

# FRONTEIRAS DO CONHECIMENTO EM CIÊNCIAS DO MAR

ORGANIZADORES

PAULO DA CUNHA **LANA** &  
JORGE PABLO **CASTELLO**



MINISTÉRIO DA  
EDUCAÇÃO



PÁTRIA AMADA  
BRASIL  
GOVERNO FEDERAL



RIO GRANDE  
2020

# FRONTEIRAS DO CONHECIMENTO EM **CIÊNCIAS DO MAR**

**ORGANIZADORES**

PAULO DA CUNHA **LANA** &  
JORGE PABLO **CASTELLO**



MINISTÉRIO DA  
EDUCAÇÃO  **PÁTRIA AMADA  
BRASIL**  
GOVERNO FEDERAL

Organizadores

**Paulo da Cunha Lana &  
Jorge Pablo Castello**

Colaboradores

**Antônio Olinto Ávila-da-Silva • Aurea Maria Ciotti • Bernardo A. P. da Gama • Carina Catiana Foppa • Carlos Augusto Schetini • Carlos Roberto Soares • Dante Queirolo Palma • Eduardo Marone • Eduardo Siegle • Gustavo Goulart Moreira Moura • José Angel Alvarez Perez • Juliano Coletto • Katya Regina Isaguirre • Lauro A. S. P. Madureira • Lauro Júlio Calliari • Luciano Ponzi Pezzi • Luís Felipe Niencheski • Maikon Di Domenico • Marcelo P. De Pinho • Marcelo Visentini Kitahara • Mauricio Almeida Noernberg • Paulo C. Abreu • Renato C. Pereira • Ronald Buss de Souza • Segen Farid Estefen • Sônia Cristina da Silva Andrade • Stefan Weigert • Xavier Castello**

Diagramação

**Mariana Martins de Andrade**

Fotografias, ícones e imagens

**Acervo dos autores • Freepik • Unsplash**

**Livro de distribuição gratuita.**

F935 Fronteiras do conhecimento em ciências do mar / organizadores Paulo da Cunha Lana & Jorge Pablo Castello. - Rio Grande: Ed. da FURG, 2020.  
379 p.

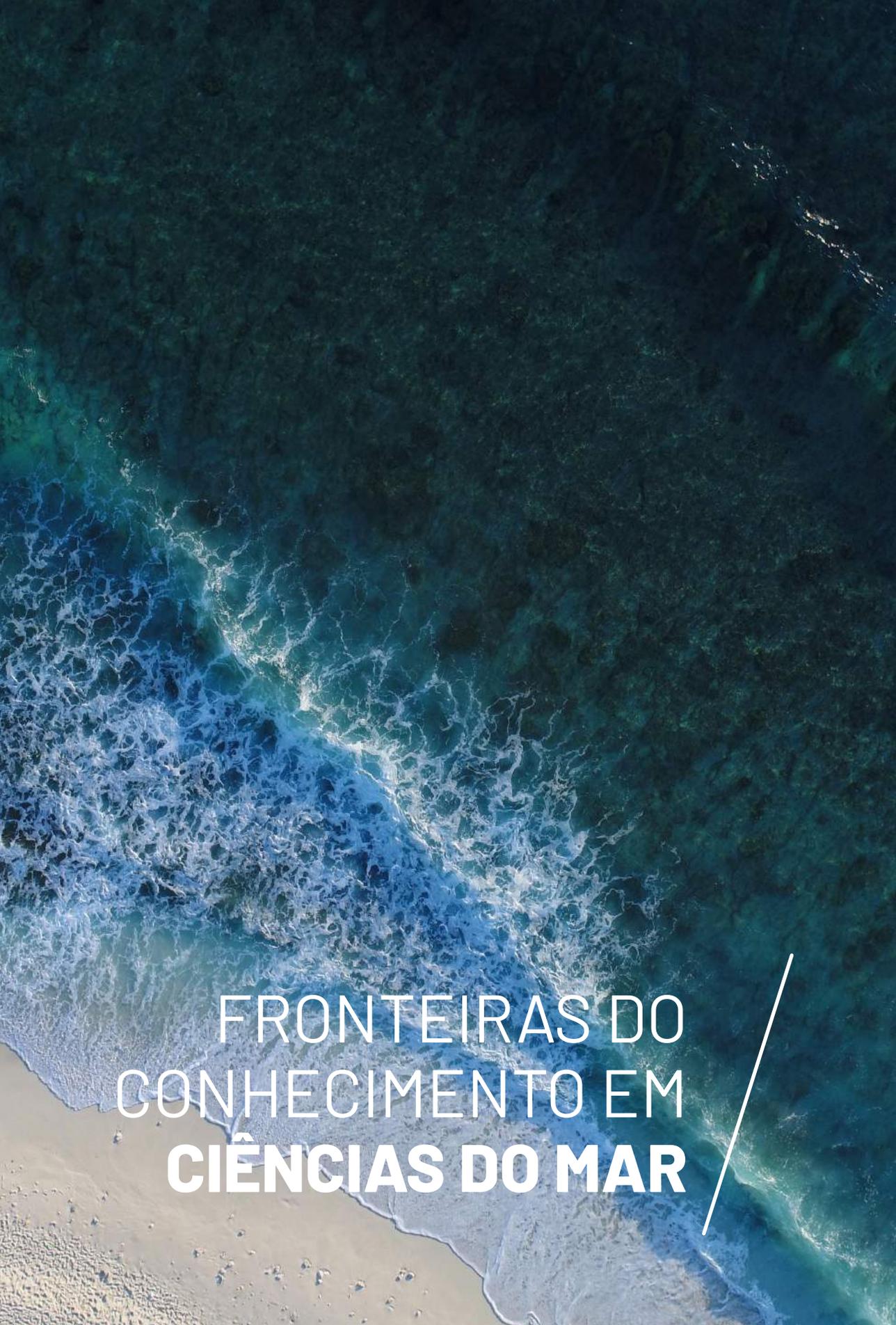
ISBN: 978-65-5754-019-0

1. Ciências do mar 2. Oceanografia 3. Oceanos I. Lana, Paulo da Cunha II. Castello, Jorge Pablo

CDU: 551.46

Catálogo na fonte: Bibliotecária Vanessa Dias Santiago - CRB10/1583

© 2020. Fronteiras do Conhecimento em Ciências do Mar está licenciado sob uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional. Para ver uma cópia desta licença, visite [creativecommons.org/licenses/by/4.0/](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

An aerial photograph of a beach with waves crashing onto the shore. The water is a deep blue-green, and the sand is a light tan color. The waves are white and foamy as they break. The text is overlaid on the lower part of the image.

