperaturas pivotais.

Os intervalos de retorno das fêmeas adultas para novas desovas em anos posteriores podem variar entre espécies, e entre populações de uma mesma espécie. Populações estudadas de tartarugas-

de-Kemp e tartarugas-olivácea apresentaram os menores intervalos de tempo, variando entre 1,5 e 1,7 anos em média; e distintas populações de tartarugas-verde apresentaram os maiores valores, chegando a cinco anos de intervalo para uma nova desova de fêmeas monitoradas na Austrália. Essas informações são relevantes porque retratam a complexidade que envolve as missões de pesquisar e conservar as populações de tartarugas marinhas, em face às atuais ameaças à proteção das sete espécies viventes. É bastante comum o retorno das fêmeas às mesmas praias para desovas em anos posteriores, processo conhecido como filopatria. Possivelmente, assinaturas químicas locais serviriam para que as fêmeas rastreassem as mesmas praias.

Por fim, merece destaque na descrição do ciclo de vida das tartarugas marinhas a capacidade migratória das sete espécies. Dados envolvendo marcação de indivíduos por meio de anilhas, associados a monitoramentos com base em uso de tecnologias satelitais em tempos recentes, indicam deslocamentos em amplas áreas por indivíduos adultos.

Tartarugas-de-couro já cruzaram rotas migratórias de até 7000 km entre uma área de alimentação e a praia de desova. Apesar do menor porte, os mesmos estudos realizados para tartarugas-de-pente e para tartarugas-verde adultas indicaram movimentos de até 2.500 km. O que mais tem impressionado os cientistas em tempos recentes é a observação de não haver padronização de rotas migratórias desempenhadas por fêmeas de mesma espécie e que desovam nas mesmas praias. Há, em alguns casos, deslocamentos para latitudes totalmente antagônicas, quando se consideram duas ou mais fêmeas marcadas com transmissores satelitais em uma mesma praia, às vezes em uma mesma semana. Ainda há um longo caminho de investigações a serem realizadas para compreender como esses quelônios utilizam seu habitat principal – os oceanos.

Foto: Diogo Barcellos

## 8. Ameaças à sobrevivência

Com as primeiras formas surgindo há cerca de 200 milhões de anos no nosso planeta, a sobrevivência das tartarugas marinhas passou a ser ameaçada em larga escala principalmente a partir dos anos 1960 a 1970. São dois os propulsores principais para que essas ameaças se tornassem cada vez mais frequentes e mais opressoras ao bem-estar desses quelônios: o aumento populacional humano de forma exponencial, e o inadequado uso dos oceanos e das zonas costeiras, sem planejamento adequado, sem respeito ao meio ambiente, e sem conhecimentos sobre uma parte considerável da vida marinha.

O aumento populacional humano gera duas demandas que perturbam gravemente a saúde dos oceanos: 1) a necessidade de explotar (=extrair com fins econômicos) recursos marinhos vivos como o pescado, principalmente, em quantidades cada vez maiores para gerar proteína de origem marinha a essa crescente população, e de recursos não vivos, como óleo e derivados, principalmente, para alimentar economias mundiais baseadas em atingir metas irreais e insustentáveis de um "Produto Interno Bruto"; e 2) a necessidade de prover empregos e diversão a essa crescente população humana. Em paralelo, os produtos finais de muitas atividades humanas em ambientes terrestres e aquáticos são representados pela poluição e contaminação do ar, do solo e da água, afetando a própria qualidade de vida dos humanos.

Mas por que esse avanço emplacou a partir das décadas de 1960 e 1970? Principalmente pelo fato de que a humanidade se tornou bastante dependente do uso da energia e dos subprodutos gerados pela indústria do óleo explorado (fase de prospecção; de procura e mapeamento) e explotado nos oceanos. E foi justamente naquele período mencionado que se deu início a uma nova era de prospecção e explotação desse recurso com o avanço de novas tecnologias e consideráveis investimentos de capital por diversas nações incluindo o Brasil.

De maneira sinergética, ao menos nove principais ameaças à sobrevivência das tartarugas marinhas se tornaram frequentes daqueles anos até o presente momento, e encontram-se listadas a seguir:

### 8.1 Sobrepesca de recursos marinhos vivos

A sobrepesca desequilibra as teias tróficas marinhas constituídas ao longo de milhões de anos por processos de co-evolução entre seus componentes. Ao desequilibrar essas tramas tróficas no processo de retirada de milhares de toneladas de espécies de pescado, de moluscos como ostras, lulas e polvos, e de crustáceos como caranguejos e lagostas, as sociedades humanas afetam a si mesmas.

Os ecossistemas marinhos em desequilíbrio, e sob forte e constante pressão de explotação, não conseguem mais gerar os mesmos produtos como era feito em tempos em que as atividades pesqueiras e extrativistas se desenvolviam em menor escala. Além desse aspecto, algumas artes de pesca como os arrastos de fundo destroem habitats como bancos de algas e recifes de corais, que geralmente estão associados às áreas de alimentação de tartarugas marinhas em plataformas continentais.

A destruição do assoalho marinho, impedindo uma oferta constante de alimento às tartarugas marinhas, aliada à baixa disponibilidade de outros recursos sobrepescados em todos os mares do planeta, afetam o estado de saúde desses quelônios pela menor acessibilidade às suas presas. Com menos recursos disponíveis, as populações de todas as espécies de tartarugas marinhas tendem a entrar em declínio de abundância.

## 8.2 Capturas diretas de tartarugas marinhas e de ovos para consumo humano

Tartarugas marinhas e seus ovos serviram como fonte de proteína a diversas sociedades humanas que habitaram regiões costeiras globalmente, incluído o litoral brasileiro, bem como aos navegantes do hemisfério norte em suas descobertas de colônias em ilhas e continentes no hemisfério sul. Por acreditarem que era um recurso abundante e infinito, essas sociedades utilizaram fêmeas de tartarugas marinhas que visitaram praias para desova como alimento, e seus ovos depositados também foram consumidos.

É praticamente impossível estimar o número de tartarugas mortas e consumidas pelos humanos pelo fato de que essas capturas diretas não eram contabilizadas, tampouco deixaram restos e/ou provas que fossem suficientes para avaliar as proporções dessa matança. Apesar de estarem protegidas em relação ao consumo humano em diversos países do mundo, ainda há consumo de ovos e indivíduos, bem como há países em que não há legislação de proteção às mesmas, que continuam servindo de alimento a algumas populações humanas costeiras.

## 8.3 Capturas acidentais em operações de pesca

Define-se captura acidental como a *captura não intencional de organismos não-alvo em operações de pesca*. Onde ela ocorre? Globalmente onde há ocorrência de megafauna marinha (elasmobrânquios, tartarugas, aves e mamíferos marinhos) e petrechos de pesca. No caso das tartarugas marinhas, ao se envolverem com petrechos de pesca como redes e espinhéis quando estão submersas, elas tendem a morrer por afogamento por não conseguirem voltar à superfície da água para respirar. Muitas vezes podem chegar a detectar barcos em operações de arrasto de fundo, mas não conseguem evitar a captura. Há situações em que buscam se alimentar das iscas utilizadas em pontiagudos espinhéis para a captura de pescado, e acabam sendo fisgadas pelos mesmos. Há situações em que as tartarugas marinhas chegam a ser trazidas a bordo com vida, mesmo após se envolverem nesses petrechos de pesca. Elas podem vir à embarcação ainda bastante ativas e estressadas, ou elas podem chegar desacordadas pelo estresse da falta de oxigênio. Neste segundo caso, manobras de reanimação podem traze-las de volta à lucidez, podendo em seguida retornar ao meio marinho.

É uma tarefa bastante complexa avaliar as taxas de mortalidade de tartarugas marinhas provocadas pelas capturas acidentais em operações de pesca. O ponto crucial é que, em quase toda a sua totalidade, as atividades pesqueiras não são adequadamente monitoradas globalmente. Tanto em relação às avaliações de produção pesqueira condicionadas ao entendimento dos ciclos de vida das espécies-alvo para seu manejo adequado, como em relação ao registro dos dados de megafauna capturada. Neste segundo caso, a falta de uma política nacional adequada de pesquisa e de conservação abre caminhos para a subnotificação pelas nações pesqueiras, ou para uma irrisória notificação bastante distante da realidade dos fatos.

Países em que as políticas de conservação não envolvem um processo construtivista e participativo e que inclua a integração entre agentes governamentais, pesquisadores e comunidades pesqueiras, pecam por seguir não avaliando essa mortalidade. Em consequência, o estado de saúde de suas populações de megafauna marinha é fortemente afetado. A tendência em muitos países foi estabelecer e publicar normas e leis que no papel funcionam muito bem, mas que não funcionam na prática por não terem contado com a participação da comunidade pesqueira. Essa última, sem ter acesso adequado às portarias e legislações vigentes, ou por medo de punição, se afasta de agentes de governo e de grupos de pesquisa e, quando questionada sobre capturas acidentais de megafauna, na grande maioria dos casos prefere comentar que não ocorre e/ou que nunca viu. Além dessas interações diretas e indiretas

com as capturas de tartarugas marinhas, há que se considerar os petrechos de pesca e à deriva como redes e cabos com espinhéis que vitimam milhares de indivíduos anualmente por dificultarem sua natação e, consequentemente, mata-las afogadas pela fadiga.

## 8.4 Contaminação química por compostos orgânicos persistentes

Existe uma categoria de compostos químicos orgânicos de baixa a alta toxicidade que são produzidos por indústrias de transformadores de energia, assim como de pesticidas, e que não é quebrada ou metabolizada por organismos vivos. Por essas propriedades, eles são coletivamente conhecidos como "organopersistentes", pelas características de persistirem por longo prazo no meio ambiente sem serem processados por quaisquer organismos ou processos naturais. Assim, eles se acumulam e aumentam seguidamente em todos os elos das teias tróficas contaminadas inicialmente pela absorção dos produtores primários, em um processo conhecido como biomagnificação. Portanto, as taxas de contaminação dos níveis tróficos mais altos (nos oceanos é na megafauna) tendem a oferecer um diagnóstico da contaminação do meio ambiente.

Em taxas baixas, aparentemente e pelo que consta em literatura até o presente momento, esses compostos podem ter pouca ou nenhuma ação deletéria ao estado de saúde dos organismos contaminados. Entretanto, estudos realizados com diversas espécies que ocupam topos de teias alimentares como os cetáceos, por exemplo, comprovaram que muitos desses compostos atuaram sobre o sistema reprodutivo dos mesmos, gerando má-formação de filhotes, processos cancerígenos em adultos, e desequilibrando o sistema imunológico de adultos. As ações desses compostos, na maioria das espécies marinhas, ainda são muito pouco conhecidas, e aqui se incluem as tartarugas marinhas.

A preocupação vigente em águas brasileiras é que alguns estudos realizados com tartarugas marinhas já detectaram vários desses compostos, mas ainda em baixas concentrações. O país teve um histórico de altíssima produção de organopersistentes para a indústria dos transformadores nos anos 1970, com um polo de larga produção e que operou na Baixada Santista, no sudeste do Brasil. Ao longo de toda a costa, produtos químicos utilizados em cultivares são carreados pelo ar, quando pulverizados por aviões e drones, ou pelos rios, quando ocorrem as chuvas em lavouras. E esses rios desaguam em estuários e/ou no mar. Nos oceanos, seguem carreados por correntes marinhas para locais distantes do centro de origem, como as áreas polares onde já foram notificados.

Em um planeta com população humana crescente e dependente de ser alimentada, o agronegócio virou prioridade para muitas nações como o Brasil que, com o tempo, tendem a enfraquecer as normas e leis de proteção contra o uso de produtos químicos de alta toxicidade. Assim, os riscos de acúmulo de contaminação aumentam e necessitam de monitoramento o mais brevemente possível.

## 8.5 Degradação e perda de habitat

Cultural e globalmente, as sociedades humanas chegaram à conclusão de que seus dejetos deveriam ser lançados em um local distante de seus lares. Dessa forma, por séculos, nos habituamos a poluir rios e oceanos com esse objetivo. Muitas cidades litorâneas globalmente contam com "emissários submarinos", que são estruturas tubulares construídas para conduzir os dejetos gerados nas edificações dessas cidades em direção ao mar, em uma região ligeiramente distante de nossas praias. Esse comportamento gerou às populações humanas a falsa sensação de que assim estávamos livres de produtos que, caso acumulassem aos nossos redores, se tornariam um grande incômodo e afetariam nossas saúdes.

Ledo engano! Segundo a Organização Mundial de Saúde, *poluição é a introdução de contaminantes (= substâncias ou energia em concentrações que excedem níveis naturais) em um ambiente cujas consequências são relacionadas à instabilidade, desordem, malefícios, ou desconforto de ecossistemas e de seres vivos*. Nosso comportamento, portanto, polui os oceanos. Bactérias e vírus nocivos à vida marinha são introduzidos diariamente e circulam em todas as bacias oceânicas. Mais do que isso, ao poluir o ambiente em que se encontra parte considerável da proteína animal consumida globalmente por meio do pescado (ex: peixes, moluscos, crustáceos) e extrativismo (ex: moluscos), as sociedades humanas correm sérios riscos de afetarem suas próprias saúdes. Qual será a carga de poluentes que afetará as distintas populações de nossa espécie? Quando isso irá ocorrer?

Por serem encontradas em águas temperadas, subtropicais e tropicais, alimentarem-se em plataformas continentais, e virem às praias para desovas, muitas populações de tartarugas marinhas se tornam altamente vulneráveis a essa carga de poluentes por um período considerável de suas vidas.

Além da degradação do habitat marinho pela poluição e pelos arrastos em operações de pesca, a ocupação humana não planejada em regiões costeiras que contavam com praias de desova de tartarugas marinhas tornou-se um motivo de grande preocupação. Elas perderam espaço para portos, marinas, bares, restaurantes, residências e hotéis. E continuam perdendo esses espaços em países sem legislação adequada para proteção do meio ambiente e de tartarugas marinhas. Muitos estoques populacionais tiveram que evitar praias anteriormente usadas, e procurar áreas pouco conhecidas ou desconhecidas para desova. E assim, sucessivamente, enquanto as faixas costeiras passaram por um forte processo de antropização.

Em paralelo, centenas de milhares de tartarugas marinhas foram (e continuam sendo) atropeladas por embarcações em áreas de extenso uso humano, e foram (e continuam sendo) trucidadas por máquinas envolvidas em dragagens de sedimento para a operacionalização de portos – também mal planejados por desconhecimento de questões básicas de Oceanografia Física e Geológica.

A iluminação artificial de orlas marítimas ao largo de praias de desova de tartarugas marinhas representa um sério risco aos filhotes recém-nascidos, que podem se deslocar em sentido contrário ao mar pelo instinto de buscar o setor mais claro após o nascimento. Cabe aqui salientar que as constantes perdas de áreas de manguezais para a carcinicultura, ou aterramento dos mesmos para a construção de portos, marinas, polos industriais, residências e hotéis, também afetam o ciclo de vida de uma miríade de populações de tartarugas marinhas, que necessitam visitar manguezais altamente produtivos para se alimentar em períodos importantes de suas vidas.

Fica claro, neste item, que tanto as áreas de alimentação, quanto as áreas importantes para a reprodução das tartarugas marinhas, estão sendo afetadas pelas ações antrópicas. Essas ações devem afetar a saúde das populações de tartarugas marinhas globalmente, contribuindo como todos os demais itens, a declínios de abundâncias populacionais.

## 8.6 Desastres ambientais gerados pela explotação de óleo e derivados

Os desastres ambientais provocados pela contaminação de óleo e derivados nos oceanos são uma constante rotineira. Esta fonte de poluição marinha e, a posteriori, do ar, será inesgotável enquanto a humanidade depender amplamente da energia gerada por combustíveis fósseis.

Os processos de extração e transporte de óleo e derivados não são 100% seguros, estimando-se que no século XXI os vazamentos são praticamente diários em escala global. Esses compostos

químicos irritam as mucosas das tartarugas marinhas e, dependendo de sua densidade, dificultam ou impossibilitam seus movimentos, impedindo-as de evitar a fonte poluidora.

As trocas gasosas efetuadas pela cloaca potencializam a contaminação das tartarugas marinhas em águas contaminadas por esses produtos. Os gases gerados pelos raios solares na interação mar-atmosfera no processo de vaporização geram estresse respiratório aos organismos marinhos que necessitam vir à superfície da água para respirar por meio de pulmões.

Uma parte considerável dos produtos voláteis que compõem o óleo e seus derivados é tóxica e ataca os pulmões das tartarugas marinhas. Os componentes químicos dos derivados de óleo no meio aquático contaminam o alimento a ser ingerido pelas tartarugas marinhas, desde as algas que absorvem os mesmos, passando pela miríade de espécies que compõem a dieta das mesmas. Na sequência, o estado de saúde desses vertebrados será afetado pelos componentes químicos tóxicos oriundos de seus itens alimentares.

## 8.7 Poluição proveniente de um dos piores derivados do óleo – o plástico

Um dos produtos principais derivados da explotação de óleo assina globalmente há décadas a cultura do plástico, poluidora em ecossistemas terrestres e aquáticos. Os danos gerados pelos plásticos nas tartarugas marinhas ocorrem basicamente em dois estágios.

O primeiro estágio envolve a ingestão acidental de sacolas plásticas, que geralmente são confundidas com águas-vivas – itens alimentares de algumas espécies – ou de restos de materiais plásticos depositados no substrato marinho quando estão se alimentando de algas ou invertebrados. A sobrepesca e outras interferências humanas nas teias tróficas marinhas, por meio de distintas formas de poluição, têm dificultado a procura e a captura de alimento pela fauna marinha. Restos plásticos podem ser confundidos pelas tartarugas por itens alimentares, e constantemente são ingeridos pelas mesmas. Além de poder provocar o bloqueio do trato digestório com consequentes danos à saúde do quelônio que ingeriu o plástico, seu processamento pelo mesmo trato libera contaminantes tóxicos na circulação sanguínea, debilitando o mesmo. Ainda são desconhecidos os efeitos patológicos desses compostos acumulados nas tartarugas em médio a longo prazo.

O segundo estágio afeta toda a biota marinha. Ele ocorre quando esses dejetos plásticos permanecem se decompondo nos oceanos, liberando seus componentes tóxicos em longo prazo. Esses componentes podem ser absorvidos pelos produtores primários e, destes, serem transferidos por toda a teia trófica sem serem metabolizados, incluindo aqui uma parte importante da proteína animal representada por peixes, moluscos e crustáceos, que compõe a dieta de cerca de 50% da população humana. Como mencionado aos petrechos de pesca, os restos de materiais plásticos podem provocar sufocamento e/ou enforcamento de tartarugas marinhas, também as levando a óbito.

## 8.8 Doenças

Nas últimas quatro décadas, as doenças em tartarugas marinhas passaram a ser melhor investigadas quando os profissionais da área de Medicina Veterinária vieram a atuar mais proximamente às mesmas. Com o estabelecimento de redes de monitoramento de ocorrências, centros de reabilitação, e colheitas adequadas de material biológico para investigações científicas, é que este conhecimento vem gradativamente aumentando e se consolidando. Certamente, as perspectivas são muito boas, caso haja investimento financeiro adequado e isento para a realização desses estudos.

Dentre uma série de doenças já descritas para as tartarugas marinhas, a fibropapilomatose tem atraído bastante atenção globalmente. Esta doença se caracteriza pelo desenvolvimento de um ou mais tumores epiteliais benignos, que possivelmente tem como agente etiológico o herpes vírus. Esse vírus é comumente encontrado em áreas degradadas, poluídas.

A fibropapilomatose é uma doença global, que afeta entre 50 e 70% das populações de tartarugas marinhas encontradas principalmente em águas tropicais e subtropicais. Apesar de se tratar de um tumor benigno, com o tempo ele pode se tornar debilitante, trazendo complicações às tartarugas marinhas para se deslocarem, se alimentarem, ou se reproduzirem; podendo leva-las ao óbito em consequência.

## 8.9 Mudanças climáticas globais

Mesmo que negacionistas afirmem que estamos em um período interglacial e que, por isso, um sensível aumento da temperatura média do ar e dos oceanos seria esperado, é clara a relação de causa-efeito sincronizado do aumento das emissões dos gases de efeito estufa – gerados pelas atividades humanas poluidoras – e o aumento das referidas temperaturas.

E as previsões e modelagens são cada vez mais assustadoras; com algumas delas já sendo notadas em nossas rotinas com uma sucessão de maior frequência de eventos catastróficos gerados pelo clima, como tsunamis, furacões e ressacas. As últimas podem lavar praias de desova de tartarugas, expondo os ovos dos ninhos a predadores e aos raios solares de forma direta, implicando possivelmente na morte de toda uma geração (ou coorte) de um determinado estoque populacional.

Dentre os gases do efeito estufa, o dióxido de carbono gerado principalmente pela queima de combustíveis fósseis é o que mais afeta os oceanos de maneira direta. Em maiores concentrações na atmosfera, o $CO_2$ tende a ser absorvido pelos oceanos, que ocupam 71% da superfície do planeta, por difusão. O dióxido de carbono em excesso nos oceanos gera a acidificação dos mesmos, com a formação do ácido carbônico ($H_2CO_3$). Em consequência, reduz-se a disponibilidade do íon carbonato ($CO_3^{-2}$) nos oceanos, que é essencial aos organismos que secretam conchas de $CaCO_3$ para suas proteções como uma ampla gama de espécies de crustáceos (ex.: caranguejos, lagostas) e moluscos (mexilhões, ostras). Há previsão de perdas irreparáveis de diversidade biológica nos oceanos associadas a este processo de acidificação nos próximos 30 anos, caso não haja uma redução considerável e urgente no uso e na emissão de combustíveis fósseis no planeta. Uma parcela considerável desses organismos faz parte da dieta de muitas populações de tartarugas marinhas e, certamente, a falta destes itens deverá levar a declínios populacionais de elevadas proporções desses quelônios.

Além desse processo de acidificação dos oceanos, já está ocorrendo um processo globalizado de branqueamento de recifes corais. Esses sistemas marinhos são os maiores oásis de diversidade biológica no planeta, oferecendo bens e serviços, direta e indiretamente, a cerca de um bilhão de seres humanos. Entretanto, o aumento da temperatura dos oceanos tem provocado a mortalidade em massa de corais em todas as bacias oceânicas. O estresse térmico consequente desse aumento de temperatura em meio aquático induz à expulsão da zooxantela (dinoflagelado) simbiótica dos pólipos de corais. Como ocorre este processo? O aumento da temperatura da água do mar induz ao aumento da produção de oxigênio por parte das zooxantelas, de forma que os níveis acumulados desse gás se tornem tóxicos aos pólipos que, como resposta, expelem as zooxantelas. Sem as mesmas, os próprios pólipos acabam sucumbindo. Esse processo é chamado de "branqueamento dos corais" pois, sem as zooxantelas, os pólipos tornam-se brancos. E como esse processo afeta as tartarugas

marinhas? Os recifes de corais estão concentrados nos trópicos e subtrópicos e servem como área de residência, de alimentação e de descanso de diversas populações de ao menos quatro das sete espécies de tartarugas marinhas. Sem este habitat saudável, as tartarugas marinhas sofrerão um impacto sem precedentes em sua história evolutiva.

O aumento da temperatura dos oceanos também será responsável pela elevação global do nível do mar, pelas propriedades da água se expandir à medida em que é aquecida, e pelo degelo das calotas polares. Áreas costeiras deverão ser afetadas no médio a longo prazo. Certamente, muitas praias de desova de tartarugas marinhas serão afetadas, possivelmente desaparecendo do mapa. Outra grande preocupação reside na influência de temperaturas mais altas afetando a determinação do sexo dos filhotes nos ninhos em praias arenosas. Seria possível ocorrer um desequilíbrio voltado a gerar apenas filhotes do sexo feminino pelas elevadas temperaturas nos ninhos? Se possível, como avaliar as consequências em curto, médio e longo prazos?

As soluções para mitigar essas ameaças em curto a longo prazo passam pelo estabelecimento de programas internacionais adequados de pesquisa e de conservação de tartarugas marinhas e dos oceanos, bem como por um processo de mudanças de hábitos da humanidade.

## 9. Conservação

Pesquisar e proteger tartarugas marinhas é uma missão bastante complexa em função de suas amplas áreas de vida. A dependência de uso de praias para a incubação de ovos, de zonas oceânicas para o período de infância dos filhotes, e das plataformas continentais para a alimentação, impõem mudanças de uso de área de acordo com faixas etárias distintas. O monitoramento de toda a extensão dessa área para um indivíduo apenas já é bastante difícil em se executar. A situação fica bem mais complicada quando se consideram as variações individuais de uso de área em uma mesma espécie, e entre espécies diferentes. E esses processos esbarram em outro desafio: o uso de áreas oceânicas geopolíticas pertencentes a algumas nações descompromissadas pela proteção de tartarugas marinhas e oceanos, bem como o uso de águas internacionais onde, apesar de haver consenso quanto ao uso e respeito ao meio ambiente, não há nos dias atuais formas adequadas de fiscalização e de punição a nações que gerem danos ambientais nessas águas.

A se considerar que há ao menos nove distintas fontes de ameaças à sobrevivência das tartarugas marinhas, e que a maturidade sexual das distintas espécies é somente alcançada entre 9 e 40 anos de idade, a depender do estoque populacional e da espécie, é possível que uma parcela considerável delas não seja capaz de repor o estoque populacional nem pela primeira vez na vida. Quando estoques não são repostos, os declínios de abundâncias populacionais são as consequências imediatas.

Preocupa também o intervalo de desovas de fêmeas entre distintas temporadas, que pode levar entre 1,5 a 5 anos, a depender do estoque populacional e da espécie. Por fim, outro fato preocupante reside no fato de que a população humana continua crescendo globalmente, aumentando gradativamente os efeitos de cada uma das ameaças listadas e descritas neste documento. Do outro lado da equação, o resultado a ser observado será óbvio: os declínios populacionais das populações das sete espécies de tartarugas marinhas.

A União Internacional para a Conservação da Natureza (sigla IUCN, em língua inglesa), avalia os estoques populacionais globais de milhares de espécies vivas para disponibilizar seus estados de

conservação na lista vermelha das espécies ameaçadas de extinção a um amplo leque de profissionais que inclui cientistas, professores, agentes públicos de proteção ao meio ambiente, e os altos escalões de governos responsáveis por estabelecer políticas públicas de pesquisa e conservação da natureza.

Para ilustrar a complexidade que envolve a pesquisa e a proteção das sete espécies de tartarugas marinhas, as últimas avaliações efetuadas para cada uma delas ocorreram no intervalo compreendido entre 1996, no caso da avaliação da tartaruga-de-casco-achatado encontrada na Oceania, e 2019, no caso da avaliação da tartaruga-de-Kemp no Atlântico Norte Ocidental.

Seis das sete espécies estão inseridas na categoria de "**ameaçadas de extinção**", em três diferentes subcategorias. A tartaruga-de-Kemp e a tartaruga-de-pente estão avaliadas como "**criticamente em perigo**", a tartaruga-verde está avaliada como "**em perigo**", e a tartaruga-de-couro, a tartaruga-cabeçuda, e a tartaruga-olivácea estão avaliadas como "**vulneráveis**" à extinção. Para a tartaruga-de-casco-achatado, ainda não estão disponíveis dados suficientes para avaliar seu estado de conservação.

Esse cenário é bastante preocupante, visto que estas são representantes das apenas sete linhagens remanescentes de um processo evolutivo de 200 milhões de anos. E ações humanas manejáveis estão pavimentando o caminho do desaparecimento de organismos ímpares que habitaram e habitam o planeta; os únicos que se adaptaram ao mar e levaram consigo a novidade evolutiva do casco para sua proteção.

O que mais nós perdemos sem as tartarugas marinhas nos oceanos? Junto a outras espécies de vertebrados aquáticos de médio a grande porte, de dieta variada, e de grande mobilidade, as tartarugas marinhas: 1) desempenham papel fundamental na **manutenção da diversidade biológica**, ao manter estáveis as populações de suas variadas presas e, em consequência, as teias alimentares em que estão envolvidas; 2) **transportam nutrientes** horizontalmente (entre latitudes) e verticalmente (ao longo da coluna d'água) quando efetuam seus constantes deslocamentos regionais e migratórios, fertilizando por meio de suas excretas nitrogenadas o fitoplâncton das camadas superficiais quando estão relaxadas nas águas superficiais às quais visitam constantemente para respirar, contribuindo com a produção de uma parte considerável de oxigênio vital para a vida no planeta (incluindo os seres humanos); e 3) promovem a **disponibilização de recursos alimentares** a uma miríade de outras espécies marinhas, como peixes ósseos que geralmente estão associados às áreas de ocorrência de tartarugas marinhas, bem como de organismos que vivem associados ao substrato e, em ambos os casos, se beneficiam da geração de restos de itens alimentares gerados nos processos de forrageamento e capturas de suas presas por meio de suas poderosas ranfotecas. Esses três papéis ecológicos são essenciais à própria sobrevivência humana, pela sua dependência de recursos vivos de origem marinha.

Perder as tartarugas marinhas dos oceanos resultará em um efeito dominó, que levará à perda de uma considerável diversidade biológica global, podendo afetar a produção de oxigênio pelos oceanos que é responsável por ao menos metade desse gás vital que a humanidade consome.

As ações urgentes que devem ser tomadas pela humanidade estão centradas em mudança de comportamento. Essa mudança deve ocorrer em escalas local, regional e global. Ela envolve uma série de atitudes que devem mudar nossas rotinas em curto e médio prazo para proporcionar condições mínimas e adequadas para a vida neste planeta.

As políticas voltadas a enfrentar os agentes causadores das mudanças climáticas globais requerem acordos internacionais que sejam discutidos, planejados, instaurados e respeitados no longo prazo. É necessário reduzir em larga escala a emissão dos gases do efeito estufa, e esta medida passa obrigatoriamente por reduzir paulatinamente o uso e a nossa dependência de combustíveis fósseis para gerar energia e nos transportes.

É urgente o investimento em formas limpas de energia como as energias solar e eólica. Veículos movidos a energia elétrica, desde que sua produção não emita poluentes como os combustíveis fósseis, devem substituir os meios de transporte atuais altamente poluentes.

É necessário banir a produção e a distribuição de sacolas plásticas, bem como a produção de uma série de derivados de plástico desnecessários à vida humana, e que podem ser substituídos por produtos sustentáveis. O estabelecimento de um programa de planejamento familiar por meio de políticas públicas torna-se necessário em escala global, pelas dimensões limitadas do planeta e de seus recursos.

Com o crescimento populacional sendo regulado, haverá menor demanda por recursos como óleo e derivados, por alimentos oriundos dos oceanos, e por alimentos gerados por extensas plantações e pecuária que, a cada ano, avançam indiscriminadamente sobre ecossistemas únicos existentes no planeta como a Mata Atlântica, a Caatinga, a Floresta Amazônica, o Pantanal, dentre outros. Dessa forma, esses ecossistemas poderão se recuperar em longo prazo, oferecendo bens e serviços de forma manejada e sustentável.

No caso específico das tartarugas marinhas, é necessário o investimento na condução de pesquisa científica por meio de projetos que visem a internacionalização dos esforços de observação, monitoramento e avaliação dos estados de saúde dos estoques populacionais das sete espécies de quelônios marinhos. Suas histórias de vida extrapolam as fronteiras geopolíticas estabelecidas pela humanidade e que, em muitas áreas da Ciência que envolvem estudos de espécies migratórias, atrasam o avanço do conhecimento pela falta de uma mentalidade que enfoque um mundo biótico sem fronteiras.

Novas tecnologias para investigar padrões de distribuição, de uso de área, os descritores de aspectos reprodutivos e alimentares mais refinados, e os graus de contaminação devem ser aplicadas globalmente, sempre que possível com integração entre grupos de pesquisa que interajam com pesquisadores de outros países.

É urgente a implantação de monitoramentos adequados de produção pesqueira e de mortalidade de megafauna em operações de pesca em escalas regionais e globais. Uma parte considerável dessas informações ainda não está disponível a todos os estoques populacionais de tartarugas marinhas, e compõe o banco de dados crucial para avaliar o estado de conservação dos mesmos com base nas temáticas-alvo propostas pela IUCN. Essa Ciência deve, preferencialmente, ser baseada em hipóteses a serem testadas por meio de metodologia científica replicável, de domínio público, e realizadas em centros de pesquisa especializados e em universidades.

Resumidamente, é momento de mais ações práticas e de menos especulações e marketing. Há fatos e informações claras descrevendo um cenário preocupante e, contra fatos e dados científicos, não há argumentos que devam obstruir a tomada de ações visando a conservação das tartarugas marinhas e dos oceanos.

*Foto: Marcos Santos*

## Referências Bibliográficas

ABREU-GROBOIS, A & PLOTKIN, P. 2008. *Lepidochelys olivacea*. The IUCN Red List of Threatened Species 2008: e.T11534A3292503. https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2008.RLTS.T11534A3292503.en. Downloaded on 28 April 2020.

CASALE, P. & TUCKER, A. D. 2017. *Caretta caretta* (amended version of 2015 assessment). The IUCN Red List of Threatened Species 2017: e.T3897A119333622. https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-2.RLTS.T3897A119333622.en. Downloaded on 28 April 2020.

LIEM, K.F., W.E. BEMIS, W.F. WALKER JR. & GRANDE, L. 2013. Anatomia Funcional dos Vertebrados – Uma Perspectiva Evolutiva. Tradução da 3ª edição. Cengage Learning, Brasil.

LUTZ, P.L., MUSICK, J.A. & WYNEKEN, J. 2003. The Biology of Sea Turtles. Volume II. CRC Marine Biology Series. CRC Press. Boca Raton.

LUTZ, S.J.; MARTIN, A.H. 2014. Fish carbon: Exploring marine vertebrate carbon services. Noruega: GRID-Arendal.

MORTIMER, J.A & DONNELLY, M. 2008. *Eretmochelys imbricata*. The IUCN Red List of Threatened Species 2008: e.T8005A12881238. https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2008.RLTS.T8005A12881238.en. Downloaded on 28 April 2020.

RED LIST STANDARDS & PETITIONS SUBCOMMITTEE. 1996. *Natator depressus*. The IUCN Red List of Threatened Species 1996: e.T14363A4435952. https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.1996.RLTS.T14363A4435952.en. Downloaded on 28 April 2020.

SEMINOFF, J.A.2004. *Chelonia mydas*. The IUCN Red List of Threatened Species 2004: e.T4615A11037468. https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2004.RLTS.T4615A11037468.en. Downloaded on 28 April 2020.

SOYKAN, C.U., MOORE J.E., ZYDELIS, R., CROWDER L.B., SAFINA C., LEWISON R.L. 2008. Why study bycatch? An introduction to the theme section on fisheries bycatch. Endangered Species Research 5, 91–102.

SPOTILLA, J.R. 2004. Sea Turtles: A Complete Guide to Their Biology, Behavior and Conservation. The John Hopkins University Press. Baltimore and London.

WALLACE, B.P., TIWARI, M. & GIRONDOT, M. 2013. *Dermochelys coriacea*. The IUCN Red List of Threatened Species 2013: e.T6494A43526147. https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-2.RLTS.T6494A43526147.en. Downloaded on 28 April 2020.

WIBBELS, T. & BEVAN, E. 2019. *Lepidochelys kempii* (errata version published in 2019). The IUCN Red List of Threatened Species 2019: e.T11533A155057916. https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2019-2.RLTS.T11533A155057916.en. Downloaded on 28 April 2020.

WYNEKEN, J., M.H. GODFREY & V. BELS (Eds.). 2003. Biology of Sea Turtles. Volume III. CRC Press, Boca Raton.

WYNEKEN, J., M.H. LOHMANN, K.J & MUSICK, J.A. 2013 (Eds.). Biology of Sea Turtles. Volume III. CRC Press, Boca Raton.

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 27*

# AVES MARINHAS

*Marcos César de Oliveira Santos*

REVISÃO: CAMILA NEGRÃO SIGNORI

CITAÇÃO SUGERIDA: SANTOS, Marcos César de Oliveira. Aves marinhas. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 27: p. 601-624.

# Aves Marinhas

*Marcos César de Oliveira Santos*

## 1. Introdução

Assim como as terminologias populares comumente utilizadas em nosso dia a dia e aplicadas a grupos de vertebrados como as "tartarugas marinhas" e os "mamíferos marinhos", o grupo não taxonômico das "aves marinhas" (Fig. 1) ganhou força de uso em diferentes idiomas. Esse grupo é resultante de uma mistura de representantes de distintos clados de aves, e não há uma definição clara e concreta de quais aves são consideradas "marinhas", e quais não são.

**FIGURA 1. Albatroz-de-nariz-amarelo,** *Thalassarche chlororhynchos*, **decolando da superfície das águas do litoral norte paulista.** *Foto: Marcos Santos.*

Como no caso das tartarugas marinhas e dos mamíferos marinhos, esse grupo não taxonômico de vertebrados passou por muito tempo despercebido pelo meio acadêmico no Brasil. Obviamente, por questões logísticas, financeiras e práticas, sempre foi mais acessível de maneira geral, investir-se em estudos de organismos terrestres e de água doce, ante aos organismos marinhos. E quando consideramos um país de dimensões continentais como o Brasil, que apresenta uma série de biomas extraordinários em estrutura, função e diversidade de espécies, onde se incluem as aves no meio terrestre, era mais do que esperado que as Ciências Biológicas tivessem uma preferência histórica para investigar esses ecossistemas terrestres prontamente acessíveis.

O mar ganhou notoriedade por frentes de ações humanas que avançaram globalmente, principalmente dos anos 1960 e 1970 em diante. Esses processos foram iniciados primeiramente nos países ricos, chegando nos anos 1980 e 1990 aos países em desenvolvimento com suas complexas limitações. A exploração, definida como a prospecção ou procura de áreas para gerar recursos, e a explotação, definida como o processo de extração ou retirada de recursos para aproveitamento econômico, de óleo e gás impulsionaram as investigações em meio marinho em busca do ouro negro, e ainda moldam o ritmo das economias mundiais.

A ciência-chave nessa linha de negócios sempre foi a otimização da explotação dos recursos não naturais e a necessidade em se monitorar os impactos em fauna surgiu apenas a posteriori. Movimentos ecológicos de proteção ao meio ambiente ganharam vozes que se espalharam pelos quatro cantos do

nosso planeta desde os anos 1960 e 1970, por meio de cidadãos preocupados com o bem-estar da natureza e, consequentemente, de nós mesmos, seres humanos. Nos sistemas terrestres brasileiros, por exemplo, as campanhas de proteção da Mata Atlântica e do mico-leão-dourado tiveram grande repercussão e culminaram em resultados ímpares, com a não extinção e conservação da espécie e do bioma mencionados, por enquanto. A campanha internacional de proteção às baleais chegou ao Brasil nos anos 1980, com a decisão do país em cessar suas operações de matança em 1986.

Menos populares que as tartarugas marinhas e que os mamíferos marinhos, as aves marinhas ainda recebem pouca atenção de autoridades brasileiras de proteção à natureza, bem como ainda são foco de poucos estudos acadêmicos realizados pelo país. São lembradas principalmente em processos de compensação ambiental envolvendo danos provocados aos oceanos e zonas costeiras, quando da realização de grandes empreendimentos que geram impactos diretos e indiretos aos recursos naturais.

Com os avanços tecnológicos das últimas décadas, facilidades de comunicação globalizada e maior acessibilidade aos ecossistemas costeiros e insulares, é preciso pavimentar um caminho mais fértil para serem investidos recursos financeiros e humanos em estudos conduzidos em médio e longo prazos com aves marinhas no Brasil.

## 2. Quem são as aves marinhas?

Não há uma definição globalmente aceita para "aves marinhas" ("*marine birds*" ou "*seabirds*", em língua inglesa). Há uma proposta de cientistas que define aves marinhas como *todas aquelas que vivem ou dependem do ambiente marinho, que inclui áreas e ilhas costeiras, estuários, áreas úmidas e ilhas oceânicas*. Há uma outra proposta que define aves marinhas como *um subconjunto de aves que se alimenta no mar, tanto em áreas costeiras, como em áreas oceânicas*. Essas duas definições estão intimamente relacionadas ao meio ambiente e ao comportamento, e não a características morfológicas, moleculares, e nem a relações ancestral-descendentes que poderiam tornar este grupo de organismos exclusivamente distinto de outros, e que tivesse características que não fossem compartilhadas com "aves não marinhas". Portanto, essas definições não oferecem aos leitores a possibilidade de terem uma ideia mais precisa de quais espécies, ou grupos de espécies de aves, certamente poderiam ser inseridas nesta categoria não taxonômica de "aves marinhas". Em paralelo, abre-se uma janela a potenciais indefinições, a depender da espécie ou grupo de espécies em questão. Dentro destas propostas, alguns grupos de investigadores propuseram criar dois grandes grupos não taxonômicos, nominados de aves "costeiras" e "pelagiais", baseados mais no estilo de vida do que na geografia.

Segundo esta proposta, as aves "costeiras" passam toda a vida, ou a maior parte dela, em áreas costeiras rasas, e em muitos casos se adaptando às águas estuarinas. São representadas principalmente por gaivotas, algumas espécies de trinta-réis, talha-mares, biguás, fragatas, uma espécie de pelicanos, algumas espécies de atobás e a maioria das espécies de pinguins. As aves "pelagiais" ou "pelágicas" passam a maior parte das suas vidas vagando pelos oceanos abertos, geralmente próximo aos limites da quebra de plataformas continentais, frequentemente distantes de terra firme, e retornando a ilhas remotas, oceânicas ou costeiras, apenas para a reprodução. Neste grupo se destacam os albatrozes, os petréis, os fulmares, algumas espécies de atobás, de pinguins e de gaivotas.

Os cientistas estimam que cerca de 350 espécies de aves seriam consideradas "aves marinhas"; uma fração muito pequena perante as mais de 11.000 espécies descritas. Por que tão poucas espécies ocupam essa faixa de oceanos que representa praticamente 71% de espaço do nosso planeta? Uma das razões é

que os sistemas marinhos ofereceram e oferecem poucos nichos ecológicos distintos para a evolução das aves. No processo evolutivo, os oceanos apresentaram poucas possibilidades de isolamento reprodutivo às aves para se especiarem na mesma taxa como ocorreu com as espécies de hábitos terrestres.

Diferentemente da maior parcela de espécies de organismos atualmente viventes, cuja maior diversidade está concentrada nos trópicos e subtrópicos, nas aves marinhas o processo evolutivo levou a uma inversão de concentração de sua diversidade, principalmente nas estações reprodutivas. A maior parte das espécies tende a se concentrar em altas latitudes, em ilhas subárticas e subantárticas, próximas a mares frios, com mais oxigênio e altamente produtivos, e que mantêm suas populações de adultos e jovens, e ainda alimentam suas proles sazonalmente. Áreas temperadas e subtropicais onde ocorrem processos de ressurgência, como as costas da Califórnia, do Peru e do Chile, por exemplo, também concentram uma interessante diversidade de aves marinhas, bem como manchas de estuários e manguezais em áreas subtropicais.

Pelo que foi exposto até aqui, os agrupamentos populares de aves marinhas, tartarugas e mamíferos marinhos são considerados como não funcionais, gerando mais dúvidas e controvérsias do que entendimento. Para evitar essas dúvidas é que a taxonomia e a sistemática, que são ciências tradicionais que se baseiam em características que definem relações ancestral-descendentes dos organismos vivos para ordená-los, contribuem para pavimentar caminhos mais férteis ao entendimento dos seres vivos. Porém, o ensino de quesitos básicos sobre essas ciências ainda é muito incipiente nos ensinos fundamental e médio no Brasil, onde acaba prevalecendo a difusão do conhecimento popular em uma grande extensão do país. Taxonomicamente, as aves marinhas estão inseridas no clado "Sauropsida" (Fig. 2), que significa "face de lagarto".

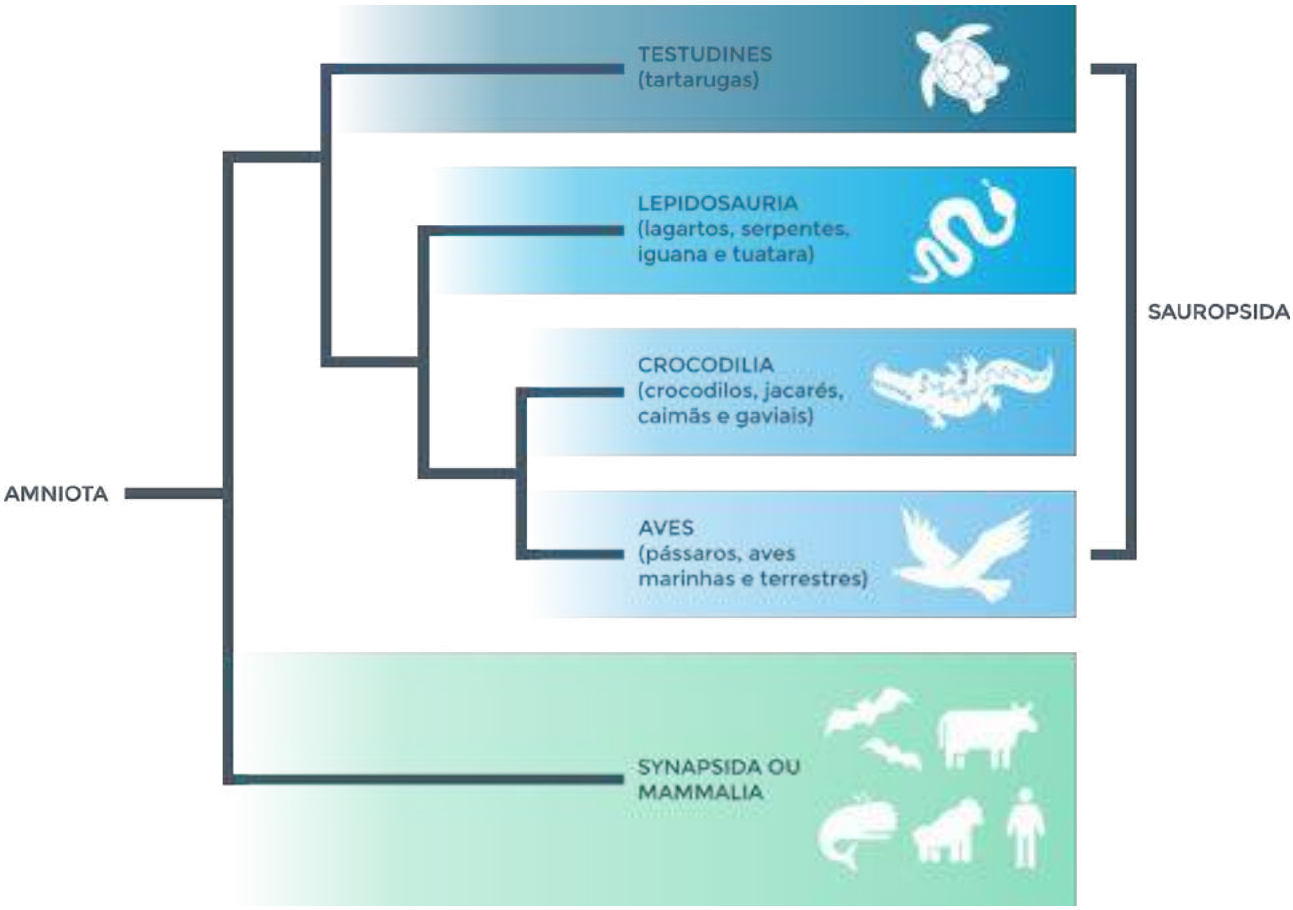



**FIGURA 2. Cladograma simplificado dos clados Sauropsida e Synapsida (=mamíferos).** *Adaptado de Liem et al. (2013). Arte: Marcos Santos.*

"Sauropsida" são dioicos e, com exceção de algumas espécies de serpentes, são todos ovíparos. "Sauropsida" se subdivide em "Testudines" (quelônios = tartarugas, com cerca de 300+ espécies), "Lepidosauria" (lagartos, serpentes, iguana marinha e tuatara – um pequeno lagarto endêmico da Nova Zelândia, com cerca de 7.800+ espécies), e "Archosauria", que por sua vez é subdividido em "Crocodilia" (jacarés e crocodilos, com cerca de 23+ espécies), e "Aves" (pássaros e aves terrestres e aves marinhas, com cerca de 11.000+ espécies).

É muito importante aos leitores terem a compreensão que o cladograma simplificado da Figura 2, apesar de nos remeter às formas viventes no planeta em tempos modernos, obrigatoriamente incluem as espécies extintas, por ter como base o princípio da filogenética para a sua elaboração. E este princípio envolve a formação de clados mutuamente exclusivos baseados em linhagens únicas de ancestrais-descendentes com identidade própria quando comparadas a outras linhagens. Neste sentido, é importante esclarecer que o clado das "Aves" está incluído em um outro clado mais abrangente conhecido como "Theropoda", que inclui dinossauros terrestres de locomoção bípede e extintos, como o tiranossauro (*Tyrannosaurus rex*) e os "velociraptors", que ganharam maior exposição com a sequência de filmes para o cinema conhecido como "*Jurassic Park*" em língua inglesa, ou "Parque dos Dinossauros" em português.

O termo popular "dinossauro" deveria se referir cientificamente apenas a representantes de um clado ainda mais abrangente nominado "Dinosauria". Esse raciocínio nos leva à conclusão de que as aves modernas são dinossauros vivos. O clado "Dinosauria" tem como grupo-irmão o extinto clado dos "Pterosauria" – os pteurossauros, que foram representados por reptilianos voadores. Apesar de pterossauros serem expostos no cinema e em literatura popular como "dinossauros", tecnicamente eles não fazem parte do clado "Dinossauria". Por terem o hábito de voar, os pteurossauros costumam levar as pessoas a concluir que eles originaram as aves modernas; o que veremos na próxima seção que não foi o que efetivamente ocorreu na história evolutiva do grupo. Relembrando, todos esses clados mencionados estão inseridos no clado mais abrangente dos "Archosauria".

## 3. Origem, evolução e diversidade de espécies

Os primeiros fósseis de aves são registrados para 147 milhões de anos, no Jurássico, que é o período datado para a origem do grupo até este momento. O primeiro fóssil de representantes deste clado foi encontrado na Alemanha em 1861. O depósito fossilífero de calcário de Solnhofen na Bavária tinha características ímpares que levaram à preservação de uma única pena na primeira descoberta divulgada pelos cientistas. Aquela espécie fóssil foi descrita como *Archaeopteryx lithographica* (Fig. 3), que significa "asas antigas escritas na pedra".

Os maiores exemplares do gênero devem ter alcançado até cerca de 50 centímetros de comprimento. Descobertas posteriores apresentaram à Ciência registros de exemplares com mais penas. Descobertas mais recentes visam refinar a investigação sobre os ancestrais de *Archaeopteryx*, bem como comprovar se esse é efetivamente o primeiro fóssil do clado das aves.

O clado das aves modernas viventes ("Neornithes") é representado por cerca de 11.000 espécies subdivididas em 22 ordens. As ordens são basicamente diferenciadas com base em caracteres morfológicos envolvendo o bico, o tamanho e a forma da asa e da cauda, e a forma de penas e pés/patas, por exemplo. Essas diferenças implicam em distintas adaptações para alimentação, reprodução, locomoção e nas escolhas de habitat, por exemplo.

Mais da metade dessas espécies (*ca*. 6.500) está inserida na ordem Passeriformes – que inclui os pássaros (nome popular mais conhecido), geralmente de pequeno ou médio porte, que se distinguem de todas as demais espécies de aves pela disposição de seus artelhos ("dedos") dos membros posteriores ou patas: três deles voltados para frente e um voltado para trás.

**FIGURA 3. Fóssil de *Archaeopteryx lithographica* exposto no Harvard Museum of Natural History, Cambridge (MA), Estados Unidos.** *Foto: Marcos Santos.*

As principais ordens com o maior número de representantes de espécies que são dependentes das regiões costeiras, oceânicas e/ou áreas úmidas estão listadas abaixo, com alguns exemplos de representantes com seus nomes populares. A Figura 4 ilustra alguns desses exemplares.

**Sphenisciformes:** pinguins.

**Procellariiformes:** albatrozes, petréis, grazinas, bobos, fulmares e pardelas.

**Pelecaniformes:** pelicanos, socós, garças, guarás e colhereiros.

**Suliformes:** fragatas, fragatas, atobás, biguás, cormorões e "gannets".

**Charadriiformes:** skuas, gaivotas, trinta-réis, talha-mares, piru-pirus (ostraceiros/ostreiros), batuíras, e "auks".

**Ciconiiformes:** maguaris.

**Gruiformes:** saracuras.

**Coraciiformes:** martins-pescadores.

**FIGURA 4. Alguns exemplos de aves marinhas: A) talha-mar (*Rynchops niger*; Charadriiformes); B) petrel-gigante-do-sul (*Macronectes giganteus*; Procellariiformes), C) pinguim-de-barbicha (*Pygoscelys antarcticus*; Sphenisciformes); D) fragata ou tesourão (*Fregata magnificens*; Suliformes); e F) gaivotão (*Larus dominicanus*; Charadriiformes).** *Fotos em diferentes escalas: Marcos Santos.*

Pelo que foi apresentado até aqui, nota-se que não é possível quantificar precisamente quantas espécies de aves são "marinhas". Mais importante aos interessados em investigar "aves marinhas", será estudar e compreender quais são as distintas ordens existentes, seus representantes, suas características principais e suas histórias evolutivas. Certamente é um universo magnífico bastante conhecido e ainda com muito a se desvendar. Para uso de terminologia científica adequada aos nomes populares adotados e padronizados em língua portuguesa, e associados aos nomes científicos, é prudente consultar a página web do Comitê Brasileiro de Registros Ornitológicos[1]. O propósito em disponibilizar uma lista atualizada em meios acessíveis gratuitamente a todos propicia maior e mais eficiente divulgação do conhecimento científico aos interessados, e facilita as atualizações geradas por novas investigações, principalmente aquelas vinculadas às novidades taxonômicas que podem mudar uma ou mais espécies de clados como as ordens, por exemplo.

## 4. Aspectos básicos de morfologia

De uma maneira geral, é bastante simples caracterizar morfologicamente uma ave marinha (Fig. 5). Em um sentido antero-posterior, elas apresentam a cabeça com olhos, bico – uma estrutura exclusiva do grupo, e um par de narinas, o pescoço em forma de "S", um par de asas ou membros anteriores, e um par de patas ou membros posteriores com unhas. Todas as aves apresentam o corpo revestido por penas, também uma característica exclusiva do clado.

[1] Acesse em: <http://www.cbro.org.br>

**FIGURA 5.** **Morfologia geral de um guará-vermelho,** *Eudocimus ruber*, **fotografado no estuário de Cananéia, SP.** *Foto: Marcos Santos.*

O bico das aves é formado por uma estrutura óssea, revestida por um anexo tegumentário que lhe promove proteção. A morfologia do bico tem íntima relação com os itens alimentares das aves, variando entre distintas funções de coleta de grãos e sementes, pincelagem de presas móveis como peixes e lulas em meio aquático a partir de posicionamento em meio terrestre, ou pouco ágeis ou sésseis como invertebrados em substratos consolidados ou não consolidados, filtragem de zooplâncton, e pesca de presas como peixes e lulas na superfície da água com ou sem a necessidade de pouso. As estratégias variam entre a busca ativa pelas presas, ou a estratégia "senta e espera" para que elas estejam mais facilmente disponíveis à captura, seguindo a teoria do forrageamento ótimo. Alguns exemplos são ilustrados nas Figuras 6 e 7.

**FIGURA 6.** **Exemplos de estratégias alimentares de aves marinhas associadas à teoria do ótimo forrageamento e pela morfologia do bico: A) colhereiro (***Platalea ajaja***; Pelecaniformes) filtrando o zooplâncton à beira de um manguezal com bico em forma de colher; e B) atobá-pardo (***Sula leucogaster***; Suliformes) capturando três sardinhas após mergulho na água e com bico em forma de pinça.** *Fotos em diferentes escalas: Marcos Santos.*

**FIGURA 7. Exemplos de estratégias alimentares de aves marinhas associadas à teoria do ótimo forrageamento e pela morfologia do bico: A) biguá (*Phalacrocorax brasilianus*; Suliformes) levantando voo após capturar um bagre que terá seus espinhos quebrados pelo seu bico curvado na porção anterior; e B) garça-branca-pequena (*Egretta thula*; Pelecaniformes) à espera de aproximação de cardume de peixes para capturá-los com seu bico em forma de pinça.** *Fotos em diferentes escalas: Marcos Santos.*

Em uma ordem de aves marinhas, os Procellariformes, seus representantes apresentam tubos nasais que possivelmente otimizam seu sistema olfativo, os auxiliando a encontrar alimento mais facilmente em vastas áreas oceânicas. Há casos em que esses tubos nasais são representados por dois orifícios sequenciais às narinas, como nos albatrozes, por exemplo, e outros casos em que um único tubo nasal é repartido internamente em duas porções, como é o caso de muitas espécies de petréis (Fig. 8).

**FIGURA 8. A) Tubos nasais pares de um albatroz-real-do-sul (*Diomedea epomophora*); e B) tubo nasal em uma única estrutura cônica no petrel-gigante-do-norte (*Macronectes halli*. Ambos fotografados em Kaikoura, Nova Zelândia.** *Fotos em diferentes escalas: Marcos Santos.*

As penas das aves são formadas primariamente por beta-queratina (90% de sua composição), água (8%), lipídeos (1%) e outras proteínas e pigmentos (1%). Elas têm diferentes formatos e funções, como as **penas de contorno** que envolvem o corpo e estão associadas ao auxílio ao voo, conhecidas como *rêmiges* nas asas e como *rectrizes* na cauda, as **semiplumas** ao longo do corpo e sob as penas de contorno e que estão associadas ao isolamento térmico, as **cerdas** na base do bico, olhos, cabeça e artelhos com função sensorial tátil e de proteção, dentre outras. As penas são trocadas sazonalmente. Diferenças em padrões de colorações de plumagem e de bicos com base nas classes etárias é comum em aves (Fig. 9).

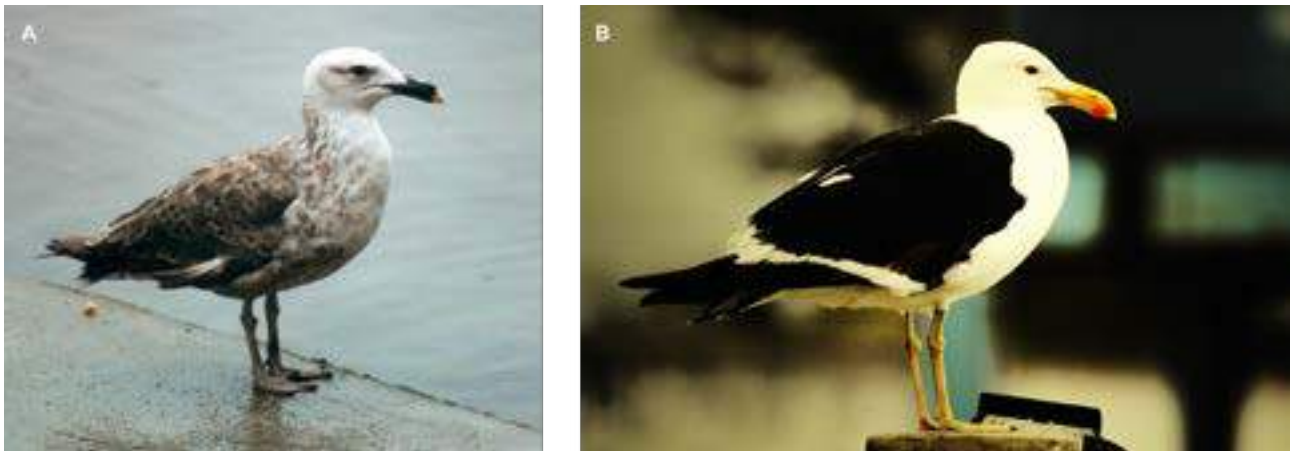



**FIGURA 9. Diferentes padrões de coloração de plumagem e de bico do gaivotão (*Larus dominicanus*; Charadriiformes). Mostra-se um juvenil (A) e à direita um adulto, com destaque para a pigmentação avermelhada na base do bico, usada pelos filhotes no ninho para chamar a atenção dos pais quando estão famintos, ao bicar essa mancha por acreditar que se trataria de alimento (B).** *Fotos em diferentes escalas: Marcos Santos (A) e Leandro Coelho (B).*

O tamanho das asas das aves varia entre as espécies e tem direta relação com a autonomia do voo. Por essa relevância, costuma-se destacar a informação sobre a envergadura das aves, que é uma medida morfológica que registra a distância em linha reta entre as pontas das asas. Das aves modernas, o albatroz-errante é a espécie de maior envergadura, chegando a atingir cerca de 3,7 metros (Fig. 10).

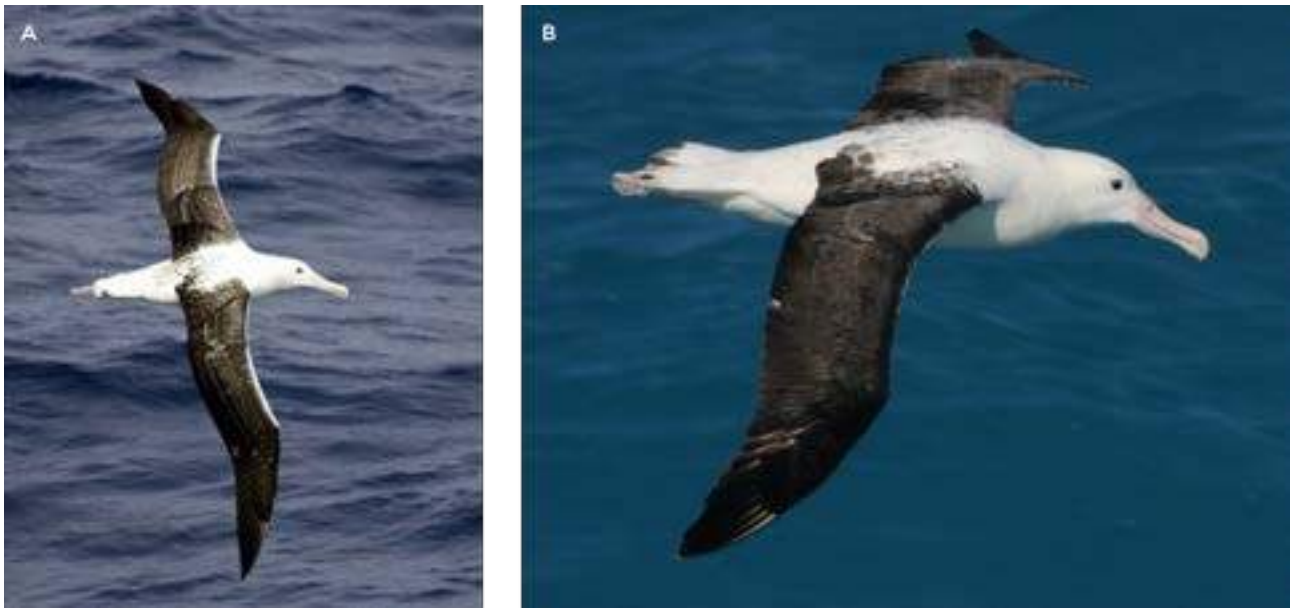



**FIGURA 10. A e B) Albatroz-errante (*Diomedea exulans*; Procellariiformes), ave com maior envergadura nos dias atuais, em voo no Estreito de Drake.** *Fotos em diferentes escalas: Marcos Santos.*

Assim como no caso das tartarugas marinhas, as aves marinhas apresentam uma cloaca, que é a cavidade onde se abrem o trato intestinal, o sistema urinário e o sistema reprodutivo; ou seja, via por onde são eliminados fezes e urina, e por onde são liberados o esperma dos machos e ovos pelas fêmeas.

## 5. Adaptações aos meios aéreo, aquático e terrestre

Ao longo do processo evolutivo de todos os organismos vivos, o meio em que eles são encontrados funciona como importante fator que implica em diversas adaptações morfo-fisiológicas para atenderem aos seus ciclos de vida. No caso das aves marinhas, é importante destacar as adaptações para utilizarem tanto o meio aéreo, utilizado pela maioria das espécies que tem a capacidade de voar e conhecidas como carinatas; quanto o meio terrestre, onde todas as espécies de aves se reproduzem e onde uma parcela delas que não tem capacidade de voo, chamadas de ratitas, passa praticamente toda a vida; e o meio aquático, onde uma parcela de espécies de aves busca seu alimento.

No meio aéreo, há que se buscar equilíbrio de sustentabilidade ao voo. No meio terrestre, há a necessidade de se evitar o aquecimento ou o resfriamento em excesso e a desidratação corpórea. No meio aquático, há principalmente as ações de vencer as barreiras impostas pela água ao deslocamento e as limitações impostas pela perda de calor ao meio (temperatura), pela pressão para aves que mergulham e pela salinidade da água.

Acredita-se que as aves mais antigas que passaram a alçar voos apresentavam pequeno porte e foram ágeis corredoras. Elas possuíam penas que cobriam o corpo com principal função de isolamento térmico. Ao se deslocarem freneticamente em busca de suas presas de pequeno porte que tinham habilidade de voo, as aves ancestrais desenvolviam altas velocidades com o apoio dos membros posteriores sobre o solo, e buscavam equilibrar seus corpos com a movimentação dos membros anteriores. Com alguns saltos e maior movimentação dos membros anteriores visando o equilíbrio, as aves antigas conseguiriam capturar presas que estavam alçando voos a alturas maiores que seus comprimentos. Com o tempo, esses saltos foram tornando-se mais estáveis por modificações na estrutura dos membros anteriores, associadas a uma maior cobertura de penas, e adaptações no arcabouço muscular corpóreo associado às asas.

O esterno, osso situado logo abaixo da região peitoral das aves, passa a desenvolver uma quilha com maior expansão para o aporte de uma rede de fibras musculares vinculadas ao bater de asas. Essa é resumidamente a teoria cursorial relacionada ao voo das aves e a mais aceita nos dias atuais, que indica que os primeiros voos foram alçados do solo para o ar.

Mas apenas essas adaptações anatômicas ósseas e musculares não seriam suficientes para o sucesso das aves na conquista do espaço aéreo. O peso sempre foi um obstáculo para o voo das aves. Muitas delas de maior porte e peso, como as extintas aves-elefante de Madagascar (Aepyornithiformes) e os moas da Nova Zelândia (Dinornithiformes), que chegavam a cerca de 3 metros de altura e a pesar quase 500 quilos, e as maiores espécies ratitas viventes como o avestruz-comum (*Struthio camelus*; Struthioniformes) e a ema (*Rhea americana*; Rheiformes), limitaram-se a não desenvolver o voo em suas histórias de vida.

A ave moderna carinata que se encontra praticamente no limite de alçar voos é o cisne-bravo (*Cygmus cygmus*; Anseriformes), que chega ao limite de 15 a 17 quilos de peso. Para reduzir o impacto imposto pelo peso ao voo, a história evolutiva das aves marcou um processo de adaptação morfológica

óssea de extrema importância. Os ossos tornaram-se mais leves, com estruturação de cavidades aéreas em seu interior, que implicaram na nominação a esses ossos de "ossos aéreos" ou "ossos pneumáticos". Ao mesmo tempo em que são leves, continuam sendo resistentes para sustentar o corpo das aves. Em espécies com maior dependência do meio aquático como os pinguins, os ossos mantiveram-se mais densos, pois os auxiliam em mergulhos a maiores profundidades e no rápido e eficiente deslocamento nos oceanos.

Houve uma fusão em larga escala de ossos nas aves, como a das costelas com vértebras com a cintura escapular e o esterno, uma redução do tamanho dos membros anteriores com fusão de alguns dedos e a perda secundária de outros dedos. As penas passaram a ter funções cada vez mais especializadas ao voo e, dessa forma, esse grupo de vertebrados definitivamente conquistou o meio aéreo de maneira eficiente para a exploração em importantes etapas de suas histórias de vida.

Um capítulo à parte envolvendo o voo das aves se encontra nos processos migratórios. Esses processos foram desenvolvidos em milhões de anos de adaptações ao clima e à oferta de habitats seguros para alimentação e para reprodução. Dessa forma, sazonalmente uma parcela considerável de aves (*ca*. 400 espécies) percorre rotas migratórias que muitas vezes, mas não necessariamente, extrapolam os hemisférios do planeta.

A maioria das espécies de aves que migra entre hemisférios realiza a nidificação (geração de novas crias) no hemisfério norte e a alimentação no hemisfério sul. É o caso do trinta-réis-ártico (*Sterna paradisaea*; Charadriiformes) (Fig. 11) que completa cerca de 25.000 km em um circuito de ida e volta do Ártico à Antártica. Os sinais para que essas espécies iniciem e terminem suas rotas migratórias devem estar relacionados à sensibilidade ao fotoperíodo. E muito se discute sobre quais seriam as principais orientações que as aves migratórias seguiriam, que podem envolver um sinergismo de uso deles, como a sensibilidade aos pólos geomagnéticos do planeta ao apresentarem magnetita no cérebro, o uso do sol e de estrelas como referências, o aprendizado em mapear referenciais geográficos identificados com o tempo e as rotas, e características químicas do ar.

Há uma série de espécies de albatrozes, pardelas e petréis que mantém suas rotas migratórias restritas ao mesmo hemisfério. No hemisfério sul, as ilhas subantárticas representam uma ampla área de nidificação de algumas espécies, como o albatroz-de-sobrancelha mostrado na Figura 11. Muitas vezes alguns representantes dessas espécies visitam a costa brasileira no inverno quando estão em busca de alimento.

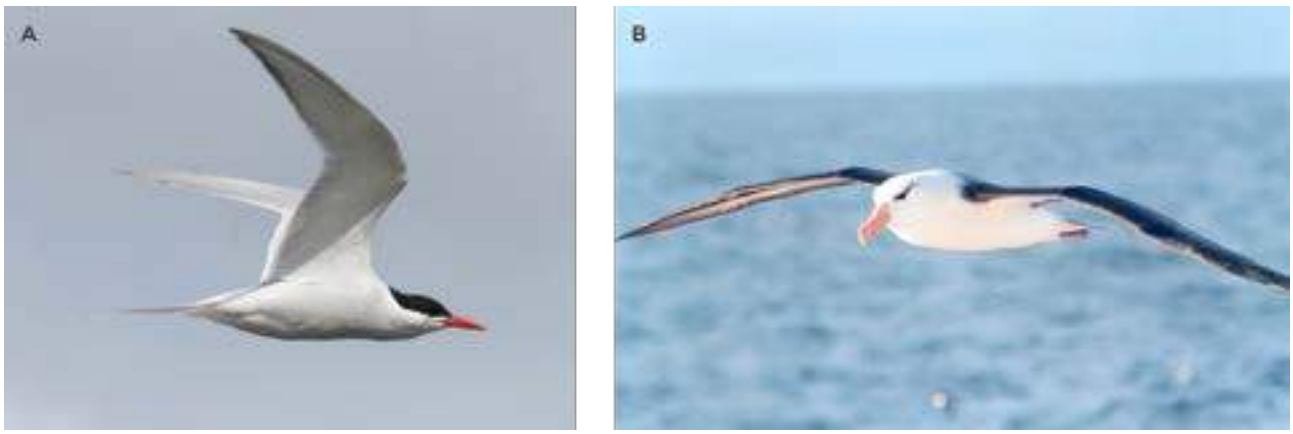



**FIGURA 11. A) Trinta-réis-ártico (*Sterna paradisaea*; Charidriiformes) fotografado em Punta Arenas à esquerda, a ave marinha com a maior rota migratória conhecida nos dias atuais; e B) o albatroz-de-sobrancelha (*Thalassarche melanophris*; Procelariiformes), cuja rota migratória concentra-se no hemisfério sul, fotografado no Estreito de Drake.** *Fotos em diferentes escalas: Marcos Santos.*

Para possibilitar longos voos em busca de alimento e mergulhos em profundidades variáveis da água, e evitar acúmulo de pequenos parasitas que podem provocar males à saúde das aves e perda desnecessária de calor ao meio, as penas precisam se manter sempre limpas, arranjadas em tramas que mantêm a temperatura corpórea e, quando necessário, impermeabilizadas para evitar o afogamento (no caso das aves marinhas). Dessa forma, com exceção de apenas nove famílias de aves (a maioria das aves ratitas como avestruzes, emas, kiwis; e outras como os papagaios da Amazônia e pica-paus, que contam com plumas especializadas que crescem continuamente e não são trocadas e têm funções de regular a temperatura corpórea), a grande maioria das espécies apresenta a glândula uropigial localizada dorsalmente na base da cauda. Esta é uma glândula sebácea que varia em tamanho e formato entre as distintas espécies de aves. A glândula uropigial produz e secreta um óleo que é espalhado pelas penas, pernas e patas com o uso do bico, após esfregá-lo na referida glândula.

Para regularem sua temperatura corpórea em ambientes frios e durante o voo e mergulhos, as aves contam com o processo fisiológico da endotermia, compartilhado com os mamíferos. Esses dois clados evolutivamente contam com um sistema de manutenção de calor em torno de uma temperatura adequada ao bom funcionamento de órgãos e do metabolismo vital. Esse sistema necessita de um combustível constante para sua operacionalização: alimento ou reserva de alimento sob a forma de gordura. O metabolismo de aves e mamíferos é uma usina que transforma alimento e reservas de gordura, dentre outros produtos, em matéria-prima básica para manter a temperatura corpórea regulada. E, somada a anexos tegumentários como as penas/a plumagem nas aves e os pelos nos mamíferos, a endotermia cumpre seu papel de manutenção corpórea da temperatura de aves marinhas em voo, na água, ou em ninhos/colônias.

Nas situações de excesso de calor, as aves não contam com glândulas sudoríparas. A temperatura pode ser regulada por meio de ventilação do trato respiratório, como se funcionasse como um radiador (Fig. 12A), assim como com o aumento do fluxo sanguíneo ao bico para perder calor ao meio.

**FIGURA 12. Atobá-grande (*Sula dactylatra*; Suliformes): A) regulando sua temperatura corpórea na Ilha Redonda, em Abrolhos (BA); e B) membranas interdigitais de um indivíduo da mesma espécie em B, evidenciando uma das adaptações morfológicas ao deslocamento em meio aquático.** *Fotos em diferentes escalas: Marcos Santos.*

Ainda sobre a regulação da temperatura corpórea, é intrigante como as patas de pinguins não congelam em contato direto com o gelo antártico. As aves marinhas também podem controlar a temperatura das suas pernas e patas pela constrição do fluxo sanguíneo às suas extremidades corpóreas, reduzindo assim a perda de calor ao meio sem o risco de congelamento do sangue e das patas.

Os pinguins mantêm a menor superfície de contato possível das patas com a camada de gelo, geralmente mantendo os artelhos (=dedos) fora do alcance do solo. Um sistema de contra-corrente

envolvendo uma intrincada rede de artérias e veias que irrigam as patas evitam o congelamento das mesmas ao receberem sangue quente do coração, não perderem calor ao meio e manterem as patas em temperatura acima do ponto de congelamento no retorno desse sangue ao coração. Por fim, em temperaturas mais extremas, uma camada de gordura interna, as penas mantendo uma camada de ar quente isolando seu corpo do meio externo, as penas escuras absorvendo calor do sol e da atmosfera, a redução do metabolismo e da circulação sanguínea não essencial, a recuperação de até 85% do calor que seria perdido na respiração no bico (= radiador), e a agregação de indivíduos protegendo-se entre eles e constantemente alterando posições, são outros fatores que colaboram para a manutenção da temperatura corpórea da maioria das espécies de pinguins em ambientes antártico e subantártico. Com essas adaptações, pinguins-imperadores (*Aptenodytes forsteri*) podem suportar temperaturas de até -60°C.

No meio aquático, as aves marinhas podem se deslocar boiadas na superfície da água, ou nadar na coluna d'água após mergulhos. No primeiro caso, as patas funcionarão como remos para elas realizarem curtos deslocamentos. Para isso, muitas espécies de aves marinhas desenvolveram membranas interdigitais (Fig. 12B), que aumentam a superfície de contato com a água, gerando impulsos mais efetivos em seu deslocamento.

Nos mergulhos, as asas são potencialmente mais efetivas do que as patas, fazendo com que algumas espécies de pinguins alcancem velocidades de cerca de 25 a 30 km/h. Apesar do porte, o pinguim-imperador é um excelente nadador e mergulhador, alcançando profundidades de 580 metros, e permanecendo até cerca de 20 minutos em meio aquático sem respirar. O segredo de resistir a grandes profundidades e a esse longo tempo reside em apresentar uma estrutura de órgãos e ossos resistente à força da pressão, e ao gerenciamento do oxigênio em grandes concentrações em músculos principalmente. Na superfície da água, diferentemente da maioria das aves marinhas, os pinguins se posicionam com praticamente todo o corpo embaixo da água, exceto a cabeça, e assim, as asas seguem como suas importantes forças propulsoras.

Além de contarem com rins eficientes para auxiliar no processo de osmorregulação, as aves marinhas apresentam um par de glândulas de eliminação de sal, que contribuem com este importante processo fisiológico. Estas glândulas se posicionam na porção dorsal dos olhos, e se conectam por canalículos às narinas, de onde gotículas de sal são expelidas ao meio externo. Em albatrozes, petréis, pinguins, pelicanos, atobás e gaivotas, elas tendem a ser mais eficientes e a apresentarem maior porte com relação ao crânio. Gotículas de secreções salgadas chegam à ponta do bico das aves marinhas, que se livram das mesmas ao chacoalhar a cabeça. O sal acaba sendo ingerido acidentalmente quando da captura de presas, bem como vem associado a alguns itens alimentares, principalmente no caso de peixes e crustáceos como o krill. A água doce muitas vezes é extraída do próprio alimento (peixes e lulas geralmente), do metabolismo de gordura, ou buscando-se diretamente uma fonte para ingestão ativa.

No meio terrestre, as aves necessitam sustentar seus corpos sobre sua estrutura esquelética e caminhar com o apoio de pernas e patas. O deslocamento em meio terrestre envolve processos distintos entre saltar, caminhar, escalar e se empoleirarem. Certamente, as aves marinhas têm mais habilidade no ar e/ou no mar para se deslocarem, e usam o meio terrestre muitas vezes de maneira "desajeitada" sob a ótica humana. Independente dessa pequena limitação em movimentos, o meio terrestre é vital para todas as espécies de aves. Somente fora da água ocorrem as desovas, em locais que variam entre o solo nu à elaboração de ninhos complexos em diferentes locais como o solo, copas de árvores e até em falésias. Em ovos amnióticos, a pequena ave em desenvolvimento depende das trocas gasosas com o meio externo. Embaixo da água, ovos de quaisquer espécies de aves não gerariam vida. Maiores detalhes desta importante etapa do ciclo de vida das aves marinhas é tratada no tópico seguinte.

## 6. História de vida: reprodução

Torna-se uma tarefa quase impossível caracterizar o ciclo de vida das 11.000 espécies de aves com uma só diagramação ou descrição. Já seria uma tarefa bastante complexa ilustrar aquelas do grupo não taxonômico das "aves marinhas"; e depois ainda haveria a tarefa de avaliar as semelhanças e as particularidades de cada clado (ordem, família, gênero e espécie). Em paralelo, neste grande universo de espécies de aves, há muitas delas em que não se conhece o ciclo de vida completo, sendo necessário se investir em estudos em médio a longo prazo como veremos adiante. Por essas razões, serão descritas linhas gerais e, quando prudente, serão destacadas particularidades de grupos que tradicionalmente são mais conhecidos pela Ciência.

Para seguir uma sequência lógica de temas, os seguintes subitens serão tratados separadamente: os sistemas reprodutivos, a corte, a cópula e a fertilização, os ninhos e ninhegos (termo técnico auferido às crias), as colônias, os ovos e a incubação, e o nascimento. Aves marinhas em geral apresentam maturação sexual tardia e longevidade relativamente alta (*ca*. 20 a 60+ anos), o que torna um desafio a investigação e o conhecimento dos ciclos reprodutivos de todas as espécies.

### 6.1 Sistemas reprodutivos

Mesmo em meio a uma miríade de diferentes estratégias para reprodução, em mais de 90% das espécies de aves os machos participam de múltiplas tarefas que envolvem o acasalamento, como encontrar o local onde será construído o ninho, ajudar a construí-lo, chocar o(s) ovo(s), alimentar a(s) cria(s) e, em muitas espécies, também alimentar as fêmeas que estão chocando ovo(s) ou cuidando da(s) cria(s), e cuidar da(s) e proteger a(s) cria(s). Os machos dessa maioria de espécies de aves só não desovam. Dessa forma, em função desta cumplicidade em participação de tarefas, geralmente há uma tendência de machos acasalarem com uma só fêmea por estação reprodutiva (ER). Esse sistema reprodutivo é conhecido como monogamia, e é a estratégia de acasalamento mais comum em aves marinhas.

Em alguns grupos de aves, a relação monogâmica é fixa para mais de uma ER e dura enquanto o par de aves estiver vivo, como nos casos de cisnes, gansos, águias, muitas espécies de corujas e papagaios, por exemplo. Entretanto, por haver condições biológicas para os machos competirem entre si para fertilizarem mais fêmeas na mesma ER, em algumas espécies a poligamia pode ser observada. E ela se aplica tanto a machos fertilizarem mais do que uma fêmea (=poliginia), quanto a fêmeas terem sido fertilizadas por mais de um macho (=poliandria), e nos raros casos em que machos e fêmeas têm mais de um parceiro na ER (=poliginandria). Uma curiosidade interessante no sistema reprodutivo das aves, e que difere dos mamíferos, é que na determinação dos sexos, os machos são homozigotos (ZZ) e as fêmeas são heterozigotas (ZW).

### 6.2 Corte

Machos de uma grande parcela das espécies de aves se exibem de maneira elaborada, dedicada e ritualizada para atrair fêmeas para o acasalamento. Elas, por sua vez, podem ser parceiras passivas à corte, ou responderem com exibições também elaboradas. A corte tem papéis importantes como levar pares de mesma espécie a se reproduzir, já que a geração de híbridos estéreis leva a baixo investimento de energia por parte de ambos no processo evolutivo; mostrar ao potencial parceiro algumas características importantes para o acasalamento, como o estado de maturidade de cada um, o status de cada um em

meio à sociedade da referida espécie, e a prontidão em que se encontram para o acasalamento; além de mostrar eventuais características do futuro parceiro para atender às etapas que virão e que demandam energia e dedicação de ambos – como é o caso de uma parte considerável das aves marinhas.

O repertório de exibições de corte é complexo e bastante amplo nas aves. Ele pode envolver a importância de se exibir porções do corpo ao par, principalmente no caso de penas brilhantes; a exibição de um ninho bem construído; o oferecimento de alimento, que é bastante comum em algumas garças, em gaivotas e em trinta-réis; a demonstração de movimentos corporais que chamem a atenção do sexo oposto; ou rituais mútuos de dança ou de esgrima com uso dos bicos, quando os parceiros são bastante parecidos, como é o caso de muitas espécies de albatrozes. Muitas vezes esses rituais são acompanhados por vocalizações e chamados somente dos machos, ou de ambos os sexos.

## 6.3 Cópula e fertilização

No ciclo de vida das aves, a cópula em si é a etapa mais rápida a ocorrer, levando menos de cinco segundos em um pouco mais de 30% das espécies. Este é um dado subestimado, já que não é possível aos investigadores terem a certeza de que todos os contatos observados levaram efetivamente a cópulas concluídas com êxito. Geralmente, os machos montam no dorso das fêmeas, balançam as asas rapidamente e, em muitos casos, agarram com o bico as penas do pescoço ou da cabeça das fêmeas como apoio. A transferência do esperma dos machos para as fêmeas é facilitada por um contato cloacal entre ambos. As fêmeas podem estocar o esperma dos machos em intervalos que variam entre seis e 110 dias. Em albatrozes, as fêmeas estocam o esperma dos machos por até dois meses, já que há uma possibilidade dos pares não mais se encontrarem por este período logo após a cópula, quando as fêmeas passam semanas se alimentando no mar para obter nutrientes suficientes para produzir um único ovo de grande porte e com uma rica gema, enquanto os machos permanecem na colônia reprodutiva para proteger o ninho de rivais.

Foto: Leandro Coelho

## 6.4 Ninhos e ninhegos

Apesar de haver espécies de aves que não constroem ninhos, eles têm papel de grande valor nos cuidados parentais das aves que tentem produzir prole de tamanho limitado a uma ou poucas crias. Ninho pode ser definido como uma estrutura construída por um ou ambos genitores, com função de proteger o(s) ovo(s) e a(s) cria(s) de intempéries, de predadores e muitas vezes de congêneres da mesma espécie, bem como para descanso para jovens e adultos de algumas espécies. Na maioria dos casos, eles precisam ser estrategicamente construídos para a manutenção de uma temperatura adequada para a incubação do(s) ovo(s) e para a sobrevivência do(s) ninhego(s).

Ninhos podem ser construídos diretamente no solo; como no caso de muitas espécies de pinguins ao usarem pequenas pedras como matéria-prima; usando-se vegetação em áreas úmidas como fazem algumas espécies de garças; vegetação, penas e guano como fazem algumas espécies de albatrozes; em vegetação de ilhas rochosas como o caso de fragatas e atobás; em cavidades no próprio solo, como fazem pinguins-de-Magalhães, ou em barrancos como fazem algumas espécies de Martim-pescador; e em troncos e galhos de árvores como fazem algumas espécies de trinta-réis.

Há uma tendência do grau de complexidade do ninho, bem como a altura onde é construído, estarem diretamente relacionados à habilidade de voo da espécie e ao grau de desenvolvimento do ninhego ao nascer. Quanto menos desenvolvido nasce o ninhego, nominalmente chamado de cria altricial, ele requer maior proteção do ninho e dos pais. Ninhegos altriciais nascem com as pálpebras fechadas, completamente ou quase completamente nus, sem ou com raras penas, sem capacidade de movimento e são dependentes dos pais por dias, semanas e até meses. Aqui temos como exemplos os atobás, os pelicanos, os biguás e as fragatas. No outro extremo, estão as crias chamadas de precoces, que têm maior mobilidade e desenvoltura que os ninhegos altriciais, e que geralmente nascem em ninhos menos complexos em estrutura e mais associados ao solo. Nascem de olhos abertos e com densa plumagem cobrindo o corpo e incluem exemplos de algumas espécies de gansos, patos e cisnes.

Há dois grupos de ninhegos que se encontram em um estágio de desenvolvimento ao nascer intermediário entre os altriciais e os precoces. Há os semi-altriciais, que embora nasçam com os olhos abertos e cobertos por plumagem, eles tendem a se manter imóveis e desamparados no ninho e dependem dos adultos para se alimentar, para cuidados e proteção até apresentar a plumagem específica para realizar o primeiro voo. São os albatrozes, petréis, fulmares, algumas espécies de socós, colhereiros e de guarás. E há também os semi-precoces, que são mais móveis e menos desamparados que os dois estágios menos desenvolvidos citados, mas que se mantêm dependentes dos pais até estarem preparados ao primeiro voo. Aqui os exemplos são as skuas, gaivotas, trinta-réis e talha-mares.

O tempo de construção de ninhos pode levar de cinco a sete semanas até cerca de quatro meses e meio. Há casos em que algumas espécies de adultos tomam ninhos já construídos por outros adultos, bem como retiram às escondidas partes constituintes de ninhos vizinhos – fato que tende a ocorrer com espécies de pinguins que usam pequenas pedras para moldar seus ninhos em colônias onde vários vizinhos estão muito próximos.

## 6.5 Colônias

Em ilhas subárticas e subantárticas é bastante comum encontrar colônias de diversas espécies de aves marinhas voadoras como os albatrozes e petréis, e não voadoras como os pinguins (popularmente conhecidas como pinguineiras – Fig. 13). Evolutivamente, as colônias prevaleceram como modo de

agregar indivíduos de mesma espécie principalmente em estações reprodutivas, por aumentar a proteção de todos os seus membros contra a ação de predadores, por facilitar o encontro e a seleção de parceiros, e por aumentar as taxas de sobrevivência das crias, considerando-se a longevidade das espécies de aves marinhas. Por outro lado, viver em colônias pode trazer algumas desvantagens, como gerar maior competição por recursos se houver colônias próximas, por facilitar a dispersão de parasitas e doenças aos congêneres, e pela vulnerabilidade às espécies invasoras, bem como aos eventos naturais estocásticos.

**FIGURA 13.** Colônia de pinguim-de-barbicha (*Pygoscelys antarcticus*; Sphenisciformes) na Ilha Elefante, ao norte da Península Antártica. Foto: Marcos Santos.

## 6.6 Ovos e incubação

Nas aves, as desovas podem gerar de um a 19 ovos, dependendo da herança genética, dos efeitos da seleção natural e do porte das espécies, principalmente. Em média, as desovas de aves marinhas geram de um (exs: albatrozes, petréis, pinguim-rei e pinguim-imperador) a dois ovos. A tendência é que um ninhego se desenvolva. Os ovos de aves variam em tamanho, forma e padrão de coloração. A maioria das espécies de aves marinhas é capaz de gerar uma desova anual.

Há espécies de albatrozes em que o ciclo de vida não é anual, podendo haver geração de crias em anos alternados. Espécies cujos progenitores investem mais tempo em cuidado parental geralmente são incapazes de gerar uma desova anual. O(s) ovo(s) geralmente é/são incubado(s) em proximidade direta com o corpo, na região ventral, ou nas pernas e/ou pés dos adultos, para assim mantê-lo(s) em temperatura que varia entre 34°C e 39°C para as aves em geral.

Em uma resposta hormonal, a maioria das espécies de aves apresenta uma área no ventre em que as penas são perdidas após a desova, e esse setor altamente vascularizado do corpo pode transferir calor aos

ovos em desenvolvimento. Essas manchas sem penas no ventre são frequentemente encontradas somente em um dos sexos que incubam os ovos: em cerca de 25% das espécies são as fêmeas, e em cerca de 5% são apenas os machos, e em mais da metade das espécies de aves ambos os sexos cuidam dos ovos.

Muitos albatrozes e pinguins não apresentam essa mancha sem penas, mas sim uma cavidade sem penas no ventre rodeada por penas extra densas, e que mantêm esse ovo acomodado de uma maneira que o mesmo não role para os lados quando os adultos se levantam. Em um outro extremo de temperatura para o calor, os adultos podem reduzir o tempo que chocam os ovos, podem gerar sombra aos ovos com as asas, ou voarem a um local úmido para molhar sua plumagem e retornar ao ninho para resfriá-los. Essa é mais uma característica do cuidado parental das aves em geral.

O período de incubação dos ovos varia geralmente de acordo com o peso dos mesmos. Dessa forma, as aves de menor porte tendem a apresentar tempos mais curtos de incubação do que as de maior porte. Albatrozes de maior porte, por exemplo, incubam seus ovos em média entre 75 e 82 dias. Os machos dos pinguins-imperadores apresentam o maior período contínuo de incubação nas aves, variando entre 62 e 67 dias, em pleno inverno antártico. Enquanto ele choca o único ovo gerado pela fêmea, ela passa um período em que se alimenta no mar logo após a desova, para então retornar para tomar conta do filhote já nascido, quando será a vez do macho seguir ao mar para se alimentar.

### 6.7 Nascimento

O nascimento das crias, marcado pela quebra da casca do ovo e abandono do mesmo, pode levar entre alguns minutos, em aves de menor porte, até cerca de seis dias em algumas espécies de albatrozes. O bico do ninhego apresenta um pequeno dentículo afiado, pontiagudo e calcário, que se encontra na porção dorsal da maxila e o auxilia na quebra da casca aos poucos. Durante o processo de incubação, os ovos tendem a se tornar mais fracos em função da absorção do carbonato de cálcio pela cria em desenvolvimento. Há espécies em que, no dia em que abandona o ovo, o ninhego precoce já se apresenta independente para seguir seus progenitores. E há outros casos, como nos albatrozes de grande porte, em que se leva até 8-9 meses ou mais para o filhote se tornar independente dos pais.

## 7. Ameaças à sobrevivência

Foram dois os principais fatores propulsores para que a sobrevivência das aves marinhas se tornasse cada vez mais ameaçada: o aumento populacional humano de forma exponencial e o inadequado uso dos oceanos e das zonas costeiras, sem planejamento adequado, sem respeito ao meio ambiente e sem conhecimentos sobre uma parte considerável da vida marinha.

O aumento populacional humano gera duas demandas que perturbam gravemente a saúde dos oceanos: 1) a necessidade de explotar recursos marinhos vivos (pescado principalmente) em quantidades cada vez maiores para gerar proteína de origem marinha a essa crescente população, e de recursos não vivos (óleo e derivados principalmente) para alimentar economias mundiais baseadas em atingir metas irreais e insustentáveis de um "Produto Interno Bruto"; e 2) a necessidade de prover empregos e diversão a essa crescente população humana. Em paralelo, os produtos finais de muitas atividades humanas em ambientes terrestres e aquáticos são representados pela poluição e contaminação do ar, do solo e da água, afetando a própria qualidade de vida dos humanos.

Mas por que esse avanço emplacou a partir das décadas de 1960 e 1970? Principalmente pelo fato de que a humanidade se tornou bastante dependente do uso da energia e dos subprodutos gerados pela indústria do óleo explorado e explotado dos oceanos. E foi justamente naquele período mencionado que se deu início a uma nova era de prospecção e explotação desse recurso, com o avanço de novas tecnologias e consideráveis investimentos de capital por diversas nações incluindo o Brasil.

De maneira sinergética, algumas principais ameaças à sobrevivência das aves marinhas se tornaram frequentes desde aqueles anos até o presente momento, e encontram-se listadas a seguir:

## 7.1 Sobrepesca de recursos marinhos vivos

A sobrepesca desequilibra as teias tróficas marinhas constituídas ao longo de milhões de anos por processos de co-evolução entre seus componentes. Ao desequilibrar essas tramas tróficas no processo de retirada de milhares de toneladas de espécies de pescado, as sociedades humanas afetam a si mesmas. Os ecossistemas marinhos em desequilíbrio e sob forte e constante pressão de explotação não conseguem mais gerar os mesmos produtos como ocorreu nos tempos em que as atividades pesqueiras e extrativistas se desenvolviam em menor escala. Com menos recursos disponíveis, as populações de todas as espécies de aves marinhas tendem a entrar em declínio de abundância.

## 7.2 Capturas diretas de aves marinhas e de ovos para consumo humano

Aves marinhas e seus ovos serviram como fonte de proteína a diversas sociedades humanas que habitaram regiões costeiras globalmente, incluído o litoral brasileiro, a exploradores que habitaram ilhas remotas como escalas ou as tornaram colônias de países do hemisfério norte. Por acreditarem que era um recurso abundante e infinito, essas sociedades consumiram aves marinhas encontradas de forma vulnerável em seus ninhos em grandes colônias, assim como seus ovos depositados. É praticamente impossível estimar o número de aves mortas e consumidas pelos humanos, pelo fato de que essas capturas diretas não eram contabilizadas, tampouco deixaram restos e/ou provas que fossem suficientes para avaliar as proporções dessa matança.

## 7.3 Capturas acidentais em operações de pesca

Define-se captura acidental como *a captura não intencional de organismos não-alvo em operações de pesca*. Onde ela ocorre? Globalmente onde há ocorrência de megafauna marinha (elasmobrânquios, tartarugas, aves e mamíferos marinhos) e petrechos de pesca. No caso das aves marinhas, ao se envolverem com petrechos de pesca, como redes e espinhéis, quando estão submersas, elas tendem a morrer por afogamento por não conseguirem voltar à superfície da água para respirar, ou têm seus tratos alimentares perfurados por espinhéis. As aves marinhas aprendem facilmente a buscar os recursos marinhos, cada vez menos disponíveis pela ação pesqueira globalizada, nas iscas utilizadas em pontiagudos espinhéis para a captura de pescado, onde geralmente acabam sendo fisgadas pelos mesmos.

É uma tarefa bastante complexa avaliar as taxas de mortalidade de aves marinhas provocadas pelas capturas acidentais em operações de pesca. O ponto crucial inicial é que, em quase toda a sua totalidade, as atividades pesqueiras não são adequadamente monitoradas globalmente. Tanto em relação às avaliações de produção pesqueira, condicionada ao entendimento dos ciclos

de vida das espécies-alvo para seu manejo adequado, como em relação ao registro dos dados de megafauna capturada. Neste segundo caso, a falta de uma política nacional adequada de pesquisa e de conservação abre caminhos para a subnotificação pelas nações pesqueiras, ou para uma irrisória notificação bastante distante da realidade dos fatos.

Países em que as políticas de conservação não envolvem um processo construtivista e participativo que inclua a integração entre agentes governamentais, pesquisadores e comunidades pesqueiras, pecam por seguir não avaliando essa mortalidade de forma ordenada e adequada. Em consequência, o estado de saúde de suas populações de megafauna marinha é fortemente afetado. A tendência em muitos países foi estabelecer e publicar normas e leis que no papel funcionam muito bem, mas, como não foram definidas de maneira participativa com a comunidade pesqueira, na prática são uns desastres.

A comunidade pesqueira, geralmente sem ter acesso adequado às portarias e legislações vigentes, por medo de punição se afasta de agentes do governo e de grupos de pesquisa e, quando questionada sobre capturas acidentais de megafauna, na grande maioria dos casos prefere comentar que não ocorre e/ou que nunca viu.

Além dessas interações diretas e indiretas com as capturas de aves marinhas, há que se considerar os petrechos de pesca flutuantes, como redes e cabos com espinhéis, que vitimam milhares de indivíduos anualmente por dificultarem sua natação (Fig. 14) e, consequentemente, matando-os afogados pela fadiga.

**FIGURA 14.** **Pinguim-de-Magalhães (*Spheniscus magellanicus*; Sphenisciformes) envolto em rede de pesca na Ilha Comprida, SP.** *Foto: Marcos Santos*.

### 7.4 Desastres ambientais gerados pela explotação de óleo e derivados

Os desastres ambientais provocados pela contaminação de óleo e derivados nos oceanos são uma constante rotineira. Esta fonte de poluição marinha e, a posteriori, do ar, será inesgotável enquanto a humanidade depender amplamente da energia gerada por combustíveis fósseis.

Os processos de extração e transporte de óleo e derivados não são 100% seguros, estimando-se que no século XXI os vazamentos são praticamente diários em escala global. Esses compostos químicos irritam as mucosas das aves marinhas e, dependendo de sua densidade, dificultam ou impossibilitam seus movimentos, impedindo-as de evitar a fonte poluidora.

Além disso, não há glândula uropigial que dê conta de impermeabilizar as penas e, consequentemente, aves oleadas tendem a rapidamente morrer afogadas. Os gases gerados pelos raios solares na interação mar-atmosfera no processo de vaporização geram estresse respiratório aos organismos marinhos que se encontram na superfície da água descansando ou capturando presas.

Uma parte considerável dos produtos voláteis que compõem o óleo e seus derivados é tóxica e ataca os pulmões das aves marinhas. Os componentes químicos dos derivados de óleo no meio aquático contaminam o alimento a ser ingerido pelas aves marinhas e, em seguida, afetam seu estado de saúde. Muitos deles compõem a base de alimentação de sociedades humanas.

### 7.5 Poluição proveniente de um dos piores derivados do óleo – o plástico

Um dos produtos principais derivados da explotação de óleo assina globalmente há décadas a cultura do plástico, altamente poluidora em ecossistemas terrestres e aquáticos. Os danos gerados pelos plásticos nas aves marinhas ocorrem basicamente em dois estágios.

O primeiro estágio envolve a ingestão acidental de itens plásticos de pequeno porte, como tampas de garrafas pet, escovas de dentes e cápsulas não reutilizáveis de cafeteiras, que geralmente são ingeridos como consequência da falta de alimento gerada pela sobrepesca humana. Restos plásticos podem ser confundidos pelas aves marinhas por itens alimentares e, constantemente, são ingeridos pelas mesmas. Além de poder provocar o bloqueio do trato digestório com consequentes danos à saúde da ave que ingeriu o plástico, seu processamento pelo mesmo trato libera produtos tóxicos na circulação sanguínea, debilitando a mesma. Ainda são desconhecidos os efeitos patológicos desses compostos acumulados nas aves em médio a longo prazo.

O segundo estágio afeta toda a biota marinha, quando esses dejetos plásticos permanecem se decompondo nos oceanos, liberando seus componentes tóxicos em longo prazo. Esses componentes podem ser absorvidos pelos produtores primários e, destes, serem transferidos por toda a teia trófica sem serem metabolizados, incluindo aqui uma parte importante da proteína animal representada por peixes, moluscos e crustáceos, que compõe a dieta de cerca de 50 % da população humana. Como mencionado aos petrechos de pesca, os restos de materiais plásticos podem provocar sufocamento e/ou enforcamento de aves marinhas, também as levando a óbito.

Duas outras grandes preocupações mais recentes se encontram em investigação. Os impactos do turismo em áreas de reprodução, capazes de gerar estresse às aves e de carrear patógenos e espécies invasoras a colônias remotas, que estariam livres desses riscos, e das mudanças climáticas globais, que podem afetar sensivelmente o habitat das espécies polares e subpolares.

## 8. Conservação

Pesquisar e proteger aves marinhas é uma missão bastante complexa em função de suas amplas áreas de vida. A dependência de uso de ecossistemas terrestres continentais e insulares para incubação de ovos, tanto em zonas costeiras como oceânicas, bem como de extensas áreas de oceanos e estuários para alimentação, torna as aves marinhas bastante vulneráveis às ações antrópicas recentes.

O monitoramento de toda a extensão da área de vida de várias populações de aves marinhas é um desafio difícil em se executar. E este processo esbarra em outro desafio: o uso de áreas oceânicas geopolíticas pertencentes a algumas nações desinteressadas na temática, bem como o uso de águas internacionais onde, apesar de haver consenso quanto ao uso e respeito ao meio ambiente, não há nos dias atuais formas de fiscalização e de punição a nações que geram danos ambientais às mesmas.

A se considerar as distintas fontes de ameaças à sobrevivência das aves marinhas anteriormente descritas, e que a maturidade sexual das distintas espécies é tardia, a depender do estoque populacional e da espécie, é possível que uma parcela considerável delas não seja capaz de repor o estoque populacional nem ao menos uma vez na vida. Quando estoques não são repostos, os declínios de abundâncias populacionais são as consequências imediatas.

A União Internacional para a Conservação da Natureza (sigla IUCN, em língua inglesa) avalia os estoques populacionais globais de milhares de espécies vivas para disponibilizar seus estados de conservação na lista vermelha das espécies ameaçadas de extinção a um amplo leque de profissionais que inclui cientistas, professores, agentes públicos de proteção de meio ambiente e os altos escalões de governos, responsáveis por estabelecer políticas públicas de pesquisa e conservação da natureza. As últimas avaliações efetuadas pela IUCN sobre os estados de conservação de aves marinhas indicaram dois cenários bastante preocupantes: a maioria das espécies e albatrozes e petréis estão categorizadas em "ameaçadas de extinção" e há um grande grupo de aves marinhas categorizado como "deficiente em dados", ou seja, faltam estudos de médio a longo prazo para avaliar essas espécies de maneira adequada.

O que mais nós perdemos sem as aves marinhas nos oceanos? Junto com outras espécies de vertebrados aquáticos de médio a grande porte, de dieta variada e de grande mobilidade, as aves marinhas desempenham papel fundamental na manutenção da diversidade biológica, ao manter estáveis as populações de suas variadas presas e, em consequência, as teias alimentares em que estão envolvidas.

Elas transportam nutrientes quando efetuam seus constantes deslocamentos regionais e migratórios, fertilizando por meio de suas excretas (o guano rico em fósforo) tanto o fitoplâncton das camadas superficiais dos oceanos, quanto a vegetação das ilhas oceânicas onde formam suas colônias, como também as zonas costeiras onde se alimentam.

Quando se alimentam na superfície da água, promovem a disponibilização de recursos alimentares a uma miríade de outras espécies que geralmente estão associadas às áreas de ocorrência de aves marinhas, bem como de organismos que vivem associados ao substrato e que, em ambos os casos, se beneficiam da geração de restos de itens alimentares a partir dos processos de forrageamento e capturas de suas presas por meio de seus poderosos bicos.

Esses três papéis ecológicos são essenciais à própria sobrevivência humana, pela sua dependência de recursos vivos de origem marinha. Perder as aves marinhas dos oceanos resultará em um efeito dominó, que levará à perda de uma considerável diversidade biológica global, afetando a produção de oxigênio pelos oceanos, que é responsável por ao menos metade desse gás vital que a humanidade consome.

As ações urgentes que devem ser tomadas pela humanidade estão centradas em mudança de comportamento. Essa mudança deve ocorrer em escalas local, regional e global. Ela envolve uma série de atitudes que devem mudar nossas rotinas em curto e médio prazo, para proporcionar condições mínimas e adequadas para a vida neste planeta.

As políticas voltadas a enfrentar os agentes que geram declínios populacionais de aves marinhas requerem acordos internacionais que sejam discutidos, planejados, instaurados e respeitados no longo prazo. É necessário reduzir em larga escala e paulatinamente o uso e a nossa dependência de combustíveis fósseis para gerar energia e nos transportes.

É urgente o investimento em formas limpas de energia, como as energias solar e eólica. É necessário banir a produção e a distribuição de sacolas plásticas, bem como a produção de uma série de derivados de plástico desnecessários à vida humana, e que podem ser substituídos por produtos sustentáveis.

O estabelecimento de um programa de planejamento familiar por meio de políticas públicas torna-se necessário em escala global, pelas dimensões limitadas do planeta e de seus recursos. Com o crescimento populacional sendo regulado, haverá menor demanda por recursos como óleo e derivados, e por alimentos oriundos dos oceanos. Dessa forma, os oceanos poderão se recuperar em longo prazo, oferecendo bens e serviços de forma manejada e sustentável.

No caso específico das aves marinhas, é necessário o investimento em condução de pesquisa científica por meio de projetos que visem a internacionalização dos esforços de observação, monitoramento e avaliação dos estados de saúde dos estoques populacionais das distintas espécies. Suas histórias de vida extrapolam as fronteiras geopolíticas estabelecidas pela humanidade e que, em muitas áreas da Ciência que envolvem estudos de espécies migratórias, atrasam o avanço do conhecimento pela falta de uma mentalidade que enfoque um mundo biótico sem fronteiras.

Novas tecnologias para investigar padrões de distribuição, uso de área e descritores de aspectos reprodutivos e alimentares mais refinados devem ser aplicadas globalmente, sempre que possível com integração entre grupos de pesquisa que interajam com pesquisadores de outros países.

É urgente a implantação de monitoramentos adequados sobre a avaliação de produção pesqueira e de mortalidade de megafauna em operações de pesca, em escalas regionais e globais. Uma parte considerável dessas informações ainda não está disponível a todos os estoques populacionais de aves marinhas e compõe o banco de dados crucial para avaliar o estado de conservação dos mesmos com base nas temáticas-alvo propostas pela IUCN. Essa Ciência deve, preferencialmente, ser baseada em hipóteses a serem testadas por meio de metodologia científica replicável, de domínio público e realizada em centros de pesquisa especializados e em universidades.

Resumidamente, é momento de se investir em mais ações e menos em especulações e marketing enganoso. Há fatos e informações claras descrevendo um cenário preocupante e, contra fatos e dados científicos, não há argumentos que devam obstruir a tomada de ações visando a conservação de espécies.

Foto: Marcos Santos

## Referências Bibliográficas

CROXALL, J. P. 1987. Seabirds: Feeding Biology and Role in Marine Ecosystems. Cambridge University Press.

DE ROY, T., JONES, M. & CORNTHWAITE, J. 2013. Penguins: The Ultimate Guide. Princeton University Press.

DE ROY, T., JONES, M. & FITTER, J. 2008. Albatross: Their World, Their Ways. Firefly Books.

ELPHICK, J. 2016. Birds: A Complete Guide to their Biology and Behavior. Firefly Books.