FRONTEIRAS DO  
CONHECIMENTO EM  
**CIÊNCIAS DO MAR**

# SU MÁRIO

**INTRODUÇÃO** **6**  
PAULO DA CUNHA LANA  
JORGE P. CASTELLO

**CAPÍTULO 1** **10**  
**OCEANOGRAFIA  
OPERACIONAL (OO)**  
E. MARONE  
C.A.F. SCHETINI  
E. SIEGLE  
L.F. NIENCHESKI  
L.A.S.P. MADUREIRA  
S. WEIGERT  
M.P. DE PINHO  
J.L. COLETTTO

**CAPÍTULO 2** **54**  
**PROCESSOS REGIONAIS  
DE INTERAÇÃO OCEANO-  
ATMOSFERA NO  
ATLÂNTICO SUL**  
RONALD BUSS DE SOUZA  
LUCIANO PONZI PEZZI

**CAPÍTULO 3** **94**  
**OCEANOGRAFIA ÓPTICA:  
AVANÇOS, PERSPECTIVAS E O  
ACOPLAMENTO DO  
SENSORIAMENTO  
REMOTO E OBSERVAÇÕES  
IN SITU**  
AUREA MARIA CIOTTI  
MAURICIO ALMEIDA NOERNBERG

<b>CAPÍTULO 4</b> AS NOVAS FRONTEIRAS PARA EXPLORAÇÃO DOS RECURSOS NÃO VIVOS: DESAFIOS E PRECAUÇÕES CARLOS ROBERTO SOARES LAURO JÚLIO CALLIARI	<b>124</b>	<b>CAPÍTULO 8</b> NOVOS MÉTODOS E ABORDAGENS MULTIDISCIPLINARES PARA O USO E GESTÃO DOS RECURSOS PESQUEIROS MARINHOS NO BRASIL E NO MUNDO JOSÉ ANGEL ALVAREZ PEREZ ANTÔNIO OLINTO ÁVILA-DA-SILVA DANTE QUEIROLO PALMA	<b>258</b>
<b>CAPÍTULO 5</b> OS OCEANOS: OS DESAFIOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA SUSTENTÁVEL XAVIER CASTELLO SEGEN FARID ESTEFEN CARLOS ROBERTO SOARES	<b>158</b>	<b>CAPÍTULO 9</b> AS DIMENSÕES SOCIAIS E HUMANAS NA ZONA COSTEIRA: UMA PERSPECTIVA SISTÊMICA SOCIOAMBIENTALISTA CARINA CATIANA FOPPA GUSTAVO GOULART M. MOURA KATYA REGINA ISAGUIRRE	<b>322</b>
<b>CAPÍTULO 6</b> AVANÇOS NA GENÔMICA MARINHA MAIKON DI DOMENICO MARCELO VISENTINI KITAHARA SÔNIA C. DA SILVA ANDRADE	<b>182</b>	<b>CAPÍTULO 10</b> REFLEXÕES SOBRE A PERCEPÇÃO DO MAR JORGE P. CASTELLO	<b>348</b>
<b>CAPÍTULO 7</b> A EXPLORAÇÃO DE RECURSOS BIOTECNOLÓGICOS DO MAR: ESTADO DA ARTE E PERSPECTIVAS RENATO C. PEREIRA PAULO C. ABREU BERNARDO A.P. DA GAMA	<b>222</b>	<b>CAPÍTULO 11</b> PERSPECTIVAS DAS CIÊNCIAS DO MAR NO BRASIL: O QUE FAZEMOS E O QUE PRECISAMOS FAZER? PAULO DA CUNHA LANA	<b>360</b>



(foto de Giovanna Di Domenico)

## Só ele, muito ele na foto

As perdas de pessoas que realmente importam sempre acontecem muito antes da hora. Ao **Carlos Roberto Soares** dedicamos este livro. Só ele, muito ele na foto. Os colegas e amigos - que tiveram a sorte de com ele conviver - imediatamente dirão isto, ao ver esta imagem do Carlos fazendo aquilo de que mais gostava na vida. Dar aulas e interagir com suas alunas e alunos foi para ele um verdadeiro prazer, sempre vivido com ondas de calor humano e afeto profundo. Consola um pouco saber que o Carlos continuará chegando até todos nós através dos dois capítulos com os quais colaborou neste livro.



FRONTEIRAS DO CONHECIMENTO EM **CIÊNCIAS DO MAR**

# IN TRO DU ÇÃO

**ORGANIZADORES**

PAULO DA CUNHA **LANA**

JORGE PABLO **CASTELLO**

## **CAROS LEITORES**

Este trabalho é uma iniciativa pioneira do PPGMar. Não tivemos a intenção de editar apenas mais um livro-texto sobre a oceanografia e suas áreas correlatas, já razoavelmente atendidas pelo mercado editorial brasileiro e internacional. Em vez disso, procuramos fornecer para estudantes, jovens pesquisadores e interessados em geral uma visão minimamente abrangente das atuais fronteiras do conhecimento das ciências do mar. A escolha de temas foi bastante seletiva, não deixando de refletir nossas próprias percepções – e talvez preconceitos – a respeito dos grandes avanços e das grandes lacunas nessa grande área do conhecimento.

Para a preparação do livro, convidamos um grupo bastante representativo de pesquisadores brasileiros, que têm atuado e se destacado em áreas de grandes novidades científicas recentes, com suas pesquisas e com seu trabalho de formação de pessoas. Esses colegas se responsabilizaram gentilmente por uma série de textos que têm antes de tudo o objetivo de provocar jovens cientistas, chamando sua atenção para áreas de inovação que se encontram em pleno florescimento. Os avanços recentes das ciências do mar não resultaram apenas do espetacular desenvolvimento tecnológico que vivemos no momento, mas também de novos quadros de pensamento e de novas maneiras de pensarmos e percebermos os oceanos e o seu entorno costeiro, tão vitais para as populações. Sob essa perspectiva, este livro não deixa de ser uma espécie de reação à ciência convencional e incremental que ainda se pratica com frequência em um país em desenvolvimento. Nesse sentido, é também uma tentativa bem-intencionada de reduzir as barreiras conceituais, metodológicas e tecnológicas que tornam a nossa ciência oceanográfica tão atrasada em relação ao contexto internacional. Com essa expectativa, não poderíamos deixar de agradecer a todos os nossos colegas que tão generosamente dispuseram de seu tempo e conhecimento e suportaram com tanta paciência as nossas pressões editoriais durante esta verdadeira campanha oceanográfica. Para eles, desejamos a maior recompensa: o sucesso deste trabalho coletivo, que tivemos o prazer de editar, na expectativa de que este livro firme e reafirme vocações pelo Brasil afora, ao longo dos próximos anos.

Os avanços do conhecimento científico sobre o ambiente marinho têm sido de fato notáveis e nos proporcionam uma sempre renovada visão desse mundo extraordinário que cobre 70% de nosso planeta. As ênfases na oceanografia operacional e óptica, na biotecnologia e na genômica marinhas, nas interações mar-atmosfera, nos caminhos inovadores para o manejo dos recursos vivos, na exploração sustentada de recursos vivos e não-vivos e na consideração da gestão inclusiva e participativa de recursos naturais, à margem das formas hegemônicas institucionais, foram o foco principal do trabalho. Esta cobertura temática de forma alguma esgota todos os tópicos passíveis de atenção. Acreditamos, no entanto, que os temas aqui aprofundados estarão entre os alvos principais e prioritários das ciências do mar ao longo das próximas décadas. Complementando as abordagens mais técnicas, finalizamos o livro com nossas reflexões pessoais sobre a percepção que a sociedade tem do ambiente marinho e sobre o papel dos próprios cientistas na eventual reformatação da maneira com que fazemos ciência neste país.

Em um primeiro momento, esperamos que os tópicos aqui apresentados despertem a curiosidade e o interesse de novos cientistas e dos amantes das ciências marinhas no Brasil. Em um segundo momento, estaremos mais do que recompensados se o livro funcionar como um verdadeiro reforço vocacional dos nossos futuros cientistas do mar, seja durante seus processos de formação, seja em sua futura prática profissional.

**ORGANIZADORES**

**PAULO DA CUNHA LANA E JORGE PABLO CASTELLO**



# CAPÍTULO 1

# OCEANOGRAFIA OPERACIONAL (OO)

**E. MARONE**<sup>1</sup>

**C.A.F. SCHETINI**<sup>2</sup>

**E. SIEGLE**<sup>3</sup>

**L.F. NIENCHESKI**<sup>4</sup>

**L.A.S.P. MADUREIRA**<sup>5</sup>

**S. WEIGERT**<sup>4</sup>

**M.P. DE PINHO**<sup>4</sup>

**J.L. COLETTO**<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Processos Costeiros e Estuarinos, Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná.

<sup>2</sup> Departamento de Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco.

<sup>3</sup> Departamento de Oceanografia Física, Química e Geológica, Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo.