GILL, F.B. 2007. Ornithology. 3rd Edition. W.H. Freeman and Company, New York.

LIEM, K.F., W.E. BEMIS, W.F. WALKER JR. & GRANDE, L. 2013. Anatomia Funcional dos Vertebrados – Uma Perspectiva Evolutiva. Tradução da 3ª edição. Cengage Learning, Brasil.

PONGANIS, P.J. 2015. Diving Physiology of Marine Mammals and Seabirds. Cambridge University Press.

SCHREIBER, E.A. & BURGER, J. 2002. Biology of Marine Birds. CRC Marine Biology Series. CRC Press.

SOYKAN, C.U., MOORE J.E., ZYDELIS, R., CROWDER L.B., SAFINA C., LEWISON R.L. 2008. Why study bycatch? An introduction to the theme section on fisheries bycatch. Endangered Species Research 5, 91–102.

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 28*

# MAMÍFEROS MARINHOS

*Marcos César de Oliveira Santos*

REVISÃO: CAMILA NEGRÃO SIGNORI

CITAÇÃO SUGERIDA: SANTOS, Marcos César de Oliveira. Mamíferos marinhos. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 28: p. 627-646.

# Mamíferos Marinhos

*Marcos César de Oliveira Santos*

## 1. Quem são os mamíferos marinhos?

Ao longo do tempo, tem sido comum englobar uma centena de espécies de mamíferos com histórias evolutivas muito distintas em um grupo zoológico artificial cunhado de "mamíferos marinhos". Em função da força de uso da literatura em língua inglesa, que é a mais extensa e conhecida, é cada vez mais comum encontrar esta forma de agregar tantas espécies distintas no referido grupo. Entretanto, quando se envereda pelos caminhos de comparação entre alguns distintos grupos de espécies que compõem a categoria dos "mamíferos marinhos", nota-se com muita clareza o quão diferentes são esses mamíferos.

Para evitar essa forma de agregar espécies de maneira equivocada, há séculos os cientistas procuram criar critérios robustos que as agrupem da melhor forma possível. Com isso, surgiu o que os cientistas chamam de categorias taxonômicas ou *taxa*, palavra em latim cujo termo em singular é táxon. Cabe a este capítulo tornar claro aos leitores a necessidade em se reconhecer as diferenças entre as categorias taxonômicas que compõem esse grupo zoológico artificial.

Desde as primeiras investidas voltadas à classificação e ordenamento dos seres vivos, tem sido cada vez mais claro que esse exercício deve, necessariamente, passar pelo zelo em agrupar espécies assemelhadas no tempo evolutivo, envolvendo ancestrais e seus descendentes. Com o advento da tecnologia acoplada aos esforços científicos e à junção de expertise que envolve estudos realizados por morfologistas, paleontólogos, geneticistas, dentre muitos outros profissionais, muitas mudanças tomaram corpo para gerar as modernas classificações dos seres vivos.

Os organismos que viveram ou vivem no Planeta Terra são agrupados com base em uma miríade de caracteres, e em função de suas histórias evolutivas. Assim chegamos aos mamíferos, por exemplo, que são animais de sangue quente, que secretam leite materno fundamental para a sobrevivência de seus filhotes e que apresentam pelos em ao menos uma fase do seu ciclo de vida. Humanos são mamíferos, assim como cães domésticos, gatos, morcegos, baleias e golfinhos peixes-boi, focas, lobos-marinhos e leões-marinhos. Pelas características descritas, aliadas a muitas outras, nós fazemos parte de um grupo seleto de organismos que, aparentemente, ainda apresentam muitas diferenças entre si. Por isso que existem as categorias taxonômicas. A partir desse agrupamento do que os taxonomistas chamam de classe dos mamíferos, teremos subdivisões de grupos menores de organismos com características similares, gerando outras categorias denominadas como ordem, infraordem, família, gênero e espécie.

O fato de muitas espécies de mamíferos utilizarem o meio aquático em alguma fase do ciclo de vida, ou mesmo passarem a integridade de suas vidas em meio aquático, não representa motivo suficientemente robusto para agrupar espécies em alguma categoria taxonômica.

Considerando mamíferos como os elefantes, os hipopótamos, as lontras, as ariranhas, os ursos polares, os ursos pardos, os lobos-marinhos, os leões-marinhos, as focas, as baleias, os golfinhos, os peixes-boi e os dugongos, com base em todo o conhecimento gerado sobre esses animais, torna-se impossível agrupá-los em uma categoria taxonômica única além da classe dos mamíferos. Por isso, os cientistas refinaram a forma de classificar esses mamíferos em outras categorias taxonômicas mais

específicas. Nesse refinamento, as espécies que são geralmente incluídas na categoria artificial dos "mamíferos marinhos" são agrupadas em ordens distintas, a saber: lontras, ariranhas, ursos-polares, lobos e leões-marinhos e focas na ordem dos **carnívoros**; as baleias e os golfinhos na ordem dos **cetartiodactyla** e subordem dos cetáceos; e os peixes-boi e dugongos na ordem dos **sirênios**. Talvez não só o fato de utilizarem o meio aquático em parte de suas vidas ou integralmente em suas vidas os reúnam em tal grupo. Costumo comentar com meus alunos que ainda acredito que o "nível alto de fofura" dos representantes do grupo, que eu chamo cientificamente de "índice de fofulência", ajuda a reunir tantos animais charmosos e evolutivamente distintos em um só grupo não taxonômico, sem utilidade prática.

Em literatura inglesa contendo a citação da categoria artificial dos "mamíferos marinhos" ("*marine mammals*", em língua inglesa) são quase sempre considerados os seguintes vertebrados: lontras marinhas e ariranhas, ursos polares, focas, lobos e leões marinhos (coletivamente chamados de *pinípedes* que nomeia a subordem), baleias e golfinhos (coletivamente chamados de *cetáceos* que nomeia a subordem da ordem cetartiodactyla – mais detalhes no decorrer do texto), e peixes-boi e dugongos (coletivamente chamados de *sirênios* que nomeia a subordem).

O urso polar é incluído por passar parte considerável de sua vida sobre o mar congelado. No caso das lontras marinhas, apesar de existir mais de uma dezena de espécies de lontras, apenas a lontra marinha encontrada na costa oeste norte-americana e canadense tem recebido especial atenção. Obviamente isto ocorre pelo fato de que a literatura popular sobre mamíferos "marinhos" é proveniente desses dois países, que ignoram a existência de outras espécies de mustelídeos fora da América do Norte. E aqui, há mais uma questão que deve ser levantada sobre o uso dos termos "mamíferos marinhos".

Quase uma dezena das espécies é encontrada em água doce fora da América do Norte, e não em água salgada. Temos exemplos clássicos na fauna de mamíferos encontrada no Brasil: a ariranha, o boto-vermelho ou boto-cor-de-rosa, e o boto-tucuxi. Sendo assim, seria mais adequado agrupá-los em uma categoria artificial denominada "mamíferos aquáticos".

Neste capítulo, trataremos dos cetáceos, dos pinípedes e dos sirênios, os três principais grupos de "mamíferos aquáticos" incluídos na categoria coletiva e artificial dos "mamíferos marinhos". O objetivo é que os leitores saibam diagnosticar os representantes de cada um desses grupos, compreendendo aspectos sobre sua diversidade biológica, onde são encontrados no globo terrestre, e aspectos gerais de morfologia, dieta e reprodução.

Também serão apresentadas informações sobre as origens evolutivas de cada um dos grupos para que o leitor compreenda o que foi exposto até o presente momento em referência às diferenças entre os mesmos. Para alcançar este objetivo proposto, cetáceos, pinípedes e sirênios serão tratados à parte.

Foto: Marcos Santos

## 2. Cetáceos

Entre os três grupos anteriormente citados como representantes mais comuns na literatura, o mais diversificado é o dos cetáceos. Nesse grupo encontramos os mamíferos que popularmente são conhecidos como baleias, golfinhos, botos, toninhas, cachalotes e orcas. São 89 espécies reconhecidas, das quais até o ano de 2020 tivemos notificação de 47 em águas brasileiras. Ocuparam todas as bacias oceânicas e encontram-se atualmente em três bacias de água doce na América do Sul e na Ásia. Apresentam a maior diversidade de formas e tamanhos, com grande plasticidade para ocupar nichos dos mais diversos, sejam águas estuarinas, sejam águas oceânicas, sejam águas polares, ou mesmo a imensidão da Amazônia. É sem sombra de dúvidas o grupo taxonômico, dentre os mamíferos, que melhor se adaptou ao meio aquático, onde passam todo o seu ciclo de vida.

O mais incrível desse fascinante táxon de mamíferos é que, quando surgiram, os cetáceos possuíam quatro patas, pelos por todo o corpo e vagavam em ambiente terrestre. Isso mesmo! Há cerca de 55 a 50 milhões de anos, animais semelhantes a lobos passaram a procurar alimento em um ambiente aquático no chamado Mar de Thethys, aproximadamente onde hoje temos a junção entre a Europa e Ásia com a África. Essa informação nos fazer compreender as razões pelas quais a evolução das espécies, seguindo a conformação do Planeta Terra, foi fundamental para chegar às formas viventes atualmente. Todos nós sabemos que o planeta sofreu mudanças em milhões de anos para alcançar a formação atual dos continentes e das bacias oceânicas. Nos primórdios, o Planeta Terra era constituído por uma massa de terra chamada de Pangeia (do grego *pan* = todo + *gea* = terra), cercada por um único oceano chamado Pantalassa. Em função da movimentação de placas tectônicas, o planeta dividiu-se em Gondwana ao sul e Laurásia ao norte, separados pelo Mar de Thethys. Foi justamente ali que surgiram os primeiros cetáceos.

Mas se esses cetáceos arcaicos tinham quatro patas, quem foram seus ancestrais? O que ocasionou transformações tão marcantes em cerca de 55 milhões de anos de história evolutiva? Sugere-se que o ancestral dos cetáceos era um quadrúpede conhecido como Condylarthra Mesonychidae. Esse ancestral não somente representa a essência que fez surgir os atuais golfinhos e baleias, mas também os hipopótamos, porcos, girafas, cabras e bois, dentre outros mamíferos terrestres que apresentam número par de dedos nas patas. Eles são cientificamente conhecidos como "artiodactyla" (do grego *artios* = número par + *daktulos* = dedo). Uma de suas principais características é apresentar o tarso paraxônico, ou seja, apresentar um plano de simetria entre o terceiro e o quarto dedos.

Por incrível que pareça, os primeiros cetáceos arcaicos também apresentavam o tarso paraxônico, pois também eram quadrúpedes, o que em anos recentes fez os cientistas criarem uma nova ordem de mamíferos chamada de cetartiodactyla, que representa a fusão dos cetáceos com os artiodactyla. Portanto, estudos baseados em morfologia e genética molecular têm apontado os hipopótamos como os parentes mais próximos dos cetáceos atualmente viventes. Esses, ao longo do processo evolutivo, tiveram uma perda secundária dos membros posteriores.

Uma linhagem do ancestral acima descrito, e que foi buscar alimento no Mar de Thethys altamente produtivo, passou a encarar mudanças em sua morfologia na sequência dos anos. Houve deslocamento das narinas da ponta do focinho para o topo da cabeça, redução quase completa de pelos, desaparecimento dos membros posteriores, redução dos membros anteriores e transformação em nadadeira peitoral, e surgimento de um pedúnculo caudal associado a uma nadadeira caudal formada por dois lobos para maior eficiência na propulsão em ambiente aquático. Sobre os pelos, o leitor deve estar pensando onde se encontram os pelos nos cetáceos atualmente viventes. Na maioria das espécies viventes, os pelos apenas surgem no estágio embrionário e se concentram no rostro dos cetáceos (veja o que vem a ser o rostro na descrição de morfologia mais à frente), sendo perdidos nos primeiros dias de vida. Eles deixam uma

pequena marca nos exemplares juvenis, e que some com o tempo. Para as espécies de cetáceos com barbatanas na boca para apreensão de alimento (ver adiante), eles se mantêm concentrados na região da cabeça na vida adulta, e provavelmente têm função de captação de vibração de ondas do meio aquático.

Com essas transformações morfológicas que levaram alguns milhões de anos para ocorrer, precisamos lembrar que os continentes continuavam a mudar suas conformações pela tectônica de placas. Há cerca de 35 milhões de anos, passa a surgir no hemisfério sul uma corrente chamada de "Corrente Circumpolar Antártica". Ela praticamente gira ao redor do globo terrestre entre os extremos da América do Sul, África e Oceania, funcionando como um eficiente veículo responsável pelo aumento da produtividade biológica dos mares austrais. Naquela situação, temos a presença de cetáceos arcaicos que já estão extintos, chamados de arqueocetos (Archaeoceti), cetáceos que apresentavam cerdas bucais para apreensão de alimento que deram origem às baleias atualmente viventes e chamados de misticetos (Mysticeti), e cetáceos que apresentavam dentes para apreensão de alimento que originaram os golfinhos atualmente viventes e chamados de odontocetos (Odontoceti).

Em função do fechamento de conexões, processo conhecido como "vicariância" ou formação de barreiras pelos cientistas, entre bacias oceânicas como o que ocorreu entre os oceanos Atlântico e Pacífico com a América Central conectando as Américas do Norte e do Sul, estoques de espécies de baleias e golfinhos se isolaram, passaram a habitar ambientes com características distintas entre si, com presas muitas vezes diferenciadas em cada local, e houve assim uma redução em alguns movimentos de dispersão de espécies. Muitas espécies desapareceram, outras tantas surgiram, se dispersaram e, aos poucos, elas foram ocupando espaços nas bacias de águas salgada e doce.

Hoje são 89 espécies reconhecidas, número que o leitor perceberá que varia consideravelmente quando são comparadas diferentes fontes literárias. Essa variação se explica pelas datas de publicação das obras e o conhecimento existente naquelas ocasiões, assim como nas divergências entre cientistas sobre a descrição e redescrição de novas espécies a partir das que se conheciam.

Nos dias atuais, os representantes dos cetáceos apresentam uma variação de formas impressionante ao se considerar um único táxon de organismos viventes. Ao se comparar o maior e o menor cetáceo vivente, temos a baleia-azul (Fig. 1) com 32 m de comprimento e alcançando cerca de 190 ton quando adulta em um extremo, e a o golfinho-de-Hector, pequeno golfinho encontrado na Nova Zelândia, com 1,4 m e 60 kg quando adultos.

**FIGURA 1.** **Esqueleto de uma baleia-azul (*Balaenoptera musculus*) comparado ao autor deste capítulo na foto.** *Foto: Acervo LABCMA.*

É uma variação de 19 vezes em tamanho e 3.160 vezes em peso. A baleia-azul ainda é considerada como o maior organismo que viveu no Planeta Terra em toda a sua história. Ao longo da evolução, o fato dos cetáceos não mais dependerem de sustentar estruturas esqueléticas em substrato firme em função da força da gravidade fez com que eles atingissem proporções corpóreas colossais. Por outro lado, quando por algum motivo quaisquer das espécies de cetáceos encalham em praias, possivelmente o destino é a morte, já que todo o peso do corpo recai nos pulmões e caixa torácica, complicando a respiração e o funcionamento de funções vitais à sobrevivência.

No parágrafo anterior estávamos comparando um misticeto com um odontoceto. O que mais eles têm de diferenças entre si? Os misticetos são representados por 14 espécies subdivididas em quatro famílias, número que irá variar de acordo com a obra consultada conforme exposto anteriormente. O tamanho na idade adulta vai variar entre 6 m, considerando a baleia-minke-Antártica, até os 32 m da baleia-azul. As fêmeas são geralmente maiores do que os machos e em sua totalidade.

Os misticetos são filtradores de pequenos organismos entre os componentes do zooplâncton e crustáceos e pequenos peixes. Para filtrar esses organismos, os misticetos utilizam uma estrutura queratinizada que é presa em sua maxila e forma uma espécie de cortina em ambos os lados da boca. A queratina é o mesmo componente de nossas unhas e, no caso dos misticetos, ela também tem crescimento contínuo e é desgastada pelo atrito com o alimento. Essa estrutura é chamada de barbatana ("*baleen*" em língua inglesa) ou cerda bucal (Figura 2). De maneira completamente equivocada, canais de mídia e pesquisadores não especialistas em morfologia chamam as nadadeiras dos peixes e cetáceos de barbatanas.

O número, o padrão de coloração e o tamanho das placas de barbatanas variam entre as diferentes espécies de misticetos, servindo como diagnóstico para identificar espécies. Cada placa de barbatana tem suas extremidades franjadas para apreender o alimento no interior da boca. Ao colocar uma grande quantidade de água ou lodo com alimento na boca, os misticetos pressionam o palato ou céu da boca com a língua, fazendo com que a água ou lodo sejam eliminados para o meio externo pelas frestas existentes entre as placas de barbatanas e pela comissura bucal. O alimento fica aprisionado nas franjas das cerdas bucais e, com a língua, os misticetos carregam o mesmo para a faringe.

Outra característica que diferencia os misticetos dos odontocetos reside no fato dos primeiros apresentarem dois orifícios respiratórios, e os demais apenas um. Ambos apresentam dois canais nasais que partem dos pulmões para o topo da cabeça. Entretanto, em função de um processo de compactação dos ossos do crânio nos odontocetos para acomodação de uma estrutura chamada de melão envolvida com o processo de ecolocalização, há apenas uma comunicação respiratória ao meio externo no topo da cabeça.

Os odontocetos são representados por cerca de 75 espécies, subdivididas em cerca de 10 famílias com larga variação de tamanhos entre elas na idade adulta. Os menores odontocetos apresentam cerca de 1,4 m e 60 kg quando adultos, enquanto que os maiores, os machos de cachalotes, apresentam até 18,5 m de comprimento total e pesam até 60 ton. Salvo algumas exceções, os machos são geralmente maiores do que as fêmeas.

Os odontocetos apresentam dentes (Fig. 2) para apreensão de alimento. Esses dentes variam em número, tamanho e em forma, aspectos que também servem para que os investigadores consigam distinguir diferentes espécies. Apenas uma dentição se faz presente ao longo do ciclo de vida dos odontocetos. Este fato possibilita aos investigadores estimar a idade desses cetáceos por meio de confecção de lâminas histológicas, ao se fazer cortes longitudinais nos dentes coletados de animais mortos e de vivos capturados para este fim. Há uma deposição anual de camadas de dentina no interior dos dentes dos odontocetos, indicando assim suas idades. Os odontocetos se alimentam principalmente

de peixes e lulas, sendo observadas dietas específicas por parte de algumas populações de algumas espécies, como algumas orcas que se alimentam de animais de sangue quente como pinguins, pinípedes, golfinhos e baleias. Os dentes dos odontocetos têm crescimento contínuo e são gastos com o atrito com o alimento, tonando-se rasos nos exemplares idosos, quando a taxa de crescimento deve ser reduzida.

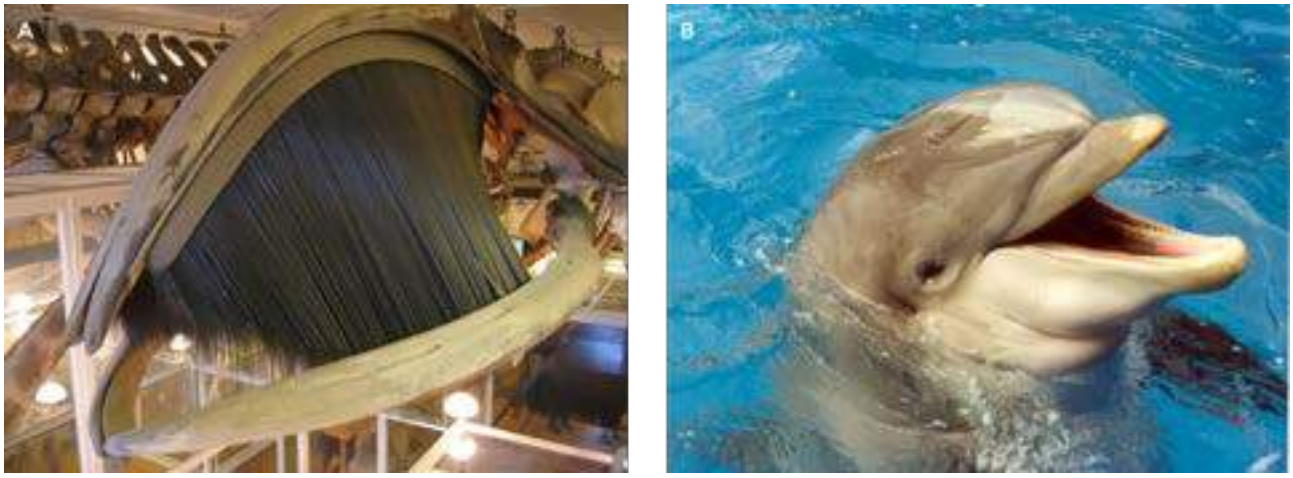



**FIGURA 2. Comparação entre as principais estruturas bucais utilizadas para captura de presas pelos misticetos (baleia-franca-do-Atlântico-norte, *Eubalaena glacialis*) (A) e pelos odontocetos (golfinho-nariz-de-garrafa, *Tursiops truncatus*) (B).** *Fotos: Marcos Santos.*

Uma notável diferença entre odontocetos e misticetos reside no fato de que, apenas nos primeiros, o processo de ecolocalização é conhecido. Esse processo está relacionado com a produção e emissão de ondas sonoras ao meio para detecção de presas, predadores, obstáculos e congêneres. Seria o mesmo processo envolvido em sonares de embarcações e emitido pelos morcegos.

Anatomicamente, os odontocetos têm uma grande diferença quando comparados aos misticetos, que é representada pela presença do melão, uma estrutura composta por gordura que se encontra à frente do orifício respiratório e sobre o crânio dos mesmos. A gordura é um excelente meio condutor de ondas sonoras, e facilita a propagação do som produzido pela ação muscular do canal nasal que pressiona o ar ali contido, gerando som. Seria o mesmo processo de pressionar a saída do ar de bexigas utilizadas em festas de crianças e emitir som gerado pelo atrito do ar com as paredes do canal de saída das bexigas. Esse som emitido segue ao ambiente externo, bate em obstáculos e retorna aos odontocetos que não possuem pavilhão auditivo para captar o som. O pavilhão auditivo causaria atrito com a água e atrapalharia em seu deslocamento. O som segue por um canal de gordura encontrado na mandíbula dos odontocetos e que está conectado ao ouvido interno. Do ouvido interno os sinais sonoros são processados no cérebro. Aqui os cientistas não sabem ao certo se há uma decodificação de ondas sonoras em imagens, ou em sinais que os odontocetos aprendem a decifrar com o tempo e suas experiências utilizando seu sonar. Cabe aqui esclarecer que há dois tipos principais de emissões sonoras: os assobios, utilizados para comunicação entre indivíduos, e os cliques de ecolocalização, relacionados com a localização no espaço físico.

É possível que esse avançado sistema de localização tenha tornado os odontocetos os mamíferos que mais sucesso obtiveram na reconquista do meio aquático. Neste meio, utilizar racionalmente e eficientemente o som torna-se a chave para o sucesso. A luz tem penetração restrita no meio aquático, limitando o uso da visão. O olfato dos cetáceos é considerado inexistente, com potencialidade para detecção de características do meio com o uso de papilas gustativas. Assim sendo, o uso do som torna a audição o sentido mais importante para os cetáceos no ambiente aquático. Na água, o som se propaga cinco vezes mais rapidamente do que no ar, sendo um instrumento primordial para comunicação e

localização. O fato dos misticetos não apresentarem a estrutura do melão não quer dizer que eles não se comunicam. Sabe-se que baleias-jubarte emitem sons estruturados chamados de canções em áreas de reprodução e cria de filhotes (ver a seguir). Se elas não apresentam estruturas como o melão, como esses sons são emitidos? Os estudos realizados até o presente momento indicam que há vibração da laringe dos misticetos, que deve ter papel importante na emissão de sons para comunicação e, possivelmente, localização. Nota-se que, em pleno século XXI, ainda há muito a se conhecer envolvendo esses leviatãs do mundo aquático. E quem são esses leviatãs?

Dentre os misticetos, todos conhecem a baleia-azul pelas ilustrações em livros didáticos, paradidáticos e em mídias eletrônicas sobre seu notável porte. Porém, há outras 13 espécies de misticetos que compõem as quatro famílias com formas vivas. A família Balaenopteridae caracteriza-se por agregar as baleias que apresentam sulcos ventrais. Por esse motivo, os representantes dessa família também são chamados de "rorquais". Rorqual é uma palavra norueguesa que significa "sulco ventral". Esses sulcos se expandem durante o processo de captura de presas, acumulando água e alimento por um determinado tempo em que haverá a filtração desta água durante a alimentação.

A família Balaenopteridae é a que se constitui pelo maior número de representantes. São oito espécies no total considerando a baleia-azul, a baleia-fin, a baleia-sei, a baleia-de-Bryde, a baleia-de-Omura, a baleia-jubarte, e duas espécies de baleias-minke. Com exceção da baleia-de-Bryde, as demais espécies realizam movimentos migratórios entre as regiões polares e subpolares, onde se concentram em uma parte do ano (verão) para se alimentar, e as regiões tropicais e subtropicais, onde se concentram em outra parte do ano (inverno) para reproduzirem e gerar filhotes. Um filhote é gerado por gestação para todos os cetáceos. Os períodos de gestação variam de espécie para espécie entre sete e 17 meses.

O processo migratório envolvendo os misticetos está acoplado à sua história evolutiva, e ao fato de que há uma grande concentração de itens alimentares nas águas frias na estação do verão de cada hemisfério. Nas águas mornas há uma tendência em se encontrar um menor número de predadores para os filhotes. Cabe aqui enfatizar que nem todos os indivíduos dessas espécies executam os movimentos migratórios anualmente, havendo indivíduos que acompanham as linhas limítrofes da calota polar que se congela nas estações de outono e inverno e, posteriormente se descongela nas estações da primavera e do verão.

Uma das características morfológicas que possibilita aos misticetos migrar entre polos e trópicos é a presença de uma camada de gordura revestindo o corpo internamente e chamada de "*blubber*", em língua inglesa. Os odontocetos também possuem o "*blubber*", porém nos misticetos a espessura sempre é maior do que nos odontocetos. O "*blubber*" tem três funções vitais para os cetáceos: 1) auxilia na flutuabilidade; 2) é uma reserva de energia para períodos críticos sem alimento; e 3) atua como um isolante térmico da temperatura externa, sempre menor do que a temperatura corpórea dos cetáceos.A baleia-de-Bryde é um rorqual que chega a cerca de 15 m de comprimento quando adulta, e não se encontram registros em águas polares e subpolares. Há suspeitas de que elas realizem movimentos longitudinais nos trópicos e subtrópicos. Na costa brasileira é comum encontrá-la no litoral paulista e fluminense, geralmente associada a áreas de ressurgência.

Dos componentes da família Balaenopteridae, a baleia-jubarte (Fig. 3) é a mais conhecida pelos brasileiros. A região do banco dos Abrolhos, no sul da Bahia, é uma das áreas de concentração anual dessas baleias que se encontram nos meses de inverno e primavera para gerar filhotes, e para ocorrer os acasalamentos entre machos e fêmeas. Como o ciclo gestacional dura por volta de 12 meses, haverá tempo para que as fêmeas que tenham sido fertilizadas em um dado ano, retornem para as áreas de alimentação em seguida e, no ano seguinte, às baixas latitudes para gerar sua cria. Uma curiosidade interessante sobre a baleia-jubarte está em sua morfologia: sua nadadeira peitoral

alcança até 1/3 do seu comprimento total de 15 m, ou seja, chegam a 5 m de comprimento. Por isso seu nome científico é *Megaptera novaengliae*, que significa "asas imensas da Nova Inglaterra" (do latim, *mega* = imenso + *pterus* = asa).

Outras duas famílias de misticetos são monoespecíficas, ou seja, constituídas cada uma delas por uma espécie só. Elas não têm representantes registrados na costa brasileira. A família Eschrichtiidae é representada pela baleia-cinzenta, que só ocorre no Oceano Pacífico, e a família Neobalaenidae é representada pela baleia-franca-pigméia, que ocorre apenas no hemisfério sul. Os membros desta família chegam a medir 6 m de comprimento quando adultos e ainda são pouco conhecidas. As baleias-cinzentas chegam a atingir 15 m de comprimento quando adultas, e são os únicos misticetos a se alimentar de crustáceos encontrados no substrato lodoso. Ambas espécies não apresentam sulcos ventrais e sim ranhuras na porção ventral e anterior do corpo que não se expandem como os sulcos dos rorquais.

**FIGURA 3. Baleia-jubarte (*Megaptera novaeangliae*) saltando à frente de uma embarcação e mostrando suas imensas nadadeiras peitorais.** *Foto: Marcos Santos*.

Outra espécie de baleia muito conhecida dos brasileiros é a baleia-franca (Fig. 4). Esta baleia pertence à família Balaenidae, que por sua vez é composta por quatro espécies: a baleia-franca-austral, único representante do hemisfério sul, a baleia-franca-do-Atlântico-norte, a baleia-franca-do-Pacífico-norte e a baleia-da-Groenlândia. Essas baleias são lisas no ventre, ou seja, não apresentam sulcos ventrais. A base da dieta dessas baleias se concentra no zooplâncton, que é filtrado pelas cerdas bucais ao se deslizarem na superfície ou na coluna d'água.

As três espécies de baleias-franca apresentam calosidades na região da cabeça, que são utilizadas como diagnóstico para identificar indivíduos. Essas calosidades são protuberâncias de pele como se fossem nossas verrugas. Outra estrutura da morfologia dos representantes desta família e que servem de diagnóstico é a nadadeira peitoral em forma de trapézio. Na idade adulta, as baleias-franca chegam a 15 m, enquanto as baleias-da-Groenlândia chegam a 20 m de comprimento. Nos meses de inverno e primavera é comum encontrar uma grande concentração de baleias-francas-austrais (*Eubalaena australis*) no litoral sul de Santa Catarina. Ali se concentra uma das áreas de reprodução e cria desta espécie no hemisfério sul. Nos mesmos meses, há registros da mesma espécie até o litoral sul da Bahia, o que pode representar uma expansão da área de reprodução.

Uma curiosidade importante, e que precisa ser esclarecida aos leigos, é que esta espécie tem preferência de uso de águas rasas na costa da América do Sul. Quando visitam a costa brasileira,

tendem a passar dias concentradas próximas à zona de arrebentação de ondas, quando em muitas ocasiões chegam a apoiar a nadadeira caudal no substrato. Leigos se desesperam e fazem grande alarde para "salvar" as baleias-franca de um encalhe eminente. Sua história de vida mostra que esta é uma das espécies com menor incidência em registros de encalhes na costa brasileira, justamente porque se adaptaram muitíssimo bem a repousar nas águas rasas ao longo de sua evolução. O que mais preocupa em relação à sua segurança não é a possível eminência do encalhe, mas sim as atitudes geradas pela ação de moradores locais no intuito de espantar a baleia de onde está tranquilamente descansando, podendo gerar colisão da embarcação com a baleia com injúrias a humanos e ao cetáceo. Portanto, o melhor a se fazer é contemplar à distância, evitando-se aproximação indevida e suicida.

**FIGURA 4. A) Baleia-franca-austral (*Eubalaena australis*) evidenciando as calosidades em sua cabeça à esquerda. B) A nadadeira peitoral em forma de trapézio à direita no sul de Santa Catarina.** *Fotos: Marcos Santos.*

Apresentar os odontocetos é uma tarefa mais difícil. São dez famílias descritas recentemente, sendo que uma, a família Lipotidae, foi considerada extinta em 2007. Esta família era monoespecífica e era representada pelo Baiji, *Lipotes vexillifer*, pequeno golfinho encontrado em uma bacia de água doce na China. A utilização desordenada e irracional daquela bacia aquífera pelos humanos gerou a extinção desta espécie. Ao final deste capítulo, o leitor entenderá como os humanos estão levando gradativamente uma grande parte dos cetáceos à extinção.

Das famílias remanescentes, cabe aqui ilustrar apenas algumas delas e as espécies mais importantes ao conhecimento pelos brasileiros. Os cachalotes (*Physeter macrocephalus*), famosos pela obra de Herman Melville conhecida como "Moby Dick", são os representantes únicos da família Physeteridae. Nessa espécie é possível notar o que os cientistas chamam de dimorfismo sexual, ou seja, distinção do sexo entre adultos pelo porte. Os machos chegam a 18,5 m de comprimento quando adultos, enquanto as fêmeas não passam dos 13 m.

Os cachalotes são cosmopolitas, ocorrendo em todas as bacias oceânicas e são geralmente encontrados em águas pelágicas. Alimentam-se principalmente de cefalópodes, com preferência pelas lulas. Os machos são conhecidos por predar lulas de 12 a 14 m de comprimento do gênero *Architeuthis*, cunhadas como "lulas-gigantes". Muito se comenta em literatura sobre a potencialidade de suas emissões sonoras desnortearem suas presas, tornando-as facilmente capturáveis. Apesar dos cachalotes terem se tornado famosos em função da obra histórica "Moby Dick", é importante relatar que a estória real que serviu de base ao livro de Herman Melville foi intitulada "No Coração do Mar" de Nathaniel Philbrick; uma recomendação de agradável leitura!

Dos demais odontocetos, costuma chamar a atenção o narval, cetáceo que atinge até 4 m de comprimento quando adulto sem contar um dente que parte da região frontal do crânio para o meio

externo. Este dente chega a cerca de 2,7 m de comprimento e é mais comum em machos. Há raros registros de fêmeas que apresentam este dente, e há casos de registros de machos com dois dentes exteriorizados. Por essa morfologia estranha aos humanos, os narvais ficaram conhecidos como os unicórnios-do-mar. Eles ocorrem apenas no hemisfério norte em águas polares e subpolares. Lá eles compartilham espaço com as belugas, odontocetos de coloração esbranquiçada quando adultos, e que chegam até 5 m de comprimento. As belugas são conhecidas como os "canários do mar", em função de seu particular repertório sonoro que se assemelha a cantos de aves.

Outros odontocetos que pouco conhecemos são chamados de baleias bicudas. São 21 espécies conhecidas até o presente momento que têm preferência por utilizar águas pelágicas. O rostro dessas baleias é estreito e a mandíbula costuma ser mais extensa do que a maxila. Assim como os cachalotes, são excelentes mergulhadores, podendo permanecer até 120 minutos sob a superfície da água sem respirar. O número, a forma e a posição dos dentes na boca servem de diagnóstico entre as espécies, sendo que a maioria delas apresenta dentes apenas na mandíbula e reduzidos a um ou dois pares. O tamanho dos adultos varia entre 3,5 m até 10 m. As baleias bicudas se alimentam principalmente de lulas que são sugadas quando ingeridas. Essas espécies ainda representam um mistério ao conhecimento dos cetáceos em função da dificuldade de acesso para estudo da maior parte das espécies. São os melhores mergulhadores em profundidade no planeta, alcançando a marca de quase 3000 metros.

A família que atualmente apresenta o maior número de representantes é a Delphinidae. São cerca de 35 espécies subdivididas em 17 gêneros. Há grande variação no padrão de coloração e porte das espécies que compõem esta família que variam entre 1,4 m até cerca de 10 m de comprimento quando adultos. A família é representada pelos golfinhos em geral incluindo as orcas (*Orcinus orca*) (Fig. 5), tecnicamente chamada de golfinho por ser um odontoceto. As orcas historicamente receberam a infeliz reputação de "baleias-assassinas" por predar aves e mamíferos em algumas regiões do globo terrestre. O termo é pejorativo e não deve ser utilizado em língua portuguesa. Resta-nos a humilde alternativa de chamá-las de orcas, o que significa "tonel ou barril", uma referência à forma de seu corpo.

**FIGURA 5.** **Exemplar de orca (*Orcinus orca*) avistado ao largo de Ilhabela, São Paulo, em dezembro de 2012.** *Foto: Marcos Santos.*

Dentre os delfinídeos precisamos enfatizar o boto-cinza (*Sotalia guianensis*) (Fig. 6), espécie de cetáceo mais comum na costa brasileira. Ocorrendo do Amapá até Santa Catarina, o boto-cinza é endêmico das Américas do Sul e Central, onde ocorre até Honduras. Chega a cerca de 2 m de comprimento quando adulto e é encontrado principalmente em baías e estuários. Tem comportamento arisco quando da aproximação de pessoas e de embarcações. Há regiões onde é facilmente observado, como a baía norte e a baía da Babitonga em Santa Catarina, o estuário de Paranaguá no norte do Paraná, o estuário de Cananéia no sul do Estado de São Paulo, as baías de Paraty, Ilha Grande, Sepetiba e Guanabara no Rio de Janeiro, e a praia do Pipa no Rio Grande do Norte.

**FIGURA 6. Par formado por fêmea e filhote de boto-cinza (*Sotalia guianensis*) no estuário de Cananéia, São Paulo.** *Foto: Marcos Santos.*

Há uma espécie muitíssimo parecida com o boto-cinza, porém de porte menor e apenas encontrada na bacia Amazônica: o boto-tucuxi (*Sotalia fluviatilis*). O tucuxi chega a 1,7 m de comprimento quando adulto e também é arisco quanto à aproximação de humanos. Até 2007, o boto-cinza e o tucuxi eram considerados como pertencentes a uma mesma espécie, porém estudos baseados em genética molecular separaram as mesmas em duas espécies distintas.

Nesta mesma família de odontocetos encontra-se o golfinho-nariz-de-garrafa (*Tursiops truncatus*), famoso pelo seriado "Flipper", e pela sua demografia em parques aquáticos pelo mundo. Espécie cosmopolita, evita apenas águas polares e subpolares. No Brasil há registros por toda a costa, com concentração em águas costeiras de Santa Catarina ao Rio Grande do Sul. Chegam a 3,9 m quando adultos e há duas localizações na costa brasileira onde esses golfinhos realizam uma pesca cooperativa com pescadores: Laguna, em Santa Catarina, e Imbé/Tramandaí, no Rio Grande do Sul. Nessa interação, os golfinhos arrebanham tainhas para as águas rasas onde pescadores aguardam com suas tarrafas, petrecho de pesca que é lançado à água e captura peixes em função de apresentar pequenas estruturas de chumbo para fazer com que a rede facilmente afunde capturando os peixes. Neste momento, os golfinhos retiram a sua parte do trabalho ou da fuga das tainhas à sombra da rede, ou das próprias redes que estão sendo puxadas pelos pescadores arrastadas em contato com o substrato.

No sul do Brasil, as comunidades litorâneas chamam o golfinho-nariz-de-garrafa de boto, já que o boto-cinza ali não ocorre. De Santa Catarina para o norte do Brasil, o golfinho-nariz-de-garrafa abandona um pouco a região costeira e deixa o espaço ocupado pelo boto-cinza, o que fez com que a comunidade pesqueira nessas regiões chamasse o boto-cinza de boto. Essa é uma tendência em um país com dimensões continentais como o Brasil. Os termos populares se adaptam às condições locais. Cabe a nós, cientistas e leitores, respeitar as regras locais.

Por fim, cabe destacar mais duas famílias de odontocetos que têm muita importância em águas brasileiras. A toninha (*Pontoporia blainvillei*) (Fig. 7), chamada de franciscana no Uruguai e Argentina, é um pequeno odontoceto que chega a 1,8 m de comprimento quando adulta. Ela ocorre do Espírito Santo até o norte da Argentina, sendo uma espécie endêmica da América do Sul. A toninha tem coloração parda e caracteriza-se por apresentar um longo rostro e olhos de tamanho reduzido. Ela é a única representante da família Pontoporiidae. Muitíssimo arisca com relação à aproximação de humanos, a toninha tem preferência por ocorrer em águas costeiras, rasas e turvas. Há duas regiões estuarinas onde podem ser encontradas ao longo de todo o ano no Brasil: a Baía de Babitonga em Santa Catarina e a Baía das Laranjeiras no norte do Paraná.

**FIGURA 7. Toninha (*Pontoporia blainvillei*) fotografada na Baía das Laranjeiras, norte do Paraná no ano de 2008, quando uma população foi descrita pela primeira vez para as águas estuarinas locais.** *Foto: Marcos Santos.*

Outra espécie de ocorrência na bacia amazônica é o boto-vermelho ou boto-cor-de-rosa (*Inia geoffrensis*). Famoso pela lenda do boto que se transforma em um belo rapaz que seduz as moças ribeirinhas gerando os "filhos do boto", o boto-vermelho chega a cerca de 2,5 m de comprimento e apresenta coloração que varia entre o róseo e o acinzentado. É uma das exceções nos cetáceos quando o assunto é a forma dos dentes. O boto-vermelho apresenta heterodontia, ou seja, dentes com formatos diferentes. Assim como a toninha, possuem olhos de tamanho reduzido e melão pronunciado, indicando uma evidência morfológica de dependerem mais do som do que da luz em seu meio. Diferentemente das toninhas, possuem vértebras cervicais fundidas e nadadeira dorsal de pequena altura, o que facilita sua locomoção por entre troncos e galhos de árvores encontradas embaixo da superfície da água na estação das cheias.

Após essa descrição superficial das principais espécies de cetáceos, o leitor poderia questionar: onde podemos encontrar misticetos e odontocetos? A pequena diversidade e os maiores estoques dos misticetos estão concentrados no hemisfério sul em função da formação do Oceano Austral no tempo, e pelo simples fato de que há mais áreas navegáveis no hemisfério sul do que no norte, onde os continentes ocupam mais espaço.

Todos os misticetos estão adaptados a viver em todas as bacias oceânicas. Uma parte considerável deles realiza movimentos migratórios e irão ocupar faixas distintas dos oceanos de acordo com a estação do ano no hemisfério em que se encontram. Já os odontocetos, como mencionado anteriormente, irão ocupar bacias oceânicas seja em águas estuarinas, costeiras ou pelágicas, além de três bacias de água doce. A diversidade dos estoques se concentra em áreas de ressurgência situadas nos trópicos e subtrópicos.

## 3. Sirênios

Como ocorreu com os cetáceos, os sirênios surgiram a partir de exemplares quadrúpedes que passaram a utilizar o Mar de Thethys há cerca de 50 milhões de anos. Com origem sugerida para onde atualmente se encontra a Jamaica (gênero do fóssil: *Prorastomus*) e o Egito (gênero do fóssil: *Protosiren*), os sirênios passaram a buscar alimento em rios e estuários férteis. O ponto crucial que os diferenciou dos cetáceos ao longo do período evolutivo foi que ancestrais e descendentes foram primariamente herbívoros. Este hábito fez com que a maioria das espécies ancestrais e todas as quatro espécies viventes tivessem suas distribuições restritas a águas rasas.

Estamos considerando aqui mamíferos que necessitam de obter oxigênio dissolvido no ar por meio dos pulmões, como também é o caso dos cetáceos. Porém, estamos considerando aqui mamíferos de deslocamento mais lento, corpos robustos, narinas encontradas na ponta do focinho (Fig. 8), e necessidade de pastar em profundidades baixas. Isso faz com que a biogeografia das quatro espécies atualmente viventes seja definida pelos seus hábitos alimentares, se restringindo a águas costeiras, estuarinas e bacias de água doce nos trópicos e subtrópicos. Como os cetáceos, os sirênios passam toda ao seu ciclo de vida em ambiente aquático.

**FIGURA 8. Peixe-boi-marinho (*Thichechus manatus*) evidenciando o momento de trocas gasosas com o ambiente aéreo.** *Foto: Marcos Santos.*

As quatro espécies viventes se dividem em duas famílias: Trichechidae (com três espécies) e Dugongidae (com uma espécie). Os adultos podem chegar entre 2,8 m e 4,5 m de comprimento. Nenhuma delas tem nadadeira dorsal e uma das formas de distinguir as famílias se dá pela morfologia da nadadeira caudal: nos Trichechidae ela é unilobada e nos Dugongidae ela é bilobada. A presença ou ausência de unhas também difere entre as espécies como será mostrado adiante.

A família Dugongidae é representada pelo Dugongo (*Dugong dugon*). Esta espécie ocorre apenas nos oceanos Índico e Pacífico, nas regiões costeiras da África, Ásia e Austrália. Ela chega a 3,3 m de comprimento quando adulta e não apresenta unhas nas nadadeiras peitorais. Um representante desta família foi extinto pelos humanos em apenas 27 anos após ter sido descrita. A vaca-marinha-de-Steller (*Hydrodamalis gigas*) foi descrita em 1741 por Vitus Bering durante uma expedição russa ao Alasca, na época chamada de "terra incognita".

No dia 10 de agosto de 1741, Bering afirma ter se deparado com um animal desconhecido ("unusual animal") que chegava a 8 m de comprimento e era lento em seu deslocamento. Desbravadores interessados em explorar a nova fonte de proteína animal descobriram uma grande concentração de gordura representada pelo "*blubber*", também encontrado nos cetáceos. A caça de um mamífero dócil foi intensa e perdurou até 1768, quando a vaca-marinha-de-Steller foi considerada extinta.

A família Trichechidae tem representantes encontrados no Oceano Atlântico e na bacia amazônica. O peixe-boi-africano (*Trichechus senegalensis*), conhecido em língua inglesa como "*West African manatee*", ocorre na costa oeste da África em água marinha, salobra e doce, quando neste último caso adentram rios continentais. Chegam a 3,5 m de comprimento quando adultos e podem apresentar até quatro unhas nas peitorais. Também encontrado em águas marinhas costeiras e em águas salobras, o peixe-boi-marinho (*Trichechus manatus*) ou "*West Indian manatee*" ocorre na costa leste das três Américas entre o nordeste do Brasil e o sudeste dos Estados Unidos, passando pela região do Caribe. Chegam a cerca de 4 m de comprimento quando adultos e apresentam de três a quatro unhas nas nadadeiras peitorais. Por fim, o peixe-boi-amazônico (*Thichechus inunguis*) representa a menor entre as quatro espécies viventes, chegando a 2,5 m de comprimento quando adultos. Ocorre em grande parte da bacia amazônica.

Algumas características morfológicas dos sirênios são muito interessantes. Por exemplo, como se tratam de pastadores, seus dentes são adaptados para este hábito alimentar. Eles apresentam de cinco a sete dentes funcionais por ramo mandibular e maxilar, e esses dentes apresentam crescimento contínuo, sendo gastos com o tempo. Apenas o dugongo tem um par de dentes incisivos que serve para cortar vegetais associados ao fundo, além de acídias e poliquetas.

Outra característica morfológica interessante se concentra no posicionamento das duas glândulas mamárias nas fêmeas, situadas abaixo da nadadeira peitoral. O período de gestação dura entre 12 e 14 meses e os sirênios podem gerar e criar gêmeos. Assim como os cetáceos, os sirênios são promíscuos, ocorrendo cópula da fêmea com muitos machos em uma estação reprodutiva.

## 4. Pinípedes

Como mencionado no início deste capítulo, os pinípedes pertencem à ordem Carnivora, subordem Caniformia. Têm origem evolutiva muito mais recente, quando comparados a cetáceos e sirênios, e não passam toda a vida em ambiente aquático. Seus ancestrais datam de cerca de 27 a 25 milhões de anos, descendentes de um grupo de organismos viventes semelhantes aos pinípedes modernos e chamados de Pinnipedimorpha. Supõe-se que o centro de origem e dispersão se deu nas proximidades do que hoje é o Oregon nos Estados Unidos, havendo algumas controvérsias sobre o tema.

Como ocorreu com os cetáceos, a formação de barreiras ("vicariância") e a dispersão ao longo de milhões de anos gerou a atual conjuntura de biogeografia envolvendo as espécies de pinípedes. Os

pinípedes tiveram sucesso na ocupação das altas latitudes, próximos às calotas polares em águas polares e subpolares. Há menos registros de colônias em regiões tropicais e subtropicais.

Ao longo da evolução, duas espécies tiveram suas distribuições limitadas a lagos separados do oceano na Europa e na Ásia pela movimentação das placas tectônicas: a foca-do-lago-Baikal (*Pusa sibirica*) e a foca-do-Mar-Cáspio (*Pusa caspica*).

O nome da infraordem é derivado do grego que significa "pés transformados em nadadeiras". Mantiveram os pelos no corpo até os dias atuais e, em função dos mesmos, muitas espécies devem passar um tempo em ambiente terrestre para ocorrer a troca de pelagem, bem como seu aquecimento em dias frios. A maioria das espécies se reproduz em ambiente terrestre e se alimenta em ambiente aquático. As principais presas são peixes e cefalópodes, podendo passar por bivalves, crustáceos, pinguins e outros pinípedes. Os principais predadores são as orcas e os tubarões.

Apresentam uma menor diversidade biológica, quando comparados aos cetáceos, representados por 35 espécies viventes. A plasticidade em formas e tamanhos também é menor, quando comparada aos cetáceos. O macho de elefante-marinho chega a 4 m de comprimento total e a pesar 2,5 ton quando adulto, enquanto o menor pinípede, a foca-do-lago-Baikal, chega a medir 1,5 m e a pesar 70 kg: 2,5 vezes menor e 35 vezes mais leve.

São conhecidas apenas três famílias de pinípedes: Odobenidae, representada por uma espécie, Phocidae, representada por 19 espécies, e Otariidae, representada por 15 espécies. Como comentado aos cetáceos, esses números devem variar de acordo com a referência bibliográfica consultada. As diferenças diagnósticas para estas famílias se concentram em aspectos relacionados à pelagem, fórmula dentária, presença ou ausência de pavilhão auditivo, e apoio ou não aos membros anteriores quando se deslocam em meio terrestre.

A família Odobenidae é representada pelas morsas, aqueles pinípedes que apresentam dois dentes caninos exteriorizados. Sim, é o famoso personagem "Leôncio" do desenho do Pica-Pau. As morsas têm distribuição restrita ao hemisfério norte em uma extensa área circundando o Ártico. Machos são geralmente maiores que as fêmeas e chegam a 3,5 m e a pesar 1,5 ton. Os dentes exteriorizados servem para procura e captura de bivalves no substrato, seu principal item alimentar. Os dentes também são utilizados nas suas interações sociais, e como suporte para subir em panquecas de gelo. Os filhotes nascem sem os dentes exteriorizados que crescem e aparecem na fase juvenil. As morsas se apoiam em membros anteriores para se locomoverem no substrato terrestre e não apresentam pavilhão auditivo. Sua pelagem é reduzida e suas unhas são vestigiais.

A família Phocidae é representada pelas focas propriamente ditas. Chamamos de focas os pinípedes que rastejam sobre o substrato terrestre para se locomoverem (Fig. 9). São 19 espécies que apresentam pelagem curta e não apresentam pavilhão auditivo (Fig. 10). Têm distribuição concentrada nas áreas polares e subpolares. É a família que maior sucesso alcançou entre os pinípedes, não só em número de espécies, mas também em adensamentos populacionais. Ela representa 90% dos pinípedes viventes, sendo os 10% remanescentes divididos pelas famílias Odobenidae e Otariidae. A família é representada por 13 gêneros, sendo nove monoespecíficos. Aqui se destacam o elefante-marinho (*Mirounga leonina*) pelo seu porte e potencial de navegação e mergulho, e a foca-leopardo (*Hydrurga leptonyx*) por alimentar-se de animais de sangue quente. Nesta família que se encontram os extremos de tamanho e peso nos pinípedes mencionado anteriormente. A maior parte das espécies se encontra nos polos norte e sul, sendo que há representantes encontrados no Mediterrâneo (foca-monge-do-Mediterrâneo; *Monachus monachus*) e no Havaí (foca-monge-do-Havaí; *Monachus shauinslandi*).

**FIGURA 9.** **Uma das diferenças básicas entre um Otariidae (A) e um Phocidae (B). Nota-se a o apoio nos membros anteriores no exemplar de lobo-marinho-subantártico,** *Arctocephalus gazella*, **e o hábito rastejante em mesmo substrato do pelo elefante-marinho-do-sul,** *Mirounga leonina*. *Fotos: Marcos Santos*.

A família Otariidae é representada por lobos e leões-marinhos. Eram esses os artistas que povoavam circos fazendo malabarismos com bolas de plástico no passado, e que eram cunhados de maneira muitíssimo equivocada como focas. Ainda nos dias de hoje, quando a mídia comenta em malabarismos com bolas, acaba por utilizar o termo equivocado de foca. Leões-marinhos são distinguidos dos lobos pela pelagem adensada que os machos adultos apresentam na região do "pescoço" e que se assemelha a uma juba de leão. São 16 espécies divididas em sete gêneros, sendo o gênero *Arctocephalus* representado por oito espécies. Os otarídeos apoiam-se nos membros anteriores para se deslocar (Fig. 9), têm pelagem densa, pavilhão auditivo (Fig. 10) e unhas vestigiais. Representantes dessa família são encontrados em áreas polares, subpolares, temperadas, subtropicais e tropicais.

**FIGURA 10.** **Outra das diferenças básicas entre um Otariidae (A) e um Phocidae (B). Nota-se a presença do pavilhão auditivo no exemplar de lobo-marinho-subantártico,** *Arctocephalus gazella*, **e a ausência do mesmo na foca-de-Weddell,** *Leptonychotes weddellii*. *Fotos: Marcos Santos*.

Apenas duas das 35 espécies formam colônias de alimentação e descanso no sul do Brasil: o lobo-marinho-sul-americano (*Otaria flavescens*) e o lobo-marinho-de-dois-pelos (*Arctocephalus australis*). Para a região Sul e Sudeste do Brasil, com notificações esporádicas no Nordeste, há uma tendência em se reportar registros entre o outono e a primavera, quando indivíduos são trazidos em função do aporte de correntes e ventos fortes e mais constantes. Até 2020, foram registradas oito espécies no país: o lobo-marinho-sul-americano (*O. flavescens*), o lobo-marinho-de-dois-pelos (*A. australis*), o lobo-marinho-subantártico (*A. tropicalis*), o lobo-marinho-antártico (*A. gazella*), a foca-de-Weddell (*Leptonychotes weddellii*), a foca-leopardo (*Hydrurga leptonyx*), a foca-caranguejeira (*Lobodon carcinophaga*) e o elefante-marinho-do-sul (*Mirounga leonina*). Indivíduos de determinadas espécies que não ocorrem em águas brasileiras serão denominados como "vagantes" ou "exploradores" ("*stray*" em língua inglesa) de suas áreas de distribuição originais.

## 5. Ameaças e conservação

Em função de nosso irracional uso dos ambientes aquáticos, principalmente após a Revolução Industrial, cetáceos, sirênios e pinípedes encontram-se ameaçados em praticamente todas as bacias em que ocorrem. Historicamente, o homem moderno os explorou como fonte de alimento, óleo ao processar o "*blubber*", pelagem, dentre outros produtos. Com essa ação, reduzimos praticamente todos os estoques populacionais, levando algumas espécies à extinção (ex.: vaca-marinha-de-Steller) e outras à beira da extinção (ex.: baleia-franca-do-Atlântico-norte e vaquita). Não contentes com isso, povoamos os mares e rios com extensas dimensões de redes de pesca que podem cobrir o planeta por quatro vezes se unidas. Essas redes não só reduziram consideravelmente os estoques de pescado para o próprio consumo humano, mas também para consumo dos cetáceos e pinípedes. Em paralelo, acidentalmente, esses mamíferos acabaram se emaranhando nas redes e morrendo afogados. Há estimativas anuais de 600 mil "mamíferos marinhos" mortos em operações de pesca por ano no Planeta Terra (Fig. 11).

**FIGURA 11. Golfinho-pintado-do-Atlântico (*Stenella frontalis*) acidentalmente capturado em redes de pesca no sudeste do Brasil.** *Foto: Marcos Santos.*

Ainda não contentes, reduzimos o habitat das espécies encontradas em rios, ocupando suas áreas com residências, hidrelétricas, reservatórios, explotações de metais, dentre outras ações. Em consequência lógica, nós poluímos a residência desses mamíferos. Ainda não contentes, em nossa história tão curta e insignificante no Planeta Terra, nós decidimos que os oceanos e os rios devem ser o depósito dos nossos esgotos que não suportamos ter em casa.

Além das nossas excretas, lançamos nesses ambientes aquáticos todos os produtos tóxicos à nossa saúde que queríamos longe de nós: metais pesados e organoclorados. Claro que fomos descobrir apenas em anos recentes que essa contaminação toda volta a todos nós quando consumimos pescado, e que uma parte considerável desses compostos é cancerígena.

Resolvemos, em um dado momento de nossa história, que cruzar mares navegando é uma ótima forma de lazer e de se fazer comércio entre nações. Afetamos a saúde de oceanos e rios de outra forma: com a poluição sonora! Estamos gerando ruído suficiente para quebrar a comunicação entre cetáceos, pinípedes e sirênios, além de conseguirmos, em alguns casos, provocar trauma auditivo, levando-os à morte. Com números cada vez maiores de embarcações, começamos a atropelar esses mamíferos (Fig. 12), levando-os à morte ou incapacitando-os, tornando-os alvos fáceis a seus predadores. Recentemente, estamos descobrindo que nossos hábitos devem ter relação com um aumento não esperado da temperatura do planeta, com consequente desequilíbrio nas teias tróficas marinhas e de água doce.

**FIGURA 12. Filhote de toninha (*Pontoporia blainvillei*) após atropelamento por embarcação no litoral norte do Estado de São Paulo. Notar machucado gerado pela hélice no rostro, e marcas indicativas da presença do pelo comum em filhotes nas primeiras semanas de vida.** *Foto: Marcos Santos.*

Depois de estarmos cientes de tudo isso, continuamos a pensar em aumentar o "Produto Interno Bruto" das nações a todo custo, doa a quem doer, desapareçam as espécies que tenham que desaparecer. Contentemo-nos com uma fauna pobre, composta por pombos, pardais, bagres, e liquidemos toda a beleza que a evolução nos presenteou. Liquidemos a nós mesmos! Esse é o caminho que estamos traçando. Se quisermos mudar esse rumo, temos que começar já. Temos que investir em mudança de hábitos. Para a espécie humana, esse será o desafio do século XXI. Se não mudarmos nossos hábitos agora, estaremos sujeitos a viver em um mundo contaminado, repleto de pragas e doenças, com praticamente nenhuma qualidade de vida.

Cetáceos, pinípedes e sirênios são mamíferos carismáticos. Suas imagens podem ser utilizadas para convencimento (Fig. 13). Precisamos investir em proteção de grandes ecossistemas em que esses mamíferos se encontram. Campanhas envolvendo a defesa de baleias e golfinhos tendem a proteger, em consequência, estoques pesqueiros, por exemplo. Essa é uma das estratégias para mudar os hábitos de humanos.

Outra estratégia reside em investir em pesquisa científica adequada. Saber investir em uma área do conhecimento que ajude a avaliar as magnitudes e as extensões dos impactos antrópicos nos cetáceos, pinípedes e sirênios é prioritário. Em paralelo, conhecer com detalhes as informações de densidade, hábito alimentar, reprodução, dentre outros aspectos é necessário para entender as consequências das ações humanas. Só excesso de amor e carinho aos mamíferos comentados não é suficiente. Pelo contrário, muitas vezes atrapalha, pois muitas ações voltadas a protegê-los são dotadas apenas de um radicalismo desnecessário que só atrapalha o caminho árduo e de longo prazo a ser investido.

Ao compreender as ações das fontes de impactos sobre os mamíferos, as primeiras ações devem visar suas mitigações para possível interrupção no futuro. Como todo o processo envolve diferentes atores, a estratégia ideal no século XXI envolve uma ação de manejo participativo, ou seja, colocar à mesa todos os interessados: os explotadores e os atores interessados em conservação da natureza. É importante que se trabalhe em cima de bons argumentos. Apenas o apreço pela "fofulência" desses seres não serve! É importante entender seu papel na teia trófica, seu valor econômico no que tange a contemplação, seu papel na cadeia de detritos, as suas características ímpares conhecidas, e o fato deles representarem geralmente os melhores indicadores biológicos da qualidade do meio em que se encontram.

Os que visam a conservação de cetáceos, pinípedes e sirênios, devem ser inteligentes o suficiente para entender que esses organismos dependem de área de vida de grandes dimensões e que, caso seus esforços não contemplem a conservação de ecossistemas como um todo, suas iniciativas estarão fadadas ao fracasso. Portanto, mãos à obra! A leitura deste capítulo pode ter representado o primeiro de muitos passos.

**FIGURA 13.** **Nadadeira caudal de baleia-jubarte (*Megaptera novaeangliae*) na Península Antártica: uma simbologia na luta pela conservação dos oceanos.** *Foto: Marcos Santos.*

## Referências Bibliográficas

BERTA, A. 2012. Return to the Sea: The Life and Evolutionary Times of Marine Mammals. University of California Press.

BERTA, A.; SUMICH, J. L. & KOVACS, K. M. (EDS). 2006. Marine Mammals Evolutionary Biology. 2nd Edition. Academic Press.

ESTES, J. A.; DEMASTER, D. P.; DOAK, D. F.; WILLIAMS, T. M. & BROWNELL JR., R. L. (EDS). 2006. Whales, Whaling and Ocean Ecosystems. University of California Press.

GALES, N.; HINDELL, M. & KIRKWOOD, R. (Eds.). 2003. Marine Mammals: Fisheries, Tourism and Management Issues. CSIRO Publishing.

JEFFERSON, T. A.; WEBBER, M. A. & PITMAN, R. L. (EDS). 2008. Marine Mammals of the World. Academic Press.

NIKAIDO, M.; ROONEY, A. P. & OKADA, N. 1999. Phylogenetic relationships among cetartiodactyla based on insertions of short and long interspersed elements: Hippopotamuses are the closest extant relatives of whales. Proceedings of the National Academy of Sciences (USA); 96: 10261-10266.

PERRIN, W.F.; WÜRSIG B. & THEWISSEN J. G.M. (EDS). 2009. Encyclopedia of Marine Mammals. Academic Press.

PRICE, S. A.; BININDA-EMONDS, O. R. P. & GITTLEMAN J. L. 2005. A complete phylogeny of the whales, dolphins and even-toed hoofed mammals (Cetartiodactyla). Biological Review: 80: 445-473.

REYNOLDS III, J. E. & ROMMEL, S. A. (EDS). 1999. Biology of Marine Mammals. Smithsonian Institution Press.

RICHARDSON, W. J.; GREENE JR., C. R.; MALME, C. I. & THOMSON, D. H. 1998. Marine Mammals and Noise. Academic Press.

RIEDMANN, M. 1990 (ED.). The Pinnipeds. University of California Press.

WALLACE, D. R. 2007. Neptune's Ark: From Ichthyosaurs to Orcas. University of California Press.

ZIMMER, C. 1998. À Beira d'Água: Macroevolução e Transformação da Vida. Jorge Zahar (Ed.), Rio de Janeiro.

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 29*

# ECOLOGIA DO BENTOS MARINHO

*Thaïs Navajas Corbisier, Márcia Regina Denadai, Tito Monteiro da Cruz Lotufo & Alexander Turra*

REVISÃO: VICENTE GOMES

CITAÇÃO SUGERIDA: CORBISIER, Thaïs Navajas et al. Ecologia do bentos marinho. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 29: p. 649-680.

# Ecologia do Bentos Marinho

*Thaïs Navajas Corbisier, Márcia Regina Denadai, Tito Monteiro da Cruz Lotufo & Alexander Turra*

## 1. Introdução

O bentos marinho reúne todos os organismos - vírus, bactérias, algas, fungos, plantas, invertebrados e vertebrados - que vivem em associação com o fundo do mar, da região entremarés às fossas abissais do oceano. Devido à grande diversidade de habitats bentônicos existente no oceano, e visto que os organismos bentônicos colonizaram toda a área costeira-oceânica do globo terrestre (361,9 milhões km$^2$), a diversidade de organismos bentônicos é enorme, podendo alcançar cerca de 950 mil espécies. O bentos compreende cerca de 98% das espécies conhecidas pela ciência e viventes no oceano e nas regiões costeiras, sem considerar os micro-organismos.

Os ecossistemas bentônicos possuem grande importância para o ser humano. Muitos organismos, como caranguejos, camarões, ostras, mexilhões, lulas, polvos e peixes bentônicos são vastamente consumidos pela sociedade como alimento. Muitos destes organismos também representam o principal item alimentar da maioria das espécies de peixes, crustáceos e moluscos capturados pela pesca artesanal e comercial, sendo a base da economia e da subsistência de comunidades tradicionais ao longo do planeta. Os organismos bentônicos sedentários ou sésseis possuem uma estreita relação com o ambiente por não se deslocarem ou se deslocarem muito pouco ou vagarosamente, sendo, portanto, sensíveis às alterações ambientais e servindo como indicadores biológicos de impactos (como a poluição) ao meio ambiente. Além disso, são um grande atrativo nas atividades turísticas de mergulho e podem ser fontes de compostos químicos para uso medicinal ou na indústria de cosméticos.

A conservação do oceano, além de todos os benefícios diretos e indiretos que traz para os seres humanos, é de suma importância para a proteção dessa grande diversidade biológica. A proteção do fundo marinho e sua biodiversidade é essencial para a qualidade do oceano, trazendo benefícios também para o meio ambiente terrestre, uma vez que muitos desses organismos são responsáveis pelo sequestro e estocagem de gás carbônico que auxiliam na manutenção das características da atmosfera, no combate ao efeito estufa e na regulação climática.

Os ambientes bentônicos estão sujeitos a diversos gradientes de fatores ambientais, que irão determinar quais organismos os habitam, como profundidade, tipo de fundo, salinidade, temperatura, luz e exposição ao ar, estes últimos na região entremarés. Com relação à profundidade, os ambientes bentônicos podem ser divididos em: 1) litoral (ou entremarés) - faixa periodicamente descoberta pelas marés baixas e inundadas pelas marés altas, possui vida animal e vegetal abundante e diversa; 2) sublitoral - entre a linha da maré baixa e o fim da plataforma continental, com vida animal abundante, bancos de algas e gramas marinhas e pescaria intensa; 3) zona batial - faixa correspondente ao talude continental, com aumento substancial do gradiente de profundidade, possui atividade biológica intensa e abundância de alimento; 4) zona abissal - compreende fundos oceânicos com profundidades geralmente além de 4.000 m até o nível superior das fossas oceânicas, possui fauna escassa e organismos fotossintetizantes ausentes; e 5) zona hadal - engloba o fundo das fossas oceânicas, onde apenas organismos altamente especializados sobrevivem (Fig. 1).

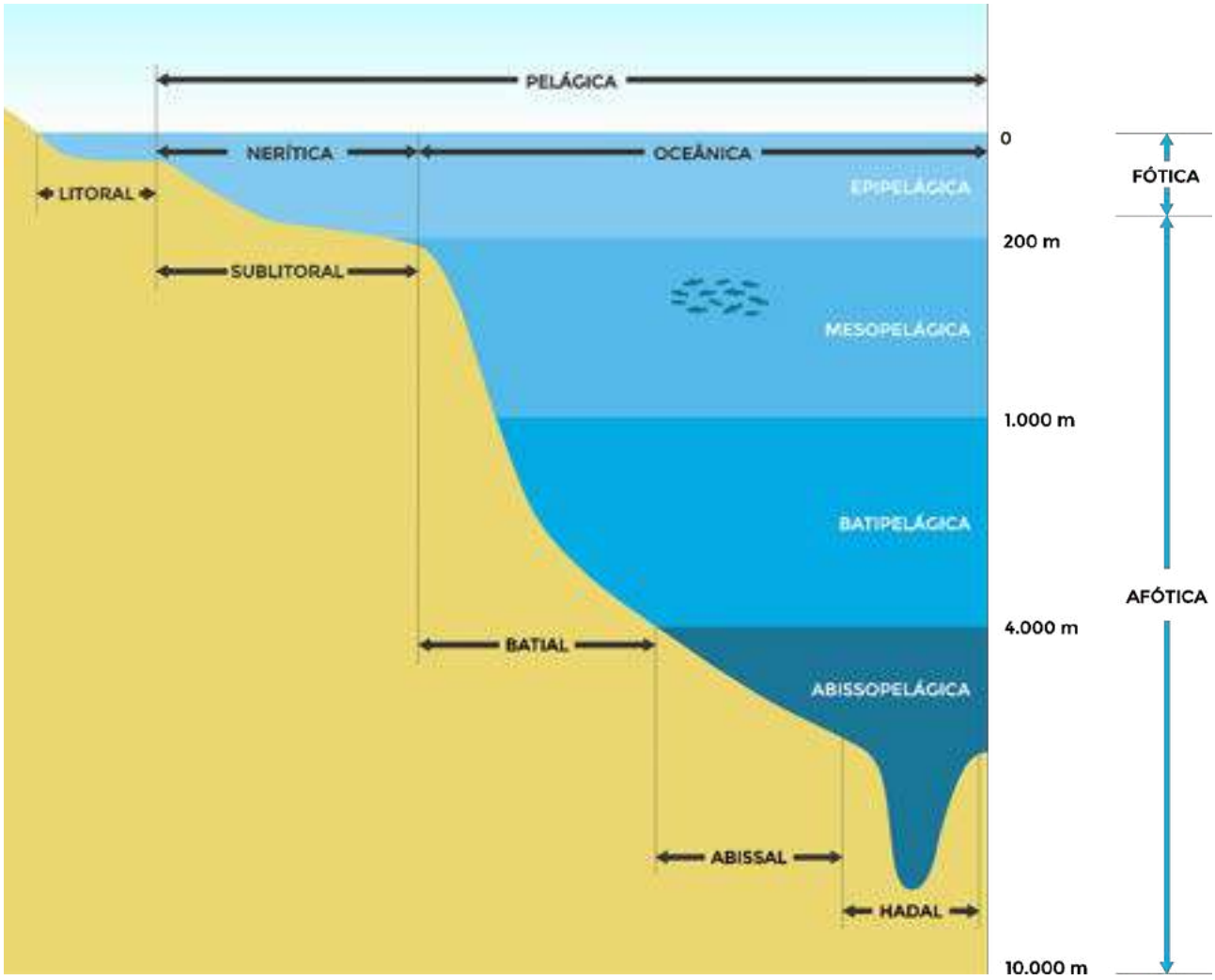



**FIGURA 1.** Principais divisões e compartimentos do ambiente marinho.

Com relação ao tipo de fundo, os ambientes bentônicos podem ser classificados em consolidados e inconsolidados. Os fundos consolidados compreendem os costões rochosos, os recifes de corais, além de estruturas construídas pelo homem, como píeres, plataformas de petróleo e espigões. Os fundos inconsolidados, por sua vez, congregam todos os fundos constituídos por areia, lama e cascalho, podendo ser entremarés ou sublitoral (todas as profundidades ou zonas descritas acima).

Dentro dessas classificações, os ambientes bentônicos estão sujeitos às variações de salinidade (em ambientes costeiros, em função da presença de corpos de água doce e intensidade das chuvas), temperatura (influenciada pela latitude, profundidade, mas também pelo fenômeno da ressurgência - subida de águas subsuperficiais frias para a superfície), luz (cuja intensidade diminui com a profundidade), nutrientes (associados muitas vezes a descarga fluvial e ressurgência), produtividade (dependente da disponibilidade de nutrientes e luz e da temperatura) e diversidade de organismos.

Os organismos bentônicos vivem em relação íntima com o substrato, podendo fixar-se a ele, perfurar, cavar ou caminhar sobre a sua superfície. Podem ser classificados, quanto à sua estrutura, funcionamento e forma de obtenção de energia, em fitobentos (fotossintetizantes) ou zoobentos (animais). O fitobentos engloba desde organismos unicelulares microscópicos, como algas diatomáceas e protozoários, a algas multicelulares macroscópicas (ex. *Sargassum* e *Ulva*), angiospermas (gramas marinhas como *Halodule*) e árvores de manguezal. O zoobentos engloba uma grande variedade de

seres. Segundo seu tamanho pode ser classificado como: 1) megafauna (**megabentos**), animais maiores que 50 mm; 2) macrofauna (**macrobentos**), que possuem tamanho entre 0,5 e 50 mm; 3) meiofauna (**meiobentos**), grupo constituído por animais entre 0,063 e 0,5 mm e que normalmente ocupam os interstícios do sedimento; e 4) microfauna (**microbentos**), que engloba os organismos menores que 0,063 mm, normalmente unicelulares (protistas, entre outros). Cada uma dessas categorias tem uma relação específica com o substrato e uma função particular no ecossistema.

Este capítulo apresenta a diversidade de ambientes bentônicos de áreas costeiras e de mar profundo, com exemplos de seus habitantes, exemplificando suas peculiaridades, modos de vida e importância. Ao final são apresentadas algumas reflexões sobre a forma como os fatores ambientais influenciam o bentos, bem como as principais ameaças que agridem esse importante compartimento do ambiente marinho.

# 2. Habitats bentônicos

## 2.1 Habitats costeiros

### *2.1.1 Estuários*

Os estuários são sistemas de transição entre o oceano e o continente, por se tratar de um local onde a água doce de um rio se mistura à água salgada do mar (Fig. 2). As descargas de água doce podem ocorrer por um ou mais rios ou apenas pela drenagem do continente. São sistemas semifechados, tendo uma conexão livre com o mar aberto, a qual pode ser permanente ou periódica (quando a barra de um rio é fechada de tempos em tempos).

Tratam-se de ambientes heterogêneos, compostos por alta diversidade de habitats. Possuem uma zona fluvial, mais interna, com salinidades baixas; uma zona estuarina média, com salinidades muito variáveis, devido à intensa mistura de águas fluviais e marinhas em decorrência da oscilação das marés; e uma zona estuarina costeira, onde a salinidade é maior e menos variável e as forçantes marinhas (marés, ondas, correntes) predominam.

Devido às forçantes fluviais e marinhas que atuam juntas, criam-se, nesses locais, ambientes entremarés únicos, com a formação de habitats lamosos e pântanos. Devido aos nutrientes transportados pelos rios, os estuários são ambientes com alta produtividade biológica. No entanto, por conta de sua configuração semifechada, esses locais podem ser altamente impactados pelo acúmulo de poluentes, levando a uma situação de forte degradação ambiental.

As comunidades bentônicas que ocupam os estuários são estruturadas por interações complexas em diferentes escalas espaciais (local, regional ou global) e temporais (diárias, sazonais e anuais). Assim, essas comunidades são condicionadas por variáveis climáticas, regimes de salinidade e dinâmicas oceânicas, como mudanças no aporte de nutrientes, produção primária e transporte de sedimentos. Tal situação leva a uma baixa diversidade, com poucas espécies adaptadas a viver em tais condições. Nota-se uma clara alternância das espécies, principalmente influenciada pelo gradiente de salinidade desde a parte mais interna ou fluvial do estuário (espécies dulcícolas) até a zona costeira (espécies marinhas). A zona de transição (zona estuarina média) é ocupada por espécies altamente tolerantes às variações de salinidade.

**FIGURA 2.** **Estuário durante a maré baixa evidenciando bancos lamosos cuja fauna bentônica serve de alimento para aves residentes e migratórias.** *Foto: Lorena Bissoli.*

Poucas espécies passam a vida toda nos estuários, mas muitas espécies dependem destes ambientes em algum momento do seu ciclo de vida. Assim, os estuários possuem alta importância ecológica e socioeconômica, sendo local de reprodução e criação para diversas espécies marinhas, como moluscos, crustáceos e peixes. Caracterizados por abrigarem algas planctônicas e bentônicas, sua vegetação vai desde florestas de mangue, em climas tropicais, até marismas, em ambientes subtropicais e temperados.

### *2.1.2 Manguezal/Marisma*

Os manguezais e as marismas também são ecossistemas costeiros de transição entre os ambientes terrestre e marinho (Fig. 3). A vegetação típica de manguezais (mangue-vermelho - *Rhizophora mangle*, mangue-branco - *Laguncularia racemosa* e mangue-preto - *Avicennia* sp.) é limitada aos climas tropicais, que no Brasil ocorrem, no seu limite sul, até o estado de Santa Catarina. As marismas predominam em ambientes subtropicais e temperados, sendo caracterizadas por pradarias de fanerógamas (gramas-marinhas) e ocorrem, no Brasil, desde São Paulo até o Rio Grande do Sul.

**FIGURA 3.** **Manguezal durante a maré baixa ilustrando a densa vegetação (*Rhizophora mangle*) e os bancos de lama em sua borda externa.** *Foto: André S. Rovai.*

Os manguezais estão associados às margens da desembocadura de rios, barras, lagunas, baías, enseadas ou reentrâncias costeiras e sofrem a ação de muitas forças, como a das marés, das precipitações, dos aportes de água doce e salgada e da entrada de sedimentos fluviais e marinhos, além da energia do sol. A energia gerada por essas forçantes são captadas e transformadas em estrutura florestal pelas árvores do manguezal.

O solo dos manguezais é úmido, salgado, lodoso, pobre em oxigênio e muito rico em nutrientes, além de apresentar grande capacidade de estocar carbono retirado da atmosfera pela fotossíntese. A alta decomposição de matéria orgânica em meio ao sedimento desprovido de oxigênio produz um odor típico, por conta do gás sulfídrico que é produzido nesse processo.

As árvores do mangue são conhecidas como halófitas, pois estão adaptadas às variações de salinidade, eliminando o excesso de sal por glândulas presentes em suas folhas. Outras adaptações desta vegetação são as raízes aéreas, que lhes permitem ocupar solos pobres em oxigênio, e as raízes-escora, que lhes permitem viver em ambiente inundado e pouco consolidado (Fig. 4). A variedade de nichos ecológicos possibilita a existência de uma fauna bastante diversificada.

**FIGURA 4. Raízes aéreas (pneumatóforos) de *Avicennia* sp. (A) e raízes-escoras de *Rhizophora mangle* (B).** *Fotos: Márcia Denadai e Cláudia Câmara do Vale.*

Os principais representantes do bentos são caranguejos, ostras, mexilhões, berbigões e cracas. Os manguezais são o lar de muitos peixes em sua fase juvenil, onde buscam alimento e abrigo de predadores, além de camarões, sendo, portanto, considerados "berçários" naturais para a vida marinha. Os manguezais são extremamente importantes no sequestro e fixação de carbono, podendo armazenar em seu solo cinquenta vezes mais gás carbônico do que as florestas tropicais.

As marismas não constituem florestas como os manguezais, sendo caracterizadas como pradarias adaptadas a ambientes com grandes variações de salinidade e temperatura, geralmente hipersalinas (Fig. 5). Também estão sujeitas às oscilações das marés, constituindo vastas planícies vegetadas com fundo inconsolidado.

O sistema radicular da vegetação é um dos componentes mais importantes desses ecossistemas, criando um substrato de lama espessa e fibrosa, que lhe confere maior estabilidade. Sua vegetação é composta principalmente por angiospermas herbáceas (ex. *Spartina*), que demonstram uma clara zonação em função de um gradiente de inundação causado pela variação das marés, dependente da fisiografia das marismas, moldada pela hidrodinâmica local, regimes de marés, topografia e tipo de sedimento.

A diversidade florística das espécies de marismas varia com a latitude, com menor diversidade próximo ao Equador (cinco espécies) e maior em zonas temperadas (vinte espécies). Estressores biológicos em regiões tropicais, como a intensa competição por espaço e sombreamento, resultam em um desenvolvimento menos estruturado que em regiões temperadas, onde os estressores, como altas temperaturas, são menos intensos. De forma semelhante aos manguezais, nas marismas existe uma grande quantidade de matéria orgânica, que dá suporte a uma alta produtividade primária, contribuindo para as teias alimentares associadas. Além disso, a exemplo dos manguezais, atenuam os processos erosivos costeiros e oferecem abrigo para juvenis de diversas espécies de peixes, crustáceos e moluscos, que utilizam esse ambiente para a reprodução.

**FIGURA 5. Marisma localizada em estuário da região de Cananéia, SP, ilustrando a estrutura da vegetação e sua importância para alimentação e descanso de aves marinhas.** *Foto: Marília Cunha Lignon*.

### *2.1.3 Costões rochosos*

Costões rochosos são mais um exemplo de ambiente de transição comuns em áreas costeiras ao redor do mundo (Fig. 6). São formados por rochas sólidas, formando diferentes habitats, como penhascos íngremes, plataformas, poças rochosas e áreas pedregosas, com áreas expostas à variação das marés ambientes (entremarés) ou sujeita a borrifos esporádicos das ondas em momentos de maior energia que se estendem para o supralitoral.

Há uma relação entre a fisiografia ao longo da região costeira brasileira e a ocorrência de costões rochosos. Em áreas onde a serra está próxima ao oceano, ocorre a predominância de costões rochosos (ex., litoral norte de São Paulo); já em locais onde a serra está distante do oceano, há a predominância de outros ambientes costeiros (praias, manguezais e restingas; ex., litoral sul de São Paulo).

O tipo de rocha que forma os costões depende da geologia do local, podendo ter natureza vulcânica, como na maioria das ilhas oceânicas, ou metamórfica, nas quais predominam granitos e gnaisses, como no litoral do sudeste brasileiro. No nordeste do Brasil, os costões são substituídos, via de regra, por afloramentos de arenitos, que abrigam uma biota similar.

**FIGURA 6. Entremarés do costão rochoso da praia do Lázaro (Ubatuba, SP) ilustrando a zonação dos organismos sésseis de fundo consolidado.** *Foto: Thaïs Navajas Corbisier*.

Os costões podem ser divididos em: 1) costões batidos (expostos): formados normalmente por paredões lisos, sob forte hidrodinamismo e impacto das ondas, tem menor diversidade de habitats; e 2) costões protegidos (abrigados): sob hidrodinamismo mais fraco sendo, portanto, bastante heterogêneos e fragmentados, levando à formação de habitats mais complexos. Os costões batidos possuem geralmente menor diversidade, pois menos espécies toleram a intensa ação das ondas. Os costões protegidos podem ter maior quantidade de microhabitats, com fendas, reentrâncias e rochas soltas, e assim oferecem abrigo para um maior número de espécies. Em geral, os costões são substrato para uma grande variedade de algas e invertebrados sésseis, que atingem um grande adensamento populacional, formando faixas de distribuição no entremarés de acordo com suas tolerâncias à dessecação e às altas temperaturas e sua capacidade de competir por espaço e resistir à predação ou à herbivoria. Esse tipo de distribuição, chamado **zonação**, é bem conhecido para os costões rochosos.

A zona superior (**supralitoral**), permanentemente exposta ao ar, recebe apenas borrifos da água do mar e caracteriza-se pela ocorrência de organismos bem adaptados à perda de água e à variação de temperatura, como: organismos terrestres (liquens, bromélias, cactos), cirripédios (cracas do gênero *Chthamalus*), isópodes (*Ligia*) e gastrópodes (*Littorina*).

A zona intermediária (**entremarés**), sujeita às variações das marés, é ocupada por organismos resistentes a essas oscilações, como cirripédios, moluscos e algas, essas últimas em especial nas faixas mais próximas à linha da água. Nessa zona também se formam as poças de marés, depressões onde a água fica represada durante a maré baixa, sujeitas ao calor excessivo, redução do oxigênio e alta salinidade (devido à evaporação da água).

A zona inferior (**sublitoral**), localizada abaixo da linha das marés e sempre submersa, é habitada por uma variedade de algas e invertebrados sésseis (fixos) e vágeis (que se deslocam). Nessa zona, as relações bióticas (ex. predação, competição e herbivoria) passam a ter maior importância, visto que os fatores abióticos são mais estáveis. Os costões rochosos possuem grande importância ecológica e econômica por fornecerem abrigo e alimento para várias espécies de peixes e invertebrados bentônicos.

### *2.1.4 Praias arenosas*

As praias arenosas são ecossistemas costeiros que podem dominar a linha de costa tanto em regiões tropicais como temperadas. São ambientes de transição entre terra e mar formados por substrato inconsolidado, sendo, portanto, ambientes dinâmicos e controlados por fatores físicos (Fig. 7). As praias são definidas como depósitos de sedimentos arenosos, que sofrem a ação das ondas e das marés, podendo ser remobilizados constantemente.

Mas a praia é mais ampla do que normalmente conhecemos. Uma praia se inicia no ponto em que o fundo marinho e as ondas passam a interagir, podendo atingir os 20 m de profundidade, e se estende até o limite com outros habitats costeiros, como as dunas costeiras ou a vegetação de restinga. As praias estão sujeitas aos fatores físicos, como energia das ondas, marés, ventos e oscilações na precipitação e aporte de água doce. Esses fatores determinam o tipo de praia, incluindo diferentes tipos de sedimento (desde areia grossa até fina, silte e argila, ou mesmo matacões e fragmentos rochosos) e inclinações.

Podem ser divididas em dois tipos extremos: 1) **praias refletivas**: ocorrem em áreas em que as ondas quebram junto à praia o que faz com que a energia dessas seja refletida pela face da praia; possuem declividade acentuada e grãos grossos de areia; e 2) **praias dissipativas**: ocorrem em áreas onde a energia das ondas se dissipa por vasta região de quebramento (**zona de surfe**); possuem declividade suave e grãos finos de areia. Além desses dois tipos extremos, existem vários outros tipos intermediários, que mesclam características de praias dissipativas com refletivas.

**FIGURA 7. Praia arenosa com morfodinâmica dissipativa (A), localizada na Ilha do Cardoso, litoral sul de SP (*Foto: Márcia Denadai*), e refletiva (B), localizada em Ubatuba, litoral norte de SP.** *Foto: Marina Mourão Santana.*

O bentos de praias arenosas é composto predominantemente por animais sedentários, que passam todo seu período de vida pós-larval enterrados no sedimento. Os organismos podem ser classificados, de acordo com o seu modo de vida, em **epifauna** (vivem na superfície do sedimento) ou **endofauna** (vivem enterrados no substrato); ou de acordo com o seu tamanho, em **macrofauna** (maiores que 0,5 mm), ou **meiofauna** (menores que 0,5 mm).

O sedimento das praias arenosas é normalmente pobre em nutrientes e matéria orgânica, pois eles são constantemente removidos pela ação das ondas e/ou do vento. Além disso, a radiação solar atinge a areia com grande intensidade, devido à sua pobre vegetação. Tais características tornam o ambiente praial muito austero para sua biota. Portanto, os organismos que vivem nesse ambiente apresentam diversas adaptações contra a dessecação e altas temperaturas, criando zonas de tolerância das espécies em um gradiente de influência da água do mar, assim como a zonação descrita para costões, mas que não é tão visível em praias pelo fato dos organismos se enterrarem.

As variações diárias de amplitude das marés determinam três faixas de saturação do sedimento pela água: uma superior, constantemente umedecida por borrifos, mas somente coberta pelo mar em marés altas excepcionais, ressacas e tempestades; uma faixa intermediária coberta e descoberta a cada ciclo de maré; e uma faixa inferior, submersa, mas que sua parte superior pode, eventualmente, ficar exposta em marés extremamente baixas.

A faixa superior é ocupada por espécies mais bem adaptadas à vida terrestre que à aquática, como o caranguejo "maria-farinha" (*Ocypode*), as "pulgas-da-praia" (*Atlantorchestoidea*) e alguns besouros (*Bledius*); a faixa intermediária é ocupada por uma grande diversidade de espécies, principalmente crustáceos, moluscos e poliquetas, com adaptações morfológicas e/ou comportamentais para impedir a perda de água durante a baixamar; a faixa inferior é habitada por organismos pouco tolerantes à exposição ao ar, podendo inclusive ocorrer mortalidades em caso de marés excepcionalmente baixas (ex. o hidrozoário *Renilla* sp., as estrelas-do-mar e as bolachas-da-praia).

### *2.1.5 Planícies litorâneas e restingas*

Uma planície é uma grande área com pouca ou nenhuma variação de altitude. As planícies costeiras ou litorâneas são formadas por sedimentos terciários (66,4 a 1,6 milhões de anos) ou quaternários (1,6 milhões de anos até os tempos atuais), depositados na zona costeira. Sua formação está relacionada a diversos fatores, que incluem as variações do nível do mar do quaternário associadas às correntes de deriva litorâneas, às fontes primárias de sedimento, e às armadilhas para retenção do sedimento (promontórios, barragens, enrocamentos e espigões). As planícies se formam pela ação dos rios, mares e ventos, os quais carregam sedimentos que vão se acumulando até formar uma superfície uniforme. Não por acaso, a maioria das planícies litorâneas está localizada às margens de rios e do mar.

O termo "restinga" é muitas vezes utilizado com o sentido de planícies litorâneas ou do sistema solo-vegetação como um todo (Fig. 8). Em outras ocasiões é empregado como a denominação dada ao tipo de vegetação ocorrente em planícies costeiras, como a vegetação de dunas, que ocorre na linha de praia das planícies litorâneas de forma adaptada às condições salinas (halófilas) e arenosas (psamófilas) sob influência das marés. Após esta faixa, sobre cordões arenosos mais estáveis, encontra-se uma vegetação arbustiva e arbórea densa, denominada jundu, com muitas bromélias terrícolas. A fauna é composta por inúmeros invertebrados, pequenos mamíferos e aves.

**FIGURA 8.** Planície costeira com vegetação de restinga na transição com o ambiente praial. *Foto: Lucas Barbosa.*

### *2.1.6 Dunas*

As dunas se formam quando o mar traz mais areia para a praia do que consegue carrear de volta. São elevações arenosas que podem ter desde poucos centímetros até centenas de metros de altura (a maior duna conhecida tem mais de 2.000 m acima do nível do mar).

As regiões em que as dunas são formadas apresentam algumas características que favorecem o acúmulo de areia, como ventos constantes que sopram em uma direção predominante, baixa pluviosidade, e uma área extensa, onde a areia possa se acumular (Fig. 9).

**FIGURA 9. Duna frontal em uma praia arenosa e sua vegetação rasteira típica.** *Foto: Lucas Barbosa.*

A formação das dunas ocorre quando o sedimento transportado pelos ventos, ao encontrar um obstáculo (pedra, tronco etc.), começa a se acumular, formando uma elevação. A partir daí a própria duna passa a ser um obstáculo, acumulando sedimento e aumentando sua altura gradativamente.

As dunas não são estáticas, podendo "mudar de lugar" com o passar do tempo. Isso ocorre porque os sedimentos continuam a ser carregados pelos ventos, sendo depositados mais adiante e, portanto, a duna vai se formando sempre na direção do vento. No entanto, as dunas podem se tornar mais estáveis a partir do momento em que começam a ser cobertas por vegetação. Por isso é importante a proteção dessa vegetação.

A vegetação das dunas é rasteira, composta principalmente por gramíneas e outras plantas herbáceas, que desempenham o importante papel na formação e fixação das dunas. Dentre os invertebrados bentônicos que ocupam esses ambientes, está o caranguejo-fantasma, ou maria-farinha (*Ocypode quadrata*; (Fig. 10), que vive em tocas. A fauna inclui também insetos e vertebrados, como roedores, cobras, anfíbios e diversas aves.

**FIGURA 10. O caranguejo fantasma** *Ocypode quadrata. Foto: Lucas Barbosa*.

### *2.1.7 Pradarias marinhas*

As pradarias marinhas (do inglês, *seagrasses*) constituem ecossistemas de grande importância para a zona costeira, caracterizando-se como o ecossistema mais produtivo da Terra. São povoamentos de plantas vasculares, angiospermas monocotiledôneas (ex. *Halodule*, *Halophila* e *Ruppia*), que formam um complexo sistema de rizomas nos sedimentos estuarinos e marinhos (Fig. 11). Essas espécies marinhas têm ancestrais terrestres e, ao longo da evolução, passaram a ocupar as águas marinhas, sendo então denominadas angiospermas marinhas. Ocupam grandes extensões em fundos de areia ou lamas submersas, em zonas bem iluminadas, podendo alcançar profundidades superiores a 30 metros.

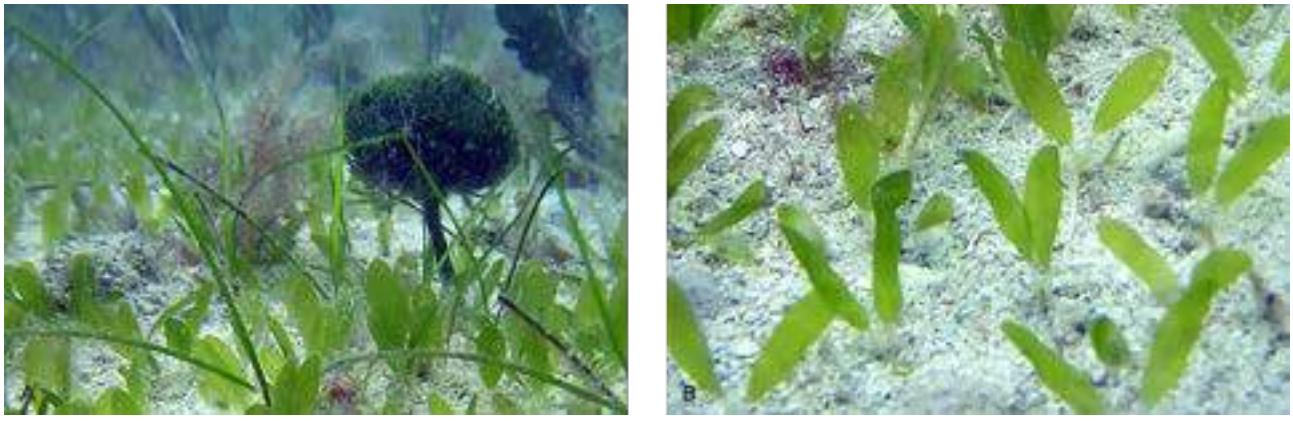


**FIGURA 11. A) Vegetação de pradarias marinhas submersas ilustrando a dominância de** *Halophila decipiens* **na cobertura do substrato. B)** *Halophila decipiens* **em destaque**. *Fotos: Joel C. Creed, UERJ*.

As pradarias possuem grande importância, pois, além de favorecer a estabilidade costeira e produzir matéria orgânica para a teia trófica marinha, esses ambientes têm sido reconhecidos pela grande capacidade de armazenar carbono orgânico em seus sedimentos e são, portanto, prioritários para as medidas de mitigação do aumento de carbono na atmosfera. Por esse motivo,

o termo *Blue Carbon* (Carbono Azul) tem sido utilizado para designar o carbono acumulado nas pradarias marinhas, bem como nas demais áreas úmidas costeiras (manguezais e marismas). Essas monocotiledôneas marinhas também melhoram a qualidade da água pela oxigenação e remoção do excesso de nutrientes, ou mesmo de poluentes.

As pradarias abrigam muitos animais marinhos, que buscam proteção contra ondas e correntes e também contra os predadores. Também são ótimos abrigos para a postura de ovos e sua vegetação serve de alimento para diversas espécies. Dentre as espécies que ocupam esses habitats estão diversos invertebrados, cavalos-marinhos, raias, tubarões, tartarugas-marinhas, peixes-boi, além de muitas aves marinhas. Dentre as fanerógamas marinhas que ocupam as pradarias brasileiras, *Halodule wrightii* e *Ruppia maritima* são as mais abundantes e conhecidas.

### *2.1.8 Recifes de coral*

Considerados como os ecossistemas marinhos com maior biodiversidade do planeta, os recifes de coral são frequentemente comparados às florestas tropicais por conta de sua complexidade e grande número de espécies presentes. Os recifes de coral típicos são ecossistemas bentônicos cuja cobertura é dominada por corais, cnidários que possuem um esqueleto calcário (Fig. 12). Os corais típicos são organismos bastante complexos e que, na verdade, resultam de associações do cnidário com vários micro-organismos. A associação mais relevante para os corais se dá com microalgas flageladas da família Symbiodiniaceae, chamadas de zooxantelas, que passam a ser cultivadas nos tecidos do animal, fornecendo a ele parte considerável da energia necessária para sua sobrevivência. Na maioria dos casos o coral não consegue sobreviver longos períodos sem as zooxantelas em seus tecidos.

**FIGURA 12.** **Biodiversidade em recife de coral em Oahu (Hawaii, EUA).** *Foto: Tito Monteiro da Cruz Lotufo.*

Apesar da clara dominância dos corais na comunidade que ocupa os recifes, há ainda uma enorme variedade de espécies de diferentes grupos taxonômicos, incluindo algas, moluscos, crustáceos, esponjas e ascídias, entre outros componentes bentônicos que contribuem com a estrutura do ambiente. A dominância dos corais contribui para um sistema com grande complexidade tridimensional, pois há grande variação nos tamanhos e formatos desses animais, que podem crescer multiplicando seus pólipos de forma assexuada.

Uma das características mais marcantes dos recifes de coral é o fato de constituírem um ambiente que foi remodelado e construído por organismos marinhos, os chamados bioconstrutores ou bioengenheiros, e por isso se diz que são formações biogênicas. Dessa forma, os corais e outros bioconstrutores vão adicionando o material que produzem, que vai se acumulando, e ao longo de milhares de anos vão se consolidando e formando rochas calcárias. Os recifes não apenas crescem pela ação dos bioconstrutores, mas são constantemente erodidos pelos animais perfuradores e bioerodidores, havendo um balanço entre processos de calcificação e erosão.

A formação dos recifes de coral é um processo bastante lento e delicado, que depende de condições oceanográficas adequadas, como temperaturas mais quentes, águas claras e fundos rasos com boa penetração de luz. Nessas condições, os recifes podem se desenvolver até o limite da zona entremarés e, em áreas litorâneas, formam o que se chama de recife em franja. Em áreas rasas também podem ocorrer manchas recifais, de forma mais isolada e espalhadas por extensões de tamanho variável. As lentas mudanças no nível do mar ao longo de dezenas, centenas ou milhares de anos (não as rápidas oscilações das marés) podem fazer com que esta franja recifal sirva de base para o crescimento dos corais quando há um aumento do nível do mar, originando então os recifes em barreira, que se localizam um pouco distantes da costa, com um canal recifal que os separa dela. Este mesmo processo, quando ocorre em ilhas oceânicas, pode originar os atóis. Entre os processos que podem originar os atóis, há casos em que a ilha afunda com os movimentos tectônicos e o nível do mar sobe, as barreiras que circundam a ilha tornam-se anéis recifais com uma laguna central sobre o topo do que é agora um monte submarino. Nos Oceanos Índico e Pacífico há um grande número de atóis, e a própria palavra deriva do dialeto falado nas Ilhas Maldivas, um país formado por 26 grandes atóis, cujos anéis são formados por mais de 1.000 atóis menores. No Brasil há o Atol da Rocas (Fig. 13), um ambiente único situado 270 km da nossa costa e que, ao contrário da maioria dos atóis do planeta, foi construído majoritariamente por algas calcárias, mas também tem a contribuição de corais e outros organismos.

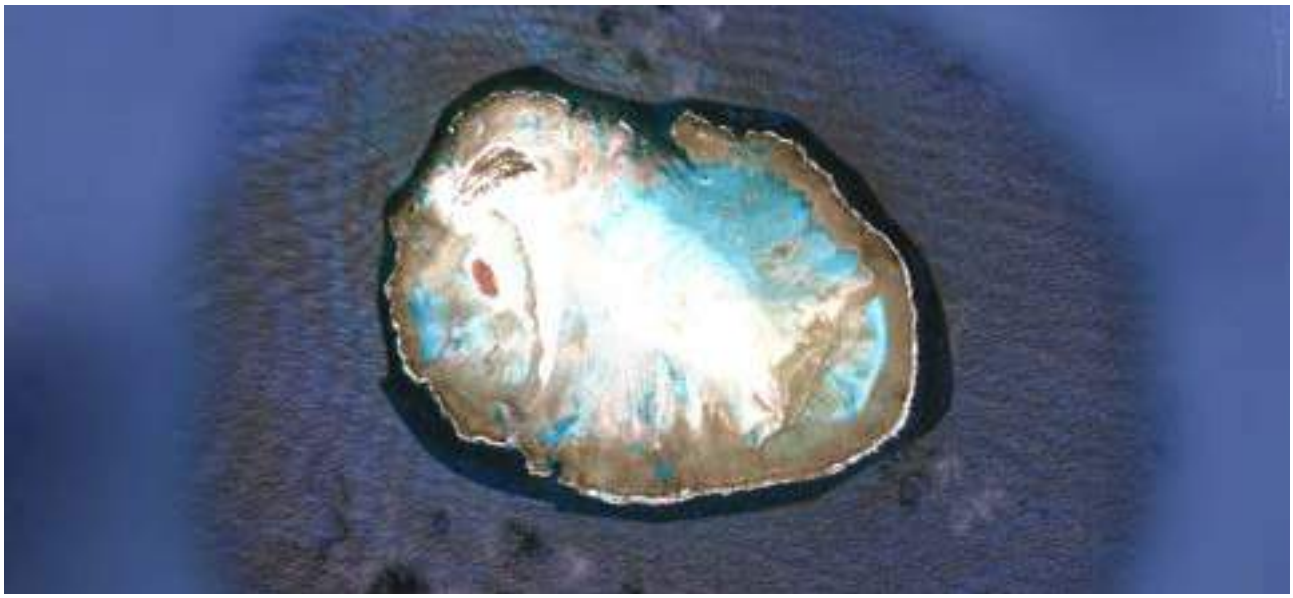


**FIGURA 13.** **Imagem de satélite do Atol das Rocas, RN.** *Fonte: Google Earth*.

Nos recifes há também uma variação importante de estrutura e composição quando se percorre sua extensão desde o mar aberto até o interior de um canal ou laguna (Fig. 14).

A parte mais externa do recife, chamada de **fronte recifal**, é caracterizada geralmente por um declive mais acentuado e grande diversidade de espécies. Esta zona pode estar mais ou menos exposta à ação de ondas, e isso também se reflete nas espécies que crescem ali. Sob forte ação de ondas geralmente as espécies presentes tendem a formar crostas ou ramos mais robustos, ao passo que em águas mais calmas se observa a formação de ramos curtos e compactos, ou cabeças de corais mais hemisféricos.

No topo da fronte recifal há uma **crista recifal**, que está mais vulnerável e sob forte ação das marés, podendo ficar exposta ao ar durante as marés mais baixas.

A área mais extensa dos recifes é o **platô recifal**, que forma um ambiente bastante raso, e por isso sujeito também a variações ambientais mais rápidas de temperatura, oxigênio e outras condições essenciais para os organismos.

No lado voltado para a costa ou para o interior da **laguna**, o recife forma uma zona de declive mais suave, caracterizada também por uma grande diversidade de formas de vida, chamada de **pós-recife**.

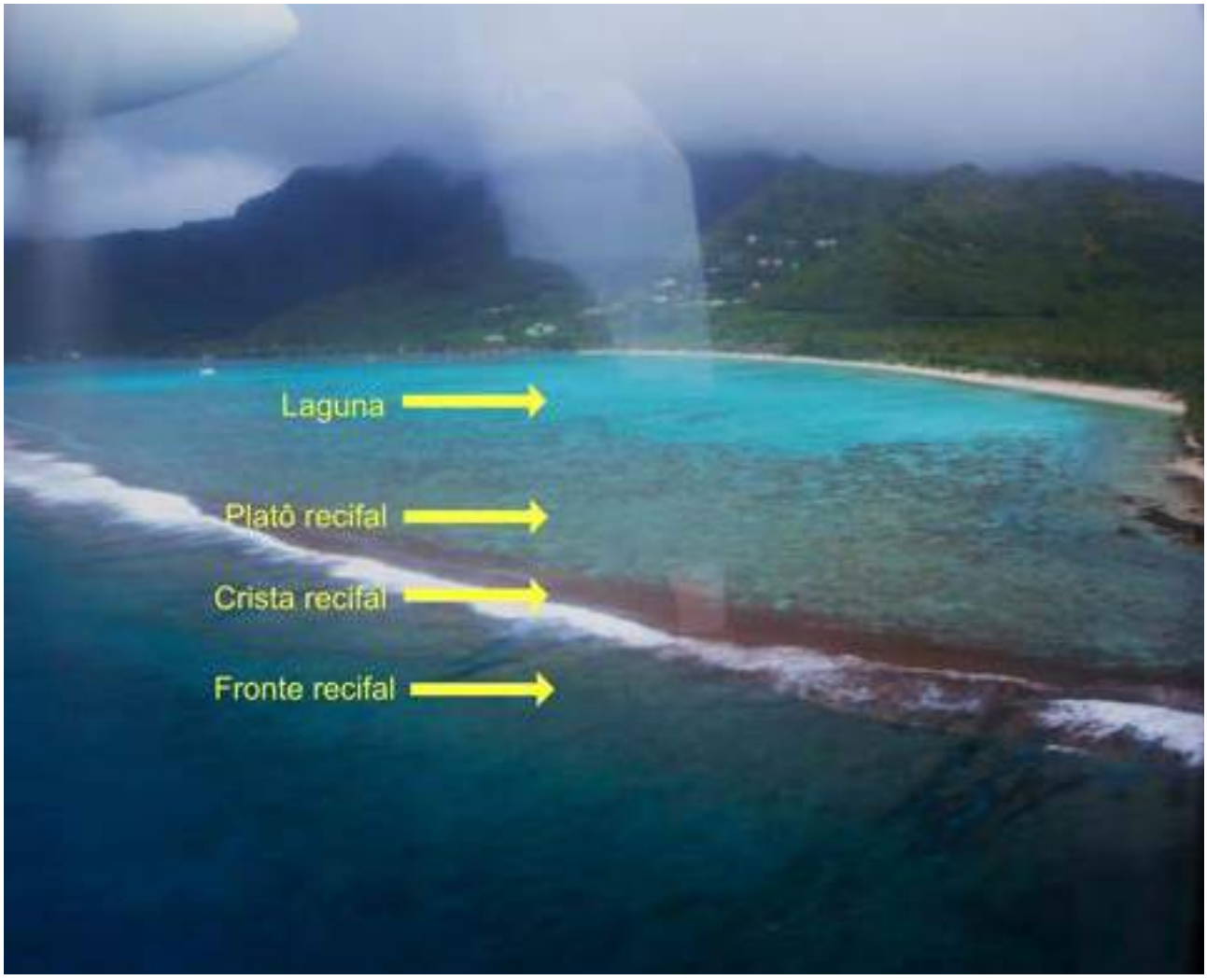



**FIGURA 14.** Vista aérea de um recife de coral em barreira, com as zonas indicadas (Moorea, Polinésia Francesa). *Foto: Tito Monteiro da Cruz Lotufo.*

Os recifes de coral abrigam, numa relação de interdependência, um número muito grande de espécies de micro e macro-organismos, ou seja, de bactérias microscópicas, essenciais aos ciclos biogeoquímicos, até grandes tubarões, como o tubarão-tigre, um grande predador que controla populações de peixes menores. Sua complexidade e grande sensibilidade a alterações nas características ambientais fazem dos recifes sistemas muito sensíveis e vulneráveis a quaisquer impactos ambientais.

A maior formação recifal do planeta encontra-se ao largo da costa leste da Austrália, sendo denominada de Grande Barreira de Recifes da Austrália, no Oceano Pacífico, ao passo que a segunda maior formação desse tipo está localizada no Mar do Caribe, ao largo de Belize, na América Central. Há regiões do mundo onde os recifes são particularmente diversos, sendo que o mais importante em termos de biodiversidade é o chamado Triângulo dos Corais, localizado entre os oceanos Índico e Pacífico, entre Indonésia, Filipinas e Papua Nova Guiné.

No Brasil há também importantes formações coralíneas, e as maiores encontram-se no Parque Nacional Marinho de Abrolhos, no sul da Bahia. Ali são encontradas espécies endêmicas de corais e representantes de praticamente todas as espécies de corais do Brasil. Em Abrolhos há também formações coralíneas únicas, em formato de gigantescos cogumelos, chamadas de chapeirões.

Os recifes no mundo inteiro sofrem ameaças, tanto de ações pontuais como da pesca desordenada, poluição e construções humanas, mas também são fortemente impactados por alterações no clima do planeta. O aquecimento do planeta, decorrente do lançamento de gases de efeito estufa, tem ameaçado praticamente todos os recifes de coral no mundo. Em decorrência desse aquecimento, tem ocorrido com maior intensidade e frequência um fenômeno chamado "**branqueamento**". No branqueamento, ocorre a perda de pigmentos dos corais e a expulsão das zooxantelas (microalgas simbiontes), fazendo com que o coral fique totalmente branco.

Em alguns casos, os corais podem recapturar as microalgas da água e voltar à sua condição saudável. Em muitos casos, contudo, a perda das zooxantelas irá ocasionar a morte do coral, que depende da energia fornecida por estes parceiros. Infelizmente há hoje um número reduzido de regiões que não foram afetadas por branqueamento e mortalidade de corais.

### *2.1.9 Bancos de rodolitos*

Do ponto de vista geológico, os depósitos de algas calcárias são considerados como sedimentos ricos em carbonato, chamados "**granulados bioclásticos**". Por terem origem biológica, esses depósitos podem ser definidos como fundos organogênicos, incluindo cascalho, areias biogênicas (ou bioclásticas) e sedimentos carbonáticos.

Do ponto de vista biológico, os rodolitos são constituídos por crostas de algas calcárias, que formam nódulos de diversos formatos e tamanhos (~10 centímetros), podendo ser formados por uma ou mais espécies de algas calcárias vermelhas (rodófitas, de onde seu nome se origina). Um "banco de rodolitos" (Fig. 15) forma-se quando, além de um conjunto de rodolitos, tem-se uma comunidade formada por outros organismos associados, semelhante ao que ocorre em um recife de coral.

Estes sistemas representam uma extraordinária biofábrica de carbonatos no Atlântico Sul Tropical. As algas calcárias mais comumente encontradas nos rodolitos são *Sporolithon* sp. e *Lithophyllum* sp.

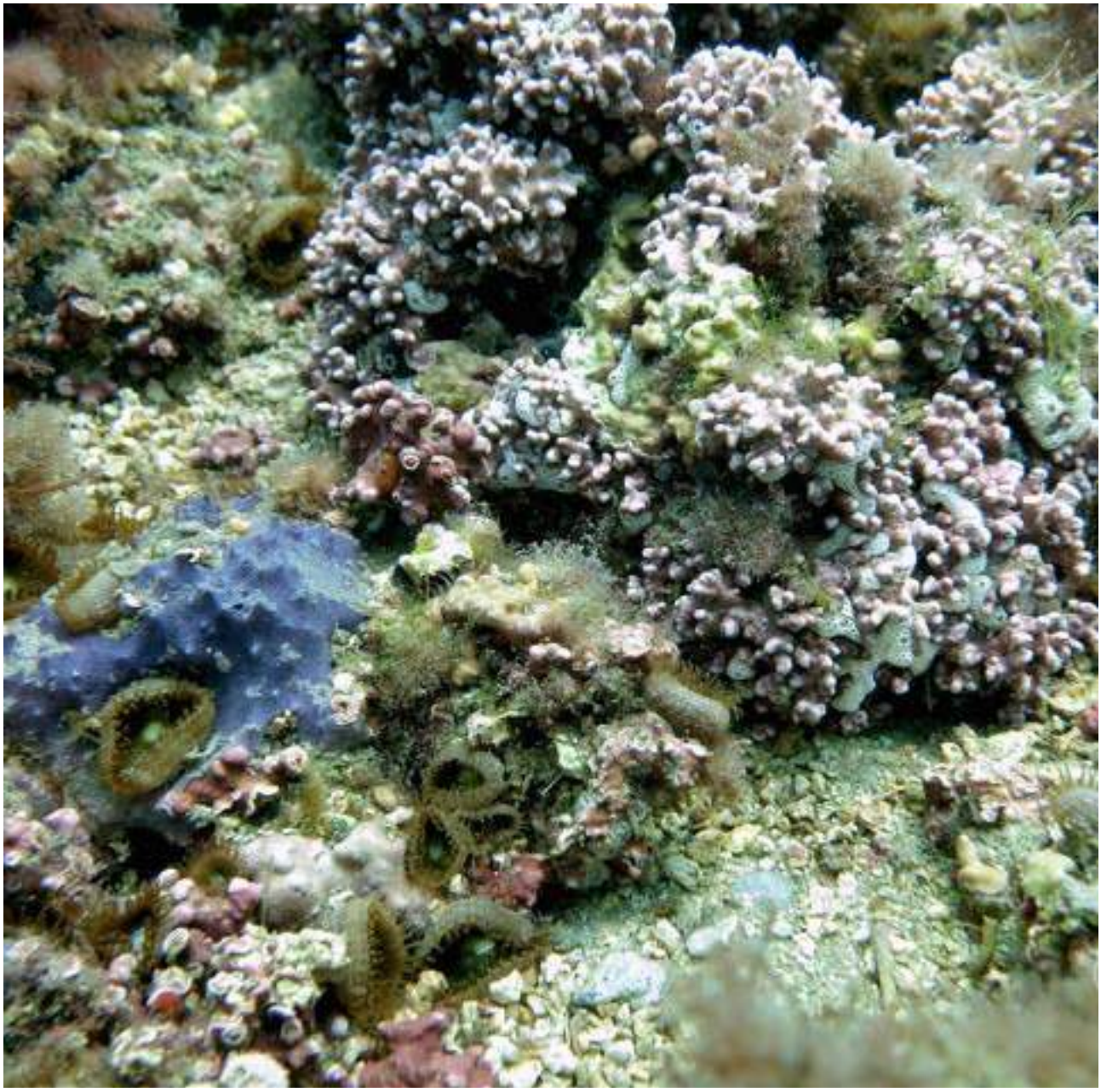


**FIGURA 15.** Detalhe da fisionomia de um banco de rodolitos, evidenciando a grande diversidade associada. Foto: *Marina Nasri Sissini*.

O maior banco de rodolitos conhecido está localizado no litoral da Bahia, em Abrolhos, margeando os recifes coralíneos, com 21 mil quilômetros quadrados de área (equivalente ao estado de Sergipe). No entanto, os bancos de rodolitos estão presentes em todos os oceanos e são particularmente abundantes no Mar Mediterrâneo, Golfo da Califórnia e Oceano Atlântico.

Os bancos de rodolitos representam substrato, abrigo e, indiretamente, alimento para uma extraordinária diversidade biológica, formando oásis de diversidade em meio às paisagens monótonas do fundo arenoso da plataforma continental.

Do ponto de vista ambiental, os rodolitos têm ainda a importante função de retirar carbono em excesso da atmosfera, ajudando a regular o clima no planeta. Apesar disso, os bancos de rodolitos são fortemente ameaçados pelas atividadeshumanas devido, por exemplo, à exploração pelo calcário e à exploração de petróleo em seus arredores.

## 2.2 Habitats de profundidade

### *2.2.1 Fundos inconsolidados da plataforma continental*

A plataforma continental compreende a área submersa dos continentes, do nível de maré baixa até cerca de 200 m de profundidade, onde aproximadamente ocorre a quebra da plataforma, com largura variável em relação à costa. Embora representem cerca de 3% do assoalho oceânico, as plataformas continentais têm grande importância econômica. É a região onde se concentra a pesca de espécies de interesse comercial, como peixes, moluscos e crustáceos e que provê importantes habitats de reprodução.

O bentos de plataforma fornece alimento a um grande número de peixes de fundo, além de crustáceos maiores, como camarões e lagostas. Por outro lado, também está sujeita a efeitos antrópicos como a perturbação causada por arrastos de pesca, descarga de esgotos, deposição de dragagens de sedimentos de áreas portuárias, perfuração de poços de petróleo ou gás, derrames de óleo, entre outras causas.

A maior parte das plataformas continentais é coberta por sedimentos arenosos ou lamosos. As comunidades são dominadas por animais, embora bancos de rodolitos e pradarias (tratados anteriormente) também se estabeleçam em fundos inconsolidados, em áreas mais rasas onde a luz ainda atinge o fundo do mar. A luz é geralmente insuficiente para organismos fotossintetizantes, exceto em regiões costeiras onde se encontram as microalgas bentônicas, as angiospermas marinhas e as macroalgas gigantes (estas últimas em águas frias).

Nas plataformas continentais, as variações na estrutura das comunidades são relacionadas a diversos fatores. Em geral, mais do que um fator atua em conjunto. O tipo de sedimento de fundo, que é função da velocidade de correntes, é um fator importante. Tanto as larvas, quando assentam, como os adultos sedentários podem ser seletivos quanto ao tipo de substrato. Quanto maior a hidrodinâmica, mais grossos são os sedimentos do fundo, nos quais predominam invertebrados que se alimentam de material em suspensão, os **suspensívoros**. No oposto, em áreas onde há correntes fracas, ocorre maior deposição de sedimentos finos e predominam invertebrados que se alimentam de material depositado, os **depositívoros**. A quantidade e a natureza do alimento vão determinar a densidade e o tipo de organismo presente.

A temperatura da água pode variar de acordo com a latitude e com a profundidade e as comunidades bentônicas diferem do Equador para os pólos e das áreas mais rasas para as mais profundas; as massas de água que atuam sobre o fundo (Fig. 16) também alteram a ocorrência de espécies, devido às diferenças de temperatura. Na costa sudeste do Brasil há espécies da megafauna que acompanham a ACAS (**Água Central do Atlântico Sul**, mais fria e salina - Fig. 16); a principal é o siri *Portunus spinicarpus*. Por outro lado, outras espécies são características da **Água Costeira** (AC - Fig. 16), mais quente e menos salina, como o camarão sete barbas (*Xiphopenaeus kroyeri*). Áreas de **ressurgência costeira**, onde massas d'água de fundo trazem nutrientes à coluna d'água e superfície, como na costa do Peru e ao largo de Cabo Frio, Rio de Janeiro, têm comunidades diferentes nos períodos com e sem a ressurgência.

O fundo de águas mais rasas pode ser mais afetado por ondas e correntes, que revolvem o fundo e podem remover a fauna. O despejo de água doce e de sedimentos em suspensão de grandes rios pode reduzir a densidade, soterrar a fauna e diminuir a diversidade, como ocorre ao largo do delta do Amazonas, na região norte do Brasil.

As interações entre espécies, como competição e predação, também podem modificar as comunidades, assim como essas podem, por meio de escavação, enterramento e atividade alimentar (ex. construção de tubo, irrigação de tubos, seleção de partícula, produção de fezes), criar estruturas que modificam localmente os sedimentos, afetando as espécies que ocorrem. Esses processos podem induzir heterogeneidade na escala da dimensão de seu habitat e promover o controle da densidade e composição de espécies em manchas locais de sedimento.

A principal fonte de energia para as comunidades bentônicas é proveniente da coluna de água: produção primária fitoplanctônica na zona eufótica e utilização de matéria orgânica dissolvida (MOD) pelo bacterioplâncton, processo conhecido como alça microbiana (ver capítulo **A Vida no Mar**).

A matéria orgânica produzida na coluna d'água sedimenta sobre o fundo na forma de fitodetritos, pelotas fecais do zooplâncton, restos de organismos ou grandes agregados de fitodetritos, denominados de "neve marinha". Uma vez sedimentada, parte da matéria orgânica particulada é canalizada para a trama trófica através da assimilação e mineralização por micro-organismos ou consumidores primários bentônicos.

A biomassa do bentos de plataforma continental reflete a contribuição do fitoplâncton/ fitodetritos, que varia com a profundidade. O aporte de material dos continentes também pode fornecer uma contribuição importante para as comunidades da plataforma continental, chegando por meio das bacias de drenagem ou cânions submersos.

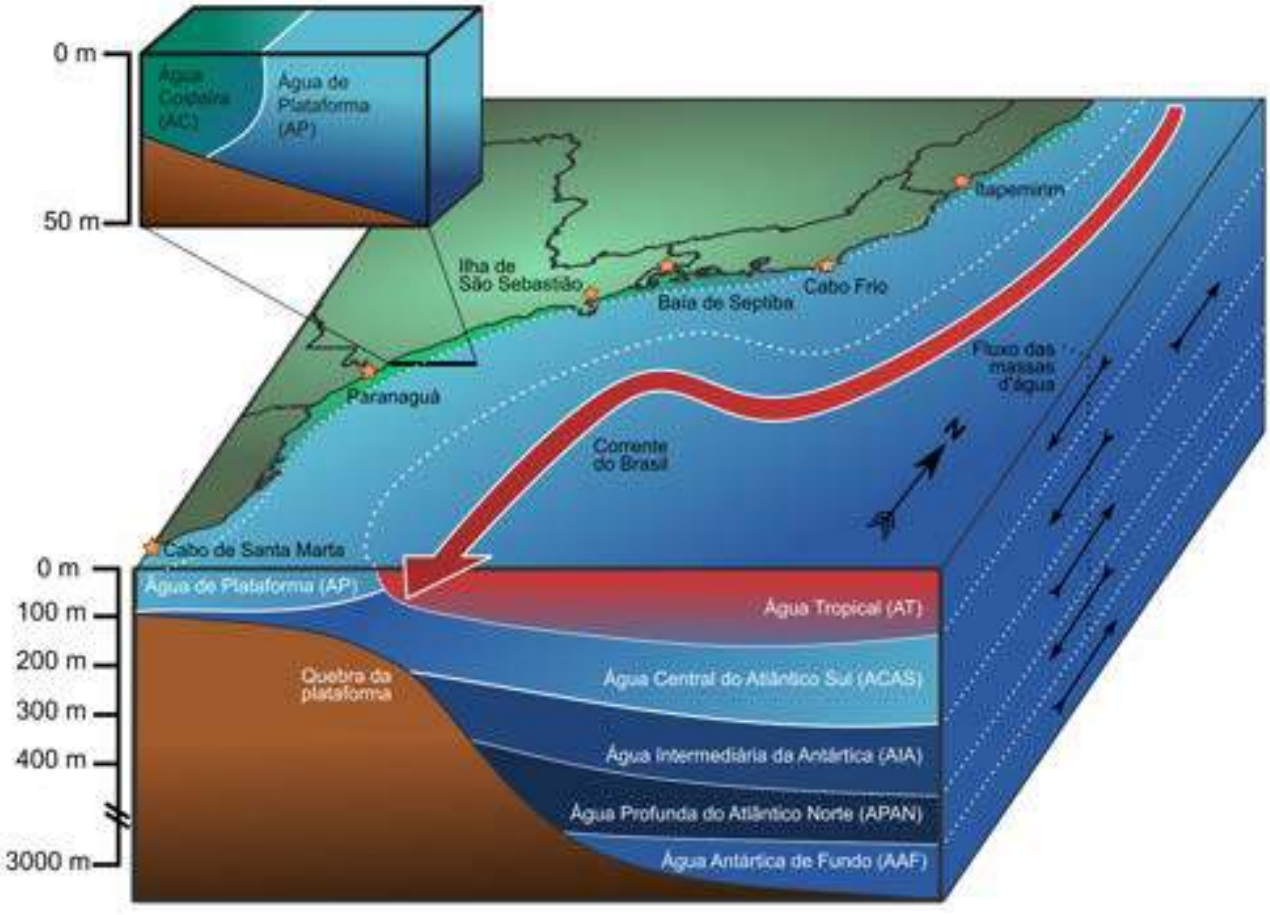



**FIGURA 16.** Sentido e profundidade das principais massas d'água ao largo da costa brasileira.

### *2.2.2 Mar profundo*

Dos 200 m de profundidade até o fundo das fossas oceânicas (cerca de 11.000 m) o assoalho do oceano corresponde ao mar profundo, constituindo cerca de 97% da área do fundo oceânico: taludes 12%; elevações 5%; montanhas/cordilheiras 36%; planos abissais 42%; e fossas 2%.

No mar profundo não há luz, a temperatura é baixa (cerca de 4°C), a salinidade e o teor de oxigênio da água são mais constantes, a pressão hidrostática é alta (1 atm a cada 10 m de profundidade) e os sedimentos são muito finos, com predominância de silte, argila e vasas biogênicas. Há pouca quantidade de alimento, uma vez que depende, em grande parte, da exportação de material das zonas iluminadas, pois não há produção primária importante (exceto em fontes hidrotermais; ver adiante).

O mar profundo é habitado esparsamente, em consequência da baixa contribuição de matéria orgânica. Em geral, a densidade, em termos de número de indivíduos, a biomassa e o conteúdo orgânico são baixos e têm uma relação inversa ao longo do gradiente de profundidade, decrescendo da plataforma continental à zona abissal. A maior parte do fundo oceânico suporta menos de 0,5 g de peso úmido de organismos por $m^2$, enquanto em um recife de coral, por exemplo, pode ter mais de 5kg/$m^2$.

A fauna apresenta muitas adaptações morfológicas e ecológicas, peculiares para viver neste ambiente de alta pressão, sem luz, com sedimentos muito finos e com pouco alimento. A maioria da fauna é comedora de depósito (sedimentos), sendo que os pepinos do mar (holotúrias) ocorrem em grande número.

Em comparação à fauna de águas mais rasas, há uma tendência de miniaturização da macrofauna e da meiofauna bentônicas, que juntas abrigam o grupo mais numeroso e diverso do bentos do mar profundo. Invertebrados maiores têm corpos delicados, frágeis, pernas ou projeções corpóreas longas, pois evitam o soterramento em sedimentos muito finos. O carbonato de cálcio tem sua deposição reduzida (em especial abaixo de 4.000 m) e há poucos organismos com carapaça calcificada abaixo dessa profundidade. Nos organismos predomina a cor vermelha, laranja ou roxa, que pode protegê-los da bioluminescência produzida por predadores (luz azul, na maioria), embora muitos não possuam coloração.

Em oposição à miniaturização, o gigantismo ocorre em alguns grupos de invertebrados, como em anfípodes necrófagos, alguns isópodes, camarões carídeos e em holotúrias em áreas oligotróficas, o que contradiz o problema da falta de alimento. O fato está ligado ao efeito do metabolismo baixo sob alta pressão e/ou baixa temperatura e escassez de alimento que reduzem taxas de crescimento e aumentam a longevidade, ou seja, são organismos com crescimento lento e idade muito avançada, chegando a dezenas ou centenas de anos.

As características biológicas gerais da fauna do mar profundo são: taxas metabólicas e nível de atividade baixos; baixa concentração de enzimas e de proteínas; conteúdo de água do corpo alto para o equilíbrio com a pressão da água; crescimento lento e alta longevidade; baixa taxa de colonização, baixas densidades populacionais, baixa mortalidade (devido à baixa pressão de predação); maturidade sexual lenta e tardia, poucos ovos de tamanhos grandes, gametogênese e desenvolvimento embriológico lentos.

Os únicos organismos produtores primários no mar profundo são bactérias e arqueias quimiossintetizantes associadas às fontes hidrotermais quentes ("*hydrothermal vents*") e exsudações frias ("*cold seeps*"), sendo as primeiras associadas às fendas das cordilheiras meso-oceânicas. As fontes hidrotermais ou plumas constituem um oásis no mar profundo. São circundadas por grandes

populações de animais, com uma enorme biomassa, como os vermes vestimentíferos e mexilhões, que têm bactérias simbiontes em seus tecidos, as quais fornecem matéria orgânica para esses invertebrados por meio de quimiossíntese. As bactérias utilizam o sulfeto eliminado nas plumas como fonte primária de energia para síntese de matéria orgânica.

Além dessas, há outras comunidades especiais. As carcaças de baleias, que chegam ao mar profundo, têm associadas a elas comunidades especiais, em particular os vermes-zumbi (Siboglinídeos do gênero *Osedax*). Esses vermes "enraizam" seus tecidos dentro dos ossos e, em simbiose com bactérias, utilizam o tutano (com alto conteúdo de lipídios) para produzir a energia para seu metabolismo.

Pesquisas recentes revelaram inesperados ecossistemas de coral, em plataforma continental, talude, montes marinhos e sistemas de cordilheiras, em águas frias, com temperaturas entre 4 e 12°C. Estas condições são encontradas em maiores profundidades (até 4.000 m) abaixo de massas d'água quentes, em baixas latitudes, e em águas relativamente rasas (~50 a 1.000 m), em altas latitudes.

Os corais ocorrem individualmente, como colônias isoladas, em pequenos recifes de vários metros quadrados, ou formam grandes recifes e montes gigantes de carbonato de até 300 m de altura e vários quilômetros de diâmetro, formados de mil a milhões de anos atrás.

Os corais de águas frias são cnidários que incluem corais pétreos (Scleractinia), octocorais (gorgônias, corais-joia, corais bambu), corais negros (Anthipatharia) e hidrocorais (Stylasteridae), que são azooxantelados (sem os dinoflagelados simbiontes). Estes corais são alimentados pela produção primária da água de superfície, transportada para o fundo oceânico. Estão ameaçados por dragagens de fundo, perfuração de petróleo e mineração. A acidificação do oceano tem efeito potencial na redução da calcificação dessa fauna, principalmente nos mares do Norte.

## 2.3 Bentos na Antártica

A Antártica é um continente muito inóspito, exceto no verão; porém, embaixo d'água o bentos é muito diverso e abundante. As águas polares costeiras e rasas são cobertas a maior parte do ano por gelo. Desse modo, o bentos está sujeito a um fator de perturbação – o efeito do gelo – que não ocorre em outras regiões marinhas. Durante o inverno, o gelo forma uma espessa camada, que reduz a penetração de luz e afeta a produção primária do plâncton e a quantidade de alimento que chega ao fundo.

Outro efeito importante do gelo sobre as comunidades bentônicas ocorre durante o verão, quando icebergs se desprendem, são deslocados pelos ventos e correntes e causam escavações no fundo, os "*ice-scours*", por ação mecânica, causando a destruição ou remoção da fauna (Fig. 17).

No inverno, até cerca de 30 m de profundidade, pequenas placas de gelo – "*anchor ice*" - se formam no fundo e à medida que aumentam de tamanho cercam os invertebrados sésseis ou sedentários que, em geral, congelam. À medida que aumentam, ficam menos densas que a água do mar e deixam o fundo carregando os invertebrados, podendo suspender até 25 Kg de sedimento.

Pode ocorrer ainda o congelamento de áreas maiores do fundo pelo contato com o gelo que se forma rapidamente a partir da costa, fenômeno chamado de "*ice foot*". Com exceção do efeito do gelo em áreas costeiras, o ambiente marinho possui temperaturas baixas o ano todo e, com exceção do degelo, não há deságue de rios trazendo água doce para o mar.

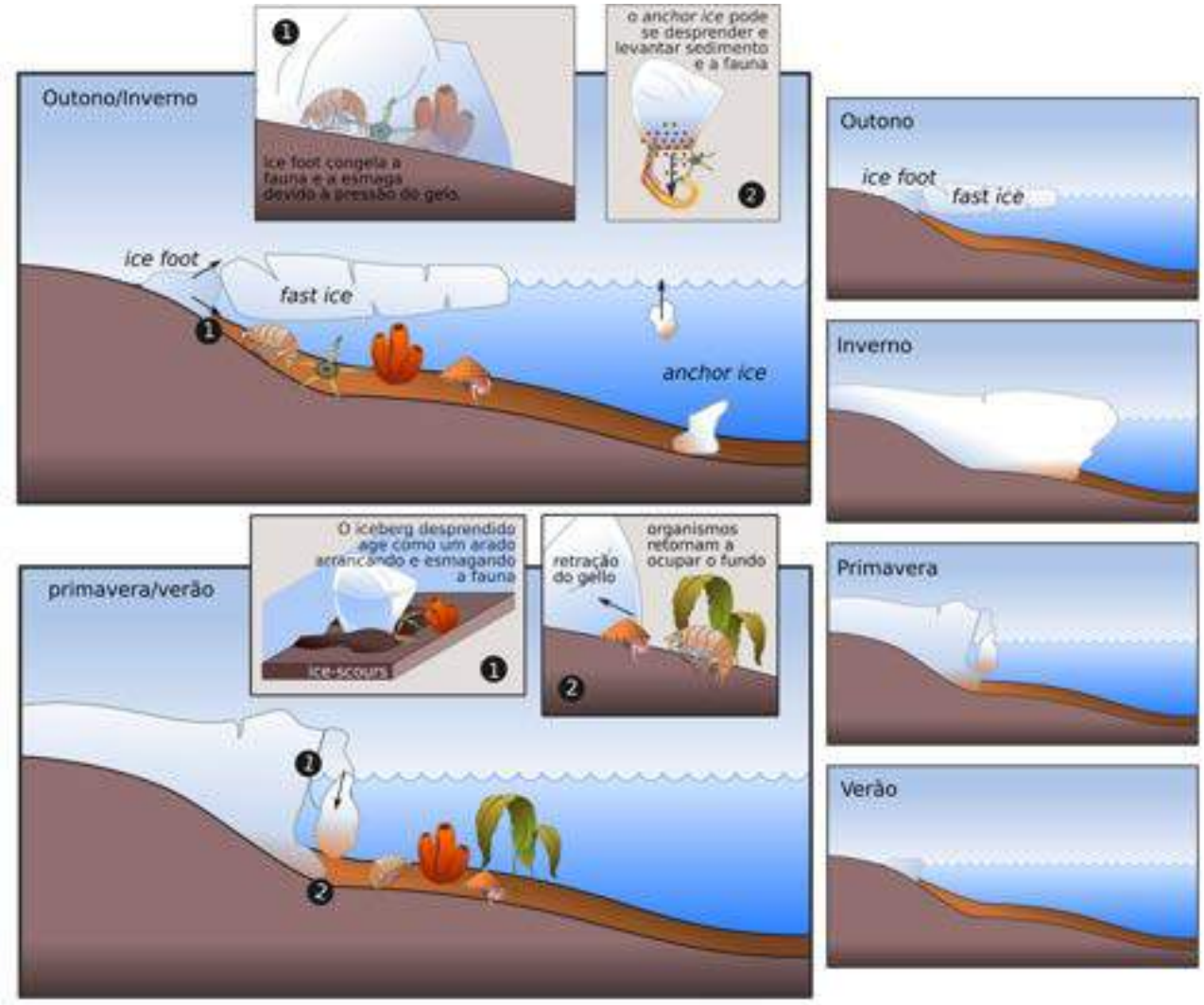



**FIGURA 17.** Comportamento do gelo nas diferentes estações do ano e sua influência nas comunidades bentônicas.

Por essas razões, as áreas submersas mais rasas, até onde o efeito do gelo se estende, não têm comunidades permanentes. As macroalgas se desenvolvem nos fundos duros quando o gelo derrete. Durante o período livre de gelo, essas áreas são habitadas por organismos vágeis ou transitórios, como anfípodes e os gastrópodes *Nacella*, e os organismos sésseis são raros. Mais abaixo, os invertebrados são abundantes, com alta riqueza de espécies e comunidades características, com uma zonação relacionada à variação de fatores ambientais associados à profundidade, como o tipo de sedimento e a quantidade de alimento. Na Antártica, a biomassa em qualquer profundidade é cerca de uma a duas ordens de magnitude maior que no Ártico. Esse fato está provavelmente relacionado à água mais rica em nutrientes e à alta produtividade das águas sobre a plataforma, quando a luz se torna disponível durante o verão. Além disso, a fauna da Antártica tem um alto grau de endemismo relacionado à longa história evolutiva e isolamento das plataformas de outros continentes.

A fauna bentônica tem baixa taxa metabólica, gigantismo de alguns invertebrados, longevidade prolongada, baixas taxas de crescimento, baixa fecundidade, reprodução sazonal e atraso na maturidade dos organismos. Essas características são similares às da fauna de mar profundo, devido à baixa temperatura da água e à disponibilidade esporádica de alimento.

Em áreas costeiras, além do fitoplâncton, o microfitobentos, detritos de macroalgas, bem como as algas de gelo, têm grande importância na teia trófica como fonte de matéria orgânica para o bentos.

## 3. Biodiversidade bentônica

Aqui apresentamos os principais agrupamentos de organismos marinhos com base em sua função no ambiente: produtores primários, consumidores e estruturantes, exemplificando alguns de seus componentes (Fig. 18), e como se dá o fluxo de matéria e energia nesse sistema.

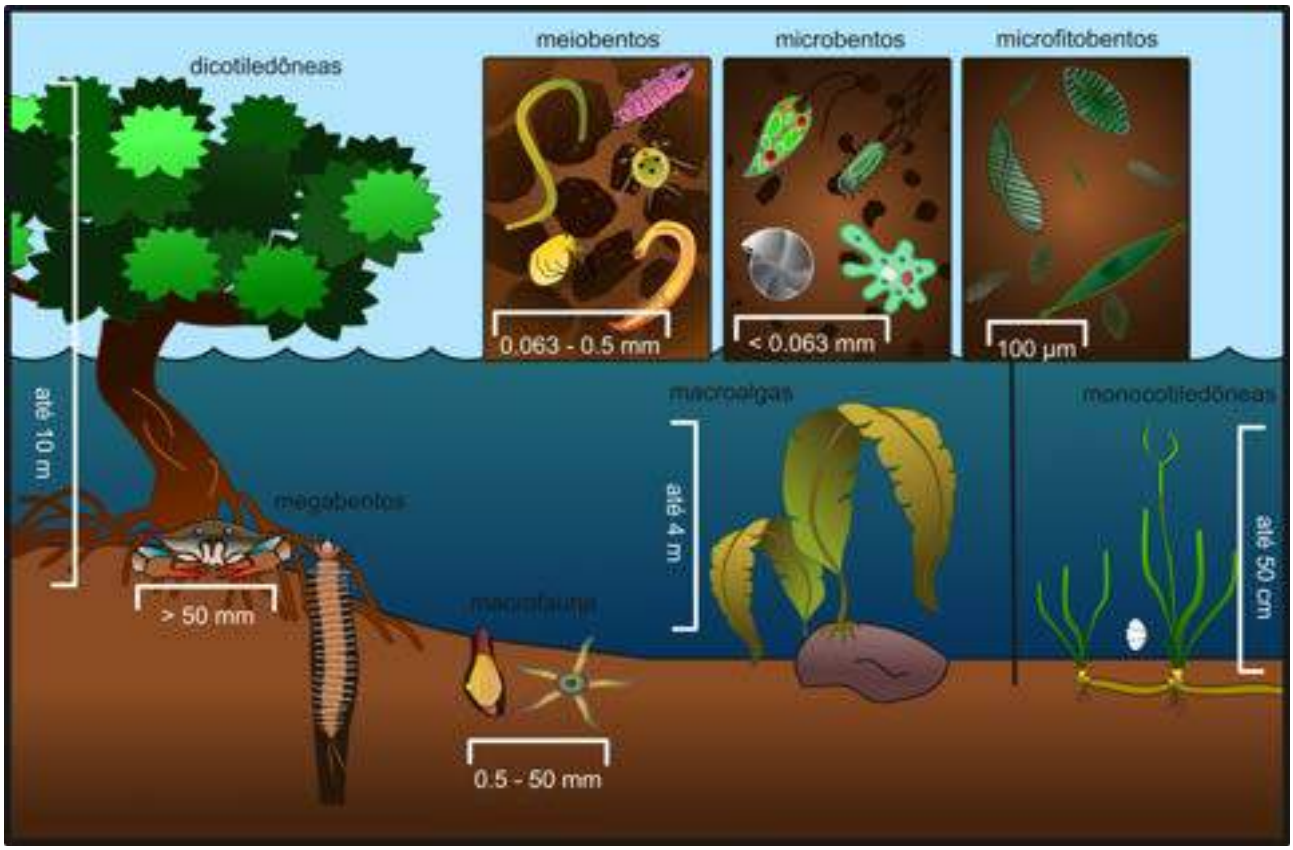



**FIGURA 18.** Principais tipos de organismos bentônicos marinhos, com base em seus tamanhos, posição trófica (produtores primários e consumidores) e hábitos de vida.

### 3.1 Produtores primários

O Fitobentos utiliza a energia luminosa para fixar $CO_2$ em matéria orgânica, realizando a fotossíntese.

#### *3.1.1 Microfitobentos*

Importantes produtores primários em águas rasas; na plataforma rasa podem crescer em intensidades luminosas muito baixas, inferiores a 1% da radiação incidente na superfície. Seus componentes são microalgas eucariontes e cianobactérias fotossintetizantes (micro-autotróficos); diatomáceas, particularmente penadas, também diatomáceas cêntricas, incluindo algumas que sedimentam do plâncton, e outras que são frequentemente ressuspendidas; cianobactérias; clorófitas; dinoflagelados (Dinophyceae, Euglenóides) – *Euglena*. O microfitobentos está presente em habitats de águas rasas nos primeiros milímetros de sedimentos entremarés, lagunas, estuários, marismas e áreas vegetadas do sublitoral, sobre diversas superfícies, como rochas, em sedimentos da região nerítica (< 60 m de profundidade) e em gelo marinho.

### *3.1.2 Macroalgas (verdes, vermelhas e pardas)*

Em geral presentes até 30-40 metros de profundidade, em fundos consolidados. Têm talo flexível, apressório para a fixação, fronde com células ativas nas duas superfícies, onde ocorre a absorção de nutrientes e a fotossíntese. Estão associadas às comunidades de outros organismos, sendo muito diversas. As macroalgas gigantes e "kelps" ocorrem em águas frias, ricas em nutrientes, onde atingem tamanhos de até 50 m, como *Macrocystis* e *Laminaria*. Há comunidades faunísticas muito diversas associadas a elas.

### *3.1.3 Plantas superiores*

Angiospermas marinhas, com raízes e flores, são principalmente produtores de detritos; há fauna muito rica associada. Incluem monocotiledôneas (seagrasses), como *Thalassia*, *Halodule*, *Halophila* e *Zostera*, geralmente submersas; marismas (salt-marshes), como *Spartina*, geralmente emersas; dicotiledôneas, como as árvores de manguezal, possuem adaptações à vida em sedimento mole, salgado e constantemente inundado: caules (raízes suporte e adventícias), folhas espessas, plântulas que se desenvolvem na planta mãe, como: *Rhizophora*, *Avicennia* e *Laguncularia*. O manguezal tem função muito importante de aprisionar sedimento fino e filtrar poluentes por meio de seu sistema radicular.

## 3.2 Consumidores (fauna)

### *3.2.1 Megafauna*

A megafauna é constituída por invertebrados e vertebrados (ex. peixes bentônicos) visíveis a olho nu e/ou que podem ser capturados por rede de arrasto de malha de 3 cm. Estrelas-do-mar, grandes caranguejos, camarões, lagostas, gastrópodes e polvos fazem parte desse grupo.

Foto: Leandro Coelho

### *3.2.2 Macrofauna*

A macrofauna ou macrobentos é o conjunto de animais que vivem no substrato dos ecossistemas aquáticos e que possuem tamanho maior ou igual a 1 mm e, portanto, são visíveis a olho nu. Esses organismos são geralmente menos móveis que o plâncton e o nécton. Em função disso, estão sujeitos às condições adversas do ambiente, visto a impossibilidade de fuga em situações desfavoráveis. Por esse motivo, o macrobentos é considerado um valioso bioindicador em casos de degradação do ambiente.

Os organismos bentônicos vivem em relação íntima com o substrato, podendo fixar-se a ele, perfurar, escavar ou caminhar sobre a sua superfície. Quanto à sua posição no substrato, podem ser epibentônicos (vivem sobre o substrato) ou endobentônicos (vivem no interior do substrato); quanto à sua mobilidade, em sésseis (fixos à uma superfície sólida - como cracas, corais, crinóides e ostras), sedentários (mobilidade limitada - moluscos bivalves, poliquetas, estrelas-do-mar, bolachas-da-praia) ou vágeis (possuem a capacidade de se movimentar sobre o substrato - caranguejos, caramujos e peixes bentônicos). Dentre os endobentônicos, existem os cavadores (moluscos bivalves, poliquetas e alguns crustáceos) e os perfuradores (alguns moluscos bivalves e poliquetas). Com relação aos hábitos alimentares, podem ser comedores de depósitos, suspensívoros (ou filtradores), herbívoros (consumindo algas e vegetais superiores), carnívoros ou necrófagos.

Os organismos macrobentônicos possuem grande importância socioeconômica, sendo cultivados pela maricultura para a produção de alimento, pérolas e ração animal (ex. mexilhão, ostras, camarão e vieiras); utilizados em estudos como indicadores de poluição marinha, por acumularem substâncias em seus tecidos (principalmente os moluscos filtradores); como espécies alvo de pescarias (ex. camarão, vieira e abalone); atrativos para o turismo de mergulho (principalmente os corais); e extração de compostos químicos bioativos para a produção de fármacos.

### *3.2.3 Meiofauna*

Grupo constituído de filos de animais pequenos (< 0,5 mm), pouco conhecidos, invisíveis para nós, que vivem entre os grãos do sedimento ou outros habitats marinhos e ocorrem desde as praias até o mar profundo. Podem ser muito numerosos, alcançando densidades de cerca de um milhão de indivíduos por metro quadrado no sedimento da plataforma continental.

Os grupos principais são: nematódeos, copépodes harpacticóides, tardígrados, quinorrincos, gastrótricos, gnatostomulídeos, ostrácodes e turbelários. Esses animais apresentam diversas adaptações para vida entre os grãos do sedimento: são, em geral, vágeis; têm corpo alongado, vermiforme ou achatado para o enterramento; têm cutícula resistente, com ornamentação ou placas, cílios, cerdas ou espinhos para proteção contra o esmagamento pelo sedimento; e glândulas adesivas ou garras para se prender aos grãos do sedimento.

Os nematódeos (filo Nematoda), em especial nos sedimentos, são muito abundantes; a maioria é pequena, têm corpos cilíndricos e delgados. Alimentam-se de bactérias, microalgas ou matéria orgânica, e alguns podem ser predadores. Estima-se que haja até meio milhão de espécies ainda a serem descobertas na meiofauna.

### *3.2.4 Microbentos ou nanobentos*

Constituído por organismos unicelulares, como protistas e bactérias heterotróficos. São muito importantes na reciclagem da matéria orgânica e como alimento para outros componentes do bentos.

### 3.3 Estruturantes/arquitetos

Nas comunidades bentônicas os organismos apresentam não apenas relações de transferência de matéria e energia ou competição por recursos, mas desempenham funções importantes para toda a estrutura do ecossistema. Uma dessas funções, que pode estar associada a outras, consiste na remodelagem do espaço físico.

Tais organismos são denominados estruturadores ou bioconstrutores. Esses organismos conferem maior complexidade aos ecossistemas, criando condições ambientais muito específicas. A maior parte desses organismos compõe o que chamamos de biota séssil, ou seja, que permanece presa ao fundo de forma mais ou menos permanente. Dentre os grupos de organismos bentônicos com essa função podemos destacar:

**Macroalgas:** Mencionadas no item produtores primários, as macroalgas podem possuir frondes com características muito variáveis. Há ainda grande diversidade de algas calcárias, que contribuem para a construção dos recifes, por exemplo. As frondes de algas podem ainda atuar na redução do fluxo das correntes marinhas próximas ao fundo, favorecendo a deposição de sedimentos que, eventualmente, podem ser agregados ao fundo.

**Poríferos:** Apesar de não parecerem, as esponjas são animais muito complexos que podem alcançar grande tamanho, dominando o fundo em diversas regiões do planeta. Por sua natureza porosa e repleta de cavidades, as esponjas tornam-se verdadeiros condomínios com diversos animais associados, como camarões, equinodermos e até mesmo cnidários. Parte considerável de sua biomassa, na verdade, é de micro-organismos associados que vivem nos espaços disponíveis.

**Cnidários:** Dentre estes animais, o grupo mais emblemático é o dos corais que, como mencionado anteriormente, podem formar grandes estruturas, por vezes com muitos quilômetros de extensão. Seu esqueleto calcário confere grande complexidade aos ecossistemas e seu crescimento é geralmente muito lento. Outros grupos de cnidários, como as gorgônias, possuem esqueletos mais flexíveis, e também podem atuar reduzindo o fluxo da água no local.

**Moluscos:** Alguns grupos de moluscos, como gastrópodes vermetídeos, podem contribuir de forma importante para a estrutura de comunidades bentônicas, formando aglomerados de tubos calcários muito extensos. Espécies de bivalves sésseis, como mexilhões e ostras, também podem formar recifes bastante complexos.

**Poliquetas:** Alguns destes anelídeos podem secretar tubos calcários ou ainda formar grandes condomínios aglutinando areia do ambiente.

**Crustáceos:** As cracas são crustáceos muito modificados, o que faz com que muitas pessoas não os reconheçam como animais relacionados com camarões e caranguejos, por exemplo. Sua estrutura externa calcificada auxilia na estruturação de microhabitats importantes para outras espécies.

**Ascídias:** Trata-se de um grupo de animais pouco conhecido das pessoas, mas que pode formar colônias também bastante grandes. Alimentam-se por filtração, assim como as esponjas, e muitas vezes são confundidos com esses animais por seu aspecto externo.

**Briozoários:** São também animais bastante comuns e que podem por vezes formar estruturas bastante complexas, com formas incrustantes ou arborescentes. Suas colônias podem ser confundidas até mesmo com macroalgas num olhar descuidado.

## 4. Fluxo de matéria e energia nos diferentes sistemas

Os organismos do bentos têm papel importante nas tramas tróficas marinhas. Um dos papéis mais importantes dessas comunidades é receber detritos orgânicos e convertê-los em biomassa de invertebrados, que por sua vez serve como alimento para peixes demersais e outros predadores, constituindo a produção secundária. Além disso, nas regiões costeiras há os vegetais fotossintetizantes e em áreas do mar profundo, os quimiossintetizantes.

Nos ecossistemas, há inúmeras ligações tróficas entre os organismos, formando as chamadas de teias tróficas. A teia se inicia com os produtores primários autotróficos, que sintetizam matéria orgânica a partir de elementos inorgânicos, formando o primeiro nível trófico.

Espécies herbívoras do bentos, que se alimentam diretamente de algas marinhas (ex. gastrópodes e ouriços), constituem o segundo nível trófico e são denominados consumidores primários. Os níveis tróficos subsequentes são formados por espécies carnívoras que se alimentam de espécies herbívoras (consumidores secundários, como os caranguejos) e por carnívoros que se alimentam dos carnívoros menores (consumidores terciários, como alguns peixes).

No caso do bentos, há uma forte conexão com o que se processa na coluna d'água, pois muitos animais bentônicos são filtradores e muitos animais do nécton se alimentam no bentos. Além disso, a maior parte dos organismos bentônicos possui uma fase da vida no plâncton. Esses processos de conexão entre os compartimentos marinhos formam o que se chama de acoplamento bento-pelágico.

Foto: Leandro Coelho

## 5. Relação entre o ambiente e os organismos

Os organismos bentônicos ocupam os diferentes habitats descritos acima, apresentando diferentes adaptações. Os organismos que habitam a faixa entremarés, tanto em substratos consolidados como não consolidados, possuem adaptações morfológicas, fisiológicas e comportamentais que permitem a eles enfrentar as periódicas emersões nos períodos das marés baixas. Por exemplo, moluscos retém água dentro de suas conchas fechadas (valvas unidas em bivalves e vedação com opérculo em gastrópodes) para evitar a dessecação e o aumento excessivo da temperatura.

Em grandes profundidades, os organismos possuem adaptações para enfrentar a ausência de luz, como a bioluminescência, e seus corpos são preenchidos unicamente por sólidos e líquidos, sem espaços preenchidos por gás, como pulmões ou bexigas natatórias. Os líquidos, por serem incompressíveis, são pouco afetados pela grande pressão.

Em relação ao tipo de substrato, os organismos que ocupam fundos consolidados podem apresentar diversas adaptações para enfrentar as condições hidrodinâmicas e se fixarem a esses locais, como cimentação (ostras, cracas), filamentos de bisso (moluscos mitilídeos), ventosas (gastrópodes, pepinos do mar) e construção de galerias (poliquetas do gênero *Phragmatopoma*).

Dentre os organismos que não se fixam ao substrato consolidado, estão crustáceos (caranguejos e isópodes - baratas-da-praia), que possuem agilidade para se abrigarem em fendas quando as ondas atingem a costeira.

Já os organismos que ocupam fundos não consolidados são, em sua maioria, endofaunais. Para conseguirem viver no interior do sedimento, esses organismos possuem adaptações para a escavação (pés musculosos dos moluscos bivalves, abdome de alguns crustáceos) ou para a construção de tubos e galerias (muitos poliquetas e alguns crustáceos).

O caranguejo "maria-farinha", por exemplo, utiliza suas quelas para retirar areia de dentro de sua galeria, aprofundando-a e limpando-a. O poliqueta *Diopatra* constrói tubos elaborados com muco, grãos de areia e fragmentos diversos, dentro do qual permanece por toda sua vida.

Espécies eurialinas são definidas como aquelas que possuem adaptações para suportarem grandes variações de salinidade, estando aptas a ocuparem ambientes desafiadores, como os estuários. Da mesma forma, espécies euritérmicas conseguem enfrentar grandes variações de temperatura, podendo ocupar ambientes com aflorações de águas profundas geladas, como ocorre no evento das ressurgências.

Como mencionado anteriormente, a luz é um importante fator ambiental que influencia o funcionamento do bentos. A água do mar e as partículas que se encontram em suspensão funcionam como um filtro para a luz do sol, modificando não apenas sua intensidade, mas também a qualidade da luz, pois tem uma capacidade de atenuação diferente conforme o comprimento de onda da radiação luminosa.

Conforme afundamos na coluna d'água, temos a percepção de que o colorido marinho vai mudando. Na verdade o que ocorre é que quem está mudando é a luz, pois o que vemos é apenas a sua reflexão. O espectro luminoso é afetado de tal forma que cores como vermelho e amarelo são extintas logo nos primeiros metros da coluna d'água, restando, por último, a luz azul, que pode penetrar muitas dezenas de metros (Fig. 19).

A luz é um elemento essencial para a maior parte da vida marinha e no bentos não é diferente. Em águas marinhas muito transparentes, a luz é capaz de penetrar até cerca de 200 m de profundidade. A maior parte das zonas rasas costeiras, no entanto, não possuem águas muito transparentes por conta da maior produtividade e presença de partículas em suspensão. Nessas áreas, a penetração de luz é muito menor, por vezes chegando até poucos metros. A zona que recebe luz nos ambientes marinhos é chamada de **zona fótica**, ao passo que as regiões mais profundas onde não há mais luz compõem a **zona afótica**.

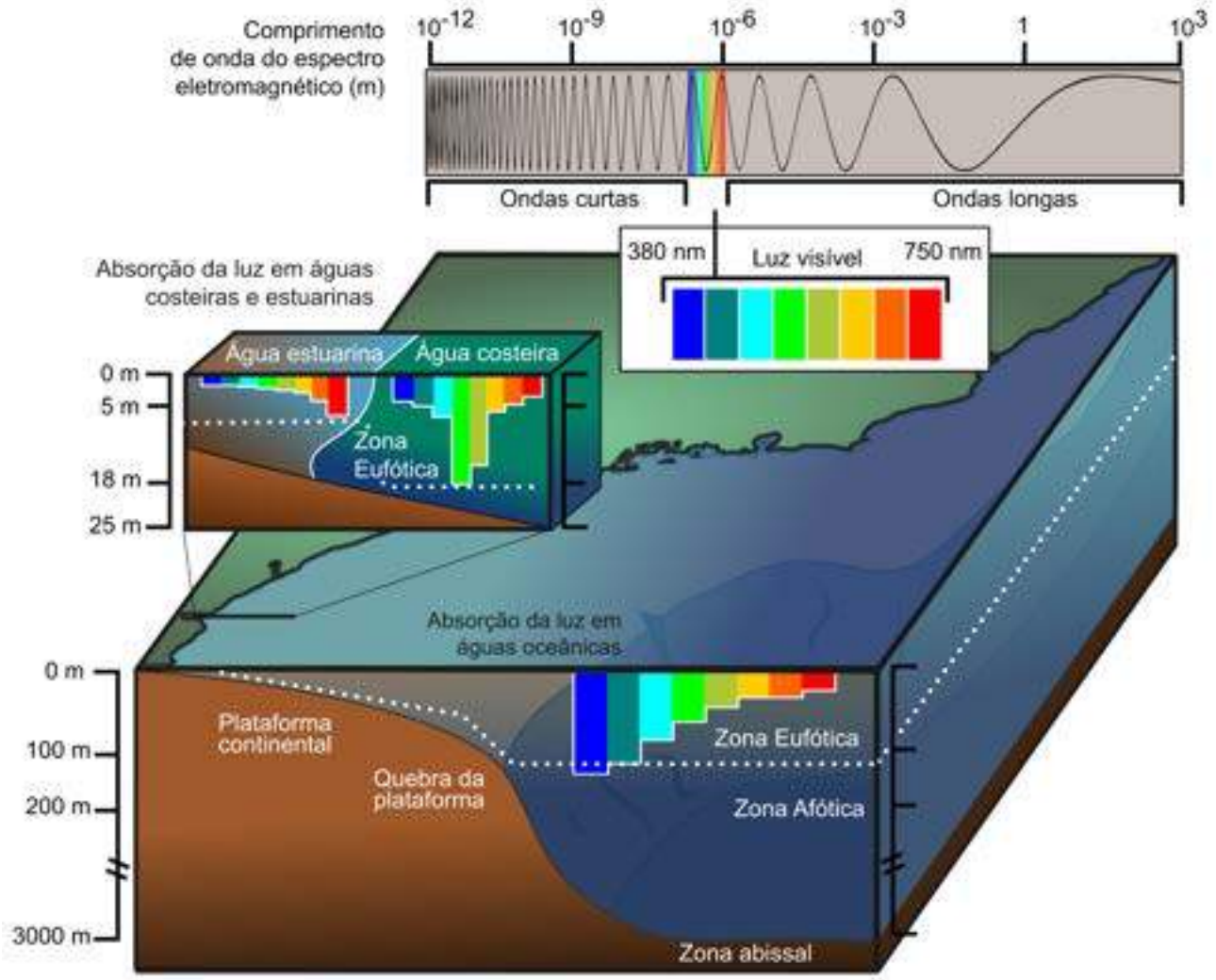



**FIGURA 19.** Penetração da luz visível na coluna d'água, indicando as zonas eufótica e afótica, e o processo de absorção da luz em águas costeiras e estuarinas.

Para os produtores primários, como as algas, a vida depende totalmente da existência de luz suficiente para o organismo obter sua energia com taxas em que a fotossíntese seja maior que a respiração. Dessa forma, o fitobentos está sempre restrito a uma fração variável da zona fótica.

Como mencionado anteriormente, a luz é essencial também para os recifes de coral, nos quais corais, moluscos e outros organismos dependem da produção primária das zooxantelas presentes em seus tecidos.

Dessa forma, há um gradiente luminoso conforme se mergulha para profundidades cada vez maiores, e este gradiente reflete-se na composição e estrutura da biota bentônica.

## 6. Poluição e outros impactos antrópicos

O mar está, por imposição gravitacional, destinado a receber todos os resíduos gerados pelas atividades humanas, tanto em terra como no próprio mar. Assim, recebe produtos agrícolas (inorgânicos e orgânicos), fertilizantes ou tóxicos, além dos esgotos domésticos, resíduos sólidos e resíduos industriais lançados nos rios ou diretamente ao mar.

Organismos marinhos bentônicos possuem uma forte associação com o ambiente onde vivem, apresentando locomoção limitada, geralmente passando todo seu período de vida pós-estabelecimento larval em um mesmo local, uma vez que suas larvas se estabelecem em áreas favoráveis ao sucesso da espécie. Sua mortalidade é muitas vezes causada por distúrbios ambientais, naturais ou antrópicos, aos quais muitas espécies não resistem.

Os principais distúrbios causados pelo ser humano ao ambiente marinho, bem como suas consequências para os organismos, ecossistemas e seres humanos, são:

### 6.1 Contaminação química

Dejetos industriais despejados por emissários submarinos, derramamentos de petróleo e produtos utilizados para sua remoção, biocidas em tintas anti-incrustantes utilizados em cascos de embarcações, fármacos provenientes da urina humana. Tais substâncias podem ter efeitos deletérios aos organismos expostos a elas, podendo os metabólitos produzidos terem efeitos carcinogênicos, mutagênicos ou teratogênicos assim como causar desbalanço hormonal.

### 6.2 Contaminação orgânica

Esgotos domésticos, aporte de nutrientes e resíduos oriundos da agricultura, da pecuária e da maricultura. O aporte desses materiais leva ao processo de eutroficação e à criação de zonas mortas, onde restam apenas bactérias anaeróbias. O contato com bactérias patogênicas pode causar infecções e morte aos organismos marinhos, em especial àqueles de interesse econômico, prejudicando atividades econômicas como a maricultura e a pesca.

### 6.3 Resíduos sólidos domésticos

Oitenta porcento dos resíduos que chegam ao mar têm origem terrestre (doméstica, industrial, turismo) e 20%, origem marinha (embarcações de pesca, transporte e turismo, plataformas de petróleo, portos). Cerca de 90% dos resíduos encontrados no mar são algum tipo de plástico.

Diversos são os efeitos do lixo sobre a biota, podendo ser agudos (morte) ou crônicos (efeito no metabolismo e balanço energético), os quais podem ser causados pela ingestão, sufocamento ou emaranhamento (ex. pesca-fantasma).

Grandes perdas econômicas podem atingir os seres humanos, como danos às embarcações, prejuízos à pesca e ao turismo, deterioração ambiental e disseminação de doenças.

## 6.4 Acidificação do oceano

O pH da água do oceano vem baixando e, portanto, tornando-se mais ácido, devido ao aumento dos gases do efeito estufa na atmosfera e a consequente dissolução do dióxido de carbono ($CO_2$) atmosférico no oceano. Estima-se que o oceano absorva cerca de 25% do $CO_2$ antropogênico, reduzindo fortemente os impactos desses gases no clima do nosso planeta. No entanto, esse benefício à atmosfera tem consequências sérias ao oceano. A absorção do $CO_2$ altera a química da água, levando a um aumento na formação de ácido carbônico. A água torna-se mais corrosiva, prejudicando a sobrevivência de organismos de interesse ecológico e econômico que dependem do carbonato de cálcio ($CaCO_3$), como os moluscos e os corais.

## 6.5 Outros distúrbios

Em linhas gerais, além da poluição, descrita acima, o oceano está sob a ameaça de quatro outras atividades derivadas da ação humana: destruição ou degradação de habitats (ex. erosão costeira e supressão de manguezais e restingas), sobrepesca, invasão de espécies exóticas e mudanças no clima. A acidificação é um efeito das mudanças no clima causadas pelo aumento das emissões de $CO_2$.

A perda da saúde do ambiente marinho reverte-se em prejuízos para o próprio ser humano e suas atividades. Um ambiente degradado perde a capacidade em prover recursos e serviços para a sociedade, de forma que o desenvolvimento de atividades econômicas, tanto ligadas quanto não relacionadas ao oceano, dependem de um ambiente equilibrado. O bentos é um importante componente marinho nessa discussão, pois além de ser importante para a sociedade tem um relevante papel ao nos auxiliar como sentinela das mudanças que estamos causando no oceano.

Foto: Leandro Coelho

## Referências Bibliográficas

ABSALÃO, R. S. & ESTEVES, A. M. (eds). 1997. Ecologia de praias arenosas do litoral brasileiro, Rio de Janeiro, Oecologia Brasiliensis nº3.

AMARAL, A. C. Z., CORTE, G. N., ROSA FILHO, J. S., DENADAI, M. R., COLLING, L. A., BORZONE, C., VELOSO, V., OMENA, E. P., ZALMON, I. R., ROCHA-BARREIRA, C. A., SOUZA, J. R. B., ROSA L. C. & ALMEIDA, T. C. M. 2016. Brazilian sandy beaches: characteristics, ecosystem services, impacts, knowledge and priorities, Brazilian Journal of Oceanography, 64 (SI2), 5-16.

BAKER, J. M. & WOLFF, W. J. (eds). 1987. Biological surveys of estuaries and coasts, Cambridge, Cambridge University Press.

BARNES, R. S. K. & HUGHES, R. N. 1988. An introduction to Marine Ecology. 2nd ed., Oxford, Blackwell Scientific Publications.

BERCHEZ, F. A. S.; GHILARDI-LOPES, N. P.; CORREIA, M. D.; SOVIERZOSKI, H. H.; PEDRINI, A. G.; URSI, S.; KREMER, L. P.; ALMEIDA, R.; SCHAEFFER-NOVELLI, Y.; MARQUES, V. & BROTTO, D. S. 2016. Marine and coastal environmental education in the context of global climate changes - synthesis and subsidies for ReBentos (Coastal Benthic Habitats Monitoring Network), Brazilian Journal of Oceanography, 64 (SI2), 137-156.

BERNARDINO, A. F., PAGLIOSA, P. R., CHRISTOFOLETTI, R. A., BARROS, F., NETTO, S. A., MUNIZ, P. & LANA P. C. 2016. Benthic estuarine communities in Brazil: moving forward to long term studies to assess climate change impacts, Brazilian Journal of Oceanography, 64 (SI2), 81-96.

COPERTINO, M. S., CREED, J. C., LANARI, M. O., MAGALHÃES, K., BARROS, K., LANA, P. C., SORDO, L. & HORTA, P. A. 2016. Seagrass and Submerged Aquatic Vegetation (VAS) Habitats off the Coast of Brazil: state of knowledge, conservation and main threats, Brazilian Journal of Oceanography, 64 (SI2), 53-80.

CORTE, G. N., CHECON, H. H. & AMARAL, A. C. Z. (Eds.). (No prelo) Brazilian Sandy Beach Biodiversity, vol. V, In: Turra, A. (Org.) Brazilian Marine Biodiversity, São Paulo, Springer.

COUTINHO, R., YAGINUMA, L. E., SIVIERO, F., DOS SANTOS, J. C. Q. P., LÓPEZ, M. S., CHRISTOFOLETTI, R. A., BERCHEZ, F., GHILARDI-LOPES, N. P., FERREIRA, C. E. L., GONÇALVES, J. E. A., MASI, B. P., CORREIA, M. D., SOVIERZOSKI, H. H., SKINNER, L. F. & ZALMON, I. R. 2016. Studies on benthic communities of rocky shores on the Brazilian coast and climate change monitoring: status of knowledge and challenges, Brazilian Journal of Oceanography, 64 (SI2), 27-36.

GRAY, J. S. & ELLIOT, M. 2009. Ecology of Marine Sediments from Science to Management, 2nd ed., New York, Oxford Univ. Press Inc.

HOLME, N.A. & MCINTYRE, A.D. 1984. Methods for Study of Marine Benthos, 2nd ed., Oxford, Blackwell Sci.

HORTA, P. A., RIUL, P., AMADO FILHO, G. A., GURGEL, C. F. D., BERCHEZ, F., NUNES, J. M. C., SCHERNER, F., PEREIRA, S., LOTUFO, T., PERES, L., SISSINI, M., BASTOS, E. O., ROSA, J., MUNOZ, P., MARTINS, C., GOUVÊA, L., CARVALHO, V.,

BERGSTROM, E., SCHUBERT, N., BAHIA, R. G., RODRIGUES, A. C., RÖRIG, L., BARUFI, J. B. & FIGUEIREDO, M. 2016. Rhodoliths in Brazil: Current knowledge and potential impacts of climate change, Brazilian Journal of Oceanography, 64 (SI2), 117-136.

LALLI, C. M. & PARSONS, T. R. 1997. Biological Oceanography: an introduction, Oxford, Butterworth-Heinemann.

LANA, P. C., BERNARDINO, A. F. (Eds.) 2018. Brazilian Estuaries, vol. I., In: Turra, A. (Org.) Brazilian Marine Biodiversity, São Paulo, Springer.

LEÃO, Z. M. A. N., KIKUCHI, R. K. P., FERREIRA, B. P., NEVES, E. G., SOVIERZOSKI, H. H., OLIVEIRA, M. D. M., MAIDA, M., CORREIA, M. D. & JOHNSSON R. 2016. Brazilian coral reefs in a period of global change: A synthesis, Brazilian Journal of Oceanography, 64 (SI2), 97-116.

LERMAN, M. 1986. Marine Biology, Menlo Park, Benjamin Cummings.

LEVINTON, S. 2001. Marine Biology. Function, Biodiversity, Ecology, 2nd ed., New York, Oxford University Press, 515 p.

MARIA, T. F., WANDENESS, A.P. & ESTEVES, A. M. 2016. State of the art of the meiofauna of Brazilian Sandy Beaches, Brazilian Journal of Oceanography, 64 (SI2), 17-26.

NYBAKKEN, J. W. 2001. Marine biology: an ecological approach, 5th ed., São Francisco, Benjamin Cummings.

PEREIRA, R. C. & SOARES-GOMES, A. (Orgs). 2021. Ecologia Marinha, Rio de Janeiro, Interciência.

RUPPERT, E. E. & BARNES, R. D. (Eds). 1996. Zoologia dos Invertebrados, 6ª ed., São Paulo, Editora Roca.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y. 1995. Manguezal: Ecossistema entre a terra e o mar, São Paulo, Caribean Ecological Research.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y., SORIANO-SIERRA, E. J., VALE, C. C., BERNINI, E., ROVAI, A. S., PINHEIRO, M. A. A., SCHMIDT, A. J., ALMEIDA, R., COELHO JÚNIOR, C., MENGHINI, R. P., MARTINEZ, D. I., ABUCHAHLA, G. M. O., CUNHA-LIGNON, M., CHARLIER-SARUBO, S., SHIRAZAWA-FREITAS, J. & CINTRÓN-MOLERO, G. 2016. Climate changes in mangrove forests and salt marshes, Brazilian Journal of Oceanography, 64 (SI2), 37-52.

SCHAEFER-NOVELLI, Y., CINTRÓN-MOLERO, G. & ABUCHAHLA, G. M. O. (Eds). (No prelo). Brazilian Mangrove Biodiversity, vol. IV, In: Turra, A. (Org.) Brazilian Marine Biodiversity, São Paulo, Springer.

SUMIDA, P. Y. G., BERNARDINO, A. F. & DE LÉO, F. C. (Eds.). 2020. Brazilian Deep-Sea Biodiversity, vol. III, In: Turra, A. (Org.) Brazilian Marine Biodiversity, São Paulo, Springer.

TURRA, A. & DENADAI, M. R. (Orgs). 2015. Protocolos para o Monitoramento de Habitats Bentônicos Costeiros - Rede de Monitoramento de Habitats Bentônicos Costeiros (ReBentos), São Paulo, IOUSP.

UNDERWOOD, A J. & CHAPMAN, M. G. (Eds). 2005. Coastal marine ecology of temperate Australia, Sydney, University of New South Wales Press.

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 30*

# MANGUEZAL: ECOSSISTEMA ENTRE A TERRA E O MAR

*Yara Schaeffer-Novelli, Guilherme Moraes de Oliveira Abuchahla & Clemente Coelho-Jr.*

REVISÃO: VICENTE GOMES

CITAÇÃO SUGERIDA: SCHAEFFER-NOVELLI, Yara; ABUCHAHLA, Guilherme Moraes de Oliveira; COELHO-JÚNIOR, Clemente. Manguezal: ecossistema entre a terra e o mar. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 30: p. 683-702.

# Manguezal: Ecossistema entre a Terra e o Mar

*Yara Schaeffer-Novelli, Guilherme Moraes de Oliveira Abuchahla & Clemente Coelho-Jr.*

## 1. Introdução

Manguezais colonizam paisagens costeiras de climas tropical e subtropical, em espaços abrigados com relevo suave, onde as marés atuam de forma a delimitar os terrenos passíveis de colonização pelas plantas típicas. Podem estar associados a corpos de água estuarina ou diretamente de frente para o mar.

A paisagem costeira é modelada numa escala de tempo geológica de milhares a milhões de anos, por diversas forças controladoras que podem ser organizadas em forçantes atmosféricas/hidrográficas e forçantes oceanográficas/geológicas. As mesmas forçantes atuam sobre o ecossistema manguezal em menor escala de tempo, de meses à décadas, criando gradientes ambientais típicos, onde as marés são um dos principais mecanismos de manutenção do ecossistema (Fig. 1).

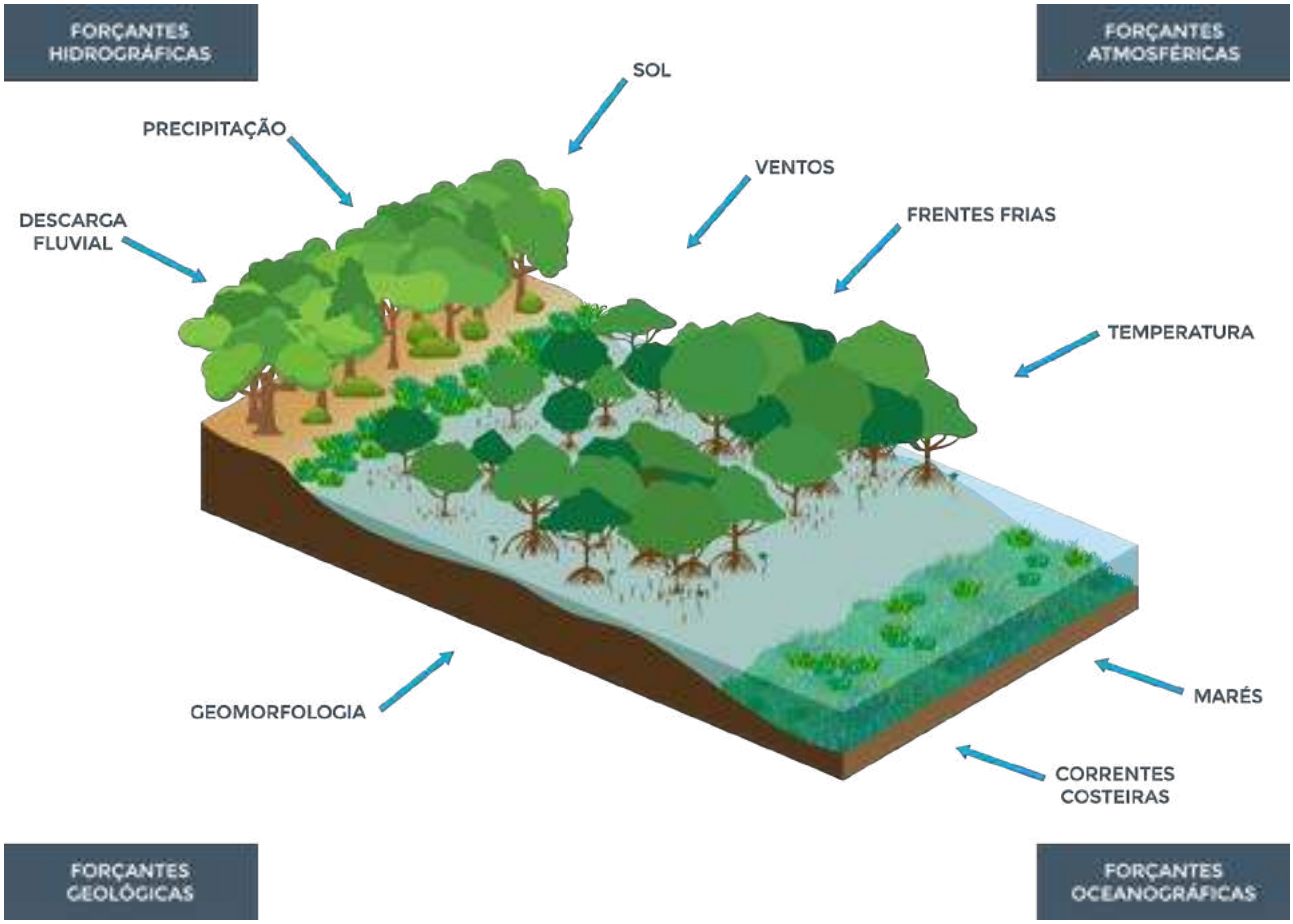



**FIGURA 1.** **Forças controladoras do desenvolvimento da paisagem e do gradiente ambiental dentro do ecossistema manguezal.** *Ilustração: Leandro Coelho, adaptada de Twilley (2001).*

As marés, como motrizes da penetração das águas marinhas no interior da costa, por meio dos segmentos a jusante das bacias hidrográficas, são o agente de formação e de manutenção dos substratos dos manguezais, aptos a serem colonizados pelas espécies típicas de mangue (cobertura vegetal), tolerantes ao sal (classificadas como halófitas facultativas). As preamares atingem os pontos mais internos e distantes da costa pelo intrincado sistema de pequenos canais de maré (chamados popularmente de gamboas ou camboas), lavando o substrato dos manguezais por ocasião das vazantes. Dessa forma, a matéria orgânica sintetizada pelas plantas do manguezal supre uma miríade de organismos detritívoros, constituindo a base de consumidores da teia trófica estuarino-costeira. O limite do manguezal coincide com o limite máximo até onde penetra a água salgada (preamares de sizígia) na planície costeira.

Ao longo da zona entremarés, encontramos um *continuum* de feições características do ecossistema manguezal, onde se destacam o **lavado** (na frente do bosque de mangue), o **bosque de mangue** (cobertura vegetal típica) e o **apicum** (feição do manguezal praticamente desprovida de vegetação arbórea) que pode estar na faixa de transição do ecossistema com a terra firme ou no meio do bosque de mangue.

A frequência com que os bosques de mangue são inundados pelas preamares depende do relevo do terreno e da distância em relação ao corpo d'água adjacente (rio, baía, laguna). Bosques próximos ao corpo d'água geralmente possuem topografia mais baixa, enquanto que bosques mais distantes, próximos à terra firme, colonizam áreas mais elevadas e, por conseguinte, com menor frequência de inundação pelas preamares. Isso faz com que se crie um gradiente de inundação, afetando diretamente a salinidade da água intersticial no sedimento do manguezal.

A concentração da salinidade da água intersticial do sedimento, ao longo da zona entremarés, é influenciada pela pluviosidade, drenagem terrestre e penetração da água no sedimento (infiltração). Nas zonas de cotas mais baixas do terreno, a salinidade é praticamente a mesma da água das marés, podendo chegar a 35 (ou mais alta dependendo da insolação) ou abaixo desse valor em sistemas onde atuam fortes descargas fluviais. Já a zona com menor frequência de inundação, topograficamente mais alta, é fortemente influenciada pelas características climáticas da região.

Em regiões com déficit hídrico, ou seja, onde a taxa anual de precipitação é menor que a taxa de evapotranspiração, a salinidade intersticial e superficial na zona topograficamente mais elevada e com menor frequência de inundação é geralmente alta, podendo chegar a mais de 90 (limite de tolerância ao sal das espécies típicas de mangue). Nesse trecho podemos encontrar a feição apicum, desprovida de vegetação vascular, mas rica em nutrientes, abundância em plantas halófitas, além de microalgas e de cianofíceas (Fig. 2). Os manguezais do nordeste apresentam esse tipo de feição.

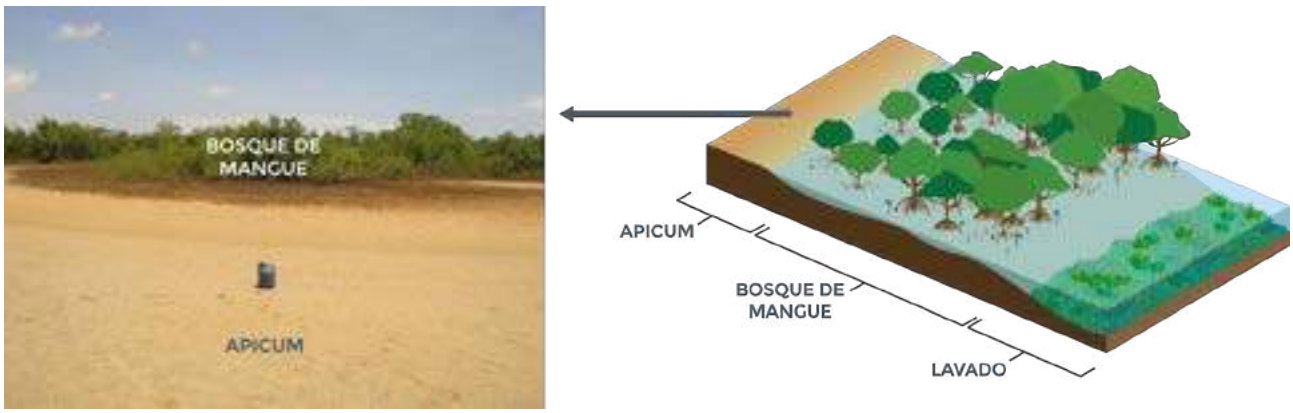



**FIGURA 2. Gradiente ambiental onde se destacam as feições lavado, bosque de mangue e apicum, caracterizando uma região com déficit hídrico, onde a taxa de pluviosidade é menor que a taxa de evapotranspiração.** *Ilustração: Leandro Coelho, adaptada de Twilley (2001) e foto: Clemente Coelho Junior.*

O contrário acontece em regiões do litoral brasileiro com elevados índices pluviométricos e menores taxas de evaportranspiração (com excedente hídrico), podendo acarretar aumento da drenagem terrestre e de infiltração, levando as zonas mais altas do mangue, e consequentemente menos inundadas pelas preamares, a valores relativamente baixos de salinidade (Fig. 3). Esse tipo de padrão é comum nos litorais sudeste e sul do Brasil, onde as planícies costeiras, adjacentes ao ecossistema manguezal e acima das preamares, são colonizadas por vegetação de Mata Atlântica conhecida como restinga, com solo predominantemente arenoso. Entre a restinga e o bosque de mangue é possível perceber um ecótone típico, com vegetação rasteira (geralmente ciperáceas) e poucas espécies arbóreas que diferem das espécies típicas do manguezal.

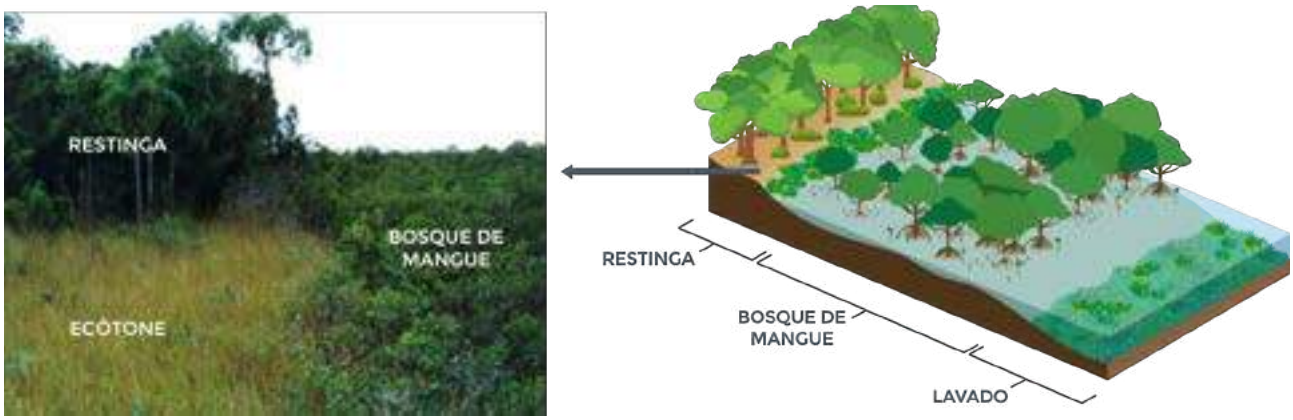



**FIGURA 3. Gradiente ambiental onde se destacam as feições lavado e bosque de mangue. A transição com a restinga é caracterizada por um ecótone com espécies diferentes de plantas.** *Ilustração: Leandro Coelho, adaptada de Twilley (2001) e foto: Clemente Coelho Junior.*

Há outros fatores físico-químicos que variam ao longo do gradiente ambiental do ecossistema manguezal, dentre estes se destacam os nutrientes, como nitrogênio e fósforo, potencial de oxirredução, pH e textura do sedimento. Sem dúvida nenhuma, esses fatores estão correlacionados.

## 2. Origem evolutiva e biogeografia

Acredita-se que as plantas típicas de mangue tiveram origem há mais de 55 milhões de anos, quando, durante a evolução dos vegetais superiores, teriam surgido os gêneros atuais. Tal hipótese baseia-se em fósseis, estudos genéticos, evolução tectônica do planeta, além de análises palinológicas (pólen), entre outras. Infelizmente, estudos paleontológicos não são fáceis de ser realizados, uma vez que os terrenos colonizados por manguezais estão associados a áreas costeiras dinâmicas, onde ocorrem intensos processos de erosão e de deposição ao longo dos tempos geológicos.

Alguns fatos a respeito da biogeografia dos manguezais ainda nos intrigam, como o bosque monoespecifico de mangue-branco (*Laguncularia racemosa* L.) no Manguezal do Sueste, localizado na baía de mesmo nome, na principal ilha do Arquipélago de Fernando de Noronha, sendo considerado o único manguezal em ilha oceânica do Atlântico Sul. Ainda não se sabe como e quando teriam chegado lá os primeiros propágulos de mangue-branco, trazidos pelas correntes marinhas.

Apesar de tantos milhões de anos de mudanças climáticas, extinções em massa e mudanças radicais no posicionamento dos continentes, os manguezais continuam adaptando-se às condições do ambiente ao longo dos tempos. No entanto, os impactos induzidos pelos seres humanos parecem ultrapassar os limites da resiliência desse ecossistema.

## 2.1 Mangue e manguezal

**Mangue** é o termo empregado para designar um grupo floristicamente diverso, de árvores tropicais pertencentes a famílias botânicas sem relação taxonômica entre si, mas que comparilham características fisiológicas similares. Tais adaptações permitem que as espécies cresçam em ambientes abrigados, banhados por águas doces, salobras ou salgadas, reduzida disponibilidade de oxigênio e substrato inconsolidado.

**Manguezal** é o termo empregado para descrever comunidades florestais, ou ainda, o ecossistema. Espaço onde interagem populações de plantas, animais e micro-organismos que ocupam a área do manguezal, interagindo com o ambiente físico-químico (abiótico).

### *Feição bosque de mangue*

As árvores típicas de mangue estabilizam o sedimento com seu intricado sistema de raízes e troncos. Tal emaranhado de raízes e troncos reduz a energia das ondas, que de outra forma permitiria a ressuspensão de partículas de sedimento das áreas costeiras mais rasas. Ao mesmo tempo, aprisionam poluentes prevenindo que estes contaminem águas costeiras adjacentes. A copa das árvores funciona como verdadeira cortina-de-vento, atenuando os efeitos de tempestades nas áreas costeiras.

O conjunto de vegetais de um determinado sistema é denominado de cobertura vegetal. No caso do manguezal, o termo é usado para descrever as espécies típicas de mangue da feição bosque de mangue. As plantas típicas do manguezal (os mangues) são extremamente dependentes da luz solar (heliófilas), formando apenas o estrato arbóreo – em um manguezal sadio raramente são avistadas plantas sombreadas. As plantas de mangue convivem com água salgada (halófitas), e conseguem se sustentar em substrato lamoso, pouco consolidado.

As plantas, consideradas como típicas de mangue, são aquelas cujas características adaptativas permitem que se desenvolvam em ambientes banhados por águas salobras ou salgadas, apesar de serem fisiologicamente aptas a se desenvolver em ambientes de água doce.

Na água doce as plantas típicas de mangue perdem na competição com espécies glicófitas (espécies de água doce). As espécies de mangue possem sistemas de sustentação adequados à fixação em substratos pouco consolidados, isto é, sedimentos lamosos ou de areia e lama. Entretanto, também são competentes a se desenvolver sobre afloramentos coralíneos podendo formar verdadeiras ilhas de manguezal.

## 2.2 Manguezais no Brasil

Por se tratar de um país de proporções continentais, o extenso litoral brasileiro (Fig. 4) apresenta variada combinação de arranjos geomorfológicos, oceanográficos e climáticos. Por conta dessa diversidade, os manguezais também acabam por se distribuir e apresentar de acordo com o ambiente em que estão.

No extremo norte do Brasil, nos litorais dos estados do Amapá, Pará e Maranhão, os manguezais são bem desenvolvidos, extensos, e suas árvores podem alcançar mais de 30 metros de altura. É neste segmento do litoral brasileiro que se encontra a maior extensão contínua de manguezais do mundo, nos estados do Pará e Maranhão.

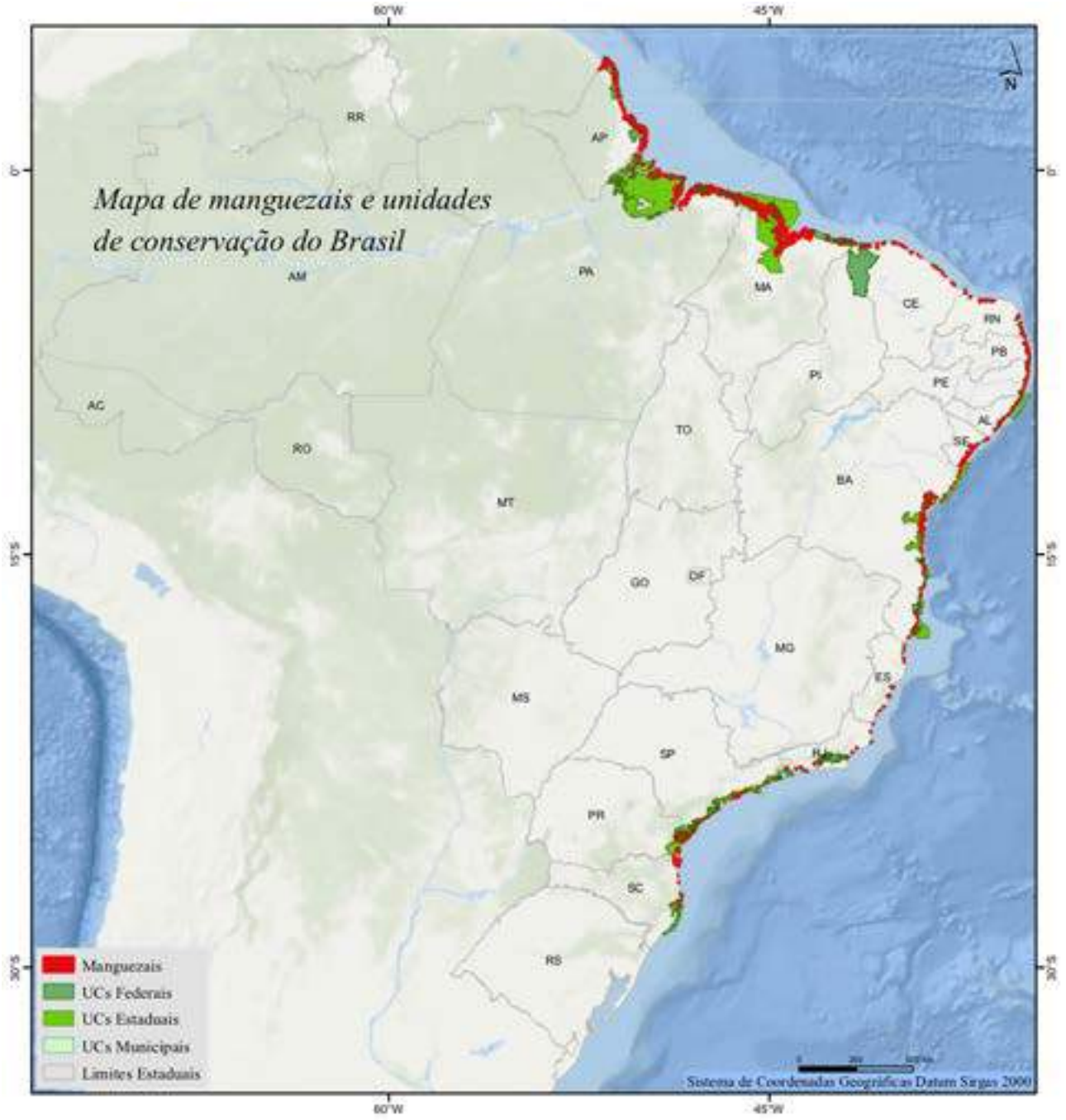



**FIGURA 4** Mapa do Brasil mostrando a ocorrência de manguezais nos 17 estados da Federação, desde o Amapá até Santa Catarina. O mapa também delimita as unidades de conservação (UCs) em que se encontram os manguezais brasileiros (assunto tratado mais adiante no capítulo). *Fonte: ICMBio (2018).*

Em direção aos estados do Piauí, Ceará e norte do Rio Grande do Norte, as condições do ambiente costeiro mudam (litorais com baixa pluviosidade), e os manguezais apresentam menor desenvolvimento estrutural (altura das árvores e diâmetro dos troncos) e presença mais marcante da feição apicum.

Do Rio Grande do Norte em direção aos litorais dos estados de Paraíba, Pernambuco, Alagoas e Sergipe, os manguezais voltam a apresentar maior desenvolvimento estrutural de seus bosques. É nesse segmento que vamos encontrar, no Arquipélago Fernando de Noronha, o manguezal do Sueste, constituído por uma única espécie vegetal, *Laguncularia racemosa* (o mangue-branco) (Fig. 5).

**FIGURA 5.** **Manguezal da Baía do Sueste, em Fernando de Noronha (PE). Adjacente à praia do Sueste, existe um cordão de dunas frontal parcialmente vegetado, exceto na desembocadura do Riacho Maceió. O manguezal do Sueste possui 0,89 ha e está associado a um corpo lagunar posicionado a 2,40 m acima do nível do mar, com cerca de 300 m de comprimento e 25 m de largura, encaixado paralelamente entre o cordão de dunas frontal (2,5 m de altura) e cordão de dunas mais antigo (8-10 m), à retaguarda da pequena planície costeira de 0,125 km² (Barcellos *et al.*, 2013). É o único manguezal de ilha oceânica do Atlântico Sul, possuindo apenas uma espécie arbórea, o mangue-branco (*Laguncularia racemosa*).** *Foto composta: A) ao fundo, Baía do Sueste registrada por Claudio Bellini; e B) desembocadura do Riacho Maceió registrada por Clemente Coelho Junior*.

Na Baía de Todos os Santos (BA), o terreno é fértil, e florescem manguezais com estruturas bem desenvolvidas, chegando facilmente aos 15 metros de altura. Do litoral sul da Bahia até o Espírito Santo encontramos um litoral marcado por estuários e baías, onde se desenvolvem bosques de mangue bordejando suas margens.

A partir do Rio de Janeiro até o Sul, com a proximidade da Serra do Mar, o litoral fica estreito, dando menos espaço para o desenvolvimento de extensos manguezais. Mas há exceções, como o fundo da Baía de Guanabara (RJ), a porção norte da Baía de Sepetiba (RJ), a Baixada Santista (SP), o Sistema Cananéia-Iguape (SP), a Baía de Paranaguá (PR) e a Baía da Babitonga (SC), onde os bosques de mangue dominam as paisagens com seu verde escuro contrastante com os tons da vegetação da restinga e da Floresta Atlântica. Os bosques de mangue atingem seu limite austral de ocorrência em Laguna (SC).

## 2.3 Espécies vegetais típicas de mangue

O ecossistema manguezal é caracterizado pelo conjunto de árvores típicas, uma vez que são elas que exibem aspectos marcantes, principalmente pelos sistemas de sustentação sobre o ambiente lamoso:

1) os **pneumatóforos**, raízes com geotropismo negativo; 2) os **rizóforos**; e 3) as **raízes adventícias** que se parecem com verdadeiras armações de sustentação às árvores.

Ao longo da costa brasileira ocorrem seis espécies típicas, distribuídas em três gêneros. As plantas do gênero *Rhizophora* são conhecidas por mangue-vermelho, gaiteiro ou mangue-verdadeiro, dentre outros. São três espécies desse gênero no Brasil: *Rhizophora mangle*, *R. harrisonii* e *R. racemosa*.

Destas espécies, somente *R. mangle* (Fig. 6) ocorre ao longo de praticamente toda a costa (limite de ocorrência fica na latitude da Ilha de Santa Catarina). As outras duas espécies, *R. harrisonii* e *R. racemosa* ocorrem desde o extremo norte do Brasil até o Delta do Parnaíba (PI).

**FIGURA 6. Bosque de mangue-vermelho (*Rhizophora mangle*) de cerca de 15 m de altura, no nordeste do Brasil. Ao fundo observa-se o emaranhado de rizóforos das árvores. Muitas vezes tidos como raízes aéreas, os rizóforos são, em realidade, semelhantes a galhos.** *Fotos: A) Guilherme M. O. Abuchahla; composição de fotos de: B) folhas; B) flores; e D) propágulos: Clemente Coelho Junior*.

As plantas do gênero *Avicennia* são conhecidas por mangue-preto, siriba, siriúba ou canoé (Fig. 7) e apresentam duas espécies no país: *Avicennia schaueriana* e *A. germinans*. A espécie *A. schaueriana* ocorre ao longo de toda a costa brasileira, enquanto *A. germinans* ocorre desde o extremo Norte até o norte do Rio de Janeiro.

As árvores do gênero *Laguncularia*, de ocorrência nacional, são conhecidas como mangue-branco, tinteiro ou mangue-de-baraço, dentre outros. Trata-se de um gênero monoespecífico, sendo representado pela espécie *Laguncularia racemosa* (Fig. 8).

**FIGURA 7.** **Bosque de mangue-preto (*Avicennia schaueriana*) crescendo sobre substrato arenoso no nordeste brasileiro. Em primeiro plano (A), densa rede de pneumatóforos (raízes com geotropismo negativo) estendendo-se a metros de distância das árvores de origem. Abaixo estão fotos das folhas (B), flores (C) e propágulos da espécie (D).** *Fotos: Guilherme M. O. Abuchahla e Clemente Coelho Junior*.

**FIGURA 8.** **A) Franja de bosque de mangue composta por indivíduos de mangue-branco (*Laguncularia racemosa*). Algumas aves aparecem acomodadas nos galhos. Além de pneumatóforos mais curtos que os do mangue-preto, essa espécie também é facilmente distinguível por apresentar pecíolo avermelhado (B).** *Fotos: Guilherme M. O. Abuchahla e Clemente Coelho Junior*.

Um traço comum entre essas espécies típicas de mangue é a tolerância ao sal, tanto do sedimento, quanto da água que os banha, e a reprodução por meio de propágulos. Os propágulos não são frutos nem sementes, mas estruturas reprodutivas que rapidamente formam uma nova planta ainda presos à árvore-mãe, fixando-se ao encontrarem substratos favoráveis. Os propágulos podem flutuar por meses na água do mar (mangue-vermelho), enquanto outros resistem apenas por poucas semanas (mangue-branco e mangue-preto).

Crescendo sobre galhos e troncos das árvores de mangue, podem ser encontradas epífitas como líquens, musgos, samambaias, gravatás, filodendros, orquídeas, cactos e até uma hemiparasita, a erva de passarinho. O sistema de sustentação e o segmento dos troncos mais frequentemente banhados pelas marés são colonizados por algas marinhas de diferentes grupos.

Nos terrenos mais elevados, raramente atingidos pelas marés, ocorrem espécies como o algodoeiro-da-praia ou embira-do-mangue (*Hibiscus tiliaceus* var. *pernambucensis*), o avencão ou samambai-do-mangue (*Acrostichum aureum*), o mangue-de-botão (*Conocarpus erectus*) e algumas espécies de Ciperáceas. Na franja do mangue, em contato com o estuário, também é comum a presença de vegetação de marismas, como o capim-marinho ou capim-praturá (*Spartina* spp.) na frente do bosque de mangue, próximo ao curso d'água (Fig. 9).

**FIGURA 9. A)** *Hibiscus tiliaceus*; **B)** *Spartina* **spp.**; **C)** *Conocarpus erectus*; **e D)** *Acrostichum aureum*. **A figura demonstra espécies associadas encontradas nas transições do mangue com a terra-firme (A, C e D) e na franja do bosque (B), neste caso,** *Spartina* **spp. aparece colonizando a feição lavado do ecossistema manguezal.** *Fotos: Clemente Coelho Junior*.

## 2.4 Faunas associada e visitante

Diferentemente do que ocorre com as plantas, a fauna encontrada no manguezal é considerada **associada** por não ser exclusiva deste ecossistema. Esses organismos podem ser encontrados em outros ambientes, como restingas, estuários, costões rochosos e até mesmo em praias. Os visitantes são oriundos do ambiente terrestre e até mesmo de rios e águas costeiras. A diversidade de habitats do ecossistema manguezal, ao longo do *continuum* de feições lavado ↔ bosque de mangue ↔ apicum, oferece várias opções para uma fauna bem diversificada. De uma forma simplificada, podemos organizar os representantes da fauna em cinco grupos de acordo com seus hábitos de vida:

### *Animais de vida livre*

Alguns destes são encontrados em meio aquático (rio, estuário, laguna, mar). Peixes como baiacus, robalos, tainhas, siris e até os carismático mamífero peixes-boi (Fig. 10). Há ainda os de vida livre que voam, como insetos e aves, como, por exemplo, mutucas, maruins, mosquitos hematófagos, abelhas, e aves como garças, colhereiros, guarás, martins-pescadores, biguás e o papagaio-de-cara-roxa.

Há também os oportunistas, ou visitantes ocasionais, como guaxinins, capivaras, serpentes, lontras, cotias, jacarés, cachorros-do-mato e - por que não incluir? - os próprios seres humanos. Entretanto, essas espécies utilizam o ecossistema somente para coleta e caça de alimento, em um determinado período de seus ciclos de vida, predando propágulos, insetos, caranguejos, ostras.

**FIGURA 10.** Natália, uma fêmea de peixe-boi marinho nadando livremente na margem do rio Tatuamunha (APA Costa dos Corais, AL). O peixe-boi é protegido por lei federal e está na lista de animais ameaçados. Seu habitat, o manguezal (ao fundo), é explorado pelo turismo de observação de base comunitária no litoral norte de Alagoas e em Mamanguape, no litoral paraibano. *Foto: Clemente Coelho Junior*.

### *Animais arborícolas*

Um segundo grupo de representantes da fauna de vida livre incluem os arborícolas que, em sua maioria, vivem sobre as copas das árvores, incluindo o macaco-prego, a cobra caninana, lagartos e teiús. Sobre os troncos, encontramos o caranguejo-marinheiro (*Aratus pisonii*, Fig. 11) e a maria-mulata (ou aratu-do-mangue, *Goniopsis cruentata*). As copas das árvores ainda abrigam ninhos de várias espécies de aves.

**FIGURA 11.** **Em destaque caranguejo marinheiro (***Aratus pisonii***) sobre tronco de mangue-vermelho (***R. mangle***).** *Foto: Clemente Coelho Junior*.

### *Animais sésseis*

O termo "séssil" é sinônimo de imóvel. Estes são os organismos que colonizam os segmentos das porções inferiores dos troncos e o sistema de sustentação do mangue, ou seja, os substratos duros (consolidados) do manguezal. Exemplos desses animais são as cracas e as ostras, incluindo as ostras-do-mangue brasileiras *Crassostrea rhizophorae* e *C. brasiliana* (Fig. 12).

**FIGURA 12.** **Ostras fixadas em rizóforos do mangue-vermelho.** *Foto: Clemente Coelho Junior*.

### *Animais rastejadores*

São aqueles que se locomovem lentamente sobre o substrato do manguezal ou sobre a folhagem caída (serapilheira). Um bom exemplo é o caramujo de formato semelhante ao grão do café, *Melampus coffea* (Fig. 13).

**FIGURA 13.** Caramujo *Melampus coffea* rastejando sobre a lama do manguezal, durante a maré baixa. Nas marés enchentes ele costuma subir nas raízes e troncos. *Foto: Clemente Coelho Junior*.

### *Animais escavadores*

Por conta do substrato inconsolidado, mole, sobre o qual crescem as árvores de mangue e, consequentemente, se forma o ecossistema manguezal, há diversos animais que vivem enterrados ou constroem galerias no sedimento do mangue. Entre eles, podemos citar os bivalves sururu, o mapé e a unha-de-velho, e os crustáceos caranguejo-uçá (*Ucides cordatus*, Fig. 14), guaiamum (*Cardisoma guanhumi*, este mais na transição com a terra-firme) e o caranguejo chama-marés (*Uca* spp.). O turu ou teredo é um escavador mais críptico, tratando-se de um bivalve muito alongado que constrói suas galerias dentro dos troncos de árvores e até em cascos de barcos.

**FIGURA 14.** Caranguejo-uçá, *Ucides cordatus*. Esta espécie tem grande importância ecológica e socioeconômica. Suas galerias (ou tocas) levam oxigênio às raízes, e sua atividade de limpeza das tocas remobiliza o sedimento, disponibilizando nutrientes para a vegetação de mangue e microalgas. A espécie tem valor nutricional, sendo apreciado na gastronomia, e garante renda para as famílias tradicionais. *Foto: Guilherme M. O. Abuchahla*.

## 3. Conectividade

Ecossistemas como os manguezais são sistemas abertos, ou seja, exercem influência sobre outros sistemas adjacentes, ao mesmo passo que são influenciados pelos mesmos (Fig. 15). Esta troca de influências, chama-se conectividade, que pode ser **estrutural** ou **funcional** com outros ecossistemas costeiros. A seguir, exemplificaremos, superficialmente, manifestações dessa conectividade.

**FIGURA 15.** Rio Tatuamunha, em Porto de Pedras (AL), desembocando no mar da APA Costa dos Corais, onde se localiza o projeto Peixe-Boi (ICMBio/CEPENE). Nota-se, nas margens do rio, bosque de mangue. Ao fundo, as cores contrastantes revelam diferentes ambientes: praia, banco de gramas marinhas e recifes de coral. *Foto: Rafael Munhoz (Fundação Toyota do Brasil).*

As estruturas de sustentação das árvores de mangue (rizóforos, pneumatóforos e raízes) retêm sedimento oriundo tanto da terra emersa quanto dos cursos d'água. Com isso, promovem diminuição da turbidez da água, o que possibilita o estabelecimento de corais e fanerógamas marinhas (que podem vir a formar recifes de coral e pradarias marinhas, respectivamente) em águas rasas costeiras. Essa retenção de sedimentos também age como um filtro para que certos poluentes não cheguem ao mar. Assim, organismos sensíveis à poluição conseguem completar seus ciclos de vida.

As folhas, flores, frutos e propágulos das árvores de mangue, ao caírem, transformam-se em fonte de nutrientes para diversos organismos decompositores e detritívoros, desde os menores (ex: fungos e cianobactérias) aos maiores (ex: caranguejo-uçá). Os organismos, que dessa matéria se alimentam, farão parte ainda da teia trófica do próprio manguezal, dos corpos d'água adjacentes e até de ecossistemas terrestres em suas margens. Os guaxinins, por exemplo, alimentam-se frequentemente

de caranguejos, apesar de habitarem as matas secas. Ao defecarem, farão transferência de nutrientes oriundos do manguezal (folha-caranguejo-guaxinim) para o ecossistema terrestre. O mesmo ocorre com diversos organismos marinhos que vêm a se alimentar de pequenos peixes e larvas que buscam refúgio na rede de rizóforos do mangue-vermelho.

O emaranhado de rizóforos e de pneumatóforos do manguezal oferece abrigo para os ovos de diversas espécies de peixes e moluscos, e também para suas larvas. As águas, geralmente ricas em taninos (com cor de café), associadas à dificultação de acesso por grandes organismos, tornam-se refúgio ideal para organismos diminutos e indefesos. As fêmeas de muitas espécies, como os peixes vermelhos da família Lutjanídeos (Cioba, Dentão, Ariocó), por exemplo, depositam seus ovos próximo aos estuários e os alevinos que nascem migram para os pontos mais distais dos canais de maré, encontrando abrigo e proteção contra predadores entre as raízes de mangue. Após amadurecerem, jovens migram para outros ecossistemas, como os bancos de gramas marinhas e recifes de coral, até atingirem a fase adulta e migrarem para os corais profundos e mares abertos (Fig. 16).

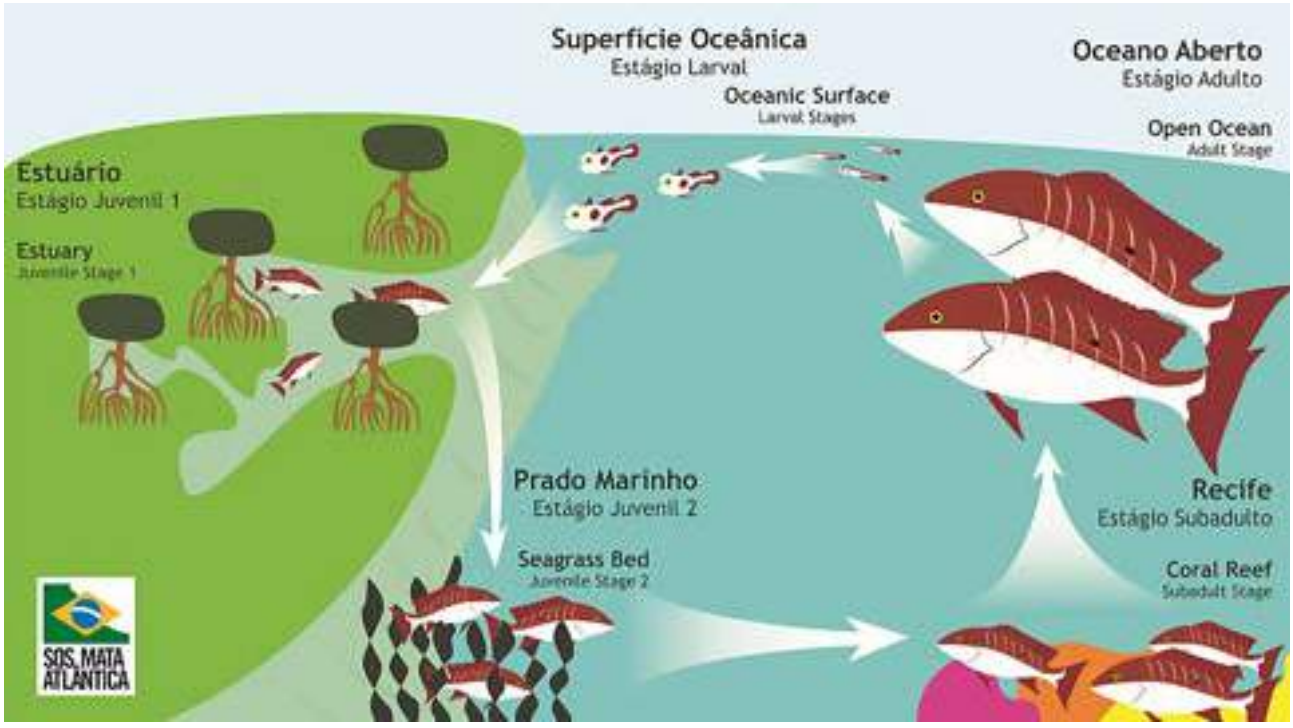



**FIGURA 16.** **Ciclo de vida de peixes lutjanídeos como exemplo de conectividade entre diferentes ecossistemas.** *Figura Fundação SOS Mata Atlântica/Renata Mamede*.

## 4. Serviços ecossistêmicos

Os primeiros registros sobre a ocorrência de árvores crescendo em ambientes de águas salgadas datam de 325 A.C. e foram feitos pelos navegadores de Alexandre, o Grande, a respeito dos manguezais no delta do rio Indo (atual Paquistão). Muitos séculos depois, quando do período das grandes navegações, europeus relatavam o íntimo contato que os nativos de novas terras exploradas tinham com os manguezais, onde chegavam a viver em alguns períodos do ano, fato que deixou registros por meio do acúmulo de conchas, restos de caranguejos, ossos e espinhas de peixes acumulados e consolidados em montes chamados **sambaquis** (Fig. 17), encontrados de norte a sul do Brasil (Fig. 7).

**FIGURA 17. Sambaqui recoberto por vegetação costeira. Os sambaquis podem alcançar dezenas de metros de altura e centenas de metros de comprimento.** *Fonte: https://paineira.usp.br/aun/index.php/2018/05/24/entre-sambaquis-e-o-valo-grande-a-historia-ambiental-de-santos-e-do-vale-do-ribeira-e-investigada/ (Acesso: 13/05/2020, 10:30).*

Os manguezais sempre ofertaram gratuitamente bens, alimentos e proteção aos seres humanos. Assim foi que se formaram os primeiros povoados junto à costa, mais tarde dando origem às cidades e metrópoles que vicejam ao longo do litoral. O ambiente abrigado do manguezal propiciava, além de abundância de alimento e proteção contra as ondas e ressacas do mar, condições ideais para estabelecimento de portos de pesca e atracagem. Estes e outros benefícios do manguezal e de outros ecossistemas são chamados serviços ecossistêmicos e podem ser categorizados em serviços de suporte, regulação, provisão e serviços culturais (Quadro 1).

**QUADRO 1. Categorias de serviços ecossistêmicos providos pelo ecossistema manguezal e exemplos.**

| Categorias | Exemplos |
|---|---|
| **Suporte** | Formação e estabilização do substrato<br>Ciclagem de nutrientes<br>Dispersão de propágulos<br>Conectividade da paisagem<br>Manutenção da biodiversidade<br>Exportação de biomassa<br>Berçário de espécies costeiras e marinhas |
| **Provisão** | Alimento<br>Matérias-primas |
| **Regulação** | Controle de erosão<br>Retenção de sedimentos<br>Anteparo para o avanço da maré (NMRM)<br>Estoque de carbono |
| **Culturais** | Beleza cênica<br>Valor educacional<br>Recreação e turismo<br>Conservação da paisagem<br>Religioso e espiritual |

## VOCÊ SABIA?

**Entre os primeiros relatos conhecidos para o Brasil aparecem: "Tratado Descritivo do Brasil", de Gabriel Soares de Souza (1569-1587) (Souza, 1987). Referências aos manguezais da Capitania de São Vicente podem ser encontradas nas "Cartas Jesuíticas", do Padre José de Anchieta (Anchieta, 1984).** ***Imagem: http://www.mapas-historicos.com/atlas-miller.html.***

**A lista de publicações focadas nos manguezais brasileiros tem início em 1614 (Schaeffer-Novelli, 1986), incluindo centenas de trabalhos, teses, dissertações, monografias e relatórios. Dentre eles, destacam-se "Os manguezaes de Santos" (Luederwaldt, 1919), "*Die Mangroveregion tropischer Küsten als Lebensraum*" (Gerlach, 1958), tratando sobre os manguezais de Cananéia, "Contribuição ao conhecimento da ecologia das plantas do manguezal de Itanhaém" (Lamberti, 1969), "Manguezais do recôncavo da Baía de Guanabara" (Araújo; Maciel, 1979) e "*Variability of Mangrove Ecosystems Along the Brazilian Coast*" (Schaeffer-Novelli *et al.*, 1990), o último foi o primeiro trabalho sobre a estrutura dos manguezais ao longo da costa brasileira.**

No Brasil, e na grande maioria de países onde há manguezais, ainda podem ser encontradas comunidades pouco numerosas, nas quais a economia de subsistência é intimamente ligada ao ambiente costeiro e ao manguezal. Tais comunidades são, no Sul e Sudeste do nosso País, denominadas comunidades *praianas* ou *caiçaras*.

A economia de subsistência em ambientes dominados por manguezais inclui serviços de provisão, representados pela pesca artesanal e a cata de caranguejo (principalmente o caranguejo uçá, *Ucides cordatus*), bem como serviços culturais, provendo beleza cênica, valor educacional e espaço para recreação e turismo de base comunitária. Tais serviços culturais são usufruídos na crescente prática do ecoturismo.

Muitos serviços ecossistêmicos também são difíceis de ser visualizados, geralmente enaltecidos pela comunidade científica. Dentre eles, podemos destacar a estocagem de carbono. Baseando-se em dados de aquecimento global e outras mudanças climáticas, formou-se a economia do carbono, que atribui créditos à emissão de gases de efeito estufa, principalmente o monóxido de carbono (CO), o dióxido de carbono ($CO_2$) e o gás metano ($CH_4$). Pesquisas recentes evidenciam que os manguezais têm capacidade de estoque de carbono muito superior à de outras florestas tropicais, o que os torna aliados importantes na tentativa de desacelerar as mudanças globais causadas direta e indiretamente pela humanidade da era industrial.

Outro serviço intangível, e, por muitas vezes negligenciado, é o serviço cultural de ordem religiosa ou espiritual. Ao redor do globo, incluindo o Brasil, é muito comum encontrar alguma lenda, mito ou ritual associado ao ambiente do manguezal, o que só comprova o papel relevante deste ecossistema para o desenvolvimento de diversas atividades culturais.