<sup>4</sup> Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande.

<sup>5</sup> Laboratório de Tecnologia Pesqueira e Hidroacústica, Instituto de Oceanografia da Universidade Federal do Rio Grande.

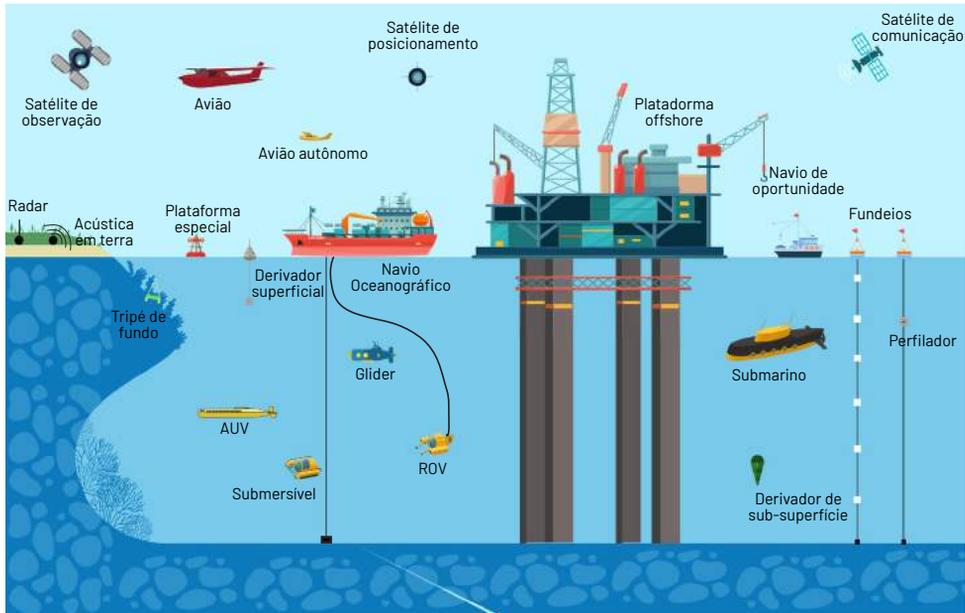
<sup>6</sup> INCT-Mar Centro de Oceanografia Integrada, Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande.

## 1 DAS ORIGENS AO PRESENTE DA OCEANOGRAFIA OPERACIONAL (OO)

Imagine uma frota de mais de 13 mil navios de todos os tipos e tamanhos, aos quais se somam mais de 150 mil pessoas e quase 12 mil aviões. Todos eles devem convergir numa região de praias e sua zona costeira adjacente, com não mais de 80 quilômetros de extensão, numa operação de alta complexidade e em um intervalo de tempo reduzido. Para ter sucesso, é necessário saber prever tanto as condições atmosféricas quanto as oceanográficas, mas isso não basta. As previsões não são perfeitas e as informações das condições ambientais, que são capazes de mudar rapidamente, têm que ser também conhecidas em tempo real. Isso inclui desde os ventos às ondas por eles geradas, as variações de nível do mar devido às marés astronômicas e aos efeitos atmosféricos e locais, as correntes, a temperatura e salinidade da água e, até, o tipo de sedimento das praias e a nebulosidade. Tudo isso deviam prever e conhecer os Aliados nos dias anteriores a 6 de junho de 1944, quando ocorreu o desembarque na Normandia (o Dia D). Considere que não contavam com nenhuma das tecnologias que temos hoje disponíveis.

Agora não apenas imagine, mas saiba que quase dois terços da humanidade habitam as zonas costeiras e suas áreas de influência. As atividades realizadas nessa região ou em mar aberto são tão ou mais complicadas que as militares, já que incluem operações relacionadas ao tráfego marítimo de bens e pessoas, ao uso e proteção dos serviços dos ecossistemas marinhos e costeiros, desde a exploração de recursos vivos e não-vivos ao turismo e lazer, da segurança de pessoas e bens à segurança alimentar. Essa lista pode ser aumentada quase indefinidamente. Ao contrário dos Aliados no Dia D, hoje dispomos de uma enorme variedade de ferramentas, tanto de observação (Figura 1) quanto de previsão das condições dos oceanos, cada vez mais aprimoradas. Se essas ferramentas são colocadas ao serviço do suporte às operações antes mencionadas, por sua vez realizadas nos oceanos e na zona costeira, estaremos nos aproximando da chamada Oceanografia Operacional (OO).

Em uma definição mais precisa, a OO compreende as atividades de medições sistemáticas e de rotina, de longo prazo, sustentáveis e multidisciplinares, dos oceanos e da atmosfera, bem como a rápida interpretação das informações e sua disseminação na forma de “produtos” direcionados aos distintos potenciais usuários, sejam públicos ou privados, que realizam atividades ou dependem das operações nos oceanos.



**FIGURA 1:** Sistemas de observação de variáveis oceânicas e atmosféricas. Adaptado de Malone, 2003. AUV: Veículo Submarino Autônomo pelas suas siglas em Inglês; ROV: Veículo Operado Remotamente pelas suas siglas em Inglês; e GLIDER: veículo sem motor que, similar a um avião planador (glider em Inglês), se movimenta ao sabor das correntes e densidade do fluido.

A OO geralmente funciona com uma rápida transmissão de dados observacionais para centros de assimilação de dados. Lá, poderosos computadores processam esses dados, usando modelos de previsão numérica. As saídas dos modelos são usadas para gerar produtos, muitas vezes através de organizações intermediárias que dão valor agregado a eles após a sua interpretação e devida formatação. Exemplos de produtos finais incluem alertas (de inundações costeiras, de potenciais danos causados por tempestades, florações de algas nocivas, dispersão de contaminantes etc.), cartas eletrônicas, rotas ótimas para navios, previsão da produtividade primária sazonal ou anual, correntes oceânicas, variabilidade do clima oceânico etc. Os produtos e as previsões devem ser distribuídos rapidamente para os usuários finais, agências governamentais e autoridades reguladoras (<http://eurogoos.eu/>), para que sirvam efetivamente na condução de operações.

Dentre os produtos importantes da oceanografia operacional, podemos mencionar:

- Descrição, em formato útil e amigável para os usuários, do estado atual e futuro do mar.

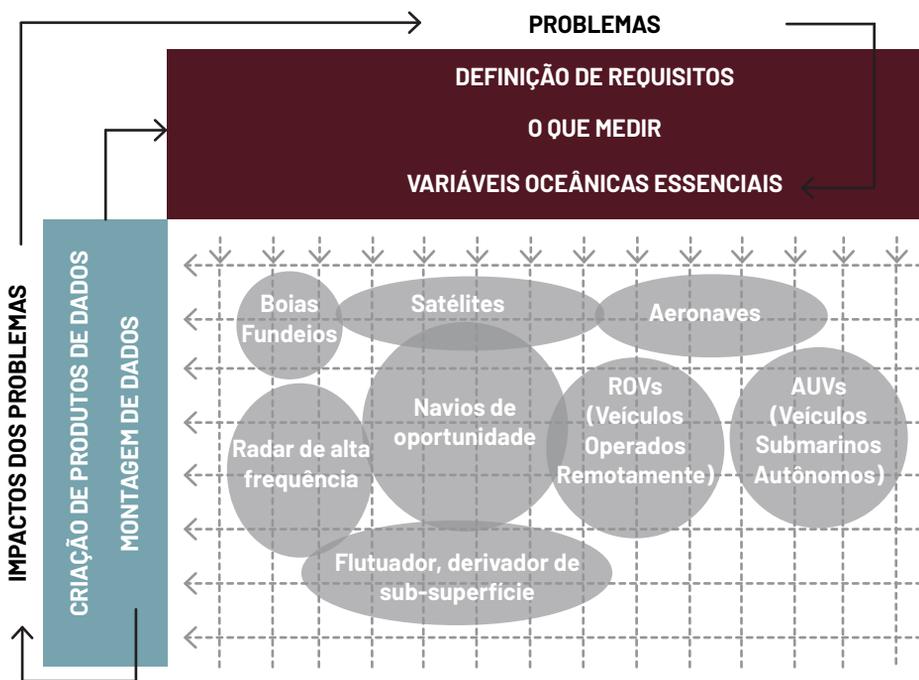
- Previsões contínuas da situação futura do mar para os períodos mais longos possíveis.
- Análise e simulação de eventos passados (*hindcasts*) usando conjuntos de dados de longo prazo e séries temporais, mostrando tendências e mudanças.