## 5. Impacto ambiental

Os impactos ambientais podem ser naturais ou induzidos pelo homem. Entre os naturais estariam excesso de salinidade, periodos de estiagem prolongada, ressacas, entre outros. No contexto dos impactos induzidos pelo homem, temos desde aterros, alteração do curso de rios, dragagens, desmatamentos, lixões, portos, marinas, tanques de aquicultura, sobrepesca, mineração, assentamentos humanos, entre outros.

***Cultivo de camarão e outros crustáceos***

Pesquisadores indicam a carcinicultura como a atividade atual que mais promove a supressão de manguezais no mundo. Vastas áreas de vegetação de mangue são devastadas para que se construam piscinas ou tanques de cultivo de camarão próximas à costa, o que facilita e barateia logisticamente a atividade. A vida útil média de tais estruturas é de cerca de não mais que dez anos, porém os efeitos adversos no ambiente (passivos ambientais) podem perdurar para sempre.

***Portos e marinas***

Ambientes abrigados, propícios para o estabelecimento de bosques de mangue, são visados para construção de portos e marinas, uma vez que ambientes protegidos facilitam manobras náuticas e eventuais transferências de passageiros e mercadorias para a terra-firme. Antes de se fazer notar a importância do ecossistema manguezal para a humanidade, muitos portos e marinas substituíram o manguezal. Atualmente, a maior pressão parece vir da alegada necessidade de expansão de tais estruturas.

***Assentamentos humanos***

A grande maioria da população mundial vive a menos de 100 km da costa. Com a crescente tendência de expansão das atividades econômicas, a população de grandes centros urbanos tende a crescer, principalmente em suas periferias. Margens de estuário com manguezal tornam-se áreas especuladas por condomínios de luxo ou por moradias de baixo-custo, como palafitas e outras, quando não se tem planejamento urbano adequado.

***Sobrepesca***

O serviço ecossistêmico de provisão, mencionado anteriormente, é usufruído de forma muito semelhante ao redor do mundo, salvando-se as diferenças biogeográficas de clima, regime de marés, cursos de água, ocorrência e abundância de espécies. Apesar de todas essas diferenças, tornaram-se cada vez mais comuns os relatos de diminuição da quantidade de peixes, caranguejos e outros frutos do mar, ou até da diminuição no tamanho médio dos indivíduos pescados ou capturados. Esses fatos são típicas respostas à sobrepesca e sobrecaptura.

***Poluição***

Estruturas portuárias e cidades costeiras acabam por despejar, direta ou indiretamente, poluentes de natureza diversa nos corpos d'água que banham os manguezais. Dentre eles, encontram-se hidrocarbonetos (derivados de petróleo), detergentes e surfactantes, metais pesados, esgoto doméstico e resíduos sólidos (os famigerados plásticos e microplásticos). Os rios podem também trazer poluentes oriundos de atividades humanas à montante, como agrotóxicos lixiviados de plantações, efluentes da cana-de-açúcar, esgoto doméstico de cidades distantes da costa, entre outros.

***Mineração, dragagem de canais, barragens e mudança de cursos d'água***

Atividades de mineração, muitas vezes próximas a rios, fazem com que partículas de solo e areia cheguem ao ambiente do manguezal, o que provoca alterações no substrato. A drenagem de canais, para facilitação de passagem de embarcações, provoca aceleração de correntes e, consequentemente, aumenta a erosão. Encostas erodidas dificultam a manutenção da sustentação de árvores adultas de mangue e dificultam o processo de estabelecimento de novos propágulos. Em geral, quaisquer mudanças em cursos d'água têm grande efeito sobre o ecossistema manguezal e seu funcionamento; por exemplo, o represamento de marés com diques e o a retificação de canais de maré ou rios.

Foto: Leandro Coelho

## 6. Legislação e conservação

Perante a legislação ambiental brasileira, o ecossistema manguezal tem categoria de Área de Preservação Permanente (APP) em toda a sua extensão (Lei Federal no 12.651/2012). É o único ecossistema costeiro que goza de tal categoria, garantindo destarte certo grau de proteção e de garantia aos demais ecossistemas com os quais mantêm conectividade, como marismas, recifes de coral e pradarias marinhas.

O extenso litoral brasileiro conta com 18 estados costeiros (apenas o Rio Grande do Sul nao possui manguezais), e a área total dos manguezais brasileiros tem cerca de 14 mil km$^2$, equivalentes a 9% do total global deste ecossistema. Cerca de 87% deles estão inclusos em Unidades de Conservação (UCs) no Brasil (Fig. 4), sendo que 83% delas são de uso sustentável e 13% de proteção integral (ICMBio, 2018).

Dentre as estratégias adicionais para a conservação dos manguezais brasileiros, podemos destacar a ratificação da Convenção de Ramsar, em 1996, e o Plano de Ação Nacional para a Conservação das Espécies Ameaçadas e de Importância Econômica do Ecossistema Manguezal (PAN Manguezal), em 2004. O último tem como objetivo "*aumentar o estado de conservação dos manguezais brasileiros, reduzindo a degradação e protegendo as espécies-alvo, mantendo suas áreas e usos tradicionais, a partir da integração entre as diferentes instâncias do poder público e da sociedade, incorporando os saberes acadêmicos e tradicionais, até 2019*".

## Referências Bibliográficas

ANCHIETA, J. 1984. Cartas correspondência ativa e passiva do Padre José de Anchieta, S. J. (1554-1594) XI. Carta sobre as coisas naturais de São Vicente (1560). São Paulo: Edições Loyola.

ARAÚJO, D.S.D. & MACIEL, N.C. 1979. Os manguezais do recôncavo da Baía de Guanabara. Cadern. FEEMA, Série técnica, 10, 1-113.

BARCELLOS, R.L., LINS, S.R., COELHO JR., C. & TRAVASSOS, P.E. 2013. The coastal plain and seafloor mapping of an oceanic island sheltered coast/the case of Sueste bay, Fernando de Noronha, South Atlantic, Brazil. In: Proceedings of 12th GEOHAB. Roma: GEOHAB.

GERLACH, S.A. 1958. Die Mangroveregion tropischer Küsten als Lebensraum. Z. Morph. Ökol. Tiere, 46, 636-730.

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). 2018. Atlas dos Manguezais do Brasil. Brasília: ICMBio.

LAMBERTI, A. 1969. Contribuição ao conhecimento da ecologia das plantas do manguezal de Itanhaém. Bolm. Fac. Filos. Ciênc. Univ. S. Paulo, 317 (33), 1-317.

Luederwaldt, H. 1919. Os manguezaes de Santos. Revta. Mus. Paul., 11, 309-408.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y. 1986. Manguezais brasileiros: uma bibliografia (1614-1986). São Paulo: IOUSP/Superintendência do Desenvolvimento do Litoral Paulista.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y., CINTRÓN-MOLERO, G., ADAIME, R.R. & CAMARGO, T.M. 1990. Variability of Mangrove Ecosystems Along the Brazilian Coast. Estuaries, 13 (2), 204-218.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y., COELHO-JÚNIOR, C., TOGNELLA-DE-ROSA, M. 2002. Manguezais. São Paulo: Editora Ática.

SOUZA, G.S. 1987. Tratado descritivo do Brasil em 1587. Edição castigada pelo estudo e exame de muitos códices manuscritos existentes no Brasil, em Portugal, Espanha e França, e acrescentada de alguns comentários por F. A. de Varnhagem, 5a ed. São Paulo: Editora Nacional.

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 31*

# ECOSSISTEMA MARINHO ANTÁRTICO

*Paulo Yukio Gomes Sumida, Karin Lütke Elbers, Arthur Ziggiatti Güth, Angelo Fraga Bernardino & Phan Van Ngan*

REVISÃO: VICENTE GOMES

CITAÇÃO SUGERIDA: SUMIDA, Paulo Yukio Gomes et al. Ecossistema marinho antártico. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 31: p. 705-728.

# Ecossistema Marinho Antártico

*Paulo Yukio Gomes Sumida, Karin Lütke Elbers, Arthur Ziggiatti Güth, Angelo Fraga Bernardino & Phan Van Ngan*

## 1. A região Antártica

O Continente Antártico, ou Antártica[1], distribui-se em latitudes que vão de 90°S (Polo Sul geográfico) a cerca de 60°S na porção mais ao norte da Península Antártica, sendo o quinto maior continente[2] do planeta com quase 14 milhões de km² (Fig. 1), o que representa cerca de 1,6 vezes o tamanho do território brasileiro.

**FIGURA 1. Localização e topografia do Continente Antártico e do Oceano Austral. Faixas radiais indicam territórios reivindicados.** *Fonte: modificado de Hugo Ahlenius, UNEP/GRID-Arendal.*

[1] Antártica ou Antártida? Etimologicamente o nome do continente vem de sua oposição à região Ártica (que é denominada a partir da constelação da Estrela Polar, Ursa Menor; sendo *arktos* urso em grego). Ou seja, Antártica significa literalmente o 'anti-Ártico'. Na língua portuguesa, o termo Antártica é mais utilizado, no entanto, tanto Antártica ou Antártida são igualmente corretos.

[2] Ao contrário da região Antártica, que é formada por uma massa de terra cercada por um oceano, a região Ártica é formada por um oceano (Oceano Ártico) cercado por terras. Não há um continente sob o Polo Norte, apenas um oceano coberto por uma calota de gelo polar.

A Antártica e o oceano que a circunda, chamado Oceano Austral, formam a Região Antártica, que cobre mais de 45 milhões de km$^2$, ou quase 10% da superfície terrestre. As condições climáticas, as características ambientais e o funcionamento do ecossistema do Continente Antártico e do Oceano Austral fazem desta região um ambiente muito peculiar e com atributos únicos em relação a outras regiões do planeta.

O continente é famoso por seus extremos: é considerado o mais frio, o mais alto, o mais seco e o mais ventoso. As temperaturas na Antártica estão entre as mais baixas do planeta. A média anual de temperatura no Polo Sul geográfico é de -49°C. No entanto, o Polo Sul não é o local mais frio do continente, e sim a região conhecida como Domo A, que é uma elevação no platô do manto de gelo da Antártica Oriental com 4.093 m de altitude e onde a temperatura média anual gira em torno de -58,3°C e desconfia-se ocorrerem as menores temperaturas absolutas do planeta. Oficialmente a menor temperatura da Terra foi registrada na estação de pesquisa russa Vostok, próxima ao Domo A, quando no mês de julho de 1983 os termômetros marcaram -89,2°C.

As baixas temperaturas ocorrem principalmente devido à pequena incidência de luz solar e à alta altitude média do continente. Comparando com regiões tropicais, a quantidade de energia solar incidente por área em regiões polares é menor devido ao menor ângulo de incidência dos raios solares e ao maior caminho que a luz percorre na atmosfera, chamada de massa atmosférica, que aumenta a reflexão e absorção da energia luminosa. Contribui também para as baixas temperaturas a alta reflexão da luz solar pela presença de gelo (alto albedo), estimada em cerca de 85%.

A altitude média do continente está em torno dos 2.000 m, o que é três vezes superior à média de qualquer outro continente. No entanto, o que confere a este continente suas grandes altitudes é o manto de gelo antártico, uma camada de gelo com espessura média de 1.829 m e máxima de 4.776 m que recobre 99,7% do continente[3]. Sob ele encontram-se não só as rochas continentais, mas rios e lagos subglaciais, sendo o maior deles o lago Vostok, com aproximadamente 14.000 km$^2$, localizado entre 3.750 e 4.150 m abaixo da estação russa, com profundidades que variam de 200 a 800 m.

Se todo o manto de gelo antártico derretesse, ou seja, cerca de 30 milhões de km$^3$ de gelo (ou $30 \cdot 10^{18}$ litros), o continente perderia cerca de 50% de sua área, fazendo com que muitas de suas feições características se transformassem em ilhas, como por exemplo, a Península Antártica. Calcula-se que o derretimento do manto de gelo antártico elevaria o nível do mar em 60 m.

No interior da Antártica, os ventos são constantes e fracos, raramente ultrapassando 20 km/h, e sopram do interior em direção à costa no sentido anti-horário. Isso ocorre devido à presença permanente de um centro de alta pressão atmosférica (anticiclone) sobre o manto de gelo que provoca a subsidência de massas de ar seco. Contudo, em regiões onde o declive é elevado, o ar frio, mais denso, pode descer as encostas do manto de gelo em direção à costa com velocidades de 70 km/h. Estes ventos são chamados de ventos catabáticos. Ventos catabáticos de 327 km/h foram registrados na estação de pesquisa francesa Dumont d'Urville, em 1972.

A presença do centro de alta pressão no interior do continente e as baixas temperaturas fazem com que a umidade relativa do ar seja muito baixa. A maior parte da precipitação nesta região ocorre na forma de cristais de gelo, contudo, a precipitação anual de neve não atinge 50 mm, valor que pode ser comparado ao deserto do Saara, em que a precipitação anual varia de 20 mm em regiões mais secas a 100 mm nas regiões mais úmidas. Deste modo, apesar de ser uma imensa área coberta de gelo, podemos considerar a Antártica um grande deserto polar.

[3] O manto de gelo antártico corresponde a cerca de 90% de todo o gelo e de 70% da água doce mundial. Como comparação, a Bacia Amazônica detém cerca de 20% de toda água doce em estado líquido presente no planeta.

As chuvas e neve são mais comuns na região costeira da Antártica. Isso porque sistemas atmosféricos provenientes de latitudes mais baixas podem atingir a costa, trazendo massas de ar mais úmidas. Sobre o Oceano Austral existem centros de baixa pressão que formam uma faixa circumpolar em torno das latitudes 60-65°S, conhecido como cavado circumpolar, uma das regiões mais tempestuosas do mundo.

O limite norte do Oceano Austral, o qual também limita a chamada Região Antártica, é chamado de Zona da Frente Polar Antártica. É neste local em que a água fria e densa da Antártica encontra as águas mais quentes e menos densas dos oceanos adjacentes (Atlântico, Pacífico e Índico), afundando sob elas. Este local também coincide com a isoterma de 10°C do mês de fevereiro (mês mais quente do ano). Sua posição média (latitude 58°S) está ao norte do Círculo Polar Antártico, no entanto, esta barreira oceanográfica não possui um limite fixo, pois o seu extremo norte pode oscilar de acordo com a posição das massas de água ao longo do ano.

A Zona da Frente Polar Antártica é extremamente importante dentro do ecossistema marinho antártico, pois é caracterizada pelas mudanças abruptas de temperatura e salinidade que interferem na abundância de fitoplâncton e na distribuição do zooplâncton, das aves e de mamíferos marinhos, funcionando como uma barreira biogeográfica para muitas espécies. Nesta região, as temperaturas da superfície do oceano variam de 4-8°C no verão a 1-3°C no inverno.

Já em áreas próximas ao continente antártico, a temperatura da água do mar varia muito pouco, de -1,0°C no verão a -1,9°C (ponto de congelamento da água do mar com salinidade igual a 35 psu) no inverno. No entanto, a zona costeira rasa apresenta uma maior variação de temperatura, dependendo da profundidade da coluna de água e do confinamento. Por exemplo, em poças de maré, a temperatura pode variar de 2°C a 14°C em apenas 8 horas.

De maneira geral, o Oceano Austral tem uma largura que varia de 200 a 1.000 km, abrangendo uma área que equivale a cerca de 10% do oceano global. A enorme quantidade de gelo presente no manto antártico faz com que a massa de rocha continental esteja afundada cerca de 500 a 1.000 m em relação a outros continentes[4]. Em consequência, a plataforma continental antártica é também mais estreita (com exceção dos mares de Ross e Weddell) e mais profunda do que as plataformas em outros lugares da Terra. Assim, enquanto os mares sobre essas plataformas continentais têm profundidade máxima de 200 m, na Antártica, a profundidade das águas ao redor do continente varia entre 500 e 750 m. A região mais profunda do Oceano Austral possui 7.235 m.

A característica mais importante da Região Antártica, tanto em termos físicos como biológicos, é a sazonalidade. Todo ano, durante o inverno, uma área de cerca de 20 milhões de km$^2$ é adicionada ao continente através da formação de uma camada de gelo marinho de até 3 metros de espessura (a média é de 1 m) sobre o Oceano Austral (Figs. 2 e 3).

No verão, a área de gelo que recobre o oceano reduz-se em 1/5 (cerca de 4 milhões de km$^2$). Este processo de avanço e retração da banquisa de gelo é considerado o maior processo sazonal da Terra e possui papel fundamental no sistema climático global, já que altera o albedo e as trocas de calor e umidade com a atmosfera. Além disso, possui um efeito marcante sobre a biota do Oceano Austral.

[4] Este fenômeno, conhecido como depressão isostática, surge em decorrência do equilíbrio das placas tectônicas sobre a camada de magma da astenosfera terrestre, que é dependente da densidade e do peso das placas.

**FIGURA 2. Formação do gelo marinho no Oceano Austral: A) estágio de formação de uma banquisa (*pack ice*), conhecido como banquisa aberta, em que as placas de gelo (*pancake ice*) ainda não estão em contato entre si (Margherite Bay, Antártica); e B) gelo fixo; Navio de Pesquisa (quebra-gelo) Nathaniel B. Palmer (EUA) (Margherite Bay, Antártica).** *Imagens: Arthur Z. Güth (Laboratório de Ecologia e Evolução de Mar Profundo, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo).*

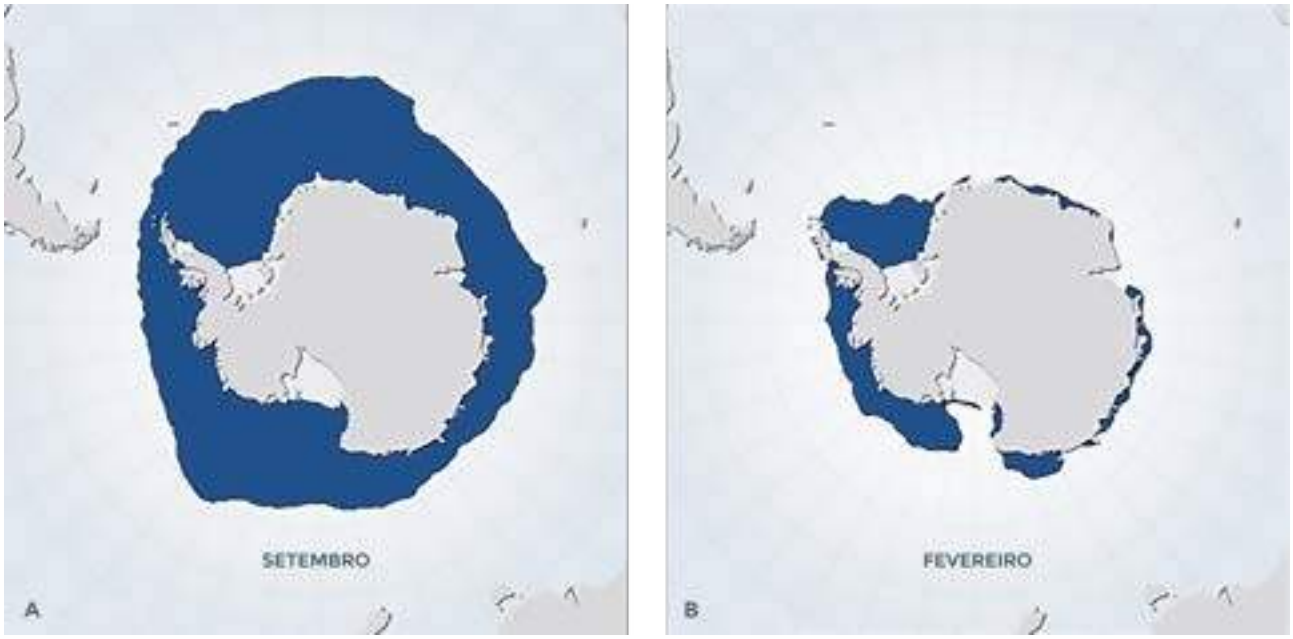



**FIGURA 3. Extensão média do gelo marinho no Oceano Austral entre 1979 e 2002/2003: A) durante os meses de setembro (Inverno); e B) fevereiro (Verão).** *Fonte: modificado de Hugo Ahlenius, UNEP/GRID-Arendal*

Em alguns embaiamentos da costa da Antártica, onde o manto de gelo continental invade a superfície do Oceano Austral são formadas as plataformas de gelo, que são extensas superfícies flutuantes, relativamente planas e persistentes durante o ano todo. As maiores plataformas de gelo são as de Ross (sobre o Mar de Ross, com cerca de 473 km$^2$), Filchner-Ronne e Larsen (ambas sobre o Mar de Weddell, com cerca de 423 km$^2$ e 49 km$^2$, respectivamente) (Fig. 3). Além de muito extensas, podem atingir 1.200 m de espessura.

As bordas destas plataformas, que podem ultrapassar 50 m de altura, são chamadas de falésias de gelo e consistem nas áreas de formação dos grandes icebergs, quando parte do gelo se desprende da falésia pela ação de ondas, vento, derretimento do fundo e quebra devido à extensão da própria plataforma oceano adentro.

O padrão de circulação do vento sobre o Oceano Austral é considerado mais intenso e constante do que em qualquer outra região do mundo. São estes campos de vento que governam sua circulação superficial. As correntes superficiais mais importantes presentes no Oceano Austral são a Corrente Circumpolar Antártica (CCA) e Corrente Costeira Antártica (CCoA).

A CCA é considerada a maior corrente oceânica do mundo, que flui de oeste para leste ao redor da Antártica com velocidades relativamente baixas (20 a 40 cm/s), mas que atingem velocidades maiores em regiões de estrangulamento, como na Passagem de Drake.

A CCoA é governada pelo regime costeiro de ventos de leste, originado no centro de alta pressão existente sobre o manto de gelo continental, portanto, flui no sentido contrário da CCA com velocidades entre 2,5 e 25 cm/s e está localizada mais próxima à costa. No entanto, a CCoA não é uma corrente circumpolar contínua, ela sofre interrupções ao longo da Península Antártica e nos mares de Ross e Weddell devido a presença das plataformas de gelo.

As massas de água ao redor do continente circulam sobre um fundo oceânico formado por bacias oceânicas com profundidades entre 4.000 e 7.000 m, rodeadas por montes e elevações submarinas que tendem a restringir e desviar a passagem de massas de água. Em áreas mais próximas à costa, as correntes e as propriedades das massas de água são influenciadas principalmente pela profundidade da plataforma continental e, em determinados locais, como no Mar de Ross e no Mar de Weddell por sua grande extensão. Na Região Antártica é formada a Água Antártica de Fundo (AAF), rica em oxigênio, que circula lentamente junto ao assoalho oceânico, demorando centenas de anos até retornar a superfície.

## 2. O ecossistema costeiro e marinho

### 2.1 O ecossistema costeiro

A região costeira antártica é composta por diversas feições rochosas e sedimentares associadas ao gelo, neve, solo, *permafrost* (solo permanentemente congelado), lagos e rios de degelo. Estes habitats abrigam uma baixa biodiversidade de organismos constituídos por invertebrados, micro-organismos, liquens, fungos, musgos, microalgas e apenas duas espécies nativas de plantas com flores: *Deschampsia antarctica* e *Colobanthus quitensis* (Fig. 4).

A maior parte destes organismos está confinada à região costeira do continente não coberta pelo manto de gelo, condição mais comum na Península Antártica e nas ilhas subantárticas (*e.g.* Ilhas Geórgia do Sul, Shetlands do Sul, Macquarie, Kerguelen, dentre outras), formando um bioma conhecido como tundra antártica. No interior do continente a biodiversidade é ainda mais baixa, sendo que apenas bactérias, algas, liquens, protozoários, tardígrados e rotíferos residem neste ambiente tão inóspito.

Na região costeira são encontrados micro-organismos unicelulares, como arqueias[5], bactérias, fungos unicelulares, microalgas e protozoários, além dos vírus. Para estes micro-organismos, variações extremas na temperatura, radiação e cobertura de gelo são importantes, assim como variações na salinidade, pH, umidade e nutrientes. Muitos deles são denominados extremófilos, ou seja, vivem e se reproduzem em ambientes com condições geoquímicas extremas. Muitos também são psicrófilos, ou seja, capazes de viver e se reproduzir em baixas temperaturas.

Os musgos e líquens constituem a maior parte dos organismos observados na tundra antártica. Mais de 250 espécies de liquens e 100 espécies de musgos já foram descritas na Antártica. Ambos podem formar extensos campos, pequenas áreas ou até pequenos tufos isolados.

Todos estes organismos contribuem para o colorido observado nas encostas rochosas e planícies das regiões livres de gelo durante os meses mais quentes e servem de hábitat ou alimento para os pequenos invertebrados (Fig. 4).

**FIGURA 4. Flora da região costeira antártica em áreas expostas durante o verão: A) Comunidade de planta com flores, musgos e liquens ao redor da estação Copacabana (EUA); B)** *Colobanthus quitensis*; **C) líquen** *Usnea aurantiacoatra*; **e D) microalgas habitando o gelo (Baía do Almirantado, Ilha Rei George, Arquipélago Shetlands do Sul).** *Imagens: Karin L. Elbers (Laboratório de Ecologia e Evolução de Mar Profundo, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo).*

[5] Organismos que até a década de 1970 eram agrupados sob um mesmo táxon (Bacteria), mas agora tratados como do Reino Archaea. Apesar de morfologicamente semelhantes às bactérias, são estrutural e metabolicamente muito diferentes e são comumente encontrados em ambientes extremos, tais como fontes hidrotermais, lagos e mares hipersalinos e ambientes ricos em gás sulfídrico ou metano.

Na cadeia alimentar terrestre, as poucas espécies de invertebrados[6] ocorrentes consomem estes organismos produtores, e são representados por rotíferos, tardígrados, ácaros, nematódeos, colêmbolos e insetos.

Aves e pinípedes (focas e leões-marinhos) também ocupam as áreas terrestres da região costeira, mas buscam alimento no oceano. Estes grandes organismos contribuem para o ecossistema terrestre através de restos de alimento, cadáveres, fezes e como hospedeiros dos invertebrados parasitas. Por exemplo, o gaivotão antártico (*Larus dominicanus*) alimenta-se de um gastrópode muito comum na zona entre marés chamado Nacella polaris, deixando conchas e restos orgânicos sobre as encostas. A única ave realmente terrestre é a pomba-antártica (*Chionis alba*), que se alimenta de carcaças, fezes, ovos e restos de alimentos.

Assim como no Oceano Austral, a sazonalidade também é bem marcada nos ambientes costeiros. Nos meses de verão as temperaturas são mais altas, os períodos de luz são maiores e uma pequena parcela da área terrestre permanece livre de gelo. Porém, no início do inverno, as temperaturas começam a diminuir, juntamente com os períodos de luz, e toda essa região começa a ser recoberta por gelo e neve. Desse modo, os organismos terrestres estão adaptados e respondem rapidamente a estas mudanças de diversas formas. A sincronização do ciclo de vida (reprodução, crescimento) com os regimes de temperatura, luz e disponibilidade de água é uma estratégia de sobrevivência neste ambiente. Por exemplo, alguns organismos possuem formas de resistência (cistos) nos meses de inverno, um mecanismo que os protege do frio e da dessecação.

## 2.2 O ecossistema marinho pelágico

### *2.2.1 Os organismos planctônicos*

Os principais grupos de organismos planctônicos presentes na região pelágica do Oceano Austral são: 1) os micro-organismos, constituídos por bactérias (chamadas de bacterioplâncton), arqueias e protozoários, além dos vírus; 2) as microalgas planctônicas, ou fitoplâncton e 3) o zooplâncton.

Os micro-organismos possuem um papel fundamental nas cadeias alimentares do ecossistema pelágico, pois atuam em um processo conhecido como alça microbiana (ver capítulo **A Vida no Mar**). Este termo indica um caminho através do qual o carbono orgânico dissolvido (COD) é reintroduzido na cadeia alimentar por meio da incorporação pelas bactérias, que são posteriormente consumidas por protistas flagelados e ciliados (protozooplâncton).

### *2.2.2 O fitoplâncton e a produção primária no Oceano Austral*

O fitoplâncton desempenha um papel fundamental no Oceano Austral atuando na base da cadeia alimentar e nos processos que influenciam diretamente o clima e as mudanças globais. Através da fotossíntese, estes organismos são os principais produtores primários do Oceano Austral, convertendo carbono inorgânico dissolvido em matéria orgânica para formar suas células. Consumidores como os crustáceos copépodes e o *krill*, alimentam-se do fitoplâncton e sustentam os demais elos da cadeia alimentar.

[6] Estão presentes em regiões subantárticas 387 espécies de invertebrados terrestres: 127 nas áreas costeiras e 107 no interior do continente. Cabe ressaltar que muitas dessas espécies podem viver em mais de uma região.

O fitoplâncton do Oceano Austral é composto principalmente por diatomáceas, dinoflagelados e silicoflagelados. Mais de 100 espécies de diatomáceas e 60 espécies de dinoflagelados foram encontradas nas águas ao redor da Antártica, entre espécies cosmopolitas e endêmicas. Uma grande diversidade de espécies vive associada ao gelo marinho (chamadas de epônticas) e estão adaptadas à uma condição bastante peculiar de luminosidade. Durante o inverno, estes organismos permanecem presos no gelo marinho, sob condições de baixa luminosidade. Durante o verão, com o derretimento do gelo marinho, eles são liberados na coluna de água, onde realizam fotossíntese de maneira muito eficiente, sob um regime de alta luminosidade (Fig. 5).

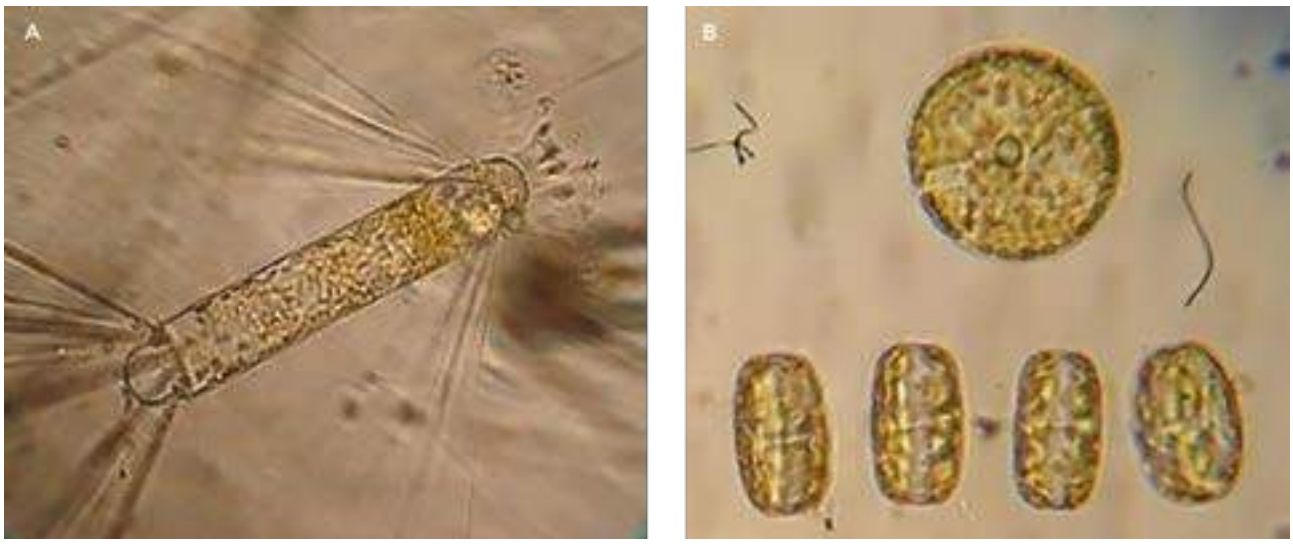



**FIGURA 5. Fitoplâncton marinho antártico: A)** *Corethron* **spp., espécie planctônica e epôntica; e B)** *Thalassiosira* **sp., diatomácea cêntrica planctônica.** *Imagens: Priscila K. Lange (Laboratório de Fitoplâncton Marinho, Instituto de Biologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro).*

Além dos organismos microplanctônicos, a contribuição do nanoplâncton e picoplâncton (organismos entre 2-20 µm e < 2 µm, respectivamente) para a biomassa e produção primária dos fitoautótrofos do Oceano Austral é extremamente importante. Estes organismos constituem grande parte da comunidade fitoplanctônica das regiões costeiras no início do verão, quando se inicia o derretimento do gelo marinho.

O avanço e retração sazonal do gelo marinho interfere nos níveis de produção primária já que durante os meses de inverno o gelo cobre grande parte do Oceano Austral, impedindo a passagem da luz. Durante a formação do gelo sobre o oceano, há incorporação e desenvolvimento de algas (conhecidas como 'algas do gelo') e a formação de um complexo sistema microbiano nos buracos e na superfície inferior do gelo que permanece em contato com a água do mar. As algas do gelo podem sobreviver com apenas 1% da luz incidente, em um ambiente frio e super-salino (-10°C e 150 psu[7]).

No período de derretimento do gelo marinho, principalmente nos meses de novembro e dezembro, ocorre a introdução de grande quantidade de água de baixa salinidade no sistema pelágico. Esta introdução de água menos densa provoca maior estabilidade vertical na coluna de água que, concomitante com um aumento na incidência de luz e na concentração dos nutrientes, promove o crescimento e surgimento de grandes florações de fitoplâncton.

As concentrações superficiais de clorofila *a* (ou biomassa fitoplanctônica) no Oceano Austral variam entre 0,1 e 1 mg/m$^3$, com valores médios em torno de 0,5 mg/m$^3$. No entanto, os valores

[7] A salinidade média dos oceanos gira em torno de 35 psu (Unidades Práticas de Salinidade).

máximos são encontrados em profundidades subsuperficiais (chamados de máximos subsuperficiais de clorofila), seguidos de valores cada vez menores com o aumento da profundidade, até cerca de 200 m. No Oceano Austral, contudo, valores significativos podem ser encontrados logo abaixo da zona eufótica, e refletem acúmulo e biomassa fotossintética e crescimento sazonal nestas profundidades.

A produtividade primária no Oceano Austral é espacialmente heterogênea. Em áreas oceânicas, longe da costa, e em algumas áreas ao redor do continente, os valores encontrados são tipicamente de regiões oligotróficas[8] (< 0,1 g · C/m$^2$/dia). No entanto, em outros locais, os valores encontrados muitas vezes são tipicamente de áreas de ressurgência, que são altamente produtivas[9]. Dentre os fatores que podem limitar a produtividade primária no Oceano Austral, os mais importantes são a disponibilidade de macronutrientes[10] e micronutrientes, a estabilidade da coluna de água, a temperatura e a radiação solar, ainda que alguma resposta adaptativa às baixas temperaturas e à baixa radiação solar tenha sido observada no processo de fotossíntese pelo fitoplâncton em águas antárticas. Além destes, o consumo do fitoplâncton por organismos do zooplâncton, processo conhecido como pastejo, também é um fator limitante importante, principalmente em locais com alta densidade de protistas, crustáceos e apendiculárias.

Os macronutrientes presentes na água do mar do Oceano Austral, como nitrato, fosfato e silicato, geralmente ocorrem em quantidades não limitantes à produção primária, mesmo quando ocorrem os picos de floração do fitoplâncton. Em geral, a disponibilidade de micronutrientes como íons Ferro ($Fe^{2+}$) limita a produção primária em áreas afastadas do continente antártico, isto porque grande parte do Oceano Austral possui um suprimento de ferro (principalmente de fontes eólicas) muito baixo (*e.g.*: 0,1 g · C/m$^2$/ano), provocando baixos níveis de ferro dissolvido (0,16 nmol/kg) na água do mar. Estudos de fertilização marinha com Ferro têm sido realizados desde a década de 90 para testar a hipótese da limitação da produtividade por ferro na região[11].

### *2.2.3 O zooplâncton e o papel do krill no ecossistema marinho antártico*

No Oceano Austral, a produção primária fitoplanctônica sustenta diversos grupos heterotróficos de consumidores primários que fazem parte do zooplâncton, como protozoários, crustáceos pelágicos (larvas de copépodes, eufausiáceos, ostrácodes e anfípodes), apendiculárias e salpas, moluscos pelágicos e as larvas holoplanctônicas e meroplanctônicas[12] (Fig. 6). Os organismos do zooplâncton que se alimentam de outros organismos, mas não do fitoplâncton, são chamados de consumidores secundários e são representados por copépodes adultos, quetognatas, poliquetas pelágicos, medusas e sifonóforos, além das larvas de peixes, que pertencem a um grupo chamado de ictioplâncton[13].

[8] Regiões oligotróficas consistem em locais com baixa concentração de nutrientes e baixa produtividade biológica (*e.g.*: as vastas regiões de giro subtropical), já as regiões ricas em nutrientes e com alta produtividade biológica são chamadas de eutróficas.

[9] Em algumas regiões costeiras da Antártica, os valores de produtividade primária podem ultrapassar 3 g · C/m$^2$/dia. Porém, valores acima de 5 g · C/m$^2$/dia já foram registrados no Oceano Austral.

[10] Os nutrientes podem ser classificados em macro e micronutrientes. Macronutrientes são os necessários em grande quantidade e fornecem energia e componentes necessários para o crescimento e manutenção, enquanto os micronutrientes são necessários em pequenas quantidades (mili ou microgramas).

[11] A idéia de que a deficiência de ferro em águas antárticas limitava o crescimento do fitoplâncton na região foi proposta por J. H. Martin e colaboradores em 1990. Esta deficiência evitaria a ocorrência de florações de fitoplâncton e a utilização por completo dos nutrientes disponíveis.

[12] Larvas holoplanctônicas constituem o grupo de larvas de organismos que passam todo o seu ciclo de vida no plâncton (holoplâncton) como, por exemplo, a larva náuplio dos copépodes. Larvas meroplanctônicas (meroplâncton) são aquelas que se desenvolvem na coluna de água, mas se assentam e se tornam adultas no bentos, como algumas espécies de estrela-do-mar.

[13] Ictioplâncton consiste no conjunto de ovos e larvas de peixes presentes no plâncton.

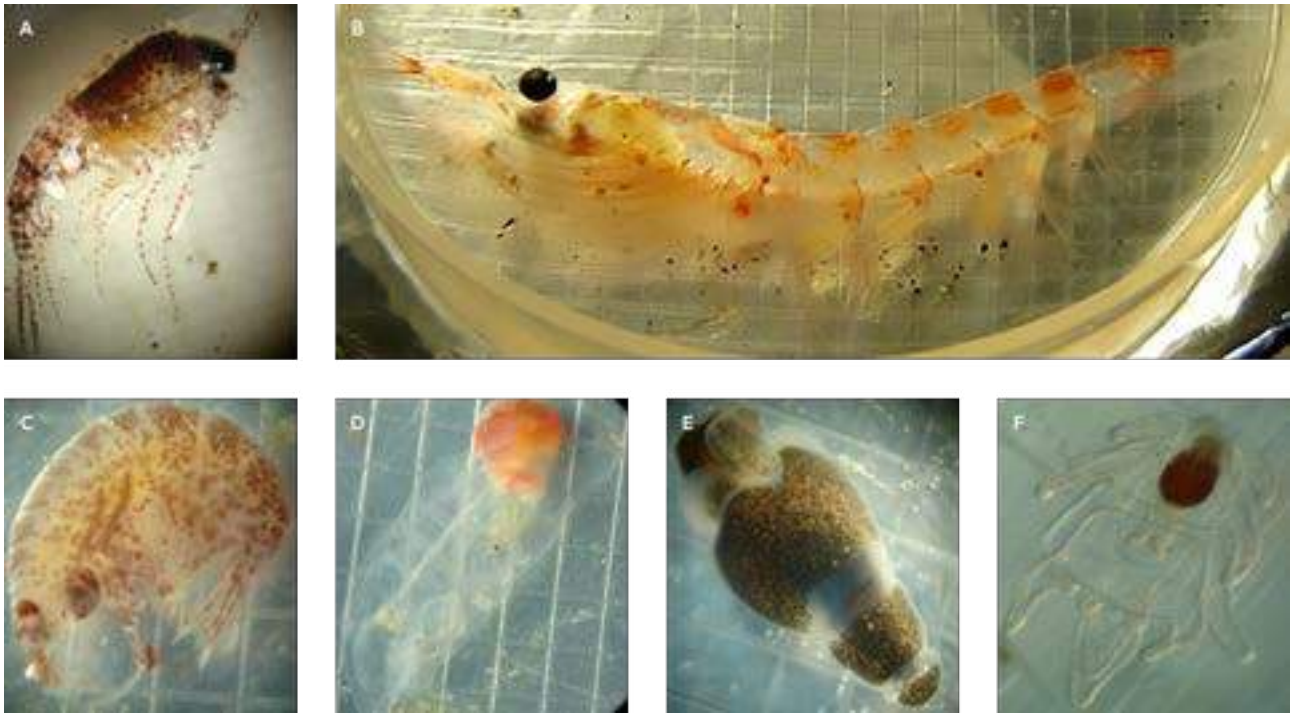



**FIGURA 6. Organismos do zooplâncton: A) crustáceo anfípode; B) crustáceo krill; C) crustáceo anfípode; D) salpa (tunicado da Família Salpidae); E) molusco pterópode; e F) larva de estrela-do-mar no estágio conhecido como braquiolária. Organismos coletados pelo Projeto de Monitoramento do Zooplâncton na Baia do Almirantado, Ilha Rei George, Arquipélago Shetlands do Sul (INCT-APA).** *Imagens: Karin L. Elbers (Laboratório de Ecologia e Evolução de Mar Profundo, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo).*

Os organismos do zooplâncton antártico são diversos e abundantes, sendo que em algumas regiões sua biomassa total pode chegar a 3,5 g (peso seco)/$m^3$, ultrapassando muitas regiões tropicais e temperadas. Muitas espécies de copépodes, eufausiáceos e salpas formam agregados na superfície do oceano, contribuindo com um grande aumento para a biomassa zooplanctônica local. Os agregados possuem efeitos significativos na comunidade planctônica e são importantes na alimentação de lulas, peixes, focas e baleias. Além de diverso e abundante, muitas espécies do zooplâncton são endêmicas do Oceano Austral, possuindo distribuição circumpolar, porém limitada pela barreira formada pela Zona da Frente Polar Antártica.

Esta alta abundância pode ser explicada pelo acoplamento dos ciclos de vida de muitas espécies herbívoras do zooplâncton com a sazonalidade e ciclos reprodutivos de populações do fitoplâncton. Algumas espécies que pastejam apenas durante o verão acumulam lipídios de modo a suprir a falta de alimento no inverno e várias espécies predadoras podem se reproduzir, crescer e se alimentar ao longo do ano todo. Muitas destas espécies dependem do gelo marinho como hábitat ou para a alimentação e são chamadas de fauna criopelágica. O zooplâncton criopelágico se alimenta das algas e micro-organismos que se desenvolvem nos buracos a na superfície inferior da camada de gelo.

Os organismos do zooplâncton também podem ser encontrados desde a superfície até regiões mais profundas do oceano. Algumas espécies de copépodes, por exemplo, são migrantes sazonais, ou seja, ao longo do ano eles vivem em diferentes profundidades para reprodução, crescimento e alimentação. Outras realizam migrações verticais diárias, permanecendo em regiões mais profundas durante o dia e retornando à superfície durante a noite. A presença de indivíduos zooplanctônicos em diferentes profundidades ao longo do ano, aliada a diferenças na distribuição espacial e temporal, também pode ser uma estratégia para evitar a competição inter-específica por alimento.

Dentre os organismos do zooplâncton do Oceano Austral, os mais abundantes e importantes são os crustáceos da Ordem Euphausiacea, conhecidos genericamente como krill. O krill é o principal elo de ligação da cadeia pelágica antártica, sendo uma espécie-chave do ecossistema marinho antártico.

Apesar de existir mais de uma espécie de krill, a mais conhecida e abundante é a *Euphausia superba*, que ocorre em torno de todo o continente. Este pequeno crustáceo, com pouco mais de 6 cm de comprimento e cerca de 1 a 2 gramas de peso, ocorre em grande número. Calcula-se que a população total de krill nas águas antárticas gire em torno de 600 trilhões de indivíduos, ou 19 milhões/km$^2$, e biomassa total de krill de ca. 650 milhões de toneladas.

Não é de se admirar que o krill sirva de alimento, direta ou indiretamente, para uma ampla gama de grandes predadores, entre baleias verdadeiras, focas, pinguins, lulas, peixes e outros invertebrados. Isso faz com que a cadeia alimentar antártica seja abreviada em alguns ramos (*e.g.*: fitoplâncton - krill - baleias), embora esteja longe de ser simples (Fig. 7). Alguns organismos podem apresentar uma dieta quase exclusiva de krill e estima-se que os predadores de krill consumam cerca de 250 milhões de toneladas a cada ano.

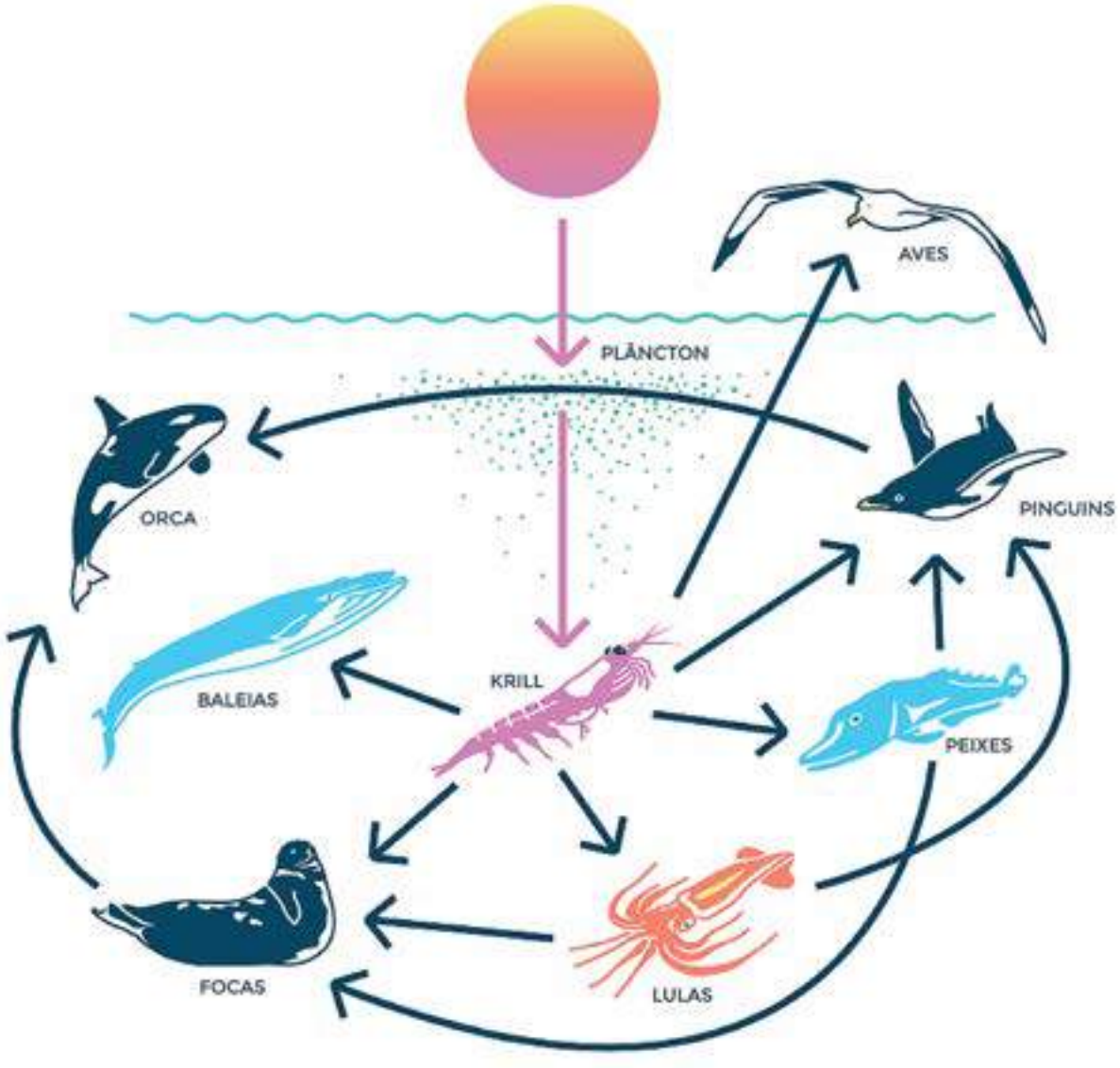



**FIGURA 7. Cadeia alimentar simplificada do Oceano Austral.** *Imagem modificada de greenpeace.org.au*.

Apesar da grande abundância e da ocorrência ao redor de todo o continente, a distribuição do krill não é homogênea em torno da Antártica. O krill forma grandes agregados de larvas e adultos, geralmente coincidentes com os principais giros de correntes oceânicas e com a maior disponibilidade de alimento.

Estes estoques são importantes para a reprodução e manutenção das populações na região. Alguns superagregados de krill podem conter 2,1 milhões de toneladas em 450 km$^2$, apesar de agregados de 10 a 100 toneladas serem mais comuns.

O ciclo de vida do krill é muito peculiar. Os ovos fertilizados são liberados na água e os embriões desenvolvem-se à medida que afundam até a eclosão, que pode ocorrer a cerca de 750 m de profundidade. A partir daí os estágios larvais começam uma migração em direção à superfície, onde chegam como estágios larvais avançados ou pós-larvas e ali permanecem até atingir o estágio adulto. Estudos sugerem que o krill alcance um tamanho de 6 centímetros em 2 ou 3 anos, podendo viver até mais de 7 anos.

Durante o verão, o krill se alimenta essencialmente de fitoplâncton, mas durante o inverno, as microalgas do gelo marinho são as únicas fontes substanciais de nutrição, tanto para adultos, como para as larvas. No entanto, sob determinadas circunstâncias, quando diatomáceas ficam escassas, o krill é capaz de alimentar-se de coanoflagelados, heteroflagelados, protozoários planctônicos (*e.g.*: tintinídeos) e outras espécies de zooplâncton, especialmente copépodes. Com isso, o krill é considerado essencialmente herbívoro, mas de fato, é um organismo onívoro oportunista.

### *2.2.4 Os organismos nectônicos*

No Oceano Austral, os principais componentes de vertebrados do nécton são os peixes, as aves e os mamíferos marinhos. Ao redor da Antártica não são encontrados répteis marinhos, como as tartarugas marinhas por exemplo, pois esses organismos não possuem a capacidade de regular a temperatura do corpo (são chamados de termoconformadores[14]) e nem mecanismos para sobreviver em condições tão extremas. No entanto, alguns grupos de termoconformadores desenvolveram mecanismos para garantir a vida em águas frias e próximas ao ponto de congelamento.

Uma das adaptações mais interessantes verificadas em organismos antárticos é a adaptação às baixas temperaturas em algumas espécies de peixes. Estas espécies apresentam glicoproteínas anticongelantes nos fluidos biológicos (sangue, líquido intersticial), que garantem sua fluidez e evitam seu congelamento e a consequentemente morte destes organismos. As glicoproteínas garantem a sobrevivência em águas com até -1,9°C, no entanto, os peixes não conseguem viver em águas acima de 4 ou 5°C.

Outras adaptações dos peixes antárticos consistem na capacidade de adaptação à variação da salinidade, que ocorre com o congelamento e derretimento da superfície do mar e das geleiras, e ao regime de luz constante durante o verão e a escuridão na coluna de água durante o inverno, como mecanismos para orientação, defesa, busca por alimento e parceiros para reprodução.

Existem inúmeras espécies de peixes vivendo no Oceano Austral, sendo uma grande parte endêmica da região (90%, no caso de peixes bentônicos). Só a Subordem Notothenioidei engloba

[14] Animais termoconformadores são aqueles incapazes de regular a temperatura corpórea (em oposição aos termorreguladores). São também chamados de animais de "sangue frio". Apesar disto ser verdade na Antártica, nem sempre um animal termoconformador possui sangue frio, pois isso depende da temperatura do meio onde vive.

mais de 120 espécies, sendo que a família dos bacalhaus antárticos (Nototheniidae) representa a maior parte delas (cerca de 50 espécies que vivem por toda a coluna de água), seguida pela família dos peixes de gelo ou *icefish* (Channichthyidae).

Estes últimos são muito interessantes por não possuírem hemoglobina, uma vez que a alta solubilidade do oxigênio em baixas temperaturas, aliada a uma taxa metabólica muito reduzida, permite que o oxigênio seja transportado dissolvido no sangue, sem a ajuda de um pigmento respiratório. A ausência da hemoglobina torna estes peixes tipicamente transparentes e com órgãos internos esbranquiçados (Fig. 8).

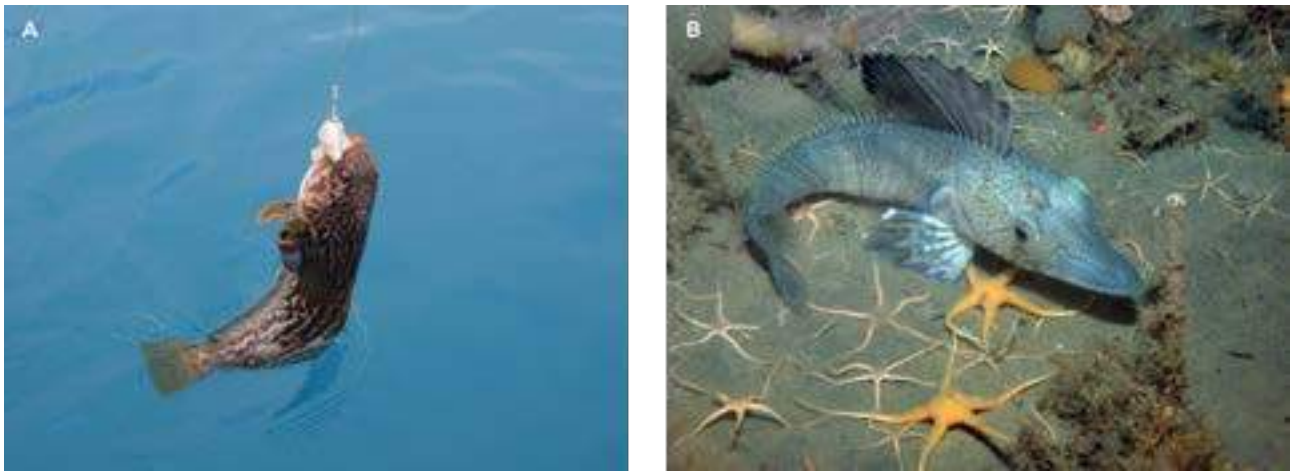



**FIGURA 8. A) Coleta de *Notothenia rossii* na Baía do Almirantado; B) Peixe de gelo (*icefish*) sobre fundo lamoso coberto de ofiuroides.** *Imagens de: A) Edson Rodrigues (Universidade de Taubaté – UNITAU); B) Julian Gutt (Alfred-Wagener-Institut – AWI; expedição Ant-XXIII/8 do Navio de Pesquisa Polarstern).*

Os peixes antárticos podem se alimentar de krill, peixes menores e lulas em ambientes pelágicos, mas podem também permanecer no fundo para se alimentarem de outros organismos, como pequenos invertebrados. Essa associação com o fundo faz com que sejam considerados bento-pelágicos, ou demersais.

Muitos se apoiam sobre algum substrato ou se protegem entre algas e rochas, porém, para algumas espécies esta associação com o fundo pode ocorrer apenas em determinada idade ou fase da vida. Esta relação com os fundos oceânicos resulta em uma distribuição bastante ampla de algumas espécies, podendo atingir até cerca de 4.000 m de profundidade, como por exemplo, a merluza negra ou merluza da Patagônia (*Dissostichus eleginoides*).

A ausência de grandes predadores terrestres (anfíbios, répteis e mamíferos) e a presença de grandes estoques de alimento no Oceano Austral, como krill e peixes, permite o sustento de imensas populações de aves marinhas na Antártica. Aproximadamente 45 espécies de aves marinhas vivem ao sul da Zona da Frente Polar Antártica, mas apenas três[15] reproduzem-se exclusivamente no continente antártico.

As aves marinhas capazes de voar incluem a Ordem Charadriiformes, representada principalmente pelas skuas (*Stercorarius* sp.), o gaivotão (*Larus dominicanus*) e o trinta-réis-antártico (*Sterna vittata*); a Ordem Procellariiformes que responde por mais da metade das espécies de aves antárticas, representada pelos albatrozes e petréis e a Ordem Pelecaniformes, representado pelo biguá-de-olhos-azuis (*Phalacrocorax atriceps*) (Fig. 9).

[15] Skua, pinguim-imperador e o petrel-antártico.

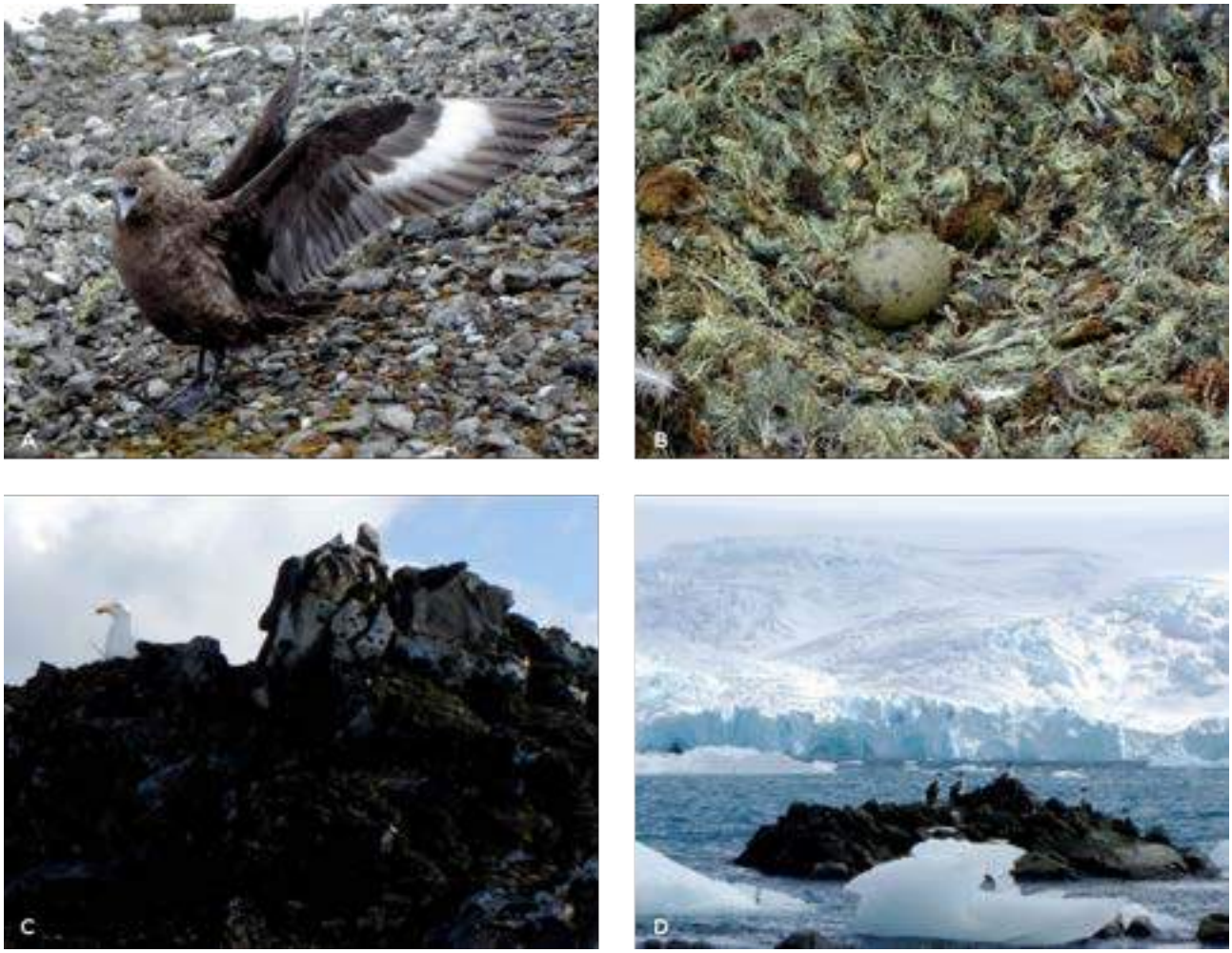


**FIGURA 9. Aves marinhas antárticas: A) skua-antártica (*Stercorarius* sp.); B) ninho com ovo de skua-antártica; C) gaivotão (*Larus dominicanus*); e D) biguás-de-olhos-azuis (*Phalacrocorax atriceps*). Ilha Rei George, arquipélago Shetlands do Sul.** *Imagens: Karin L. Elbers (Laboratório de Ecologia e Evolução de Mar Profundo, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo).*

Os pinguins (Ordem Sphenisciformes) são as aves marinhas mais características da Antártica e fazem parte de um grupo de aves que não voam, mas que possuem adaptações morfológicas para natação e mergulho. Essas características morfológicas incluem forma de corpo hidrodinâmica, penas diminutas, patas palmadas e asas em forma de aletas.

Adaptações anatômicas e fisiológicas permitem a esses animais atingirem profundidades de até 600 m, como o caso do pinguim-imperador (*Aptenodytes forsteri*), que pode ficar até cerca de 20 minutos sem respirar à procura de presas (krill, peixes, pequenos crustáceos e cefalópodes) ou se deslocando (para a maioria dos pinguins este tempo máximo de mergulho está entre 5 e 7 minutos).

Existem mais de vinte espécies de pinguins habitando o planeta. Apenas uma espécie habita a região equatoriana, nas Ilhas Galápagos; muitas ocorrem em regiões temperadas do Hemisfério Sul *(e.g.*: *Spheniscus magellanicus*, conhecido como pinguim-de-magalhães, que habita a porção mais meridional da América do Sul) e a maioria pode ser encontrada na Antártica e ilhas subantárticas, como o pinguim-de-adélia (*Pygoscelis adeliae*), pinguim-marcaroni (*Eudyptes chrysolophus*), pinguim-gentoo ou papua (*Pygoscelis papua*), entre outros (Fig. 10).

**FIGURA 10. Espécies de pinguins: A) pinguim-imperador (*Aptenodytes forsteri*), Mar de Weddell; B) pinguim-de-magalhães (*Spheniscus magellanicus*), Ilha Marguerita, Estreito de Magalhães, Chile; C) pinguim-de-adélia (*Pygoscelis adeliae*); e D) pinguim-papua ou gentoo (*Pygoscelis papua*). Note que o ninho é feito sobre pequenas rochas muito bem selecionadas pelos adultos, ambas na Ilha Rei George, Arquipélago Shetlands do Sul.** *Imagens: Paulo Y. G. Sumida (A) e Karin L. Elbers (B, C, D) (Laboratório de Ecologia e Evolução de Mar Profundo, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo).*

Uma das características mais marcantes da maioria das espécies de aves marinhas antárticas é a migração. Durante a primavera e verão as aves procuram locais na região costeira para a reprodução e construção de ninhos, nas encostas ou nas colônias de reprodução, que ficam livres de gelo nesta época do ano. Durante o inverno, muitas espécies migram em direção ao Norte, para regiões mais quentes.

Muitas espécies de pinguins se reproduzem no ambiente antártico e podem formar colônias com mais de 1,5 milhões de indivíduos, também chamadas de pinguineiras (Fig. 11). Estes locais são extremamente importantes para a formação de solos (solos ornitogênicos) e para alimentação de outros organismos, inclusive outras aves, que se alimentam das fezes, ovos, filhotes ou cadáveres de pinguins, como a pomba antártica, o gaivotão, as skuas e petréis.

Uma das poucas espécies que permanecem durante o inverno na Antártica é o pinguim-imperador, a maior espécie de pinguim (adultos podem atingir 1,22 m). Esta espécie possui

distribuição circumpolar, mas se concentra em colônias de reprodução nas plataformas de gelo e em regiões até 18 km para o interior do continente. A fêmea põe apenas um ovo no final do outono e o deixa aos cuidados do macho enquanto segue em direção ao oceano, onde passa o inverno se alimentando. O macho é responsável pela incubação do ovo, que dura cerca de 65 dias. Durante este período, os machos enfrentam temperaturas abaixo de -40°C e ventos superiores a 200 km/h, um ao lado do outro, na maior parte do tempo dormindo ou revezando a posição, dentro e na borda do agregado, para poupar energia. Os machos não se alimentam por cerca de 115 dias (desde a chegada à colônia até o retorno para o mar) e sobrevivem graças as penas e a camada de gordura que acumularam durante o verão, que pode atingir cerca de 3 cm, funcionando como um isolante térmico. A fêmea regressa apenas no início da primavera, na época do nascimento dos filhotes, para alimentá-los. A taxa de sobrevivência é alta e a estimativa de vida é de cerca de 20 anos.

**FIGURA 11. Pinguineiras de pinguim-papua (*Pygoscelis papua*): A) Ilha Rei George, arquipélago Shetlands do Sul; e B) Ilha Petermann, lado oeste da Península Antártica, considerada a colônia mais austral desta espécie.** *Imagens: Karin L. Elbers (Laboratório de Ecologia e Evolução de Mar Profundo, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo).*

Os mamíferos marinhos antárticos são os mais importantes predadores de pinguins e outras aves marinhas e são considerados os predadores do topo da cadeia alimentar do Oceano Austral. Eles são representados por dois grupos: 1) os cetáceos (Ordem Cetacea), que inclui as baleias e golfinhos; e 2) os pinípedes (Infraordem Pinnipedia), que inclui as focas, lobos-marinhos, leões-marinhos e elefantes-marinhos. Ambos possuem adaptações para viverem sob regimes de temperatura extremamente baixos, como por exemplo, o desenvolvimento de uma grossa camada de gordura logo abaixo da pele, isolando e diminuindo a perda de calor corporal para o ambiente.

Entre os cetáceos, são poucos os que vivem permanentemente na região antártica ou subantártica, chamados de residentes (*e.g.*: baleia-bicuda-de-arnoux e golfinho-cruzado ou ampulheta). A maioria das espécies de baleias realiza migração no início do outono, em busca de água tropicais quentes para a reprodução e nascimento dos filhotes, que não possuem uma camada de gordura suficientemente desenvolvida ao nascerem, para suportar o frio antártico.

Na primavera elas retornam para as águas do Oceano Austral, onde se alimentam até o início do outono seguinte. Por exemplo, as baleias jubarte (*Megaptera novaeangliae*) passam o verão nos arredores de ilhas subantárticas, mas durante o inverno se acasalam e têm filhotes na região nordeste do Brasil. Outras baleias de barbatana (Subordem Mysticeti) que realizam migração anual são as baleias minke, azul, fin, sei e franca, que se alimentam principalmente do krill nas águas do Oceano Austral.

Alguns cetáceos com dentes (Subordem Odontoceti), como os cachalotes e as orcas, podem permanecer durante o inverno no Oceano Austral. No caso dos cachalotes, apenas os machos vivem nesta região, pois as fêmeas permanecem em água tropicais e subtropicais. Eles se alimentam de lulas, polvos e peixes, enquanto as orcas, além destas presas, consomem pinguins e outras aves, pinípede e outras baleias.

Os pinípedes são mamíferos marinhos aptos a viver na terra e no mar, mas é na água que mostram sua grande agilidade. Os lobos e leões-marinhos (Família Otariidae) possuem orelha e são um pouco mais ágeis em terra que as focas verdadeiras e elefantes-marinhos (Família Phocidae), que não possuem orelha externa e geralmente se deslocam em terra rastejando.

Estes grupos alimentam-se no mar, de peixes, crustáceos e lulas, mas se reproduzem em terra, tendo apenas um filhote por vez, que pode viver até cerca de 25 anos. Algumas espécies presentes na Antártica são: a foca-caranguejeira (*Lobodon carcinophagus*), a foca-de-Weddell (*Leptonychotes weddellii*), a foca-leopardo (*Hydrurga leptonyx*), o lobo-marinho-antártico (*Arctocephalus gazella*) e o elefante-marinho (*Mirounga leonina*) (Fig. 12).

**FIGURA 12. Pinípedes da Antártica: A) foca-de-Weddell (*Leptonychotes weddellii*); B) foca-leopardo (*Hydrurga leptonyx*), ambas na Baía do Almirantado, Ilha Rei George; C) lobo-marinho-antártico (*Arctocephalus gazella*), Rhotera Point, Ilha Adelaide, Península Antártica; e D) elefante-marinho (*Mirounga leonina*), Ilha Anvers, Península Antártica.** *Imagens: (A, C e D) Karin L. Elbers (Laboratório de Ecologia e Evolução de Mar Profundo, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo) e (B) Priscila K. Lange (Laboratório de Fitoplâncton Marinho, Instituto de Biologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro).*

## 2.3 O ecossistema marinho bêntico

A região marinha costeira e a margem do continente antártico são morfologicamente similares a outras margens continentais do planeta. Ao redor do continente antártico encontramos ecossistemas intermarés como costões rochosos e praias, e ainda ecossistemas bênticos imersos com fundo consolidado e não consolidado, em profundidades que ultrapassam 7.000 metros[16]. Porém, algumas peculiaridades distinguem estes ecossistemas antárticos de outros em regiões subtropicais e tropicais do planeta.

Os costões rochosos da região antártica tipicamente possuem menor abundância e riqueza de organismos (*e.g.*: cracas e mexilhões), se comparados com os encontrados em áreas temperadas e tropicais. Além da limitação fisiológica, poucas algas e invertebrados conseguem sobreviver ao clima antártico, o impacto do gelo nestas comunidades afeta o desenvolvimento de grande parte dos ecossistemas costeiros antárticos. Assim, poucas espécies sobrevivem às baixas temperaturas e algumas migram sazonalmente durante o inverno para o sublitoral raso adjacente procurando evitar o congelamento.

Ao contrário das áreas emersas de baixa diversidade biológica, as comunidades permanentemente submersas são muito mais abundantes e ricas em espécies. Contudo, há algumas regiões onde icebergs[17] podem atingir o fundo constantemente, eliminando as espécies bênticas e diminuindo a diversidade no local. Este fenômeno é chamado de *ice scouring*[18] e, apesar de ser mais comum em áreas costeiras com até 20 metros de profundidade, o impacto de icebergs pode estender-se a até 150 metros de profundidade[19] quando afetadas por icebergs de grandes proporções.

Outro efeito deletério às comunidades bênticas sublitorais (5-20 metros) na Antártica é a formação de gelo ancorado no sedimento. Este fenômeno ocorre sob determinadas condições de temperatura e resulta no congelamento dos organismos bênticos. O gelo eventualmente se desprende do sedimento, matando e levando os animais para a coluna de água durante o processo, diminuindo a diversidade biológica da área. A ação física recorrente em comunidades rasas faz com que algumas regiões permaneçam em constante estado de recolonização biológica.

Em regiões onde o impacto físico causado por icebergs ou gelo ancorado é reduzido, as comunidades bentônicas apresentam-se abundantes e frequentemente com alta diversidade. Estas comunidades são dominadas principalmente por equinodermes (estrelas-do-mar, pepinos-do-mar, ouriços, lírios-do-mar e ofiuróides ou serpentes-do-mar), esponjas, anêmonas, gorgônias, vermes e crustáceos (Fig. 13).

Animais tais como, crustáceos e moluscos, acumulam sais e compostos orgânicos que reduzem o ponto de congelamento dos fluidos corpóreos.

A maioria dos organismos marinhos bentônicos da Antártica depende da matéria orgânica produzida pelo fitoplâncton na coluna de água, salvo exceções em áreas costeiras dominadas por macroalgas. A produtividade primária do fitoplâncton é altamente sazonal ao redor do continente antártico.

[16] A fossa das Ilhas Sanduíche do Sul possui 7.235 m de profundidade e constituem a região mais profunda do Oceano Austral.

[17] Icebergs são formados pela quebra de grandes blocos de gelo da calota polar em áreas costeiras. Eles podem atingir dimensões gigantescas de, por exemplo, 240 km x 110 km.

[18] Processo pelo qual os icebergs produzem cicatrizes no assoalho oceânico quando a profundidade da coluna de água é menor do que o tamanho de sua parte submersa.

[19] Foram encontradas marcas no assoalho oceânico a 450 metros de profundidade, provavelmente causadas por icebergs gigantescos. Contudo, estes eventos são mais raros.

Durante o verão ocorre um crescimento rápido do fitoplâncton estimulado pela presença de luz e nutrientes adequados. A transferência de alimento da coluna d'água para o ecossistema bentônico pode ocorrer de forma direta (afundamento de biomassa fitoplanctônica) ou através da cadeia alimentar pelágica, passando pelos micróbios e animais herbívoros (*e.g.* krill), antes de chegar ao fundo sob a forma de excretas ou restos de animais.

**FIGURA 13. Estrelas-do-mar comuns na Antártica: A)** *Odontaster validus*; **e B)** *Labidiaster annulatus*. *Fotos: Luciano Candisani.*

Em geral, boa parte da produção primária pelágica antártica deposita-se no sedimento, mesmo em profundidades de até 600 metros. Na Antártica, este fluxo de material orgânico para o sedimento durante a primavera e verão figura entre os maiores do mundo, ao passo que no inverno o fluxo está entre os mais baixos. Nesta época, com a maior parte do mar coberto por gelo e a baixa quantidade de luz, a produtividade é extremamente baixa, gerando quase nenhum fluxo de matéria orgânica para o bentos. Este ritmo sazonal tem influência marcante na biologia e comportamento dos organismos antárticos.

## 3. Origens da fauna e da biodiversidade

A dinâmica da circulação atual do Oceano Austral promove um certo isolamento físico-químico em relação aos demais oceanos – os Oceanos Atlântico, Pacífico e Índico. No entanto, a separação física entre o Oceano Austral e oceanos adjacentes ocorreu a mais de 20 milhões de anos. Esse isolamento físico teve um importante papel para a biota hoje encontrada na Antártica.

A origem da fauna e da biodiversidade atual do ecossistema antártico resultou da interação entre os processos de evolução geológica e climática desse continente. Há cerca de 20.000 anos atrás, durante a última era glacial, o ambiente terrestre antártico foi completamente coberto por gelo, extinguindo grande parte dos organismos terrestres. Os grupos sobreviventes tiveram que se adaptar ao ambiente com condições desfavoráveis à vida: baixas temperaturas e pouca luminosidade. Nesta época, a limitada conexão da Antártica com os demais continentes e oceanos dificultava a entrada de espécies vindas dos trópicos e as principais correntes oceânicas circumpolares e correntes atmosféricas em seu entorno atuavam como eficiente barreira à movimentação da fauna e flora para dentro e fora do continente e regiões marinhas adjacentes.

Os eventos de extinção promovidos por processos de glaciação e mudanças climáticas ao longo do tempo geológico selecionaram alguns grupos taxonômicos terrestres do continente antártico. Organismos pequenos e com baixa demanda energética, como os ácaros e líquens sobreviveram por poderem ocupar microambientes menos rigorosos (refúgios) e aproveitar melhor a pouca e sazonal energia presente no ambiente ou exibirem formas de resistência, como ovos, cistos ou esporos. As comunidades terrestres antárticas são principalmente representadas por animais de pequeno porte como insetos, ácaros, nematódeos, crustáceos e liquens. Tais grupos exibem altos níveis de endemismo, fruto do isolamento geográfico e genético ocorrido há milhares de anos.

Apesar do alto endemismo, a fauna e a flora terrestres possuem, em geral, baixa biodiversidade se comparada a outros continentes. Plantas superiores praticamente não ocorrem no continente e não existem vertebrados terrestres nativos. Algumas espécies de liquens e vegetais ocorrem nas ilhas oceânicas próximas ao continente, sendo que os principais grupos de animais são representados por aves e mamíferos marinhos que utilizam estas regiões principalmente para alimentação e reprodução.

O Oceano Austral conecta-se com todas as maiores bacias oceânicas – Oceanos Pacífico, Atlântico, e Índico, o que promove uma relativa conexão com os demais ecossistemas marinhos mundiais. Apesar de a Zona da Frente Polar Antártica limitar parte da dispersão de organismos marinhos planctônicos para os oceanos adjacentes, ela não é uma barreira à migração de muitos organismos pelágicos ou bentônicos. Como resultado, muitos peixes e invertebrados bentônicos que habitam a plataforma continental antártica (tipicamente com 600 m de profundidade), ocorrem em regiões oceânicas ao largo da América do Sul e das demais bacias oceânicas profundas.

O ecossistema marinho antártico possui boa conectividade e sobreposição de espécies com outras bacias oceânicas, e ao mesmo tempo exibe alto endemismo de espécies sugerindo processos de isolamento e especiação em alguns grupos animais. A aparente conectividade de populações marinhas de outros oceanos com a Antártica ocorre principalmente em altas profundidades (> 1.000 m), onde as populações de origem colonizaram regiões de talude e bacias abissais (entre 1.000 e 6.000 m de profundidade) ao redor do continente antártico. A ocorrência de correntes com baixas temperaturas e o padrão de circulação de massas de água profundas são fatores que permitiram a colonização por espécies oriundas de bacias oceânicas profundas adjacentes, como do Atlântico. Tal sobreposição de espécies ocorre principalmente em equinodermas, gorgônias e outros cnidários que possuem ampla distribuição geográfica.

Contrariamente à similaridade da fauna de regiões profundas do Oceano Austral com outros oceanos, a fauna da plataforma continental e regiões marinhas rasas apresenta alto endemismo de espécies, resultado do isolamento geológico e genético de suas comunidades. Os processos de isolamento e evolução independentes são muito evidentes nos isópodes marinhos, um grupo de crustáceos caracterizado por enorme riqueza e diversidade de espécies. Evidências indicam ainda que algumas espécies de isópodes de águas rasas da Antártica irradiaram-se para regiões profundas adjacentes ao continente.

Outros grupos oriundos de regiões profundas colonizaram habitats de plataforma e costeiros e lá se isolaram de suas populações de origem. Esse processo é evidente em um dos anelídeos poliquetas mais abundantes da plataforma oeste da Península Antártica (*Aurospio foodbancsia*), que apresenta íntima afinidade com uma espécie de ampla distribuição em regiões profundas ao redor do mundo. A colonização de regiões profundas por espécies que se especiaram em áreas rasas aparenta ter sido impulsionada por eventos glaciares que teriam congelado grandes extensões marinhas da plataforma continental antártica. Assim, muitas espécies utilizaram regiões profundas adjacentes como refúgios durante períodos climáticos extremos, e lá geraram novas espécies.

Dessa forma, os eventos geológicos aliados à processos de radiação e isolamento de espécies exerceram forte influência nas comunidades marinhas do continente antártico, promovendo incríveis níveis de diversidade e uma extraordinária história evolutiva. Muitos aspectos biogeográficos e evolutivos ainda aguardam esclarecimento, e as respostas para muitas perguntas aguardam por investigações científicas no continente mais extremo e desafiador do mundo.

## 4. Mudanças climáticas e ameaças ao ecossistema

Como ocorre em escala mundial, a estrutura e funcionamento dos ecossistemas Antárticos têm sofrido acentuadas mudanças em resposta a diversos agentes antrópicos. Alterações em larga escala incluem as mudanças climáticas globais, que na Antártica produzem padrões contrastantes de aquecimento ou resfriamento. Por exemplo, nos últimos 50 anos a Península Antártica apresentou a maior taxa de aquecimento atmosférico do mundo, enquanto algumas regiões no interior do continente resfriaram-se levemente.

Em escalas locais, comunidades marinhas e terrestres do continente gelado vêm sofrendo acentuados impactos decorrentes de atividades humanas, incluindo a pesca predatória, poluição e introdução de espécies exóticas. As alterações decorrentes de ocupação humana no continente tendem a ser limitadas e controladas pelo Tratado Antártico, em vigor desde 1961. Porém, o aquecimento das águas e atmosfera vem promovendo alterações significativas nos ciclos hidrológicos e nos padrões sazonais de formação e derretimento do gelo continental e marinho, o que tem acarretado sérios impactos às comunidades marinhas ao redor da Antártica. A seguir, citamos algumas:

### 4.1 Pesca

A pesca comercial tem levado ao colapso vários estoques mundiais de peixes em virtualmente todos os oceanos e mares conhecidos. Os impactos da pesca são altamente destruidores por vários fatores.

Primeiro, a alta frequência com que regiões marinhas são pescadas não permite a recuperação dos estoques, sendo que algumas áreas são pescadas centenas de vezes por ano. Dessa forma, estas comunidades permanecem num constante estado de degradação, que é acentuado pela natureza das espécies pescadas que apresentam lento crescimento e maturação tardia (e.g. baleias e outros mamíferos marinhos).

As expedições baleeiras que ocorreram nos séculos XIX e XX ao redor da Antártica quase dizimaram por completo as populações de focas e baleias da região. Com o esgotamento dos estoques pesqueiros mundiais, é altamente provável que a pesca na Antártica seja direcionada para outras espécies de menor valor comercial, o que iria potencializar os danos nos ecossistemas devido à utilização de outras técnicas de pesca, as quais promovem alta destruição de habitats e morte de espécies associadas.

O segundo fator que acentua os danos causados pela pesca predatória na Antártica, correlaciona-se com a diminuição da extensão da cobertura por gelo e início antecipado do seu derretimento. Com a diminuição da camada de gelo sobre os mares Antárticos, aumentou o acesso de frotas pesqueiras à estoques que antes estavam fora do seu alcance.

## 4.2 Mudanças climáticas

Os impactos do aquecimento atmosférico na região oeste da Antártica, principalmente na Península e ilhas no entorno, são evidentes e têm sido intensamente estudados. Alterações marcantes na extensão da cobertura por gelo marinho foram observadas ao longo das últimas décadas e são importantes pois o gelo marinho que se forma ao redor da Antártica nos meses de inverno possui papel central na dinâmica de comunidades microbianas e de várias algas e invertebrados marinhos planctônicos.

A diminuição na cobertura por gelo e mudanças no início do seu derretimento podem levar a alterações significativas nos ciclos de vida dos organismos associados, afetando toda a cadeia trófica Antártica que depende energeticamente da produção sazonal de alimento produzido no verão. Por exemplo, o ciclo do krill – a principal fonte de alimento das baleias e pinguins durante o verão Antártico – está intimamente associado à dinâmica de derretimento do gelo marinho e ao ciclo dos nutrientes no mar, indicando que qualquer alteração significativa nesses processos podem impedir que estoques inteiros de krill não se desenvolvam durante o verão, com consequências dramáticas para as baleias e outros predadores. A partir da década de 1970, os estoques de krill foram reduzidos em mais de 50% na região da Península Antártica. No mesmo período, houve também uma drástica redução no número de pinguins-de-adélia (*Pygoscelis adeliae*) se reproduzindo nessa área. Contudo, não foi comprovada a relação de causa e efeito entre esses dois fenômenos.

A dinâmica do gelo marinho antártico também está intimamente relacionada com as comunidades que vivem associadas ao fundo marinho (o bentos), a mais de 500 m de profundidade. Os eventos de intensa produção primária por algas que ocorrem durante o verão, conhecidos como "*blooms de fitoplâncton*", produzem enorme quantidade de biomassa nas águas antárticas que afundam até o assoalho marinho e possuem energia suficiente para sustentar comunidades inteiras ao longo de todo o ano. Dessa forma, as centenas de espécies que fazem parte das comunidades bentônicas antárticas, também dependem intimamente do correto funcionamento do ecossistema pelágico, e da dinâmica sazonal existente nas comunidades planctônicas.

É provável que as mudanças climáticas e outras alterações de origem antrópica já tenham alterado o frágil balanço dos ecossistemas antárticos de uma maneira significativa, ainda de difícil compreensão devido à dificuldade de se pesquisar naquele continente remoto e extremo. Alterações na biogeoquímica do Oceano Austral também têm sido frequentemente descritas, e apresentam talvez uma das maiores ameaças ao clima da Terra.

Os cientistas ainda tentam compreender a importância que o Oceano Austral tem no sequestro de carbono antropogênico que se acumula na atmosfera no decorrer dos anos, e procuram descobrir como a dinâmica das comunidades marinhas planctônicas influencia esse sequestro. Na Antártica também se formam as massas de água frias e densas que afundam próximo ao continente e percorrem as grandes bacias oceânicas, levando nutrientes e oxigênio para as espécies de mar profundo a milhares de quilômetros de distância da Antártica. É possível que a entrada de água doce oriunda do derretimento das geleiras altere o balanço físico-químico dessas massas de água, acarretando em mudanças na circulação oceânica profunda com efeitos negativos para as comunidades bênticas ao redor do globo.

Na atmosfera, outro fator de grande importância é o buraco na camada de ozônio estratosférico por sobre o continente. A camada de ozônio tem papel importante no bloqueio dos radiação solar ultravioleta que é prejudicial aos organismos vivos. Nos meses de inverno, vórtices polares criam condições atmosféricas específicas sobre a Antártica, que concentram os aerossóis lançados pelo homem (também conhecidos como Cloro-Flúor-Carbonos ou CFCs) e outros produtos químicos e

permitem que ocorram reações que formam substâncias químicas que destroem a camada de ozônio, principalmente durante a primavera. Em setembro de 2000 foi detectado o maior buraco na camada de ozônio medido pelo homem com cerca de 28,3 milhões de km². A última medição em 2009 registrou um buraco de 24,1 milhões de km² (Fig. 15).

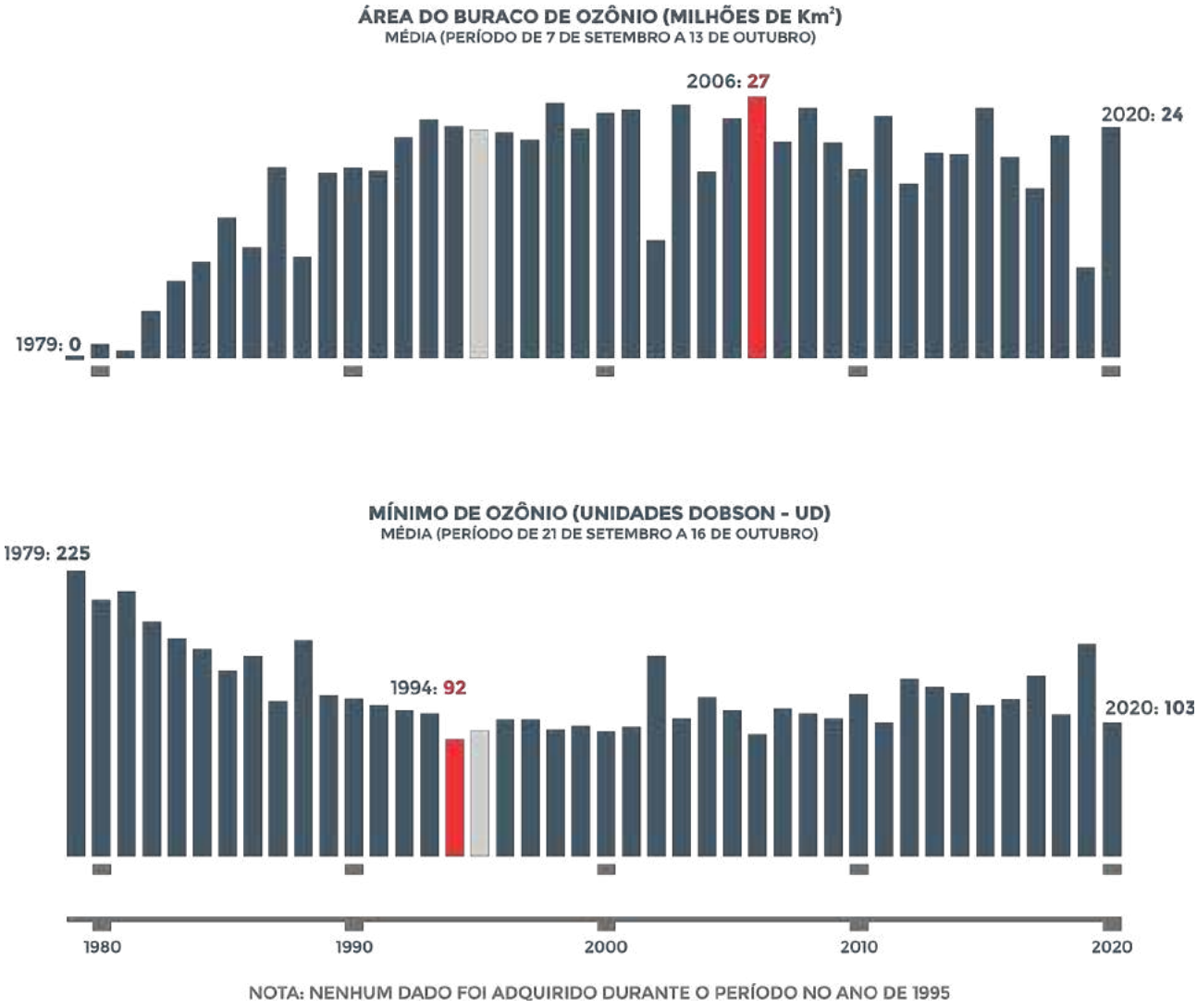



**FIGURA 15.** Gráfico superior: média (período de 7 de setembro a 13 de outubro) da área do buraco de ozônio em milhões de km². Gráfico inferior: média (período de 21 de setembro a 16 de outubro) do mínimo de ozônio (em Unidades Dobson –UD). Nota: Nenhum dado foi adquirido durante o período no ano de 1995. **Fonte:** *NASA/Ozone Hole Watch – http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/*.

## SITES RECOMENDADOS

Cool Antarctica: <www.coolantarctica.com>

Glaciers and glaciation in Antarctica and beyond. <www.antarcticglaciers.org>

British Antarctic Survey. <www.antarctica.ac.uk>

Discovering Antarctica. <www.discoveringantarctica.org.uk>

WWF Terrestrial Ecoregions - Tundra. <www.worldwildlife.org/biomes/tundra>

## Referências Bibliográficas

BRANDT, A., GOODAY, A. J., BRANDÃO, S. N., BRIX, S., BRÖKELAND, W., CEDHAGEN, T., CHOUDHURY, M., CORNELIUS, N., DANIS, B., DE MESEL, I., DIAZ, R. J., GILLAN, D. C., EBBE, B., HOWE, J. A., JANUSSEN, D., KAISER, S., LINSE, K., MALYUTINA, M., PAWLOWSKI, J., … VANREUSEL, A. 2007. First insights into the biodiversity and biogeography of the Southern Ocean deep sea. Nature, 447(7142), 307–311. https://doi.org/10.1038/nature05827

CLARKE, A., & CRAME, J. A. 1989. The origin of the Southern Ocean marine fauna. Geological Society, London, Special Publications, 47(1), 253–268. https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.047.01.19

CLARKE, A. 2003. The polar deep seas. In: Tyler, P.A. (Ed.) Ecosystems of the Deep Oceans. Elsevier, Amsterdam, pp. 239-260.

CONVEY, P., & STEVENS, M. I. 2007. Antarctic Biodiversity. Science, 317(5846), 1877–1878. https://doi.org/10.1126/science.1147261

GRESSITT, J.L. 1967. Entomology of Antarctica. Antarctic Research Series, vol. 10 American Geophysical Union. https://doi.org/10.1029/ar010

CHAPIN, F.S., BERMAN, M. CALLAGHAN *et al.*, 2005. Polar Systems. In: Hassan, R., Scholes, R. & Ash, N. eds. Ecosystems and human well-being: current state and trends. Vol 1. Ch. 25. 719-738.

LIVERMORE, R., HILLENBRAND, C.-D., MEREDITH, M., & EAGLES, G. 2007. Drake Passage and Cenozoic climate: An open and shut case? Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 8(1), n/a-n/a. https://doi.org/10.1029/2005gc001224

MARSHALL, D. J., & COETZEE, L. 2000. Historical biogeography and ecology of a Continental Antarctic mite genus, *Maudheimia* (Acari, Oribatida): evidence for a Gondwanan origin and Pliocene-Pleistocene speciation. Zoological Journal of the Linnean Society, 129(1), 111–128. https://doi.org/10.1111/j.1096-3642.2000.tb00011.x

MINCKS, S. L., DYAL, P. L., PATERSON, G. L. J., SMITH, C. R., & GLOVER, A. G. 2009. A new species of *Aurospio* (Polychaeta, Spionidae) from the Antarctic shelf, with analysis of its ecology, reproductive biology and evolutionary history. Marine Ecology, 30(2), 181–197. https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.2008.00265.x

STEIG, E. J., SCHNEIDER, D. P., RUTHERFORD, S. D., MANN, M. E., COMISO, J. C., & SHINDELL, D. T. (2009). Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. Nature, 457(7228), 459–462. https://doi.org/10.1038/nature07669

LUCAS, M. 1996. Antarctica. New Holland Pub. Ltd, Singapore, 160 p.

WALTON, D.W.H. 1987. Antarctic science. Cambridge University Press, Cambridge, 280

# MUSEU OCEANOGRÁFICO

*Foto: Luciano Souza (MO)*

*Capítulo 32*

# EDUCAÇÃO AMBIENTAL PARA O MAR: MUSEU OCEANOGRÁFICO COMO ESPAÇO EDUCATIVO

*Elisabete de Santis Braga*

CITAÇÃO SUGERIDA: BRAGA, Elisabete de Santis. Educação ambiental para o mar: Museu Oceanográfico como espaço educativo. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 32: p. 733-744.

# Educação Ambiental para o Mar: Museu Oceanográfico como Espaço Educativo

*Elisabete de Santis Braga*

A importância da água no planeta e de seu papel na manutenção da vida sempre alimentou muitas ações em prol de sua conservação e proteção. Nas últimas décadas, a água vem recebendo um tratamento especial em todas as partes do mundo pois, historicamente, o valor da água junto ao desenvolvimento das civilizações e preservação da vida tem sido destacado por instituições nacionais e internacionais, como é o caso da própria ONU (Organização das Nações Unidas), que declarou a Década da Água: Fonte de Vida (2005-2015) como um período para se refletir e agir em relação ao manejo, preservação e defesa dos recursos hídricos. Segue-se a isto a Década do Oceano declarada para 2021-2030, voltando os olhares para a Década da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável.

"Recursos hídricos" é a expressão comumente associada à parcela de água utilizável pelos seres humanos. No entanto, é mais do que isso. O desenvolvimento tecnológico permite inúmeros usos, então praticamente toda a água da Terra seria utilizável, como é o caso da retirada de sais dissolvidos da água dos oceanos e de outros depósitos de água salgada, tornando-a adequada ao consumo humano. As tecnologias de dessalinização (retirada de sal) da água do mar ainda são muito caras, sendo pouco exploradas. Tal processo é utilizado somente em locais realmente desprovidos de outras fontes de água, como é o caso de algumas ilhas, como é Curaçao.

Para suprir suas necessidades, a humanidade conta principalmente com as águas dos lagos, dos rios e de depósitos ou aquíferos subterrâneos. A má utilização da água agrava o problema da sua reposição natural. Por exemplo, cerca de 70% da água utilizada na irrigação evapora ou infiltra-se no solo sem efetivamente ser incorporada aos vegetais. Cerca de 40% da água distribuída pelas redes urbanas é perdida em vazamentos. A escassez de água, em termos de qualidade, vem se tornando uma realidade. Além disso, o uso na agricultura, indústria e doméstico são intensos.

O crescimento da população e da industrialização aumentam a poluição dos cursos de água e das águas marinhas costeiras. O volume de água desses corpos hídricos vem se tornando insuficiente para depurar a carga de material que é lançada, contendo cada vez mais agentes tóxicos. A ação do homem sobre o ambiente repercute sobre o ciclo hidrológico, como é o caso dos desmatamentos que permitem um maior escoamento superficial das águas, alterando a recarga dos aquíferos, modificando a vazão dos rios, provocando enchentes.

A utilização dos corpos de água como grandes receptores de efluentes domésticos e industriais é desmedida, colocando em risco a saúde, a biodiversidade e o equilíbrio ambiental. A poluição por esgotos em regiões costeiras é vista como a mais importante preocupação em termos de poluição marinha atual, sendo que o lixo plástico vem ganhando dimensão nesta última década. São milhões de toneladas de esgoto sendo lançadas no mar. Esgoto este que pode ter de tudo, como detergentes, pesticidas, hidrocarbonetos de petróleo, nutrientes em excesso, agentes patogênicos, medicamentos, micro e nanoplásticos, dentre outras substâncias e materiais.

O mar, devido ao seu imenso volume de água, é tido como grande diluente do material nele inserido. No entanto, a realidade já não é mais essa, pois a inserção de material ocorre em uma quantidade e velocidade tais que superam a capacidade de diluição nas zonas costeiras, ou seja, nas margens dos continentes, onde a ação antrópica (resultante das atividades humanas) está mais presente.

O ciclo hidrológico mostra a disposição da água em diversos compartimentos interligados, onde as fases da água e os locais em que ela se encontra são dinâmicos. Em um determinado "momento" a água está dentro de um ser vivo, em outro pertence a um rio, e mais um está na atmosfera e, quando atinge o oceano, nele permanece por muito tempo, pois como seu volume é o maior, a molécula de água permanece bastante tempo integrando as diferentes massas d'água marinhas antes de passar a outro compartimento do ciclo hidrológico.

A complexidade de interações que a água estabelece com o clima, o mar, a vida, as relações humanas, os recursos vivos e não vivos, as lendas, a tecnologia, faz com que o roteiro de seu conhecimento possa ter várias vertentes como as geológicas, físicas, químicas, biológicas, humanas, tecnológicas e assim vai. A abordagem da água é múltipla e o Museu Oceanográfico adotou um percurso expositivo com foco nos oceanos, mas que não perde de vista as relações da água com os demais temas.

O Museu Oceanográfico do IOUSP, localizado na sede do IOUSP, na cidade Universitária "Armando de Sales Oliveira", foi criado em 1988, visando difundir a Ciência Oceanográfica e as pesquisas desenvolvidas pelo Instituto Oceanográfico da USP. O Museu passou por várias atualizações, mantendo uma exposição permanente; exposições temáticas itinerantes; construiu uma coleção de organismos para empréstimo com finalidade didática; criou uma sala de projeção para abrigar a "Ciência na Esfera"; projetou uma sessão de instrumentos oceanográficos e um espaços para aquários temáticos e tanque para experimentação sensorial; além de diferentes aspectos de relação entre a humanidade e a água e, a humanidade e o mar, destacando a ciência, a tecnologia e a preservação ambiental. Uma contribuição da Exposição "Água: uma viagem no mundo do conhecimento" doada pelo Museu de Ciências da USP, veio enriquecer o conjunto expositivo.

No contexto de valorização da água e da importância dos oceanos, o espaço expositivo remete o visitante ao ambiente marinho. Já em sua entrada, conta com diferentes objetos no jardim e com a traineira Camboriú, a primeira embarcação adquirida pelo IOUSP, em 1954 e utilizada em pesquisas na região de Cananéia e Iguape, litoral sul do estado de São Paulo. O cuidado com a água doce (2,5% do total de água no Planeta) também é evidenciado com a apresentação do uso da água pela agricultura, indústria e uso doméstico, no formato de porcentagem um imenso disco.

**FIGURA 1.** Entrada do Museu Oceanográfico da USP: Embarcação Camboriú (A); e a roda do uso da água (B).
*Fotos: Elisabete S. Braga.*

A interação com o Planeta logo na entrada do Museu inicia a navegação na exposição, onde a espiral histórica da geologia mostra diferentes momentos da formação da Terra com destaque ao aparecimento dos oceanos. Segue-se a deriva continental, a interação ar-mar, e alguns aspectos da água subterrânea com destaque ao aquífero Guarani.

**FIGURA 2. Representação tridimensional do Planeta Terra (A). A espiral geológica, a deriva continental, a circulação termohalina e o aquífero Guarani representados nas peças (B).** *Fotos: José Carlos Gonçalves Dias (A) e Elisabete S. Braga (B).*

A história da Oceanografia, bem como do Instituto Oceanográfico é relembrada no início da exposição, bem como alguns aspectos históricos, tais como: sua constituição como Instituto Paulista de Oceanografia (IPO); o papel do patrono da Oceanografia no Brasil, o Professor W. Besnard; a aquisição da embarcação Camboriú; o uso de "garrafas de deriva" lançadas ao mar para estudo das correntes marinhas; entre outros aspectos históricos.

**FIGURA 3. Um pouco de história: o logotipo do Instituto Paulista de Oceanografia (A); o Prof. W. Besnard (B); uma garrafa de deriva (C); a embarcação Camboriú (D); e o Navio Prof. W. Besnard, em construção (E).** *Fotos: Acervo Museu Oceanográfico.*

Os oceanos, por sua vez, estão envolvidos no equilíbrio do clima no planeta. Assim, conhecer o papel dos oceanos e da preservação de suas condições naturais é uma atitude que deve ser praticada em todos os ambientes de formação dos cidadãos deste planeta, passando pela educação formal e por todas as práticas educativas não formais, que alertam para a preservação e conservação deste enorme reservatório de água do planeta que a Terra abriga.

**FIGURA 4.** Representação do acoplamento ar-mar e aquífero Guarani. Acabamento artístico, imagens de Anavilhanas. *Foto: Elisabete S. Braga.*

A água salgada representa 97,5% da água do planeta, enquanto 2,5% é de água doce. A presença de sais na água do mar e de diferentes átomos que atingiram as depressões oceânicas, lixiviados e eliminados pelo vulcanismo nos momentos de grande intemperismo no planeta, contribuíam com o acúmulo de sal nas bacias oceânicas.

**FIGURA 4.** Representação do inventário da água, com a grande porcentagem de água salgada. *Foto: Elisabete S. Braga.*

A origem da vida associada aos oceanos é remetida em vários momentos na sopa de átomos e água submetida a inusitadas cargas de energia e organização de moléculas, com forte participação de carbono.

**FIGURA 6.** **A vida no mar: os átomos compondo o DNA (A); os diferentes ecossistemas (B); e esqueleto de baleia (C).** *Fotos: Elisabete S. Braga.*

A interface entre os domínios da terra e do mar são amplas fronteiras onde o homem se relaciona de modo direto ou indireto com a água e com os oceanos, considerando atividades de alimentação, transporte, lazer, cultura, entre outras.

**FIGURA 7. Os utensílios desenvolvidos para armazenar a água ao longo da história (A) e as construções relacionadas à água, como os aquedutos (B).** *Foto: Elisabete S. Braga.*

As áreas costeiras de todos os continentes se encontram povoadas e abrigam desde moradias, estabelecimentos comerciais, turísticos, indústrias, salinas, portos e até mesmo a plataforma continental é zona de exploração, por embarcações pequenas para a pesca e retirada de recursos minerais, como o petróleo. Os grandes oceanos são vias de comércio, onde muitas embarcações trafegam, transportando mercadorias, vazando e retirando proteínas do mar. Resíduos de toda sorte são lançados no ambiente marinho, desde pedaços de satélites que eventualmente caem no mar até rejeitos nucleares. A poluição marinha, sobretudo nas regiões costeiras, é uma triste realidade.

**FIGURA 8. As lendas e o misticismo ligados às ao mar (A), e Meios de transportes aquáticos (B).** *Fotos: Elisabete S. Braga.*

Em todos os momentos difíceis, as atitudes mais corretas, duradouras, e que oferecem alguma esperança à humanidade e aos ecossistemas, incluem a educação. A educação como transmissão de conhecimento e atitudes, busca de soluções, participação e formação da cidadania. O ambiente é um todo e está à mercê de ações em todos os setores.

A grandeza dos oceanos, seu papel na manutenção da vida no planeta Terra junto à temperança do clima, ao ciclo da água, à manutenção da vida marinha como via de transporte, como grande dispersor dos poluentes e sumidouro de carbono, mantenedor de culturas e tradições, abrigo de mitos e do desconhecido, deve ser objeto da educação. Na educação ambiental, valores regionais, nacionais, globais e mesmo individuais são cultivados. O enfoque e a perspectiva holística que relaciona o homem, a natureza e o universo assim como o caráter multi e interdisciplinar, podem ser praticados, com muita didática junto às ciências do mar.

Os oceanos permitem uma navegação educativa passando por aumento do conhecimento, prática de saberes, relação multi e interdisciplinar, valores integradores e noções de sustentabilidade, contribuindo com a mudança de valores e ações globais de preservação do planeta. O estudo dos oceanos e as práticas educativas ligadas ao ambiente marinho constituem excelentes ferramentas para a busca de valores integradores e globais no que tange a preservação da vida no planeta, numa relação de preservação cósmica.

A tecnologia desenvolvida para pesquisa nos oceanos foi uma importante etapa para aquisição de conhecimento. Alguns instrumentos estão presentes no museu, mostrando uma evolução.

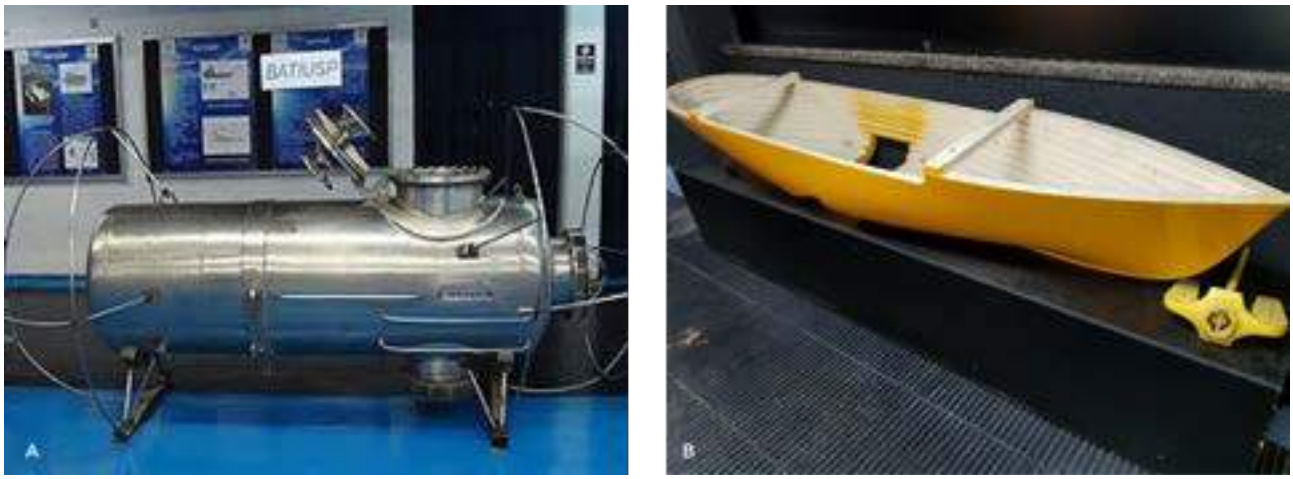



**FIGURA 9.** **O desenvolvimento da tecnologia: o Batiusp (A); e o modelo de casco do navio Besnard, feito para os testes hidrodinâmicos antes de sua construção (B).** *Foto: Elisabete S. Braga.*

Cursos formais capacitam profissionais para atuação em diversas áreas do conhecimento ambiental, como a Ecologia, a Oceanografia, as Ciências Ambientais, entre outras, mantendo uma forte interface com a educação ambiental. O papel do professor na formação de valores de sustentabilidade, com grande importância no século XXI, é fundamental. A participação na governabilidade dos problemas ambientais preconizados na Agenda 21, a reunião da *World Comission on Environment and Development* (Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento), colocam em evidência as causas que originam problemas socioeconômicos e ecológicos que exigem conhecimento pelas novas gerações. Propostas pedagógicas centradas na conscientização dos problemas ambientais, aumentando o conhecimento e incentivando as mudanças de valores em prol de uma maior harmonia e integração com o meio ambiente, devem ser praticadas no modelo formal de educação, contribuindo à cidadania. Os museus constituem excelentes espaços para as práticas educativas, com atividades formais e não formais e no despertar de vocações, sobretudo na mentalidade marítima.

O educador é peça fundamental na construção e solidificação de valores referenciais ambientais buscando a sustentabilidade como prática social e ecológica. E os museus têm forte papel nessa missão. Observando os esforços em prol da disseminação do conhecimento e conscientização para a preservação do meio marinho, nos deparamos com um grande número de pessoas com preocupações científicas, econômicas, sociais e culturais. As ações educativas praticadas em salas de aula, nas escolas, como parte de disciplinas formais, mantêm os educadores atualizados, ativos e preocupados, e permitem a continuidade da prática de proteção e manejo racional.

A educação ambiental praticada por ações extraclasse, formais ou não formais, junto a um objeto de estudo como os oceanos, tem efeitos bastante surpreendentes na fixação de conceitos e na sensibilização das práticas da defesa e conservação. O mar, a praia, o mangue e os estuários são verdadeiros laboratórios para a prática da educação para o mar em todos os níveis, seja fundamental, médio, superior ou melhor idade. Todos nós nos deixamos levar ao conhecimento nestes locais. O mar é atraente, lúdico, poético, misterioso e gigante. Um ecossistema com todas essas qualidades desperta interesse em todas as idades, contribuindo para as ações educativas.

Aquários, exposições, palestras, excursões, oficinas, programas de férias, filmes, livros, desenhos animados, trilhas marinhas, são alguns recursos muito utilizados para a transmissão do conhecimento, formando bases sólidas para a prática da cidadania em defesa daquele que é responsável por boa parte da temperança climática do planeta. Aquele que distribui calor, transportando-o dos lugares mais quentes para os mais frios; aquele que mantém uma diversidade grande de seres vivos; aquele que gera recursos vivos e não vivos; aquele que é via de transporte, aquele que guarda grande parte da água e a libera aos poucos; aquele que fornece condições para amenizar o poder dos contaminantes.

Nos grandes aquários marinhos é possível conhecer a qualidade da água do mar, os tipos de vegetais e animais que vivem em cada cenário marinho, passando por zonas costeiras, regiões entremarés, recifes de corais, costões rochosos, lajes, taludes, oceano profundo, a vida abissal, as hidrotermais e as regiões polares. Montar um aquário simples é uma atividade singela que fornece uma importante noção de quão frágil é o sistema marinho, quão frágil é a vida marinha fora de seu ambiente natural, do quão difícil é mantê-la sob equilíbrio.

O conhecimento do ecossistema marinho, do equilíbrio entre fatores ambientais e a vida, ou das relações entre os elos da cadeia trófica (alimentar), permitem exercícios didáticos de suma importância à compreensão das relações de vida no planeta Terra e levam também ao fortalecimento das relações de confiança, respeito mútuo, responsabilidade, compromisso, solidariedade e cidadania, seguindo os exemplos de relações biológicas no ambiente marinho. A importância de reuniões, como a Rio 92, onde o valor da educação ambiental para a construção de sociedades sustentáveis e com responsabilidades globais foi destacado, deve ter continuidade e passar à pratica efetiva. O incentivo à crítica ao modo de vida contemporâneo, como foi definido a partir da conferência de Estocolmo de 1972, deve ser uma prática contínua, visando a busca da sustentabilidade social, econômica e ecológica, e buscando a promoção de ações integradoras e globais.

O acervo do Museu Oceanográfico conta com organismos vivos, compondo diferentes ambientes nos aquários, para que o conhecimento se amplie em relação ao equilíbrio e as fragilidades dos ecossistemas. Qualquer aquário fascina, mas o modo como o educador trabalha os conceitos de integração e sustentabilidade para uma projeção holística da realidade integradora do ecossistema com o público, constitui sim, a ferramenta mais importante e que deve estar sempre atualizada e dotada de todas as estratégias para que a mesma não seja objeto apenas de lazer individual ou decorativo, permitindo o comércio de peixes e devastação de santuários ecológicos para a decoração de salas e lucro de poucos.

As leis de proteção ambiental são verdadeiras cartilhas que devem ser adotadas, mas há a necessidade de compreensão do todo, do porquê e para quê elas foram concebidas. O homem é muito inteligente e pode até manter a vida em aquários a partir de reproduções adequadas, porém licenças devem ser adquiridas para a comercialização de espécies criadas para este fim. Sempre há uma saída adequada e a sustentabilidade deve ser prezada como lei universal.

**FIGURA 10. Aquários marinhos.** *Fotos: Luciano Souza.*

No Brasil existem poucos aquários voltados à visitação pública, e os investimentos em educadores com capacitação adequada ainda é muito pequeno. A disponibilização de material didático para empréstimo ao professor/educador e ao aluno é um serviço à comunidade que deveria ser praticado por várias universidades como uma forma de apoiar os educadores em suas práticas educativas. Como exemplo dessa atividade, podemos citar o serviço de empréstimo que existe no Museu Oceanográfico do IOUSP, que foi reformulado com o apoio do Pró-Reitoria de Cultura Extensão Universitária da USP em sua missão de fomentar a integração do conhecimento gerado pela Universidade e a comunidade em geral. As práticas extensionistas existem hoje em dia, na maioria das universidades, e devem ser aplicadas à educação ambiental cada vez mais. Nos museus oceanográficos são difundidos conceitos de oceanos e Oceanografia, relatos das pesquisas oceanográficas e a importância da preservação dos oceanos e das áreas costeiras.

**FIGURA 11. Material educativo para empréstimo à escolas, professores e feira de ciência, disponível no Serviço de Museu Oceanográfico do IOUSP.** *Foto: Elisabete S. Braga.*

O conceito de ações locais para a preservação global também é materializado por meio da compreensão de que os oceanos atuam junto ao clima de todo o planeta, firmando a necessidade de tomadas de decisões em conjunto por todas as nações, para a preservação do planeta e da vida.

**FIGURA 12.** A "Ciência na esfera" sala de projeção para uso na exposição e também com reservas para aulas.
*Fotos: Fabiano Attolini (esquerda) e Luciano Souza (direita).*

A "Ciência na esfera" constitui um excelente sistema idealizado e desenvolvido pelo NOAA (Agência Americana de Oceanos e Atmosfera) que faz projeções diversas sobre um globo suspenso. Esse instrumento fantástico contribui ao ensino junto à educação formal, com reservas do espaço para aulas, e também contribui à educação não-formal, que é feita para a comunidade, durante as visitações ao Museu Oceanográfico da USP.

O conhecimento do mar por meio de exposições, acampamentos junto ao mar, trilhas marinhas, ações de estudantes de Oceanografia junto às escolas, geração de material didático específico, capacitação de professores de ciências da natureza, integração das atividades de graduação e pós-graduação das Universidades e as atividades educativas não formais junto às comunidades, são exemplos de práticas que são aplicadas no Brasil e também no âmbito internacional.

Levar as questões ambientais ligadas ao mar às populações estabelecidas no interior dos continentes parece uma difícil missão, mas não é. A curiosidade é tamanha, que a prática educativa se torna sempre um sucesso. Exposições itinerantes representam uma solução móvel para difusão do conhecimento, como ocorre, por exemplo, na exposição temporária "Oceanografia e a biodiversidade marinha", feita pelo Museu Oceanográfico do IOUSP, em parceria com a Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto e o Museu de Ciências da USP. Um exemplo de como levar o conhecimento dos oceanos ao interior. O uso de exposições como ferramenta para a prática educativa apresenta um excelente resultado. O uso de material preservado, de recursos interativos e animações, bem como, de objetos artísticos para falar de ciência, incentivam o conhecimento das questões relacionadas à água no Planeta Terra.

Exposições fotográficas também representam importantes ferramentas para a ação educativa, como é o caso da Pesquisa Antártica Brasileira (Programa PROANTAR), que sempre desperta curiosidade nos visitantes. A exposição oferece um excelente espaço para a prática da educação não formal, mostrando a importância do continente gelado e dos oceanos polares na temperança climática do planeta.

**FIGURA 13.** Exposição fotográfica de diferentes aspectos da região Antártica tomadas durante as pesquisas com participação de integrantes do IOUSP no Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR).
*Fotos: Elisabete S. Braga.*

As feiras de ciência, de todos os tamanhos e as palestras em escolas através de pessoal especializado com alunos e professores da Oceanografia, também são ações muito qualificadas. As oficinas de toque que existem em quase todos os centros de ciências e aquários em muitos países, como a toca do toque na Fundação La Caixa (Barcelona), em Oceanópolis (França) e em outros países, também podem ser implementadas no Museu Oceanográfico do IOUSP. A oficina de toque realizada na Semana Nacional de Ciência e Tecnologia, em evento na Praça do Relógio na USP, provocou a sensibilização de muitas crianças, muitas que jamais tinham visto animais marinhos, pois eram provenientes de cidades localizadas a mais de 300 km do mar. A sensibilização é uma das atividades de maior impacto junto à educação ambiental, de modo geral, e de modo muito especial, no que tange ao ambiente marinho. Os animais marinhos sempre despertam curiosidade, sendo excelentes veículos para o conhecimento das práticas de preservação e sustentabilidade necessárias a esse meio.

A prática da preservação por meio de conhecimento aberto à comunidade em geral também faz parte de uma estratégia de sucesso ao conhecimento dos oceanos. Cursos de Extensão Universitária aproximam a comunidade da Universidade e do conhecimento, como ocorre no curso de extensão "Usos e abusos do mar!", no "Descobrindo os Oceanos: Embarque imediato", e no curso de difusão cultural "Noções sobre Oceanografia", oferecido aos domingos pelo Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo a um público eclético e heterogêneo, do público leigo aos profissionais das mais diversas áreas do conhecimento, cuja curiosidade sobre assuntos do mar deve ser saciada.

O Instituto Oceanográfico dispõe de acomodações para a prática de atividades educativas formais e não formais em suas bases de apoio ao ensino e a pesquisa: no litoral norte, Base Norte – "Clarimundo de Jesus", em Ubatuba; e no litoral Sul, Base Sul – "Prof. Dr João de Paiva Carvalho", em Cananéia. Cada uma delas dispões de alojamentos, laboratórios e meios flutuantes para a educação formal dos alunos da universidade, e não formal, junto às ações educativas do âmbito da Cultura e Extensão de Serviços à Comunidade. A aproximação da comunidade e das escolas é uma prática frequente na Instituição.

**FIGURA 14. Tempo de degradação de alguns materiais que atingem os oceanos na forma de lixo.** *Foto: Elisabete S. Braga.*

Cursos mais sofisticados também são oferecidos à comunidade, como o caso do curso de Especialização "Medição, análise, previsão e modelagem do nível do mar". O curso é direcionado a alunos graduados em áreas afins, para complementação de formação em Oceanografia Física, e está à disposição no Instituto Oceanográfico da USP.

A educação ambiental para o mar permite reorientar estilos de vida coletivos e individuais em prol de ações integradoras e globais, facilitando um exercício de cidadania planetária.

Vamos preservar o meio marinho e interagir com ele com conhecimento e respeito, a caminho de uma relação de sustentabilidade para a manutenção do Planeta. O lixo nos oceanos preocupa a todos e a degradação dos materiais que atingem os oceanos pode ser muito lenta, sendo que os danos causados ao ecossistema podem ser irreparáveis. O tempo de degradação de alguns materiais estão indicados no percurso expositivo.

Venham conhecer o Museu Oceanográfico do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. Temos recebidos muitas escolas, grupos ou público individual. Todos são muito bem-vindos a bordo!

MUSEU
OCEANOGRÁFICO
IOUSP

*Capítulo 33*

# ATIVIDADES DE CAMPO DO MUSEU OCEANOGRÁFICO NO CURSO "NOÇÕES SOBRE OCEANOGRAFIA"

*Sérgio Teixeira de Castro, Fabiano da Silva Attolini & Luciano Pereira de Souza*

CITAÇÃO SUGERIDA: CASTRO, Sérgio Teixeira de; ATTOLINI, Fabiano da Silva; SOUZA, Luciano Pereira de.Atividades de campo do Museu Oceanográfico do IOUSP durante o curso. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 33: p. 747-757.

# Atividades de Campo do Museu Oceanográfico no Curso "Noções sobre Oceanografia"

*Sérgio Teixeira de Castro, Fabiano da Silva Attolini & Luciano Pereira de Souza*

## 1. Introdução

Como atividade de campo (opcional) do curso de difusão "Noções sobre Oceanografia" do IOUSP, o Museu Oceanográfico coordena uma vivência prática com os alunos do curso na base de apoio ao ensino e pesquisa do IOUSP "Dr. João Paiva de Carvalho", em Cananéia, litoral sul de São Paulo (aproximadamente 230 km da capital).

Essa atividade é uma adaptação do projeto de excursão ecológica "A Escola Vai Ao Mar" do Museu Oceanográfico do IOUSP, criada por Sérgio Castro e aplicada a escolas de ensino médio da rede pública e privada de São Paulo desde 1992 e suspenso em 2001, por conta do excesso de utilização das bases após a implantação do curso de graduação em oceanografia. Desde este período, a atividade é oferecida semestralmente aos alunos do curso de difusão a "Noções Sobre Oceanografia" do IOUSP.

Esta vivência com o meio ambiente marinho é uma oportunidade única que permite ao aluno praticar o que ele aprendeu na teoria durante o curso. A ideia é que eles possam se sentir como um pesquisador desenvolvendo suas pesquisas a bordo de embarcações oceanográficas, manipulando equipamentos, analisando o material coletado em laboratório e debatendo temas correlatos a Oceanografia e a preservação do ambiente marinho.

Primeiramente os alunos do curso fazem uma inscrição prévia para a saída de campo e, caso haja necessidade, participam de um sorteio por conta do número restrito de 20 vagas para a operacionalização do projeto.

A atividade é optativa devido ao valor de custo cobrado por aluno para a sua realização, pois há necessidade de contratação de um transporte (ônibus), seguro de acidentes pessoais, educadores (pós-graduação do IOUSP) para a realização das atividades, pagamento de alimentação, hospedagem e combustível para as embarcações (Albacora e lanchas), além das taxas de diárias das mesmas.

Após a formação do grupo, os alunos recebem uma ficha cadastro (médica) para que possamos acompanhar as pessoas que possuem algum tipo de enfermidade, alergia a remédios, comidas, insetos, etc. Também é fornecida, ao grupo, uma lista de sugestão com itens de uso pessoal a serem levados para a viagem como roupas para entrar nos manguezais, protetor solar, repelente, capa de chuva, etc. Nesta lista os alunos tomam conhecimento também de tudo que é oferecido pela Base do IOUSP.

Período de realização das atividades: final de semana subsequente ao término do curso de difusão Noções sobre Oceanografia. Este programa é restrito a maiores de 18 anos por questões de segurança e de responsabilidade civil.

***Objetivos:*** "Proporcionar uma experiência prática com o ambiente marinho, aplicando parte da teoria abordada no curso de difusão Noções sobre Oceanografia do IOUSP, visando sempre uma reflexão sobre nossos valores e nossa consciência de sustentabilidade".

## 2. Cronograma de atividades

**QUADRO 1.** Cronograma de atividades do curso "Noções sobre Oceanografia".

| Dia | Horário | Atividades |
|---|---|---|
| 1º dia (sexta-feira) | 13:00 | Saída do IOUSP (Cidade Universitária – SP) |
| | 17:30 | Chegada prevista em Cananéia (base sul do IOUSP) |
| | 17:35 | Apresentação da base: Neste momento os alunos tomam conhecimento da estrutura oferecida pela base de apoio ao ensino e pesquisa do IOUSP "Dr. João de Paiva Carvalho" e recebem suas primeiras orientações sobre o programa a ser desenvolvido. Além deste reconhecimento, eles são apresentados a alguns equipamentos meteorológicos e oceanográficos instalados na base que fornecem dados muito importantes para o apoio aos pesquisadores que ali desenvolvem seus trabalhos e também para a Marinha do Brasil |
| | 19:00 | Jantar |
| | 20:00 | Palestras sobre Cananéia (história e cultura), formação geológica da região, ecossistema estuarino lagunar, manguezal e sobre a ação antrópica do Valo Grande |
| | 21:00 | Apresentação do programa e divisão dos grupos. Após a apresentação da programação e do cronograma de atividades, os alunos são separados por sorteio em dois diferentes grupos para facilitação da logística de operação. Cada grupo participa simultaneamente com os outros das atividades pré-estabelecidas e, em um rodízio, executarão cada atividade em um período do final de semana, se encontrando apenas durante as refeições, palestras, debates e reconhecimento da base e da cidade |
| 2º dia (sábado) | 08:00 | Café da manhã |
| | 09:00 | Atividades práticas I (Grupo A) e II (Grupo B) |
| | 12:30 | Almoço |
| | 14:00 | Atividades práticas I (Grupo B) e I (Grupo A) |
| | 17:00 | Retorno à base |
| | 19:00 | Jantar |
| | 20:30 | Debate (dinâmica de grupo) |
| 3º dia (domingo) | 08:00 | Café da manhã |
| | 09:00 | Atividades práticas III (Grupos A e B) |
| | 12:00 | Encerramento no trapiche (píer) |
| | 13:30 | Almoço |
| | 14:30 | Partida para São Paulo (IOUSP) |

Tradicionalmente, ao final de cada versão do programa, os alunos são todos "batizados" com substrato retirado do fundo do Canal do Mar Pequeno, próximo à Base do IOUSP, onde cada um recebe um nome de um organismo marinho associado às características mais marcantes do mesmo, avaliada e registrada pelos educadores e equipe técnica do Museu Oceanográfico do IOUSP, durante o período das atividades.

## 3. Atividades principais

### 3.1 Palestras sobre Cananéia (história e cultura), formação geológica da região, características do ecossistema estuarino lagunar, manguezal e Valo Grande

O objetivo destas palestras iniciais é orientar os alunos quanto a sua localização geográfica, apresentar a estrutura de formação geológica da região (decorrente dos fenômenos de transgressão e regressão do nível do mar), discutir sobre a importância da estrutura, da dinâmica e da biodiversidade dos ecossistemas estuarinos lagunares e manguezais, além da necessidade de sua preservação, bem como apresentar a problemática e as consequências de uma ação antrópica crucial para a formação do Canal do Mar Pequeno ou Mar de Cananéia, a construção do Valo Grande em Iguape (instalação da barragem e desvio do leito do Rio Ribeira do Iguape).

**FIGURA 1.** Palestras específicas sobre a região estuarino-lagunar de Cananéia/SP.
*Foto: Luciano Pereira de Souza*.

### 3.2 Simulação de estação oceanográfica

Os alunos fazem a simulação de uma estação oceanográfica, promovendo um estudo básico das características físico químicas, geológicas e biológicas do ambiente marinho, utilizando a embarcação Albacora do IOUSP e equipamentos oceanográficos como:

***Correntômetro Sensor Data:*** medição das correntes marinhas de superfície/fundo.

***Batitermógrafo (BT):*** registra um perfil da temperatura na coluna d´água, através de um método indireto (contração e dilatação de metais).

***Garrafa de deriva:*** propicia a observação visual das correntes oceânicas de superfície e da influência do vento.

***Disco de Secchi:*** determinação visual da transparência e turbidez da água. Tradicionalmente o disco de PVC branco vem montado em uma corda para ser baixado aos poucos na água, marcando-se a profundidade limite de sua visualização.

***Rede de plâncton:*** rede cônica ou cilíndrica de malha muito fina (60 a 500µm), confeccionada para coletar organismos do plâncton (fito ou zooplâncton).

***Garrafa de Nansen:*** equipamento amplamente utilizado na Oceanografia, principalmente para coleta de água, de onde podem ser analisados parâmetros como salinidade, oxigênio dissolvido, temperatura, etc.

**FIGURA 2.** **Atividades realizadas durante a simulação de estação oceanográfica: A) Instruções sobre a operação dos equipamentos; B) Lançamento da Garrafa de Nansen para coleta de água ; e C) Observação dos termômetros de reversão para obtenção da temperatura.** *Fotos: Luciano Pereira de Souza*.

***Rede de arrasto:*** rede composta por duas "portas" de madeira que se mantêm afastadas e servem para abrir a rede, aumentando a área de captura. Na parte de cima existem flutuadores e, na de baixo, pesos para manter a rede no fundo e sempre esticada. É utilizada principalmente para coleta de peixes e organismos da megafauna bentônica.

Além destas práticas com equipamentos oceanográficos, os alunos aprendem um pouco sobre salvatagem (técnicas de segurança a bordo), observam a cobertura de nuvens, a intensidade dos ventos, o posicionamento geográfico (latitude e longitude) através do GPS, avaliam a carta náutica local, observam a profundidade através do ecossonda e ainda conhecem um pouco da estrutura e funcionamento de uma embarcação oceanográfica do IOUSP, a Albacora (traineira de aproximadamente 14 m adaptada para trabalhos oceanográficos). Nesta atividade, os alunos geram uma planilha oceanográfica para registrarem todos os dados coletados, além promover os registros fotográficos. Durante todo o trabalho embarcado, os alunos permanecem com coletes salva vidas por medidas de segurança.

**FIGURA 3.** **A e B) Visita à cabine de comando para observação de equipamentos de navegação, carta náutica da região, etc.** *Fotos: Luciano Pereira de Souza*.

## 3.3 Estudo prático do manguezal, visitas ao sambaqui e cerco de pesca

Na atividade de vivência prática no ecossistema de manguezal, os alunos, embarcados em lanchas de alumínio de casco achatado (carinhosamente chamadas de "chatinhas") e devidamente equipados com coletes salva vidas, são levados a diversos pontos de manguezais da região de Cananéia e Ilha Comprida (SP). Ali, eles têm a oportunidade de transitar às margens deste ecossistema, considerado um berçário do ecossistema costeiro devido a sua grande produtividade e depósito de matéria orgânica que serve também de abrigo e fonte de alimento para uma grande quantidade de larvas e adultos de organismos invertebrados e vertebrados marinhos.

**FIGURA 4.** **A e B) Atividades no manguezal.** *Fotos: Luciano Pereira de Souza*.

No **Manguezal**, um ecossistema considerado de transição entre os ambientes terrestres e marinhos, os alunos podem sentir a textura e o odor do substrato lodoso e rico em matéria orgânica; observar as adaptações das principais plantas como raízes escoras para apoio e sustentação (*Rhizophora* sp.), pneumatóforos para trocas gasosas (*Avicennia* sp.) e "glândulas" de eliminação de sais das folhas para controle osmótico (*Laguncularia* sp.); a fauna típica, representada pelos caranguejos de mangue (arborícolas ou que vivem sobre o sedimento); moluscos tubicolas como o Teredo, temidos pelo seu poder de perfuração de madeiras; o regime das marés vazantes e enchentes, que regem toda a circulação de nutrientes neste ambiente; etc. É apresentada ainda para os alunos a grande importância do manguezal como fonte direta ou indireta de alimentos para as populações humanas e a relação com o desmatamento e extração de recursos como caranguejos, moluscos e madeira para construção.

**FIGURA 5. A e B) Retorno para as chatinhas após a visita ao manguezal.** *Fotos: Luciano Pereira de Souza.*

No Rio Embu-Guaçu (Ilha Comprida), os alunos conhecerão um depósito de conchas calcarias, o **Sambaqui**, proveniente de uma etnia de mais de 4.000 anos atrás chamada Povo do Sambaqui que se alimentava muito destes moluscos e depositavam estas conchas na beira dos rios, praias e mesmo ilhas da região. Alguns até enterravam seus mortos nestes depósitos. Atualmente são utilizados como sítio arqueológico e etnológico para se compreensão de seus hábitos, crenças, religiões, etc.

**FIGURA 6. A e B) Sambaqui do rio Embu-Guaçu (Ilha Comprida).** *Fotos: Luciano Pereira de Souza.*

No retorno da atividade, uma parada estratégica é realizada em um **Cerco** (ou Curral), armadilha de bambus para captura de peixes, utilizada pelos caiçaras e provavelmente advinda da cultura indígena, onde podemos observar uma essência sustentável empírica na estrutura onde os peixes de interesse comercial e de consumo são retirados e os demais devolvidos à natureza, deixando o fluxo das correntes e marés correrem naturalmente onde são fixados. Nesta atividade, toda explicação e demonstração da estrutura é realizada por um funcionário da Base do IOUSP, caiçara, nativo de Cananéia, com muita experiência na construção e utilização de Cerco para pesca.

### 3.4 Atividades práticas de laboratório

Nesta atividade é feita a observação e o estudo de alguns organismos marinhos, analisando seus modos de vida, alimentação, morfologia, adaptações, etc. A atividade de laboratório é dividida basicamente em três módulos: plâncton, nécton e bentos.

A partir da coleta feita durante os trabalhos na embarcação, o plâncton é observado sob lupa ou microscópio e são identificados os grupos mais representativos como copépodas, diatomáceas, dinoflagelados e larvas de peixes e invertebrados bem como algumas de suas principais adaptações. Para tanto, os alunos utilizam-se de livros com chaves de identificação e pranchas com ilustrações (material do próprio museu).

**FIGURA 7. Consulta bibliográfica, pranchas de identificação e mapas da região.** *Foto: Luciano Pereira de Souza.*

Os peixes coletados através da rede de arrasto são analisados através do estudo da morfologia externa (escamas, nadadeiras, forma do corpo, etc), morfologia interna (órgãos principais) e conteúdo estomacal (tentativa de identificação do alimento ingerido). É também realizado um estudo sobre forma e função, procurando associar algumas características morfológicas (estrutura e posição da boca, tipo de arcos branquiais, posição e tipo das nadadeiras, presença de barbilhões, coloração, etc.) com alguns hábitos e modos de vida dos peixes (carnívoro ou filtrador, pelágico ou bentônico, etc.).

Como a diversidade de organismos bentônicos é enorme e apenas alguns espécimes são coletados pela rede de arrasto, são trazidos organismos já fixados provenientes do setor de empréstimo do Museu Oceanográfico, sendo o estudo baseado neste material, através do reconhecimento das estruturas externas e das adaptações.

**FIGURA 8.** A e B) Aula com o material do setor de empréstimo do Museu Oceanográfico; C) Análise do material coletado durante a atividade embarcada. *Fotos: Luciano Pereira de Souza.*

### 3.5 Debate e dinâmica de grupo

Dinâmica e debate sobre sustentabilidade e preservação ambiental, social e cultural. Nesta atividade os alunos são levados a refletir sobre o que absorveram até o momento nas atividades que participaram.

Ainda em grupos, eles são convidados a elaborar uma estratégia de apresentação para os demais participantes sobre os conceitos importantes adquiridos e, de uma forma crítica e reflexiva, relatar a importância disto nas mudanças de seus próprios hábitos em busca de um mundo mais sustentável. Portanto, seja através de jingles, rap ou mesmo através de dramatizações (pequenos contos ou comerciais), todos os alunos participam e contribuem com reflexões, discussões, e soluções para esta grande problemática da preservação ambiental e de recursos naturais para as próximas gerações.

**FIGURA 9.** A e B) Dinâmica de grupo onde os alunos escolhem algumas formas de representar o conteúdo abordado durante o dia, nas atividades de estação oceanográfica e manguezal. C e D) Encerramento do programa, após o batismo simbólico. *Fotos: Luciano Pereira de Souza*.

### 3.6 Avaliações e atestados

No retorno a São Paulo, os alunos recebem um questionário simples de avaliação para que possamos aperfeiçoar nosso programa e manter o nível de excelência. Um atestado também é fornecido aos alunos que participaram das atividades de campo, com um total de 16 horas.

## 4. Anexos

### 4.1 Ficha cadastro/médica que os alunos levam para a viagem (trabalho de campo)

### 4.2 Questionário de avaliação do programa

| CADASTRO DE VIAGEM | | |
|---|---|---|
| NOME: | | DATA DE NASCIMENTO: |
| ENDEREÇO: | | BAIRRO: |
| CEP: | E-MAIL: | FONE: |
| | | RG: |
| ALUNO DO CURSO: | | C P F: |
| ACOMPANHADO (A) DE SEUS **MONITORES**, PARA (LOCAL) : | | |
| DURANTE O PERÍODO DE : ----------/----------/---------- A ----------/----------/---------- | | |

| DADOS GERAIS DO PASSAGEIRO PARA A VIAGEM | | |
|---|---|---|
| NOME DA MÃE : | | |
| NOME DO PAI: | | |
| SABE NADAR | TEM RESTRIÇÕES PARA ENTRAR NA AGUA | TEM RESTRIÇÕES PARA ALGUMA ATIVIDADE FISICA? CASO AFIRMATIVO, INFORMAR QUAIS. |
| Qual o seguro saúde? Informe o telefone de emergência do seguro e o número de segurado. Se possível envie a carteira de associado com ele ou com um responsável na viagem. | | |

| DADOS MÉDICOS DO PASSAGEIRO PARA A VIAGEM | | | | |
|---|---|---|---|---|
| ALTURA: | PESO ATUAL: | TIPO SANGUÍNEO: (A) (B) (AB) (O) | RH (+) (-) | NÃO SABE ( ) |
| TEM ALGUMA DOENÇA CRÔNICA? QUAL? | | TEM RESTRIÇÃO A ALGUM MEDICAMENTO? QUAL? | | |
| ESTA SENDO MEDICADO ULTIMAMENTE? QUAL O MEDICAMENTO? NÃO SE ESQUEÇA DE ENVIA-LO! | | | | |
| TEM ALERGIA QUE NÃO SEJA RELACIONADA A MEDICAMENTOS? QUAL? COMO O MÉDICO PROCEDE DE COSTUME? | | | | |
| COMO DEVE SER ADMINISTRADA A MEDICAÇÃO? | | TEM ACOMPANHAMENTO MÉDICO? | | |
| QUAL O NOME E TELEFONE DO MÉDICO PARA SER USADO EM CASO DE EMERGÊNCIA? | | JÁ SOFREU ALGUMA CIRURGIA? QUAL? | | |

_____

Local, data e assinatura.

**OBS. – Obrigatória a apresentação desta ficha preenchida e assinada no dia da viagem.**

Museu Oceanográfico do Instituto Oceanográfico da USP – Praça do Oceanográfico, 191 - Butantã (SP) – Brasil.
CEP: 05508-120. Tel.: (0xx11) 3091 6587 – E-mail: museu.io@usp.br

- Anexo 1 -

**Avaliação Excursão Ecológica do**
**Museu Oceanográfico IOUP para o Curso "Noções sobre Oceanografia"**

**Data: ___/___/____ Local: _____ Idade:_____.**

**A - <u>Atividades Educativas:</u>**

1 – Palestras introdutórias sobre Cananéia, Valo Grande, Manguezal, etc.:
( ) ótima ( ) boa ( ) regular ( ) fraca

2 – Simulação de Estação Oceanográfica:
( ) ótima ( ) boa ( ) regular ( ) fraca

3 – Atividade Prática em Ambiente de Mangue:
( ) ótima ( ) boa ( ) regular ( ) fraca

4 – Atividades práticas de laboratório:
( ) ótima ( ) boa ( ) regular ( ) fraca

5 – Desempenho de cada monitor:

**B – <u>Infraestrutura e apoio:</u>**

1 – Acomodações da Base (alojamentos, banheiros, limpeza, etc.):

2 – Refeições oferecidas:

3 – Embarcações e Laboratórios:

**C – <u>Sugestões:</u>**
Se desejar, relacione no verso sugestões e críticas que possam contribuir para o projeto.

# OCEANOGRAFIA APLICADA

*Foto: Leandro Coelho*

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 34*

# INSTRUMENTAÇÃO OCEANOGRÁFICA

*Luiz Vianna Nonnato*

CITAÇÃO SUGERIDA: NONNATO, Luiz Vianna. Instrumentação oceanográfica. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 34: p. 763-788.

# Instrumentação Oceanográfica

*Luiz Vianna Nonnato*

## 1. Introdução

De um modo geral, cada área de pesquisa científica emprega instrumentos de medida e outros equipamentos que são específicos para o tipo de trabalho desenvolvido naquela área. Não fugindo a esta regra geral, a Oceanografia dispõe de um vasto conjunto de equipamentos especiais, próprios para a coleta de informações sobre o ambiente marinho.

Desde os primeiros estudos científicos sobre o ambiente marinho, em meados do século 19, inúmeros instrumentos oceanográficos foram desenvolvidos. Os primeiros instrumentos, devido às limitações tecnológicas da época, tiveram concepção basicamente mecânica, embora em alguns casos incorporassem mecanismos muito engenhosos (Fig. 1) e possibilitassem a realização de medições com alta precisão.

Com o avanço da tecnologia, sistemas eletrônicos de controle e aquisição de dados, assim como novas classes de sensores de alto desempenho e novos materiais (alumínio, titânio e plásticos especiais), foram sendo gradativamente incorporados no projeto de novos equipamentos. Na atualidade, boa parte dos instrumentos empregados em levantamentos oceanográficos apresenta subsistemas eletrônicos sofisticados, incorporando microprocessadores poderosos, podendo inclusive implementar estratégias sofisticadas de controle e processamento de dados, como inteligência artificial.

**FIGURA 1.** Correntòmetro (medidor de correntes marinhas) modelo *Eckman*, desenvolvido nos primeiros anos do século 20.

Devido à enorme variedade de modelos de equipamentos atualmente disponíveis para trabalhos de pesquisa oceanográfica, seria impossível a descrição exaustiva dos mesmos. Este trabalho procura, assim, apresentar uma visão geral sobre instrumentação oceanográfica, descrevendo alguns dos equipamentos comumente utilizados em levantamentos no ambiente marinho.

O ambiente marinho apresenta características bastante peculiares, que influenciam marcantemente diversos aspectos da concepção e operação dos equipamentos oceanográficos:

***Pressão externa elevada:*** equipamentos que operam submersos devem suportar grandes pressões externas, uma vez que a pressão na coluna d'água aumenta cerca de uma atmosfera a cada dez metros de profundidade. Assim, por exemplo, um instrumento que opere a 1.000 m de profundidade está submetido a uma pressão 100 vezes superior à da superfície. Desta forma, as câmaras estanques de instrumentos que operam a grandes profundidades devem ser extremamente reforçadas, sendo usualmente construídas de aço inoxidável, vidro ou titânio (Fig. 2A).

***Ambiente quimicamente ativo:*** a água do mar, devido aos diversos sais nela dissolvidos, é bastante ativa quimicamente, podendo acarretar rápida corrosão de componentes dos equipamentos. Para minimizar os efeitos do ambiente, usualmente equipamentos oceanográficos recebem revestimentos especiais ou são construídos em materiais apropriados, como aço inoxidável, vidro ou materiais termoplásticos (nylon, policarbonato, etc).

***Rápida incrustação por organismos vivos:*** equipamentos que operam na superfície ou próximo a ela estão sujeitos a incrustação por organismos vivos (algas, moluscos, crustáceos, entre outros). Esta incrustação pode causar modificação nas dimensões dos equipamentos (acarretando um aumento do arrasto hidrodinâmico do equipamento, por exemplo), obstrução de sensores, prejudicar a movimentação de partes móveis (como hélices ou lemes) ou, em casos extremos, danificar irreparavelmente o mesmo (como no caso de incrustação de moluscos teredinídeos, que perfuram estruturas de madeira). Revestimentos especiais dos instrumentos, como tintas anti-incrustantes, podem retardar o crescimento dos organismos, mas equipamentos instalados próximos à superfície necessitam obrigatoriamente de limpeza periódica (Fig. 2B).

***Agitação constante:*** devido à ação de ondas e vento, equipamentos que operam na superfície ou próximo a ela estão sujeitos a permanente agitação. Assim, componentes do equipamento podem apresentar problemas decorrentes de fadiga mecânica do material e do deslocamento de peças. Como consequência, por exemplo, peças aparafusadas podem se soltar ou placas eletrônicas podem apresentar mau-contato. Desta forma, especial cuidado deve ser tomado na fixação adequada dos diversos componentes do equipamento.

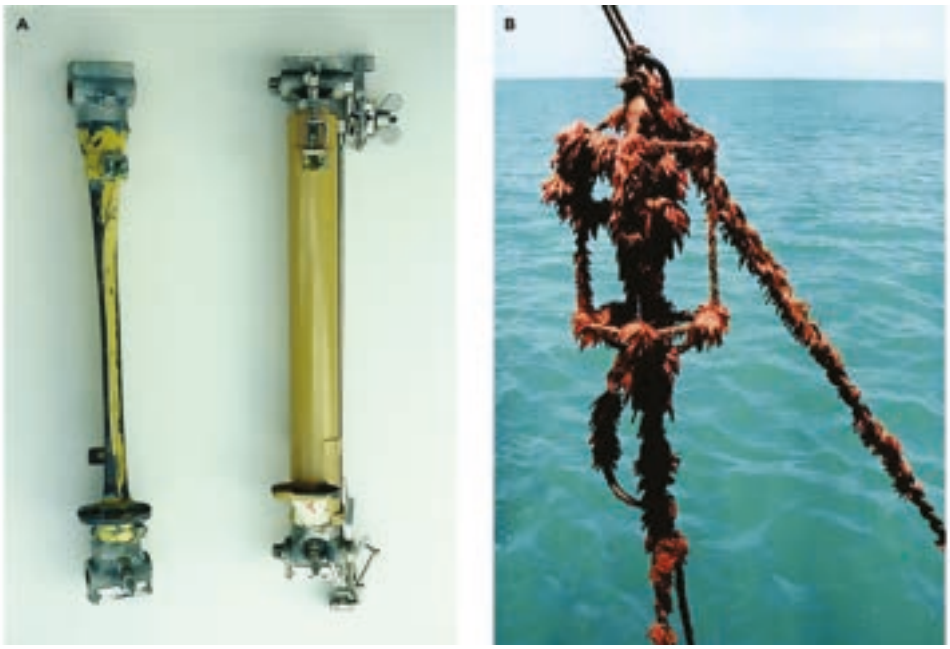



**FIGURA 2. Efeitos das condições adversas do ambiente marinho: A) pressão – Garrafa de *Nansen* danificada pela pressão elevada (esquerda), ao lado de um instrumento em boas condições de funcionamento (direita); e B) crescimento de organismos – correntômetro totalmente coberto por organismos.** *Fotos: L.V. Nonnato e Chico Vicentini.*

### *Classes de equipamentos oceanográficos*

Os equipamentos oceanográficos, de uma maneira bastante simplista, podem ser classificados em:

***Equipamentos de coleta de amostras:*** permitem ao pesquisador obter amostras de sedimento do fundo, de água ou de organismos vivos que se encontrem na coluna d'água, sobre o fundo ou enterrados no sedimento do fundo

***Equipamentos de medição "in situ":*** oferecem ao pesquisador a possibilidade de medição de um ou mais parâmetros do ambiente marinho, no exato local onde o instrumento é posicionado; os resultados das medições podem ser armazenados internamente ao instrumento ou apresentadas imediatamente ao operador

***Equipamentos de medição remota (ou sensoriamento remoto):*** permitem a medição à distância de parâmetros do ambiente marinho ou a detecção remota de objetos submersos. Deve-se notar que tais instrumentos não implicam na instalação de qualquer componente ou sensor no local de medição. Equipamentos oceanográficos de medição remota são usualmente baseados em sistemas acústicos (como sonares, eco-sondas e perfiladores acústicos de corrente) ou em sistemas que empregam radiação eletromagnética (como radares ou radiômetros, instalados em terra, aeronaves ou satélites artificiais).

Além destes, é importante mencionar-se a disponibilidade de veículos submarinos adequados à realização de levantamentos oceanográficos. Coleta de amostras, observação e monitoramento do fundo oceânico e medições de parâmetros do ambiente marinho são tarefas tipicamente desempenhadas por tais veículos.

## 2. Equipamentos de coleta de amostras

Em função do tipo de material a ser coletado (organismos vivos, amostra de sedimento ou amostra d'água) e do local de amostragem (camada próximo à superfície, interior da coluna d'água ou fundo), diferentes equipamentos de coleta podem ser utilizados.

### 2.1. Amostradores de fundo

Para a coleta de amostra de material do fundo, visando estudos biológicos ou geológicos, os equipamentos mais comumente utilizados são os pegadores de fundo e as dragas. Estudos especiais podem utilizar equipamentos mais específicos, como "*box corers*" (amostradores que permitem a coleta de sedimento com perturbação mínima) ou testemunhadores geológicos (permitem a coleta de amostras do sedimento subjacente ao fundo). Alguns modelos destes instrumentos podem ser extremamente sofisticados, permitindo a coleta de múltiplas amostras ou a medição simultânea de parâmetros do sedimento de fundo (como temperatura ou porosidade).

***Dragas:*** redes reforçadas ou estruturas metálicas que são arrastadas sobre o fundo, coletando organismos vivos ou material mineral que se encontra sobre o fundo ou na camada mais superficial do fundo (primeiros 20 - 30 cm do fundo); diferentes modelos de dragas podem ser utilizados em diferentes tipos de fundo, como lodo, areia, cascalho ou coral (Fig. 3).

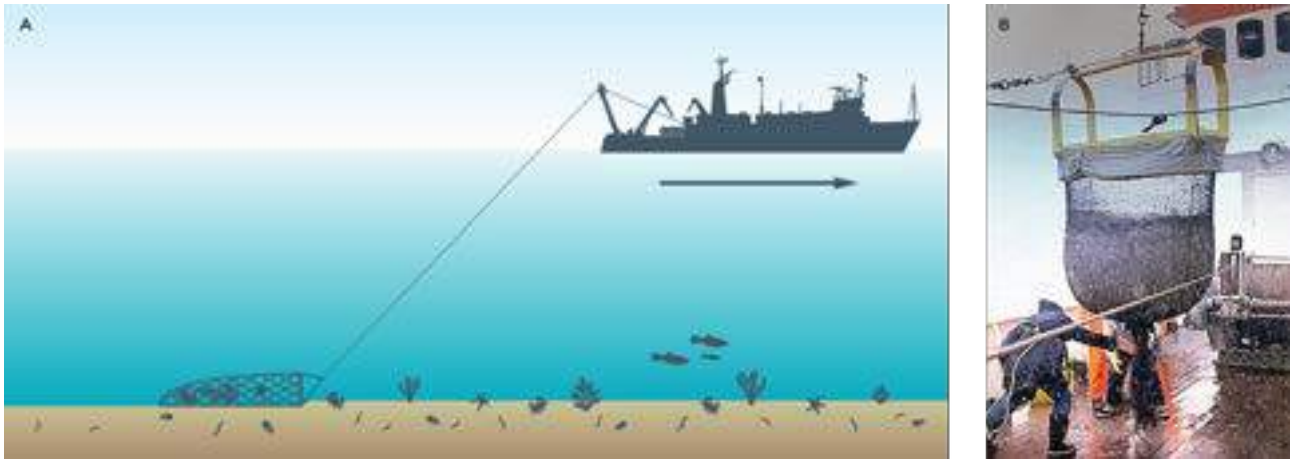


**FIGURA 3.** **Dragas: A) esquema de operação; e B) Recuperação de após amostragem.** *Foto: L.V. Nonnato.*

***Pegadores de fundo:*** sistemas mecânicos constituídos por, usualmente, duas (em alguns casos, três ou quatro) conchas metálicas articuladas que, abertas, são descidas até o fundo; ao tocar o fundo, as conchas se fecham, retendo um volume pré-determinado de sedimento do fundo (incluindo organismos nele enterrados). Estes equipamentos são bastante eficientes para coleta de amostras em locais de fundo mole, embora possam causar alguma perturbação na estrutura do material amostrado; o volume de material coletado, para diferentes equipamentos, pode variar entre menos de um litro até algumas centenas de litros (Fig. 4).

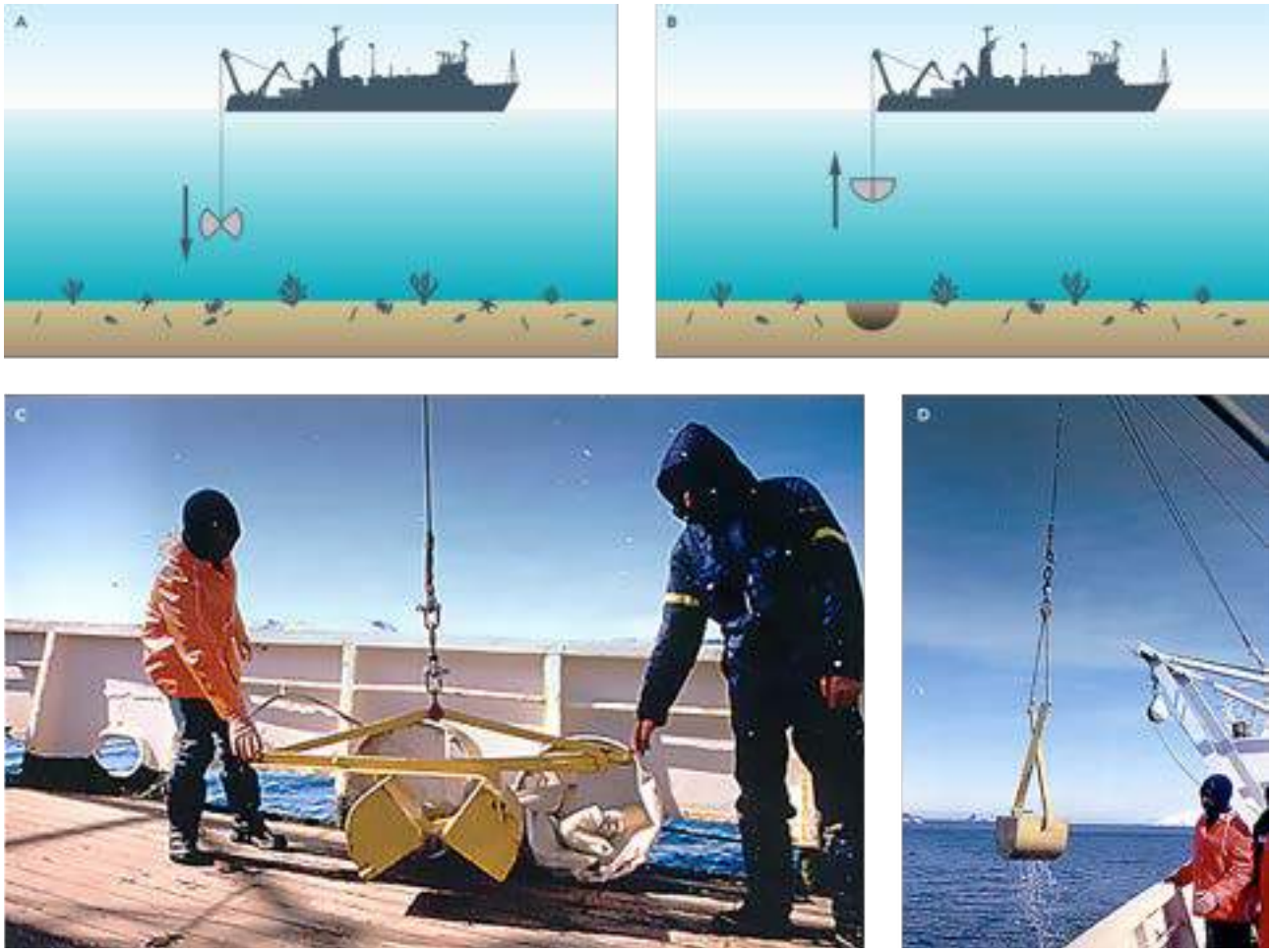


**FIGURA 4.** **Pegador de fundo: A e B) esquema de funcionamento; C) Operação de lançamento; e D) operação de recuperação.** *Fotos: L.V. Nonnato.*

***"Box corers":*** sistemas mecânicos similares aos pegadores de fundo, mas constituídos por um recipiente metálico , usualmente em forma de paralelepípedo, aberto em sua base; este equipamento é descido até o fundo e, por seu peso, penetra no sedimento; um mecanismo faz com que, então, uma chapa metálica feche a base da caixa, retendo o sedimento ali presente. São equipamentos projetados para a coleta de sedimento com perturbação mínima (ou seja, a estrutura do sedimento é bem preservada) em locais de fundo mole; são amplamente empregados em levantamentos quantitativos de organismos bênticos, avaliação de processos geoquímicos na camada superior do fundo e sedimentologia, entre outros estudos (Fig. 5).

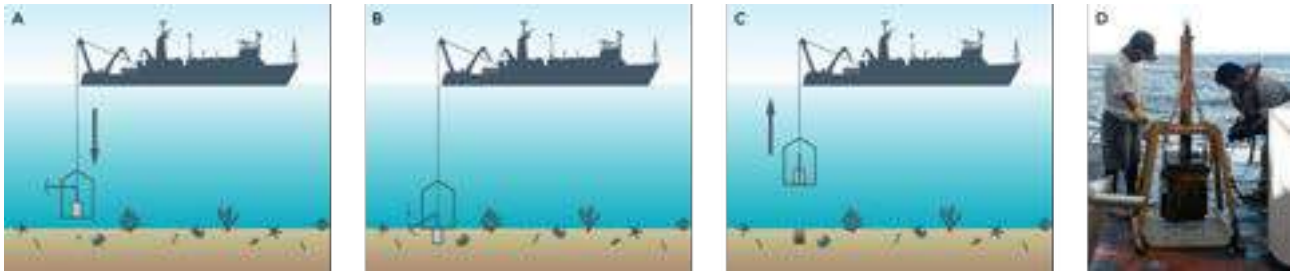



**FIGURA 5.** A, B e C) Esquema de funcionamento de um "*box corer*"; e D) Operação de um "*box corer*". *Foto: L.V. Nonnato.*

***Testemunhadores geológicos:*** equipamentos para amostrar as camadas de sedimento imediatamente subjacentes ao fundo oceânico. São basicamente constituídos por um tubo cilíndrico que penetra verticalmente no sedimento do fundo, coletando uma coluna de sedimento com perturbação mínima em sua estrutura; muitos dos modelos de testemunhadores mais utilizados (como "*gravity corers*" e "*piston corers*") simplesmente utilizam a gravidade como fonte de energia para a penetração do instrumento no fundo (uma grande massa fixada à extremidade superior do tubo força sua penetração); dependendo da composição do fundo e das características do específico equipamento, amostras de até algumas dezenas de metros de comprimento podem ser coletadas por testemunhadores deste tipo (Fig. 6).

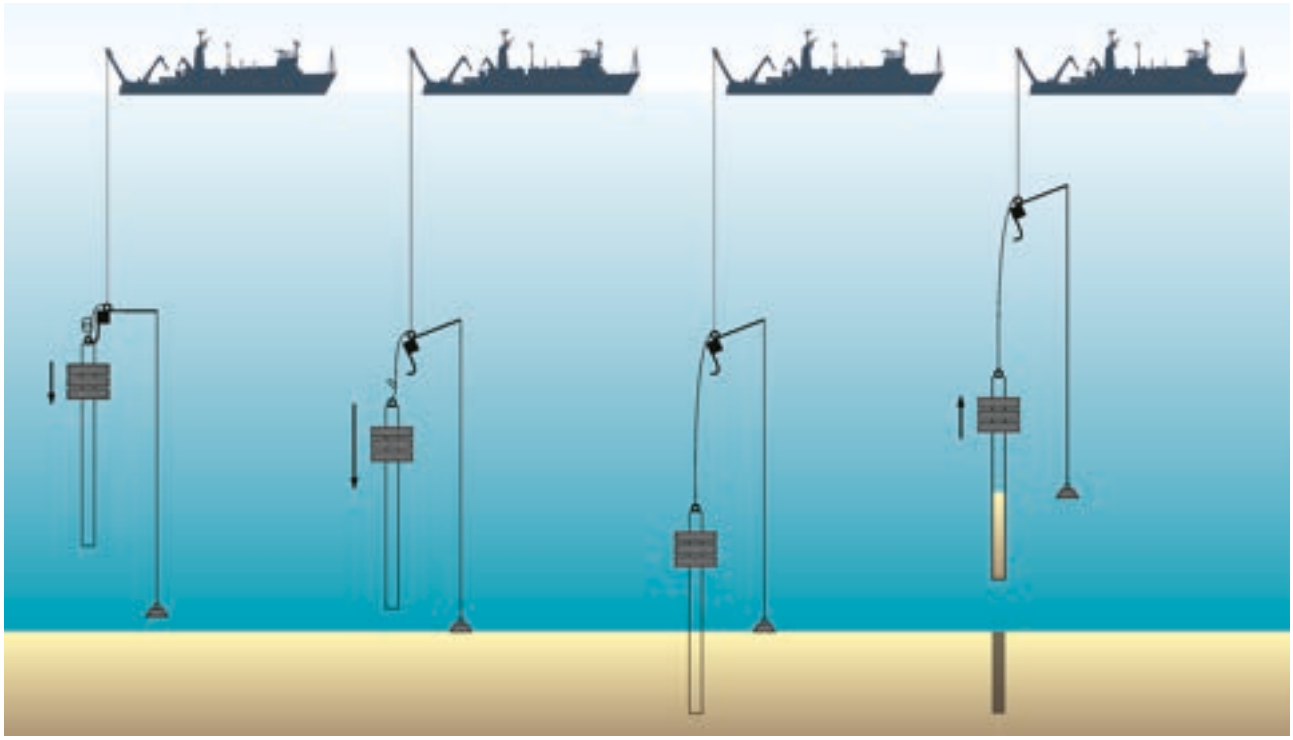


**FIGURA 6.** Esquema de funcionamento de um testemunhador.

## 2.2 Amostradores de meia-água

Para a coleta de amostras no interior da coluna d'água, os equipamentos mais frequentemente utilizados são as redes (amostragem de organismos vivos) e as garrafas de coleta d'água (coleta de determinado volume de água para posterior análise biológica, física ou química).

Em oceanografia é utilizada uma enorme gama de redes, específicas para diferentes tipos de trabalhos de pesquisa; assim, são utilizadas desde redes com malhagem (abertura da malha do tecido que forma a rede) muito fina, da ordem de algumas dezenas de micrômetros (para coleta de organismos unicelulares), até redes com malhagem de alguns centímetros (para coleta de peixes adultos), como mostrado na Figura 7.

**FIGURA 7.** Alguns dos diferentes tipos de redes utilizados para coleta de organismos em meia-água: A) rede de fitoplâncton – própria para coleta de organismos unicelulares - malhagem da ordem de algumas dezenas de micrômetros; B) rede Bongô – adequada para captura de ovos e larvas de peixe – malhagem da ordem de alguns décimos de milímetros; C) rede de pesca comercial – voltada à captura de peixes adultos – malhagem da ordem de alguns centímetros; e D) *Multi-Plancton Sampler* – equipamento que permite a abertura e fechamento controlado de um conjunto de redes – um sinal elétrico enviado a partir da embarcação comanda a atuação do sistema. *Fotos: L.V. Nonnato*.

Também, existem diversas formas de execução da operação de amostragem; algumas redes são projetadas para arrasto vertical, com o navio parado (visando a coleta dos organismos que se encontram em uma faixa relativamente ampla da coluna d'água, num determinado local), enquanto outras são projetadas para arrasto horizontal ou oblíquo, com o navio em movimento (viabilizando a coleta de organismos que se encontram em um estrato limitado da coluna d'água, em uma área mais ampla que no caso das redes de arrasto vertical).

Finalmente, alguns equipamentos modernos de amostragem incorporam sistemas mecânicos ou eletromecânicos de operação, que permitem a abertura e fechamento da rede (ou de várias redes, em sistemas mais sofisticados) de uma forma controlada pelo operador, o que permite um refinamento do processo de amostragem.

Para a coleta de amostras de água, são usualmente utilizadas garrafas de amostragem. Estas garrafas são recipientes cilíndricos ocos, usualmente metálicos ou de material sintético, que possuem válvulas em suas extremidades. Estas garrafas, com as válvulas abertas, são descidas na coluna d'água e, uma vez posicionadas na profundidade de amostragem, têm as válvulas fechadas, por um processo mecânico ou elétrico; são então trazidas para a superfície, onde as amostras coletadas são recolhidas e armazenadas. Posteriormente estas amostras são processadas em laboratório (exemplos de processamento são filtragem para coleta de material em suspensão na água ou análise química para determinação das concentrações de determinadas substâncias dissolvidas na água).

Historicamente, uma garrafa de amostragem extensivamente empregada em levantamentos oceanográficos, até hoje utilizada em algumas aplicações, é a Garrafa de Nansen (Fig. 2A); com volume de cerca de dois litros, esta garrafa metálica possui um mecanismo de fechamento que é atuado por um pequeno peso lançado da superfície. Entretanto, na atualidade, as garrafas mais utilizadas são construídas em material sintético, havendo modelos próprios para coleta desde pequenos volumes de água (cerca de um litro) até volumes bastante grandes (superior a dez litros). Exemplos destas garrafas são as Garrafas de Niskin (Fig. 8A).

Ao contrário das garrafas de amostragem antigas, que apresentavam sistemas de atuação mecânico, as garrafas mais modernas são frequentemente instaladas em Rosettes, estruturas de montagem que, conectadas à superfície por um cabo elétrico, permitem controlar o instante de fechamento das garrafas através de sinais elétricos (Figs. 8B e 8C).

**FIGURA 8.** Garrafa de *Niskin*: A) fechada (acima) e aberta (abaixo); B) Rosette com 24 garrafas de *Niskin* com capacidade de 5 litros; e C) Coleta de amostra de água de uma das garrafas da Rosette. *Fotos: L.V. Nonnato*.

## 3. Equipamentos para medição "*in situ*"

Um número muito grande de parâmetros (características) do ambiente marinho é de interesse para pesquisadores na área de oceanografia, tais como temperatura da água, concentração de sais, pressão, intensidade luminosa, velocidade de correntes marinhas e altura de ondas, entre outras. Assim, foram desenvolvidos inúmeros equipamentos que permitem a medição direta ("*in situ*") destes parâmetros.

Os equipamentos de medição "*in situ*" podem ter duas formas distintas de operação: os valores medidos podem ser apresentados instantaneamente ao operador (instrumentos de leitura direta) ou os valores medidos podem ser armazenados internamente ao instrumento, sendo recuperados a posteriori (instrumentos de registro interno). Também, em função do objetivo de um levantamento, diferentes estratégias de operação dos equipamentos podem ser implementadas (Fig. 9):

***Perfis verticais:*** medição do parâmetro de interesse na totalidade ou em parte da coluna d'água, em uma única posição geográfica; usualmente, a duração do processo de medição é curta (tipicamente, minutos ou poucas horas) e a taxa de amostragem é alta (tipicamente, uma amostra por segundo);

***Linhas horizontais:*** medição do parâmetro de interesse em um único nível de profundidade, em uma sequência de posições geográficas; usualmente, a duração do processo de medição é de algumas horas a alguns dias e a taxa de amostragem é da ordem de uma amostra por minuto;

***Séries temporais:*** medição da variação do parâmetro de interesse em função do tempo, em um único nível de profundidade e posição geográfica; usualmente, a duração do processo de medição é longa (dias, meses ou até alguns anos) e a taxa de amostragem, baixa (tipicamente, uma amostra por hora).

De um modo geral, cada instrumento possui características que o tornam mais adequados para implementação de uma das estratégias de coleta de dados mencionadas, embora existam equipamentos que podem implementar mais de uma estratégia. Alguns instrumentos, inclusive, apresentam estratégias complexas, como sistemas que realizam, por longo período, repetidos perfis verticais.

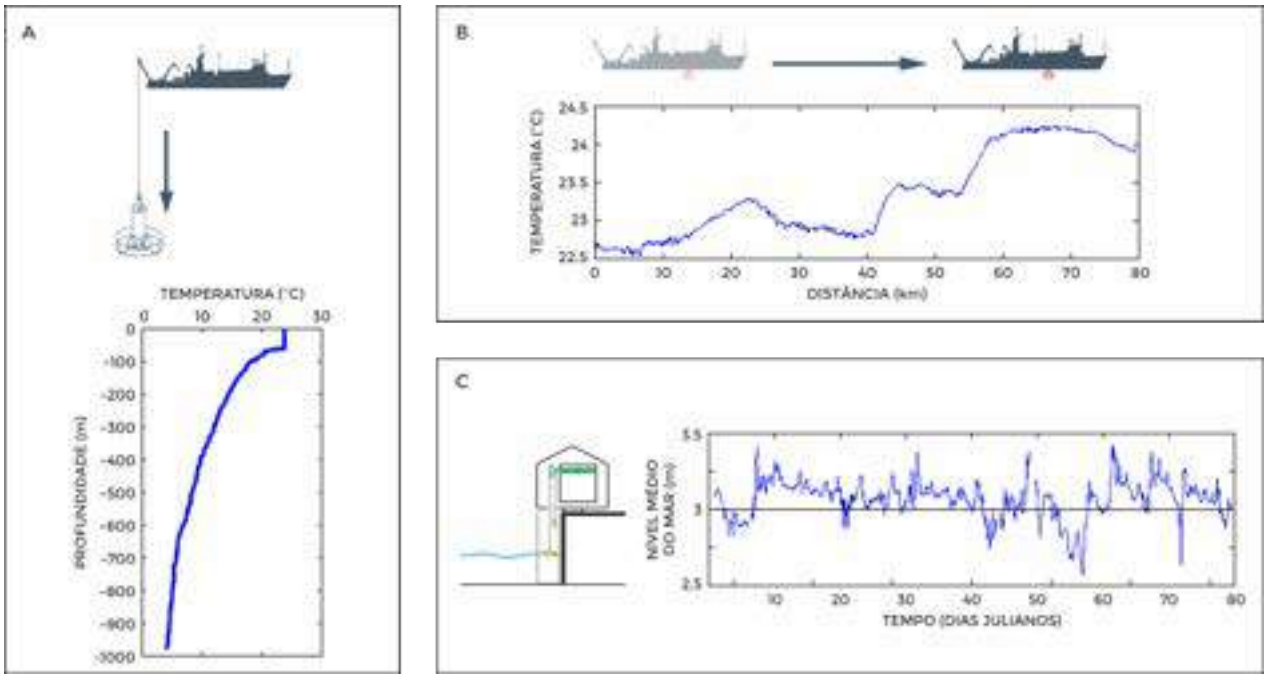



**FIGURA 9.** Estratégias de amostragem: A) perfil vertical de temperatura; B) linha horizontal de temperatura da superfície; e C) Série temporal de nível do mar.

A seguir, apresenta-se alguns dos parâmetros físicos de grande importância para a pesquisa oceanográfica, bem como alguns dos respectivos equipamentos de medição.

## 3.1 Temperatura e salinidade

A temperatura e a salinidade da água do mar variam em uma faixa bastante ampla. Assim, a temperatura de superfície em regiões tropicais pode superar 30°C, enquanto em áreas polares ou em grandes profundidades pode ser inferior a 0°C. Por sua vez, a salinidade pode variar desde valores muito baixos, em áreas estuarinas, até cerca de 38 PSU em regiões oceânicas (grosseiramente, 1 PSU corresponde a 1 grama de sais dissolvidos em 1 kg de água).

Temperatura e salinidade são grandezas independentes, que podem ser medidas por instrumentos distintos. No passado, a temperatura da água do mar era usualmente medida por termômetros de mercúrio especiais (termômetros de reversão), enquanto a salinidade era determinada em laboratório, através da análise química de amostras coletadas previamente. Na atualidade, entretanto, são disponíveis diversos equipamentos que permitem a medição simultânea de temperatura e salinidade.

Um dos equipamentos modernos extensivamente utilizados para medição destes dois parâmetros é o CTD (perfilador de condutividade, temperatura e pressão). Este é um equipamento eletrônico de alta precisão, que permite a medição contínua da temperatura, salinidade e pressão desde a superfície até o fundo. São equipamentos que, tipicamente, apresentam grande acurácia e resolução nas medidas e altas taxas de amostragem. A Tabela 1 apresenta as especificações típicas de um CTD apropriado para utilização em oceano profundo.

**TABELA 1. Especificações do CTD** *SeaBird SBE9-plus*. *Fonte: Seabird Scientific*.

| Parâmetro | Faixa de medição | Acurácia | Resolução |
|---|---|---|---|
| Temperatura | -5 a 35°C | ± 0,001°C | 0,0002°C |
| Condutividade | 0 a 7 S/m | ± 0,0003 S/m | 0,00004 S/m |
| Pressão | 0 a 6.800 dbar | ± 1 dbar | 0,06 dbar |

CTDs para uso em áreas costeiras (profundidade inferior a 500 m) usualmente têm seu corpo construído em materiais plásticos e têm dimensões e massa reduzidas. Por outro lado, sistemas para utilização em áreas profundas possuem corpo metálico (alumínio, aço inoxidável ou, para equipamentos apropriados para coleta de dados em áreas extremamente profundas - 7.000 m ou mais -, titânio), apresentando dimensões e massa maiores que os apropriados para áreas rasas.

Alguns CTDs permitem o acoplamento de sensores adicionais, viabilizando a medição de outros parâmetros da coluna d'água, como teor de oxigênio dissolvido, pH ou transparência (Fig. 10 A e B). Também, muito frequentemente, CTDs são acoplados a Rosettes, permitindo a simultânea perfilagem da coluna d'água e a coleta de amostras (Fig. 10C).

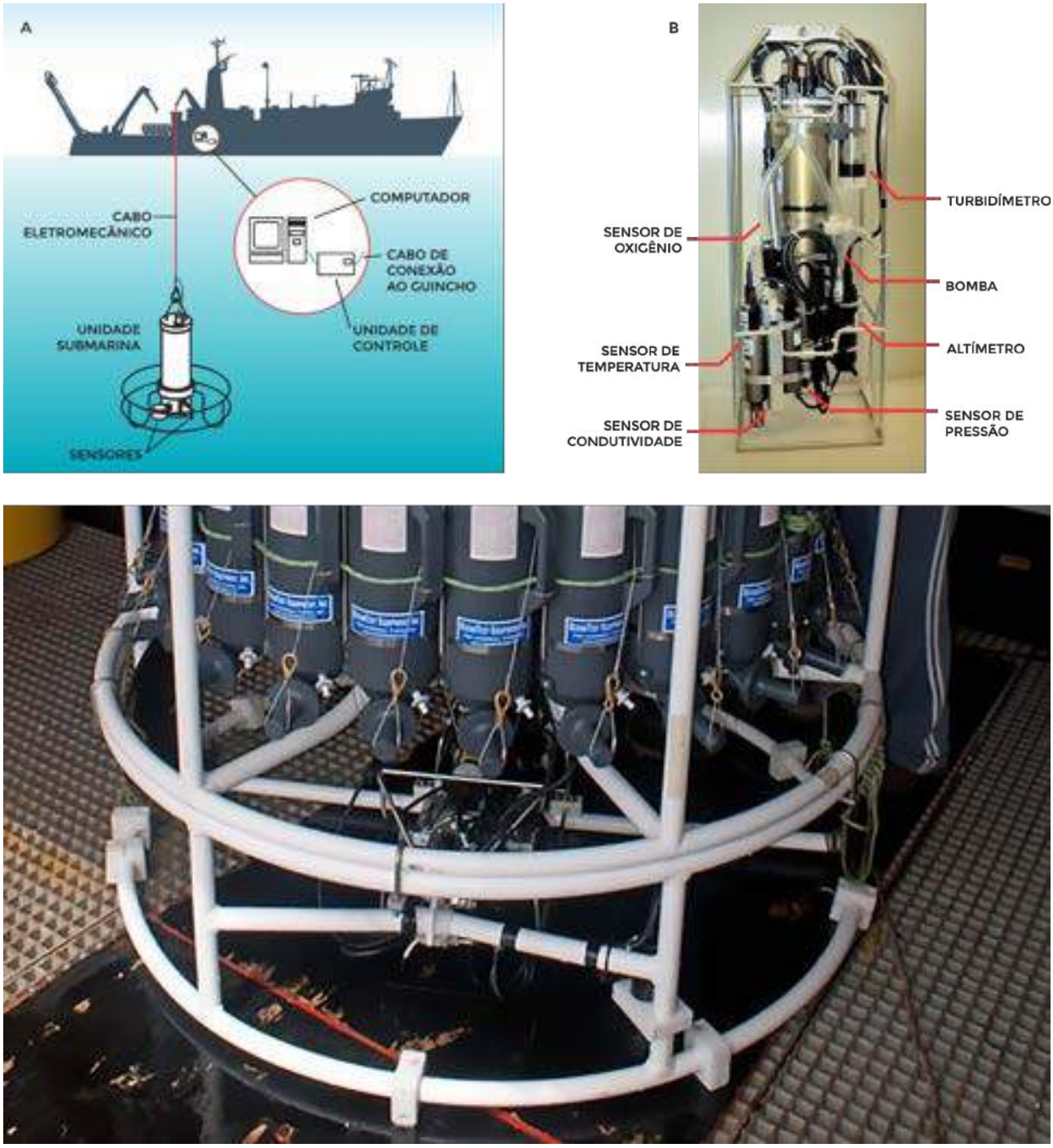



**FIGURA 10.** **Perfilador de condutividade, temperatura e pressão (CTD): A) esquema de operação; B) sensores acoplados; e C) montado na base de uma Rosette.** *Foto: L.V. Nonnato.*

## 3.2 Corrente marinha

Corrente marinha pode ser definida como a movimentação, essencialmente horizontal, de grandes volumes de água no interior do oceano. Dependendo do local, correntes marinhas podem ter intensidade desde alguns milímetros por segundo (por exemplo, em oceano profundo) até vários metros por segundo (em canais estreitos). Deve-se enfatizar que velocidade de corrente marinha é uma grandeza vetorial, isto é, deve ser representada por dois valores, intensidade e direção/sentido.

Existem duas classes básicas de equipamentos de medição "*in situ*" de correntes (correntômetros[1]) (Fig. 11):

- Os equipamentos permanecem fixos, medindo a velocidade da água que passa por eles; e
- Os equipamentos são deixados à deriva, sendo transportados pela corrente; neste segundo tipo de equipamento, a velocidade da corrente é calculada através da determinação das posições do instrumento em instantes sucessivos.

Uma terceira classe de equipamentos de medição de correntes é composta pelos ADCPs (perfiladores acústicos de correntes por efeito Doppler), embora tais equipamentos sejam mais apropriadamente considerados de medição remota (descritos na seção 4).

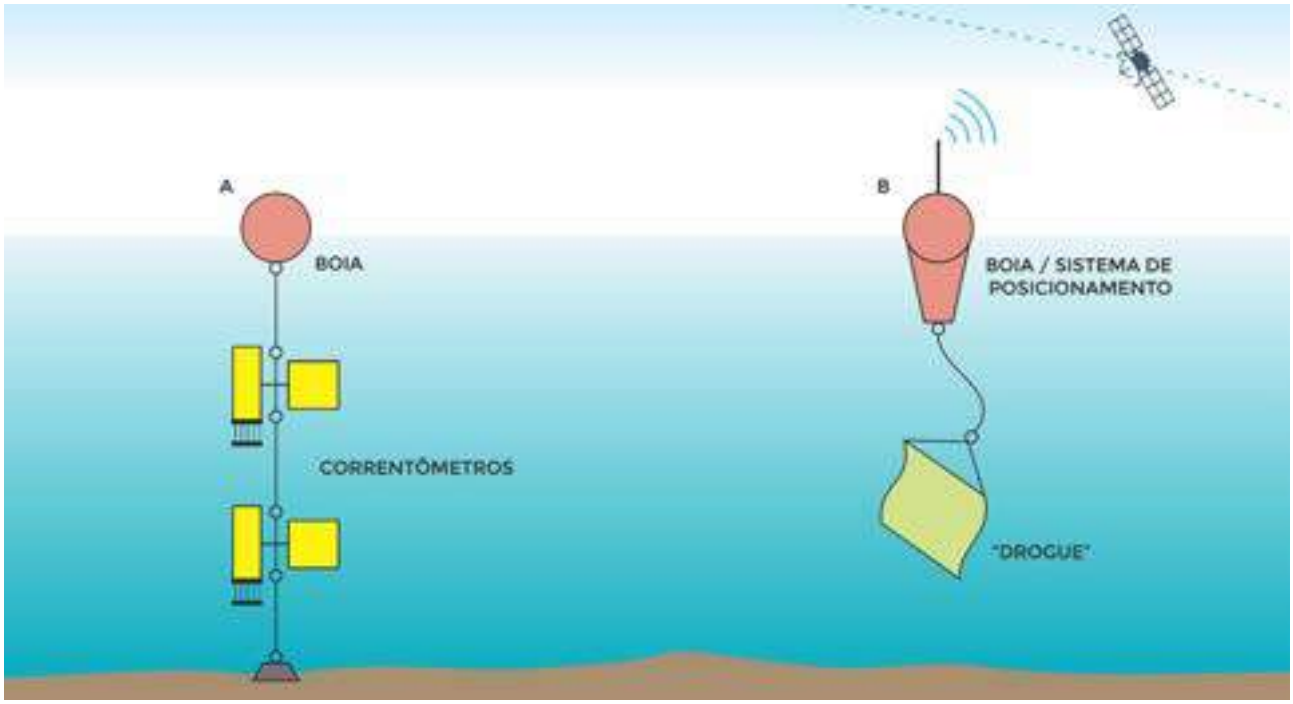



**FIGURA 11.** Métodos para medição de correntes: A) instrumento fixo (instalado em fundeio); e B) instrumento à deriva.

### *3.2.1 Sistemas fixos*

Sistemas de medição de corrente fixos podem utilizar diferentes princípios físicos para a mensuração da intensidade de correntes marinhas. A maioria dos correntômetros disponíveis na atualidade utiliza sensores mecânicos, eletromagnéticos ou acústicos, conforme descrito a seguir (Fig. 12). Por sua vez, para determinação da direção e sentido da corrente, usualmente utiliza-se bússolas mecânicas ou eletrônicas.

***Correntômetros mecânicos*** utilizam rotores ou hélices como elementos sensores; o rotor é forçado a girar pelo fluxo de água nele incidente; o instrumento mede, assim, a velocidade angular do rotor (ou o número de rotações por unidade de tempo), que é proporcional à intensidade da corrente;

[1] Historicamente, os instrumentos que realizavam a medição de corrente e apresentavam visualmente os resultados das medições ao operador eram denominados **correntômetros**, enquanto aqueles que armazenavam as informações internamente, **correntógrafos**. Atualmente, esta distinção é muito mais tênue e os dois termos são utilizados indistintamente. Neste texto, será adotado o termo correntômetro, análogo ao termo inglês "*current meter*".

***Correntômetros eletromagnéticos*** valem-se do seguinte princípio físico: a movimentação de um condutor elétrico através de um campo magnético gera uma diferença de potencial elétrico entre diferentes pontos do condutor; assim, sensores destes instrumento geram um campo eletromagnético ao seu redor; a água do mar (boa condutora elétrica) que flui através deste campo eletromagnético tem as características de um condutor em movimento; consequentemente, há uma diferença de potencial elétrico entre diferentes pontos da água, que pode ser medida por eletrodos montados no sensor; a partir do valor do potencial elétrico, infere-se a intensidade da corrente; e

***Correntômetros acústicos*** baseiam-se no seguinte princípio físico: para um observador fixo, a velocidade de propagação de um sinal sonoro através de determinado meio é influenciada pela velocidade de deslocamento do meio; assim, sensores destes correntômetros são usualmente compostos por um (ou mais) par de hastes rígidas, nas quais são fixados transdutores acústicos (elementos que permitem a emissão e recepção de sinais acústicos); no instante de medição, um dos transdutores emite um sinal acústico, que se propaga pela água até ser recebido pelo segundo transdutor, registrando-se o intervalo de tempo entre transmissão e recepção; a seguir, o procedimento é repetido, invertendo-se o sentido de transmissão (o segundo transdutor emite um sinal que é recebido pelo primeiro), registrando-se este segundo intervalo de tempo; caso a água não esteja em movimento, os dois intervalos de tempo serão iguais; caso contrário, a diferença entre os intervalos de tempo será proporcional à intensidade da corrente.

FIGURA 12. Três modelos de correntômetros: A) mecânico; B) acústico; e C) eletromagnético.

### *Instalação de correntômetros fixos - fundeios oceanográficos*

Embora correntômetros possam ser posicionados na coluna d'água através de cabos descidos de embarcações ou outra estrutura flutuante, mais frequentemente eles são fixados a estruturas apoiadas no fundo oceânico, como píeres, armações rígidas no fundo ou fundeios oceanográficos.

Fundeios são estruturas não-rígidas compostas basicamente por uma base de concreto ou metal de grande massa (poita), à qual é fixado um cabo flexível de aço ou material sintético; elementos

flutuadores (usualmente, boias) são fixados em alguns pontos do cabo (muitas vezes, agrupados em sua extremidade oposta à poita). Instrumentos de medição são então fixados em posições predeterminados do cabo. Ao ser lançada ao mar, a poita se acomoda no fundo (não permitindo deslocamento horizontal da estrutura), enquanto o cabo assume uma disposição aproximadamente vertical, devido ao empuxo produzido pelas boias nele fixadas; consequentemente, os instrumentos de medição são posicionados em níveis definidos da coluna d'água (pode haver alguma oscilação do nível de instalação dos instrumentos, devido à inclinação do cabo causada por ventos ou correntes oceânicas). Muitas vezes, instrumentos instalados em fundeios permanecem no mar por períodos contínuos de vários meses ou até de alguns anos.

A Figura 13 apresenta duas possíveis concepções de fundeios. O fundeio à direita possui uma boia de sinalização na superfície, o que facilita a localização do sistema e a operação de recuperação dos instrumentos, embora potencialize o efeito de ondas e vento sobre a inclinação do cabo e o torne susceptível a abalroamento por embarcações ou dano por vandalismo. O fundeio da esquerda, por sua vez, não possui boia na superfície (a boia na extremidade superior do cabo pode se encontrar a centenas de metros de profundidade), o que minimiza aqueles aspectos negativos; entretanto, esta concepção traz um grande problema, a dificuldade de localização do fundeio e de recuperação dos instrumentos; assim, nestes fundeios é usualmente necessária a instalação de um equipamento adicional, o liberador acústico. Liberadores acústicos cumprem duas funções: são elementos de referência de posição, permitindo que embarcações nas proximidades determinem, através de comunicação acústica, sua distância ao liberador e, assim, se aproximem ao máximo da posição de instalação do fundeio; sua segunda função é a de um elemento de atuação mecânica, acarretando a desconexão entre o cabo e a poita quando do recebimento de um sinal acústico específico (emitido pela embarcação na superfície) e consequente vinda dos equipamentos para superfície, onde serão recuperados.

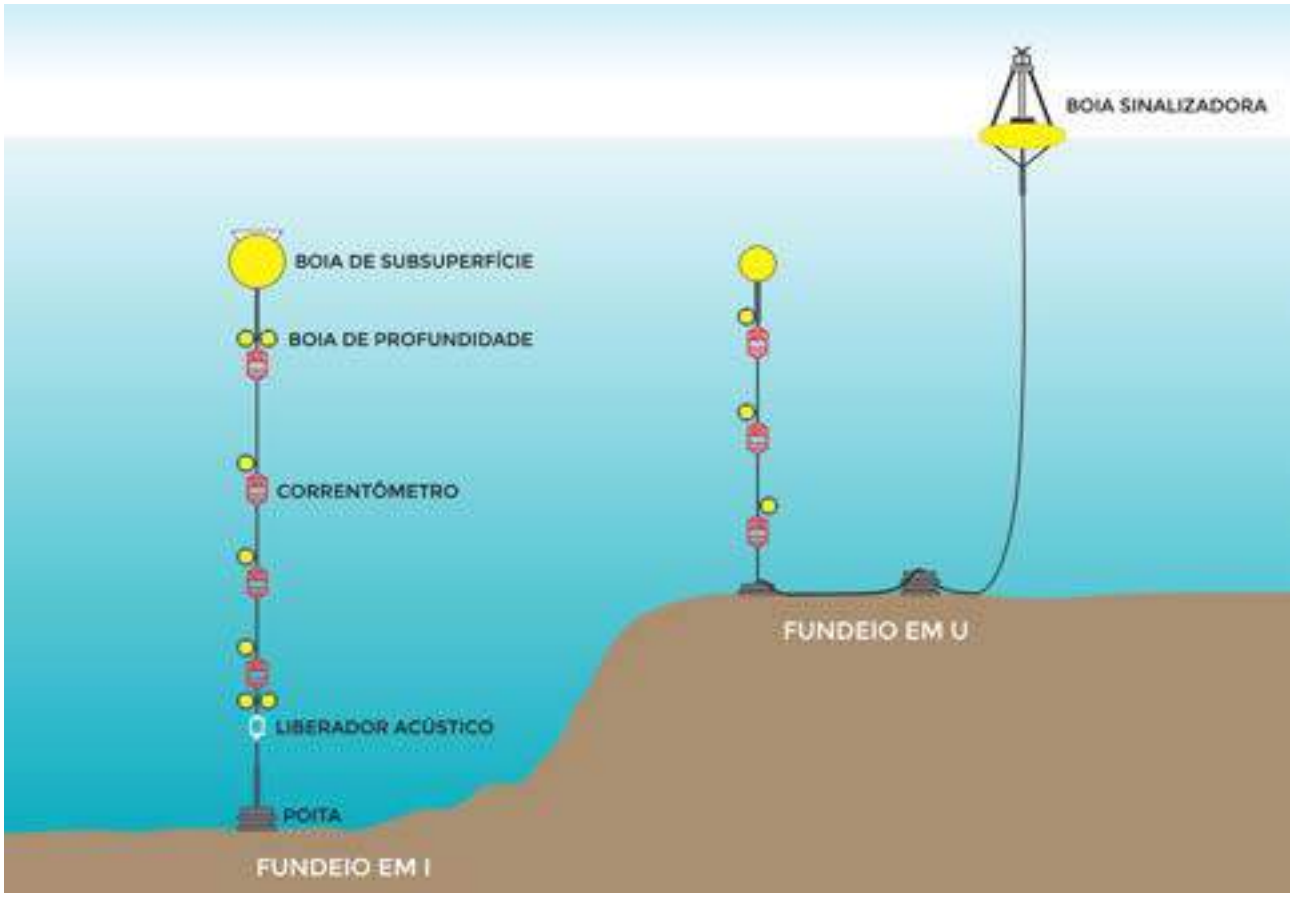



**FIGURA 13. Duas concepções de fundeios oceanográficos.** *Baseado em desenho de Chico Vicentini.*

### *3.2.2 Sistemas livres (derivadores)*

Derivadores são equipamentos que seguem livremente o movimento de uma massa d'água, tendo sua posição geográfica determinada periodicamente. O valor da velocidade, em pontos consecutivos da trajetória do instrumento, é obtido através do quociente entre a distância entre estes pontos e o tempo transcorrido neste deslocamento. A obtenção da posição do instrumento pode ser feita pelo próprio instrumento, através do uso do sistema de satélites GPS ou de sistemas acústicos, ou por estações em terra, através de sistemas de radar ou radiofrequência. Eventualmente, aeronaves ou satélites podem ser utilizados para este fim.

Alguns destes equipamentos são projetados para permanecerem flutuando na superfície, permitindo a medição de correntes nas camadas mais superficiais da coluna d'água, enquanto outros são projetados para se deslocarem no interior da coluna d'água, viabilizando a medição de correntes profundas. Em ambos os casos, um elemento central do processo de medição de corrente é a existência de um procedimento preciso para determinação da posição do instrumento durante todo o período de medição.

A Figura 11B apresenta um derivador de superfície, composto por uma bóia na superfície, que aloja os sistemas eletrônicos de posicionamento e transmissão de dados, e uma vela submarina ("drogue"), posicionada a alguns metros (no máximo, algumas dezenas de metros) de profundidade. A vela, sofrendo arrasto causado pelo deslocamento da água na camada em que a está instalada, força todo o sistema a deslocar-se solidariamente àquele volume de água.

Como exemplo de sistemas livres de medição de correntes em profundidade, pode-se citar o derivador *RAFOS* (Rossby *et al*, 1986). Estes derivadores são constituídos por um tubo de vidro fechado, no qual estão instalados um receptor de sinais acústicos, um transmissor de microondas (para transmissão de dados a satélites) e baterias; um pequeno lastro é fixado no exterior deste tubo. Lançado ao mar, devido a sua flutuabilidade negativa este equipamento afunda lentamente, até chegar a um nível de profundidade (da ordem de algumas centenas ou poucos milhares de metros) em que sua flutuabilidade passa a ser neutra, permanecendo então neste nível até o fim do período de medição. Durante o período de medição, que pode chegar a vários meses, o instrumento sofre arrasto das correntes existentes naquele nível de profundidade, deslocando-se horizontalmente (em algumas situações, por alguns milhares de quilômetros); sinais acústicos emitidos por transmissores fixos permitem ao instrumento determinar periodicamente sua posição geográfica, que é registrada internamente a ele. Após um período previamente configurado, o lastro é liberando, causando o gradual movimento do instrumento em direção à superfície. A atingir a superfície, os dados de posição são transmitidos a satélites. A Figura 14 descreve a operação do derivador, enquanto a Figura 15 mostra a trajetória de alguns destes equipamentos lançados na região do Atlântico Sudoeste.

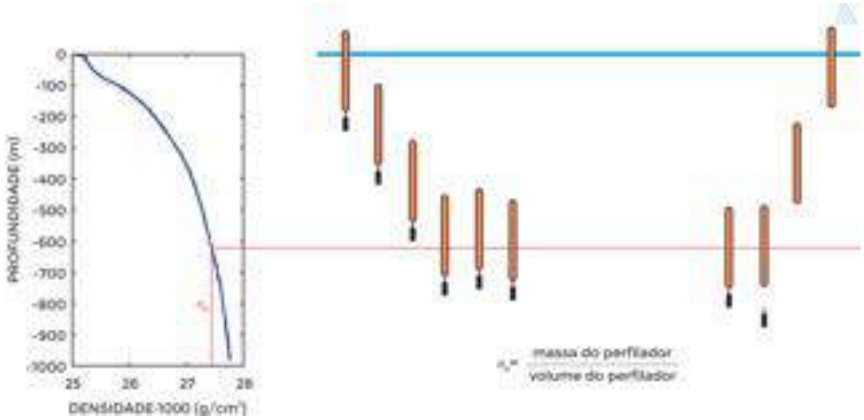
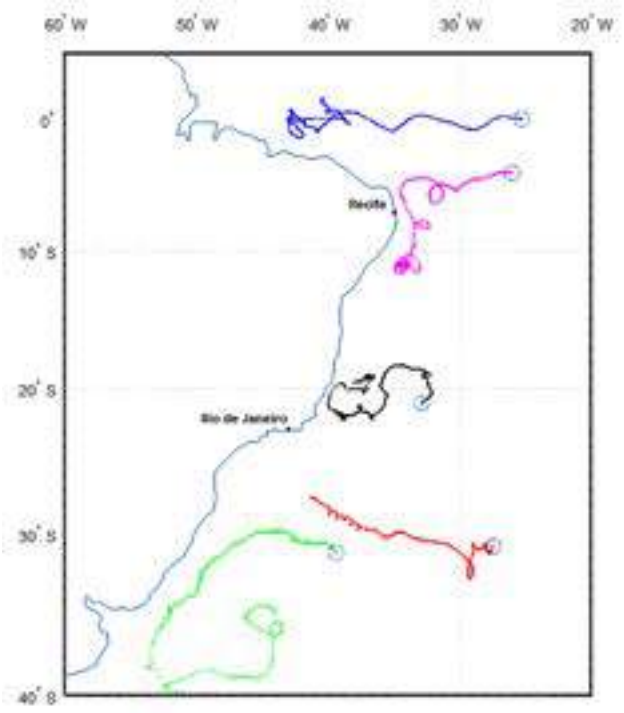



**FIGURA 14.** Diagrama esquemático da operação de um derivador *RAFOS*.




| | LANÇAMENTO | | RETORNO À SUPERFÍCIE | |
|---|---|---|---|---|
| | DATA | POSIÇÃO | DATA | POSIÇÃO |
| | 03/11/1994 | 00 ° 01,1' S 025° 14,4' W | 25/10/1995 | 01 ° 30,4' N 040° 15,7' W |
| | 05/11/1994 | 04 ° 03,3' S 025° 59,0' W | 25/10/1995 | 10 ° 33,2' S 034° 26,3' W |
| | 09/11/1994 | 21 ° 02,1' S 032° 51,8' W | 30/01/1996 | 19 ° 19,3' S 036° 34,7' W |
| | 27/05/1994 | 30 ° 49,2' S 027° 26,3 W | 17/08/1995 | 27 ° 33,8' S 041° 18,0' W |
| | 13/11/1994 | 31 ° 12,9' S 039° 21,7' W | 02/02/1996 | 35 ° 04,0' S 043° 58,1' W |

**FIGURA 15.** Trajetória de 5 derivadores *RAFOS*, lançados em diferentes pontos do Atlântico Sul, em diferentes datas.

## 3.3 Nível do mar

Diversos fatores podem causar a alteração do nível da superfície do mar, como maré, vento ou corrente marinha. Existem diversos tipos de medidores do nível do mar, tanto para instalação acima da superfície do mar quanto para instalação no fundo.

Um dos tipos destes medidores extensivamente utilizado para a medição das variações do nível da superfície decorrentes da maré é o marégrafo de boia e contrapeso (em inglês, "*stilling-well gauge*"), cujo funcionamento é esquematizado na Figura 16. Este equipamento é composto de um tubo vertical, aberto em suas extremidades, que é fixado verticalmente em uma estrutura imóvel (como uma das colunas de um píer ou a estrutura de uma plataforma de petróleo *offshore*), de forma que sua extremidade inferior fique posicionada abaixo do nível de maré mínima; no interior do tubo, uma boia flutua na superfície da água, movendo-se verticalmente conforme o nível da água se altera; um cabo fino transmite o movimento da boia a uma polia montada externamente ao tubo, causando a rotação da mesma; o ângulo de rotação da polia é periodicamente medido e armazenado por um sistema mecânico ou eletrônico.

É importante enfatizar que este equipamento exige a disponibilidade de uma estrutura imóvel para instalação, não sendo possível, assim, utilizá-lo em embarcações ou estruturas flutuantes.

Em regiões distantes da costa, onde não estão disponíveis estruturas fixas para a montagem do equipamento, podem ser utilizados marégrafos de pressão. Instalados no fundo oceânico, estes instrumentos efetuam a medição da pressão hidrostática naquele local. A variação da altura da coluna d'água no local de medição implica em uma variação da pressão no fundo, que é medida por sensores específicos.

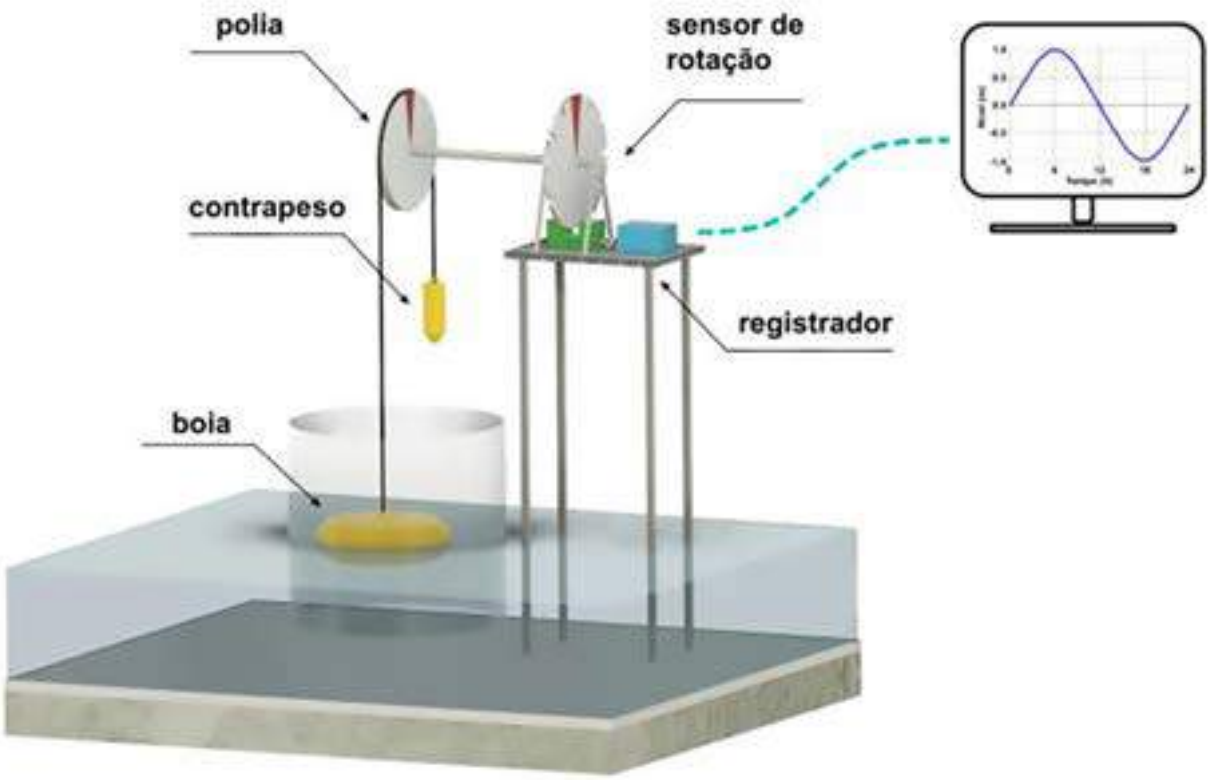



FIGURA 16. Marégrafo de boia e contrapeso.

### 3.4 Ondas

Ondas marinhas, na acepção usual do termo (mais rigorosamente, ondas de gravidade), são fenômenos que, assim como marés, causam a variação periódica do nível do mar. Entretanto, ondas de gravidade têm períodos (intervalo de tempo entre dois máximos de altura sucessivos) da ordem de alguns segundos, enquanto marés têm períodos da ordem de 12 horas. Para a caracterização das ondas marinhas, são relevantes os seguintes parâmetros: período, amplitude e direção de propagação.

De uma maneira geral, ondas podem ser medidas por marégrafos de boia e contrapeso ou outros equipamentos de medição do nível do mar (eventualmente, com algumas modificações). Entretanto, equipamentos específicos para medição de ondas, com características otimizadas para esta aplicação, foram desenvolvidos. Duas classes destes equipamentos são apresentadas na Figura 17.

***Wave riders*** são essencialmente boias de superfície fixas ao fundo por cabos elásticos, que permitem que as mesmas se movimentem de forma praticamente livre na superfície do mar. A boia sofre o efeito das ondas, deslocando-se verticalmente e horizontalmente e inclinando-se. Um conjunto de acelerômetros (medidores de aceleração), instalados no interior da boia, permite a medição destes movimentos. Os resultados das medições podem ser armazenados internamente ao instrumento ou transmitidos a uma estação terrestre via rádio ou sinal de satélite.

***Medidores de velocidade orbital*** são instrumentos fixos, instalados sobre o fundo ou em estruturas rígidas (como a coluna de um píer), que medem continuamente a velocidade da água e a pressão hidrostática naquele ponto; a sequência de valores medidos permite o cálculo dos parâmetros de

interesse da onda no local. Estes instrumentos valem-se de uma característica peculiar do movimento das moléculas de águas causado pela passagem de uma onda de superfície: na ausência de correntes marinhas, elas descrevem uma trajetória elíptica fechada (orbital), cuja amplitude é função da amplitude da onda e da distância do ponto de medição à superfície.

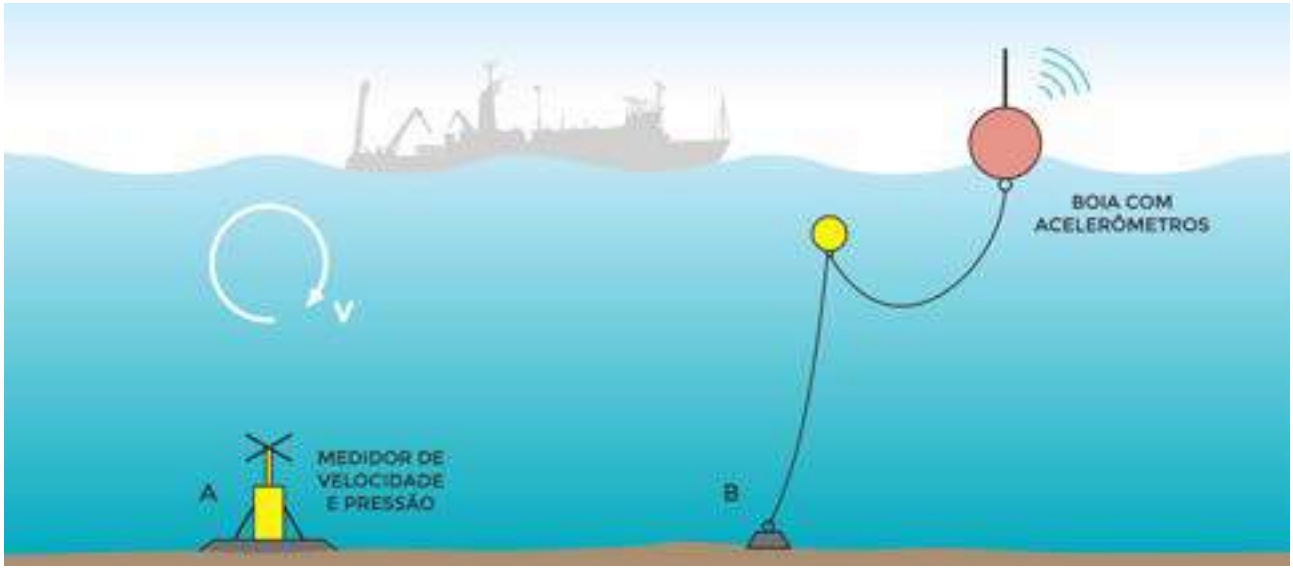



**FIGURA 17.** Esquema de operação de ondógrafos: A) medição pelo orbital; e B) *Wave Rider*.

## 4. Equipamentos de medição remota

Um pressuposto básico da operação dos equipamentos de medição "*in situ*" é que, durante o processo de medição, o instrumento encontra-se exatamente no local de medição. Os instrumentos de medição remota, ao contrário, têm características que viabilizam a realização de alguns tipos de medição à distância, sem a existência de um subsistema físico no local de medição. No caso de sensoriamento remoto por satélite, por exemplo, a distância entre o instrumento e o ponto de medição pode ser de algumas centenas de quilômetros. É importante notar-se que equipamentos que realizam medição *in situ* e transmitem os dados coletados para uma estação distante através de um sistema de telemetria (como links acústicos ou transmissores de rádio) não são considerados sistemas de medição remota.

Para utilização em oceanografia, dependendo do tipo de medição a ser efetuada, os equipamentos de medição remota podem ser baseados em sistemas acústicos ou em sistemas que empregam radiação eletromagnética.

### 4.1 Sistemas acústicos

#### *4.1.1 Sonares*

Sistemas acústicos são amplamente utilizados em oceanografia para detecção e posicionamento de objetos submersos. Tais sistemas são genericamente denominados sonares.

O princípio de operação de um sonar é relativamente simples (Fig. 18):

- Um transdutor (elemento que converte um sinal elétrico em vibração mecânica e vice-versa) submerso gera um pulso acústico (som de curta duração);
- Este pulso propaga-se pela água, a uma velocidade conhecida;
- Ao atingir um objeto com características acústicas diferentes daquelas da água, um eco é gerado;
- Este eco propaga-se pela água, em sentido oposto ao do pulso original;
- O eco é recebido pelo transdutor; e
- Através da medição do intervalo de tempo transcorrido entre a emissão do pulso acústico e a recepção do correspondente eco, a distância entre o transdutor e o objeto que produziu o eco pode ser determinada com precisão.

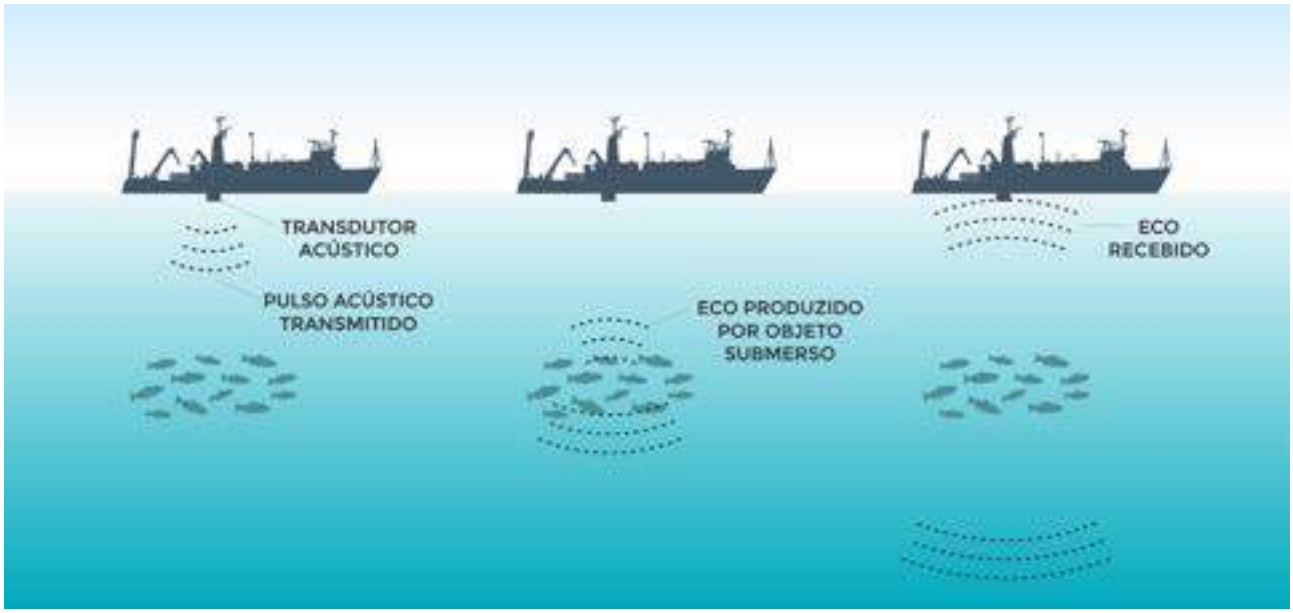



**FIGURA 18.** Princípio de operação de um sonar.

Uma classe especialmente importante de sonares são os eco-sondas (também chamados de ecobatímetros), nos quais o sinal acústico é direcionado verticalmente para baixo. Neste caso, o fundo oceânico gera um eco muito forte, permitindo a detecção precisa da profundidade local. Tais equipamentos são extensivamente utilizados em todas as classes de embarcações, como um equipamento de navegação e segurança.

Outra atividade em que sonares são elementos essenciais é a pesca comercial, onde estes equipamentos permitem detectar e identificar as dimensões de cardumes de peixes e outros organismos marinhos.

Na atualidade, são disponíveis sonares muito sofisticados, com características especiais (emissão simultânea de diversos pulsos ou pulsos com frequências variáveis, por exemplo) e que possuem sistemas de processamento computacional poderosos, permitindo a obtenção de informações bastante específicas sobre o ambiente oceânico, como mapeamento de grandes áreas do fundo, identificação do tipo de fundo, estimativa da biomassa de cardumes (massa de organismos por unidade de volume de água) ou identificação dos organismos que compõem o cardume.

### *4.1.2 ADCPs*

*Acoustic Doppler Current Profiler* (Perfilador Acústico de Corrente por Efeito Doppler) – ADCP é um equipamento derivado do sonar, cujo objetivo básico é a medição de intensidade e direção de correntes marinhas.

O princípio de operação de um ADCP é relativamente simples (Fig. 19):

- Um pulso acústico, de frequência acústica conhecida com precisão, é transmitido;
- Este pulso propaga-se pela água, a uma velocidade conhecida;
- Material em suspensão na água (microrganismos, partículas minerais e bolhas de ar, principalmente) causam a reflexão parcial do sinal acústico, gerando continuamente eco durante todo o percurso do sinal na água;
- Devido a um fenômeno físico conhecido como Efeito Doppler, caso as partículas em suspensão estejam em movimento em relação ao transmissor (ou seja, a intensidade da corrente marinha no local não seja nula), o eco gerado terá uma frequência acústica ligeiramente diferente daquela do sinal original;
- Ao ser recebido o eco, sua frequência acústica é medida e a diferença em relação à do sinal original é calculada; sabendo-se que a diferença de frequências é proporcional à velocidade das partículas, a intensidade da corrente pode ser inferida; e
- Usualmente, transmite-se simultaneamente pulsos acústico em várias direções, o que permite calcular-se também a direção e o sentido da corrente.

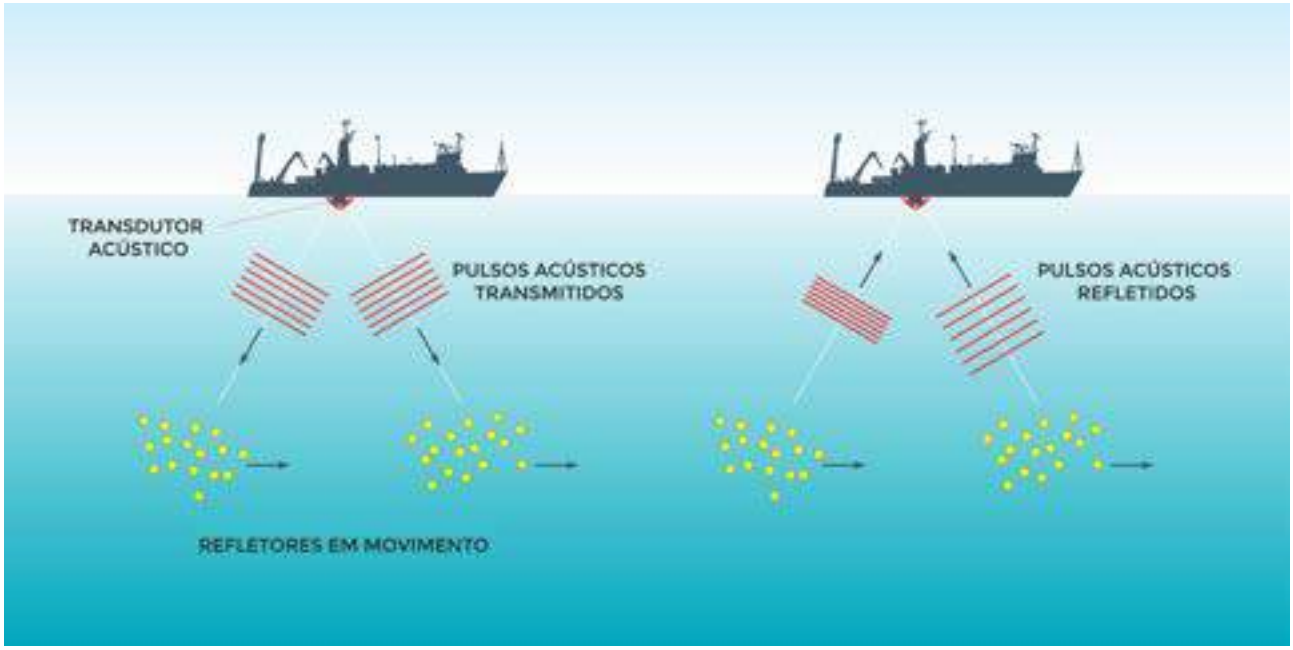



**FIGURA 19.** Princípio de operação de um ADCP.

Como curiosidade, vale a pena mencionar que o princípio de operação de um ADCP é idêntico ao de um radar para detecção de velocidade de automóveis, embora neste segundo caso sejam utilizados pulsos eletromagnéticos ao invés de acústicos.

Existem diferentes formas de instalação de ADCPs, adequadas a diferentes tipos de levantamentos: fixado no casco de embarcações, em estruturas fixas submersas (como pernas de plataformas de petróleo ou de píeres), em estruturas no fundo oceânico, em flutuadores arrastados por embarcações ou em estruturas que são descidas de embarcações (como Rosettes).

Em comparação a correntômetros fixos convencionais, ADCPs apresentam uma grande vantagem, que é a possibilidade de medição de um perfil instantâneo e contínuo de velocidade em uma camada extensa da coluna d'água (tipicamente, da ordem de algumas centenas de metros).

## 4.2 Sistemas que utilizam radiação eletromagnética

Diversas características da superfície dos oceanos podem ser medidas remotamente por equipamentos que incorporam sensores sensíveis a radiação eletromagnética em diferentes faixas do espectro (radiação na faixa de microondas, radiação infravermelha ou radiação na faixa visível).

Tipicamente, estes instrumentos são instalados em aeronaves (aviões, helicópteros, drones ou balões), em satélites artificiais ou, visando aplicações específicas, em estruturas fixas em terra ou no fundo oceânico (como plataformas de exploração de petróleo)[2].