Devemos destacar alguns pontos desta definição que são muito relevantes, já que diferenciam a essência da Oceanografia Operacional em relação à Oceanografia como Ciência do Mar. Em primeiro lugar, a Oceanografia Operacional é sistemática e de rotina, não tendo como objetivo gerar ou testar hipóteses, como se faz nas ciências do mar, mas pode dar às pesquisas científicas um forte suporte através de seus produtos. Assim como o restante da sociedade, os pesquisadores e as instituições de pesquisa são parte do grupo amplo de usuários desses produtos.

Por outro lado, sendo uma atividade direcionada a satisfazer as necessidades de usuários muito variados, todos eles formando subgrupos dentro da sociedade como um conjunto, a OO requer que os produtos sejam personalizados para cada tipo de usuário. Isso implica, por exemplo, que a previsão e o estado da agitação marítima (ondas), mesmo originados dos mesmos instrumentos de medição e dos mesmos modelos de previsão, deverão ser fornecidos como produtos diferentes para a segurança da navegação (usuário Autoridade Portuária, por exemplo) e para as atividades de lazer (usuários Surfistas, por exemplo). Não apenas os mesmos dados e modelos levam a produtos em formatos diferentes, mas esses produtos devem ser interpretados e fornecidos no tempo necessário para serem úteis. Para tal, devem ser redigidos de maneira a serem devidamente entendidos pelos respectivos usuários; isso exige que sejam “amigáveis” e forneçam ferramentas claras e cientificamente bem sustentadas para o tipo de operações e necessidades de cada usuário. A base científica e tecnológica na qual se sustenta a Oceanografia Operacional é garantia fundamental de que os produtos por ela oferecidos sejam da melhor qualidade possível, devendo se atualizar continuamente.

A Oceanografia Operacional, como atividade específica bem definida e formatada, é muito recente. Sua consolidação começou no final do século XX (Flather, 2000; Awidson et al., 2000; Flemming et al., 2002; Hansen, 2002), mesmo que algumas atividades com objetivos similares sejam realizadas desde o início daquele século. Em geral, as atividades de observação sistemática e rotineira dos oceanos começaram com fins científicos e militares, mas a academia foi pioneira na livre disponibilização dos dados e resultados das suas observações e modelos.

Na atualidade, os mais diversos atores participam de sistemas vinculados à Oceanografia Operacional, desde pequenas a médias instituições de pesquisa, até serviços oceanográficos e meteorológicos de grande porte, como a Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos Estados Unidos (NOAA, na sua sigla em inglês - <http://www.noaa.gov/>), com inúmeros produtos, ou a Agência de Meteorologia da Austrália (BOM - <http://www.bom.gov.au/>) e seu sistema BlueLink (Brassington et al., 2007). Outro modelo, de tipo cooperativo, reúne diferentes instituições dos países europeus (Euro-GOOS - <http://eurogoos.eu/>), que realizam um trabalho integrado e orientado aos usuários regionais. Na escala global, as definições e direcionamentos da Oceanografia Operacional foram consolidados e continuam a ser orientados pelo projeto internacional do Sistema de Observação Global dos Oceanos (GOOS - <http://www.goosocan.org/>) (Figura 2), da UNESCO-IOC, em particular no seu módulo costeiro.



**FIGURA 2:** Esquema proposto pelo Programa GOOS para a Oceanografia Operacional.

No Brasil, os maiores esforços têm sido realizados por instituições de pesquisa e ensino, assim como pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha e a Petrobras, esta última principalmente para o atendimento das

suas necessidades operacionais. No início do novo milênio, o Projeto QuiJo-Te (Marone & Camargo, 2002) reuniu um grupo de instituições da Argentina, Brasil e Uruguai que demonstrou as capacidades desses países para realizar provas de conceito num projeto-piloto do Módulo Costeiro do Sistema Global de Observação dos Oceanos (C-GOOS). Os metadados podem ser encontrados nas páginas da NASA e detalhes nas páginas já citadas. Outro projeto com fins mistos, operacionais e científicos, realizado pelo Brasil em cooperação com a França e Estados Unidos, é o Projeto PIRATA (<http://www.brasil.org/pirata/>), mais focado no mar aberto no Atlântico Equatorial. Em anos mais recentes, vêm sendo implementados o Programa Nacional de Boias Oceanográficas (PNBoia - <http://www.brasil.org/pnboia/>) e outros programas operacionais, sob o guarda-chuva do GOOS Brasil (<http://www.goosbrasil.org/>), assim como diversas atividades específicas que veremos a seguir.

## 2 ONDE ESTÁ A MAIORIA DOS USUÁRIOS: OCEANOGRAFIA OPERACIONAL (FÍSICA) NA ZONA COSTEIRA

Incluímos na abrangência da zona costeira os corpos de água semi-fechados (estuários, que podem ser denominados de baías, e.g. Baía de Guanabara; lagoas, e.g. Lagoa dos Patos; rios, e.g. Rio Itajaí-Açu) e a plataforma continental, que tem como limite exterior a zona de quebra da plataforma e como limite interno o início da zona de arrebentação das praias. O trecho da zona de arrebentação, por ter relação mais direta com processos litorais associados com erosão e transporte de sedimentos arenosos, será abordado na próxima seção.

O domínio aquático da zona costeira, embora represente uma área relativamente pequena quando comparada aos oceanos como um todo, é intensamente utilizado para múltiplos propósitos. É nesse domínio que se concentra grande parte da captura de recursos vivos, bem como ocorre a convergência de rotas de navegação para portos, além da navegação recreativa. O trânsito de embarcações nas zonas costeiras é muito maior do que nas regiões oceânicas e, por consequência, maiores são os riscos de acidentes. Nesse sentido, a OO nas zonas costeiras tem duas linhas de atuação. A primeira é evitar que ocorram acidentes, e a segunda, uma vez ocorrido um acidente, fornecer informações que permitam prestar socorro e mitigar os seus efeitos. Porém há outras linhas de atuação que não envolvem somente segurança da navegação. O fornecimento de mapas da temperatura da su-

perfície do mar é extremamente útil para a orientação da atividade de pesca (tema abordado na seção deste trabalho correspondente à área biológica). O conhecimento do estado do mar é essencial em operações de dragagem em áreas sensíveis, pois o descarte de material dragado poderá afetar negativamente essas áreas caso as correntes estejam de determinado modo, o que potencialmente também amortiza (ou aumenta) os custos da operação.

O grande desafio da OO na zona costeira é gerar produtos confiáveis (previsões) com as escalas de espaço e de tempo em que os processos ocorrem. As escalas espaciais são da ordem de centenas de metros a dezenas de quilômetros na horizontal, e de metros a dezenas de metros na vertical. A escala temporal é de horas a dias para a maioria das operações relevantes. Isso implica a necessidade de prever as condições meteorológicas e oceanográficas com horas de antecedência, em uma escala espacial da ordem de alguns quilômetros. Imagine que houve um naufrágio e há um bote salva-vidas com pessoas, derivando em condições de tempo adversas e, adicionalmente, no limite de alcance dos helicópteros de resgate. Uma decisão deverá ser tomada, definindo, por exemplo, para onde devem ser concentrados os esforços de busca. Para isso, ventos e correntes devem ser conhecidos (agora) e prognosticados (futuro próximo), e uma área de máxima probabilidade de sucesso de resgate deve ser estabelecida a partir do ponto de naufrágio. Esse ponto, porém, geralmente não é conhecido com precisão, o que amplia as possibilidades de deriva dos sobreviventes e aumenta a área de busca.