Levantamentos aerofotogramétricos realizados no início do século XX, empregando câmeras fotográficas de alta resolução instaladas em aeronaves ou balões, podem ser considerados como alguns dos primeiros trabalhos metódicos de sensoriamento remoto por radiação eletromagnética.

A partir do fim da Segunda Guerra Mundial, observou-se uma grande evolução neste campo de pesquisa, culminando, em 1972, com o lançamento do primeiro satélite especialmente projetado para estudo e monitoramento da superfície da Terra, o *Landsat I*. Desde então, mais de uma centena de satélites de sensoriamento remoto foram lançados por diversos países e organizações.

Os sensores utilizados em tais sistemas podem, simplificadamente, ser agrupados em duas classes[3] (Fig. 20):

***Sensores passivos***, que detectam a radiação emitida pela superfície terrestre ou a radiação proveniente de fontes naturais (como o Sol) e refletida pela superfície. Estes sensores, genericamente chamados de radiômetros, medem a intensidade da radiação em específicas faixas do espectro eletromagnético, como luz visível ou radiação termal (infravermelho). Alguns sistemas têm a capacidade de medição simultânea de dezenas ou até algumas centenas de bandas do espectro.

***Sensores ativos***, que emitem um pulso de energia em direção à superfície terrestre e detectam a radiação por ela refletida ou espalhada. Nesta categoria encontram-se sistemas que utilizam laser (*LIDAR*), radares, altímetros por microondas e "*scaterometers*" (sistemas que utilizam radiação na faixa de microondas para medir a rugosidade da superfície do oceano).

É importante observar que muitas plataformas de sensoriamento remoto operam simultaneamente vários sensores (passivos e/ou ativos), de forma a ser possível obter-se um conjunto de informações mais abrangente sobre o fenômeno em observação.

[2] Sistemas de radar empregados para medição de correntes superficiais e ondas. Vide: <https://ioos.noaa.gov/project/hf-radar/>.

[3] Para saber mais, acesse: <https://earthdata.nasa.gov/learn/remote-sensors>.

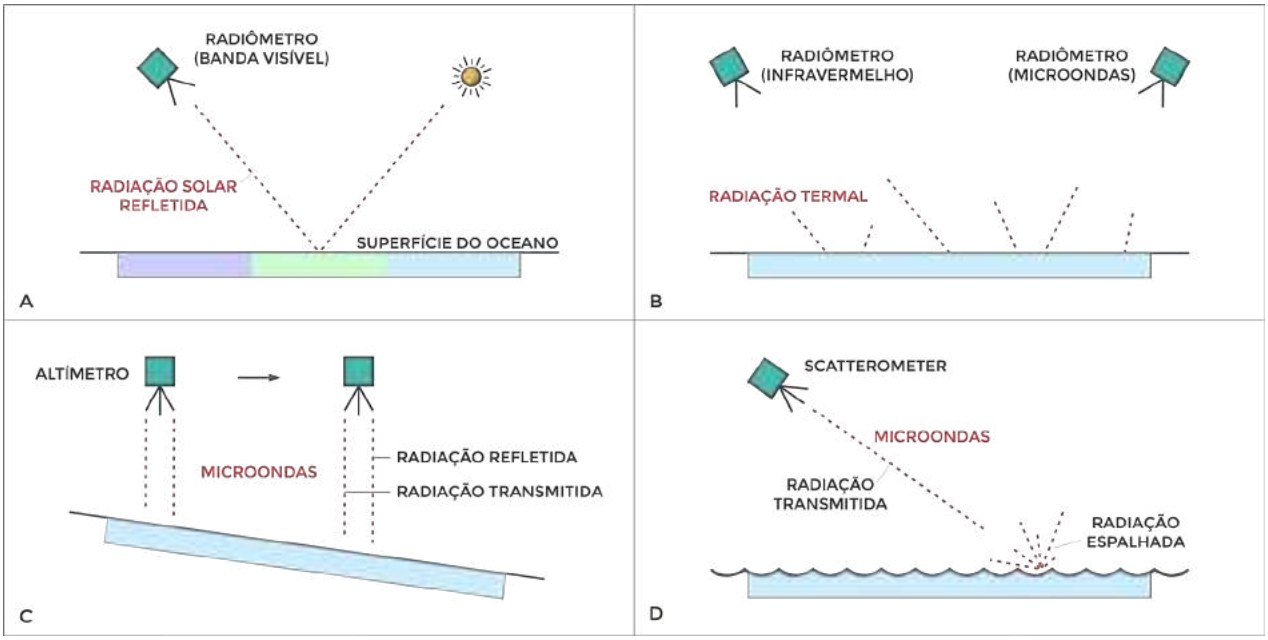



**FIGURA 20.** Classes de sensores eletromagnéticos para sensoriamento remoto: A e B) sensores passivos; e C e D) sensores ativos.

Sistemas de sensoriamento remoto por radiação eletromagnética permitem a medição de inúmeros parâmetros da atmosfera, da superfície terrestre e da superfície oceânica. Com relação a este último ambiente, algumas grandezas passíveis de medição são apresentadas na Tabela 2. Duas imagens resultantes do processamento de dados coletados por satélites de sensoriamento remoto são apresentadas na Figura 21.

**TABELA 2.** Alguns parâmetros oceanográficos passíveis de medição através de sensoriamento remoto.

| Parâmetro | Sensores utilizados | Notas |
|---|---|---|
| **Temperatura da superfície** | Radiômetros nas bandas de microondas e infravermelho | |
| **Salinidade da superfície** | Radiômetros | Estes sistemas inferem a salinidade a partir da medição de alterações das características elétricas da água do mar. |
| **Cor do oceano** | Radiômetros na banda visível | Permitem inferir a de concentração de fitoplâncton e material em suspensão na camada superficial; Detecção de vazamentos de petróleo *offshore*. |
| **Batimetria de áreas rasas** | LIDAR | Sistemas frequentemente instalados em aeronaves. |
| **Nível do mar** | Altímetros | Indiretamente, permite estimar intensidade e direção de correntes de supefície. |
| **Correntes em regiões costeiras** | Radares | Equipamentos instalados em estruturas costeiras fixas. |
| **Ondas** | Altímetros / Radares | |
| **Direção e intensidade de ventos próximo à superfície** | "*Scaterometers*" | |

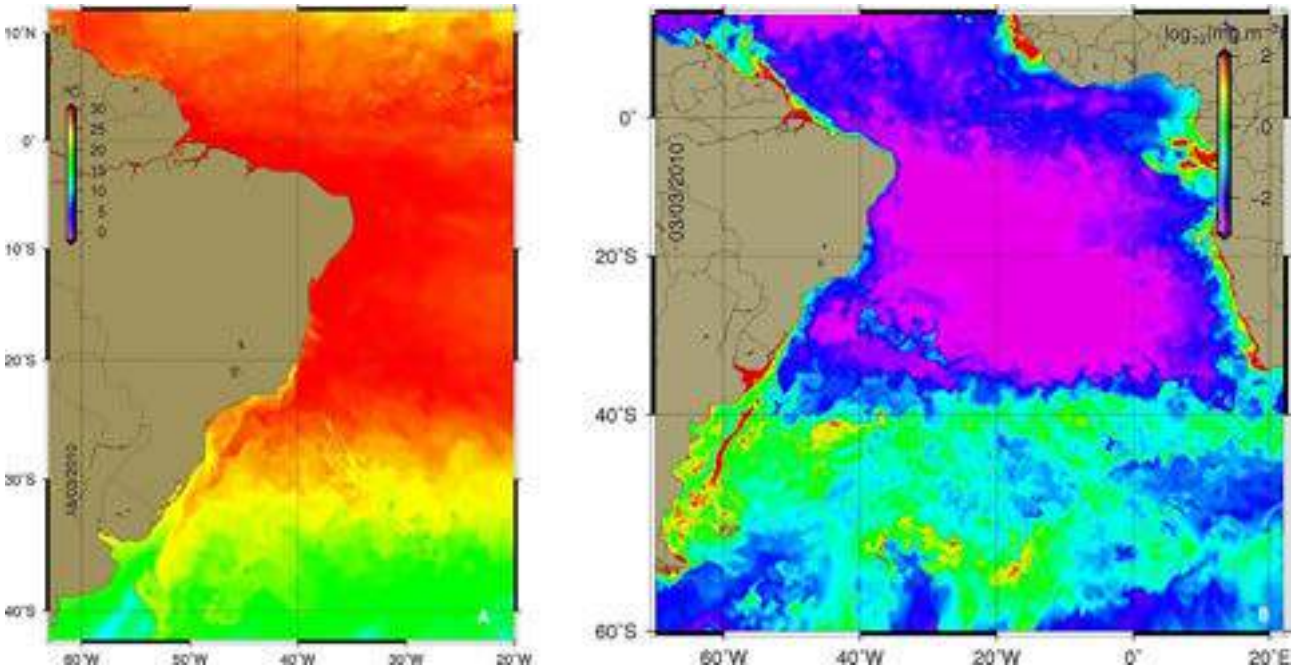



**FIGURA 21.** Imagens obtidas a partir de sensoriamento remoto por satélite – satélite *MODIS Acqua*: A) temperatura da superfície do mar (costa brasileira) - nesta imagem é possível observar-se nitidamente a Corrente do Brasil (faixa irregular vermelho/laranja que acompanha a costa brasileira desde o sula da Bahia até o norte do Uruguai); e B) concentração de clorofila (Atlântico Sul) – nota-se que a região central do Atlântico Sul é extremamente pobre em clorofila, ou seja, a concentração de fitoplâncton na área é muito baixa (regiões lilás e azul escuro na imagem); por outro lado, observa-se produtividade muito alta nas regiões próximas à costa da Argentina, costa oeste da África e costa norte da América do Sul (regiões amarelas e vermelhas na imagem). *Imagens cedidas pelos Drs. Olga T. Sato e Paulo Polito, IOUSP.*

Em comparação a equipamentos de medição *in situ*, sistemas de sensoriamento remoto apresentam uma característica extremamente vantajosa, que é sua- grande cobertura espacial e temporal. Grandes áreas da superfície oceânica (centenas de quilômetros quadrados, no caso de satélites) podem ser observadas em um intervalo de tempo curto (alguns segundos ou minutos).

Exceptuando-se sistemas instalados em satélites geosíncronos, a totalidade da superfície terrestre (ou uma extensa faixa da superfície terrestre, no caso de satélites não polares) pode usualmente ser observada em um período de alguns dias; consequentemente, uma mesma área é periodicamente observada com tal taxa de repetição.

Por outro lado, tais sistemas apresentam uma limitação drástica, que é a restrição das medições à superfície dos oceanos (ou aos primeiros metros da coluna d´água, no caso de alguns sistemas baseados em lasers). Isto é decorrente da intensa atenuação de radiação eletromagnética de alta frequência (inclusive da luz visível) ao se propagar na água.

Um segundo problema consiste na grande influência da atmosfera na propagação de radiação em algumas faixas do espectro eletromagnético, originando reflexão, refração e/ou absorção dos sinais. Por exemplo, nuvens bloqueiam a propagação de radiação na faixa visível e infravermelho, inviabilizando tais medições em áreas encobertas.

Finalmente, é importante enfatizar que medições *in situ* e levantamentos por sensoriamento remoto não são mutuamente excludentes, mas sim formas complementares de coleta de informações, contribuindo para um mais completo conhecimento do ambiente marinho.

# 5. Veículos submarinos de pesquisa

## 5.1 Veículos tripulados

Como descrito anteriormente neste capítulo, o oceanógrafo tem a seu dispor um conjunto enorme de equipamentos para observação do ambiente marinho, embora sua quase totalidade apenas permita observações indiretas, ou seja, o pesquisador não está presente no exato local de observação. Em algumas situações, entretanto, é desejável que o pesquisador tenha acesso àquele local, seja para observação visual do ambiente, seja para coleta seletiva de amostras. Nestas situações, caso o local de observação esteja próximo à superfície (profundidade inferior a 100 metros), o cientista pode valer-se de equipamentos de mergulho autônomo.

No caso de observações a grandes profundidades, entretanto, é imprescindível a utilização de submersíveis específicos. Estes veículos, muitos com propulsão, possuem escotilhas transparentes, holofotes e câmeras fotográficas externas e, frequentemente, manipuladores para coleta de amostras.

Uma característica comum a todos estes veículos é a capacidade de manutenção de um ambiente interno adequado à sobrevivência humana por períodos longos (várias horas). Assim, incorporam sistemas de aquecimento e renovação do ar, além de sistemas de comunicação com a superfície.

Deve-se notar que submersíveis para grande profundidade são equipamentos de custo extremamente alto, exigindo embarcações e equipes de operação extremamente especializadas. O número de veículos de pesquisa para grandes profundidades atualmente operacionais é pequeno (da ordem de vinte). Alguns destes são o *Alvin* (Estados Unidos), o *Shinkai* (Japão) e o *Nautile* (França) (Fig. 22).

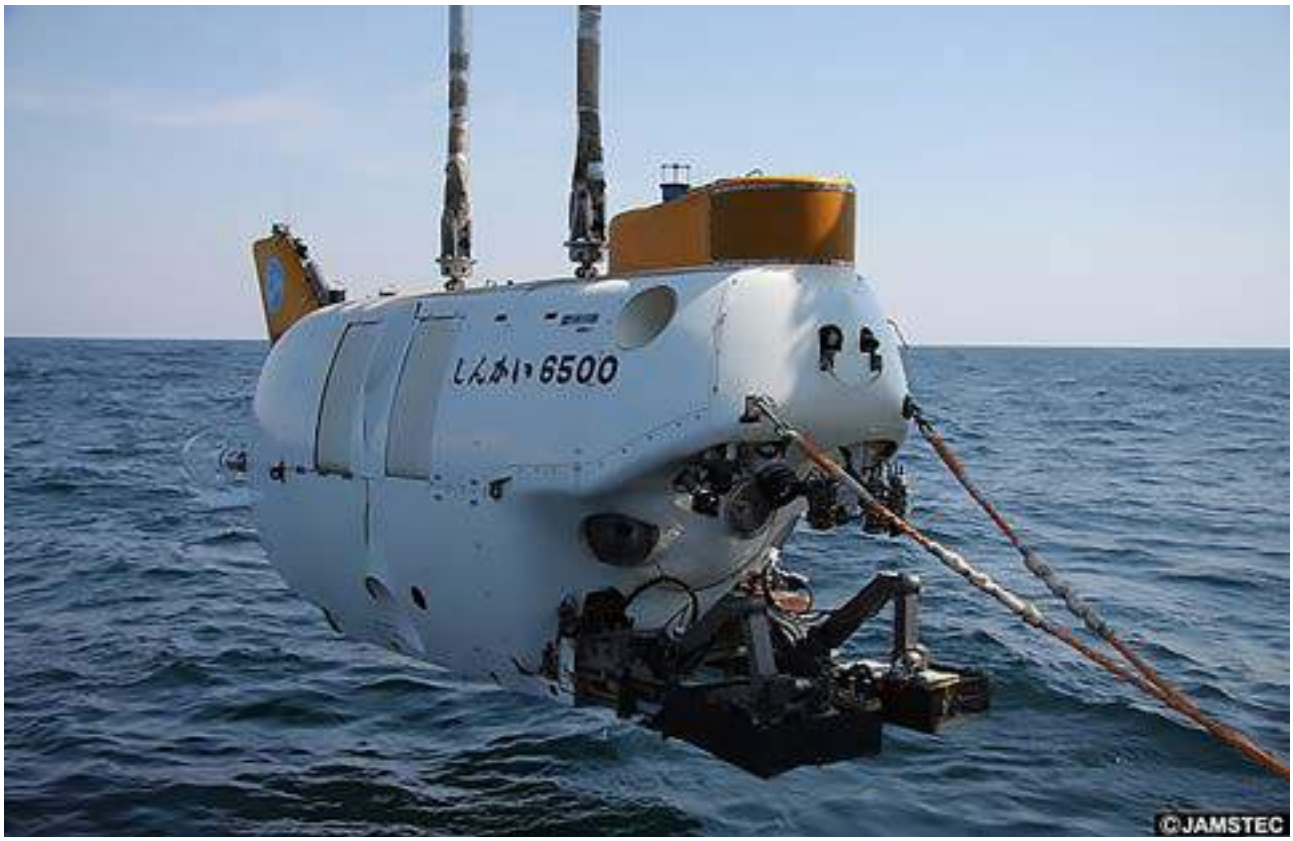



**FIGURA 22. Submersível tripulado *Shinkai 6500* (Japão).** *Fonte: JAMSTEC.*

## 5.2 Veículos operados remotamente (ROVs)

Uma alternativa aos submersíveis tripulados é constituída pelos veículos não tripulados operados remotamente (ROVs) (Fig. 23). Estes equipamentos são operados a partir de uma embarcação, sendo ligados a ela por um longo cabo (cabo umbilical), que fornece energia ao veículo e permite a comunicação entre este e a embarcação (envio de sinais de controle a partir da embarcação e recebimento de dados e imagens coletados pelo veículo). Possuem propulsão e dispõem de uma ou mais câmeras de vídeo e iluminadores, utilizadas para monitoramento do ambiente e navegação do equipamento. Frequentemente, incorporam outros sensores e manipuladores.

Em relação aos veículos tripulados, são muito menores e mais leves, podem operar continuamente por períodos mais longos e têm custo de aquisição e operação muito menor, embora ainda exijam uma equipe de operação extremamente especializada.

Atualmente, está disponível uma gama bastante grande de ROVs, desde equipamentos pequenos para monitoramento visual a pequena profundidade até equipamentos grandes, com um ou mais manipuladores, para grande profundidade. Um setor que se vale extensivamente de ROVs é o de exploração *offshore* de petróleo, para vistoria da parte submersa de plataformas de petróleo, tubulações e outros equipamentos submersos. Em alguns casos são utilizados também para manutenção de equipamentos e estruturas e operação de válvulas submarinas.

**FIGURA 23. ROV** *Kayko* **(Japão).** *Fonte:JAMSTEC.*

## 5.3 Veículos autônomos

Em função das características de determinados levantamentos oceanográficos, pode não ser viável a utilização de ROVs. Levantamentos contínuos por período muito longo (semanas ou meses), em regiões com obstáculos submersos ou área de levantamento muito extensa são exemplos de fatores negativos para a operação daqueles veículos.

Em alguns destes casos, entretanto, pode-se utilizar veículos autônomos, sem conexão física a embarcações na superfície, que realizam a navegação e coleta de dados de forma autônoma.

De uma maneira geral, estes equipamentos têm sua trajetória e estratégia de coleta de dados programadas previamente, são lançados ao mar e, terminado o levantamento, retornam à superfície para recuperação. Sistemas computacionais internos realizam automaticamente correções de rota e procuram solucionar situações de emergência (como mau funcionamento de algum subsistema).

### 5.3.1 Veículos com propulsão (AUVs)

Estes veículos têm capacidade de movimentar-se ativamente, possuindo propulsores (motores e hélices) alimentados por baterias internas. Frequentemente, são equipados com CTDs e ADCPs, além de sonares para mapeamento do fundo. Não é usual a presença de câmeras de vídeo ou fotografia.

AUVs (Fig. 24) são particularmente apropriados para levantamentos em regiões polares, abaixo das camadas de gelo, locais inacessíveis para ROVs e equipamentos descidos da superfície.

**FIGURA 24. AUV** *Sentry* **(EUA).** *Fonte: WHOI.*

### 5.3.2 Gliders

*Gliders* (deslizadores, em tradução literal) (Fig. 25), são veículos não equipados com propulsores, que ciclicamente alteram sua flutuabilidade, mergulhando até determinado nível de profundidade e posteriormente retornando à superfície. Devido à presença de aletas montadas externamente ao veículo, este movimento vertical gera uma pequena força horizontal, que impulsiona o glider horizontalmente. Através da alteração da distribuição de massa em seu interior, é possível alterar a direção de deslocamento.

A cada vez que o glider sobe à superfície, um receptor GPS interno determina sua posição, viabilizando o cálculo das necessárias correções de rota. Eventualmente, breve comunicação via satélite pode ser estabelecida entre o veículo e uma estação em terra durante o período de sua permanência na superfície Diferentes sensores podem ser instalados em gliders, como sensores de temperatura, salinidade ou turbidez, além de ADCPs e sistemas acústicos, mas câmeras de vídeo ou fotografia são muito pouco frequentes.

Em vista de seu baixíssimo consumo de energia (uma vez que não há dispêndio de energia com propulsão), gliders podem operar continuamente por muitos meses, deslocando-se por grandes distâncias. Alguns destes veículos, lançados na costa leste do Estados Unidos, atravessaram o Oceano Atlântico da América do Norte até a costa da Europa.

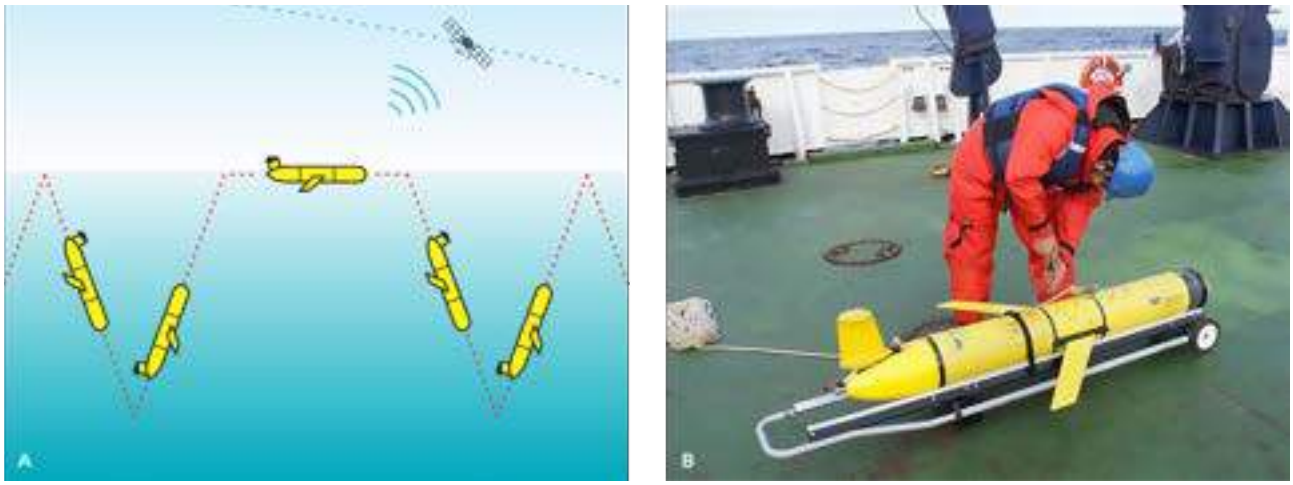



**FIGURA 25.** *Glider*: **A) trajetória típica; e B) preparação para o lançamento.** *Foto: L.V. Nonnato.*

## SITES RECOMENDADOS

Oceanographic Instrumentation: <http://www.mt-oceanography.info/IntroOc/notes/lecture13.html>

Oceanographic instrument <http://www.coastalwiki.org/wiki/Oceanographic_instrument>

Erath Data - NASA: <https://earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing>

ICMBio - Livro Vermelho 2018: <https://www.icmbio.gov.br/portal/component/content/article/10187>

LIDAR - NOAA: <https://coast.noaa.gov/data/digitalcoast/pdf/lidar-101.pdf>

## Referências Bibliográficas

BAKER JR., D.J. 1981. Ocean Instruments and Experiment Design. In: WARREN, B.A. & WUNSCH, C. Evolution of Physical Oceanography. MIT Press, Cambridge, Mass.

CALAZANS, D. (org). 2011. Estudos Oceanográficos: do instrumental ao prático. ed. Pelotas.

ROSSBY, T., DORSON, D. & FONTAINE, J. 1986. The RAFOS System. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology vol. 3, p.672-679.

SOUZA, R. B. (org). 2009. Oceanografia por Satélites. 2a Edição Revisada e Ampliada. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos.

*Capítulo 35*

# CAMPANHAS COSTEIRAS E CRUZEIROS OCEANOGRÁFICOS

*Elisabete de Santis Braga & Luiz Vianna Nonnato*

CITAÇÃO SUGERIDA: BRAGA, Elisabete de Santis; NONNATO, Luiz Vianna. Campanhas costeiras e cruzeiros oceanográficos. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 35: p. 791-813.

# Campanhas Costeiras e Cruzeiros Oceanográficos

*Elisabete de Santis Braga & Luiz Vianna Nonnato*

## 1. Introdução

A Terra realmente é o planeta azul! Cerca de 70 % da sua superfície está coberta por água, formada desde sua origem, presa em sua proto-atmosfera, sendo em parte condensada sob a forma líquida e parte resultante das emanações vulcânicas na forma de vapor, por liberação a partir de reações químicas que ocorreram no interior do planeta, sendo eliminadas de modo intenso, quando o intemperismo (fortes tempestades com muitos raios) tomou conta da Terra. Uma abundante cobertura de água na forma de vapor encontrava-se em torno do planeta, em um momento em que a escuridão na superfície estava presente. Gases estufa faziam parte da protoatmosfera e, após o resfriamento da crosta terrestre (camada mais superficial do Planeta) e a formação das grandes depressões (bacias oceânicas), um enorme volume de água na forma líquida ficou aprisionado em um único mar, o *Panthalassa* ou mar de *Tethys*.

Com a deriva continental (separação entre os continentes), outros corpos de água surgiram, formando os grandes oceanos, que armazenam uma quantidade de água calculada em $1.322.000 \cdot 10^{15}$ kg de água, constituído o maior reservatório de água do planeta, atingindo profundidades de mais de 10 km na região das fossas das Marianas no Oceano Pacífico. Considerando os três maiores oceanos do Planeta Terra, suas bacias apresentam uma profundidade média de 4.117m. Como estudar esta imensidão? Já falavam os antigos que se conhece mais do espaço do que das profundezas oceânicas.

Todo avanço científico está ligado às pesquisas tecnológicas que permitam o acesso ao objeto de estudo. Laboratórios submarinos sempre fizeram parte do ideal de pesquisa, e grandes "navios" (galeras, caravelas, etc.) iniciaram o conhecimento sobre o imenso "azul" desde a época dos Vikings, em que grandes navegadores como Eric, o Vermelho, já desbravavam os oceanos. No quadro histórico, durante quase toda a  idade média (500 a 1450), pouco do mar foi explorado pelos europeus. A partir do final do século XV, os oceanos voltaram a ser objeto de grande atenção por parte da Europa Ocidental, com a geração de muito conhecimento e o surgimento de novos conquistadores.

O navio *HMS Beagle*, em expedição realizada entre 1831 e 1834, tinha a bordo o pesquisador Charles Darwin (1809-1882), que buscava conhecer as espécies de organismos que habitavam o grande azul, resultando na descrição de muitas espécies novas e contribuindo para a formulação da Teoria da Evolução.

Um evento particularmente importante para ao estabelecimento das bases científicas da pesquisa oceanográfica foi a expedição do navio *HMS Challenger* (1872-1876), cuja proposta de pesquisa era o conhecimento pleno do ambiente "azul", partindo da composição química da água, algo tipicamente característico do ambiente marinho, a circulação, a penetração da luz no meio marinho e também a presença de seus habitantes, mas com intensa curiosidade quanto às profundidades em que viviam, os sedimentos, contemplando características geológicas, físicas, químicas e biológicas dos oceanos. Esta embarcação é, inclusive, considerada a "*nave-mãe da Oceanografia*" (Fig. 1).

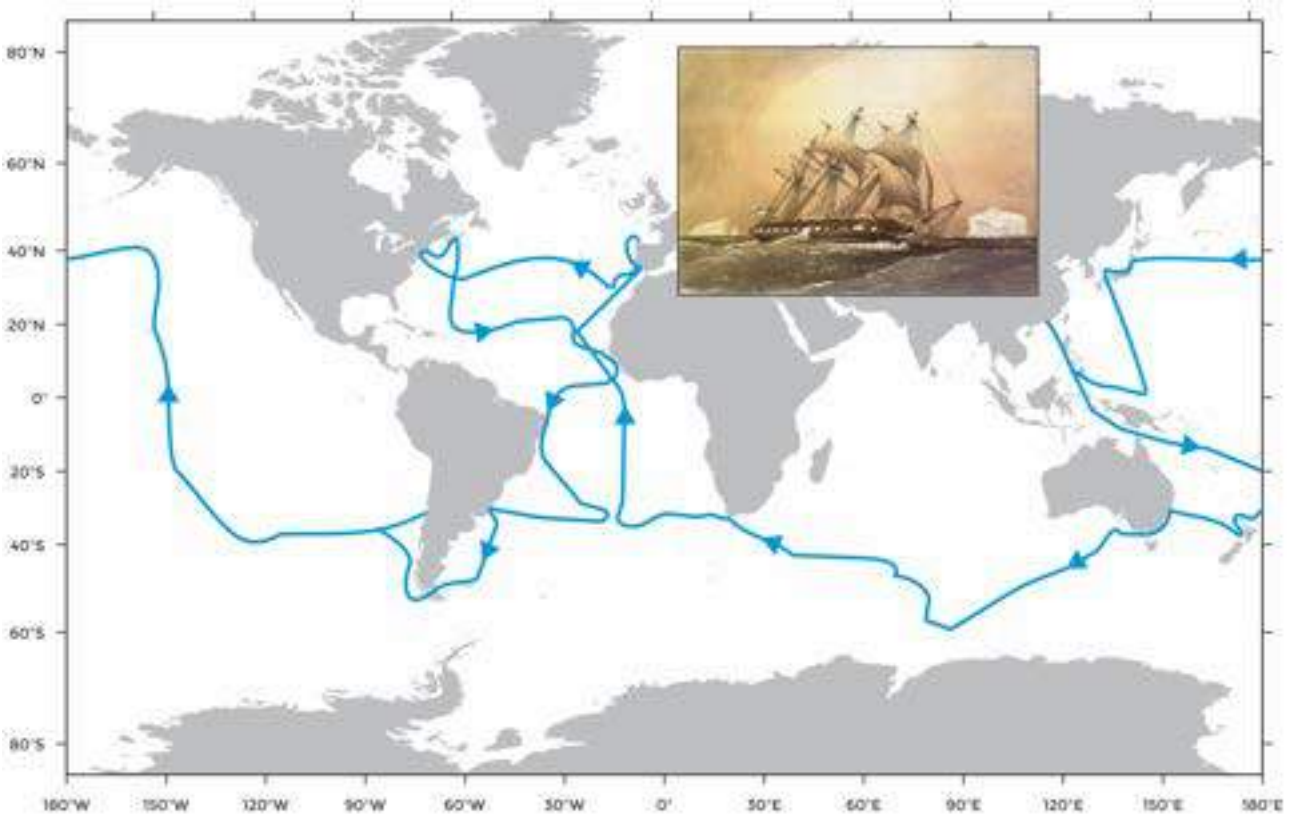



**FIGURA 1.** **Trajeto percorrido pela expedição Challenger (1872-76). No destaque, pintura de W.F. Mitchell do navio britânico** *HMS challenger (Wikimedia Commons).*

A descoberta "das proporções constantes" entre os elementos maiores dissolvidos na água do mar, atuando como fatores conservativos na propriedade "salinidade", contribuiu para, em conjunto com o conhecimento da distribuição da temperatura nos oceanos, identificar as diferentes massas de água oceânicas, atribuindo-lhes identidade. A temperatura e a salinidade são formadoras do parâmetro densidade, o qual está relacionado à distribuição da água nos oceanos e ao seu movimento. Espanta-nos pensar que as correntes marinhas superficiais já eram do conhecimento de grandes navegadores dos séculos XV e XVI!

A coleta de dados oceanográficos em águas de superfície, seja por embarcações científicas ou por embarcações mercantes (que coletam dados ao longo de sus trajetos, a partir de sensores de temperatura, salinidade e mesmo de $pCO_2$), permite a aquisição de informações que podem ser transmitidas a centros de pesquisa e armazenadas em bancos de dados nacionais e internacionais, contribuindo à formação de um panorama global de dados cada vez mais acurados e completos para compreensão dos processos que ocorrem em nosso planeta.

A disponibilidade de imagens de satélite permitiu um grande avanço nos estudos de fenômenos físicos e biológicos nos oceanos. Dados coletados por sensores presentes nos satélites, cada vez mais avançados e especializados, contribuem para a formação de cenários amplos sobre os oceanos.

Também, imagens obtidas sobre a parte terrestre auxiliam na compreensão de feições costeiras e trocas entre continente e oceanos, bem como, fenômenos integrados entre a atmosfera e os oceanos, como deslocamentos de massas de ar, formação de sistemas frontais, e outros que atuam nas mudanças climáticas intensificadas pelas as ações humanas, como é o exemplo do aumento de gases estufa devido à intensificação da queima de combustível fóssil.

Sensores de temperatura e cor, empregados na captação de imagens por satélite, permitem a obtenção de importantes informações, como a detecção de biomassa fitoplanctônica nos oceanos ou "*bloom*" de fitoplâncton marinho localizados em áreas costeiras e ressurgências, bem como, em águas costeiras eutrofizadas. Podem também detectar efeitos da erosão costeira, transporte de areia por ventos e poluição, como no caso de acidentes com petroleiros, e mais recentemente, ilhas de lixo transportadas por correntes marinhas.

Mas o que dizer da composição da água do mar? Sabemos que contém sais, na verdade toda a tabela periódica de elementos, porém em proporções diferentes. Os constituintes em maior quantidade são relacionados às propriedades conservativas como a salinidade, enquanto outros, em concentrações menores, estão associados aos nutrientes necessários para a produção da matéria orgânica dos seres vivos (constituintes não-conservativos). Existem ainda aqueles em quantidades muito menores, os elementos traços, alguns atuando como micronutrientes. Sem falar nos componentes orgânicos dissolvidos e o material particulado de origem orgânica e inorgânica. Como obter informação sobre essa composição?

Como estudar os organismos presentes nos oceanos, distribuídos nas diferentes profundidades, em toda a coluna d'água, possuindo diferentes tamanhos, de ínfimos (na escala de pico e nanoplâncton), passando a microplâncton e diferentes fases larvais de organismos que são transportados com as massas d´agua, até organismos maiores como moluscos, crustáceos, peixes, répteis e mamíferos que possuem maior autonomia no deslocamento (nectônicos), além de organismos com vida associada a um substrato como os bentônicos?

E o sedimento, um compartimento oceânico que possui muitos minerais, registra a evolução de processos que ocorreram em escala histórica nos diferentes locais, é reator para processos químicos óxicos e anóxicos, e abriga diferentes formas de vida? Como obter informações sobre os sedimentos e suas propriedades, processos geológicos e geofísicos associados ao assoalho marinho?

E a poluição, intensa nas áreas costeiras e a ameaça que representa para o mar aberto e ainda, a relação das mudanças climáticas e os oceanos, como estudar esses processos?

Na atualidade, a ênfase na mudança estrutural da economia mundial, voltada à gestão e uso racional dos recursos naturais (economia azul) implica na necessidade da expansão do conhecimento referente à **Amazônia Azul**, território marítimo sobre a qual o Brasil tem direitos exclusivos de exploração econômica (Fig. 2). Esta área engloba uma faixa de 200 milhas marítimas medidas a partir da linha de costa (Zona Econômica Exclusiva, com cerca de 3,5 milhões de quilômetros quadrados), além de uma área de Extensão da Plataforma Continental, reivindicadas junto à Organização das Nações Unidas (cerca de 2,0 milhões de quilômetros quadrados).

Assim, são muitas as perguntas que geraram e geram inúmeros projetos e programas de pesquisas, que motivam campanhas oceanográficas, visando a obtenção de informações sobre os oceanos e zonas costeiras. Nos últimos 20 anos, alguns programas de pesquisa têm se dedicado ao maior conhecimento do Atlântico Sul, e mesmo da região Antártica, nos quais muitos países demonstram grande interesse. O que acontece nos mares austrais tem efeitos sobre todo o Planeta, sendo esse um local importante para pesquisas voltadas à compreensão das mudanças climáticas globais. Afinal, no Planeta Terra temos dois importantes meios fluídos, o ar e a água. O acoplamento entre os oceanos e a atmosfera é grande responsável pela temperança climática, pois o ar e o mar trocam energia, uma vez que a água possui alto calor específico e consegue absorver calor das regiões mais quentes (equatoriais e tropicais), distribuindo às regiões mais frias (polares). As diferenças extremas de temperatura no Planeta Terra de hoje, estão entre -80˚C (Antártica, base russa de Vostok) e +50˚C (Arábia).

**FIGURA 2.** A Amazônia Azul inclui o Mar Territorial, a Plataforma Continental, a Zona Econômica Exclusiva e as águas interiores brasileiras.

Voltando ao conhecimento sobre o mar aberto, distante da costa e profundo, deve-se contar com embarcações de pesquisa como os melhores instrumentos para obtenção de conhecimento desse "imenso azul". Navios construídos ou adaptados para isto são importantes ferramentas de coleta de informações em diversos pontos dos oceanos. Entretanto, o custo de aquisição, operação e manutenção destes "equipamentos de pesquisa" é alto, pois tratam-se de navios especiais, equipados com instrumentos de última geração para pesquisa e navegação, exigindo tripulação especializada e treinada para operação dos equipamentos científicos e de pesquisa.

Programas de estudos realizados por um único país ou, em muitos casos, em cooperação entre vários países, constituem a fórmula básica para os melhores estudos oceanográficos. Em particular, a união de esforços para estudos em áreas de difícil acesso, muitas vezes em águas internacionais e/ou atingindo áreas de jurisdição de mais de um país, é uma solução que permite a troca de experiência e capacitação das equipes, além da potencialização do uso dos recursos disponíveis. A construção e gestão de embarcações oceanográficas podem, inclusive, ser feitas em parcerias entre instituições de mais de um país na forma de consórcio, como é o caso, por exemplo, da França e Espanha, que construíram e fazem gestão de um Navio de Pesquisa em parceria, o "*N/Oc. Thalassa*" (Fig. 3A).

**FIGURA 3.** Navios oceanográficos: **A)** *Thalassa* (França/Espanha); **B)** *Mirai* (Japão); e **C)** *L'Atalante* (França). *Fotos: Elisabete S. Braga*.

## 2. Embarcações oceanográficas

As embarcações oceanográficas constituem o principal equipamento de ensino e pesquisa utilizado para capacitação profissional e aquisição de informações sobre o ambiente marinho. Elas podem ser de pequeno, médio e grande porte, e mesmo jet-skis podem ser utilizados, no caso para aquisição de dados em áreas costeiras com o uso de sensores.

A área a ser estudada, a distância da costa, o tipo de trabalho a ser realizado, a autonomia da embarcação em permanência na água e suporte de equipamentos e tripulantes, ou seja a capacidade de acomodação da equipe e estrutura para coleta e análise de dados a bordo, definem as características básicas da embarcação a ser utilizada no estudo.

Uma pequena embarcação motorizada como "uma voadeira", uma lancha ou um jet-ski pode ser muito útil em levantamentos de dados em regiões costeiras rasas como estuários, em que não há necessidade de utilização de equipamentos volumosos ou em grande número ou de equipe numerosa. Este porte de embarcações é perfeitamente adequado para atividades como observação de animais (como "avistamento" de botos), acesso a manguezais, observação de feições costeiras ou acompanhamento de mergulhos, como apresentado na Figura 4.

**FIGURA 4. Atividades de pesquisa a bordo de embarcações de pequeno porte.** *Fotos: Elisabete S. Braga.*

Em estuários e regiões costeiras, quando há necessidade de uso de guinchos hidrográficos com garrafas coletoras de água, CTDs, correntômetros e sondas, pegadores de sedimentos, arrasto de rede e outras atividades que demandam uma maior estrutura de suporte e autonomia para os trabalhos, é conveniente o emprego de embarcações de médio porte, equipadas com dispositivos de navegação mais completos, como GPS, ecobatímetros, sensores meteorológicos, radio comunicadores, equipamentos de salvatagem, entre outros, além de pequenas acomodações para descanso e local para refeição (Fig. 5).

**FIGURA 5. Atividades de pesquisa a bordo de embarcações de médio porte.** *Fotos: Luiz V. Nonnato (A) e Elisabete S. Braga (B, C e D).*

Embarcações de grande porte, os chamados Navios Oceanográficos (N/Oc.), são utilizadas em levantamentos em áreas profundas e em trabalhos de longa percurso e duração, incluindo expedições transoceânicas. Normalmente dispõem de equipamentos sofisticados, adequados à medições e coleta de amostras em grande profundidade (> 5.000 m), monitoramento contínuo das condições oceanográficas e meteorológicas da região próxima à superfície oceânica, assim como infraestrutura adequada para lançamento e recuperação de redes, boias, fundeios oceanográficos e balões meteorológicos. Muitas vezes estes navios possuem infraestrutura para operação de veículos tripulados e equipamento dirigidos remotamente, como ROVs (*Remotely Operated Vehicle*).

Na atualidade, observa-se uma crescente utilização de catamarãs adaptados à pesquisa marinha. Tais embarcações, devido a sua boa estabilidade e pequeno calado, são particularmente adequadas para operação em águas estuarinas e costeiras, embora modelos de maior porte sejam também adequados para pesquisa em mar aberto. Da mesma forma, o investimento em embarcações que utilizam energia limpa como eólica ou solar para propulsão e geração de energia elétrica deve receber grande incentivo nos próximos anos.

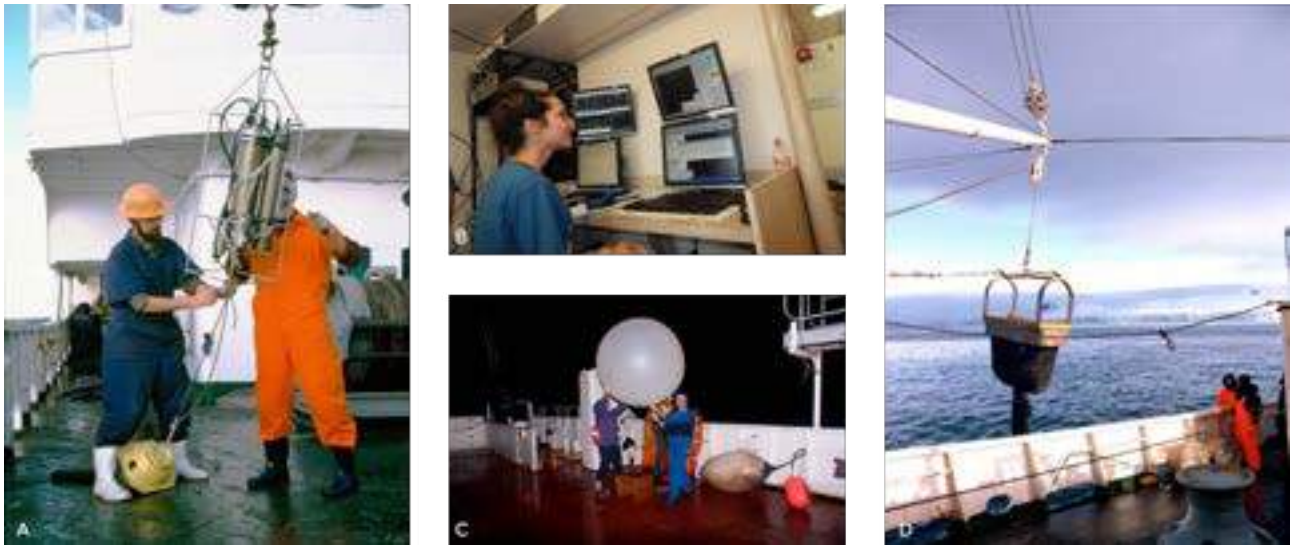


**FIGURA 6. Atividades de pesquisa a bordo de embarcações de grande porte.** *Fotos: Luiz V. Nonnato (A, C e D) e Elisabete S. Braga (B).*

O Brasil possui longa tradição de execução de levantamentos hidro-oceanográficos. Em 1857, a Marinha do Brasil realizou o primeiro levantamento hidrográficos de vulto na costa brasileira. A partir de meados do século XX, a pesquisa oceanográfica passou a receber maior atenção de instituições civis, com o início da operação de embarcações específicas para este fim. Grande contribuição neste sentido foi dada pelo Prof. Wladimir Besnard (fundador do Instituto Oceanográfico da USP), que na década de 1950 construiu um laboratório flutuante em Cananéia para observações no estuário. Desde então, a ciência em nosso país tem se valido de diversas embarcações oceanográficas, que muito contribuíram para o conhecimento de nossos mares. A figura 7 apresenta algumas destas embarcações, históricas e atuais, enquanto a Figura 8 mostra as embarcações do Instituto Oceanográfico da USP, tanto atuais quanto as já descomissionadas.

**FIGURA 7. Algumas embarcações de pesquisa brasileiras: A)** *N/Oc. Almirante Saldanha* **(Marinha do Brasil, descomissionado); B)** *N/Oc. Vital de Oliveira* **(Marinha do Brasil);** *N/Oc. Antares* **(Marinha do Brasil); e D)** *N/Oc. Atlântico Sul* **(Fundação Universidade do Rio Grande).** *Fotos: Revista Marítima Brasileira (A), Centro de Hidrografia da Marinha (B), Chico Vicentini (D) e Fundação Universidade do Rio Grande (D).*

**FIGURA 8. Embarcações da flotilha do Instituto Oceanográfico, desde sua fundação. As duas embarcações mais recentes, Alpha Crucis e Alpha Delphini, foram financiadas pela FAPESP.** *Fotos: acervo IOUSP (A, B, C, D, E, F, G e I), Luiz Vianna Nonnato (H e M), Elisabete S. Braga (J, K e L).*

## 2.1 Requisitos de uma embarcação adequada à pesquisa oceanográfica

De um modo geral, as embarcações oceanográficas devem oferecem algumas características especiais que as tornam mais apropriadas para amostragem de água, sedimentos, organismos, lançamento e recuperação de equipamentos, lançamentos de ROVs, lançamento de balões meteorológicos, perfilagem de fundo, entre outros, além de manter a bordo laboratórios que permitam o tratamento das amostras, preservação em câmaras frias, análises químicas, recepção e registro dos sinais dos equipamentos imersos, sensores instalados no caso entre outros, como comentado anteriormente. Algumas aplicações específicas exigem um grau de especialização ainda mais alto, como é o caso de navios para perfurações e obtenção de testemunhos em águas profundas ou operação de submersíveis

A Figura 9 apresenta algumas características básicas para um navio de pesquisa oceanográfica. Naturalmente, principalmente em função de seu porte, nem todas as embarcações apresentam a totalidade destas características, mas a maioria apresenta ao menos algumas delas.

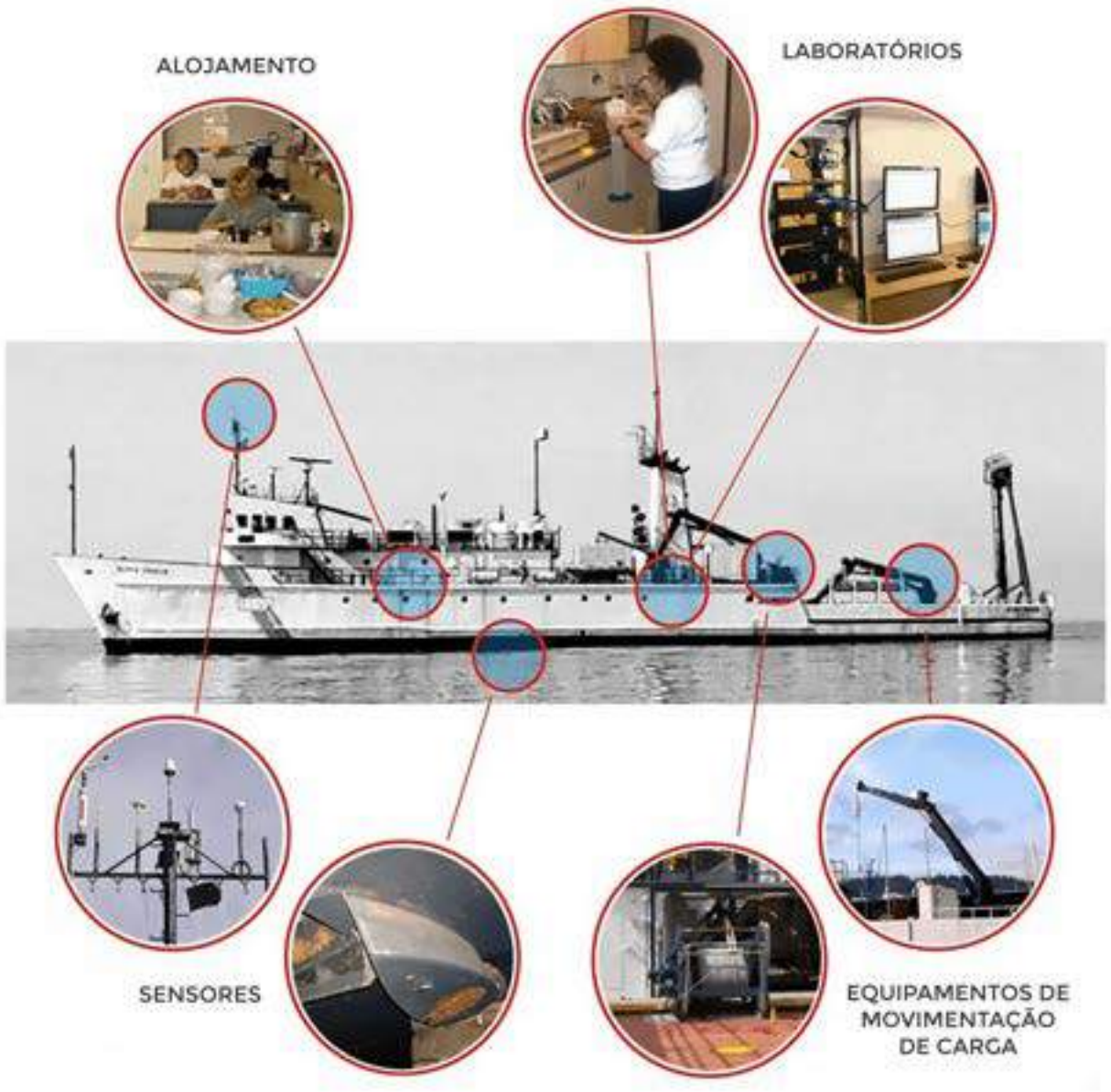



**FIGURA 9.** Instalações e equipamentos essenciais para apoio à pesquisa oceanográfica e manutenção da equipe de bordo.

### *2.1.1 Possibilidade de utilização da superestrutura, mastros e casco da embarcação como estruturas para a instalação de sensores de instrumentos de medida ou transdutores de sistemas de comunicação com equipamentos fundeados e veículos submarinos*

Diversos instrumentos científicos necessitam que seus sensores sejam instalados por longo período em pontos específicos do navio (Fig. 10). Ecossondas e sonares usualmente têm seus elementos transdutores instalados aderidos ao casco da embarcação, abaixo da linha d'agua; sensores de equipamentos meteorológicos são usualmente instalados no topo dos mastros da embarcação. Em particular, transdutores acústicos instalados no casco do navio são elementos centrais para o controle, posicionamento em relação à profundidade e relevo de fundo e aquisição de dados específicos por instrumentos de medição, como derivadores de profundidade, atuadores acústicos ou alguns tipos de veículos submarinos.

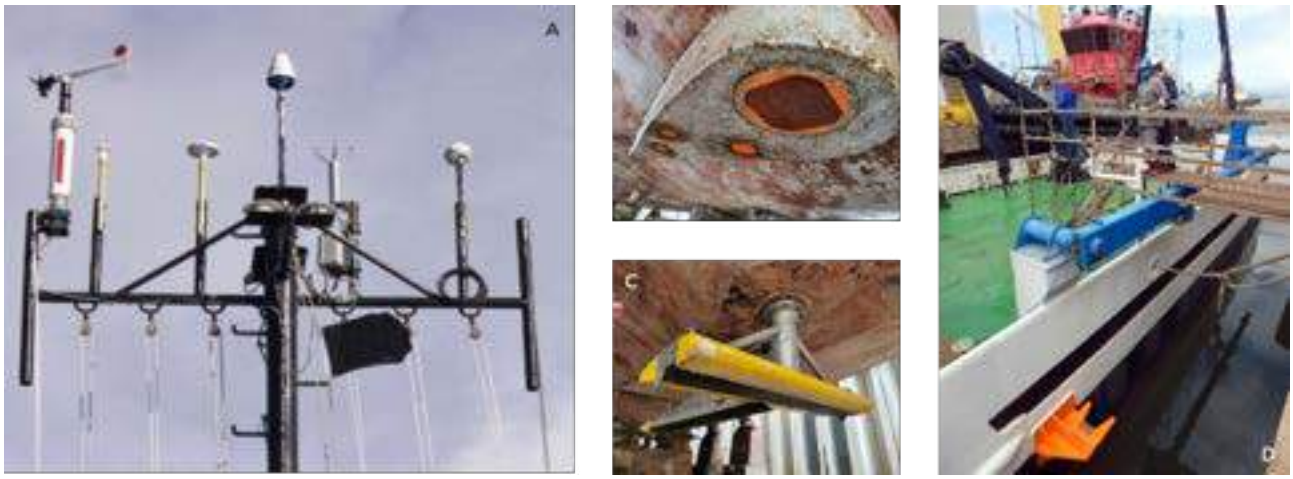



**FIGURA 10.** Equipamentos instalados nos mastros e casco do N/Oc. Alpha Crucis: A) estação meteorológica e antenas de GPS instaladas em um dos mastros; B) dois transdutores acústicos das ecossondas, instalados sob o casco; C) transdutor do sonar multifeixe, instalado próximo à quilha; e D) haste de fixação do transdutor do sistema de posicionamento submarino USBL, instalado no costado. *Fotos: Luiz Vianna Nonnato (A) e Elisabete S. Braga (B, C e D).*

### *2.1.2 Disponibilidade de equipamentos para movimentação de carga*

Equipamentos para coleta de amostras ou de medição de variáveis oceanográficas são por vezes volumosos e pesados; assim, sua instalação e retirada da água pode ser uma operação complicada e, em alguns casos, sujeitando as pessoas nela envolvidas a razoável risco de acidente. A disponibilidade, na embarcação, de equipamentos para a movimentação de carga, como **guindastes** e **guinchos** simplifica enormemente as operações a bordo oferecendo maior segurança e menor risco de acidentes e perda dos equipamentos. Guindastes ou assemelhados são utilizados para deslocamento de equipamentos no convés da embarcação e sua colocação e posterior retirada da água; guinchos (máquina utilizada para liberar ou recolher grandes extensões de cabos de aço ou fibras sintéticas) são imprescindíveis para lançamento e arrasto de redes e outros coletores de amostras, bem como para descer alguns equipamentos a grandes profundidades. Embarcações de maior porte usualmente disponibilizam cabos de diferentes bitolas e construções (e respectivos guinchos), para distintas aplicações: cabos de grande bitola, para arrasto de redes e operação de amostradores de fundo, cabos de pequena bitola para operação de redes de plâncton e arrasto de equipamentos pequenos e cabos eletromecânicos (que incorporam um ou mais condutores elétricos), para operação de CTDs e outros perfiladores eletrônicos, entre outros tipos de cabos (Fig. 11). Uma aplicação muito específica é a operação de ROVs, que exige a utilização de cabos especiais e guinchos bastante complexos.

**FIGURA 11.** **Equipamentos de movimentação de carga: A) os dois guindastes e o arco de popa (estrutura para lançamento de equipamentos pesados) do N/Oc. Alpha-Crucis; B) convés superior do N/Oc. Alpha Crucis, mostrando um dos guindastes, o arco de boreste e os dois guinchos de pesca; C) guincho de pesca do B/Pq. Veliger II; e D arco de popa do N/OC. Alpha Delphini.** *Fotos: Luiz Vianna Nonnato (A e B) e Elisabete S. Braga (C e D).*

### *2.1.3 Disponibilidade de laboratórios*

Em trabalhos no mar, distantes da costa e de pontos de apoio em terra, frequentemente os pesquisadores necessitam realizar a bordo o processamento das amostras coletadas, como sua análise, medição ou preparo e preservação das amostras para posterior análise em laboratórios em terra (eventualmente, amostras não podem ser preservadas e devem ser processadas rapidamente a bordo, como é o caso de alguns parâmetros químicos e biológicos). Assim, torna-se essencial que a embarcação disponha ao menos de um local abrigado do sol e chuva, com uma superfície plana para a realização do trabalho e mesmo instalação de pequenos equipamentos, com disponibilidade de energia elétrica, ou seja, uma área que possa ser utilizada como um pequeno "laboratório", cuja estrutura será dependente do tamanho e facilidades da embarcação (Fig. 12).

Naturalmente, uma pequena embarcação oceanográfica talvez ofereça apenas uma pequena área do convés protegida por um toldo, enquanto embarcações oceanográficas de maior porte podem dispor de um ou mais laboratórios propriamente ditos, bem equipados, com infraestrutura especializada para análises de grande complexidade e redes computacionais de grande capacidade, entre outras características.

**FIGURA 12.** **Laboratórios: A) Laboratório de sistemas eletrônicos (B/Pq. Alpha Delphini); B) Laboratório geral (N/Oc. Alpha Crucis); e C) Laboratório de Aquisição de Dados N/Oc. Alpha Crucis.** *Fotos: Elisabete S. Braga (A e B) e Luiz Vianna Nonnato (C).*

### *2.1.4 Alojamento para tripulação e pesquisadores*

Durante a realização de um levantamento oceanográfico, é frequentemente necessário que o pesquisador permaneça no mar por vários dias (um trabalho ao largo de área costeira ou um levantamento transoceânico pode estender-se por várias semanas). Assim, embarcações oceanográficas adequadas a estes trabalhos devem dispor de infraestrutura que ofereça aos embarcados estrutura mínima para atender as necessidades diárias de descanso e conforto durante o período de permanência no mar. Isso demanda estrutura para a realização de refeições, higiene e descanso entre as atividades de trabalho (normalmente realizadas em turnos, pois o navio requer operação constante e as pesquisas também, sendo a vida a bordo intensa e contínua). Dessa forma, um alojamento, para que o pesquisador possa dormir abrigado de sol e chuva e um local para preparo de refeições são imprescindíveis (Fig. 13).

**FIGURA 13.** **Alojamento e refeitório: A) cozinha (B/Pq.Veliger II); B) refeitório (B/Pq. Alpha Delphini); C) cozinha (N/Oc. Alpha Crucis); D) camarote (N/Oc. Alpha Crucis); e E) Banheiro (N/Oc. Alpha Crucis).** *Fotos: Elisabete S. Braga (A, B e C), e Chico Vicentini (D e E).*

## 3. Planejamento dos cruzeiros oceanográficos

Pesquisas utilizando embarcações implicam um planejamento complexo, iniciando com a reserva da embarcação pelo grupo de pesquisa, a definição da área a ser estudada, o período de realização da campanha, o número de pesquisadores a embarcar para cálculo de alimentação, água, combustível e outros insumos, requerendo assim, um apoio logístico que vai desde o preparo e manutenção da embarcação, treinamento de pesquisadores e tripulação e planejamento das escalas de apoio à embarcação e troca de tripulação, bem como a obtenção de apoio financeiro para sua execução.

As aquisições de informações oceanográficas em longos trajetos na região costeira e em mar aberto são operações complexas, têm custo financeiro elevado e mobilizam um número considerável de pessoas. Desta forma todo cuidado no planejamento é muito importante para garantir o máximo de segurança e aproveitamento nos trabalhos realizados em um cruzeiro, o que deve também considerar uma boa integração da equipe e organização nas tarefas a serem executadas, devendo assim ter um **Chefe científico,** que irá coordenar as atividades de ensino e pesquisa enquanto o **Comandante** irá comandar a equipe operacional da embarcação.

O N/Oc. Alpha Crucis, do Instituto Oceanográfico da USP, possui 64 m de comprimento e comporta cerca de 40 pessoas, entre pesquisadores e tripulação. A programação de um cruzeiro de ensino ou pesquisa neste navio envolve um grande conjunto de cuidados além dos diretamente relacionados à atividade científica, como previsão de armazenamento de equipamentos e amostras (eventualmente, implicando na necessidade de câmaras frias, freezers, ultrafreezer ou outros ambientes aclimatados) transporte da equipe científica e eventual treinamento da equipe científica para as atividades de bordo.

Um aspecto de particular importância é o adestramento, por parte do comando do navio, de todos (equipe científica e tripulação) quanto às medidas de segurança a bordo e instrução para situações de emergência, como incêndio a bordo ou abandono da embarcação (Fig, 14). Assim, um cuidadoso planejamento de todos os aspectos relacionados ao cruzeiro a ser realizado é um fator determinante para seu sucesso.

**FIGURA 14. Adestramento sobre medidas de salvatagem.** *Fotos: Elisabete S. Braga.*

Dois aspectos absolutamente básicos para o planejamento de um cruzeiro de pesquisa são: seu planejamento, com a devida antecedência em relação à data de execução dos trabalhos; e o detalhamento das atividades a serem desenvolvidas (área a ser estudada, trajeto, definição dos dados a serem adquiridos e, com isso, os equipamentos e a estrutura a serem utilizadas a bordo). Falhas no planejamento podem implicar em perda de dados e maior estresse entre os membros da campanha, comprometendo toda a qualidade do trabalho.

É importante mencionar que cada campanha é única, sendo praticamente impossível sua repetição nas mesmas condições temporais e ambientais, levando em conta as alterações das condições climáticas e sazonais em relação à campanha original. Alguns dos fatores importantes a serem levados em conta no planejamento de um levantamento oceanográfico são descritos a seguir.

## 3.1 Tipo de atividade e local de realização

O ponto de partida para o planejamento de qualquer cruzeiro é o perfeito estabelecimento dos objetivos do cruzeiro, seja ele relativo a um projeto de pesquisa ou a um curso, ou seja, quais as principais questões que pretende-se responder com os dados coletados no cruzeiro.Isto posto, a sequência dos trabalhos a serem realizados a bordo deve ser adequadamente definida, incluindo rota de navegação, metodologia para coleta de dados ou da obtenção de amostras, equipamentos a utilizar, distribuição de atividades entre os participantes do cruzeiro, entre outros aspectos.

Também é imprescindível o conhecimento da área geográfica a ser estudada e a obtenção de informação sobre a mesma (como profundidades locais, acidentes e feições geológicas e geográficas locais, correntes marítimas e ventos predominantes, informações estas que podem ser obtidas em cartas náuticas), bem como as regras nacionais ou internacionais para navegação e acesso à área e até mesmo para remoção de amostras, (sobretudo no caso de sedimentos e de seres vivos). Estas últimas observações são ainda mais críticas quando o cruzeiro envolve equipes multinacionais ou se desenvolve em águas territoriais de distintos países.

Uma vez discriminados os trabalhos a serem desenvolvidos e a localização geográfica dos pontos (estações oceanográficas) onde serão executadas as tomadas de informações, é importante criar um mapa de trabalho que explicite o trajeto da embarcação e as atividades a serem desenvolvidas em cada estação (mapa de estações), indicando graficamente cada uma destas atividades (para tal, é importante a inclusão de uma legenda neste mapa), como exemplificado na Figura 15. O mapa de estações é também muito útil para o detalhamento logístico do cruzeiro, como a estimativa da duração da campanha e consequente aprovisionamento da embarcação com alimentos, combustível e água, além de identificação das demandas de saída, acostamento em portos e identificação de pontos de apoio. A adequada elaboração deste mapa permite o incremento da segurança dos trabalhos e a minimização do tempo para sua execução.

Mais uma vez, é importante mencionar que o entrosamento entre o Chefe Científico e o Comandante/Mestre da embarcação é fundamental em todas as fases do planejamento da campanha, permitindo a integração entre as atividades de navegação/operação da embarcação e pesquisa, sendo um fator que colabora marcantemente para o sucesso dos trabalhos. Da mesma forma, um fator importante para a segurança e bom desempenho dos trabalhos a bordo é a disponibilidade de uma equipe em terra para contato e acompanhamento da navegação/operação, fornecendo apoio logístico à embarcação e, em caso de emergência, atuando como elemento de ligação entre a embarcação as autoridades de salvaguarda portuárias e navais.

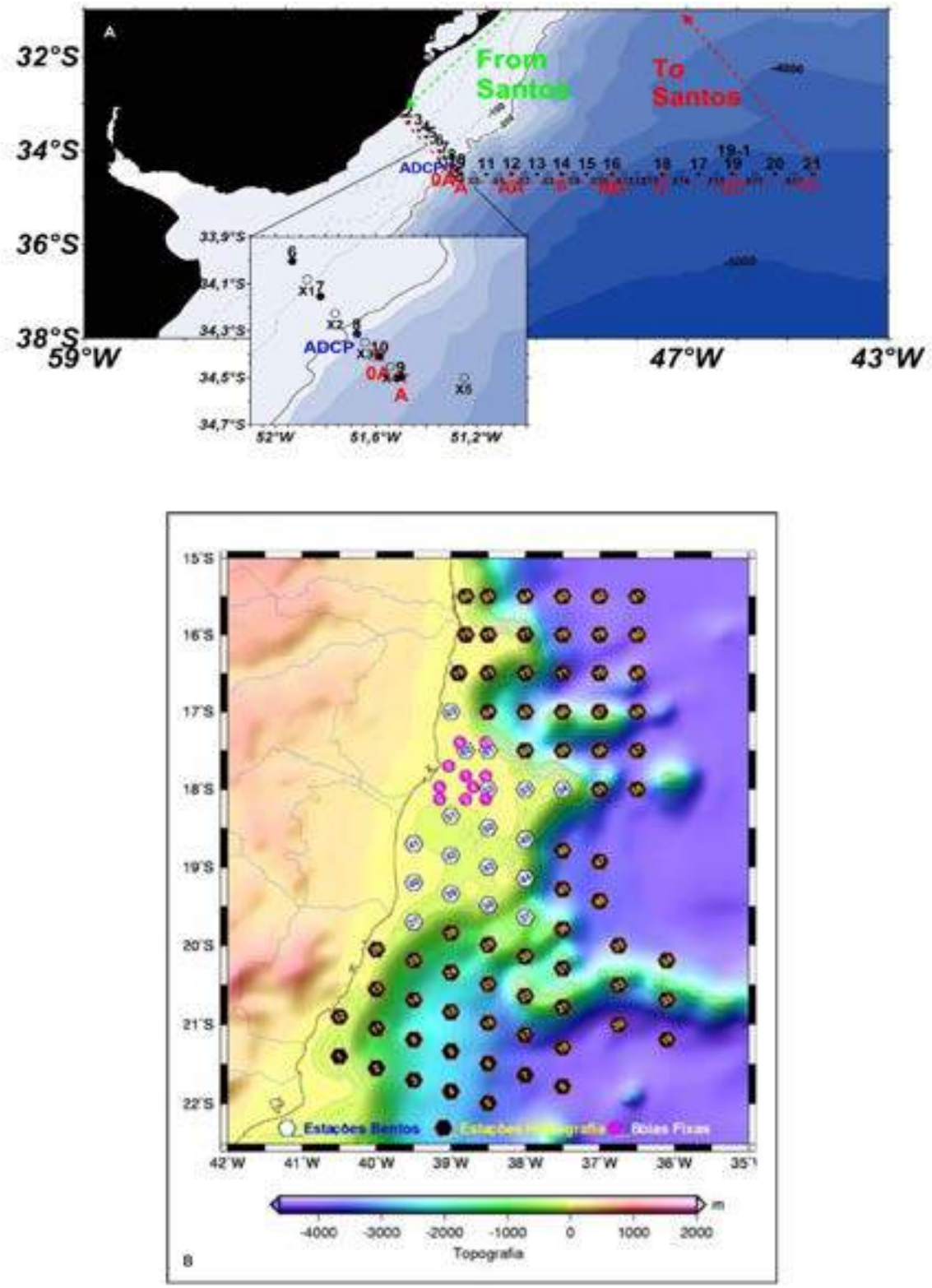



**FIGURA 15. Exemplos de mapa de estações, mostrando posição das estações, tipo de atividades a serem desenvolvidas em cada estação e batimetria da região de estudo.** *Imagens cedidas pelo projeto SAMBAR/ FAPESP (A) e Prof. Ilson Silveira (B).*

Muitas campanhas oceanográficas são multidisciplinares, envolvendo equipes distintas trabalhando simultaneamente. Assim, cuidado deve ser tomado para não haver conflito entre diferentes atividades, seja em termos de espaço físico na embarcação, coincidência de atividades incompatíveis ou metodologia de coleta de amostras, entre outros fatores.

## Trabalhos de convés

Um fator que deve ser objeto de particular atenção durante o planejamento das atividades a bordo é o estabelecimento de protocolos para operações no convés da embarcação. É importante a adequada organização, de modo produtivo e seguro de cada procedimento de coleta de amostra, operação de equipamento e registro de informações.

A perfeita interação entre os membros da equipe científica e entre estes e a tripulação proporciona a otimização do trabalho, redução do tempo para sua realização e garante a segurança do pessoal nela envolvido. Toda a operação em convés deve ser supervisionada pelo comando da embarcação, que se encarrega da movimentação e posicionamento da embarcação para preservar a qualidade do trabalho, minimizar o risco de perda de equipamentos e garantir a segurança dos embarcados. *Foto: Leandro Coelho.*

### 3.2 Cronograma para execução do cruzeiro oceanográfico

A partir do mapa de estações, podem ser estimados os intervalos de tempo necessários para a realização dos trabalhos, assim como para a navegação. Consequentemente, a duração total do levantamento pode ser determinada, de forma aproximada, embora eventos climáticos como tormentas e estado do mar podem interferir na duração do cruzeiro.

Deve-se levar em conta que qualquer atividade a bordo de embarcações possui inerentemente um certo grau de imprevisibilidade associada a diferentes fatores. O estado do mar pode alterar-se rapidamente, a embarcação pode deslocar-se por efeito de ventos e correntes, pesquisadores podem ter mal-estar súbito ou equipamentos podem apresentar falhas, o que implica em maior duração dos trabalhos. Assim, o cronograma deve incluir alguma flexibilidade em termos de duração dos trabalhos (uma margem de 20 % neste tempo é adequada). A experiência mostra que um cronograma de atividades muito rígido é contraproducente, sendo muito difícil de ser seguido à risca e causando considerável estresse na equipe.

Outra consideração importante para o estabelecimento do cronograma de atividade é a definição do período de trabalho de cada membro da equipe científica (turno de trabalho alternado com o descanso). Atividades a bordo são muito desgastantes, implicando em um esforço físico constante para a execução das atividades e, simultaneamente, compensar o balanço da embarcação com esforço corpóreo.

Ainda, a longa permanência com um mesmo grupo e em um espaço restrito muitas vezes acarreta "um desgaste entre as pessoas". Assim, uma pausa é recomendada e a privacidade individual deve ser assegurada em longas campanhas. De todo modo, é importante que a as pessoas que embarcam tenham uma boa saúde física e psicológica. Uma doença detectada pode obrigar um retorno imediato ao porto e um possível atraso ou cancelamento dos trabalhos.

Durante um embarque, especial atenção deve ser dada à alimentação, pois é essencial que a energia dispendida com o esforço físico constante, decorrente das atividades a bordo, seja compensada por uma alimentação equilibrada. Infelizmente, o "mal de mar" (enjoo) não é uma ocorrência rara a bordo, devendo ser objeto de preocupação do chefe científico e do comando do navio, pois há uma tendência à pessoa deixar de se alimentar, o que pode levar a quadros mais agudos. Eventuais ocorrências devem ser levadas ao conhecimento do oficial de saúde de bordo, cujas orientações devem ser ouvidas.

Considerando o exposto, no caso de trabalhos que necessitam de um embarque longo, o cronograma deve prever um período de relaxamento e descanso para a equipe, como assistir um filme, uma conversa informal, um livro ou uma atividade lúdica. Em algumas embarcações é promovido um ou dois dias de confraternização em longas viagens, como uma refeição conjunta, um churrasco ou outra atividade social (Fig. 16).

Em especial, eventos como a travessia do Equador, de um dos trópicos ou dos Círculos Polares são ocasiões muito apropriadas para comemorações, com os novos participantes sendo "batizados" e recebendo um Diploma de Travessia. Tais atividades contrabalançam a pesada rotina de trabalho a bordo, muitas vezes em turnos ou em horários noturnos, 7 dias por semana. Da mesma forma, é importante também a previsão do tempo de recomposição e descanso após o retorno para terra.

**FIGURA 16. Eventos de confraternização a bordo.** *Foto: Elisabete S. Braga.*

### 3.3 Material e equipamentos previstos para uso durante o cruzeiro

Trabalhos realizados nos cruzeiros têm uma característica peculiar: as equipes dispõem **única e exclusivamente do material presente a bordo**. Caso algum material não seja embarcado, sua quantidade não seja suficiente para atender a todo o trabalho previsto, ou um dano ocorra a um equipamento, sem possibilidade de reparo a bordo, devido à não disponibilidade de sobressalentes, só cabem duas alternativas: não realizar a atividade ou retornar ao porto ou cais para reparo de algum equipamento ou complementar o material embarcado, levando ao um prejuízo de tempo e nos custos da operação. Desta forma, o preparo do material e dos equipamentos, bem como o respectivo "*check list*" deve ser feito com muito cuidado e atenção.

Assim, o cuidado em estabelecer a relação de equipamentos e material de consumo para pesquisa a ser embarcado e a verificação do estado de funcionamento dos equipamentos instalados no navio que serão utilizados, é essencial. Também, sempre que possível, procura-se embarcar equipamentos sobressalentes, material de reparo, peças de reposição e material de consumo de reserva, permitindo atender a imprevistos e até mesmo oferecendo a oportunidade de realização de maior número de coletas e análises. A disponibilidade de um conjunto básico de ferramentas para pequenos reparos mecânicos e elétricos é de grande valia, sem contar a presença de profissionais especializados para auxiliar nos reparos à bordo.

Infelizmente, não pode ser evitado que pequenas peças caiam no mar ou cabos se rompam, implicando na eventual perda de equipamentos no mar, correspondendo a um prejuízo duplo: "a perda e a poluição". Em função dos cuidados com adequada preparação do material e suprimento de peças e equipamentos sobressalentes, os problemas ocasionados por estes tipos de acidentes podem ser de baixa significância ou podem levar ao retorno da embarcação para terra e ao encerramento da pesquisa.

#### Planejamento e preparação

Com relação a equipamentos científicos, é imprescindível que instrumentos de medida e coletores de amostras, sempre que possível, sejam preparados (em especial, que sejam completamente limpos e tenham eventuais baterias substituídas), calibrados e testados em terra, antes do início do cruzeiro.

Realizar estas atividades durante o cruzeiro, com o navio jogando[1], é bem mais difícil e bastante desconfortável, além de ser bem mais complicado solucionar qualquer problema detectado.

Da mesma forma, redes para coleta de organismos (peixes, fitoplâncton, zooplâncton), pegadores de fundo, dragas e testemunhadores devem estar em bom estado. Deve haver um bom planejamento em relação a material para lançamento e manutenção de fundeios, boias e outros equipamentos de longa permanência no mar. Os freezers e câmaras frigoríficas devem estar em bom funcionamento.

Um aspecto de suma importância, mas muitas vezes subestimado, é a necessidade de uma cuidadosa fixação dos equipamentos nas bancadas e outras estruturas do navio, antes do mesmo deixar o porto, como mostrado na Figura 17. O jogo do navio, muitas vezes inesperado e violento, pode causar a movimentação e queda de equipamentos inadequadamente fixados, frequentemente danificando-os irreparavelmente.

[1] Jogo - termo náutico significando a movimentação oscilatória do navio causada principalmente por ondas ("balanço").

**FIGURA 17.** **Exemplo de fixação de equipamentos em uma bancada no navio, com o uso de cabos sintéticos e extensores elásticos.** *Foto: Luiz Vianna Nonnato.*

### 3.4 Treinamento da equipe para embarque

O embarque de pessoal com experiência em trabalhos a bordo e capacitado a operar os equipamentos a serem utilizados durante o levantamento é um fator que colabora marcantemente para o bom desenvolvimento dos trabalhos. Da mesma forma, a periódica reciclagem e treinamento dos tripulantes da embarcação, a cargo dos empregadores e dos comandantes e mestres, é essencial para a segurança e eficiência dos trabalhos a bordo. Assim, a familiarização prévia de toda a equipe com os equipamentos e a adoção de protocolos adequados de coleta de dados é extremamente importante.

Paralelamente, deve-se levar em conta que uma das atividades mais relevantes na quase totalidade dos cruzeiros oceanográficos é o treinamento e embarque de iniciantes, sejam eles alunos, técnicos ou pesquisadores (Fig. 18). O acompanhamento das atividades de levantamento é uma ótima oportunidade para novos pesquisadores familiarizarem-se com os procedimentos práticos de campo, mas é importante que tal atividade não impacte negativamente o desenvolvimento dos trabalhos.

**FIGURA 18.** **Treinamento de novos pesquisadores.** *Foto: Elisabete S. Braga.*

### 3.5 Segurança do trabalho a bordo das embarcações

A manipulação de equipamentos volumosos e pesados em um navio em constante oscilação, frequentemente em condições adversas (chuva, convés escorregadio, visibilidade limitada durante a noite, entre outras), implica em probabilidade não desprezível de ocorrência de acidentes. Assim, é imprescindível que todos os cuidados possíveis sejam tomados para minimizar estes riscos.

Estes cuidados devem visar, na escala de prioridades apresentada, os seguintes aspectos:

- Segurança do pessoal;
- Segurança dos equipamentos; e
- Qualidade dos dados ou amostras coletados.

Indiscutivelmente, **a segurança das pessoas envolvidas nos trabalhos deve ser a preocupação primordial de toda a equipe**. Os recursos para atendimento médico a bordo, mesmo que o navio disponha de médico ou enfermeiro, são extremamente limitados. Dependendo do local onde o navio esteja trabalhando, o atendimento adequado às pessoas gravemente acidentadas pode só ser possível após vários dias de navegação.

Com o objetivo de aumentar a efetividade de um eventual atendimento médico a bordo, dados de saúde de cada embarcado devem ser requisitados antes do cruzeiro, permitindo o aprovisionamento de medicamentos básicos na enfermaria e fornecendo ao enfermeiro ou médico de bordo (ou o tripulante responsável pelo atendimento de primeiros socorros, em caso de indisponibilidade de um profissional médico), informações importantes para um eficiente atendimento. Deve-se notar que boa parte das embarcações oceanográficas possuem procedimentos de contingência para casos de urgência, valendo-se principalmente da estrutura de apoio suprida pela Marinha do Brasil (ou de outras organizações, caso navegue em regiões fora da jurisdição brasileira).

#### Equipamentos de segurança e treinamento

Em relação às atividades de pesquisa a bordo, diversas providências simples devem ser adotadas para minimizar o risco de acidentes e agravamento de estado de saúde. O uso de equipamentos de proteção individual - EPI (colete salva-vidas, capacete, luvas, óculos de proteção, calçados reforçados e fechados, entre outros) deve ser obrigatório, assim como a participação em exercícios de segurança, incêndio e abandono de embarcação (visando a familiarização de todos com os procedimentos a serem adotados em uma situação crítica).

É importante que haja uma organização adequada durante a operação de equipamentos pesados, de modo a restringir o acesso no entorno ao mínimo de pessoas necessárias para a execução do serviço. Muitas vezes o rompimento de um cabo pode "chicotear", representando um perigo de acidente sério. De toda forma, o trabalho externo, na popa, proa ou convés da embarcação deve ser feito por um mínimo de duas pessoas, para que no caso de uma delas se acidentar (num caso extremo, cair no mar), haja sinalização imediata para que o grupo rapidamente tome as medidas necessárias. A supervisão das condições de segurança durante estes trabalhos está normalmente a cargo dos oficiais de navegação do navio, que se valem de sistemas de câmera e comunicação entre os diversos setores do navio (caso disponíveis) para monitoramento dos trabalhos.

**FIGURA 19.** Garantir condições adequadas de segurança deve ser uma preocupação permanente em campanhas oceanográficas. *Fotos: Luiz Vianna Nonnato.*

Mantida a segurança dos membros da equipe, deve-se procurar reduzir ao máximo a possibilidade de ocorrência de danos aos equipamentos de pesquisa. Um dos grandes fatores de avaria nos equipamentos é sua manipulação incorreta no convés da embarcação e acidentes com os cabos de lançamento ao mar; os equipamentos devem ser manipulados por pessoas experientes, com cuidado e calma.

Também, no caso de equipamentos que são colocados na água, como perfiladores, amostradores de água, redes e outros, um fator de acidente ou até de perda do equipamento é o mau estado de cabos e ferragens; este material deve ser vistoriado periodicamente para identificação de eventuais danos e pontos de corrosão ou desgaste, que possam comprometer sua resistência. Finalmente, um importante fator de danos aos equipamentos é a sua utilização em condições de mar (vento e ondas) inadequadas; para evitar tal problema, é fundamental o bom senso do pesquisador quanto à avaliação da viabilidade de execução ou não de um específico trabalho, em função das condições atmosféricas e estado do mar.

Estando confirmada a segurança da equipe e dos equipamentos, é importante tomar-se todos os cuidados necessários para a obtenção de dados ou amostras de alta qualidade. Para isto, é necessário que os protocolos de execução dos diversos trabalhos sejam adequados e que a equipe científica esteja capacitada a executá-los.

Os equipamentos devem estar em perfeitas condições de operação (recomenda-se que os equipamentos sejam limpos e revisados periodicamente durante o cruzeiro). As operações de coleta de dados e amostras devem ser realizadas de forma adequada e em condições de mar compatíveis.

Também, os dados e amostras devem ser verificados após cada operação de coleta (e não só ao fim do cruzeiro), de forma que qualquer anormalidade de operação do equipamentos possa ser identificada e sanada sem comprometer as operações subsequentes. Um cuidado especial deve ser tomado em relação a equipamentos eletrônicos de medição, que armazenam dados em forma digital; uma vez recuperados do instrumento, os dados devem ser replicados e copiados para diferentes elementos de armazenamento (pen drives, disco rígido, etc.), de forma a evitar transtornos devidos a falha ou perda de um dos elementos de armazenamento.

## 4. Conclusão

Sintetizando, diante das diversas considerações apresentadas sobre a obtenção de informações oceanográficas, constata-se que há necessidade de uso de um equipamento muito importante e de alto custo de operação e manutenção, **a embarcação de pesquisa**. Sendo a Oceanografia uma ciência multidisciplinar, que aborda os oceanos sob aspectos físicos, químicos, geológicos, biológicos e meteorológicos, também necessita do envolvimento de pesquisadores com formação não só em oceanografia, mas também em diversas outras áreas da ciência, além de tripulação especializada, técnicos e alunos. Além disso há necessidade de um importante investimento de recursos financeiros para a realização da pesquisa e de todas as análises a bordo e em terra, em diferentes laboratórios (eventualmente, em outros países).

Como conclusão, é importante mencionar-se que um levantamento de dados oceanográficos bem planejado e executado gera conhecimento, forma recursos humanos, contribui com a sociedade e engrandece a participação da comunidade científica nas grandes decisões de gestão de recursos naturais, proteção ambiental e sustentabilidade dos oceanos.

*"O instrumento de trabalho fundamental para qualquer instituição que se empenha em pesquisar o mar com finalidades práticas ou científicas é uma embarcação especialmente planejada e equipada para este fim: o navio oceanográfico"*

**Prof. Wladimir Besnard, 1959**

## SITES RECOMENDADOS

Embarcações IOUSP: <http://www.io.usp.br/index.php/embarcacoes/apresentacao.html>

Embarcações Marinha do Brasil: <https://www.marinha.mil.br/meios-navais>

Embarcações e equipamentos WHOI: <https://www.whoi.edu/what-we-do/explore/>

## Referências Bibliográficas

CALAZANS, D. (org). 2011. Estudos Oceanográficos: do instrumental ao prático. ed. Pelotas.

GARRISON, T. 2016. Uma História das Ciências. As navegações e viagens marítimas. in Fundamentos de Oceanografia ,Cengage Learning. p:25-49.

# ATUAÇÃO DO OCEANÓGRAFO

*Foto: Bruno Coelho*

NOÇÕES DE OCEANOGRAFIA

*Capítulo 36*

# USO E CONSERVAÇÃO DO OCEANO: PARA ALÉM DO QUE SE VÊ

*Briana Bombana, Natalia de Miranda Grilli, Luciana Yokoyama Xavier, Leandra Regina Gonçalves, Marcus Polette & Alexander Turra*

REVISÃO: LUIZ VIANNA NONNATO

CITAÇÃO SUGERIDA: BOMBANA, Briana et al. Uso e conservação do oceano: para além do que se vê. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 36: p. 819-845.

# Uso e Conservação do Oceano: Para Além do que se Vê

*Briana Bombana, Natalia de Miranda Grilli, Luciana Yokoyama Xavier, Leandra Regina Gonçalves, Marcus Polette & Alexander Turra*

## 1. Introdução

O oceano[1] e os mares[2] influenciam e são influenciados diariamente pelas atividades humanas. Essa inter-relação é observada em exemplos cotidianos que permeiam assuntos tão diversos como a meteorologia, medicina, economia, política e alimentação. Em muitos casos, ela ocorre até mesmo onde a população humana se encontra a quilômetros de distância desses corpos de água salgada. Para citar um exemplo, a integração e a coordenação para a apresentação do conteúdo deste capítulo foram realizadas totalmente por meio da internet, a qual depende em 99% de conexões estabelecidas por cabos submarinos que cruzam o assoalho marinho de ponta a ponta, unindo o Brasil a outras regiões do planeta.

### Por que não temos desertos no Brasil?

Tanto no Hemisfério Sul como no Norte do globo terrestre, entre os paralelos das latitudes de 20° a 40°, percebe-se áreas de climas muito secos, por vezes desérticos, como é o Deserto de Kalahari na África. No caso brasileiro, isso não ocorre[3], e a resposta começa lá no oceano.

Uma equipe de pesquisadores, liderada pelo professor Antônio Donato Nobre e o ambientalista Gerard Moss, descobriu um sistema denominado "Rios Voadores". Nele, a água evaporada do Oceano Atlântico se desloca para o continente, cai como chuva sobre a mata e é absorvida pelas árvores da Floresta Amazônica (região Norte do Brasil). A Amazônia, portanto, funciona como uma bomba d'água ao puxar para o interior a umidade evaporada do oceano. Depois, com a evapotranspiração dessa mesma água pela vegetação da floresta, ela volta à atmosfera e é transportada pelos ventos às regiões mais ao sul do país. Quando precipita, a chuva oriunda dessas correntes - que conformam os Rios Voadores - alimenta as lavouras, rios e represas do Centro-Oeste, Sul e Sudeste brasileiro. Os "Rios Voadores" são essenciais para a economia brasileira, pois abastecem de água regiões, responsáveis por grande parte do Produto Interno Bruto do Brasil. Ou seja, o papel conjugado do oceano e da Floresta Amazônica fazem com que tenhamos no Brasil um clima que possibilita a agropecuária e a produção de alimentos para o país e para o mundo.

[1] Embora os livros clássicos de geografia falem de diferentes oceanos, como o Atlântico e o Pacífico, essas divisões correspondem a critérios geopolíticos, dado que o oceano é um sistema integrado de circulação de energia, matéria e organismos, do ponto de vista oceanográfico. Assim, o movimento pela alfabetização ou cultura oceânica (do inglês, *Ocean Literacy*) propõe que se adote e divulgue a ideia de um único oceano global, como será visto neste capítulo, no qual empregamos o termo "oceano" (sem o "s"). Cabe destacar também que este é definido como o corpo de água salgada de grandes dimensões que circunda os continentes. É o principal reservatório de água da superfície do planeta, abrangendo por volta de 70% da mesma e contendo aproximadamente 97% da água existente. A sua profundidade média está calculada em cerca de 4.000m.

[2] Entendemos por mar o corpo de água salgada que, geralmente, conecta-se com o oceano e apresenta uma menor dimensão quando comparada com este último. Devido à circulação limitada entre ambos, mar e oceano, normalmente, o primeiro exibe características oceanográficas diferentes deste. Esse é o caso do Mar Mediterrâneo, por exemplo.

[3] O sertão nordestino não é um exemplo de deserto subtropical. Ele se localiza em latitudes menores que 20º, é caracterizado como semidesértico e difere de outras regiões similares por ser circundado por áreas que apresentam uma umidade média significativamente mais alta.

Apesar da importância central do oceano e dos mares no nosso dia-a-dia, pode-se dizer que o nosso entendimento sobre esse complexo sistema aquático é ainda muito deficiente. De forma geral, a sociedade desconhece a real importância de mantê-los saudáveis para a presente e as futuras gerações, bem como os meios para fazê-lo. Também, a sociedade que vive distante do mar ainda não consegue compreender a relevância que o litoral tem em suas vidas, e em especial em sua qualidade de vida e bem-estar.

Dois dos desafios das "ciências para o mar"[4] , como a Oceanografia, são justamente aprofundar e divulgar esse conhecimento. Foi pensando nisso que, nas próximas páginas, aprofundaremos o entendimento da importância do oceano e dos mares, definindo alguns dos conceitos mais relevantes relacionados à temática. Isto é, apresentaremos os serviços ecossistêmicos providos pelo oceano, os usos e impactos humanos no contexto do Antropoceno e as opções ou caminhos para o uso sustentável. Trataremos também dos principais arranjos institucionais, ações e ferramentas para a governança e a gestão do oceano, dos mares e das zonas costeiras[5], tendo como foco o Brasil. Dessa forma, pretendemos que a informação apresentada, embora não exaustiva, seja útil não somente para expandir a visão sobre a importância do ambiente marinho, mas também para servir como estímulo para ações individuais e coletivas em prol da conservação marinha e costeira.

## 2. Importância e serviços ecossistêmicos

Vocês já imaginaram ou experimentaram a conexão com o mar ao pisar na areia da praia e colocar os pés à disposição do ir e vir das ondas? Ao admirar a imensidão daquela paisagem azul, ao mesmo tempo em que sentem o calor de um dia quente de verão ser atenuado pela brisa que vem do oceano? Vocês têm alguma memória infantil de montar castelinhos na areia ou das histórias contadas por seus pais, tios, tias, avôs e avós sobre a relação deles com o mar? Ou de viajar para o litoral com a família e amigos? Pois bem, todas essas sensações - a conexão espiritual, o lazer e a recreação, o desfrute da beleza cênica e a regulação local do clima - tratam de serviços que a natureza fornece para a humanidade. Em outras palavras, estão relacionadas aos serviços ecossistêmicos (SE), que são os benefícios que as pessoas obtêm dos ecossistemas (MEA, 2005).

Embora criticado por apresentar uma visão utilitarista da natureza, o conceito de SE destaca a relação de dependência vital que a humanidade estabelece com os diversos ecossistemas para a garantia do seu bem-estar. Especialmente, entender que a natureza apresenta limitações no seu “estoque” e na sua capacidade de produzir e fornecer SE (Costanza & Daly, 1992; Norgaard, 1994) nos faz perceber que a conservação dos ecossistemas é ação essencial para evitar ameaças à própria existência humana. Por exemplo, estima-se que 90% dos grandes predadores marinhos já foram removidos de todos os mares pela pesca desordenada, estando algumas dessas espécies em colapso (Steffen *et al.*, 2015).

Assim, o conceito de SE ajuda a enfatizar a necessidade de se conservar a natureza para a nossa sobrevivência no planeta. Ele confronta o modelo hegemônico focado no crescimento econômico e traz a discussão sobre sustentabilidade para o centro do debate sobre os tipos de desenvolvimento humano possíveis ou desejáveis (Gómez-Baggethun *et al.*, 2010). Afinal, dentre os benefícios que podemos extrair

[4] Aqui usamos o termo "ciência para o mar" ao invés de "ciência do mar", conforme proposto pelo Dr. Ariel Troisi, presidente da Comissão Oceanográfica Intergovernamental (COI) da UNESCO, para indicar todos os tipos de conhecimento que são relevantes para a promoção de seu uso sustentável, incluindo as ciências que tradicionalmente estudam o oceano, como a Oceanografia.

[5] Áreas nas quais os processos ocorrentes em terra e mar se encontram e se inter-relacionam, especialmente na margem terrestre-marinha. As fronteiras desse espaço variam de acordo com as características físicas locais e regionais, bem como de acordo com as atividades humanas aí desempenhadas, o contexto legal-institucional correspondente etc.

da natureza, existem diversas dimensões do bem-estar humano, desde necessidades básicas até necessidades econômicas, do meio-ambiente e relacionadas com a felicidade subjetiva (Summers *et al.*, 2012).

De maneira geral, os SE podem ser classificados em quatro tipos (MEA, 2005, Fig. 1):

1. **Provisão:** bens e produtos essenciais para a vida humana, como a água doce, a alimentação, os combustíveis, e recursos vivos;

2. **Regulação e manutenção:** benefícios obtidos da regulação de processos dos ecossistemas, como o controle do clima, proteção costeira, purificação da água e do ar;

3. **Culturais:** benefícios não materiais, tais como, recreação, turismo, e valores espirituais;

4. **Suporte:** benefícios necessários para a produção de outros, como a ciclagem de nutrientes, e a formação do solo.

Tendo em vista que o oceano ocupa cerca de 70% da superfície terrestre e se distribui por todas as latitudes do planeta, são inúmeros os benefícios que ele proporciona.

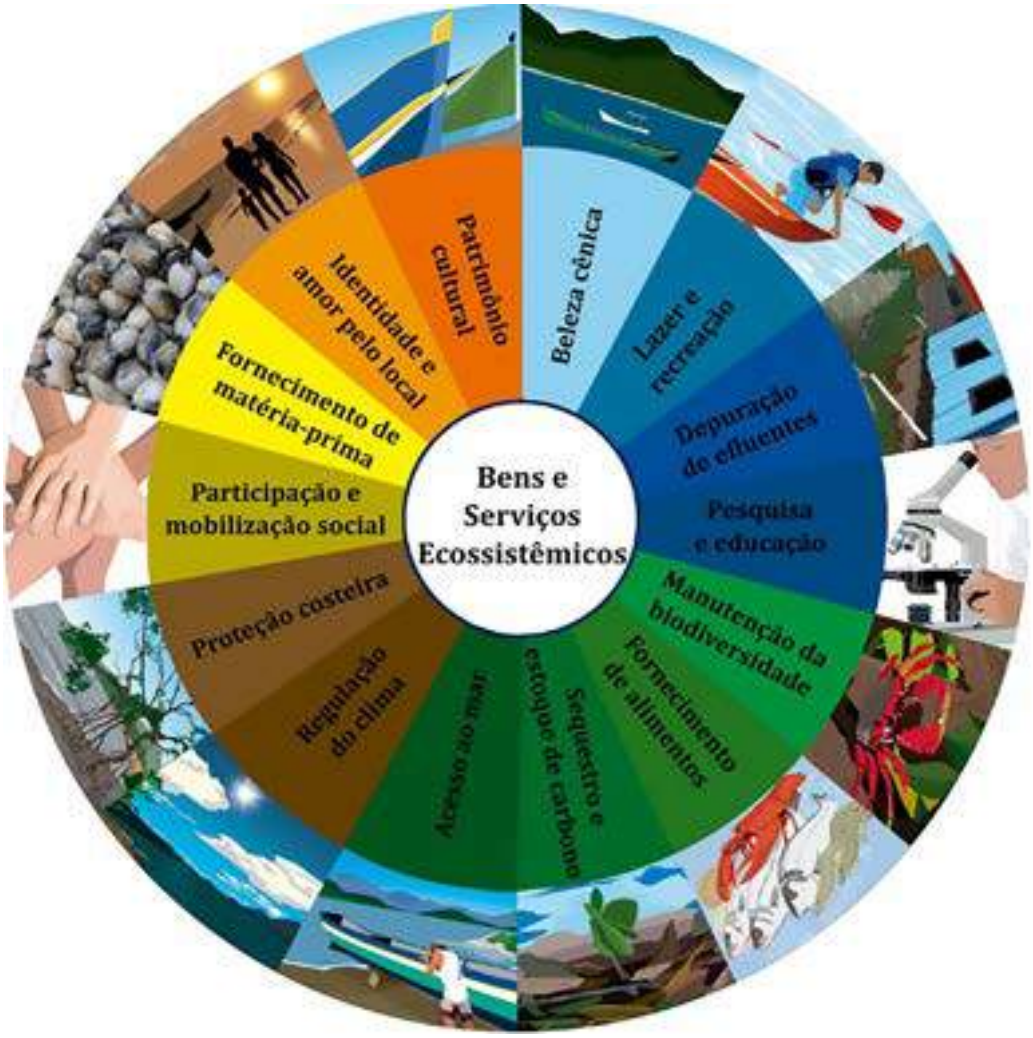



**FIGURA 1.** Exemplos de bens e serviços fornecidos pelos ecossistemas marinho-costeiros. Suporte: Manutenção da biodiversidade; Provisão: Fornecimento de alimentos, Fornecimento de matéria-prima; Regulação: Depuração de efluentes, Sequestro e estoque de carbono, Regulação do clima, Proteção costeira; Cultural: Beleza cênica, Lazer e recreação, Pesquisa e educação, Participação e mobilização social, Identidade e amor pelo local, Patrimônio cultural, Acesso ao mar. *Fonte: Xavier et al. (2016).*

Vale acrescentar que adotamos neste capítulo a nomenclatura e conceitos apresentados pela Avaliação Ecossistêmica do Milênio (do inglês, *Millennium Ecosystem Assessment* - MEA, 2005), uma vez que a mesma é a mais difundida e utilizada ainda nos dias de hoje. No entanto, outras abordagens vêm emergindo mais recentemente, devido a algumas inconsistências no esquema mencionado, como a classificação da água doce e da alimentação como serviços de provisão, enquanto o ar limpo não é assim considerado (Raffaelli & White, 2013).

## Quanto vale uma gota no oceano?

A valoração dos serviços ecossistêmicos é uma técnica utilizada para destacar e avaliar sua importância relativa em determinado contexto socioeconômico. Quanto maior a importância que a sociedade atribui a um determinado serviço ou ecossistema, maior o seu valor. A valoração pode ser não monetária (qualifica a importância sem atribuir valor econômico) ou monetária (atribuição de valor econômico) (por exemplo, Fig. 2). Esta última tem sido largamente difundida (Gómez-Baggethun *et al.*, 2010), uma vez que confirma a nossa dependência dos SE, apesar dos seus valores ficarem sujeitos a lógicas de mercado e à métrica monetária e poderem ser fortemente questionados.

**FIGURA 2.** Somente em 2007, os turistas deixaram US$11 bilhões para a cidade de Miami Beach (Flórida, EUA) que, embora conte com outros pontos turísticos, tem na praia que leva o mesmo nome, a sua principal atração. *Foto: Briana Bombana*.

Em um estudo intitulado "A importância ecológica, econômica e social do oceano", o economista ecológico Robert Costanza relacionou o bem-estar humano aos SE do oceano e estimou um valor aproximado de US$21 trilhões ao ano (comparado com o valor de todos os bens e serviços produzidos no mundo, de US$ 25 trilhões em 1999), representando aproximadamente 60% do valor econômico total da biosfera, que é estimado em US$35 trilhões (Costanza, 1999).

Além de facilitar o entendimento da importância dos ecossistemas, a valoração monetária pode ser utilizada para orientar os pagamentos por serviços ecossistêmicos (ou ambientais). Essa prática expandiu-se particularmente no Sul Global[6] uma vez que foi instituído o mecanismo de pagamento de compensações econômicas por parte dos países ricos aos países pobres que combatem o desmatamento ou a degradação de ambientes que sequestram e/ou estocam carbono, como manguezais, marismas e bancos de rodolitos, por meio do Programa Colaborativo das Nações Unidas para a Redução de Emissões do Desmatamento e Degradação de Florestas (Farrell, 2012).

[6] De acordo com o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), o "Sul Global" refere-se aos países em desenvolvimento considerando que todos os países industrialmente desenvolvidos do mundo (com exceção de Austrália e Nova Zelândia) ficam ao norte dos países em desenvolvimento (para referência adicional, consultar: <https: //kups.ub.uni- koeln.de/6399/1/voices012015_concepts_of_the_global_south.pdf>).

Alguns exemplos dessas novas abordagens são o projeto Economia dos Ecossistemas e Biodiversidade (TEEB) que enfatiza os benefícios monetários oriundos da natureza (TEEB, 2008); a Classificação Internacional Comum de Serviços Ecossistêmicos (CICES) que distingue entre a estrutura, processos, serviços, benefícios e valores dos ecossistemas e destaca a influência do componente social no capital natural (Haines-Young & Potschi, 2018); e, a Plataforma Intergovernamental sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos (IPBES) que utiliza a nomenclatura "contribuição da natureza para as pessoas" para destacar, de forma mais ampla, o valor intrínseco da natureza, a conexão direta entre a natureza e a boa qualidade de vida e a necessidade de incluir visões tradicionais sobre relações Natureza-Humanidade (por exemplo, visões tradicionais e indígenas sobre a natureza) na tomada de decisão (Pascual *et al*., 2017).

Nos próximos anos o conceito de SE, seus arcabouços e abordagens serão, sem dúvida, ajustados e mais difundidos e aplicados por diferentes áreas do conhecimento e setores de gestão, facilitando a transdisciplinaridade e o diálogo entre a ciência, incluindo a Oceanografia, e a tomada de decisão.

## 3. Usos e impactos no Antropoceno

Conquanto a inegável importância do oceano para o ser humano, o relacionamento oceano-sociedade pode representar uma ameaça ao mesmo. Desde a Revolução Industrial, no final do século XVIII, as mudanças acarretadas pelas atividades humanas têm sido mais rápidas, complexas e intensas, alcançando uma escala planetária, como jamais havia sido imaginado antes.

Com a incorporação de novas formas de apropriação do território, a diversificação dos setores econômicos e a aplicação da tecnociência, atividades como a urbanização e a produção de bens materiais pressionam e alteram o estado de ambientes naturais e impactam o bem-estar de milhões de pessoas que dependem de seus SE.

No início do presente século, o químico holandês Paul Josef Crutzen, sugeriu que estaríamos vivendo uma nova época geológica: o Antropoceno.

> "*Estava num congresso em que alguém se referiu ao Holoceno, a longa época de clima relativamente estável que se seguiu à última era glaciar. Logo me dei conta de que aquilo era um erro. O mundo mudou tanto que eu afirmei "Não, estamos no Antropoceno". Inventei a palavra, estimulado pelo debate. Todos ficaram estupefatos. Mas parece que concordaram*". Crutzen em fala durante o Colóquio do Programa Internacional Geosfera - Biosfera, realizado em fevereiro de 2000 em Cuernavaca, México.

Logo depois, em coautoria com Eugene Stoermer, Crutzen publicou um artigo (Crutzen & Stoermer, 2000) no qual afirmaram que vivíamos no Holoceno, época geológica pós-glacial (últimos 10-12 milênios), durante o qual a evolução dos seres humanos foi impressionante, mas ainda com impactos de menor magnitude. Inicialmente, como caçadores-coletores reunidos em pequenos grupos e que utilizavam o fogo, os humanos progrediram na manufatura de ferramentas que auxiliassem na caça, na domesticação de animais e na produção de alimentos, produzindo emissões de $CO_2$ que, quando comparadas com o período Pré-revolução Industrial, são consideradas mínimas. Mesmo modificando os ecossistemas costeiros e terrestres, os seus impactos permaneceram em grande parte locais e transitórios, dentro dos limites da variabilidade natural dos ambientes.

## Paul Josef Crutzen

Nascido em 1933 em Amsterdã, Paul Josef Crutzen estudou engenharia antes de se voltar para as ciências atmosféricas. Suas especialidades de pesquisa incluem o buraco na camada de ozônio, inverno nuclear e mudanças ambientais globais. Na década de 1970, Crutzen descobriu que certas substâncias causam danos à camada de ozônio. Ele fez campanha pela proibição mundial de todas as substâncias perigosas para a atmosfera que envolve a Terra. O Protocolo de Montreal - o tratado ambiental internacional de maior sucesso até hoje - também é, em grande parte, o resultado de seus esforços.

Crutzen e seus colegas, Mario J. Molina e Frank S. Rowland, receberam o Prêmio Nobel de Química em 1995 em reconhecimento por seus trabalhos na proteção da camada de ozônio. Crutzen faleceu em Janeiro de 2021, mas deixou um enorme legado sobre a importância de controlarmos os impactos dos seres humanos no planeta. *Fonte das informações e foto: Environmental and Society Portal*.

Mais tarde, as grandes navegações dos séculos XV e XVI marcaram o início de práticas coloniais ao longo do Globo baseadas, de forma geral, na apropriação de recursos, estando muitas delas vigentes até os dias atuais. A partir da Revolução Industrial, em meados do séc. XVIII, essa ação humana sobre o planeta foi potencializada, acarretando em mudanças de natureza geológica e morfológica. Assim, pode-se observar o aumento dos níveis de concentração de dióxido de carbono e metano na atmosfera, e de materiais particulados (ex., carbono negro e microplásticos) e substâncias químicas (ex., metais pesados e derivados de petróleo) em rochas sedimentares no mar. Estas alterações de escala planetária fizeram com que ingressássemos no Antropoceno (Crutzen, 2002; 2006), o qual pode ser atualmente dividido em três estágios principais:

1. **Meados de 1800 até 1945:** Estágio marcado pela industrialização e utilização de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás. O resultado da queima de combustíveis fósseis, o uso de fertilizantes na agricultura, a criação intensiva de gado, as alterações de uso e ocupação do solo e consequente desmatamento aumentaram os gases do efeito estufa substancialmente na atmosfera, alterando os padrões das chuvas, provocando aumentos de temperatura e aumentando o nível dos mares.

2. **A Grande Aceleração, entre os anos de 1945 (pós-II Guerra Mundial) e 2015:** Nesse estágio, a população mundial praticamente dobrou com intenso desenvolvimento econômico e amplo fluxo de capitais e comércio ao longo do planeta. As áreas costeiras tiveram seu maior aporte populacional e migratório com intensas alterações na estrutura e funcionamento dos seus principais ecossistemas e a atividade pesqueira experimentou seu período de maior explotação. O aumento do consumo de petróleo, a aceleração do processo de urbanização e o advento de novas tecnologias foram fatores decisivos para grandes transformações planetárias e impactos de todas as magnitudes.

3. **Desde meados de 2015 à atualidade:** Existe uma crescente consciência do impacto humano sobre o ambiente em escala global e as primeiras iniciativas de construir governança global e sistemas capazes de gerenciar essa relação entre a humanidade com os sistemas terrestre,

costeiro e marinho, por meio de convenções internacionais. No entanto, esses movimentos têm sido insuficientes, e em alguns países as políticas públicas têm seu direcionamento oposto ao que seria necessário para a busca da sustentabilidade. As emissões de $CO_2$ continuam a aumentar, intensificando o declínio da biodiversidade e o comprometimento dos SE providos no planeta Terra (Steffen *et al.*, *in press*).

Em resumo, na presente época, além do intenso avanço dos mais diversos setores econômicos, a humanidade teve sua população incrementada em bilhões de habitantes, a Terra se converteu em um planeta urbano, com um imprevisto e deliberado uso de recursos naturais renováveis e não-renováveis como jamais ocorreu. Embora alicerçada em diferenças assimétricas entre países, regiões, povos e classes sociais, uma profunda alteração resultante dessa relação Natureza-Humanidade é observada de forma ampla pelo planeta, cujos impactos ambientais são diariamente percebidos por todos nós, fermentando discussões sobre uma governança global.

## 3.1 Usos e impactos no oceano, mares e zonas costeiras

Quando olhamos especificamente para o oceano, percebemos que os impactos das atividades humanas já estão presentes em todas as suas partes e vêm aumentando ao longo do tempo (Halpern *et al.*, 2019) (Fig. 3). Todas as atividades, especialmente aquelas realizadas diretamente no oceano, têm o potencial de afetar suas características físicas e biológicas e, consequentemente, seus SE. Em 2019, a chegada de toneladas de petróleo às praias brasileiras chamou atenção para os riscos associados à exploração e transporte de petróleo em alto mar e a um ineficiente sistema de governança e gestão.

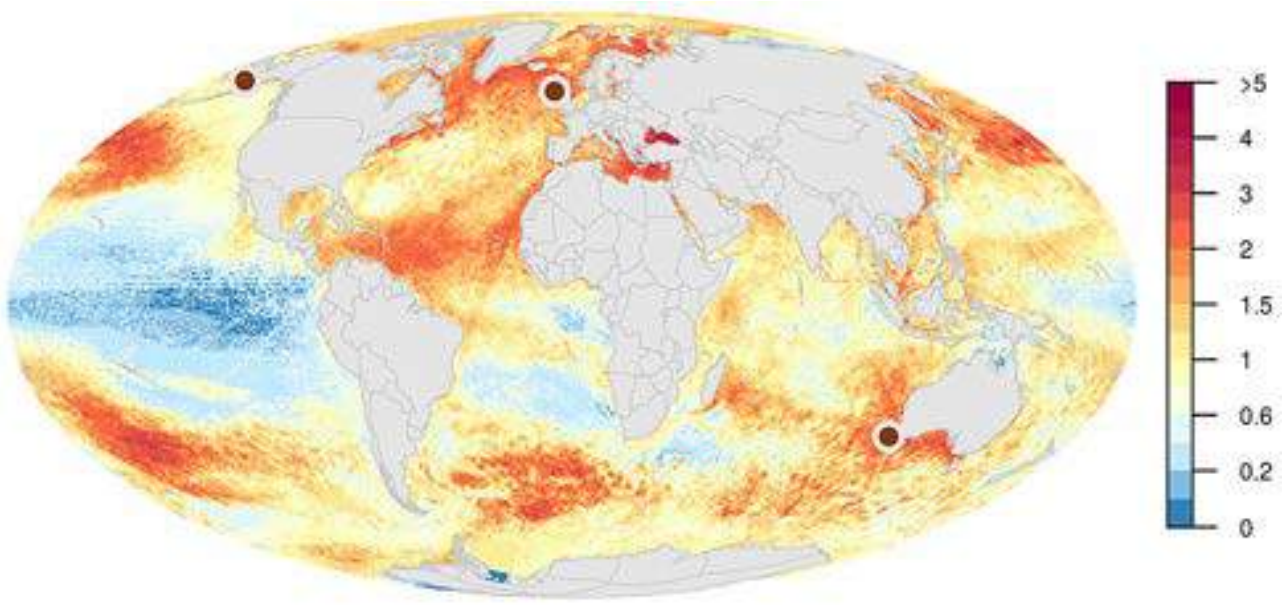



**FIGURA 3.** O impacto cumulativo das atividades humanas afeta todo o oceano. A escala à direita do mapa, embora sem unidade, indica que quanto mais próximo de 0 o impacto cumulativo diminui e quanto mais próximo de 5 aumenta. Assim, é possível observar que há poucas áreas onde o impacto cumulativo é mínimo - como a região equatorial do Pacífico, e muitas áreas onde o impacto se aproxima de valores mais altos, de 3 a 5. Sugerimos desconsiderar os três pontos castanho-avermelhados no mapa, dado que se referem à informação apresentada na figura original, não relevante para o presente texto. *Fonte: Halpern et al., 2019*.

## Uma economia sustentável para o oceano

Apesar dos debates sobre a sua adequação e de não haver uma única definição, o conceito de "Economia Azul", "Crescimento Azul" ou "Economia do Mar" propõe uma nova abordagem para as atividades e políticas de exploração do espaço e recursos marinhos. A proposta visa a promoção de um oceano resiliente, inclusivo e sustentável, cujos benefícios possam ser compartilhados por todos em uma longa escala de tempo. Ela convida governos, empresas e cidadãos a repensar a relação com o mar e iniciar um movimento de transformação das práticas dominantes.

Não basta uma atividade ser desenvolvida no oceano para ser considerada parte da Economia Azul. Alguns princípios desse tipo de economia incluem (WWF, 2015):

- Gerar benefícios sociais e econômicos para as gerações atuais e futuras;
- Restaurar, proteger e manter a diversidade, produtividade, resiliência, funções e valor intrínseco dos ecossistemas marinhos;
- Ser baseada em tecnologias limpas, energia renovável e processos de economia circular que reduzam a geração de resíduo e promovam a reutilização de materiais.

Assim, a Economia Azul não deve reproduzir as injustiças socioambientais resultantes da economia linear predominante atualmente (Fig. 4). Ela deve ser um gerador de capital por meio de atividades que respeitem igualdade e justiça entre os múltiplos atores[7] envolvidos, e a saúde do ambiente marinho (Bennet *et al.*, 2021).

**FIGURA 4.** Múltiplos aspectos da Economia Azul que considera igualdade e respeito socioambiental. *Fonte: retirada e adaptada de Bennet et al. (2021).*

Além das atividades diretamente relacionadas ao mar e à zona costeira, a conexão do oceano a corpos de água dos continentes também expõe esse sistema a impactos de atividades terrestres. O caso do rompimento da barragem de minério do município de Mariana, em Minas Gerais, é um exemplo emblemático de como tragédias ambientais do interior dos continentes podem afetar o oceano (Fig. 5). A lama tóxica liberada pela barragem em novembro de 2015 alcançou o Rio Doce e foi transportada por mais de 600 km até atingir o litoral e se espalhar 770 km$^2$ mar adentro. Os reais impactos de tal tragédia para o ecossistema oceânico e para as populações que se beneficiam de seus serviços ecossistêmicos ainda não são inteiramente conhecidos.

**FIGURA 5. Foto de satélite da lama invadindo o mar na data de 16/12/2015.** *Fonte: Wikimedia Commons*.

Acidentes de enormes proporções que afetam o oceano ganham destaque na mídia e mobilizam pessoas e instituições[8] em prol de sua defesa. No entanto, atividades com impactos crônicos, ainda que menos evidentes, são igualmente ou até mais ameaçadoras pois podem passar despercebidos pela sociedade. Por décadas o oceano foi entendido como um sumidouro de capacidade ilimitada. Assim, ele vem recebendo, inadvertidamente, inúmeros resíduos das atividades humanas que poluem a coluna d'água e o fundo marinho e contaminam os ecossistemas e seus componentes. Cerca de 80% de todo lixo encontrado no mar é proveniente de fontes terrestres, especialmente dos rios e cidades, reforçando aqui a intrínseca conexão entre os ambientes terrestre e marinho. Por exemplo, estima-se que, anualmente, somente o Rio Amazonas transporte toneladas de lixo e poluentes de sua bacia hidrográfica[9] para o oceano (Lebreton *et al.*, 2017).

Para a escala mundial, calculou-se que o oceano recebeu entre 4,8 e 12,7 milhões de toneladas de lixo plástico somente em 2010 (Jambeck *et al.*, 2015), o que equivale a despejar um caminhão de lixo plástico por minuto no mar. Esses resíduos são prejudiciais à saúde dos ecossistemas marinhos e sua biodiversidade, além de impactar negativamente setores econômicos, como a pesca, o turismo e a navegação, além da própria saúde humana.

[7] Aquelas pessoas, grupos ou organizações que afetam/influenciam ou são afetados/influenciados pelos processos de gestão de uma parte do território.

[8] Uma instituição pode ser entendida como uma estrutura/atividade cognitiva, normativa ou regulatória que fornece estabilidade e sentido a um dado comportamento social.

[9] Área delimitada topograficamente, na qual toda a água do seu interior, especialmente àquela oriunda da chuva, é drenada por um sistema de afluentes e/ou um curso d'água (rio principal) até descarregar no ponto mais baixo dessa área (foz do rio).

Além dos impactos da poluição, o oceano também tem sentido os efeitos de ser percebido como uma fonte inesgotável de recursos, os quais são, frequentemente, afetados por práticas predatórias. A sobreexplotação do pescado, por exemplo, tem causado o declínio acentuado de populações das principais espécies comerciais. Dados apontam que, entre 1974 e 2017, a porcentagem de recursos pescada em níveis insustentáveis aumentou de 10% para 34,2% (FAO, 2020).

## O vazamento de óleo na costa brasileira

Em agosto de 2019, um incidente de vazamento de óleo atingiu a costa Nordeste do Brasil afetando algumas das praias mais visitadas e preservadas do país (Fig. 6). Até hoje não se sabe exatamente a causa do vazamento. Estima-se uma contaminação de mais de 2.900 km das áreas litorâneas, o que equivale a aproximadamente ⅓ do litoral de todo o país.

Fontes governamentais, pesquisadores e a sociedade civil afirmaram que esta é a pior crise ambiental no litoral, atingindo mais de 860 localidades e com mais de 7.000 toneladas de óleo já retiradas das praias por grupos locais. Essa quantidade de óleo se refere apenas àquela removida; o volume que permanece no oceano ou em áreas inacessíveis é provavelmente muito maior.

Os principais efeitos ecológicos se referem à mortalidade de mamíferos, tartarugas e aves marinhas, e aos impactos potenciais em ambientes específicos, como estuários, manguezais e marismas. Os impactos socioeconômicos ainda não foram totalmente estimados, mas incluem perda de receita com turismo e pesca, perda de empregos e meios de subsistência e comprometimento da saúde humana.

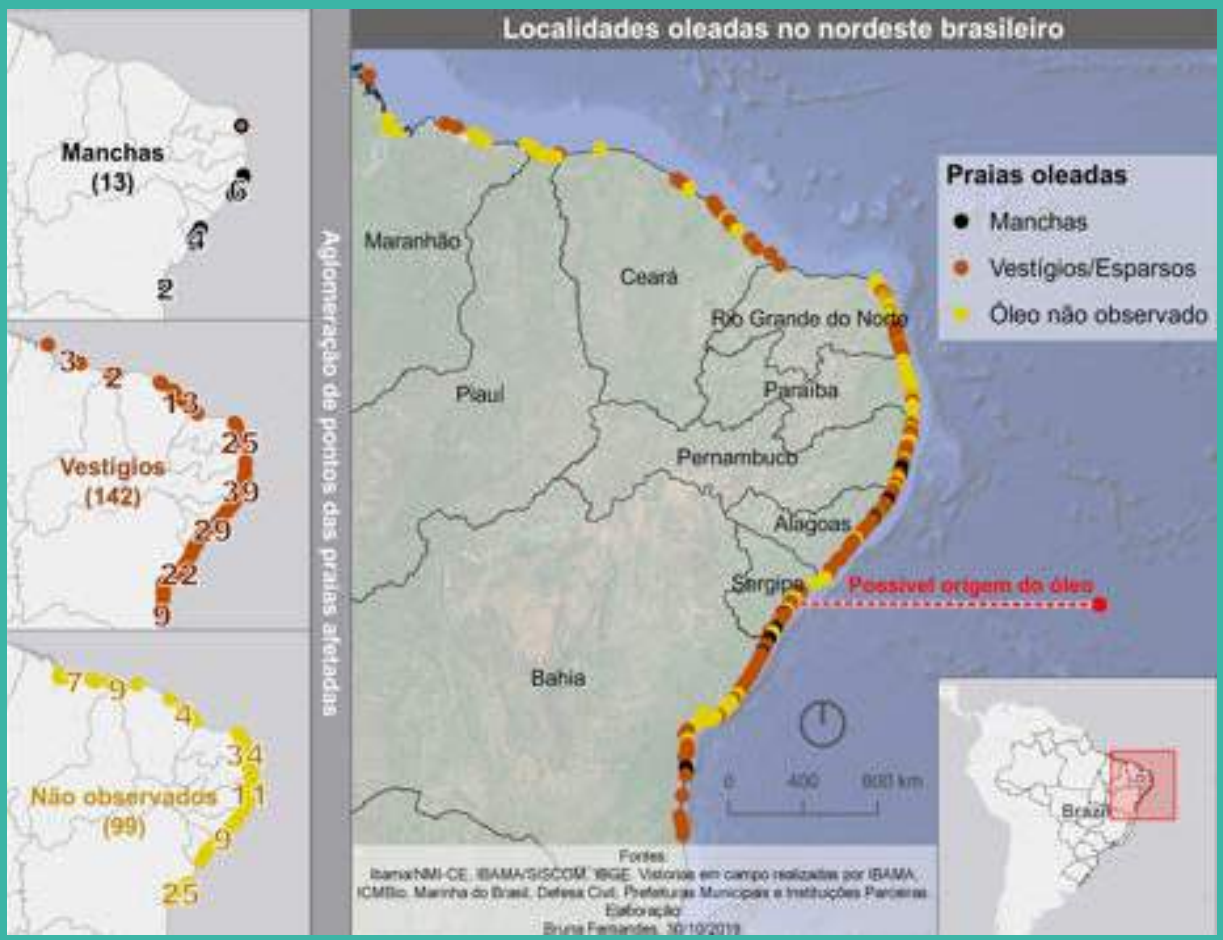



**FIGURA 6.** Localidades com manchas e vestígios de óleo bruto encontradas no Nordeste brasileiro. *Fonte: Gonçalves et al. (2020).*

Não apenas ações humanas diretas impactam o oceano. O grande aumento da concentração de gás carbônico na atmosfera, gerado pelas atividades humanas, indiretamente promove mudanças climáticas que intensificam os impactos negativos no oceano. Este, por sua vez, tem funcionado como um amortecedor global às mudanças climáticas ao absorver parte do calor e do carbono atmosférico. Mais carbono no oceano significa águas mais ácidas.

Além da acidificação, o aumento da temperatura da água é prejudicial às espécies marinhas, especialmente àquelas mais sensíveis e com menor capacidade de movimentação, que não podem migrar para águas mais adequadas a seu desenvolvimento, como os recifes de coral. Em 2020, tanto no nordeste brasileiro quanto na Austrália, foram registrados eventos de branqueamento de corais em massa devido ao aumento da temperatura superficial da água do mar (Fig. 7).

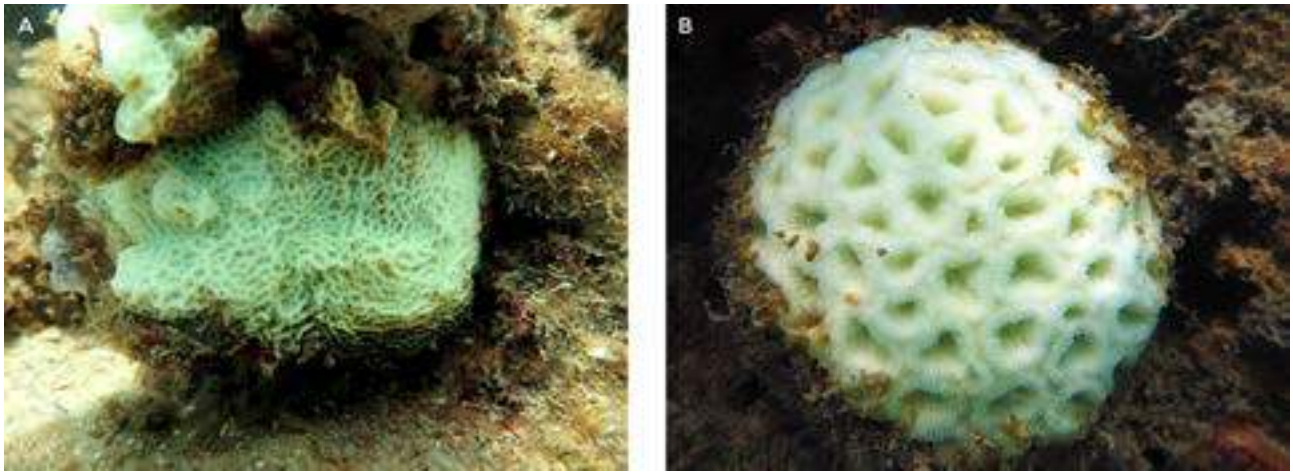



**FIGURA 7. Corais das espécies *Agaricia agaricites* (A) e *Mussismilia hispida* (B) após evento de branqueamento no entorno da Ilha dos Frades, Baía de Todos os Santos (BA), em 2019.** *Fotos: Bárbara Pinheiro (Laboratório de Conservação no Século XXI, Universidade Federal de Alagoas).*

## 4. Gestão e governança para o uso sustentável do oceano

Se por um lado é impossível pararmos de usar o oceano, por outro é urgente diminuir a pressão e os impactos sobre ele. A discussão sobre conservação ambiental é relativamente antiga (Fig. 8) e, ao longo dos anos, o oceano vem ganhando papel central nos debates sobre sustentabilidade, tanto para a busca da qualidade ambiental quanto do desenvolvimento de atividades socioeconômicas pouco impactantes.

O crescente entendimento de que o oceano é um sistema socioecológico - no qual os componentes ecológicos e sociais estão acoplados e não podem ser efetivamente separados - tem destacado a importância de serem buscadas práticas sustentáveis não somente para a sua conservação, mas sobretudo para a nossa sobrevivência. Assim, os debates sobre a sustentabilidade e a conservação do oceano têm evoluído e sido pautados, ao longo das últimas décadas, em conjunto com os debates sobre gestão e governança. Enquanto o primeiro faz referência ao conjunto de instrumentos, técnicas e ferramentas aplicadas em processos de tomada de decisão para resolver determinado problema, o último abarca o conjunto de acordos formais e não formais que orientam e permitem um maior controle social da gestão, para além das esferas de governo (Polette, 2020).

Apesar de ainda existirem muitos desafios que possam garantir a gestão integrada e uma governança justa, sustentável e inclusiva do oceano, mares e zonas costeiras, existem atualmente instrumentos normativos e instituições que têm promovido o uso do oceano em benefício da humanidade e da manutenção e conservação da biodiversidade e serviços ecossistêmicos. Pode-se dizer que estes instrumentos conformam a espinha dorsal das iniciativas de gestão e governança marinho-costeiras produzidas em escala internacional e nacional. Por isso, estão abaixo divididas de acordo com o contexto ao qual correspondem.

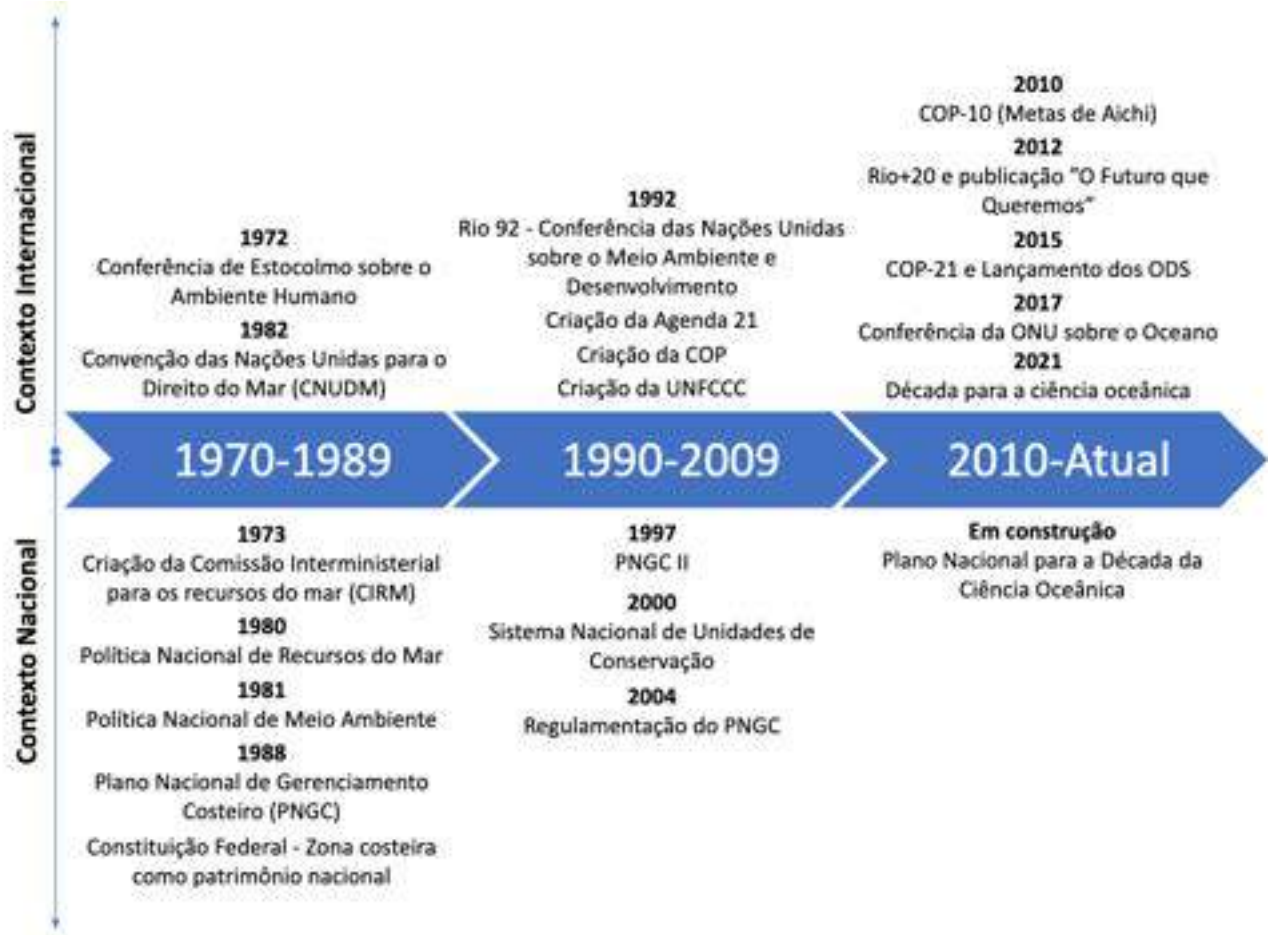



**FIGURA 8.** **Síntese do histórico da governança e da conservação marinho-costeira.** *Fonte: elaboração própria.*

Foto: Briana Bombana

## A evolução do conceito de sustentabilidade

O conceito de sustentabilidade foi introduzido inicialmente pelo Relatório Brundtland (1987), que cunhou o termo "desenvolvimento sustentável". Por meio deste, o mundo poderia garantir as necessidades básicas das gerações presente e futuras, garantindo oportunidades para satisfazer as aspirações para uma vida melhor a partir da conservação da natureza. Assim, agendas desenvolvimentistas e ambientais foram combinadas e, portanto, o termo em questão tem recebido uma ampla aceitação em diferentes âmbitos, como na política, na academia e nas organizações não governamentais.

Porém, a popularidade do "desenvolvimento sustentável" é tão justificada quanto problematizada pela sua intrínseca ambiguidade e generalidade, realçando sua lentidão em propor soluções aos problemas globais. De todas as maneiras, ele continua sendo amplamente utilizado, apesar de atualmente abarcar diferentes conceituações dependentes do "grau de sustentabilidade" ao qual pode ser referido.

Para citar um exemplo, Gudynas (2000) versa sobre dois tipos de sustentabilidade: a forte e a fraca. Isto é, enquanto esta última considera uma possível substituição da natureza por capital manufaturado, por exemplo, quando um país ou empresa paga um certo valor monetário por uma área protegida marinha, a qual "presta o serviço" de sequestrar o carbono (um dos elementos causadores das mudanças climáticas) por meio de organismos fotossintéticos marinhos, com o intuito de compensar suas atividades que produzem carbono; a primeira não aceita tal substituição, assim defendendo que a natureza em si própria deva ser o objeto a ser conservado, ou seja, a implantação de alternativas para isto, como pode ser uma área protegida marinha, deve ocorrer com o objetivo último de manter as funções e processos de um dado ambiente, para além das regras de mercado. Assim, os diversos valores da natureza são enfatizados, não somente o monetário, como por exemplo, o seu valor intrínseco e o valor sentimental que apresenta para uma comunidade de pessoas.

Mais recentemente, pesquisadores como Julian Agyeman e Robert Bullard discutiram o conceito de sustentabilidade à luz de dimensões sociais, cunhando o termo sustentabilidade justa. Para eles, etnias, gêneros, classes, justiça e equidade desempenham um papel chave para a sustentabilidade. Uma sociedade verdadeiramente sustentável é aquela em que questões mais amplas de necessidades sociais, bem-estar humano e oportunidades econômicas estão integralmente relacionadas aos limites ambientais impostos pelos ecossistemas (Agyeman, 2008).

### 4.1 Contexto mundial

Globalmente, foi na Conferência de Estocolmo sobre o Meio Ambiente Humano, em 1972, que as preocupações com o oceano foram ampliadas, assim como as relações existentes entre os sistemas ecológico e social foram mais bem compreendidas. A divisão do oceano entre os países, as formas para explorá-lo e lidar com os impactos gerados e as proposições de regulamentações foram discutidas pela Assembleia Geral da Organização das Nações Unidas, que então deu início à construção da Convenção das Nações Unidas para o Direito do Mar (CNUDM). A "constituição do oceano" como é popularmente conhecida demorou mais de dez anos para ser negociada, adotada e ratificada pelos mais de 150 países que hoje são seus signatários. Ela representa um marco importante para a governança global do oceano, uma vez que traz objetivos para a promoção da utilização equitativa e eficiente dos recursos vivos e não vivos marinhos e também estabelece critérios para determinar a soberania e as responsabilidades e regras para o uso.

## Você sabia?

Depois da "Guerra das Lagostas" ocorrida na década de 1960, na qual a França disputou com o Brasil o direito de pescar esses crustáceos na plataforma continental do Nordeste brasileiro, é que se pleiteou a necessidade de reconhecer a soberania dos países em gerir as suas águas marítimas adjacentes (até 200 milhas da costa, excetuando alguns casos específicos).

Esta guerra foi decidida diplomaticamente e contribuiu, assim, com a criação da Convenção Internacional sobre o Direito do Mar (CNUDM) em 1982, a qual tem por objetivo principal definir as normas jurídicas para uso dos mares e oceano, que devem ser respeitadas por todos os países signatários, inclusive o Brasil.

Dez anos mais tarde, em 1992, a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio 92) discutiu mais amplamente o conceito de desenvolvimento sustentável, voltado à promoção do bem-estar social e econômico das gerações atuais e futuras. No documento resultante dessa conferência, a Agenda 21, um capítulo inteiro (o Capítulo 17) é dedicado à proteção do oceano, adotando princípios como o da precaução e o das responsabilidades comuns diferenciadas. Enquanto o primeiro argumenta que, na ausência de informações que comprovem determinados impactos ambientais, deve-se adotar a precaução, o último almeja impulsionar a equidade e as iniciativas de cooperação internacional voltadas ao meio ambiente. Também, foi na Rio 92 que outros instrumentos internacionais que se relacionam indiretamente com a governança do oceano foram discutidos, como a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC) e a Convenção sobre Diversidade Biológica (COP).

Adentrando o novo século, em 2010, durante a 10ª Conferência das Partes da Convenção sobre Diversidade Biológica (COP-10), as Metas de Aichi para a Biodiversidade chamaram a atenção para a necessidade de promover o uso sustentável dos estoques pesqueiros (Meta 6); minimizar impactos antrópicos relacionados à alterações climáticas e acidificação do oceano sobre recifes de coral e ecossistemas vulneráveis (Meta 10); e proteger 10% dos ecossistemas representativos das zonas costeiras e marinhas (Meta 11). Em 2012, na Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (Rio + 20), a declaração "O Futuro que queremos" destacou ações para promover a sustentabilidade do oceano, zona costeira e ilhas. Especialmente, o tema recebeu destaque na carta produzida durante o evento, na qual foi destacada a importância do oceano, do que já existe em termos de arranjos institucionais[10] e a necessidade de ir além das águas territoriais para preservação do ambiente marinho como um todo no planeta. Também foi salientada a importância do oceano para a questão climática e para o bem-estar humano.

Na esteira da Rio+20, em 2015, a ONU fez uma revisão dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (1990 a 2015) para a promoção da sustentabilidade. É a conhecida "Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável", que apresenta 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Os ODS preconizam a importância da participação cidadã[11] na construção das metas estabelecidas até o ano de 2030. Com o *slogan* "Ninguém fica para trás", a Agenda 2030 indica a necessidade de integração entre suas metas e ações, ressaltando questões de justiça social e equidade de gênero.

[10] Por arranjos institucionais entende-se o conjunto de costumes, leis, instituições e estratégias estabelecidas para orientar e negociar objetivos e ações de gestão.

[11] De forma ampla, a participação social é o processo no qual os atores sociais (indivíduos, grupos ou organizações) que são afetados ou afetam a tomada de decisão resolvem ter um papel ativo nesta decisão.

A Agenda 2030 reforçou a importância do oceano para a sustentabilidade e propôs um ODS específico para o oceano, "Vida na água", o ODS 14 (Fig. 9). Ele tem como objetivo "conservar e promover o uso sustentável dos oceanos, dos mares e dos recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável". Apesar de focado no oceano, o ODS 14 contribui para promover os outros 16 ODS (Fig. 10), possuindo conexões intrínsecas com os temas de mudanças climáticas, gênero, cidades, entre outros.

**FIGURA 9. Conheça as metas do ODS 14: Vida na água.** *Fonte: Xavier et al. (2020).*

**FIGURA 10.** Interações entre as metas (de 1 a 7) do "Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 14: Vida na Água" com os demais ODS. A espessura da linha representa uma maior (7) ou menor (1) ligação do ODS 14 com os demais ODS. *Fonte: adaptado de Claudet et al. (2020).*

Dessa forma, podemos dizer que, especialmente a partir da década de 1990, a comunidade internacional tem se voltado à busca de uma melhor forma de promover a governança do oceano. A consolidação da agenda internacional para o oceano ocorreu em 2017, na Conferência da ONU sobre o Oceano, por meio do quadro de ação e acompanhamento para o oceano e mares da declaração "O Futuro que queremos", assinada em 2012. Nela, mais de 1500 compromissos voluntários, de governos, das Organizações Não-Governamentais, das empresas e da sociedade civil em geral, foram propostos para promover a sustentabilidade do oceano por meio de variadas estratégias.

Em consequência dessa mobilização, a Resolução intitulada "Nosso Oceano, nosso futuro: chamado para a ação" (A/RES/71/312), adotada pela Assembleia Geral da ONU em 6 de julho de 2017, dispõe que o oceano e mares são "críticos para o nosso futuro e humanidade comum, em toda a sua diversidade". Reforçando essa determinação, a ONU então lançou a "Década da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável" (2021-2030), com o objetivo de ampliar a cooperação internacional em pesquisa científica e inclusão de novos atores na discussão com vistas a alcançar a "ciência que precisamos para o oceano que queremos".

## A Década para a Ciência Oceânica

No ano de 2021 iniciou-se a Década da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável (2021-2030), declarada pela Organização das Nações Unidas (ONU) (UNESCO, 2020). Entre outros objetivos, a década busca construir uma base científica para subsidiar ações para a conservação do oceano, mares e zonas costeiras por meio de cooperação internacional e da promoção da cultura oceânica[12]. Ao final da Década, espera-se poder entregar os principais resultados à sociedade:

1. Um oceano limpo;
2. Um oceano saudável e resiliente;
3. Um oceano produtivo e sustentável;
4. Um oceano previsível;
5. Um oceano seguro;
6. Um oceano acessível;
7. Um oceano inspirador e envolvente.

A despeito dos avanços e da crescente preocupação em criar um quadro institucional adequado para a sustentabilidade do oceano, ainda estamos longe de um sistema eficaz. O principal desafio é como integrar as mais variadas instituições e setores, de nível nacional ou internacional, em um arcabouço integrado, flexível e dinâmico, capaz de dar resposta aos complexos desafios relacionados ao oceano e à busca pela sustentabilidade. A fragmentação institucional e os diferentes interesses voltados ao uso e à conservação do oceano dificultam o estabelecimento de uma agenda integrada e a identificação de prioridades, e acabam por concentrar esforços em medidas paliativas e de curto prazo, perpetuando um ciclo vicioso que exacerba ameaças já existentes ao meio ambiente marinho.

Por exemplo, a delimitação da área protegida marinha em torno das ilhas Galápagos (Equador) não preveniu que, nos últimos anos, frotas de navios de empresas chinesas sejam frequentemente vistas explorando os recursos pesqueiros contidos na fronteira com as áreas internacionais, e, de forma mais grave, também dentro da Zona Econômica Exclusiva equatoriana. Só em julho de 2020, foram avistados 260 navios pescando nessa área. Acredita-se que a única forma de impedir a pesca ilegal seja por meio de uma vigilância permanente que, em contrapartida, demanda muitos recursos materiais e humanos para os países marinho-costeiros. O conflito observado no Equador, comum a seus países vizinhos, elevou-se a tal ponto em que, atualmente, estejam ocorrendo diálogos para que seja apresentada uma posição regional conjunta com Colômbia, Peru, Chile, Argentina, Panamá e Costa Rica. Esta, ainda que de caráter paliativo a esse histórico de exploração econômica não permitida pelos governos nacionais envolvidos, tem como intuito chamar a atenção internacional aos abusos cometidos pelos navios de empresas estrangeiras.

À medida que o número de instrumentos jurídicos internacionais se multiplica, torna-se ainda mais difícil para países, governos subnacionais e para a sociedade se enxergarem, participarem e contribuírem com esse emaranhado institucional, o que dificulta a participação social e o desenvolvimento de processos de governança horizontalizada.

[12] O conjunto de processos nos quais se debate, forma, transmite e se aplica o conhecimento sobre como o oceano influencia as nossas vidas e como as nossas ações influenciam o oceano.

### 4.2 Contexto brasileiro

Assim como no nível internacional há o desafio de integrar o emaranhado de regras e normativas, no Brasil, notamos que os ministérios e organizações relacionados à gestão e governança do oceano e zona costeira enfrentam o mesmo problema. Assuntos relacionados a setores específicos - como a pesca, petróleo, portos, turismo e meio ambiente - são discutidos de forma isolada, sem relacioná-los entre si e com políticas de gestão costeira e do oceano. Portanto, pode-se dizer que são vários os arranjos institucionais que tangem ao uso sustentável do oceano e da zona costeira, os quais interagem com o arcabouço internacional existente, e que em geral formam uma governança ainda setorial e fragmentada (Fig. 8).

O planejamento do território marinho-costeiro brasileiro e a preocupação com a utilização dos recursos e do espaço marinho iniciou-se nos anos 70, em paralelo à Conferência de Estocolmo. Em 1973 foi criada a Secretaria de Especial do Meio Ambiente da Presidência da República; um ano depois foi instituída a Comissão Interministerial dos Recursos do Mar (CIRM). Ambas as organizações passaram a trabalhar suas perspectivas para a governança costeira e marinha, e os reflexos disso estão presentes na Política Nacional de Recursos do Mar (1980) e na Política Nacional de Meio Ambiente (1981). Por meio dessas, dentre outras ações, previu-se a promoção de formação de recursos humanos, o estímulo para o desenvolvimento da pesquisa, ciência e tecnologia marinhas, e o incentivo para a exploração e o aproveitamento sustentável dos recursos do mar, das águas sobrejacentes ao leito do mar, do leito do mar e seu subsolo, e das áreas costeiras adjacentes.

**FIGURA 11.** Áreas que compreendem a Amazônia Azul: O mar territorial, a ZEE e a plataforma estendida. *Fonte: adaptada da Marinha do Brasil.*

## A Amazônia Azul

Com mais de 8,6 mil quilômetros de costa, o Brasil possui atualmente 5,7 milhões de quilômetros quadrados (km²) de espaço marinho sob sua jurisdição. Esse território corresponde à área onde se aplica a legislação brasileira e que o Brasil pode decidir como explorar economicamente. Por conta das riquezas naturais e minerais abundantes, a área marinha sob jurisdição brasileira é chamada de Amazônia Azul, em uma comparação à importância da Floresta Amazônica para o país.

A Amazônia Azul é composta pelo Mar territorial (linhas base[13] até a extensão máxima de 12 milhas náuticas), pela Zona Econômica Exclusiva (ZEE), que se estende até a distância máxima de 200 milhas marítimas (370 km de extensão), e pela plataforma continental estendida (fundo e subsolo marinho) (Fig. 11). Os direitos do Estado costeiro na plataforma continental são exclusivos no sentido de que, se o Estado costeiro não explora a ZEE ou a plataforma continental ou não aproveita os recursos naturais das mesmas, ninguém pode empreender estas atividades sem o expresso consentimento desse Estado, incluindo a atividade de pesquisa científica.

Dia 16 de novembro é comemorado o dia da Amazônia Azul. Essa região é rica e biodiversa e ainda possui comprovada presença de recursos minerais como petróleo e gás natural, elementos que somados se revelam de elevado potencial econômico para o desenvolvimento do Brasil.

Com base nessas políticas, em 1982, a CIRM passou a promover encontros e reuniões para discutir o gerenciamento costeiro. Desse processo, surge, ainda que de forma embrionária, o sistema de gestão costeira brasileiro, que considerou um modelo descentralizado e participativo. Esse debate dá origem ao Programa Nacional de Gerenciamento Costeiro que em 1988 publica a Lei 7.661/1988 e institui o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC), regulamentado pelo Decreto 5.300/2004. Este é a base legal de planejamento e gestão ambiental da zona costeira brasileira e, atualmente, é válido por meio do PNGC II (versão atualizada e revisada pela Resolução CIRM de 05 de 3 de dezembro de 1997).[13] A nova versão estabelece os objetivos e instrumentos que operacionalizam o plano. Ela mantém a característica de gestão descentralizada e cooperativa entre os níveis federativos e, para favorecê-la, cria o Grupo de Integração do Gerenciamento Costeiro (GIGERCO), no âmbito da CIRM, com representações de diferentes setores, entre eles: ministérios, sociedade civil, instituições de pesquisa e confederações empresariais. O GIGERCO foi pensado para atuar por meio de diversos atores, cada um dos quais desenvolvendo ações que auxiliam o sistema a avançar em etapas de inovação e transformação coordenadas e lideradas pelo governo federal, e previstas e aprovadas no Plano de Ação Federal para a Zona Costeira (PAF-ZC), que está em sua quarta edição 2017-2019.

Com sua origem em 1988, o arcabouço para a gestão da zona costeira brasileira apresenta a mesma idade da nossa Constituição Federal, na qual tal zona foi também considerada "Patrimônio Nacional" e onde se estabeleceu que a utilização desse espaço deveria obedecer a condições que assegurem a preservação do meio ambiente inclusive quanto ao uso dos recursos naturais. O Brasil possui quase 10.000 km de linha de costa (se considerarmos todos os recortes e reentrâncias), permeados por um mosaico de ecossistemas, usos e impactos, e habitado por diferentes culturas e comunidades. Principalmente devido a isto, à organização político-administrativa territorial do estado brasileiro e à multiplicidade de instituições, processos, normas e controles de diferentes naturezas é que o desafio da gestão costeira no Brasil é grande e complexo.

A conservação costeira e marinha também é pautada pelo quadro normativo para o estabelecimento e gestão das unidades de conservação, condensado pelo Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC). Segundo o Cadastro Nacional de Unidades de Conservação, a primeira unidade de conservação criada com uma porção marinha no Brasil foi o Parque Nacional do Monte Pascoal, na Bahia, em 1961. O parque é predominantemente terrestre, mas inclui em sua área restingas e manguezais. Já a primeira área marinha protegida (AMP) criada no Brasil foi a Reserva Biológica do Atol das Rocas, em 1979, com objetivo de proteger tartarugas marinhas e aves migratórias. Desde então, o número e os ecossistemas abrigados por unidades de conservação que incluem o bioma marinho e costeiro cresceram, assim como o reconhecimento de sua importância e dos diversos benefícios proporcionados por tais áreas. As AMPs e as unidades de conservação mistas (com áreas terrestres e marinhas) representam uma estratégia de conservação e manutenção da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos costeiros e marinhos.

Finalmente, cabe destacar que nos dias atuais, o Brasil se encontra em fase final de construção do Plano Nacional para a Década da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável como fruto de uma ampla discussão e participação social de todas as regiões do Brasil. Internacionalmente, está alinhado ao Planejamento Global da Década do Oceano realizado pela Comissão Oceanográfica Intergovernamental (COI), da UNESCO, órgão que coordena a Década em escala global. Esse Plano prevê uma ampla reflexão nos próximos dez anos entre cientistas, formuladores de políticas, tomadores de decisão, organizações da sociedade civil e iniciativa privada para a identificação e o desenvolvimento de abordagens científicas orientadas a soluções para a sustentabilidade do oceano.

[13] Segundo a Constituição Federal Brasileira (1988), a "linha de baixa-mar do litoral continental e insular, tal como indicada nas cartas náuticas de grande escala, reconhecidas oficialmente no Brasil".

## Conheça o SNUC

No Brasil, as unidades de conservação (UCs) são reguladas pelo Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC - Lei Federal 9.985/2000), que apresenta diretrizes e procedimentos para a criação e gestão das áreas protegidas. O SNUC prevê diferentes categorias de UCs, que podem ser de proteção integral ou de uso sustentável (Fig. 12).

**FIGURA 12.** Categorias de UCs previstas pelo SNUC. *Fonte: elaboração própria.*

O objetivo das UCs de Proteção Integral é preservar a natureza. Em seu território, é admitido apenas o uso indireto dos recursos naturais, ou seja, aqueles que não envolvem consumo, coleta, dano ou destruição dos recursos e ecossistemas. Nas UCs de proteção integral, são permitidas atividades como a visitação pública, o desenvolvimento de pesquisa e algumas práticas tradicionais em áreas restritas.

Já, o objetivo das UCs de uso sustentável é compatibilizar a conservação da natureza com o uso de parcela dos seus recursos naturais. Dessa maneira, várias atividades são permitidas dentro de seus territórios e devem ser negociadas entre os diferentes setores da sociedade para que sejam realizadas de forma a promover a conservação dos recursos naturais, históricos e culturais dentro de cada unidade.

Hoje, o Brasil tem mais de 25% do território marinho sob jurisdição nacional coberto por unidades de conservação de diversos tipos (Quadro 1), o que coloca o país alinhado às metas de conservação de Aichi, em particular, a Meta 11 de proteger ao menos 10% dos ecossistemas costeiros e marinhos, ainda que não de forma amplamente representativa. Caso a proposta de extensão da Plataforma Continental Jurídica brasileira seja aceita e não haja a criação de novas unidades de conservação, esta porcentagem cairá para 16,2%.

É fato que ao longo dos anos, a criação de unidades de conservação no Brasil aumentou. No entanto, essa proteção normativa não se dá de forma equitativa entre os diferentes ecossistemas. Adicionalmente, muitas enfrentam graves problemas para serem implementadas. Áreas definidas sem critérios claros e sem recursos para executar ações de gestão - como a elaboração dos Planos de Manejo - falham em cumprir seus objetivos de conservação e são indutoras de conflitos com grupos sociais que têm interesse em explorar seus recursos e territórios. Para avançar na conservação de nosso oceano, é preciso ultrapassar essas barreiras.

**QUADRO 1.** Categorias de Unidades de Conservação que incluem áreas costeiras e marinhas no Brasil.
*Fonte: Cadastro Nacional de Unidades de Conservação (consulta realizada em 14 de abril de 2020).*

| Unidade de conservação | Número | Área costeira e marinha protegida (ha) |
|---|---|---|
| Estação Ecológica | 8 | 15.232 |
| Reserva Biológica | 8 | 56.169 |
| Parque | 51 | 472.304 |
| Monumento Natural | 8 | 11.487.334 |
| Refúgio da Vida Silvestre | 7 | 85.953 |
| Área de Proteção Ambiental | 72 | 83.497.173 |
| Área de Relevante Interesse Ecológico | 5 | 810 |
| Reserva Extrativista | 22 | 795.634 |
| Reserva de Fauna | 0 | 0 |
| Reserva de Desenvolvimento Sustentável | 4 | 4.529 |
| Reserva Particular do Patrimônio Natural | 4 | 189 |
| **TOTAL** | **189** | **96.415.327** |

## 5. Instrumentos legais que permitem a participação social na gestão marinho-costeira

A participação social ativa e voluntária nos processos de tomada de decisão é um direito e um dever fundamental das sociedades democráticas. Diversos são os instrumentos na legislação ambiental brasileira que a garantem, como: Avaliação de Impacto Ambiental, Licenciamento Ambiental, conselhos e comitês participativos, Agenda 21, entre outros. Neste capítulo vamos analisar com mais detalhes a Avaliação de Impacto Ambiental.

### 5.1 Avaliação de Impacto Ambiental

A avaliação de impacto ambiental constitui-se como um dos instrumentos de gestão e governança ambiental que fornece subsídios para um processo decisório, como é o caso do licenciamento ambiental. O artigo 225, inciso IV, § 10, da Constituição Federal estabelece que o Poder Público deve exigir, na forma da Lei, o estudo prévio de impacto ambiental para a instalação de qualquer obra ou atividade que possa causar significativa degradação ao meio ambiente. O objetivo da avaliação de impacto ambiental é analisar a viabilidade ambiental de um plano, programa ou projeto.

Mas o que é impacto ambiental? Segundo a Resolução CONAMA nº 001/1986, impacto ambiental é: "qualquer alteração das propriedades físicas, químicas ou biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetem a saúde, a segurança e o bem-estar da população, as atividades sociais e econômicas, as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente, e a qualidade dos recursos ambientais".

O processo de avaliação de impacto ambiental consiste em determinar como mudanças no ambiente, como as promovidas por projetos de infraestrutura, podem afetar a qualidade ambiental e ser refletidas no bem-estar humano. Avaliar é, assim, um processo fundamental na atualidade, pois permite julgar e entender as relações de causa e efeito que um empreendimento causará em um determinado local e propor medidas para mitigar ou compensar os impactos ambientais negativos.

Neste sentido, a participação da sociedade nos processos de tomada de decisão é fator primordial para julgar, de forma democrática, as consequências de intervenções no ambiente. Ela permite identificar estratégias de prevenção ou mitigação de danos à qualidade desse ambiente que possam ser causados por tais intervenções. Esse não é um processo simples pois exige ética e compromisso com a atual e as futuras gerações.

Assim, a Avaliação de Impacto Ambiental, como instrumento de política ambiental, somente será efetiva caso a sociedade entenda a importância dos ambientes costeiros e marinhos e os impactos de planos, programa e projetos, os quais precisam ser apresentados de forma transparente ao público, fazendo com que este possa participar e exigir medidas que eliminem ou reduzam tais impactos a níveis toleráveis. Isso somente será possível por meio da participação efetiva da sociedade na tomada de decisão referente à implantação de empreendimentos que afetem direta ou indiretamente a zona costeira e o oceano.

## 6. Ciência e tomada de decisão

"*O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano*", Isaac Newton.

No mundo ocidental, tem-se na expedição realizada entre os anos 1872-76 a bordo do navio HMS Challenger o marco de criação da oceanografia como a ciência que estuda o oceano e outras zonas por ele influenciadas. Desde então, diversos progressos foram registrados no tema, a começar pela publicação de 50 volumes originários dessa expedição, mas que foram especialmente incrementados a partir da metade do século passado com o desenvolvimento de tecnologias mais sofisticadas que permitiram a construção de equipamentos para o entendimento dos componentes e processos marinho-costeiros. Hoje, a observação oceânica conta com uma ampla rede remota para receber informação coletada nos mais diversos locais do oceano, o que recebe o nome de "Oceano das Coisas" (do inglês, *Ocean of Things*) - em alusão ao termo "Internet das Coisas" (do inglês, *Internet of Things*). Por meio dela, os objetos ou equipamentos conectam-se e comunicam-se entre si e o usuário com o apoio de programas e sensores inteligentes que transmitem informação.

A partir desse breve histórico, percebemos que, tradicionalmente, entende-se a "ciência oceânica" como o estudo das variáveis geo-físico-químicas e biológicas do oceano. Contudo, nos últimos anos, tem ganhado força o conceito de Oceanografia Humana ou Social, um campo de conhecimento que compreende pesquisas etnográficas, de impacto ambiental, gerenciamento costeiro, resiliência de sistemas socioecológicos, gestão de políticas públicas, entre outras. O desdobramento dessa outra face da Oceanografia tem como motivação principal aportar novas perspectivas e alternativas aos problemas encontrados nas zonas marinho-costeiras.

Como vimos, a degradação dos ambientes marinho-costeiros tem sido intensificada nas últimas décadas. Apesar da constante e crescente evolução científica no tema, ainda há lacunas de conhecimento importantes no entendimento dos processos marinho-costeiros e de sua gestão e governança, em diferentes escalas de tempo e espaço. Por exemplo, não se sabe como a elevação do nível do mar, uma das consequências das mudanças climáticas, afetará os ecossistemas e populações costeiras, nem quais estratégias estas formularão para se adaptarem a esse novo contexto. Essas carências tendem a explicar, mesmo que limitadamente, a falha na gestão do uso e exploração do oceano e das zonas costeiras, materializada em uma miríade de problemas de diversas magnitudes e escalas, ao passo que também destacam as limitações da ciência convencional em propor soluções aos mesmos.

A complexidade desse ambiente em constante modificação, incrementada pela crescente demanda humana por serviços ecossistêmicos, enfatiza que mesmo que contássemos com a maior quantidade de produtos oriundos da ciência convencional, estes seriam incapazes de fornecer sozinhos todas as respostas para as necessidades da sociedade (Sarewitz, 2004). Dessa forma, é necessário reconhecer que investir e fomentar os caminhos para o desenvolvimento da interdisciplinaridade e da transdisciplinaridade é crucial se quisermos compreender realmente o oceano. Esse é um ponto que vem sendo extremamente destacado nas discussões de planejamento nacional e subnacional para a implementação da Década da Ciência Oceânica no Brasil.

Desenvolver uma Oceanografia como ciência fundamentalmente interdisciplinar é fomentar a integração do conhecimento sobre diferentes processos, naturais e sociais. Nesse sentido, a literatura científica vem apontando alguns caminhos importantes. Por exemplo, a Gestão Baseada em Ecossistemas (GBE) apresenta um olhar holístico e integrador para a gestão marinho-costeira. A GBE considera que a manutenção dos ecossistemas deve ser pensada em longo prazo e levar em conta sua estrutura e funcionamento, incluindo seus processos ecológicos. Essa abordagem, voltada a garantir a resiliência de sistemas socioecológicos, vem sendo amplamente recomendada na literatura para a gestão de ambientes marinho-costeiros (Halpern *et al*., 2008), pois considera sua dinamicidade e não-linearidade e compreende uma gama variada de usos e atividades. Ao incorporar as escalas temporais e espaciais dos processos, o manejo adaptativo, o monitoramento, a participação de diferentes atores e setores, entre outros princípios, a GBE pode promover maior eficácia na sustentabilidade da zona marinho-costeira (Long *et al*., 2015).

Assim, o desafio que se coloca à frente das pessoas envolvidas com a ciência oceanográfica para a sustentabilidade é compreender a complexidade dos sistemas, identificar e compreender os processos relacionados à sua manutenção e dos SE para, por fim, propor medidas de gestão que os resguardem dos impactos das atividades humanas. Ressalta-se que o caráter integrador e adaptativo da GBE não se limita à integração dentro da própria abordagem, mas deve ser ampliado, buscando integração com outras propostas de gestão focadas na zona costeira, mares e oceano. Em outras palavras, o trabalho e colaboração de um ou mais grupo(s) de pesquisadores e outros atores deve ser guiado pela antes mencionada interdisciplinaridade, mas também pode evoluir até incluir processos de aprendizagem mútua entre a ciência e a sociedade, o que se denomina como transdisciplinaridade (Jahn *et al*., 2012). Tão importante quanto investir em formação de recursos humanos e tecnológicos em ciência oceânica, é reconhecer que o oceano é um espaço plural, em diversos sentidos. A pluralidade do oceano se traduz na diversidade de atores interessados que devem ter voz na hora da tomada de decisão.

Nesse contexto, no que tange às políticas públicas, embora seja fundamental que se desenvolvam com base no conhecimento científico disponível, é importante reconhecer que a ciência não deve ser a única voz e que esta, normalmente, é mais diversa e influenciada por valores e experiências pessoais do que pensamos.

Não é incomum que políticas e planos de gestão do ambiente marinho que supervalorizam dados e critérios ambientais em relação ao contexto social em que a área em questão está inserida, tenham sua eficácia reduzida no longo prazo. De fato, muitas das políticas públicas e estruturas institucionais relacionadas podem apresentar um viés utilitarista do oceano e zonas costeiras adjacentes que, em casos mais extremos, inclusive intensificam conflitos socioambientais existentes ou provocam novas disputas. Situações emblemáticas nesse sentido têm ocorrido com a implementação de algumas UCs e a delimitação de cotas de captura de pesca, em diversos locais do mundo.

Dessa forma, para a tomada de decisão, é necessário não apenas contar com um maior aprofundamento do conhecimento científico, mas também com uma maior diversidade desses conhecimentos, incluindo o conhecimento tradicional, sendo capaz de incrementar a sua qualidade e progredir para alcançar a transdisciplinaridade. Para tanto, a ciência deve manter um diálogo horizontal com outros saberes. Isto é, seria necessário não só mais conhecimento científico, mas também uma mudança na forma como construímos esse conhecimento por meio da participação ampliada da sociedade, se quisermos que ele seja útil e pertinente para a gestão costeira e oceânica.

## 6. Considerações finais

Estamos em um momento único da história recente, no qual os efeitos do Antropoceno estão cada vez mais presentes. Uma pandemia assola o planeta, estamos ameaçados pelas mudanças do clima, as assimetrias sociais e econômicas não deixam de aumentar em um planeta cada vez mais urbano onde a população cresce sem parar. Mais do que nunca, temos que refletir sobre o momento atual e estabelecer respostas e medidas conjuntas para um futuro cada vez mais hostil à sobrevivência da espécie humana.

Tendo em vista que os processos característicos do Antropoceno já fazem parte do nosso dia-a-dia e ainda ocorrerão por milhares de anos, fica evidente que temos uma grande tarefa em escala planetária, nacional, regional e local para construir uma estratégia de uso sustentável e justo dos recursos naturais e, desta forma, mitigar os impactos ambientais no oceano, mares e zonas costeiras. Para isso é fundamental o uso adequado do conhecimento, a participação da sociedade por meio de práticas de cidadania, bem como aproveitar a criatividade e a diversidade humana para neutralizar os problemas e conflitos decorrentes de tais impactos.

O que promove a cidadania são as atitudes e a participação ativa por meio da defesa dos princípios ou ideias associadas à democracia. Essas podem variar desde a simples presença passiva de um indivíduo nas reuniões da associação do bairro, até formas de contribuição social nas quais este indivíduo influencia os processos de tomada de decisão. Neste sentido, a ciência tem um papel importante - pois por meio desta é possível estabelecer caminhos inovadores junto aos processos de proposição e avaliação de políticas públicas.

E estamos em um exato momento da história da humanidade no qual são necessárias medidas concretas para promover ações consistentes de participação nos processos de gestão e governança do oceano. Um exemplo a ser considerado está nas ações preconizadas pelos ODS, especialmente o ODS 14 – Vida na Água, assim como por uma série de atividades que deverão ocorrer entre 2021 e 2030, quando governos, sociedade e academia deverão estar unidos para refletir e se dedicar às atividades da Década da Ciência Oceânica.

Fica assim cada vez mais evidente que cada indivíduo que vive em uma cidade e/ou município da zona costeira brasileira, e que frequenta as suas praias, estuários, lagoas e lagunas, durante todo o ano, no veraneio, ou de vez em quando - e até os que estão muito distantes da costa, e que nunca viram o mar sequer. Todos, absolutamente todos - estão interligados a ele pelo clima, pelas bacias hidrográficas, ou pelos recursos e benefícios que ele gentilmente nos oferece todos os dias. Todos nós devemos entender estas conexões e fazer a sua parte no dia de hoje, no dia de amanhã e durante os próximos anos das nossas vidas, pois esta conexão entre o tempo e o espaço está também relacionada com aqueles que irão viver um dia neste planeta.

Neste sentido, é imprescindível o processo de participação social, pois este se constitui como uma alavanca para as ações institucionais dos governos federal, estaduais e municipais. É uma força necessária para compreender a importância que o território oceânico possui nas suas economias, bem como das suas potencialidades e oportunidades ambientais e paisagísticas ali existentes – especialmente considerando a importância dos serviços ecossistêmicos costeiros, bem como dos seus limites de capacidade de carga e resiliência.

## Referências Bibliográficas

AGYEMAN, J. 2008. Toward a "just" sustainability? Continuum, v. 22, n. 6, p. 751–756.

BENNETT, N. J., BLYTHE, J., WHITE, C. S., & CAMPERO, C. 2021. Blue growth and blue justice: Ten risks and solutions for the ocean economy. Marine Policy, 125, 104387.

BRUNDTLAND, G. H. 1987. Our Common Future - The World Commission on Environment and Development. Oxford University Press.

CAMPOS, A. O Futuro do Oceano Global. Os desafios da governança global do Oceano. Relações Internacionais. Lisboa. In: Os desafios da governança global do Oceano (mec.pt). Acesso em 05 de dezembro de 2020.

CLAUDET, J. *et al*. 2020. A roadmap for using the UN Decade of ocean science for sustainable development in support of science, policy, and action. One Earth, v. 2, n. 1, p. 34-42.

COSTANZA, R. 1999. The ecological, economic, and social importance of the oceans. Ecological Economics, 31(2), 199–213. https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00079-8

COSTANZA, R., DALY, H. E. 1992. Natural Capital and Sustainable Development. Conservation Biology, 6(1), 37–46.

CRUTZEN, P. J. 2002. Geology of mankind: the Anthropocene. Nature, v. 415, n. 23.

CRUTZEN, P. J., STOERMER, E. F. 2000. The Anthropocene. Global Change Newsletter, núm. 41, p. 17-18.

CRUTZEN, P.J. 2006. The "Anthropocene". In: EHLERS E., KRAFFT, T. (eds) Earth System Science in the Anthropocene. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-26590-2_3

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2020. The State of World Fisheries and Aquaculture. https://doi.org/10.4060/ca9229en Acesso em 07 de dezembro de 2020.

FARRELL, K. N. 2012. Freedom to Serve: a critical exploration of the injustices of international payments for ecosystem services. In: Conference on Earth System Governance. Lund, p. 1–26.

GÓMEZ-BAGGETHUN, E., DE GROOT, R., LOMAS, P. L., MONTES, C. 2010. The history of ecosystem services in economic theory and practice: From early notions to markets and payment schemes. Ecological Economics, 69(6), 1209–1218. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.007

GONÇALVES, L. R. *et al*. 2020. The Brazilian Blue Amazon under threat: Why has the oil spill continued for so long? Ambiente e Sociedade, v. 23, p. 1–9.

GUDYNAS, E. 2000. Los límites de la sustentabilidad débil y el tránsito desde el capital natural al patrimonio ecológico. Educación, participación y ambiente, 4(11), p. 7-11.

HAINES-YOUNG, R., POTSCHI, M.B. 2018. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and Guidance on the Application of the Revised Structure. Nottingham, UK.

HALPERN, B. S. *et al*. 2008. Managing for cumulative impacts in ecosystem-based management through ocean zoning. Ocean & Coastal Management, v. 51, n. 3, p. 203–211.

HALPERN, B. S. *et al*. 2019. Recent pace of change in human impact on the world's ocean. Scientific Reports, v. 9, n. 1, p. 1–8.

JAHN, T., BERGMANN, M., KEIL, F., 2012. Transdisciplinarity: Between mainstreaming and marginalization. Ecological Economics, 79, pp. 1-10.

JAMBECK, J.R., *et al*. 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. Science, v. 347, n. 6223, p. 768-771.

LEBRETON, L. C. *et al*. 2017. River plastic emissions to the world's oceans. Nature Communications, 8, 15611.

LI, W. C; TSE, H. F.; FOK, L. 2016. Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects. Science of the Total Environment, v. 566, p. 333-349.

LONG, R. D.; CHARLES, A.; STEPHENSON, R. L. 2015. Key principles of marine ecosystem-based management. Marine Policy, v. 57, p. 53–60.

MEA (Millennium Ecosystem Assessment). 2005. Ecosystems and human well-being: a framework for assessment. Washington, DC: Island Press.

NORGAARD, R. B. 1994. Development Betrayed: The End of Progress and a Coevolutionary Revisioning of the Future. London: Routledge.

PASCUAL, U. *et al*. 2017. Valuing nature's contributions to people: the IPBES approach. Current Opinion in Environmental Sustainability, v. 26, p. 7-16.

POLETTE, M. 2020. Gestão e governança costeira e marinha. In: MUEHE, D.; LINS-DE-BARROS, F. M.; PINHEIRO, L. DE S. (Eds.). Geografia Marinha: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos. 1. ed. Rio de Janeiro: Caroline Fontelles Ternes, p. 292–340.

RAFFAELLI, D.; WHITE, P. C. L. 2013. Ecosystems and Their Services in a Changing World. An Ecological Perspective. 1. ed. [s.l.] Elsevier Ltd., v. 48.

SAREWITZ, D. 2004. How science makes environmental controversies worse. Environmental Science and Policy, 7(5), p. 385-403.

STEFFEN, *et al*. 2015. The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. The Anthropocene Review, 2, 1, 81-98.

STEFFEN, W. In press. Climate change: a truly complex and diabolical policy problem. In: DRYZEK, J.S., NORGAARD, R.B., SCHLOSBERG, (eds.). Handbook of climate change and society. Oxford, UK: Oxford University Press.

STEFFEN, W., GRINEVALD, J., CRUTZEN, P., MCNEIL, J. 2011. The Anthropocene: conceptual and historical perspectives. The Royal Society Journal. Phil. Trans. R. Soc. A, 369, p. 842–867.

SUMMERS, J. K., SMITH, L. M., CASE, J. L., LINTHURST, R. A. 2012. A review of the elements of human well-being with an emphasis on the contribution of ecosystem services. Ambio, 41(4), 327–340. https://doi.org/10.1007/s13280-012-0256-7.

TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity). 2008. The Economics of Ecosystem & Biodiversity: An Interim Report. A Banson Production, Cambridge, UK.

UNESCO. Cultura oceânica para todos: kit pedagógico. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373449. Acesso em 03 de dezembro de 2020.

UNESCO (2020). United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development 2021 – 2030. Second Implementation plan. https://www.oceandecade.org/assets/uploads/documents/Ocean-Decade-Implementation-Plan-Version-2-compressed_1599601175.pdf Acessado em maio, 2021.

WWF (World Wildlife Fund). 2015. Baltic Ecoregion Programme. Principles for a Sustainable Blue Economy. http://wwf.panda.org/wwf_news/?247477/Principles-for-a-Sustainable-Blue-Economy# Acesso em 05 de dezembro de 2020.

XAVIER, L. Y. *et al*. 2020. ODS 14 - Vida na Água. In: FREY, K. *et al*. (Eds.). Objetivos do Desenvolvimento Sustentável: Desafios para o planejamento ambiental na Macrometrópole Paulista. Santo André, SP: EdUFABC, p. 233–244.

XAVIER, L. Y.; STORI, F. T.; TURRA, A. 2016. Desvendando os oceanos: Um olhar sobre a Baía do Araçá. 1. ed. São Paulo: Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, 2016.

*Capítulo 37*

# O PERFIL E A ATUAÇÃO DO OCEANÓGRAFO

*Alexander Turra, Sueli Susana de Godoi, Marcos Tonelli, Vicente Gomes, Joseph Harari, Elisabete de Santis Braga & Leandro Inoe Coelho*

REVISÃO: LUIZ CARLOS KRUG (FURG)

CITAÇÃO SUGERIDA: TURRA, Alexander et al. O perfil e a atuação do oceanógrafo. In: HARARI, Joseph (org.). Noções de Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. E-book. Cap. 37: p. 849-890.

# O Perfil e a Atuação do Oceanógrafo

*Alexander Turra, Sueli Susana de Godoi, Marcos Tonelli, Vicente Gomes, Joseph Harari, Elisabete de Santis Braga & Leandro Inoe Coelho*

## 1. Oceano e a Sociedade

O oceano sempre esteve em lugar de destaque na história da humanidade e, neste último século, tem estado em evidência pelo seu envolvimento em muitas transformações relacionadas à exploração dos recursos vivos e não-vivos, mudanças climáticas, destruição de habitats e poluição. Esse destaque ao meio marinho já não era sem tempo.

De modo mais recente, um relevante passo nesse sentido foi dado pela Organização das Nações Unidas (ONU), que lançou em 2017 a proposta de realização da **Década das Nações Unidas da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável**[1], entre os anos de 2021 e 2030. Sob a coordenação da Comissão Oceanográfica Intergovernamental (COI) da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), a **Década do Oceano** reforçou a centralidade do oceano na homeostase[2] do planeta e, consequentemente, no suporte das atividades humanas. O principal foco da Década do Oceano é ampliar os esforços para reverter a tendência de perda de sua qualidade e criar condições para seu uso sustentável. Esse processo prevê um "chamado para ação", para que a sociedade como um todo esteja mobilizada e atuante. Tal chamado é também para os profissionais que gerarão a "*ciência que precisamos para o oceano que queremos*".

A Década do Oceano busca um oceano: (1) limpo; (2) seguro; (3) saudável e resiliente; (4) produtivo e explorado sustentavelmente; (5) previsível; (6) transparente e acessível; e (7) inspirador e envolvente. Esses sete objetivos são interconectados e contribuem para o desenvolvimento sustentável do oceano e do planeta como um todo. Um oceano limpo, com as fontes de poluentes terrestres e marinhas conhecidas e controladas, é saudável e capaz de lidar com eventuais pressões que venham a acontecer no futuro. A diminuição da poluição reduz o risco de consumo de alimentos de origem marinha e evita também a acumulação de compostos prejudiciais em diferentes grupos de organismos, contribuindo para a preservação da biodiversidade e da saúde humana.

Além de fonte de recursos vivos, como o pescado que alimenta a sociedade, o oceano pode ser fonte de minérios (petróleo e gás) e energia limpa (ventos, marés, correntes e ondas), os chamados recursos não-vivos, que devem ser explorados de forma racional de modo a fornecer benefícios à sociedade de modo sustentável. O desenvolvimento de uma economia do mar, (também chamada de economia azul) depende da oferta de conhecimento, segurança e tecnologia àqueles que desenvolvem atividades no meio marinho, como extrativistas, pescadores e marinheiros, bem como àqueles ligados às atividades de turismo, empreendimentos de lazer, construção civil, mercado imobiliário, energia, portos entre outros.

[1] Unesco, 2019. A ciência que precisamos para o oceano que queremos: a Década das Nações Unidas da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável (2021-2030). Paris: Unesco, 24p. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000265198_por>.

[2] Homeostase. do grego *homeo*: "similar/igual" e *stasis*: estático – a estabilidade do ecossistema.

Para que se possa buscar o uso sustentável do oceano é fundamental que haja capacidade de prever o complexo comportamento do bioma marinho sob diferentes pressões antrópicas, o que depende da geração de conhecimento e do compartilhamento de dados de qualidade para se estabelecer boas estratégias para serem utilizadas em parceria com a sociedade. Logo, o conhecimento sobre o maior ambiente da Terra deve ser amplamente disseminado, para que a sociedade entenda a importância do oceano e do valor de sua participação nas ações que envolvam sua proteção e seu uso.

Assim, para superar os desafios impostos pela busca da sustentabilidade do oceano, é necessário gerar conhecimento e ampliar o entendimento e a valorização desse ambiente pela sociedade de forma que ele possa ser cada vez mais usado como base para a tomada de decisão e para a elaboração e implementação de políticas públicas.

Para atingir os objetivos e superar os desafios, recentemente apresentados pela Década do Oceano, e manter uma relação entre o Homem e o mar de modo equilibrado, a sociedade necessita dispor de profissionais com competências e habilidades para compreendê-lo, gerenciá-lo e realizar o diálogo com os diferentes atores sociais. Neste sentido, os oceanógrafos possuem um papel de destaque nessa missão.

## 2. O profissional oceanógrafo

O oceanógrafo é um profissional de formação técnico-científica, direcionado ao conhecimento e à previsão do comportamento do oceano e ambientes transicionais[3] sob todos os seus aspectos. Tal profissional está capacitado a atuar de forma multi-, inter- e transdisciplinar nas atividades de uso e exploração racional de bens e serviços providos pelo oceano. A formação holística, integrada e sistêmica sobre fenômenos e processos que ocorrem no oceano, mares e em ambientes costeiros, e sua relação com a sociedade, caracteriza o oceanógrafo como um profissional com visão abrangente e integrada e expressiva capacidade de articulação, necessária no cenário atual de degradação e de destaque do oceano em escalas nacional e global.

Como profissão contemporânea no Brasil, a Oceanografia ainda é pouco divulgada, mas em pouco tempo, deverá ocupar lugar de destaque no cenário nacional. A integração entre as diferentes bacias oceânicas e a forte interação entre o oceano e a atmosfera concedem à Oceanografia o caráter de ciência global em sua abrangência e importância. No contexto das áreas sob jurisdição nacional, os desafios da Oceanografia estão voltados ao estudo de uma área litorânea extensa, com mais de 8.500 quilômetros e distintas realidades sociais e ambientais, e uma ampla área marinha com cerca de 5,7 milhões de quilômetros quadrados. Dada a grande dimensão e a importância estratégica para o país, similar à da Amazônia, esse território é chamado de Amazônia Azul.

[3] Ambientes transicionais são aqueles localizados entre os ambientes marinhos e terrestres como praias, costões rochosos, recifes de coral, estuários, manguezais e marismas.

Em 31 de julho de 2008 foi sancionada a Lei Federal N° 11.760/2008, que regulamenta o exercício da profissão de oceanógrafo no Brasil. Posteriormente, em 12 de julho de 2018 foi publicada a Resolução CNE/CES nº 2/2018 sobre as Diretrizes Curriculares Nacionais para os cursos de graduação em Oceanografia, que caracterizam o perfil do egresso e detalham as competências e habilidades do profissional. Esse conjunto de documentos legais permite a identificação de diversas áreas de atuação profissional.

Segundo a Resolução CNE/CES nº 2/2018:

"*Os cursos de graduação em Oceanografia deverão prover formação técnico-científica direcionada ao conhecimento e à previsão do comportamento do oceano e ambientes transicionais sob todos seus aspectos, capacitando os egressos a atuar de forma transdisciplinar nas atividades de uso e exploração racional de recursos marinhos e costeiros renováveis e não renováveis. O perfil dos egressos deverá compreender a visão crítica e criativa para a identificação e resolução de problemas, com atuação empreendedora e abrangente no atendimento às demandas da sociedade em seu campo de atuação*".

## Matriz curricular e contato com o ambiente marinho

O amplo conteúdo curricular dos cursos de graduação em Oceanografia permite ao profissional oceanógrafo atuar em diversas áreas. A existência de disciplinas básicas e profissionalizantes nas áreas de Física, Química, Geologia, Biologia e Gestão Ambiental nos cursos de graduação no país atesta esse potencial. Tal fato é reforçado pela carga horária prática que tais disciplinas têm nos cursos. Na formação do oceanógrafo, o contato direto com os ambientes naturais marinhos e costeiros o torna um profissional especialmente capacitado para atividades de amostragens de parâmetros ambientais e biológicos e para resolução de problemas de ordem prática. *Fotos: Leandro Coelho*.

O profissional oceanógrafo tem possibilidades de atuação em várias áreas ou frentes de trabalho, de acordo com os marcos legais que regulamentam o exercício desta profissão no Brasil e as Diretrizes Curriculares Nacionais para os cursos de graduação em Oceanografia.

O Parecer CNE/CES nº 224/2012 resgata e complementa as diretrizes citadas pela Lei Federal nº 11.760/2008 em seu Art. 3º, para a atuação profissional do oceanógrafo, organizando-as de forma a explicitar áreas e formas de atuação, conforme as seguintes considerações:

*I. Formular, elaborar, fiscalizar e dirigir estudos, planejamentos, projetos e/ou pesquisas científicas básicas e aplicadas que visem o conhecimento e a utilização racional do meio marinho e costeiro em todos os seus domínios, realizando direta ou indiretamente:*

*a. Levantamento, processamento e interpretação das condições físicas, químicas, biológicas e geológicas, suas interações, bem como a previsão do comportamento desses parâmetros e dos fenômenos a eles relacionados;*

*b. Desenvolvimento e aplicação de métodos, processos e técnicas de exploração, explotação, beneficiamento e inspeção dos recursos naturais;*

*c. Desenvolvimento e aplicação de métodos, processos e técnicas de preservação, saneamento e monitoramento;*

*d. Desenvolvimento e aplicação de métodos e técnicas direcionados a obras, instalações, estruturas e quaisquer outros empreendimentos;*

*e. Orientação, direção, assessoramento e prestação de consultoria;*

*f. Realização de perícias, emissão e assinatura de laudos técnicos e pareceres;*

*g. Desenvolvimento e aplicação de métodos e técnicas de gestão ambiental.*

*II. Exercer atividades ligadas à limnologia, hidrologia, hidrografia, aquicultura, processamento e inspeção dos recursos naturais de águas interiores;*

*III. Dirigir órgãos, serviços, seções, grupos ou setores de Oceanografia;*

*IV. Coordenar planos, programas, projetos e trabalhos inter e transdisciplinares na área marinha e costeira;*

*V. Desenvolver métodos de ensino e pesquisa oceanográfica;*

*VI. Conhecer, compreender e aplicar a ética e responsabilidades profissionais.*

## 3. Desafios da Oceanografia

A Oceanografia é considerada uma das profissões do futuro, tanto para garantir conservação ambiental quanto para combater a tendência de degradação ambiental que infelizmente o oceano vem enfrentando (Halpern *et al*., 2008). Nesse contexto, o oceanógrafo tem um papel central em identificar as fontes de poluentes e caracterizar a qualidade do ambiente marinho. Associado a isso, esse profissional tem também a capacidade de identificar, articular, propor e implementar ações de combate a essa degradação, seja na área de gestão pesqueira, do gerenciamento costeiro ou mesmo do controle das fontes de poluição. As possibilidades de atuação desse profissional podem estar associadas às potencialidades do oceano em prover recursos e serviços ecossistêmicos para a humanidade, oportunidades que podem ser exploradas de forma sustentável dentro da perspectiva da economia do mar, como detalharemos adiante.

Esses exemplos ilustram o papel central do oceano na Declaração da ONU intitulada "Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável"[4], lançada em 2015, que reuniu 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas. O ODS 14, denominado "*Vida na Água*", busca a "*conservação e uso sustentável dos oceanos, dos mares e dos recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável*"[5]. O ambiente marinho pode ser entendido como um eixo transversal a praticamente todos os ODS[6], como a *erradicação da pobreza* (ODS 1), *fome zero* (ODS 2), *saúde e bem-estar* (ODS 3), *igualdade de gênero* (ODS 5), *energia limpa e acessível* (ODS 7), *trabalho decente e crescimento econômico* (ODS 8), *redução das desigualdades* (ODS 10) e *ação contra a mudança global do clima* (ODS 13). Essa visão integrada do oceano foi internalizada pela Década do Oceano, que elencou dez desafios prioritários a serem superados:

***1) Combate à poluição***

O desafio é, por exemplo, realizar campanhas e movimentos para diminuir a geração e despejo de resíduos no mar, especialmente plásticos, como também promover a pesquisa sobre as origens dos poluentes e possíveis soluções para esse preocupante problema global. Os efluentes não tratados devem ser considerados como importantes poluentes, pois podem conter vários tipos de substâncias tóxicas dissolvidas, orgânicas e inorgânicas. Estes também constituem importantes geradores de poluição, que podem ocasionar efeitos visíveis na biota em pouco tempo ou podem levar a processos de bioacumulação e biomagnificação ao longo da cadeia alimentar. Os efeitos podem ser transmitidos ao longo da cadeia alimentar, atuando de uma forma "silenciosa" e provocando efeitos bioquímicos, carcinogênicos e mutagênicos nos organismos.

Foto: Leandro Coelho

[4] Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/download/50190/91863>.

[5] ONU, 2018. Glossário de termos do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 14. Brasília: ONU Brasil, 40p. Disponível em: <https://www.br.undp.org/content/dam/brazil/docs/ODS/glossarioODS14.pdf>.

[6] Le Blanc *et al*. 2017. Mapping the linkages between oceans and other Sustainable Development Goals: a preliminary exploration. DESA Working Paper 149. Disponível em: <https://www.un.org/esa/desa/papers/2017/wp149_2017.pdf>.

***2) Impactos e conservação***

É fundamental a redução de impactos e a conservação ambiental, protegendo os ecossistemas marinhos e restaurando-os, como também preconiza a Década das Nações Unidas da Restauração de Ecossistemas[7]. Para tanto, a ideia é conseguir reduzir as pressões humanas e garantir que esses lugares se mantenham saudáveis.

***3) Alimentar o planeta***

Manter a pesca e promover o cultivo de organismos marinhos de maneira sustentável é uma tarefa árdua, mas necessária para que o oceano continue auxiliando a fornecer alimentos para uma população mundial que só aumenta. Peixes e frutos do mar, como camarões e lagostas, são recursos marinhos que precisam de tempo para se desenvolver e reproduzir. Naturalmente, temos que compreender as potencialidades e os limites do oceano como fonte de alimento para a humanidade.

***4) Economia do mar***

Devemos explorar e gerenciar apropriadamente as diferentes riquezas e benefícios que o mar oferece ao ser humano, como petróleo, alimento, biotecnologia, energia limpa, turismo, esportes, atividades de lazer, recreação e até mesmo o comércio internacional. Para que todas essas atividades, ora praticadas, continuem sendo realizadas e, para que novos modelos de negócios possam ser desenvolvidos, suprindo as necessidades da sociedade, precisará haver uma mudança na forma como planejamos e executamos as atividades socioeconômicas no mar. Em especial, devemos aplicar esforços no desenvolvimento de novas tecnologias.

Foto: Leandro Coelho

***5) Oceano e clima***

Também é necessário avançar em pesquisas sobre mudanças climáticas e na melhoria da precisão dos modelos de previsão climática, lembrando a forte ligação do oceano com o clima. Dessa forma, conseguiremos contribuir para minimização dos efeitos dessas mudanças e nos adaptar melhor àquelas que já estão em curso.

[7] Para saber mais, acesse: <https://www.decadeonrestoration.org/pt-br/sobre-decada-da-onu>.

***6) Perigos associados a eventos oceanográficos.***

Alertar e prevenir a população sobre a ocorrência de eventos climáticos extremos e outros perigos relacionados ao oceano, como maremotos, ressacas, tsunamis, furacões, inundações e estiagens e suas consequências. É crucial a emissão de alertas, especialmente porque cerca de 25% da população mundial vive na zona costeira e está vulnerável a esses fenômenos. Mesmo quem vive distante do mar está sujeito às mudanças relacionadas ao oceano e ao clima.

Foto: Bruno Coelho

***7) Observação do oceano***

Estudar e monitorar desde áreas afastadas da costa e profundas, o chamado oceano aberto incluindo as grandes bacias oceânicas, até áreas costeiras, menos profundas e sobre a plataforma continental, é a base para compreendermos o comportamento do oceano como um todo. Com isso, teremos informações importantes sobre a estrutura e o funcionamento do ambiente marinho, considerando sua formação geológica e padrões de sedimentação, movimentos da água como as correntes, propriedades da água salina na composição dos oceanos e o modo de vida de seus organismos em um sistema tão diferenciado no planeta. Com esse conhecimento pode-se auxiliar a tomada de decisões sobre o que, como e quando explorar o mar dentro de uma perspectiva sustentável.

***8) Mapeamento do fundo do mar***

Uma importante lacuna no conhecimento é a falta de um mapa detalhado do relevo do fundo do mar, com seus montes submarinos e depressões e informações do leito marinho que nos auxiliem a desvendar como o oceano e o Planeta foram no passado e como são no presente. Pode ser surpreendente, mas o ser humano já mapeou a superfície da Lua, de Marte e de Mercúrio, mas ainda não tem mapas detalhados do fundo do mar e de sua evolução ao longo das eras geológicas.

***9) Compartilhamento de informações***

Disseminar as informações obtidas sobre o oceano, com base em conhecimento gerado nos itens anteriores, para que cheguem, de forma clara, a todas as pessoas e possam amparar a tomada de decisão sobre o uso e o futuro do oceano, é um enorme desafio. Para conhecer por inteiro o maior ambiente da Terra, é necessário esforços multi-, inter- e transdisciplinares, num âmbito global, promovendo a integração entre todas as áreas do conhecimento. Sem dúvida, essa é uma tarefa que necessitará promover o livre e amplo acesso às informações existentes.

***10) Oceano e você***

Por fim, é fundamental garantir que as múltiplas importâncias do oceano para o bem-estar humano e o desenvolvimento sustentável sejam reconhecidas por todos. Sabemos que uma considerável parte das pessoas vive próxima ao litoral e já conhece, aproveita e atribui valor às riquezas provenientes do oceano. Mas, precisamos que essa noção de importância se espalhe pelo mundo todo, inclusive para que pessoas que não tenham contato com o mar consigam conhecê-lo, compreendê-lo e valorizá-lo. A educação e a difusão do conhecimento são fundamentais para essa ação.

## 4. Caminhos para a atuação profissional

Todos os aspectos mencionados previamente descortinam-se à frente dos oceanógrafos como caminhos de materialização da vida profissional. Portanto, o uso sustentável do oceano é um importante pano de fundo para a atuação do oceanógrafo, o qual pode trabalhar na produção, disseminação ou uso do conhecimento.

Em linhas gerais, a produção do conhecimento está ligada à pesquisa científica. Esta é, predominantemente, realizada em instituições de ensino superior ou instituições de pesquisa públicas ou privadas, embora muitas Organizações Não Governamentais também estejam atuando nessa frente.

A capacitação para seguir esse caminho inicia-se antes do curso de graduação, com aspectos relacionados à curiosidade, visão crítica e raciocínio lógico, podendo ser estimulados no âmbito familiar, na visitação a ambientes de difusão de ciência como museus e feiras de ciências ou ao longo dos ensinos básico, fundamental e médio. Estímulos para aprofundamento de conhecimentos podem ser adquiridos por meio de bolsas de pré-iniciação científica, que aproximam os estudantes do Ensino Médio do ambiente universitário e por programas como "Mergulho na Ciência"[8], realizado pelo Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo.

Uma vez definida a vocação de um estudante para o estudo do oceano, Cursos de Graduação em Oceanografia e Oceanologia são oferecidos no país[9], nos quais as habilidades dos estudantes são exercitadas em um conjunto de disciplinas variadas, com muitas aulas práticas, culminando com um trabalho de conclusão de curso. Este possibilita a oportunidade de os estudantes amadurecerem o conhecimento recebido, desenvolvendo um projeto sob orientação de um docente.

Durante seus estudos, destacam-se os programas de iniciação científica, no formato voluntário ou incentivados por bolsas do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) vinculadas ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundações de Amparo à Pesquisa dos Estados ou mesmo internas às instituições universitárias.

[8] Para saber mais, acesse: <https://www.mergulhonaciencia.com/>.

[9] Para saber mais sobre os cursos de Oceanografia e outras ciências do mar, acesse: <https://cienciasdomarbrasil.furg.br/ensino/graduacao/graduacao-oceanografia>.

A consolidação da formação de pesquisadores ocorre em nível de pós-graduação, considerando os cursos de mestrado (*stricto sensu*) e doutorado, bem como os programas de pós-doutoramento. Esses programas possuem metas e estratégias que contribuem significativamente para a formação de um profissional com uma visão científica madura, que se soma aos esforços de produção de conhecimento científico por meio das dissertações e teses defendidas.

A absorção de doutores com formação em Oceanografia no mercado de trabalho no Brasil tem variado ao longo do tempo em função da demanda advinda da implementação de políticas governamentais, dos órgãos de fiscalização, laboratórios e centros de pesquisa, bem como da ampliação do número de universidades no país que abrangem áreas ambientais. Existem, ainda, diversas oportunidades de engajamento em instituições de ensino e pesquisa no exterior. Dentre as linhas de pesquisas predominantes, destacam-se a compreensão da estrutura e do funcionamento de ecossistemas marinhos, o desenvolvimento de métodos e técnicas de estudos ambientais em laboratório ou campo, o uso de simulações computacionais e inteligência artificial, a avaliação das condições ambientais, a identificação de soluções para os problemas ambientais e o desenvolvimento tecnológico e inovação. A atuação em pesquisa é fortemente associada à docência nas universidades brasileiras, assim como à realização de atividades de cultura e extensão.

Há, ainda, a formação complementar dada por cursos de Extensão , inclusive durante a graduação, e cursos de Especialização (*Lato sensu*), que só podem ser acessados após a graduação, como é o caso de cursos de Especialização, os quais têm sido regularmente oferecidos pelas universidades. No caso do IOUSP tem-se o exemplo do curso de Especialização, *Medição, Análise, Previsão e Modelagem do Nível do Mar*.

Complementando, há, também, na modalidade de Extensão, cursos de Difusão, Atualização do conhecimento e Treinamento oferecidos à comunidade. Neste caso, o curso de Difusão "Noções de Oceanografia", ministrado semestralmente pelo IOUSP, merece destaque tanto pela regularidade em seu oferecimento, pelo grande número de participantes por edição (200) e pelas diferentes origens de seu público, como por estar fomentando a redação deste livro. Com um leque de possiblidades de formação e de complementação profissional e de conhecimento, o oceanógrafo pode assumir importante papel na disseminação do conhecimento e na formação de uma cultura oceânica na sociedade.

Como discorre Cordani *et al*. (2018), a Oceanografia apresenta um acentuado aspecto multi- e interdisciplinar em suas abordagens físicas, químicas, biológicas e geológicas ao formar o profissional com conhecimento de seu principal objeto de estudo, o oceano e mares costeiros, ligados aos fenômenos de média e larga escalas, associados às mudanças globais e climáticas e aos recursos vivos e não vivos. Porém, deve ser feito investimento na ampliação do leque de formação associado aos sistemas de interface como estuários e sistemas límnicos, nos quais notáveis alterações antrópicas afetam o oceano, bem como aprofundamento da relação com as ciências sociais.

Foto: Bruno Coelho

O oceanógrafo pode atuar na docência universitária, tratando de temas específicos relacionados à sua área de formação, ou mesmo em atividades de extensão universitária. Ainda nesse contexto, conforme previamente mencionado, cursos de especialização, ampliam os horizontes da atuação do oceanógrafo, agregando abordagens que permitem colocar o oceano em outros contextos, igualmente importantes para a busca da sua sustentabilidade.

Exemplos relacionam-se ao jornalismo científico, à divulgação científica e às atividades não formais de educação oceânica ou ambiental. Essas últimas serão tratadas, posteriormente, com um maior detalhe, sob o conceito de Cultura Oceânica (do inglês, *Ocean Literacy*). O destaque deve ser dado para a integração do conhecimento sobre o oceano para tomadores de decisão na elaboração de políticas públicas. Não basta que exista um conhecimento, mas é necessário que este seja democratizado, capilarizado na sociedade e traduzido em uma linguagem acessível e pouco técnica, com vistas à popularização da ciência.

O uso ou aplicação do conhecimento pode ser feito com diversas finalidades, além daquelas já mencionadas previamente. Em especial, podem ser citadas as atividades de consultoria[10] e assessoria[11] ambiental. Essas atividades constituem uma forte vertente assimiladora de egressos dos cursos de graduação em oceanografia. Em síntese, os profissionais especializam-se na realização de estudos específicos em contextos como aqueles voltados à "*Avaliação de Impacto Ambiental*". Essa formação complementar pode se dar tanto em cursos de especialização, quanto em programas de pós-graduação. Vários profissionais, no entanto, acabam complementando seu conhecimento com a vivência profissional. De fato, há uma gama de horizontes possíveis, incluindo a atuação em Organizações Não Governamentais (ONGs). Estas podem promover mudanças nos processos que degradam o oceano de modo a protegê-los ou potencializar ações que estejam alinhadas com o desenvolvimento de inovação tecnológica e/ou com o desenvolvimento socioambiental, com um viés fortemente aplicado às demandas da sociedade com vistas ao desenvolvimento sustentável. Empresas, em especial *startups*, podem corresponder a um espaço promissor a ser ocupado pelos oceanógrafos com perfil empreendedor.

Há também profissionais que irão atuar na gestão ambiental, incorporando o conhecimento científico na tomada de decisão. A atuação nesta área se configura como transversal, podendo ser aplicada a diferentes setores da sociedade: público, privado e terceiro setor. Esta se constitui no processo de articulação das ações dos diferentes agentes sociais e ambientais que atuam em um dado espaço. Essencialmente, esta área de trabalho visa garantir, com base em princípios e diretrizes previamente acordados e definidos junto à sociedade, a adequação dos meios de exploração dos recursos naturais, econômicos e socioculturais de acordo com as especificidades do meio ambiente. No âmbito empresarial, o profissional deve buscar o estabelecimento de práticas de gestão compatíveis com os princípios da sustentabilidade. Neste sentido, deve propor e implementar certificações, considerando, por exemplo, as diretrizes da Organização Internacional para Padronização (do inglês, *International Organization for Standardization*; ISO 14001), e sistemas de gestão e de responsabilidade social e ambiental.

Além das formas de atuação do profissional oceanógrafo, é importante explicitar seus principais espaços de atuação, que correspondem ao setor público, iniciativa privada, terceiro setor e organismos internacionais. Na sequência, são feitos breves comentários sobre cada um deles.

[10] Consultoria: consiste em realizar análises para obtenção de um conjunto de dados, avaliá-los, emitir parecer e realizar considerações sobre os aspectos ambientais.

[11] Assessoria: consiste em receber um conjunto de dados já analisados, avaliá-los, emitir parecer e realizar considerações sobre os aspectos ambientais, continuidade e necessidade de informações adicionais.

### 4.1 Setor público

O Setor Público representa uma parcela importante do mercado de trabalho para o oceanógrafo e permite o desempenho de diferentes funções. É possível ainda prestar consultoria ou assessoria temporária a órgãos públicos, assim como promover trabalhos conjuntos com ONGs e universidades.

**Exemplos de órgãos onde o oceanógrafo pode atuar**

- Ministério do Meio Ambiente e seus órgãos vinculados: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio);
- Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações e seus órgãos vinculados, como o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE);
- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento;
- Ministério de Minas e Energia;
- Ministério da Marinha;
- Serviços de Hidrografia;
- Secretarias Estaduais e Municipais de Meio Ambiente, Aquicultura e Pesca e/ou de Planejamento e Obras; e
- Unidades de Conservação federais (gerenciadas pelo ICMBio), estaduais ou municipais.

Estação Ecológica Tupinambás e Refúgio de Vida Silvestre do Arquipélago de Alcatrazes (ICMBio). *Foto: Leandro Coelho.*

No Setor Público situam-se muitas das principais universidades do país, nas quais a atuação acadêmica, dedicada à pesquisa científica e ao ensino e extensão universitárias, é o foco do oceanógrafo. Ainda na esfera governamental, podemos mencionar os Ministérios Públicos Federal e Estadual, além do próprio Poder Judiciário, que demandam laudos e perícias para embasar ações contra a degradação do meio ambiente. Essas atividades podem ser realizadas por profissionais habilitados[12], tanto a partir da iniciativa privada como pela academia, via atividades de consultoria e assessoria.

[12] Ver requisitos para obtenção de Declaração de Habilitação Técnica (DHT) junto à Associação Brasileira de Oceanografia (AOCEANO): <https://www.aoceano.org.br/>.

### 4.2 Iniciativa Privada

Na Iniciativa Privada, a atuação do oceanógrafo é igualmente diversificada. A aquicultura e a pesca, ambas na área biológica e biogeoquímica, e a engenharia oceânica, nas áreas de Física, Química e Geologia, são exemplos de setores que representam um expressivo potencial de emprego para oceanógrafos. Na Oceanografia Química, a solução de problemas relacionados à poluição ambiental, biogeoquímica e bioquímica marinha em áreas costeiras é uma das formas de atuação profissional. Tal vertente pode envolver empresas dos mais variados portes e setores de atuação, como óleo e gás, portos, pesca, aquicultura, saneamento, mineração, energias alternativas e turismo.

A experiência embarcada, necessária à formação do profissional é oferecida durante o curso de graduação, capacita o oceanógrafo a atuar, por exemplo, em navios nacionais ou estrangeiros de empresas de pesca e aquisição de dados geofísicos, atividades portuárias, bem como em plataformas de extração de petróleo *offshore*, entre outros. As atividades embarcadas promovem a familiarização com as etapas de planejamento de atividades de campo em cruzeiros oceanográficos e com os tipos de coletas no ambiente marinho, em diferentes profundidades e distanciamento da costa, viabilizando registros de dados oceanográficos a partir do uso de instrumentação oceanográfica. Há, também, treinamento em navegação, marinharia, procedimentos gerais a bordo e salvatagem.

A formação do oceanógrafo possibilita, portanto, a atuação na exploração de recursos marinhos de forma consciente e sustentável, bem como a participação em propostas de criação Unidades de Conservação marinhas. Para tal, pode conciliar atividades embarcadas com monitoramento ambiental, gestão de recursos e territórios marinhos, gestão de resíduos, desenvolvimento/operação e testes de equipamentos/instrumentos oceanográficos, entre outros.

#### Consultoria ambiental

A necessidade do licenciamento ambiental e os princípios de proteção ambiental que surgiram em função dos crescentes índices de degradação do ambiente marinho levaram à formação de empresas de consultoria ambiental. Basicamente, o papel de tais empresas consiste em assessorar tecnicamente empresas contratantes que desejam realizar empreendimentos ou atividades na região costeira e ou oceânica. Neste contexto, o oceanógrafo pode atuar em diferentes frentes, planejando e executando Estudos de Impacto Ambiental (EIA), monitorando parâmetros oceanográficos, produzindo laudos técnicos e realizando capacitação e atividades de educação ambiental.

Além das variadas opções de trabalho na iniciativa privada, destaca-se o potencial empreendedor dos oceanógrafos, criando empresas ou planos de negócios que podem se situar no espectro empresarial tradicional ou como negócios sociais[13]. Tais negócios despontam como caminhos para solucionar problemas, sendo financeiramente auto sustentáveis, mas sem distribuição de lucros, os quais são reinvestidos no negócio que, embora aparentemente tradicional, possui uma missão essencialmente social.

A maioria das universidades privadas tem um direcionamento mais voltado para o ensino de graduação, mas também têm empregado oceanógrafos como pesquisadores. Como mencionado anteriormente, para percorrer esse caminho é necessário, normalmente, buscar uma formação complementar em nível de Pós-Graduação, realizando mestrado e doutorado.

[13] Para saber mais, acesse: <https://www.sistemabbrasil.org/>.

### 4.3 Terceiro Setor

O Terceiro Setor compreende Organizações Não Governamentais (ONGs), Organizações da Sociedade Civil de Interesse Público (OSCIPs) ou Fundações de direito privado e apresenta oportunidades variadas de atuação para o oceanógrafo.

**Oceanógrafos no terceiro setor**

Como exemplo da atuação do profissional oceanógrafo no terceiro setor, pode-se considerar o Ensino não Formal que, frequentemente, visa ações de educação ambiental e de transformação da sociedade. Tais organizações podem ainda desempenhar outras atividades, nas quais a atuação do oceanógrafo é essencial.

Neste contexto, há de citar a participação na elaboração e execução de projetos socioambientais, voltados, por exemplo, para a conservação e proteção da biodiversidade e desenvolvimento de alternativas de renda sustentáveis para comunidades tradicionais, além de ativismo político para defesa de interesses difusos.

Na prática, o Terceiro Setor tem tido um papel crucial na conservação marinha e assimilado um amplo contingente de oceanógrafos. Vale destacar que há a necessidade do desenvolvimento de habilidades específicas para atuar no Terceiro Setor, como o empreendedorismo socioambiental e técnicas de escrita, gestão e avaliação de projetos.

Há inúmeras oportunidades de estágio no decorrer dos cursos de graduação, bem como de trabalho para os egressos. No Brasil há Fundações e ONGs de grande porte e muito conhecidas, que têm aberto frentes de atuação no ambiente marinho como o *World Wildlife Fund For Nature* (WWF) ou *Fundo Mundial para a Natureza*, *Oceana*, *Greenpeace*, *SOS Mata Atlântica*, *Fundação Grupo Boticário*, *Conservação Internacional*, *The Nature Conservancy*, *World Animal Foundation*, *Route Brazil* e *Mar Brasil*. Há outras instituições de caráter mais local, mas que também têm atuado na temática marinha, como *Instituto Costa Brasilis*, *Instituto Ecofaxina*, *Instituto Argonauta*, *Instituto Brasileiro de Biodiversidade* (BrBio), *Instituto Coral Vivo*, *Instituto Ecológico Aqualung*, dentre inúmeras outras (Menck, 2020). No âmbito internacional há uma infinidade de caminhos para atuação no Terceiro Setor que podem ser pesquisados em função de suas especificidades e dos variados interesses que os oceanógrafos podem aspirar.

### 4.4 Organismos Multilaterais

Os diferentes modelos de atuação profissional no país são aplicáveis ao exterior. Para tanto é fundamental que os estudantes interessados busquem caminhos para desenvolver fluência no idioma da instituição ou do país pretendido. Domínio do inglês é um aspecto básico. Organismos internacionais, como o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (ONU Ambiente), Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO) e Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), são exemplos de locais onde a agenda do oceano tem sido fortalecida e ampliada, tendo possibilidade de assimilação de oceanógrafos.

A *UN-Oceans* é um exemplo de articulação entre agências multilaterais que se relacionam direta ou indiretamente com o oceano. A Tabela 1 ilustra a diversidade de abordagens possíveis para a atuação do oceanógrafo, por meio de programas de estágio e de contratação de profissionais.

**Tabela 1.** Atividades desempenhadas pelos programas, instituições e agências multilaterais participantes do mecanismo de cooperação das Nações Unidas para os oceanos, UN-Oceans. *Fonte: www.unoceans.org*.

| Sigla | Nome | Missão |
|---|---|---|
| CDB | Convenção da Diversidade Biológica | Promover a gestão integrada de áreas costeiras e oceânicas, o uso sustentável dos recursos vivos, a proteção de áreas costeiras e oceânicas, a maricultura e a prevenção de espécies invasoras |
| CTED | Diretoria Executiva do Comitê Antiterrorismo | Prevenir e combater crimes e ações terroristas realizados no mar |
| ESCAP | Comissão Econômica e Social para Ásia e Pacífico | Coordenar a implementação dos desdobramentos da Rio +20, incluindo ações para o desenvolvimento sustentável dos oceanos |
| FAO | Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura | Assegurar a segurança alimentar garantindo acesso regular e suficiente ao alimento de qualidade |
| IAEA | Agência Internacional de Energia Atômica | Melhorar o conhecimento sobre a radioatividade marinha |
| ILO | Organização Internacional do Trabalho | Possibilitar oportunidades para obtenção de trabalho decente, produtivo, livre, equitativo, seguro e digno |
| IMO | Organização Marítima Internacional | Melhorar a segurança marítima e prevenir a poluição por navios |
| IOC | Comissão Oceanográfica Intergovernamental (UNESCO) | Promover a cooperação internacional e a coordenação da pesquisa marinha, serviços, sistemas de observação, gerenciamento de informação e dados, mitigação de catástrofes e formação de recursos humanos para conhecer e melhor gerenciar os recursos marinhos |
| ISA | Autoridade dos Fundos Marinhos | Regulamentar a exploração de recursos no leito oceânico em áreas além das jurisdições nacionais |
| DESA | Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais | Promover e coordenar a implementação da agenda de desenvolvimento sustentável das Nações Unidas |
| DOALOS | Divisão de Assuntos Oceânicos da Lei sobre o Direito do Mar | Promover a aceitação e a aplicação consistente e racional da Lei sobre o Direito do Mar |
| OHRLLS | Escritório de Altos Representantes de Países Pouco Desenvolvidos, Sem Acesso ao Mar e Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento | Possibilitar condições para ampliar e fortalecer a participação e a manifestação de nações frágeis e marginalizadas |
| ODA | Escritório para Assuntos relacionados ao Desarmamento | Promover o desarmamento e a não proliferação de armas convencionais e de destruição em massa |
| UNCTAD | Conferência das Nações Unidas sobre Comércio e Desenvolvimento | Articular de forma integrada o comércio, o desenvolvimento e temas relacionados à área das finanças, tecnologia, investimento e desenvolvimento sustentável |
| UNDP | Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento | Conectar países para o compartilhamento de conhecimento, experiências e recursos para a melhora da qualidade de vida |
| UNEP | Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente | Promover liderança e parcerias no cuidado com o meio ambiente, inspirando, informando e criando condições para a melhoria da qualidade de vida sem comprometer as gerações futuras |
| UNESCO | Organização das Nações Unidas para Educação, Ciência e Cultura | Encorajar a paz internacional e o respeito universal aos direitos humanos promovendo a colaboração entre nações |
| UNHCR | Escritório dos Altos Comissários das Nações Unidas para os Refugiados | Promover a proteção internacional e encontrar soluções para refugiados |
| UNIDO | Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial | Promover o emprego, a economia competitiva e um ambiente sadio |
| UNU | Universidade das Nações Unidas | Fortalecer as capacidades institucionais para garantir o uso sustentável dos recursos aquáticos em países em desenvolvimento |
| WMO | Organização Meteorológica Mundial | Fornecer informações científicas sobre o clima global |
| WORLD BANK | Banco Mundial | Combater a pobreza e melhorar as condições de vida do mundo em desenvolvimento |

## 5. Mas, por onde começar?

As oportunidades de trabalho não aparecem de uma hora para outra. Na verdade, muitas vezes o caminho passa por construir uma relação de confiança na qual o oceanógrafo possa demonstrar ser o "*profissional que o empregador sempre precisou, mas que não sabia que existia*"[14].

Foto: Leandro Coelho

Para começar é fundamental que os estudantes comecem a pensar, desde o início da graduação, com o que e onde desejam trabalhar. Os estudantes devem conversar com professores, colegas, egressos e profissionais em atividade de forma a ampliar o leque de caminhos de formação e atuação profissional. Tais iniciativas são fundamentais, pois com uma visão de futuro, ainda que possa ser passível de mudança, o estudante adquire autonomia e maturidade e irá buscar complementar sua formação em disciplinas de outras unidades da universidade e oportunidades extramuros para se capacitar em uma dada temática. Basicamente, isso envolve desde um projeto de iniciação científica nos laboratórios da própria universidade até um universo de oportunidades fora da academia, ainda durante a sua formação. Há inúmeros programas de estágios remunerados em órgãos públicos e em empresas, especialmente se o curso que está sendo realizado possuir Estágio Obrigatório em seu Projeto Político Pedagógico.

A troca de experiências é importante. Por exemplo, o IOUSP recebe estudantes em estágio obrigatório de outras Universidades e apoia a realização de estágios de seus estudantes em outros órgãos. Essa atividade está amparada pela Lei do Estágio[15] e possui regras muito claras para beneficiar tanto empresas quanto a formação profissional de estudantes. No âmbito federal, estadual e municipal pode haver oportunidades de estágio ainda durante o curso de graduação nos vários órgãos da administração pública.

Há também oportunidades de voluntariado em diversos tipos de instituições, como ONGs e Unidades de Conservação, tanto federais[16] quanto estaduais[17]. O mesmo procedimento é tradicionalmente realizado em projetos de conservação marinha ligados ao ICMBio, como TAMAR (Tartaruga Marinha), Golfinho Rotador e Peixe-Boi Marinho.

[14] Expressão atribuída ao Prof. Moysés Gonzales Tessler, um dos criadores do curso de graduação do IOUSP.

[15] Lei Federal 11.788/2008.

[16] <https://ava.icmbio.gov.br/portal/sejaumvoluntario>.

[17] <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/programadevoluntariado/>.

No âmbito internacional há diversas oportunidades de estágio, voluntariado e emprego. Uma importante fonte de informações para esse caminho é o diálogo com professores e egressos dos cursos, mas também com os escritórios de cooperação acadêmica internacional, como a Agência USP de Cooperação Acadêmica Nacional e Internacional (AUCANI) na Universidade de São Paulo[18]. Outras fontes correspondem às redes sociais e páginas na internet das instituições de interesse. Por exemplo, há notificações periódicas sobre oportunidades no website da UNESCO[19,20], Comissão Oceanográfica Intergovernamental[21], ONU Ambiente[22], Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura[23], Autoridade dos Fundos Marinhos[24] e da própria Organização das Nações Unidas[25,26].

Independentemente do caminho a ser seguido, é fundamental que o profissional oceanógrafo tenha uma formação sólida em conceitos e ferramentas em seu curso de graduação. A proficiência em língua inglesa e outras línguas sempre abre muitas portas. Dentre habilidades e competências relevantes para uma ampla capacitação do profissional oceanógrafo para o mercado de trabalho, podemos destacar:

- Valorização do conhecimento;
- Busca e avaliação crítica de informações;
- Comunicação escrita;
- Comunicação oral;
- Comunicação em língua inglesa;
- Cultura digital;
- Organização do raciocínio e visão sistêmica;
- Análise de dados e raciocínio numérico abstrato;
- Raciocínio geo-espacial;
- Profissionalismo;
- Planejamento e organização;
- Trabalho em equipe;
- Uso de recursos de informática e programação;
- Liderança e cooperação;
- Ética profissional; e
- Capacidade de avaliação de desempenho.

[18] <http://www.usp.br/internationaloffice/>.

[19] <https://en.unesco.org/careers/>.

[20] <https://careers.unesco.org/go/Internships-and-volunteers/783902/>.

[21] <http://ioc.unesco.org/employment>.

[22] <https://www.unenvironment.org/work-with-us>.

[23] <ttp://www.fao.org/employment/home/en/>.

[24] <https://www.isa.org.jm/index.php/training>.

[25] <https://www.un.org/Depts/los/index.htm>.

[26] <https://www.un.org/en/>.

Nem todas essas habilidades são necessariamente e explicitamente trabalhadas nos cursos de graduação, mas podem ser desenvolvidas e fortalecidas em oportunidades de formação complementares ou cursos especializados oferecidos pelas universidades ou por outras instituições. As experiências de trabalho ainda durante o curso de graduação são igualmente importantes.

O recado aqui é: *aproveite o máximo que puder durante seu tempo de formação com atividades complementares para sua maior capacitação, olhando em volta e observando o que está disponível para o seu máximo aproveitamento*.

Como em praticamente qualquer outra profissão da atualidade, o estudante de Oceanografia deve procurar, dentro de sua vocação e perfil, estabelecer parcerias e conhecer as diferentes áreas em que pode atuar. Recomenda-se, fortemente, ao estudante participar de eventos de diferentes naturezas, como feiras científicas e de negócios, pesquisar sobre possibilidades de estágios em empresas e universidades e formar uma rede de contatos de relevância. Atualmente, o *networking* é valorizado como uma das mais poderosas ferramentas para a inserção profissional.

Algumas informações adicionais sobre formação e mercado de trabalho estão disponíveis no Portal Ciências do Mar Brasil[27], vinculado ao Comitê Executivo para a Formação de Recursos Humanos em Ciências do Mar (PPG-Mar) da Subcomissão para o Plano Setorial para os Recursos do Mar (PSRM):

Além dessas fontes, diversos materiais de divulgação auxiliam na visualização da atuação do oceanógrafo, como o programa "Seu curso USP" da Pró-Reitoria de Graduação da Universidade de São Paulo[28], a Associação Brasileira de Oceanografia (AOCEANO)[29], a Cátedra UNESCO para Sustentabilidade do Oceano[30] e a página do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo[31].

## 6. Temas emergentes para atuação profissional

### 6.1 Cultura oceânica – *Ocean Literacy*

Dados os desafios apresentados pela Década do Oceano, é fundamental que sejam ampliadas significativamente as ações de comunicação e divulgação do ambiente marinho e do conhecimento científico sobre este, mostrando sua importância no dia a dia de cada um de nós.

Nesse contexto, a COI/UNESCO, baseada em duas décadas de estudos pedagógicos sobre a relação do oceano com o ensino formal em países como Estados Unidos, Portugal e Irlanda, elaborou um kit pedagógico para explicitar os conhecimentos básicos que qualquer cidadão do planeta precisaria conhecer[32]. Estes foram estruturados em sete princípios fundamentais da Cultura Oceânica (do Inglês *Ocean Literacy*).

[27] <https://cienciasdomarbrasil.furg.br/grupos-de-trabalho/grupos-de-trabalho-mercado-de-trabalho>.