Por outro lado, há aspectos menos drásticos envolvendo a OO em zonas costeiras. O fornecimento de tábuas de marés astronômicas praticamente para todas as costas do mundo é também uma ferramenta operacional. Tábuas de marés fornecem o horário dos níveis de preamar e baixa-mar com anos de antecedência, se necessário for. Isso é feito regularmente para alguns portos desde o século XIX. Junto com o conhecimento da batimetria das zonas costeiras, fornecido pelas cartas náuticas, o conhecimento com precisão do comportamento da maré muito auxilia as operações portuárias, especialmente em áreas onde a variação da maré é mais expressiva. Por exemplo, a amplitude de alguns centímetros de coluna de água faz toda a diferença, definindo se um determinado navio pode ou não navegar com segurança em águas restritas. A elaboração de tábuas de maré é possível porque a maré astronômica é um fenômeno periódico, e assim, determinístico, gerado por movimentos da Terra, Lua e Sol e as forças de atração gravitacional entre eles. Se há registros do nível da água por um período de pelo menos um mês (aqui o mês é o tempo em que a Lua e a Terra giram entre si), podemos aplicar a análise harmônica de maré e estabelecer a variação do nível da

água em função do tempo. Tal qual podemos prever eclipses, podemos prever as marés. Como as marés não são iguais em todos os lugares, uma tabua de maré é específica para o local onde foi gerada. Atualmente as tábuas de marés para o Brasil são oficialmente geradas pela Marinha por meio do programa PACMARE de análise e previsão de marés (<http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-previsao-mare/tabuas/>). Aplicativos como o WXTide (<http://www.wxtide32.com/>) fornecem a previsão da maré para qualquer parte do mundo.

Entretanto, variações do nível do mar não se devem somente aos efeitos dos movimentos astronômicos (e periódicos). O vento também pode produzir oscilações significativas no nível do mar. Casos extremos foram o ciclone extratropical/subtropical Catarina, no Brasil, em 2004, o furacão Katrina que devastou a costa do estado do Mississippi nos Estados Unidos da América em 2005, ou o furacão Sandy que inundou a cidade de Nova York em 2012. Tais eventos estão associados com o quadro sinótico atmosférico, em especial com a distribuição da pressão atmosférica, que por sua vez determina os ventos. A pressão atmosférica depende grandemente da temperatura do ar, e esta depende da radiação solar e das trocas de calor com a superfície (terra ou água). As trocas de calor se dão por irradiação, condução ou transferência de calor latente (evaporação). Enfim, há diversas variáveis que determinam o vento, e muitas delas têm comportamento caótico, como a cobertura de nuvens ou as chuvas. Então, uma diferença conceitual em relação às variações das marés astronômicas (determinísticas) é que o vento e os seus efeitos sobre o oceano são tratados como tendo uma natureza aleatória (probabilística), mesmo que também existam causas associáveis (determinísticas). Fenômenos que combinam essas duas naturezas são chamados de “estocásticos”, e requerem avançadas ferramentas para seu entendimento e previsão incluindo, em particular, a Modelagem Numérica. Adicionalmente, vento e correntes implicam escoamento de fluidos, que são em geral turbulentos. Talvez você já tenha lido ou ouvido a expressão de que o bater de asas de uma borboleta na Amazônia pode produzir um furacão na costa do Atlântico dos Estados Unidos. Isso exemplifica a complexidade dos processos turbulentos. Conceitualmente, turbulência é o processo pelo qual o movimento dos fluidos perde energia, produzindo vórtices cada vez menores até a escala de milímetros onde ocorre a dissipação do movimento mecânico e sua conversão em energia térmica. Dois dos efeitos mais importantes da turbulência são a transferência de movimento através do fluido e a dispersão de propriedades escalares.

Para fins operacionais, o que importa é que, ainda que estejamos interessados em movimentos na escala horizontal da ordem de quilômetros, estes

serão afetados por processos em escala muito menor. Nisso reside o grande problema para se prever o futuro das condições atmosféricas e oceânicas. Dada a natureza aleatória da turbulência e sua escala reduzida, ela ainda não pode ser modelada em uma escala apropriada para fins operacionais com os recursos computacionais atualmente disponíveis (e diga-se, ainda por um bom tempo no futuro!). Um exemplo prático disso é a previsão do tempo. Se hoje é sexta-feira, por exemplo, podemos planejar nosso final de semana dando uma olhada na previsão meteorológica, com boa segurança para sábado e nem tanto para domingo. Não seria recomendável, em absoluto, fazer uma consulta para o próximo final de semana, pois a probabilidade de a previsão errar é muito maior do que a de acertar. Isso se deve à natureza aleatória dos escoamentos dos fluidos geofísicos.

A modelagem numérica é a ferramenta que utilizamos para prever os ventos, ondas e correntes, que, juntamente com o nível da água, constituem as principais variáveis de interesse operacional. Para as plataformas continentais, se conseguirmos prever bem o vento, poderemos prever razoavelmente bem as ondas e correntes. Em estuários, ainda que as correntes dependam principalmente das marés e da descarga fluvial, os efeitos do vento sobre a plataforma podem produzir variações que se propagam para dentro deles.

Um modelo numérico é uma simplificação da realidade, no qual o mundo físico é discretizado em uma matriz tridimensional de pontos. Para esses pontos tentamos descrever a variação da velocidade e direção do vento e correntes e outras propriedades (e.g., temperatura) em função de perturbações nas bordas ou limites da área modelada. Quanto mais próximos os pontos entre si, melhor será nossa representação da realidade. Contudo, considerando um volume, isso implica que para aumentar a resolução espacial é necessário o aumento de número de pontos ao cubo. Várias equações precisam ser resolvidas para cada ponto do modelo, e o aumento da resolução espacial do modelo implica um proporcional aumento do número de equações a serem resolvidas, e logo, um maior requerimento computacional. Isso levanta o problema do tempo para se efetuar as simulações preditivas em tempo hábil. Digamos que com um determinado modelo tridimensional sejam necessárias cinco horas de computação para simular cinco dias no futuro. Dobrar a resolução do modelo nas três dimensões acarretaria um aumento do tempo computacional para 125 horas (simplisticamente falando). Quando a simulação ficar pronta, ela representará o futuro de cinco dias atrás, o que, de fato, será passado e não terá utilidade para fins operacionais. Porém, os processos no plano horizontal são muito mais intensos do que na vertical (na coluna de água), e isso simplifica muito a representação espacial. A distribuição de pontos no plano horizontal pode ser muito mais espaçada do que

no plano vertical. Assim, o aumento da resolução espacial deixa de ser cúbico e passa a ser quadrático, o que é muito melhor. Os modelos devem adotar esquemas que maximizem a computação sem perder a resolução espacial, permitindo produzir resultados confiáveis em escala de alguns dias no futuro.

Na fase de implementação de um modelo, ou seja, no começo de sua utilização, o modelo deve ser exaustivamente testado e ajustado. Isso é feito comparando dados simulados com dados observados. Esse é um processo bastante extenuante, mas que tem por objetivo garantir que o modelo forneça resultados realistas. Um modelo, antes de tudo, é uma grande quantidade de equações matemáticas que produz uma grande quantidade de números. Se esses números significam algo ou não, dependerá da validação do modelo. Ainda assim, por melhor que tenha sido a calibração e validação, por melhores que sejam os esquemas numéricos, a natureza aleatória do vento não permite previsões seguras com mais do que alguns dias a partir do estado atual. Dessa forma, para poder prever, digamos, dois dias no futuro, o presente deve ser conhecido. Então surge um novo problema: como podemos conhecer o estado presente da atmosfera e das águas costeiras? Este é um desafio tecnológico formidável. Significa observar e sintetizar dados observacionais em tempo quase real para que estes possam ser assimilados pelos modelos, e que estes então possam prever o futuro próximo com mais confiabilidade.

Nas regiões costeiras, o monitoramento meteorológico e das marés é relativamente simples. Estações meteorológicas e marégrafos são relativamente fáceis de instalar, e a manutenção e transferência de dados são tecnicamente simples, dada a acessibilidade. Afastando-se da costa, contudo, aumenta significativamente a dificuldade de monitorar ventos e correntes. Os problemas na aquisição de dados costa afora residem na manutenção dos equipamentos, no fornecimento de energia e na transmissão dos dados para terra. Esse problema pode ser contornado com a utilização de boias com captação de energia eólica e solar, ou através de sistemas conectados fisicamente com centrais costeiras. Até alguns quilômetros da costa, a transmissão de dados é possível por telefonia celular. Para regiões mais afastadas é necessária a utilização de serviços de transmissão de dados por satélite ou rádio, ou ainda, a conexão pode ser física através de cabos submarinos. De maneira geral, o custo da manutenção de instrumentos instalados mar adentro é bastante alto.

Uma alternativa que vem sendo cada vez mais empregada ao redor do mundo é a tecnologia de radar. Radar é o acrônimo para radio detecting and ranging, desenvolvido a partir do início do século XX, e principalmente antes da II Guerra Mundial, com o objetivo de localizar aviões. Atualmente a tecnologia de radar é amplamente utilizada para múltiplos propósitos. Um destes é detectar remotamente o estado do mar, podendo fornecer em tempo quase

real (minutos após a medição) a intensidade e direção de correntes superficiais, ondas e vento. Embora seja uma técnica de sensoriamento remoto, há inúmeros estudos que comprovam sua eficiência para esses fins. As duas principais vantagens sobre métodos *in situ* são: (1) as antenas são instaladas na costa, o que facilita a manutenção, tal qual estações meteorológicas costeiras, e (2) permitem a cobertura de áreas relativamente grandes com boa resolução espacial. Dependendo da configuração e frequência de operação, medições de correntes podem ser feitas a até 200 quilômetros da costa. Os radares para grandes áreas operam na banda HF (*high frequency*). Em áreas restritas, como portos em estuários, são utilizados radares que operam na banda X, que são exatamente os mesmos utilizados em embarcações.

Contudo, radares não fornecem dados da coluna de água. Estes são obtidos apenas por instrumentos *in situ*, dos quais o mais utilizado atualmente é o perfilador acústico de correntes por efeito Doppler, ou ADCP (*acoustic Doppler current profiler*). Esses instrumentos podem ficar instalados no fundo ou em boias, e podem medir a velocidade e direção de correntes em diversos níveis da coluna de água, simultaneamente. Existem, porém, as questões logísticas da transmissão de dados e da manutenção dos aparelhos. Assim, são utilizados prioritariamente em áreas em que esse tipo de informação é realmente necessário, como em canais de acesso a portos ([https://tidesand-currents.noaa.gov/ofs/sfbofs/sfbofs\\_entrance.html](https://tidesand-currents.noaa.gov/ofs/sfbofs/sfbofs_entrance.html)).

### 3 ONDE ESTÁ A MAIORIA DOS USUÁRIOS: MONITORANDO A DINÂMICA COSTEIRA (GEOLOGIA)

Conicionados pelas forças físicas, ambientes costeiros, como as praias, respondem de forma dinâmica às variações nas diferentes escalas temporais e espaciais. O monitoramento desses ambientes é extremamente importante e deve ser realizado para o entendimento de suas respostas em relação aos seus processos controladores. O ambiente costeiro é altamente dinâmico e responde às condições forçantes como ondas, correntes e marés, geralmente apresentando um complexo comportamento tridimensional. Adicionalmente, a morfologia costeira é caracterizada por uma variedade de estruturas e feições em várias escalas, de muito pequenas a muito grandes. Isso contrasta com a aparentemente pequena variabilidade espacial de ondas, marés e correntes (Dronkers, 2005).

As zonas costeiras estão entre as áreas mais importantes e mais in-

tensamente utilizadas pelos humanos em torno do globo. Ambientes costeiros formam uma área de transição, sujeita a processos marinhos e continentais, sendo o seu equilíbrio extremamente frágil, sensível a impactos antrópicos ou naturais. Nos últimos anos, a pressão sobre essas regiões vem sendo exacerbada pelas rápidas alterações no clima global, resultando em mudanças nas suas condicionantes.

Um dos sinais vitais que deve ser monitorado em ambientes costeiros é a morfologia e suas condicionantes. A morfologia é a resposta dinâmica do ambiente aos processos naturais, eventos extremos e ação antrópica. É dependente principalmente das condições forçantes como ondas, marés e ventos controlando o balanço sedimentar costeiro. Em função da facilidade de acesso e viabilidade de levantamentos de forma contínua, o monitoramento da morfologia costeira é um bom parâmetro de monitoramento. O método tradicional de levantamentos morfológicos consiste no uso de nível e mira topográficos, permitindo a realização de perfis periódicos em trechos do litoral. Mais recentemente, a utilização de Estação Total ou Sistemas de Posicionamento Global Diferencial (DGPS) permitiu agilizar levantamentos morfológicos. De forma a manter monitoramentos contínuos da morfologia, foram desenvolvidas técnicas de monitoramento contínuo através de videomonitoramento.

### 3.1 MÉTODOS DE MONITORAMENTO DA MORFOLOGIA COSTEIRA E LEVANTAMENTOS TOPOGRÁFICOS

#### 3.1.1 VÍDEO

Até recentemente, informações sobre a morfodinâmica costeira eram obtidas através de levantamentos de campo tradicionais, com observações no local. Apesar de a maior parte do conhecimento atual dos processos costeiros ter se originado desses experimentos de campo, eles são limitados em uma escala de tempo observacional, são condicionados pelas condições climáticas e hidrodinâmicas e seu custo é relativamente alto. Técnicas recentes de monitoramento, baseadas em observações de vídeo da zona costeira, são boas alternativas aos experimentos de campo tradicionais. A aplicação de técnicas de imageamento com vídeo permite conhecer melhor a dinâmica costeira através da obtenção de informações úteis sobre a hidrodinâmica e morfodinâmica da zona costeira. Adicionalmente, a aplicação dessas técnicas permite a obtenção de dados ao longo de escalas temporais e espaciais maiores, variando de eventos de tempestades (horas – dias) à evolução de ambientes costeiros em médio prazo (anos – décadas).