[28] <http://seucursousp.prg.usp.br; https://youtu.be/900n3NzRr0I>.

[29] <https://www.aoceano.org.br/>.

[30] <http://catedraoceano.iea.usp.br/>.

[31] <https://www.io.usp.br/>.

[32] Santoro *et al*. 2020. Cultura Oceânica para todos - Kit pedagógico. IOC/Unesco & Unesco Venice Office, Paris (IOC Manuals and Guides), 136 p. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373449>.

Os princípios da cultura oceânica, já suficientemente amadurecidos e internalizados internacionalmente, também têm sido praticados no Brasil em ações junto a escolas e a comunidade pelas Universidades. Como exemplo, o IOUSP vem realizando por anos atividades educativas complementares, não formais, junto a escolas por meio de programas do Museu Oceanográfico[33].

Há também um setor de material didático para empréstimos, constituído de organismos marinhos preservados e com correspondente fichas técnicas. O conjunto tem sido disponibilizado aos professores com a finalidade de apoiar suas aulas práticas. No interior do Museu há um espaço "sala de aula", junto à "Ciência na Esfera" com seções de filmes da NOAA em projeções tridimensionais sobre uma esfera flutuante.

O IOUSP participa ativamente da Semana Nacional de Ciência e Tecnologia e da Feira "USP e as Profissões" divulgando conhecimento, além de ter exposições itinerantes voltadas à divulgação da Oceanografia e do oceano em diferentes cidades, como o Programa "enTenda o Lixo"[34]. Adicionalmente, o Instituto participa em diversos eventos e atividades em outras cidades, tais como cursos de formação continuada para professores do ensino fundamental e médio e atividades nas escolas, em parques e áreas de preservação costeira e marinha.

De toda forma, deve-se investir mais esforços na ampliação da divulgação do que o oceano representa para o Planeta e para a humanidade. Assim, diferentes estratégias precisam ser colocadas em prática por profissionais capacitados para essa finalidade. Uma estratégia é inserir o tema Oceanografia nos currículos dos ensinos fundamental e médio no país. Para tanto, são necessárias articulações com o Ministério da Educação e com as Secretarias Estaduais de Educação, para que a temática possa ser debatida e destacada na Base Nacional Comum Curricular (BNCC) e nos parâmetros curriculares estaduais.

[33] <https://www.io.usp.br/index.php/infraestrutura/museu-oceanografico/apresentacao.html>.

[34] Instagram: @entendaolixo.

De maneira complementar, dado o caráter transversal que o oceano tem na sociedade, a internalização do tema nos cursos de licenciatura mostra-se premente, independentemente da área específica de formação do professor: biologia, geologia, física, química ou mesmo ciências humanas, uma vez que todas as disciplinas interagem em diferentes formas com o oceano. Devemos, ainda, considerar a formação de profissionais que se relacionam direta ou indiretamente com o oceano, como analistas ambientais, juízes, promotores e procuradores de justiça. Esses últimos são responsáveis pelo cumprimento das leis ambientais e pela garantia de interesses difusos.

Outra frente corresponde ao papel que a mídia, nas mais variadas formas e veículos, pode ter na comunicação sobre o oceano. O jornalismo científico é uma importante área em que os estudantes podem se especializar, havendo incentivo de bolsas para essa frente de atuação. Assim, zelar para que a divulgação seja correta nos meios de comunicação é fundamental para que a sociedade entenda o papel do oceano em sua vida.

Por fim, é necessário que haja condições institucionais para a formação de profissionais competentes, engajados e éticos, para tratar diretamente dessa temática, tanto em nível de graduação quanto de pós-graduação. Há também a premência de uma formação adicional, diferenciada e voltada para uma inserção e um posicionamento social desses profissionais. Não basta que compreendam a estrutura e o funcionamento do oceano, eles devem compreender a relação entre o oceano e a sociedade e contribuir para promoção do desenvolvimento sustentável.

Dentro desse contexto, a Cátedra UNESCO para Sustentabilidade do Oceano[35] foi criada em 2018, junto ao Instituto de Estudos Avançados e ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como uma forma de promover a agenda do oceano. A cátedra pretende, dentre outras ações, disseminar conhecimentos sobre o oceano e estimular a realização de pesquisas aplicadas às demandas da sociedade.

## 6.2 Economia do mar, empreendedorismo e inovação

De forma livre, o termo "Economia Azul" tem sido usado para designar novas formas de exploração dos bens e serviços derivados dos oceanos. Também denominado de crescimento azul (*blue growth*), ou economia do mar, compreende "*atividades econômicas que apresentam influência direta do mar, incluindo as atividades econômicas que não tem o mar como fonte de matéria-prima, mas que são realizadas nas suas proximidades*".

A "Economia Azul" considera uma visão mais abrangente e integrada da relação entre a sociedade e o meio ambiente, conforme destaca Pauly (2010) em seu livro "*The Blue Economy*"[36]. Como exemplo, compreende que os resíduos gerados pelas atividades humanas possam ser utilizados para gerar alimento, energia e empregos. Ainda, valoriza o papel de empreendedores locais, pautados pelo desenvolvimento de tecnologias simples e limpas, cujas ações podem agregar valor aos bens e serviços disponíveis e gerar empregos para beneficiar suas comunidades, dentro de um contexto de menor desperdício de energia.

Diversas iniciativas têm sido propostas e aplicadas com vistas a explorar, direta ou indiretamente, os bens e serviços providos pelo oceano. Seus objetivos consistem em reduzir os impactos ambientais e ampliar os benefícios para a sociedade, por meio da aproximação estratégica entre ciência e a gestão.

[35] <http://catedraoceano.iea.usp.br/>.

[36] Pauly, G. 2010. The Blue Economy: 10 Years, 100 Innovations, 100 Million Jobs. Paradigm Pubns, 336 p.

## Pesca e Aquicultura

A produção de alimento é um importante desafio mundial e a provisão de alimento, historicamente realizada pela pesca, vem sofrendo de problemas derivados da sobre-explotação dos estoques pesqueiros e da degradação ambiental.

Há, portanto, a demanda por soluções inovadoras que ampliem a capacidade de avaliação dos estoques e que tornem a pesca sustentável. Paralelamente, a maricultura, isto é, o cultivo de organismos marinhos, tem vasto potencial de produção de alimentos e insumos, tanto para o consumo humano como para criação animal. *Foto: Leandro Coelho*.

Ainda dentro do contexto da exploração de recursos marinhos, existe um potencial gigantesco de oportunidades de negócios, seja para atividades tradicionais, como exploração de óleo e gás e outros recursos minerais, seja para atividades potenciais, como energias renováveis e biotecnologia. Os exemplos vão de tecnologias para exploração segura de óleo e depósitos polimetálicos, como nódulos e crostas, até prospecção, isolamento e produção de compostos bioativos derivados da biodiversidade marinha, com aplicações voltadas para a produção de alimentos, cosméticos e medicamentos.

Há também um imenso espaço para ações de desenvolvimento socioeconômico na costa, especialmente relacionadas às atividades de recreação e turismo, incluindo mergulho, pesca esportista, iatismo e mesmo aquariofilia. Iniciativas para certificação de praias, quiosques e restaurantes têm sido criadas para melhorar a qualidade dos serviços oferecidos. Inovações, como o turismo de base comunitária, têm sido desenvolvidas para valorizar a cultura de comunidades tradicionais. Associado a isso, é fundamental garantir a qualidade ambiental e métodos adequados que permitam avaliá-la de forma precisa e rápida. O desenvolvimento desses métodos e de equipamentos para essas finalidades é cada vez mais necessário.

A economia do mar passa também pelo desenvolvimento de ciência, como monitoramento do oceano ou de atividades nele realizadas a partir, por exemplo, de observações por satélites. Isso considera o acoplamento e o aprimoramento de sistemas de observação e comunicação em tempo real que permitam, por exemplo, localização e monitoramento de embarcações. Tais aspectos são importantes para a segurança da navegação e apresentam interesse para companhias de seguro e, também, para nossa soberania em águas sob jurisdição nacional.

A economia do mar demanda, portanto, abordagens inovadoras e disruptivas, que fortaleçam colaborações existentes e criem novas parcerias e/ou aplicações. Importante é considerar o uso de ferramentas de ponta, como satélites, supercomputadores e robótica, evidenciando, por exemplo, as vastas possibilidades de integração da Oceanografia com o campo das engenharias. Esses campos devem convergir para atender necessidades crescentes dos mercados de trabalhos, propiciando a criação de empregos de alta qualidade e diversificando a economia. Complementando, deve-se considerar, inclusive, o desenvolvimento de novos produtos, negócios e serviços, bem como novas interfaces com os usuários, valendo-se do potencial das redes sociais, tecnologia da informação e inteligência artificial.

Por fim, no âmbito do empreendedorismo, destaca-se também o mercado crescente das chamadas *startups*, isto é, empresas de jovens talentos em áreas que buscam a inovação e soluções que promovam eficiência e desenvolvimento de algum setor, sobretudo dos emergentes. Nesse sentido, muitos profissionais empregam seus conhecimentos pesquisando e desenvolvendo suas ideias para o avanço de tecnologia, de forma prática e dinâmica. Para tanto, é possível obter recursos de empresas privadas e de órgãos de fomento públicos. Assim, os profissionais podem atuar como empresários, já nucleando ou incubando empresas desde os cursos de graduação, tanto vinculadas às empresas juniores existentes quanto criando iniciativas com viéses específicos. De forma geral, embora haja várias formas de atuar em Oceanografia, muitas já conhecidas e consolidadas, ainda há uma infinidade a desbravar.

## 6.3 Oceanografia Social

Atualmente, a Oceanografia pode ser resumida pelo entendimento de processos que governam os fenômenos que observamos no oceano e que interagem com os ambientes contíguos, a litosfera e a atmosfera. Esses processos incluem as diferentes áreas da Oceanografia, que se refletem no perfil do oceanógrafo e que lhe permitem compreender o oceano de uma forma abrangente e integrada para buscar soluções aos problemas diagnosticados.

Entretanto, é preciso desenvolver cada vez mais a capacidade desses profissionais incorporarem a complexidade e as diferentes dimensões dos problemas enfrentados pelos sistemas socioecológicos, como o oceano. Ou seja, é fundamental integrar o conhecimento sobre o funcionamento dos sistemas naturais e sociais na busca da sustentabilidade do oceano. Um dos primeiros livros estudados pelos oceanógrafos de outrora era "O homem e o mar" que ficou um pouco abandonado. Atualmente, o ser humano volta a ganhar um papel de importância nos estudos oceanográficos, tanto no sentido das ameaças que ele representa como nas demandas e necessidades que possui em relação ao mar.

A Oceanografia deve, portanto, lançar um olhar para o futuro, um olhar que esteja mais atrelado aos problemas complexos que devem ser compreendidos e superados. Como estratégia, isso inclui uma aproximação das ciências naturais com as ciências humanas e sociais aplicadas. Esse princípio vem sendo internalizado no Brasil, como no X Plano Setorial para os Recursos do Mar[37] e no Plano Nacional de Trabalho 2021-2024 do Programa de Formação de Recursos Humanos em Ciências do Mar (PPGMar)[38]. A Oceanografia é uma ciência dinâmica, que vem incorporando novos elementos à medida que os desafios se apresentam. E assim precisa continuar, pois, de fato, necessitamos mais do que uma Ciência do Oceano; precisamos de uma Ciência para o Oceano[39], inclusiva e abrangente, que tenha condições de produzir a ciência que nos leve ao "Oceano que Queremos".

[37] <https://www.marinha.mil.br/secirm/psrm>.

[38] <https://cienciasdomarbrasil.furg.br/>.

[39] Expressão atribuída ao Sr. Ariel Troisi, da Comissão Oceanográfica Intergovernamental.

### O papel do ser humano

O ser humano é parte desse sistema, influenciando o oceano e sendo influenciado por este. Os processos sociais que determinam essa relação não podem deixar de fazer parte do horizonte epistemológico do oceanógrafo. Como consequência, emergem as áreas da Oceanografia Humana ou Social e Etno-Oceanografia. Essa última dedicada aos aspectos antropológicos e culturais dos povos do mar. Além de uma harmonização conceitual e prática entre as ciências naturais e sociais, é necessário ampliar a integração do conhecimento sobre o oceano com a sociedade. Portanto, a gestão das atividades humanas é parte central, se não essencial, da atuação do oceanógrafo.

Assim, o oceanógrafo não pode prescindir dos conceitos e metodologias relacionados à forma como ele pode promover mudanças na sociedade, como a discussão, definição, implementação e avaliação de políticas públicas. Mais que descrever o oceano, o oceanógrafo deve exercer um papel ativo na transformação da realidade que cerca esse ambiente, protagonizando transformações sociais que levem de fato ao desenvolvimento sustentável. *Foto: Leandro Coelho*.

## 7. Comentários finais - síntese

No presente capítulo, foi apresentado ao leitor o Perfil e a Atuação do Oceanógrafo em um cenário recente. A abordagem teve início com aspectos relacionados ao *Oceano e a Sociedade*. Nas últimas seis décadas, há de se destacar esforços oriundos de várias instituições, dedicadas ao estudo do oceano de forma global. Em 2017, a Organização das Nações Unidas lançou a proposta da Década das Nações Unidas da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável[40], para o período de 2021 a 2030. Há sete objetivos elencados para contribuir com o desenvolvimento sustentável do oceano e do planeta, ou seja, um oceano: (1) limpo; (2) seguro; (3) saudável e resiliente; (4) produtivo e explorado sustentavelmente; (5) previsível; (6) transparente e acessível; e (7) inspirador e envolvente.

[40] Unesco, 2019. A ciência que precisamos para o oceano que queremos: a Década das Nações Unidas da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável (2021-2030). Paris: Unesco, 24p. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000265198_por>.

Mas, como concretizar tais objetivos? Neste ponto, é relatada a importância da atuação do Profissional Oceanógrafo. Breves comentários são inseridos sobre o tipo de formação técnico-científica do oceanógrafo, que pode contemplar diversos perfis. Uma importante conquista do oceanógrafo foi a efetivação da regulamentação desta valiosa profissão no Brasil, a qual foi sancionada pela Lei Federal N° 11.760/2008, em 31 de julho de 2008. A esta, foi somada mais uma conquista, em 12 de julho de 2018, quando foi aprovada a Resolução CNE/CES nº 2/2018 sobre as Diretrizes Curriculares Nacionais para disciplinar os cursos de graduação em Oceanografia. Em síntese, tais documentos legais permitem a identificação de diversas áreas de atuação do oceanógrafo no mercado de trabalho.

Na sequência o leitor teve a oportunidade de navegar pelas áreas de atuação do oceanógrafo. Especificamente, considerando os desafios da Década do Oceano, o profissional Oceanógrafo apresenta formação e perfil para atuar em diversas áreas. Breves comentários foram lançados sobre os principais espaços de atuação profissional, correspondendo aos setores público e privado, terceiro setor e organismos multilaterais.

Diante de uma gama de possibilidades para atuar como oceanógrafo, a questão que surge é: por onde começar? Um ponto de partida é simplesmente ter consciência de que o estudante de Oceanografia tem o privilégio de visitar/estagiar pelos diversos laboratórios, vinculados às diversas áreas que compõem a Oceanografia e que estão presentes em uma instituição oceanográfica.

A experiência poderá enriquecer a formação futura do oceanógrafo, contribuindo na carreira profissional e ampliando horizontes de atuação. Destacamos, dentre outros, temas emergentes, nos quais o oceanógrafo pode atuar, tais como *Cultura oceânica – Ocean Literacy; Economia do mar, empreendedorismo e inovação e Oceanografia Social.*

Continuando, salientamos que os aspectos aqui abordados sobre o perfil e atuação do oceanógrafo são de suma relevância e que devem ser buscados durante e após a formação acadêmica. A ideia consistiu em ressaltar um conjunto de informações que possam contribuir na formação e desempenho de um futuro profissional de qualidade.

Do exposto, ressaltamos que há diversos perfis de oceanógrafos, com uma gama de habilidades peculiares, possibilitando atuarem de forma inclusiva e eficaz para um melhor entendimento do oceano, sob aspectos multi-, inter- e transdiciplinares. A motivação de estudos e pesquisas de um oceano extremamente rico, complexo tal como seus *infinitos e magníficos tons de azuis*, deve estar calcada na "*Ciência para o Oceano*" e não restringir simplesmente para a "*Ciência do Oceano*". A Oceanografia é uma área de atuação fascinante e o profissional tem inúmeras oportunidades de se desenvolver pessoalmente e profissionalmente nas suas diversas vertentes.

Portanto, no vasto oceano cabem variados perfis de atuação e trajetórias de formação, todos igualmente importantes para a promoção do desenvolvimento sustentável. Formar esses profissionais é o papel dos cursos de graduação em Oceanografia. Ao oceanógrafo cabe buscar uma formação sólida, com conteúdos, competências e habilidades para enfrentar os desafios complexos que o oceano e a sociedade lhes apresentarão, além do importante papel de praticar a difusão do conhecimento sobre o oceano.

Finalmente, para proporcionar ao leitor uma visão dos diversos cenários em que o oceanógrafo pode atuar, apresentamos uma série de imagens retratando atividades do fascinante universo da Oceanografia.

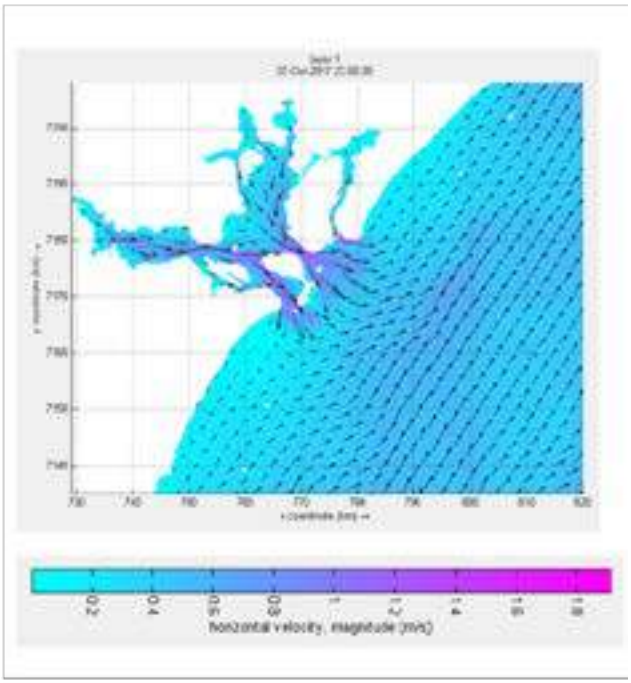
**Bem-vindos a Bordo! Bons Ventos… Mares Tranquilos!!!**

## Marujos! Bem vindos a bordo!

## Oceanografia costeira e estuarina - Cananéia (SP)

## Oceanografia costeira e estuarina - Cananéia (SP)

# Atividades de laboratório

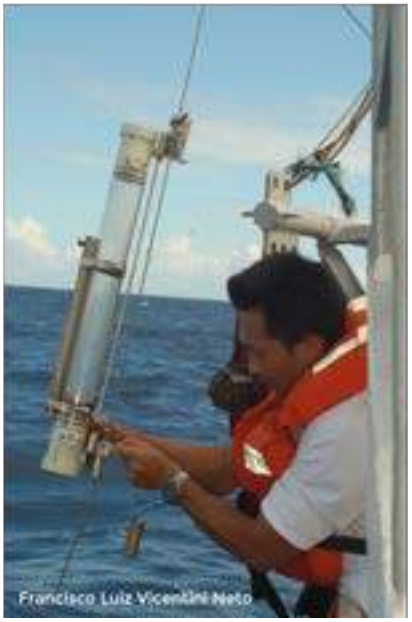


Joseph Harari

## Oceanografia costeira - Ubatuba (SP)

# Atividades embarcadas

## Atividades embarcadas

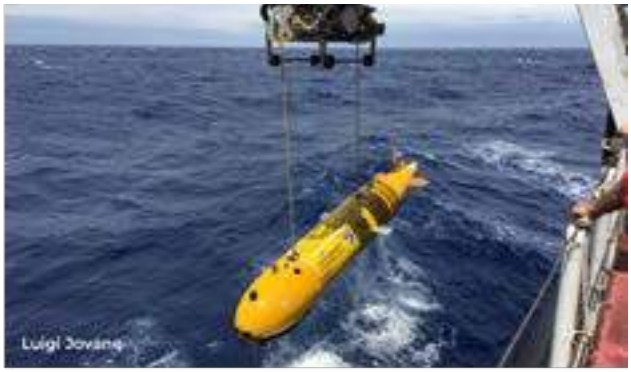


# Atividades embarcadas

## Atividades embarcadas

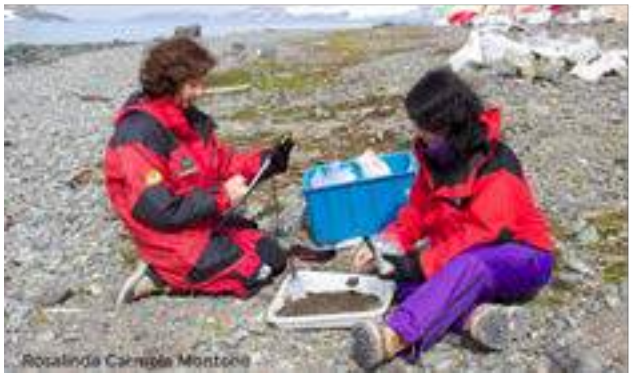
# Embarques internacionais

## Embarques internacionais



# Oceanografia Antártica

# Oceanografia Antártica



# Oceanografia Antártica

## Oceanografia e educação ambiental

# Atuação do oceanógrafo na Diplomacia Internacional

## Referências bibliográficas

CORDANI *et al*. 2018. Perspectivas do ensino de Geociências em Ernesto *et al*. In: Estudos Avançados, v 32,n. 94-2018, EDUSP.

LE BLANC *et al*. 2017. Mapping the linkages between oceans and other Sustainable Development Goals: a preliminary exploration. DESA Working Paper 149. Disponível em <https://www.un.org/esa/desa/papers/2017/wp149_2017.pdf>.

HALPERN *et al*. 2008. A global map of human impact on marine ecosystems. Science 319, 948–952.

MENCK, E.S. 2020. Um olhar sobre as organizações não-governamentais que realizam ações de educação ambiental focadas em lixo no mar no Brasil. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Paulo, 149 p.

ONU. 2018. Glossário de termos do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 14. (Eds. Turra, A.; Terto, A.P.; Machado-Filho, H.). Brasília: ONU Brasil, 40p. Disponível em <https://www.br.undp.org/content/dam/brazil/docs/ODS/glossarioODS14.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2020.

PAULY, G. 2010. The Blue Economy: 10 Years, 100 Innovations, 100 Million Jobs. Paradigm Pubns, 336 p.

SANTORO *et al*. 2020. Cultura Oceânica para todos - Kit pedagógico. IOC/Unesco & Unesco Venice Office, Paris (IOC Manuals and Guides), 136 p. Disponível em <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373449>.

UNESCO. 2019. A ciência que precisamos para o oceano que queremos: a Década das Nações Unidas da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável (2021-2030). Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000265198_por>. Acesso em: 13 jan. 2020.

Foto: Bruno Coelho

# LEITURA SUGERIDA

# LEITURA SUGERIDA

ABREU, F.; CAROLINA, A.; ARAUJO, V.; LEÃO, P.; SILVA, K. T.; CARVALHO, F. M. d.; CUNHA, O. d. L.; ALMEIDA, L. G.; GEURINK, C.; FARINA, M. et al. 2016. Culture-independent characterization of novel psychrophilic magnetotactic cocci from Antarctic marine sediments. Environmental microbiology, Wiley Online Library, v. 18, n. 12, p. 4426-4441.

ALLISON, E.H., J. KURIEN, Y. OTA *et al*. 2020. The Human Relationship with Our Ocean Planet. Washington, DC: World Resources Institute. <https://oceanpanel.org/blue-papers/HumanRelationshipwithOurOceanPlanet>.

AMARAL, A.C.Z.; TURRA, A.; CIOTTI, A. .; WONGTSCHOWSKI, C.; SCHAEFFER-NOVELLI, Y. 2018. Métodos de estudo em ecossistemas costeiros: Biodiversidade e funcionamento. Biblioteca/UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.

ASSUMPCAO M. 1992. The regional intraplate stress field in South America. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, AGU, v. 97, i. B8, p. 11889-11903.

BAPTISTA NETO, J. A., WALLNER-KERSANACH, M., PATCHINEELAM, S. M. 2008. Poluição Marinha, 1ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda, 440p.

BAUMAN, A. 2008. Núcleo e crosta terrestres. Trad. Carolina Caíres Coelho. Barueri (SP): Girassol. 29 p. il. (Planeta Terra).

BEIRÃO, A.P., MARQUES, M. & RUSHEL, R.R, 2018. O Valor do Mar. Uma visão integrada dos recursos do oceano do Brasil. São Paulo: Essential Idea.

BESNARD, W. 1951. Resultados científicos do cruzeiro do "Baependi" e do "Vega" a Ilha da Trindade. Contribuição para o conhecimento da plataforma insular da Ilha da Trindade. Boletim do Instituto Paulista de Oceanografia, São Paulo, v. 2, n.2, p.37-53.

BETZLER, C.; EBERLI, G.; LUDMANN, T.; REOLID, J.; KROON, D.; REIJMER, J.; SWART, P.; WRIGHT, J.; YOUNG, J.; ALVAREZ-ZARIKIAN, C. *et al*. 2018. Refinement of Miocene sea level and monsoon events from the sedimentary archive of the Maldives (Indian Ocean). Progress in Earth and Planetary Science, Springer Open, v. 5, n. 1, p. 1-18.

BLASIAK, R., R. WYNBERG, K. GRORUD-COLVERT, S. THAMBISETTY, *et al*. 2020. The Ocean Genome: Conservation and the Fair, Equitable and Sustainable Use of Marine Genetic Resources. Washington, DC: World Resources Institute. Nature Sustainability 3, 588-596; 2020. <www.oceanpanel.org/blue-papers/ocean-genome-conservation-and-fair-equitable-and-sustainable-use-marine-genetic>.

BOGGS JR, S. 2014. Principles of sedimentology and stratigraphy. [S.l.]: Pearson Education.

BRASIL. 2018. Atlas dos Manguezais do Brasil. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. <http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/ manguezais /atlas_dos_manguezais_do_brasil.pdf>.

BROWN, J. *et al*. 1989. Ocean chemistry and deep-sea sediments. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, v. 5.

BURLEIGH, R. 2016. Solving the puzzle under the sea: Marie Tharp maps the ocean floor [S.l.]: Simon and Schuster.

BUTLER, R. F. 1998. Paleomagnetism: Magnetic domains to geologic terranes. Electronic edition, v. 23.

CARSON, R. 2010. Beira mar. São Paulo, Gaia. 259p.

CARSON, R. 2010. Primavera Silenciosa. 14. ed. São Paulo: Gaia, 2010.

CASTELLO, J. P. & KRUG, L. C. (EDS.) 2017. Introdução às Ciências do Mar. Pelotas: Ed. Textos, 602 p.

CENTRO DE EXCELÊNCIA PARA O MAR BRASILEIRO (CEMBRA), 2012. O Brasil e o Mar no Século XXI: relatório aos tomadores de decisão do país. In: COSTA-FERNANDES, L. F. (Coord.). 2. ed. Niterói: BHMN.

CGEE (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos). 2007. Mar e ambientes costeiros. Brasília, CGEE/MCT. 323 p.

CHARLIER-SARUBO, S., CUNHA-LIGNON, M. & SCHAEFFER-NOVELLI, Y. 2015. Protocolo de coleta de dados e monitoramento dos ecótonos entre manguezal e marisma e entre manguezal e vegetação de restinga. In: TURRA, A. & DENADAI, M. R. (orgs.). Protocolos de campo para o monitoramento de habitats bentônicos costeiros – Rede de Monitoramento de Habitats Bentônicos Costeiros – ReBentos. São Paulo: IOUSP. <http://www.producao.usp.br/handle/BDPI/48874>.

CHIARABBA, C.; JOVANE, L.; DISTEFANO, R.A. 2005. new view of italian seismicity using 20 years of instrumental recordings. Tectonophysics, Elsevier, v. 395, n. 3-4, p. 251-268.

CLAUDET, J. *et al*. 2020. A Roadmap for Using the UN Decade of OceanScience for Sustainable Developmentin Support of Science, Policy, and Action. One Earth 2:1-9.

CORDANI, U.G.; ERNESTO, M.; DIAS, M. A. F. S.; SARAIVA, E. S. B. G.; ALKMIM, F. F.; MENDONÇA, C. A. & ALBRECHT, R., 2018. Ensino de Geociências na Universidade. Estudos Avançados 32(94), p.309-330.

COSTELLO, C., L. CAO, S. GELCICH *et al.* 2019. The Future of Food from the Sea. Washington, DC: World Resources Institute. <www.oceanpanel.org/future-food-sea> [Nature 588, 95-100; 2020]

CRAPEZ, M.A.C. 2002. Bactérias Marinhas. In : R.C. Pereira & A. Soares-Gomes (eds.) Biologia Marinha. Interciência, Rio de Janeiro. 382p.

CUNHA, C.N. DA; PIEDADE, M.T.F.; JUNK, W.J. 2014. Classificação e delineamento das áreas úmidas brasileiras e de seus macrohabitats. [S.l.]: Ed. UFMT.

DAVOS, C. A., 1999. On determining the social relevance of oceanography. Progress in Oceanography, 44 (1): 457-468.

DOVER, C.V. 1996. Deep-ocean journeys: Discovering new life at the bottom of the sea. [S.l.]: Addison-Wesley Massachusetts.

ELLWOOD, B. B.; FEBO, L.; ANDERSON, L.; HACKWORTH, R. T.; MEANS, G. H.; BRYAN, J. A.; TOMKIN, J.; ROWE, H.; JOVANE, L. 2020. Regional to global correlation of Eocene-Oligocene boundary transition successions using biostratigraphic, geophysical and geochemical methods. Geological Magazine, Cambridge University Press, v. 157, n. 1, p. 80-100.

ERNESTO, M. CORDANI, U. G., CARNEIRO, C. D. R.; DIAS, M. A. F. S., MENDONÇA, C. A., BRAGA, E. S. 2018. Perspectivas do ensino de Geociências. Ensino de Geociências na Universidade. In: Estudos Avançados 94, n32(94), 331-343.

EVANS, M.; HELLER, F. 2003. Environmental magnetism: principles and applications of enviromagnetics. [S.l.]: Elsevier.

FENICHEL, E.P., B. MILLIGAN, I. PORRAS *et al.* 2020. National Accounting for the Ocean and Ocean Economy. Washington, DC: World Resources Institute. Available online at <https://www.oceanpanel.org/blue-papers/national-accounting-ocean-ocean-economy> [Nature Sustainability 3, 889-895; 2020].

FIGUEIRA, R. C. L. 2000. Inventário de radionuclídeos artificiais em água do mar e sedimentos da costa sul do Brasil. Disponível em <http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Rubens%20Cesar%20Lopes%20Figueira_D.pdf>.

FIORONI, C.; VILLA, G.; PERSICO, D.; JOVANE, L. 2015. Middle Eocene-lower Oligocene calcareous nannofossil biostratigraphy and paleoceanographic implications from site 711 (equatorial Indian Ocean). Marine Micropaleontology, Elsevier, v. 118, p. 50-62.

FLEMMING, B. 1976. Side-scan sonar: a practical guide. The international hydrographic review.

FRIEDRICH, H. 1973. Marine Biology. Sidgwick & Jackson, London. 474pp.

GAINES, S., R. CABRAL, C. FREE, Y. GOLBUU *et al.* 2019. The Expected Impacts of Climate Change on the Ocean Economy. Washington, DC: World Resources Institute. <www.oceanpanel.org/expected-impacts-climate-change-ocean-economy>.

GARRISON, T., 2016. Fundamentos de Oceanografia, 7ª edição, São Paulo, SP. Cengage Learning, capítulo 2, p25-49.

GIANESELLA, S. M. F.; SALDANHA-CORRÊA, F. M. P. 2010. Sustentabilidade dos oceanos. Série Sustentabilidade Vol.7. (Coord. José Goldemberg). São Paulo, Blücher. 200p.

GOULD, S. J. 1993. A Vida Maravilhosa. Círculo do Livro.

GOYA, S. Y.; PADUA, P.; ALCANTARA-CARRIO, J.; MAIA, G.; JOVANE, L. 2018. Análise dos sedimentos. In: Métodos de Estudo em Ecossistemas Costeiros: Biodiversidade e Funcionamento. [S.l.: s.n.].

GROTZINGER, J.; JORDAN, T. 2013. Para Entender a Terra-6. [S.l.]: Bookman Editora.

HALPERN, B. S. *et al.* 2008. A global map of human impact on marine ecosystems. Science, 319:948-52.

HALPERN, B. S. *et al.* 2012. An index to assess the health and benefits of the global ocean. Nature, 488:615-620.

HARPER, B. B.; PUGA-BERNABEU, A.; DROXLER, A. W.; WEBSTER, J. M.; GISCHLER, E.; TIWARI, M.; LADO-INSUA, T.; THOMAS, A. L.; MORGAN, S.; JOVANE, L. *et al.* 2015. Mixed carbonate-siliciclastic sedimentation along the great barrier reef upper slope: A challenge to the reciprocal sedimentation model. Journal of Sedimentary Research, SEPM 6128 E. 38th Street, Tulsa, OK 74135-5814 USA, v. 85, n. 9, p. 1019-1036.

HASSAN, M. B.; RODELLI, D.; BENITES, M.; ABREU, F.; MURTON, B.; JOVANE, L. 2020. Presence of biogenic magnetite in ferromanganese nodules. Environmental microbiology reports, Wiley Online Library, v. 12, n. 3, p. 288-295.

HAUGAN, P.M., L.A. LEVIN, D. AMON, M. HEMER, H. LILY AND F.G. NIELSEN. 2020. What role for ocean-based renewable energy and deep seabed minerals in a sustainable future? Washington, DC: World Resources Institute. <www.oceanpanel.org/blue-papers/ocean-energy-and-mineral-sources> [Nature Sustainability 3, 784-794; 2020].

HERNANDEZ, H. F. C.; YEPES, P. N. M.; SANCHEZ, H. A. V. 2006. Fundamentos de cristalografia. [S.l.]: ELIZCOM SAS.

HERRERO-BERVERA, E.; JOVANE, L. 2013. On the palaeomagnetic and rock magnetic constraints regarding the age of IODP 325 Hole M0058A. Geological Society, London, Special Publications, Geological Society of London, v. 373, n. 1, p. 279-291.

HOEGH-GULDBERG. O. *et al*. 2019. The ocean as a solution to climate change: five opportunities for action. Report. Washington, DC: World Resources Institute. <http://www.oceanpanel.org/climate>.

HUMPHRIS, S. E.; GERMAN, C. R.; HICKEY, J. P. 2014. Fifty years of deep ocean exploration with the DSV Alvin. Eos, Transactions American Geophysical Union, AGU, v. 95, n. 22, p. 181-182.

IOC-UNESCO, 2017. Global Ocean Science Report – the current status of ocean science around the world. L. Valdés *et al*. (eds), Paris, UNESCO Publishing.

IOC-UNESCO, 2019. A ciência que precisamos para o oceano que queremos: a Década das Nações Unidas da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável (2021-2030). <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000265198_por>.

IOC-UNESCO, 2020a. United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development 2021 – 2030, Implementation Plan Version 2.0, 2020.

IOC-UNESCO, 2020b. Global Ocean Science Report 2020 – charting capacity for ocean sustainability. K. Isensee (ed.), Paris, UNESCO Publishing.

IOC/UNESCO, IMO, FAO, UNDP, 2011. A blueprint for ocean and coastal sustainability. An inter-agency paper towards the preparation of the UN Conference on Sustainable Development (Rio +20). Paris: IOC/UNESCO.

IPBES, 2019. Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. E. S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz, and H. T. Ngo (editors). IPBES secretariat, Bonn, Germany. <https://www.ipbes.net/global-assessment>.

JAMBECK, J., E. MOSS, B. DUBEY *et al*. 2020. Leveraging multi-target strategies to address plastic pollution in the context of an already stressed ocean. Washington DC: World Resources Institute. <https://oceanpanel.org/blue-papers/pollution-and-regenerative-economy-municipal-industrial-agricultural-and-maritime-waste>.

JOHNSON, H. P.; HELFERTY, M. 1990. The geological interpretation of side-scan sonar. Reviews of Geophysics, AGU, v. 28, n. 4, p. 357-380.

JONES, E.J.W. 1999. Marine geophysics. John Wiley & Sons Inc.

JORNAL JOVEM. 2010. <http://www.jornaljovem.com.br/edicao17/antartida_io_proantar01.php#>.

JOVANE, L.; ACTON, G.; FLORINDO, F.; VEROSUB, K. L. 2008. Geomagnetic field behavior at high latitudes from a paleomagnetic record from eltanin core 27-21 in the Ross Sea sector, Antarctica. Earth and Planetary Science Letters, Elsevier, v. 267, n. 3-4, p. 435-443.

JOVANE, L.; HEIN, J. R.; YEO, I. A.; BENITES, M.; BERGO, N. M.; CORREA, P. V.; COUTO, D. M.; GUIMARAES, A. D.; HOWARTH, S. A.; MIGUEL, H. R. et al. 2019.Multidisciplinary scientific cruise to the Rio Grande Rise. Frontiers in Marine Science, Frontiers, v. 6, p. 252.

JOVANE, L.; FLORINDO, F.; DINARES-TURELL, J. 2004. Environmental magnetic record of paleoclimate change from the Eocene-Oligocene stratotype section, Massignano, Italy. Geophysical Research Letters, AGU, v. 31, n. 15.

JOVANE, L.; FLORINDO, F.; WILSON, G.; LEONE, S. d. A. P. S.; HASSAN, M. B.; RODELLI, D.; CORTESE, G. 2021.Magnetostratigraphic chronology of a Cenozoic sequence from DSDP site 274, Ross Sea, Antarctica. Multi-Disciplinary Applications in Magnetic Chronostratigraphy, Frontiers Media SA.

JOVANE, L.; HINNOV, L.; HOUSEN, B.; HERRERO-BARVERA, E. 2013. Magnetic methods and the timing of geological processes. Geological Society, London, Special Publications, Geological Society of London, v. 373, n. 1, p. 1-12.

JOVANE, L.; SAVIAN, J. F.; COCCIONI, R.; FRONTALINI, F.; BANCALA, G.; CATANZARITI, R.; LUCIANI, V.; BOHATY, S. M.; WILSON, P. A.; FLORINDO, F. 2013. Integrated magnetobiostratigraphy of the middle Eocene-lower Oligocene interval from the Monte Cagnero section, central Italy. Geological Society, London, Special Publications, Geological Society of London, v. 373, n. 1, p. 79-95.

JOVANE, L.; VEROSUB, K. L. 2011. Magnetic properties of Oligocene-Eocene cores from SHALDRIL II, Antarctica. Tectonic, Climatic, and Cryospheric Evolution of the Antarctic Peninsula, American Geophysical Union Washington, DC, USA, v. 63, p. 115-130.

JOVANE, L.; YOKOYAMA, E.; SEDA, T.; BURMESTER, R. F.; TRINDADE, R. I.; HOUSEN, B. A. 2011. Rock magnetism of hematitic "bombs" from the Araguainha impact structure, Brazil. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, AGU, v. 12, n. 12.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. 2009. Geofísica de exploração. [S.l.]: Oficina de textos.

KIM, B. S. M. 2016. Índices de Qualidade Ambiental para avaliação de metais e semimetais em sedimentos do Complexo Estuarino de Santos e São Vicente. Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/21/21137/tde-06072017-154448/publico/Dissertacao_Kim_Bianca_Corrigida.pdf>.

KLEIN, C.; DUTROW, B. 2009. Manual de ciência dos minerais. [S.l.]: Bookman Editora.

KODAMA, K. P.; JOVANE, L.; HINNOV, L. 2021. Multi-Disciplinary Applications in Magnetic Chronostratigraphy. [S.l.]: Frontiers Media SA.

KONAR, M & H. DING. 2020. A sustainable ocean economy for 2050 approximating its benefits and costs. Washington, DC: World Resources Institute. <www.oceanpanel.org/sites/default/files/2020-07/Ocean%20Panel_Economic%20Analysis_FINAL.pdf>.

LANA, P.C. & J.P. CASTELLO (ORGS). 2020. Fronteiras do conhecimento em ciências do mar. Editora da FURG, Rio Grande, 379 p. <https://cienciasdomarbrasil.furg.br/images/livros/FronteirasCM_PPGMar.pdf>.

LEAPE, J., M. ABBOTT, H. SAKAGUCHI *et al.* 2020. Technology, data and new models for sustainably managing ocean resources. Washington, DC: World Resources Institute. <www.oceanpanel.org/Technology-data-and-new-models-for-sustainably-managing-ocean-resources>.

LE BLANC, D. 2015. Towards integration at last? The sustainable development goals as a network of targets. DESA Working Paper No. 141; ST/ESA/2015/DWP/14; disponível em: <https://www.un.org/esa/desa/papers/2015/wp141_2015.pdf> (acesso: 25/09/2019).

LE BLANC, D.; FREIRE, C.; VIERROS, M. 2017. Mapping the linkages between oceans and other Sustainable Development Goals: a preliminary exploration. DESA Working Paper 149. <https://www.un.org/esa/desa/papers/2017/wp149_2017.pdf>.

LI, Y.-X.; ZHAO, X.; JOVANE, L.; PETRONOTIS, K. E.; GONG, Z.; XIE, S. 2015. Paleomagnetic constraints on the tectonic evolution of the Costa Rican subduction zone: New results from sedimentary successions of IODP drill sites from the Cocos Ridge. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, AGU, v. 16, n. 12, p. 4479-4493.

LI, Y.-X.; ZHAO, X.; XIE, S.; JOVANE, L.; PETRONOTIS, K. 2018. Paleomagnetism of IODP site U1380: Implications for the forearc deformation in the Costa Rican erosive convergent margin. Scientific reports, Nature Publishing Group, v. 8, n. 1, p. 1-11.

LONGHURST, A. R. 1998. Ecological geography of the sea. San Diego, Academic Press.

LOURENÇO, S.O. & MARQUES JR., A.N. 2002. Produção Primária Marinha. In: R.C. Pereira & A. Soares-Gomes (eds.) Biologia Marinha. Interciência, Rio de Janeiro.382p.

LOWRIE, W.; FICHTNER, A. 2020. Fundamentals of geophysics. [S.l.]: Cambridge University Press.

LUDMANN, T.; BETZLER, C.; EBERLI, G. P.; REOLID, J.; REIJMER, J. J.; SLOSS, C. R.; BIALIK, O. M.; ALVAREZ-ZARIKIAN, C. A.; ALONSO-GARCIA, M.; BLATTLER, C. L. et al. 2018. Carbonate delta drift: A new sediment drift type. Marine Geology, Elsevier, v. 401, p. 98-111.

MAESTRELLI, D.; MASELLI, V.; KNELLER, B.; CHIARELLA, D.; SCARSELLI, N.; VANNUCCHI, P.; JOVANE, L.; IACOPINI, D. 2020. Characterisation of submarine depression trails driven by upslope migrating cyclic steps: Insights from the Ceará Basin (Brazil). Marine and Petroleum Geology, Elsevier, v. 115, p. 104291.

MANTOVANELLI, S. S.; TASSINARI, C. C.; MAHIQUES, M. M. D.; JOVANE, L.; BONGIOLO, E. 2018. Characterization of Nd radiogenic isotope signatures in sediments from the southwestern Atlantic margin. Frontiers in Earth Science, Frontiers, v. 6, p. 74.

MARINHA DO BRASIL. 2016. Tratado da Antártica e Protocolo de Madri / Marinha do Brasil. Comissão Interministerial para os Recursos do Mar. Secretaria da Comissão. - 2ª edição. Brasília, DF: SECIRM,. 72p.

MARINHA DO BRASIL. 2017. Normas da autoridade marítima para levantamentos hidrográficos: Normam 25. Diretoria de Hidrografia e Navegação, 2a Revisão, Niterói.

MAYER, L.; JAKOBSSON, M.; ALLEN, G.; DORSCHEL, B.; FALCONER, R.; FERRINI, V.; LAMARCHE, G.; SNAITH, H.; WEATHERALL, P. 2018. The Nippon Foundation-GEBCO seabed 2030 project: The quest to see the world's oceans completely mapped by 2030. Geosciences, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 8, n. 2, p. 63.

MCELHINNY, M. W.; MCFADDEN, P. L. 1999. Paleomagnetism: continents and oceans. [S.l.]: Elsevier.

MCQUILLIN, R.; ARDUS, D. A. 1977. Exploring the geology of shelf seas. [S.l.]: Graham & Trotman London.

MESQUITA, A. R. 1994. O lugar da Oceanografia. Estud. Av.:8(22). OLIVEIRA, G. O. 2001. El Niño e Você: o fenômeno climático. São José dos Campos, Transtec.

MITCHUM JR, R. M.; VAIL, P. R.; SANGREE, J. B. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 6. stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences: Section 2. application of seismic reflection configuration to stratigraphic interpretation. AAPG Special Volumes.

MONTSERRAT, F.; GUILHON, M.; CORRÊA, P. V. F.; BERGO, N. M.; SIGNORI, C. N.; TURA, P. M.; MALY, M. de los S.; MOURA, D.; JOVANE, L.; PELLIZARI, V. *et al*. 2019. Deep-sea mining on the Rio Grande Rise (Southwestern Atlantic): A review on environmental baseline, ecosystem services and potential impacts. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, Elsevier, v. 145, p. 31-58.

MOURA, D. S. d.; MOLINA, E. C.; MARANGONI, Y. R.; JOVANE, L. 2019. Gravity and magnetic constraints on the crustal structure of the Ceará Plateau, Brazilian Equatorial Margin. Frontiers in Earth Science, Frontiers, v. 7, p. 309.

NETO, J. B.; PONZI, V. R. A.; SICHEL, S. E. 2004. Introdução a geologia marinha. Editora Interciência, p. 279.

NORTHROP, E. *et al*. 2020. A Sustainable and equitable blue recovery to the COVID-19 crisis. Washington, DC: World Resources Institute. <www.oceanpanel.org/sites/default/files/2020-09/20_HLP_Report_COVID_Blue_Recovery.pdf>.

ONU, 1991. Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD). Nosso Futuro Comum. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas.

ONU, 1996. Agenda 21. Brasília: Senado Federal, Subsecretaria de Edições Técnicas.

ONU, 2012. Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (CNUDS). O Futuro que Queremos. <http://www.uncsd2012.org/thefuturewewant.html>.

ONU, 2015. Transformando Nosso Mundo: A agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. <https://nacoesunidas.org/wp-content/uploads/2015/10/agenda2030-pt-br.pdf>.

ONU, 2017. The First Global Integrated Marine Assessment: World Ocean Assessment I. Cambridge: Cambridge University Press.

ÖSTERBLOM, H., C.C.C. WABNITZ, D. TLADI *et al*. 2020. Towards ocean equity. Washington, DC: World Resources Institute. <www.oceanpanel.org/how-distribute-benefits-ocean-equitably>.

PAIVA, M. P. 1996. Instituições de Pesquisas Marinhas do Brasil. IBAMA, Brasília. 463p.

PALCU, D. V.; MURASZKO, J. R.; JAQUETO, P. F.; JOVANE, L. 2021. The birth of a connected South Atlantic Ocean: A magnetostratigraphic perspective. Multi-Disciplinary Applications in Magnetic Chronostratigraphy, Frontiers Media SA.

PAVIC, I. 2013. Development of the international standards for hydrographic surveys. In: Zbornik Radova Conference Proceedings. [S.l.: s.n.]. p. 100.

PEREIRA, R. C.; CRESPO-SOARES, A. (Org.). 2009. Biologia marinha. Rio de Janeiro, Interciência.656 p.

PINET, P.R. 2021. Invitation to Oceanography. 8th ed. USA Colgate University. Jones and Bartlett Publishers.

PNUD, 2018. Glossário de termos do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 14. (Eds. Turra, A.; Terto, A.P.; Machado-Filho, H.). <https://www.br.undp.org/content/dam/brazil/docs/ODS/glossarioODS14.pdf>.

REBENTOS. São Paulo: IOUSP. <http://www.producao.usp.br/handle/BDPI/48874>.

REGO, E.; JOVANE, L.; HEIN, J.; SANT'ANNA, L.; GIORGIONI, M.; RODELLI, D.; OZCAN, E. 2018. Mineralogical evidence for warm and dry climatic conditions in the Neo-Tethys (Eastern Turkey) during the middle Eocene. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Elsevier, v. 501, p. 45-57.

RIBEIRO, H. 2001. Estratigrafia de sequências, fundamentos e aplicações. São Leopoldo: Editora Unisinos, 428p.

ROBINSON, A. R. & BRINK, K. 2005. The global coastal ocean: multiscale interdisciplinary processes, v. 13 (Sea, ideas and observations on progress in the study of the seas). Harvard University Press, 1062 p.

ROBINSON, A. R. & BRINK, K. 2006. The global coastal ocean: interdisciplinary regional studies and syntheses, v. 14B (Sea, ideas and observations on progress in the study of the seas). Harvard University Press, 810 p.

RODELLI, D.; JOVANE, L.; ROBERTS, A. P.; CYPRIANO, J.; ABREU, F.; LINS, U. 2018. Fingerprints of partial oxidation of biogenic magnetite from cultivated and natural marine magnetotactic bacteria using synchrotron radiation. Environmental microbiology reports, Wiley Online Library, v. 10, n. 3, p. 337-343.

RODRIGUES, V. S.; ALVES, D. P.; JOVANE, L.; SOUZA, L. A. de. 2019. Seismic stratigraphy of Trapandé Bay (southern brazil) to study sea-level changes and deposition evolution in the upper quaternary. Brazilian Journal of Geophysics, v. 37, n. 4, p. 357-368.

ROGERS, A., O. ABURTO-OROPEZA *et al*. 2020. Critical habitats and biodiversity: inventory, thresholds and governance. Washington, DC: World Resources Institute. <www.oceanpanel.org/blue-papers/critical-habitats-and-biodiversity-inventory-thresholds-and-governance>.

ROSS, D.A. 1988. Introduction to Oceanography. Prentice Hall, New Jersey.

SANTORO, F. *et al*., 2020. Cultura oceânica para todos – um kit pedagógico. IOC/UNESCO & UNESCO VENICE OFFICE, PARIS (IOC Manuals and Guides, 80 revisado em 2018). <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373449>.

SAVIAN, J. F.; JOVANE, L.; BOHATY, S. M.; WILSON, P. A. Middle Eocene to early Oligocene magnetostratigraphy of ODP Hole 711a (Leg 115), western equatorial Indian Ocean. Geological Society, London, Special Publications, Geological Society of London. 373, n. 1, p. 97–110, 2013.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y. 2014. Manguezais do litoral paulista: biota e petróleo. In: DIAS-BRITO, D., MILANELLI, J.C., RIEDEL, P.S. & WIECZOREK, A. (coords.). Sensibilidade do litoral paulista a derramamentos de petróleo: um atlas em escala de detalhe, Rio Claro: UNESP. ISBN: 978-85-89082-32-7 236.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y. & CINTRÓN-MOLERO, G. 1999. Brazilian mangroves: a historical ecology. Journal of the Brazilian Association for the Advancement of Science, 51(3/4), 274-286.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y., VALE, C.C. & CINTRÓN, G. 2015. Protocolo de monitoramento do ecossistema manguezal – estrutura e características funcionais – como indicador de mudanças climáticas. In: TURRA, A. & DENADAI, M. R. (orgs.). Protocolos de campo para o monitoramento de habitats bentônicos costeiros – Rede de Monitoramento de Habitats Bentônicos Costeiros.

SCHMIEGELOW, J. M. M. 2004. O Planeta Azul. Uma Introdução às Ciências Marinhas. Interciência, São Paulo. 202p.

SEARS, M. & MERRIMAN, D. (Ed.) 1980. Oceanography: The Past. Springer-Verlag. New York. 812pp.

SEIBOLD, E.; BERGER, W. 2017. The sea floor: an introduction to marine geology. [S.l.]: Springer.

SORIANO-SIERRA, E., SCHAEFFER-NOVELLI, Y., ROVAI A.S., BERNINI, E. & ABUCHAHLA G.M.O. 2015. Protocolo mínimo para monitoramento da estrutura de pradarias de marismas como indicadora de mudanças climáticas. In: TURRA, A. & DENADAI, M. R. (orgs.). Protocolos de campo para o monitoramento de habitats bentônicos costeiros – Rede de Monitoramento de Habitats Bentônicos Costeiros – ReBentos. São Paulo: IOUSP. <http://www.producao.usp.br/handle/BDPI/48874>.

SOUZA, L. A. P. D. 2006. Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo.

SOUZA, RONALD BUSS DE. 2003. Sensoriamento remoto dos oceanos. Espaço & Geografia, Vol.6, 1, 123:145 ISSN: 1516-9375.

SRIVASTAVA, P.; JOVANE, L. 2020. Misinterpreting proxy data for paleoclimate signals: A comment on Shukla et al. 2020. The Holocene, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 30, n. 12, p. 1866-1873.

STEVEN, A.D.L., APPEANING ADDO, K., LLEWELLYN, G., VU, T.C. *et al.* 2020. Coastal development: resilience, restoration and infrastructure requirements. Washington, DC: World Resources Institute. <www.oceanpanel.org/blue-papers/coastal-development-resilience-restoration-and-infrastructure-requirements>.

STUCHTEY, M., A. VINCENT, A. MERKL, M. BUCHER *et al.* 2020. Ocean solutions that benefit people, nature and the economy. Washington, DC: World Resources Institute. <www.oceanpanel.org/ocean-solutions>.

SUMAILA, U.R., M. WALSH, K. HOAREAU, A. COX *et al.* 2020. Ocean finance: financing the transition to a sustainable ocean economy. Washington, DC: World Resources Institute. <www.oceanpanel.org/blue-papers/ocean-finance-financing-transition-sustainable-ocean-economy>.

SWILLING, M., M. RUCKELSHAUS, T. BRODIE RUDOLPH *et al.* 2020. The Ocean transition: what to learn from system transitions. Washington, DC: World Resources Institute. <www.oceanpanel.org/blue-papers/ocean-transition-what-learn-system-transitions> [Nature Communications 11, 3600; 2020].

TAUXE, L. 2010. Essentials of paleomagnetism. [S.l.]: Univ of California Press.

TAVARES, A. C.; CASTRO, D. L. de; BEZERRA, F. H.; OLIVEIRA, D. C.; VANNUCCHI, P.; IACOPINI, D.; JOVANE, L.; VITAL, H. 2020. The Romanche fracture zone influences the segmentation of the equatorial margin of Brazil. Journal of South American Earth Sciences, Elsevier, v. 103, p. 102738.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M.C.M. de; FAIRCHILD, T.R.; TAIOLI, F. 2001. Decifrando a terra. [S.l.]: Oficina Textos.

TESSLER, M. G.; MAHIQUES, M. M. 2000. Processos oceânicos e a fisiografia dos fundos marinhos. Decifrando a Terra. São Paulo: Oficina de Textos, p. 262-284.

THURMAN, H. V. 1986. Essentials of Oceanography. Merrill Publishing Company. Columbus. 370pp.

TREVIZANI, T. H. 2018. Bioacumulação e biomagnificação de metais pesados em teias tróficas de estuários do sul-sudeste do Brasil. Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/21/21137/tde-01022019-141450/pt-br.php>.

TROMPETTE, R. 2003. La Terre: Une Planète Singulière. [S.l.]: Belin.

TURRA, A. 2020. Conservação marinha – histórico, bases conceituais e estratégias. In Crespo, R.C. & Gomes, A.P. (eds). Ecologia Marinha. Interciência, Rio de Janeiro, 666 p.

USTRA, A.; MENDONCA, C. A.; LEITE, A.; JOVANE, L.; TRINDADE, R. I. 2018. Quantitative interpretation of the magnetic susceptibility frequency dependence. Geophysical Journal International, Oxford University Press, v. 213, n. 2, p. 805-814.

VAIL, P. R. 1987. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy: Part 1:Seismic stratigraphy interpretation procedure. AAPG Special Volumes.

VOO, R. VAN DER. 2005. Paleomagnetism of the Atlantic, Tethys and Iapetus oceans. [S.l.]: Cambridge University Press.

WICANDER, R.; MONROE, J. 2000. Fundamentos de geologia. [S.l.: s.n.].

WIDJAJA, S., T. LONG, H. WIRAJUDA *et al.* 2020. Illegal, unreported and unregulated fishing and associated drivers. Washington, DC: World Resources Institute. <www.oceanpanel.org/iuu-fishing-and-associated-drivers> [Nature Food 1, 389-391; 2020].

WILDER, R.J.1998. Listening to the sea: politics of improving environmental protection (Pitt series in policy and institutional studies). University of Pittsburg Press, Pittsburg, 269 p.

WINTHER, J-G., M. DAI *et al.* 2020. Integrated ocean management. Washington, DC: World Resources Institute. <www.oceanpanel.org/blue-papers/integrated-ocean-management> [Nature Ecology & Evolution 4, 1451-1458; 2020].

WISZ M.S., SATTERTHWAITE E.V., FUDGE M., FISCHER M., POLEJACK A., ST. JOHN M., FLETCHER S. & RUDD M.A. 2020. 100 Opportunities for More Inclusive Ocean Research: Cross-Disciplinary Research Questions for Sustainable Ocean Governance and Management. Front. Mar. Sci. 7:576. doi: 10.3389/fmars.2020.00576.

WITBOOI, E., K.D. ALI, M.A. SANTOSA *et al*. 2020. Organised crime in the fisheries sector. Washington, DC: World Resources Institute. <https://oceanpanel.org/blue-papers/organised-crime-associat-ed-fisheries> [Nature 588, 48-56; 2020].

YILMAZ, Ö. 2001. Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data. [S.l.]: Society of exploration geophysicists.

# SOBRE OS AUTORES

# PREFÁCIOS

## ANA MARIA SETUBAL PIRES-VANIN

*Graduada em Ciências Biológicas pela Universidade de São Paulo, com mestrado e doutorado em Oceanografia Biológica pelo Instituto Oceanográfico da USP. Foi Professora Titular do IOUSP, onde desenvolveu pesquisas nos seguintes temas: estrutura e dinâmica da fauna bêntica da plataforma continental e talude, monitoramento ambiental marinho e taxonomia de crustáceos Isopoda. Coordenou projetos integrados multi- e interdisciplinares na área da Oceanografia e foi pioneira no desenvolvimento de pesquisas sobre estrutura e função das comunidades bênticas marinhas de fundos inconsolidados no Brasil. Foi Editora-Chefe do Brazilian Journal of Oceanography e Diretora do IOUSP (2005-2009).*

## LUIZ BRUNER DE MIRANDA

*Licenciado em Física pela Universidade de São Paulo (1964) e doutorado em Curso de Pós-Graduação em Física pelo Instituto de Física da Universidade de São Paulo (1972). Atualmente é Professor Emérito do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, professor Livre Docente e Titular da Universidade de São Paulo. É um dos autores do livro "Princípios de Oceanografia Física de Estuários" (EDUSP), vencedor do Prêmio Jabuti de 2003. É Docente Colaborador Sênior do Instituto Oceanográfico da USP, com experiência na área de Oceanografia, com ênfase em Oceanografia Física de Estuários.*

## MOYSÉS GONSALEZ TESSLER

*Geólogo (1975) pela Universidade de São Paulo, com mestrado (1982) e doutorado (1988) em Geociências (Geologia Sedimentar), também pela Universidade de São Paulo. Foi professor no IOUSP, colaborando com a criação do Curso de Graduação Bacharelado em Oceanografia e posteriormente tornando-se Presidente da Comissão de Graduação. Lecionou e desenvolveu projetos de pesquisa com ênfase em Oceanografia Geológica, atuando principalmente nos seguintes temas: litoral paulista, plataforma continental, sedimentação e taxa de sedimentação.*

## ROSANE GONÇALVES ITO

*Possui graduação em Química pela Universidade de Brasília (1975), graduação em Geografia pela Universidade de São Paulo (1980), mestrado (1990) e doutorado (1996) em Química (Química Analítica) pela Universidade de São Paulo. Foi professora no IOUSP e pesquisadora na FURG, ministrando disciplinas e desenvolvendo pesquisas com ênfase em Propriedades Químicas da Água do Mar, atuando principalmente nos seguintes temas: sistema carbonato oceânico, pressão parcial do $CO_2$, fluxos líquidos de $CO_2$, carbono antropogênico e acidificação dos oceanos.*

# AUTORES

## AFRÂNIO RUBENS DE MESQUITA

*Físico pela USP, com mestrado em Oceanografia (IOUSP e University of Southampton) e doutorado em Oceanografia pelo IOUSP. Foi Professor Titular no IOUSP, onde desenvolveu projetos de pesquisa e lecionou nas áreas de hidrodinâmica costeira, dinâmica de processos temporais oceânicos, marés e nível do mar. Foi Coordenador Nacional do GARP (Global Atmospheric Research Program) – WMO/ICSU (Organização Meteorológica Mundial/ Conselho Internacional de Uniões Científicas) e fez parte do conselho de especialistas do GLOSS (Global Observing Sea Level System) - IOC/UNESCO.*

*ardmesq@usp.br*

## ALEXANDER TURRA

*É professor titular do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP) e coordenador da Cátedra UNESCO para a Sustentabilidade do Oceano, sediada no Instituto Oceanográfico e no Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo. É biólogo com mestrado e doutorado em Ecologia pela Universidade Estadual de Campinas e bolsista 1B de produtividade em pesquisa do CNPq. A atuação está voltada para o exercício da pesquisa interdisciplinar e integrada, com foco em temas como governança, manejo integrado e conservação marinha, impacto ambiental marinho, mudanças climáticas, poluição marinha (lixo nos mares) e biodiversidade marinha.*

*turra@usp.br*
*ORCID: 0000-0003-2225-8371*

## AMANDA ALVES GOMES

*Bióloga, mestre em Aquicultura e Pesca pelo Instituto de Pesca APTA/SAA. Atualmente, é aluna de doutorado do Programa de Pós-graduação em Oceanografia do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP) e faz parte da equipe do Projeto DEEP OCEAN: Diversidade e Evolução de Peixes de Oceano Profundo. Tem experiência nas áreas de Ictiologia (com ênfase em morfologia e ecologia de peixes de oceano profundo), Ciência Pesqueira e Divulgação Científica, onde atua principalmente no Canal Zoomundo no YouTube.*

*amandagomes.biomar@gmail.com*
*ORCID: 0000-0002-2048-1513*

## ANA CLÁUDIA SANTAROSA

*Graduada em Oceanografia pela Universidade de São Paulo (2007), Mestre (2010) e Doutora (2018) em Oceanografia Geológica pelo IOUSP (2018). Atualmente é pós-doutoranda na mesma Instituição, onde desenvolve pesquisa sobre foraminíferos bentônicos no talude continental da Bacia de Santos e sua aplicação para avaliação e monitoramento ambientais. Possui experiência também na área de paleoceanografia e mudanças climáticas, atuando principalmente nos seguintes temas: micropaleontologia, geoquímica de carbonatos e célula de revolvimento meridional do Atlântico.*

*anasantarosa@gmail.com*
*ORCID: 0000-0002-9436-7262*

## ANDERSON GARBUGLIO DE OLIVEIRA

*Bacharel em Química pela Universidade Federal de Santa Catarina, com Doutorado sanduíche em Química Orgânica pelo Instituto de Química da USP e San Francisco State University (EUA). Atualmente é Professor Doutor no Instituto Oceanográfico da USP onde estuda aspectos químicos e bioquímicos da bioluminescência marinha, e em especial aplicações biotecnológicas para esses sistemas.*

*anderson.garbuglio@usp.br*
*ORCID: 0000-0003-1752-0726*

## ANGELO FRAGA BERNARDINO

*Bacharel em Química pela Universidade Federal de Santa Catarina, com Doutorado sanduíche em Química Orgânica pelo Instituto de Química da USP e San Francisco State University (EUA). Atualmente é Professor Doutor no Instituto Oceanográfico da USP onde estuda aspectos químicos e bioquímicos da bioluminescência marinha, e em especial aplicações biotecnológicas para esses sistemas.*

*angelo.bernardino@ufes.br*
*ORCID: 0000-0002-1838-4597*

## ARTHUR ZIGGIATTI GÜTH

*Biólogo e pesquisador no Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP). Formado em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e Mestre em Ecologia pela mesma instituição. Tem trabalhado com Ecologia de Comunidades Bêntonicas desde então, desenvolvendo pesquisa nas áreas de Ecologia de Bentos Antártico, Recifes de Corais, Mapeamento de Habitats Marinhos e, mais recentemente, realiza estudos em Ecologia de Comunidades de Mar Profundo.*

*azguth@usp.br*
*ORCID: 0000-0001-8388-4187*

## BELMIRO MENDES DE CASTRO FILHO *(in memoriam)*

*Graduado em Física pela Universidade de São Paulo, com mestrado em Oceanografia (Oceanografia Física) pela Universidade de São Paulo e doutorado em Oceanografia Física e Meteorologia pela University of Miami. Foi Professor Titular do IOUSP, onde desenvolveu pesquisas, lecionou e orientou alunos, atuando principalmente nos seguintes temas: Hidrodinâmica da Plataforma Continental e de Estuários, além de Física da Poluição Marinha. É co-autor do livro "Princípios de Oceanografia Física de Estuários", que recebeu o Prêmio Jabuti da Câmara Brasileira do Livro. Foi Diretor do IOUSP (2001-2005) quando da criação do curso de graduação Bacharelado em Oceanografia e Chefe do Departamento de Oceanografia Física, Química e Geológica, do mesmo Instituto, nas gestões 1997-1999, 1999-2001, 2005-2007 e 2007-2009.*

## BIANCA SUNG MI KIM

*Oceanógrafa pela Universidade de São Paulo (2015). Mestra e doutoranda em Oceanografia Química no Laboratório de Química Inorgânica Marinha do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, sob orientação do Prof. Dr. Rubens Cesar Lopes Figueira. Tem experiência na área de Oceanografia, com ênfase em Oceanografia Química, principalmente na área de poluição por metais em sedimento.*

*bianca.kim@usp.br*
*ORCID: 0000-0003-2186-3764*

## BRIANA BOMBANA

*Oceanógrafa pela Universidade do Vale do Itajaí (UNIVALI), especialista em Gestão de Zonas Costeiras e Estuarinas pela Universitat Politècnica de Catalunya (UPC, Espanha), mestre em Gestão Costeira Integrada pela Universidad de la República (Udelar, Uruguai) e doutora em Geografia pela Universitat Autònoma de Barcelona (UAB, Espanha). Atualmente, trabalha como bolsista na Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina (SDE-SC). Atua nas áreas de ciência pós-normal, qualidade do conhecimento, sistemas socioecológicos, governança costeira, planejamento regional e local, gestão costeira integrada, gestão de praias, indicadores para a sustentabilidade.*

*brianaab@gmail.com*
*ORCID: 0000-0002-6044-3116*

## CAMILA NEGRÃO SIGNORI

*Oceanógrafa pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Mestre em Ciências Biológicas/ Zoologia pelo Museu Nacional e Doutora em Ciências/ Microbiologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, com Doutorado Sanduíche no Woods Hole Oceanographic Institution (Estados Unidos). Atualmente é Professora Doutora do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo e coordena o MicrOcean Lab, atuando nas áreas de diversidade e processos microbianos em ecossistemas marinhos, com ênfase na quimiossíntese.*

*csignori@usp.br*
*ORCID: 0000-0001-5259-9332*

## CINTIA YAMASHITA

*Bacharel em Oceanografia, mestre em Oceanografia Química e Geológica, doutora em Oceanografia Geológica pelo Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. Tem experiência na área de Oceanografia, com ênfase em bioindicadores ambientais, micropaleontologia e geoquímica.*

*cintia.yamashita@usp.br*
*ORCID: 0000-0001-5333-3982*

## CLÁUDIA NAMIKI

*Bacharel em Ciências Biológicas e Mestre em Ecologia, ambos pelo Instituto de Biologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Doutora em Oceanografia Biológica pelo IOUSP. Cofundadora e editora da Plataforma de Divulgação Científica Bate-Papo com Netuno. Atua principalmente na pesquisa e ensino relacionados a biologia e ecologia do ictioplâncton marinho e na divulgação das ciências do mar.*

*namiki@usp.br*
*ORCID: 0000-0001-9262-8409*

## CLEMENTE COELHO-JR

*Biólogo pela Universidade Presbiteriana Mackenzie, Mestre e Doutor pelo Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. Professor Adjunto do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade de Pernambuco (UFPE). Cofundador e Diretor-Presidente do Instituto BiomaBrasil. Desenvolve projetos de pesquisa e extensão relacionados aos ecossistemas costeiros e marinho, com ênfase nos manguezais.*

*clemente.coelhojr@gmail.com*
*ORCID: 0000-0003-2520-7027*

## DANIEL PAVANI VICENTE ALVES

*Bacharel em Oceanografia pela Universidade de São Paulo, Mestre, Doutor e Pós-doutor em Oceanografia Geológica, com ênfase em estudos sismoestratigráficos e paleoceanografia, pela mesma universidade. Trabalhou por 5 anos em empresas de consultoria em geofísica marinha rasa, trabalhando com projetos de engenharia costeira, gerenciamento costeiro e de águas interiores. Possui experiência com planejamento, aquisição e processamento de dados sísmicos, sonográficos e batimétricos.*

*daniel.alves@usp.br*
*ORCID: 0000-0002-6129-3076*

## EDMO JOSÉ DIAS CAMPOS

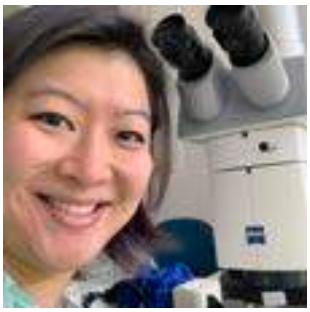
*Professor Emérito do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo e Pesquisador da Universidade Americana de Sharjah; Membro eleito da Academia Brasileira de Ciências, da Academia de Ciências do Estado de São Paulo, Brasil, e da Sigma Xi Honor Research Society. Bacharel e Mestre em Física pela Universidade de Brasília. Doutorado em Meteorologia e Oceanografia Física pela RSMAS / University of Miami. Especialista em Circulação Oceânica em Grande Escala, Circulação Oceano-Atmosfera e o Papel do Oceano no Sistema Climático.*

*edmo@usp.br*
*ORCID: 0000-0001-6399-5496*

## ELISABETE DE SANTIS BRAGA

*Professora Titular MS-6 da Universidade de São Paulo, Diretora do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (2017-2021). Responsável pelo Laboratório de Biogeoquímica de Nutrientes, micronutrientes e traços nos oceanos (LABNUT-IOUSP). Mestrado em Oceanografia Física, área de Oceanografia Química -IOUSP, Doutorado em Oceanografia Biológica-IOUSP com Sandwich em Oceanografia Química na Université de Bretagne Occidentale (França). Possui Pós-Doutorado pelo ORSTOM - atual IRD (Institut de Recherche pour le Développement)(1997), Pós-Doutorado pela Université Pierre et Marie Curie (2001) e Pós-Doutorado pelo Institut Universitaire Européen de la Mer (2004). Área de Pesquisa em Oceanografia Química com ênfase nos temas: ciclos biogeoquímicos dos nutrientes e traços, ciclo do carbono, bioquímica marinha, geoquímica e poluição, ecologia de ecossistemas. Possui cerca de 100.000 milhas náuticas navegadas em expedições científicas.*

*edsbraga@usp.br*
*ORCID: 0000-0001-5780-3814*



## FABIANE SAYURI IWAI

*Bióloga marinha, formada pela Universidade Estadual Paulista (UNESP/CLP), com título de mestre e doutora pelo Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP). Atualmente é pós doutoranda no Laboratório de Bioindicadores Ambientais no IOUSP, desenvolvendo pesquisa voltada ao monitoramento ambiental através de foraminíferos bentônicos. Atua também em divulgação científica através do iScience. Tem também experiência em análises geoquímicas, reconstituição paleoceanográfica e foraminíferos planctônicos.*

*sayuri.iwai@usp.br*
*ORCID: 0000-0002-4599-6652*

## FABIANO DA SILVA ATTOLINI

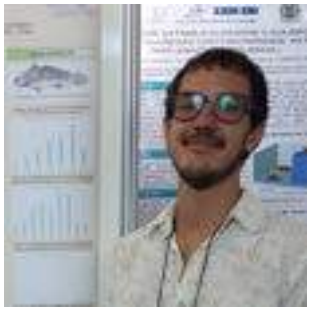
*Bacharelado e licenciatura em Ciências Biológicas pela Universidade Presbiteriana Mackenzie. Mestrado e Doutorado em Oceanografia Biológica, pelo Instituto Oceanográfico da USP. Atualmente no Museu Oceanográfico, prestando apoio às atividades de cultura e extensão desenvolvidas pelo Instituto Oceanográfico.*

*attolini@usp.br*

## FLÁVIA MARISA PRADO SALDANHA-CORRÊA

*Bacharel e licenciada em Ciências Biológicas pelo Instituto de Biociências da USP, Mestre e Doutora pelo Instituto Oceanográfico da USP (IOUSP) na área de ecologia do fitoplâncton marinho. É Bióloga do Departamento de Oceanografia Biológica do IOUSP, onde é curadora do Banco de Microrganismos Aidar & Kutner e atua nas áreas de ecologia do fitoplâncton marinho, produção primária e cultivo de microalgas.*

*fsalcorr@usp.br*
*ORCID: 0000-0001-6081-0388*




## FRANCESCO SILVEIRA MACHADO CHIOATTO

*Bacharel em Oceanografia pelo Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP). Possui experiência em análises químicas em matriz biológica e identificação, manejo e ecologia da ictiofauna.*

*fchioatto@gmail.com*

## GABRIEL TAGLIARO

*Pós-doutorando em Oceanografia Geológica no Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. Geólogo pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos com passagem sanduíche pela Baylor University (EUA) e Doutorado em Geociências pela University of Texas at Austin (EUA). Atua em pesquisas relacionadas às áreas de Geologia Marinha e Sedimentar, com foco em estratigrafia, paleoceanografia e paleoclimatologia do Cenozóico.*

*gabrieltagliaro@usp.br*
*ORCID: 0000-0002-9309-758X*

## GABRIELA VERRUCK DE MORAES

*Enquanto graduanda do Bacharel em Ciências Biológicas pela Universidade de São Paulo, migrou da área de comportamento de formigas para Bioluminescência Marinha. Ao graduar-se, aplicou para o Programa de Doutorado Direto do Instituto Oceanográfico da USP, onde hoje faz o seu doutorado em Bioluminescência Marinha, com foco em Bioquímica e Biologia Molecular.*

*gabriela.verruck.moraes@usp.br*
*ORCID: 0000-0003-3434-1631*

## GIOVANA DE ASSIS GARCIA

*Técnica em Meio Ambiente pela Escola Técnica Estadual de São Paulo (ETESP) e Oceanógrafa pelo Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IO-USP). Atualmente é mestranda na mesma instituição na área de Oceanografia Biológica. Com atuação principal em biologia e ecologia da ictiofauna, tem experiência em identificação, estudos de crescimento e idade, e relacionados à reprodução de peixes marinhos.*

*giovana.assis.garcia@usp.br*

## GUILHERME MORAES DE OLIVEIRA ABUCHAHLA

*Bacharel e licenciado em Ciências Biológicas pela Universidade Presbiteriana Mackenzie, mestre em Gestão Ambiental pela Universidade de Kiel (Alemanha), doutorando pela Universidade de Bremen e pesquisador-convidado do Leibniz-Zentrum für Marine Tropenforschung (ZMT, Alemanha). Egresso do Centro de Ensino e Formação sobre Zonas Úmidas Costeiras Tropicais, com Ênfase no Ecossistema Manguezal, trabalha neste ambiente há mais de duas décadas.*

*abuchahla@gmail.com*
*ORCID: 0000-0003-0314-2699*

## ILANA WAINER

*Ilana Wainer, Professora do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. É especialista em interação oceano-atmosfera e mudanças do clima utilizando modelos acoplados de alta complexidade. Atualmente Ilana Wainer coordena o laboratório de Oceanografia Física Clima e Criosfera (oc2.io.usp.br) e é co-chair do programa de pesquisa ANtClimNow do SCAR (Scientific Committee for Antartic Research - https://www.scar.org/science/antclimnow/home/).l*

*wainer@usp.br*
*ORCID: 0000-0003-3784-623X*

## ILSON CARLOS ALMEIDA DA SILVEIRA

*Bacharel em Oceanografia pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro, com Mestrado em Oceanografia Física (USP), Ph. D. em Ciências da Terra - Oceanografia Física (University of New Hampshire) e Pós-doutorado em Oceanografia Física (University of Rhode Island). Professor Titular de Oceanografia Física no IOUSP e Professor Adjunto da SMAST/UMass Dartmouth, desenvolve pesquisas relacionadas à dinâmica de mesoescala e sub mesoescala associadas a correntes de contorno oeste, com foco em estudos de instabilidade geofísica e vórtices no oceano. Também desenvolve pesquisa na área de Oceanografia Física Teórica, além de análise dinâmica de observações e modelagem numérica de processos físico-biológicos oceânicos.*

*ilson.silveira@usp.br*
*ORCID: 0000-0001-9266-6480*

## JOANA DIAS HO

*Bacharel e licenciada em Ciências Biológicas pelo Instituto de Biociências da USP, atualmente aluna de mestrado do programa de pós-graduação em Epidemiologia Experimental Aplicada a Zoonoses da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia da USP. Atua na área de Ilustração, assim como em pesquisa sobre microbiologia e biologia molecular.*

*joanadiasho@gmail.com*

## JOSEPH HARARI

*Bacharel em Física, Mestre em Oceanografia Física, Doutor em Meteorologia e Livre-docente em Oceanografia Física, pela Universidade de São Paulo. Atualmente é Professor Associado do Instituto Oceanográfico da USP, sendo orientador no Curso de Pós-graduação em Oceanografia, e orientador no Curso de Pós-graduação em Ciência Ambiental do Instituto de Energia e Meio Ambiente da USP. Atua nas áreas de modelagem numérica (hidrodinâmica, de ondas e de dispersão), circulação costeira e da plataforma, análise de séries temporais, marés, nível médio do mar e altimetria de satélite.*

*joharari@usp.br*
*ORCID: 0000-0002-7094-4504*

## JUNE FERRAZ DIAS

*Bióloga pelo Instituto de Biociências da USP, mestre e doutora em Ciências (Oceanografia Biológica) pelo IOUSP, com estágio de doutorado sanduíche no GEOMAR - Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, Alemanha. Atualmente é Professora Doutora no Departamento de Oceanografia Biológica e orientadora do Programa de Pós-Graduação em Oceanografia do IOUSP. Coordena o ECORREP (Lab. Ecologia da Reprodução e do Recrutamento de Organismos Marinhos). Atua nas áreas de ecologia reprodutiva de actinopterígios marinhos, recrutamento larval de pequenos pelágicos, estrutura e dinâmica da ictiofauna e uso de peixes como indicadores de integridade ecológica de ecossistemas costeiros.*

*junedias@usp.br*
*ORCID: 0000-0002-7843-4082*

## KARIN LÜTKE ELBERS

*Bacharel em Oceanografia pelo Centro de Estudos do Mar da Universidade Federal do Paraná (CEM-UFPR) e mestre em Oceanografia Biológica pelo Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP). Trabalhou com pesquisa sobre o ecossistema marinho antártico, em projetos sobre ecologia bêntica da plataforma continental e monitoramento do zooplâncton em áreas costeiras. Atua na área de meio ambiente e sustentabilidade no setor privado na Suécia.*

*karinlutke@gmail.com*

## LEANDRA REGINA GONÇALVES

*Bióloga e Doutora em Relações Internacionais pela USP. Suas pesquisas incluem gestão costeira e marinha, políticas públicas ambientais, instituições internacionais e manejo de recursos naturais de uso comum. É pesquisadora de pós-doutorado no IOUSP e Professora do Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia do Mar (Unifesp). É integrante da Plataforma Brasileira sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos (BPBES) e do Projeto de Governança do Sistema da Terra, além de Autora Principal (Efetividade das Políticas Ambientais) para o Programa de Meio Ambiente das Nações Unidas (PNUMA) no Global Environment Outlook 6. Desde 2011 vem sendo uma das articuladoras do Projeto de Lei 6.969/2013 em colaboração com a Fundação SOS Mata Atlântica e a Liga das Mulheres pelo Oceano.*

*goncalvesleandra@gmail.com*
*ORCID: 0000-0003-1182-418X*

## LEANDRO FERNANDES PATRÍCIO

*Bacharel pelo Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP), atualmente é mestrando no mesmo Instituto, na área de concentração Oceanografia Biológica. Atua principalmente em pesquisas relacionadas à oceanografia pesqueira, como biologia e ecologia da fauna dos estoques marinhos. Possui experiência com estudos com gônadas, como cálculo de fecundidade, estádios de maturidade e outros.*

*leandro27patricio@gmail.com*

## LEANDRO INOE COELHO

*Formado em Oceanografia no IOUSP com passagem por diversos laboratórios desse instituto e do Instituto de Biociências da USP. Foi Presidente e Diretor de Marketing da IO Júnior, atuou como Analista Ambiental e em Tecnologia da Informação na SALT - Sea & Limno Technology e como diretor da ONG Projeto Ecossistemas Costeiros. Atualmente é colaborador da ONG Instituto Costa Brasilis - Desenvolvimento Socioambiental e fundador da #entremarés - comunicação científica, onde desenvove projetos de editoração, ilustração e projetos voltados para a divulgação da ciência. É fotógrafo, Divemaster e realizou diversos cursos em meio ambiente, webdesign, comunicação, educação ambiental e gestão de projetos.*

*leandro.coelho@alumni.usp.br*

## LUCIANA YOKOYAMA XAVIER

*Oceanógrafa, mestre e doutora em Oceanografia pelo Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. Atualmente é pós-doutoranda no mesmo instituto (Proc. FAPESP: 2017/21797-5) e atua junto à Cátedra UNESCO para Sustentabilidade do Oceano e à Liga das Mulheres pelo Oceano. Vem desenvolvendo pesquisa na área de governança e gestão costeira integrada, transdisciplinaridade e ciência pós-normal, participação e aprendizagem social, sistemas socioecológicos, gestão baseada em ecossistemas e gestão de áreas marinhas protegidas.*

*lyxavier@usp.br*
*ORCID: 0000-0001-7074-9365*

## LUCIANO PEREIRA DE SOUZA

*Auxiliar administrativo, IOUSP. Especialista em fotografia digital, iluminação e tratamento de imagens.*

*lucianosouza@usp.br*

## LUIGI JOVANE

*Professor associado do IOUSP. Especialista em geofísica, paleomagnetismo e propriedades magnéticas com aplicações no estudo das variações climáticas e eventos globais. Participou das Expedições IODP-325 (Great Barrier Reef, Austrália), IODP-344 (Costa Rica), IODP-359 (Maldivas) e Expedição de Perfuração geológica na Antártica (ANDRILL-SMS). Membro do Comitê Científico IODP-CAPES-BRASIL. Graduado em Geologia (Universidade degli Studi di Roma TRE), com doutorado em Geofísica (ALMA MATER STUDIORUM, Università di Bologna), e Pós-doutorado em Paleomagnetismo (University of California, Davis). Atua principalmente nos seguintes temas: Magnetoestratigrafia, Paleomagnetismo, Paleoclimatologia, Antártica, Sismoestratigrafia e Geofísica Geral.*

*jovane@usp.br*
*ORCID: 0000-0003-4348-4714*

## LUIZ VIANNA NONNATO

*Engenheiro Eletrônico formado pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Mestre e Doutor em Engenharia Eletrônica / Sistemas Digitais pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Engenheiro do Laboratório de Instrumentação Oceanográfica do Departamento de Oceanografia Física, Química e Geológica do Instituto Oceanográfico da USP, atuando no desenvolvimento, manutenção e operação de equipamentos oceanográficos. Possui extensa experiência em trabalhos de campo embarcados, tendo participado de mais de meia centena de cruzeiros oceanográficos, na costa brasileira e região antártica.*

*luiz.nonnato@usp.br*
*ORCID: 0000-0002-3458-7861*

## MARCELO DOTTORI

*Bacharel em física pelo Instituto de Física da USP, possui mestrado em Oceanografia Física pelo Instituto Oceanográfico da USP e doutorado, também em Oceanografia Física, pela Florida State University (EUA). Atualmente é Professor Doutor do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP) atuando em hidrodinâmica da plataforma continental no Laboratório de Hidrodinâmica Costeira (LHiCo).*

*mdottori@usp.br*
*0000-0003-2382-4136*

## MARCELO ROBERTO SOUTO DE MELO

*Biólogo, formado pela Universidade Federal de Goiás, com mestrado em Ciências Biológicas (Zoologia) pelo Museu Nacional da Universidade Federal do Rio de Janeiro e doutorado em Ciência Biológicas (Zoologia) pela Auburn University (EUA). Atualmente, é Professor Doutor no Instituto Oceanográfico e coordena o Laboratório de Diversidade, Ecologia e Evolução de Peixes – DEEP Lab, atuando na área de ictiologia com ênfase na fauna Neotropical e de oceano profundo.*

*melomar@usp.br*
*ORCID: 0000-0002-4757-8286*

## MARCIA CARUSO BÍCEGO

*Possui graduação em Engenharia Química pela Fundação Armando Álvares Penteado (1982), mestrado em Oceanografia (Oceanografia Física) pela Universidade de São Paulo (1988) e doutorado em Química (Química Analítica) [Sp-Capital] pela Universidade de São Paulo (1996). Atualmente é professora associada da Universidade de São Paulo. Tem experiência na área de Oceanografia, com ênfase em Química Orgânica Marinha, atuando principalmente nos seguintes temas: poluição marinha, paleoceanografia e marcadores orgânicos geoquímicos.*

*marciabicego@usp.br*
*ORCID: 0000-0002-9939-9853*

## MÁRCIA REGINA DENADAI

*Licenciada em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho; Mestre e Doutora em Ciências Biológicas - Zoologia, pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho; Pós-doutorado em Ecologia Marinha pela Universidade Estadual de Campinas e Universidade de São Paulo; Jovem Pesquisador no Centro Universitário Módulo, Caraguatatuba. Possui experiência de 26 anos em pesquisa acadêmico-científica, atuando em biodiversidade marinha, ecologia do bentos, poluição marinha, cultura caiçara e lixo no mar.*

*marciard@gmail.com*

## MARCOS CÉSAR DE OLIVEIRA SANTOS

*Biólogo formado pela Universidade de São Paulo (USP) em 1993, onde cursou pós-graduação em níveis de mestrado (1999) e doutorado (2004) na área de ecologia no Instituto de Biociências. Desde 2011 é docente do Instituto Oceanográfico da USP, onde coordena o Laboratório de Biologia da Conservação de Mamíferos Aquáticos (LABCMA). Tem experiência com pesquisa, extensão cultural e atuação em frentes voltadas à conservação de cetáceos desde 1993.*

*mcos@usp.br*
*ORCID: 0000-0002-6642-2658*

## MARCOS TONELLI

*Oceanógrafo pela Universidade de São Paulo, Mestre e Doutor em Oceanografia Física pelo Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. Tem trabalhado com Oceanografia de altas latitudes com foco nos impactos das mudanças climáticas sobre a circulação e formação de massas de água no Oceano Austral, Antártica. Atualmente, ocupa o posto de Capitão de Corveta (RM3-T) da Marinha do Brasil, servindo como pesquisador no Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM), em Arraial do Cabo, RJ.*

*marcos.tonelli@gmail.com*
*ORCID: 0000-0002-0984-6358*

## MARCUS POLETTE

*Possui graduação em Oceanologia e Geografia pela Fundação Universidade do Rio Grande - FURG e mestrado e doutorado em Ecologia e Recursos Naturais pela Universidade Federal de São Carlos - UFSCar. É professor e pesquisador da Universidade do Vale do Itajaí - UNIVALI atuando nas áreas de Gestão e Governança Costeira, nos seguintes temas: Planejamento Regional e Urbano, Indicadores Socioambientais; Gestão de praias e Planejamento Espacial Marinho - PEM.*

*mpolette@univali.br*
*ORCID: 0000-0003-0437-4205*

## MARIA DE LOURDES ZANI-TEIXEIRA

*Bacharel em Ciências Biológicas pelo Instituto de Biociências da USP. Mestre pelo Instituto Oceanográfico da USP. Bióloga do Departamento de Oceanografia Biológica do IOUSP. Atuação principal em pesquisas relacionadas ao estudo da biologia e ecologia do ictioplâncton marinho.*

*zanit@usp.br*
*ORCID: 0000-0002-0865-1719*

## MARIA LUIZA FLAQUER DA ROCHA

*Graduação em Ciências Biológicas pela Universidade Presbiteriana Mackenzie; Mestrado e Doutorado em Oceanografia Biológica pelo IOUSP; Pós-doutorado pelo Instituto Oceanográfico em parceria com o Instituto de Física da UFRGS. Atuação principal em pesquisa relacionada à biologia e ecologia da ictiofauna, biomarcadores de contaminação ambiental e gerenciamento de banco de dados. Atualmente, trabalha como pesquisadora colaboradora na Coleção Biológica Prof. Edmundo F. Nonato (ColBIO).*

*isaflaquer@usp.br*

## MARIA LUIZA LEAL DE PAULA

*Bióloga pelo Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo. Tem experiência em manejo de tartarugas marinhas e identificação e manejo da ictiofauna marinha. Atualmente, pesquisa a ecologia e o impacto da pesca em espécies comerciais de peixes no Instituto de Pesca de Santos.*

*maria.lealdepaula@gmail.com*

## MARIO KATSURAGAWA

*Bacharel em Ciências Biológicas pelo IB-USP. Mestre e Doutor pelo IOUSP. Trabalha no IO desde 1976, atualmente na função de Professor Associado, junto ao Departamento de Oceanografia Biológica. Exerce atividades em ensino, pesquisa e extensão, sendo o campo de atuação principal os estudos sobre a biologia e ecologia do ictioplâncton marinho, em que possui mais de 40 anos de experiência.*

*mkatsura@usp.br*
*ORCID: 0000-0001-7986-8096*

## NATALIA DE MIRANDA GRILLI

*Bióloga, Especialista em Gerenciamento Ambiental e Mestre em Oceanografia, ambos pela Universidade de São Paulo. Possui experiência com gestão costeira integrada, abordagem ecossistêmica, lixo no mar, educação ambiental e facilitação de grupos. Integra as redes Liga das Mulheres pelo Oceano, Youth Climate Leaders, PainelMar e o Grupo de Apoio à Mobilização para a Década do Oceano da Região Sudeste. Também colabora com a Bloom Agência de Mudanças e o Instituto Costa Brasilis.*

*nmgrilli@gmail.com*
*ORCID: 0000-0002-6634-3992*

## NATÁLIA SILVA

*Possui graduação em Oceanografia, pelo Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP) e atualmente é aluna de mestrado do Programa de Pós-graduação em Oceanografia do IOUSP. Trabalha no Laboratório de Oceanografia, Clima e Criosfera (OC2), onde desenvolve pesquisas acerca do clima na Antártica e como este tem variado desde o passado até o período atual. Sua pesquisa busca investigar, em particular, se as variações do clima antártico resultam da variabilidade climática natural do Sistema Terrestre, ou se estão respondendo à forçantes externas.*

*natalia3.silva@usp.br*
*ORCID: 0000-0002-1434-5427*

## NATASHA TRAVENISK HOFF

*Oceanógrafa formada pelo Instituto Oceanográfico da USP, e mestre em Ciências (Oceanografia, área de concentração Oceanografia Biológica) pela mesma instituição. Atualmente, é doutoranda em Oceanografia (Oceanografia Biológica) pelo IOUSP e bolsista PDSE (CAPES) no Centro Interdisciplinar de Investigação Ambiental e Marinha (CIIMAR, Porto - Portugal). Possui experiência em análises químicas inorgânicas de sedimento e otólitos; estoques pesqueiros; índices de integridade biótica; e biologia e ecologia da ictiofauna.*

*tashahoff@gmail.com*
*ORCID: 0000-0003-3633-8516*

## PAULO ALVES DE LIMA FERREIRA

*Oceanógrafo formado pela Universidade de São Paulo (USP). Mestre e doutor em Oceanografia Química pela USP, atualmente é pesquisador de pós-doutorado do Laboratório de Química Inorgânica Marinha (LaQIMar) e colaborador do Laboratório de Geologia de Margens Continentais (LAMA). Tem experiência na área de Oceanografia, com ênfase em Radioatividade Marinha e Geocronologia.*

*paulo.alves.ferreira@usp.br*
*ORCID: 0000-0001-9723-3166*

## PAULO YUKIO GOMES SUMIDA

*Bacharel em Ciências Biológicas pela Universidade Presbiteriana Mackenzie, Mestre em Oceanografia Biológica pelo IOUSP, Doutor em Oceanografia Biológica pela University of Southampton (National Oceanography Centre, Inglaterra) e Livre-Docente pelo IOUSP. Pós-doutorando pela University of Hawaii, atualmente é Professor Titular do IOUSP. Participou de mais de 40 cruzeiros oceanográficos e mergulhou em diversos submersíveis de pesquisa tripulados (Alvin, Johnson-Sea-Link, Shinkai 6500, Deep Rover) a até 4200 m de profundidade. Atualmente sua pesquisa envolve o estudo da fauna de ambientes redutores de mar profundo, corais de águas profundas, crostas polimetálicas e fauna de ilhas orgânicas em altas latitudes.*

*psumida@usp.br*
*ORCID: 0000-0001-7549-4541*

## PHAN VAN NGAN

*Bacharel pela Tokyo University of Fisheries, mestrado e doutorado pela Tokyo University, ambas no Japão, Livre-Docente e Professor Titular aposentado pelo IOUSP. Lecionou, pesquisou e orientou sobre ecofisiologia de animais marinhos do Brasil e da Antártica. Participou do Programa Antártico Brasileiro desde sua Primeira Expedição e continuou a pesquisar e orientar no âmbito desse Programa até 10 anos depois da sua aposentadoria. Chefe Científico da II (segunda etapa) e III Expedições à Antártica, a bordo do N/Oc. Prof. W. Besnard. Representou o Brasil no "Working Group on Krill" (1989-1994) e "Working Group on Ecosystem Monitoring and Management" (1995-1998), no âmbito da "Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources-CCAMLR".*

*phanvanngan@gmail.com*

## RAFAEL ANDRÉ LOURENÇO

*Bacharel em Química pelo IQ-USP, mestre e doutor pelo IOUSP. Atualmente é professor associado do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. Atua na área de oceanografia química, principalmente com avaliação e interpretação de compostos orgânicos, com destaque para a avaliação de hidrocarbonetos em ambiente marinho.*

*rafaell@usp.br*
*ORCID: 0000-0002-1446-5074*

## RENATA RAMOS GOMES

*Bacharela em Oceanografia pelo Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP) e mestranda na área de concentração Oceanografia Biológica no mesmo instituto. Possui experiência em identificação, manejo e ecologia da ictiofauna. Atua em pesquisas relacionadas à ecologia e caracterização de geohabitat com ênfase em organismos demersais.*

*renata.ramos.gomes@usp.br*

## RICARDO DE CAMARGO

*Bacharel em Física pela USP (1987), Mestre em Oceanografia Física pela USP (1991) e Doutor em Meteorologia pela USP (1998). Atualmente é Professor Associado no Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. Experiência na área de Oceanografia Física e Meteorologia, Interação Oceano-Atmosfera e Meteorologia Sinótica, atuando principalmente nos seguintes temas: modelagem numérica da atmosfera e do oceano, em escala regional e em larga-escala; influências meteorológicas sobre regiões oceânicas, com ênfase em plataformas continentais e regiões costeiras; eventos marinhos extremos.*

*ricamarg@usp.br*
*ORCID: 0000-0002-9425-5391*

## ROSALINDA CARMELA MONTONE

*Bacharel em Química pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), mestrado e doutorado pela Universidade de São Paulo (USP). Atualmente é professora associada do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo atuando na área de Oceanografia Química com ênfase em poluição marinha, principalmente na pesquisa de poluição por esgotos, plásticos e poluentes orgânicos persistentes (POPs) no ambiente marinho e Antártica.*

*rmontone@usp.br*
*ORCID: 0000-0002-9586-1000*

## RUBENS CESAR LOPES FIGUEIRA

*Bacharel em Química pela Universidade Presbiteriana Mackenzie, Mestrado e Doutorado em Ciências pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN-SP). Atualmente é Professor Associado do Instituto Oceanográfico da USP. Possui experiência na área de Química Nuclear, Radioquímica, Geoquímica e Poluição Marinha. Atua nos seguintes temas: sedimentação marinha, radionuclídeos naturais e artificiais, geocronologia marinha, geoquímica marinha e poluição marinha (metais e radionuclídeos).*

*rfigueira@usp.br*
*ORCID: 0000-0001-8945-4540*

## SÉRGIO TEIXEIRA DE CASTRO

*Bacharelado e licenciatura em Ciências Biológicas pela Universidade Presbiteriana Mackenzie. Educador e chefe do Museu Oceanográfico do IOUSP. Desde 1988 à frente do Serviço de Museu do IOUSP na difusão da ciência e das pesquisas desenvolvidas pelo IOUSP.*

*sergiotc@usp.br*

## SILVIA HELENA DE MELLO E SOUSA

*Geóloga pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Instituto de Geociências e Ciências Exatas, campus de Rio Claro, Mestrado e Doutorado em Ciências pela Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências. Atualmente é professora associada do Instituto Oceanográfico da USP. Atua nas linhas de pesquisa da Oceanografia Geológica, especificamente Micropaleontologia, Sedimentação Marinha e Paleoceanografia, principalmente nos seguintes temas: foraminíferos bentônicos, ecologia, paleoecologia, reconstituição ambiental e avaliação da qualidade ambiental.*

*smsousa@usp.br*
*ORCID: 0000-0002-8860-9042*

## SÔNIA MARIA FLORES GIANESELLA

*Bióloga pelo Instituto de Biocências da USP, Mestre, Doutora e Livre-Docente pelo Instituto Oceanográfico da USP (IOUSP), com Pós -Doutorado pela McMaster University, Canadá e pelo Observatoire Océanologique de Banyuls-sur-Mer, França. É Professora Associada aposentada do IOUSP onde desenvolveu estudos voltados à ecologia do fito e bacterioplâncton marinho, produção primária e cultivo de microalgas. Foi coordenadora do Programa de Ciência Ambiental do Instituto de Energia e Ambiente da USP, da Comissão de Estudos de Problemas Ambientais da USP e membro do CONSEMA.*

*soniag@usp.br*
*ORCID: 0000-0001-7319-5169*

## SUELI SUSANA DE GODOI

*Docente do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP), vinculada ao Laboratório de Dinâmica Oceânica. Atua na área de Oceanografia Física, especificamente em estudos de circulação oceânica de meso-escala, termodinâmica da água do mar, massas de água, frentes oceânicas. Atividades de embarque em cruzeiros oceanográficos e trabalhos de campo vêm sendo desenvolvidas no âmbito do ensino e da pesquisa, ao longo de 35 anos. Enfatiza-se, também, a participação ativa em trabalhos de cultura e extensão universitária. Há Doutorado em Ciências, área de Oceanografia Física, pelo IOUSP e Mestrado em Sensoriamento Remoto, ênfase em Oceanografia, pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.*

*ssdgodoi@usp.br*
*ORCID: 0000-0003-1652-651X*

## TAILISI HOPPE TREVIZANI

*Oceanógrafa pela Universidade Federal do Paraná, mestre e doutora em Ciências (Oceanografia Química) pelo Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP). Atualmente é pós-doutoranda no IO-USP, integrante dos Laboratórios de Química Inorgânica Marinha (LaQIMar -USP) e de Geologia de Margens Continentais (LAMA - USP). Tem experiência nas áreas de Oceanografia Química, Geológica e Biológica, atuando especialmente nas áreas de poluição marinha por metais, bioacumulação e geoquímica.*

*tailisi@usp.br*
*ORCID: 0000-0002-6057-5434*

## THAÏS NAVAJAS CORBISIER

*Graduada em Ciências Biológicas pela Universidade de São Paulo (1973), Mestre e Doutora em Oceanografia (Oceanografia Biológica) pelo Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo (1981 e 1989). Professora Associada do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo em 2007. A partir de 2013, Professora Associada Sênior. Atua nas linhas de pesquisa sobre estrutura e funcionamento de ecossistemas marinhos e de impacto ambiental, principalmente nos seguintes temas: bentos, meiofauna, Nematoda, ecologia, trofodinâmica, Brasil SE, Antártica.*

*tncorbis@gmail.com*
*ORCID: 0000-0001-7689-0654*

## THAMÍRIS CHRISTINA KARLOVIC DE ABREU

*Bacharel em Ciências Biológicas e mestre em Ecologia Aplicada, ambos pela Universidade Federal de Lavras. Atualmente é aluna de doutorado do Instituto Oceanográfico – USP (concentração em Oceanografia Biológica) e estudante associado da instituição Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science (RSMAS, Miami – US). Atua em pesquisas relacionadas à ecologia e conservação de vertebrados, especialmente elasmobrânquios, com ênfase em ecologia de populações e comunidades, métodos de modelagem ecológica e manejo de espécies.*

*thamykarlovic@usp.br*
*ORCID: 0000-0001-8409-2958*

## TITO MONTEIRO DA CRUZ LOTUFO

*Graduado em Ciências Biológicas com mestrado em Ecologia e doutorado em Zoologia, fez sua livre-docência em Oceanografia Biológica. Foi professor associado da Universidade Federal do Ceará até 2014, e desde então é professor associado do Instituto Oceanográfico da USP, onde coordena o Laboratório de Biologia Recifal (BIOREC). Trabalha com ambientes recifais, envolvendo sua ecologia e biogeografia, bem como a evolução e taxonomia de invertebrados marinhos.*

*tmlotufo@usp.br*
*ORCID: 0000-0003-3630-1342*

## TULIA ISABEL MARTINEZ AGUILAR

*Bacharel em Ciências Biológicas pela Universidad del Valle – Colômbia. Mestra e Doutora pelo IOUSP. Atuação principal em pesquisas relacionadas ao estudo da oceanografia biológica.*

*tulia.isabel1@gmail.com*
*ORCID: 0000-0001-8388-4187*

## VICENTE GOMES

*Graduado em Ciências Biológicas, Mestre, Doutor e Livre-docente em Oceanografia Biológica pela Universidade de São Paulo, é atualmente Professor Associado do Instituto Oceanográfico da USP. Suas áreas de especialidade são ecofisiologia, metabolismo, biomarcadores e assuntos antárticos.*

*vicgomes@usp.br*
*ORCID: 0000-0001-8201-2301*

## VIVIAN HELENA PELLIZARI

*Bacharel em Ciências Biológicas modalidade médica. Mestrado e Doutorado em Ciências ( Microbiologia) pelo Instituto de Ciências Biomédicas da Universidade de São Paulo, com Doutorado Sanduíche e Pós-doutorado no Center for Microbial Ecology na Michigan State University. Atua na área de Ecologia de Microrganismos Marinhos com ênfase em biodiversidade de bactérias e arqueias e microrganismos de ambientes extremos.*

*vivianp@usp.br*
*ORCID 0000-0003-2757-6352*

## YARA SCHAEFFER-NOVELLI

*Professora Associada Sênior do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. Bacharel e Licenciada em História Natural pela Universidade do Brasil, Rio de Janeiro. Mestrado em Oceanografia Biológica pelo Instituto Oceanográfico da USP; Doutorado em Zoologia pelo Instituto de Biociências da USP e Livre-Docente em Oceanografia Biológica pela USP. Responsável pelo Laboratório de Bioecologia de Manguezais – BIOMA e pelo Centro de Ensino e Formação sobre Zonas Úmidas Costeiras Tropicais, com ênfase no Ecossistema Manguezal. Orientadora e Co-orientadora de Mestrados, Doutorados e Pós-doutorados no Brasil e no Exterior. Cofundadora do Instituto Bioma Brasil.*

*novelliy@usp.br*
*ORCID 0000-0002-8758-7195*

# AGRADECIMENTOS

Os autores do livro Noções de Oceanografia agradecem às seguintes pessoas:

*Alex Bastos*
*Álvaro Migotto*
*André Negrão*
*André Scalate Rovai*
*Armando Soares dos Reis Neto*
*Ayrton Carrieri Pasquini*
*Barbara Pinheiro*
*Bruno Inoe Coelho*
*Caique Dias Luko*
*Carine de Godoi Rezende Costa*
*Carlos Alberto Moreira Gouvêa*
*Carlos Eduardo Leão Elmadjian*
*Cassia Cerezani de Andrade*
*Claudia Camara do Vale*
*Claudio Bellini*
*Cleverson Guizan Silva*
*Daniel Eduardo Lavanholi de Lemos*
*Daniel Menon Simões Moita*
*Daniel Nunes*
*Denise Moura*
*Diogo Barcellos*
*Douglas Vieira da Silva*
*Eder Sanchez Corrêa*
*Edson Rodrigues*
*Eloisa de Sousa Maia*
*Felipe Vilela da Silva*
*Francisco Luiz Vicentini Neto*
*Gabriel Monteiro*
*Helcy Lylian Nogueira Silbiger*
*Helenice Vital*
*Hilda de Souza Lima Mesquita*
*Jairo Savian*
*João Pedro Saldanha Corrêa*
*Joel Christofer Creed*
*Jorge de Jesus Picanço de Figueiredo*
*Jorge Gruda*
*José Gustavo Imakawa*
*José Luiz dos Santos*
*Julian Gutt*
*Lais Muniz Paiva*
*Leandro Martins*
*Lincoln dos Santos*
*Lorena Bissoli*
*Lucas Barbosa*
*Luciano Candisani*
*Luis Carlos da Silva*
*Luiz Carlos Krug*
*Luiza de Lima Luiz Fernandez*
*Manoel da Cruz Santos*
*Marco Iannirubertо*
*Maria Clara Colla Argeiro*
*Maria José de Arruda Campos Rocha Passos*
*Maria Virgínia Alves Martins*
*Marília Cunha Lignon*
*Marina Mourão Santana*
*Marina Nasri Sissini*
*Martino Giorgioni*
*Mayza Pompeu*
*Olga Tiemi Sato*
*Oziel do Carmo Santos*
*Paulo Polito*
*Priscila Kienteca Lange*
*Rafael Ricardo Rosa de Oliveira*
*Rafael Munhoz*
*Renata Hanae Nagai*
*Renato de Almeida*
*Ricardo Palamar Menghini*
*Roberto Varjabedian*
*Sebastião Amauri Borges*
*Sérgio João Aparício*
*Sylvio da Conceição*
*Tereza Araujo*
*Theodoro Saldanha Corrêa*
*Vanessa Colla Paspaltzis*
*Victor Alves de Souza*
*Wagner Pinheiro*

# AGRADECIMENTOS

Os autores do livro Noções de Oceanografia agradecem às seguintes instituições:

*Banco Santander*
*Base de Pesquisa "Clarimundo de Jesus" – Ubatuba (SP)*
*Base de Pesquisa "Dr. João de Paiva Carvalho" – Cananéia (SP)*
*Comissão de Cultura e Extensão do IOUSP*
*Comissão de Memória do IOUSP*
*Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq*
*Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES*
*Earthwatch Institute*
*Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP*
*Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo – FUSP*
*Laboratório de Dinâmica Oceânica – IOUSP*
*Marinha do Brasil*
*Pró-Reitoria de Cultura e Extensão Universitária da USP – PRCEU*
*Universidade de São Paulo – USP*

NOÇÕES DE
OCEANOGRAFIA

REALIZAÇÃO

APOIO

NOÇÕES DE
# OCEANOGRAFIA

ISBN: 978-65-995854-0-1
CIP
9 786599 585401

#entremarés