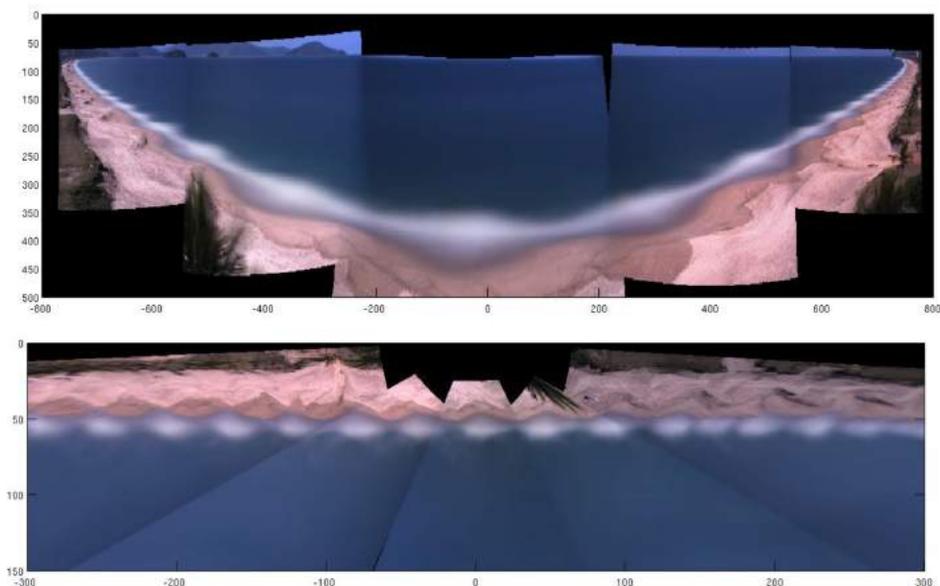
Baseado no trabalho de Lippmann & Holman (1989), que demonstrou a aplicabilidade de imagens de vídeo para o monitoramento da zona costeira, o Coastal Imaging Lab da Oregon State University (EUA) iniciou o programa Argus em 1992 (Holman, 1994). Desde então, outros sistemas de câmeras têm sido desenvolvidos (e.g. Cam-Era). Esse tipo de base de dados fornece informações com grande extensão temporal e espacial e em alta resolução.

A análise multiespectral das séries temporais de imagens de vídeo permite a observação de diferentes sinais, como: velocidade do fluxo (Down, 1999); parâmetros de onda (Lippmann & Holman, 1991; Holman et al., 1993; Stockdon & Holman, 2000); correntes de retorno (Symonds et al., 1997; Rana-singhe et al., 1999; Reniers et al., 2001); cúspides praias (Holland, 1998); morfologia de bancos arenosos (Van Enckvort & Ruessink, 2003a, b); batimetria da zona costeira (Aarninkhof et al., 2005), e morfologia intermareal (Holman et al., 1991; Plant & Holman, 1997; Siegle et al., 2006; Siegle et al., 2007).

Para obter dados com melhor resolução e precisão espacial e temporal, estudos recentes combinaram as informações extraídas de imagens com modelos numéricos (Reniers et al., 2001; Aarninkhof et al., 2005; Siegle et al., 2006; Siegle et al., 2007; Smit et al., 2007). Essas aplicações combinadas, em que há retroalimentação entre a saída de dados do modelo e os dados extraídos das imagens, têm demonstrado um grande potencial para melhor entender os processos morfodinâmicos costeiros.



**FIGURA 3:** Sistema de videoimageamento Argus na praia de Massaguaçu (SP). Fonte: Laboratório de Dinâmica Costeira/IOUSP).



**FIGURA 4:** Exemplo de imagem oblíqua combinada (topo) e retificada com base em pontos de controle. Exemplos do sistema de videoimageamento Argus na praia de Massaguaçu (SP). Fonte: Laboratório de Dinâmica Costeira/IOUSP.

O processamento das imagens para a extração de informações quantitativas é baseado na quantificação da variabilidade das intensidades de uma imagem convertida em elementos de uma malha bidimensional com coordenadas geográficas. A variação da intensidade em cada elemento da imagem (pixel) pode variar em curta escala temporal, e o valor e a taxa em que essas mudanças ocorrem podem ser quantificadas e atribuídas a processos hidrodinâmicos costeiros. A partir de imagens de longa-exposição, retificadas para produzir um mapa com escalas conhecidas, podem ser extraídos perfis de intensidade transversais ou longitudinais à imagem fornecendo informações quantitativas sobre as variáveis desejadas (Lippmann & Holman, 1989). A retificação das imagens é feita através da aplicação de relações fotogramétricas com a utilização de pontos conhecidos no campo de visão das imagens de cada câmera. A área de cobertura e a inclinação de cada câmera é ajustada no momento de instalação, de forma a cobrir a região de interesse. O campo de visão das câmeras é levemente sobreposto no limite do encontro entre as suas coberturas, tornando possível a combinação das imagens das diferentes câmeras, aumentando assim a sua área de cobertura total. Maiores detalhes sobre a fotogrametria e calibração das imagens de vídeo podem ser obtidos em Lippmann & Holman (1989).

### 3.1.2 DRONES

Nos últimos anos temos visto um grande número de drones (classificados como aeromodelos) e veículos aéreos não tripulados (VANTs – classificados como sendo de uso comercial ou de pesquisa científica) pelos céus do país. Esses sistemas são constituídos de uma aeronave autônoma ou controlada remotamente, equipada com GPS e uma câmera ou outros sensores remotos. Pesquisadores têm utilizado drones para o monitoramento barato e preciso de variáveis ambientais, com boa cobertura e resolução espacial. Capazes de atingir locais de difícil acesso e permitindo a visão panorâmica a partir de grandes altitudes, esses veículos têm se mostrado também importantes ferramentas para a observação e monitoramento de ambientes marinhos e costeiros. Diversas são as suas aplicações em ciências oceanográficas: monitoramento de erosão costeira, incluindo levantamentos rápidos após a passagem de tempestades; observação da zona de quebra das ondas e espraiamento; mapeamento de correntes de retorno; monitoramento de manguezais e marismas; monitoramento de espécies marinhas e seus habitats; observação de costões rochosos; identificação e análise de lixo marinho; observação de movimentos de organismos planctônicos, sedimentos e poluentes, etc.



**FIGURA 5:** Drone do Laboratório de Dinâmica Costeira (IOUSP) sobrevoando a praia da Ilha Comprida (SP). Fonte: Laboratório de Dinâmica Costeira/IOUSP.

A capacidade de monitoramento de um drone ou VANT dependerá de sua configuração e autonomia. Existem opções de pequenos aviões autônomos que conseguem percorrer grandes distâncias, com autonomia de voo de algumas horas, e quadricópteros menores com autonomia de aproximadamente 30 minutos.



**FIGURA 6:** Exemplo de fotografia da zona de espraiamento a partir do drone. Fonte: Laboratório de Dinâmica Costeira/IOUSP.

Ao longo do voo, são tiradas fotografias sequenciais do ambiente, permitindo a análise das variáveis de interesse a partir do pós-processamento das imagens. O pós-processamento inclui a correção da distorção da lente. A partir de pontos conhecidos em campo, é possível fazer o georreferenciamento das imagens para a sua correta interpretação. As técnicas de estrutura a partir do movimento (*structure from motion*) são utilizadas para a transformação de imagens parcialmente sobrepostas em modelos digitais de terreno (MDT), permitindo a extração de dados topográficos da área de interesse com alta resolução espacial (e.g. Mancini et al., 2013; Gonçalves & Henriques, 2015; Clapuyt et al., 2016; Brunier et al., 2016; Agüera-Vega et al., 2017; James et al., 2017; Scarelli et al., 2017).

## 4 ONDE ESTÁ A MAIORIA DOS USUÁRIOS: A DIMENSÃO QUÍMICA DA OCEANOGRAFIA OPERACIONAL

Os setores públicos e privados têm uma demanda crescente por observações ambientais precisas e confiáveis, que permitam melhor compreensão dos aspectos científicos básicos, que tenham capacidade de previsão e apoiem decisões. A Oceanografia Química está presente para atender essa demanda, promovendo o desenvolvimento e a adoção de instrumentos de monitoramento e gestão ambiental de longo prazo eficazes e confiáveis para ambientes de água doce, costeiros e oceânicos. Para tanto, são necessárias aplicações de tecnologia e sistemas para melhorar a capacidade de observação, levando à produção de dados de maior qualidade. Isso pode ser obtido através de várias estratégias, destacando-se o uso de sensores ambientais já existentes e aprimorados ou de tecnologias novas, para assim garantir que as decisões básicas de compreensão, previsão e gerenciamento sejam baseadas em dados de observação precisos, exatos e comparáveis.

Parâmetros como salinidade, pH,  $pCO_2$ , turbidez, oxigênio dissolvido (OD), nutrientes, elementos-traços, densidade e caracterização de florações tóxicas e oportunistas, clorofila, hidrocarbonetos e outros compostos orgânicos, já são monitorados através de sensores e micros sensores instalados em diferentes tipos de plataformas oceânicas *in situ*, sejam elas fixas, como torres ou boias, ou não fixas, como boias derivantes ou em veículos rebocados ou autônomos. Os sensores podem ser colocados em variados tipos de ecossistemas, muitas vezes instalados em grande número, devido ao pequeno tamanho, facilidade operacional e baixo custo. Entretanto, é primordial que sejam de alta confiabilidade e com capacidade de permanência em operação por longos períodos de tempo (alguns anos), contemplando o controle de suas calibrações periódicas.

Nesse sentido, muitos esforços têm sido desenvolvidos pela Alliance for Coastal Technologies (ACT), uma parceria estabelecida entre a NOAA (National Oceanic Atmospheric Administration), instituições de pesquisa, gestores de recursos e empresas do setor privado interessadas em desenvolver e aplicar tecnologias de sensores para monitorar ambientes costeiros (veja: <http://act-us.info>).

São destacados a seguir os principais parâmetros e compartimentos ambientais que estão recebendo atenção tanto da comunidade científica como da OO. A compreensão dos processos que comprometem a qualidade

das águas superficiais, subterrâneas e oceânicas costeiras é importante por razões de saúde pública, ecologia e economia. A qualidade da água costeira e estuarina pode deteriorar-se rapidamente em resposta a eventos episódicos ou oscilações climáticas globais, sendo que o monitoramento desses processos em tempo real traz melhores resultados.

## **4.1** TIPOS DE SENSORES E IMPORTÂNCIA DO USO EM AVALIAÇÕES DE PROCESSOS AMBIENTAIS AQUÁTICOS

**4.1.1 SALINIDADE:** encontra-se disponível uma vasta gama de sensores comerciais para medidas de temperatura, condutividade e salinidade, com várias configurações e distintas faixas de preço, para serem instalados em qualquer tipo de ambiente. Muito atraentes são os sensores denominados de “baixo custo”, mas sempre deve ser levado em consideração o custo total ou preço final para um determinado instrumento, que é o custo que envolve o pessoal (hora/homem) para instalação e manutenção.

**4.1.2 OXIGÊNIO DISSOLVIDO (OD):** é desejado que as medidas de OD sejam de rotina, tal como são as de temperatura. No mercado existem sensores que podem gerar dados de qualidade, mas a experiência do uso *in situ* demonstra que, por períodos de tempo acima de um mês, eles não fornecem dados com a qualidade requerida, devido a problemas de bioincrustação em sua superfície, afetando sua sensibilidade eletroquímica (Alliance for Coastal Technologies, 2006a).

**4.1.3 CARBONO ORGÂNICO DISSOLVIDO (COD):** maior atenção é dada aos sensores *in situ* de  $pCO_2$ , dado o seu recente desenvolvimento e uso em boias e outros sistemas fixos para medidas do fluxo global de carbono. Problemas e limitações decorrentes da instalação por longo prazo de sensores projetados para a medição de pH, carbono inorgânico dissolvido total e alcalinidade total para estudos de processos biogeoquímicos do carbono, incluindo a acidificação das águas, estão em foco nas discussões entre cientistas, fabricantes de equipamentos e tomadores de decisão (Alliance for Coastal Technologies, 2005a).

**4.1.4 NUTRIENTES:** o nitrogênio e o fósforo são essenciais à vida, mas seu excesso é prejudicial, pois pode desencadear a proliferação de algas e cianobactérias fotossintetizantes oportunistas e a redução da biodiversidade do ambiente aquático, com consequências que prejudicam os usos mais

nobres das águas, afetando aspectos econômicos de saúde humana e o equilíbrio ecológico do ambiente. Dentro do âmbito da ACT, em 2014 ocorreu o Nutrient Sensor Challenge Workshop, durante o qual foram discutidos os desafios para identificar as estratégias para lidar com a poluição por nutrientes nas águas. Esse encontro enfatizou a necessidade de desenvolvimento de sensores de nutrientes de baixo custo para fornecerem dados rápidos e confiáveis para uma tomada de decisão correta. O desenvolvimento desses sensores permitirá obter medições *in situ* com alta resolução espacial e temporal e resultados confiáveis (Alliance for Coastal Technologies, 2014).

**4.1.5 ELEMENTOS-TRAÇOS:** desempenham importantes papéis nos ecossistemas marinhos. Devido à sua toxicidade, o efeito do excesso de cobre, da presença de cádmio, cromo, mercúrio e de certos compostos organometálicos (como o tributilestano e o metilmercúrio) tem recebido muita atenção. Ultimamente, os efeitos subletais dos metais sobre a bioquímica do fitoplâncton e, em alguns casos, as neurotoxinas, têm se mostrado importantes na determinação da composição e expressão genética em alguns grupos. Cada vez mais se associa a toxicidade induzida por metais no potencial estímulo de proliferação de vegetais aquáticos nocivos e oportunistas, que traz grandes impactos econômicos, principalmente à zona costeira. De outro lado, mais recentemente, o papel da carência de ferro dissolvido no controle do crescimento do fitoplâncton levou a uma melhor compreensão sobre o fator limitante dos metais-traço nos sistemas aquáticos. Não obstante a sua importância, existem poucas tecnologias para fornecer uma avaliação rápida das concentrações dos metais ou sua especiação química nas águas. Devem ser aplicados esforços para avaliar o status atual dos sensores para análise de metais, e as possibilidades de alavancar tecnologias emergentes para expandir os limites de detecção dos elementos-alvo e, ainda, identificar etapas críticas e os limites à implantação operacional de sensores de metais, como parte dos esforços rotineiros de monitoramento da qualidade da água.

**4.1.6 COMPOSTOS ORGÂNICOS:** ainda não existem abordagens e tecnologias adequadas usadas para quantificar emissões e detecção de contaminantes orgânicos. Usam-se estimativas de balanços de massa de contaminantes em rios, lagos e oceanos para avaliar o risco das várias fontes de contaminantes, determinar a conformidade com padrões regulatórios e avaliar a redução dessas fontes. No entanto, quantificar com precisão a carga de contaminantes continua a ser um grande desafio. Como o aporte ocorre em forma diferenciada em função das condições hidrológicas, são exigidas tecnologias

de medição que possam englobar uma ampla gama de condições ambientais. Além disso, sensores químicos *in situ* que fornecem meio ideal para aquisição de medições contínuas de concentração ainda estão em desenvolvimento, particularmente para os contaminantes orgânicos, que normalmente ocorrem em baixas concentrações. Melhores abordagens e estratégias para estimar a carga de contaminantes orgânicos, incluindo tanto avaliações de desenho amostral como tecnologia de sensores, precisam ser colocadas em prática. Em 2006, a ACT organizou o workshop "Evaluating approaches and technologies for monitoring organic contaminants in the aquatic environment" (Alliance for Coastal Technologies, 2006b), com as seguintes recomendações:

- Melhorar a compreensão sobre o balanço de massa em sistemas aquáticos e sua relação com potenciais medidas substitutivas como carbono orgânico dissolvido (DOC), clorofila, granulometria e distribuição do material em suspensão e seus constituintes orgânicos alvo.
- Desenvolver sensores de medidas contínuas e em tempo real, para serem usados pelos gestores ambientais, para aplicarem monitoramento mais intensivo quando necessário.
- Buscar medições substitutivas e indicadores de contaminação para poluentes orgânicos, como por exemplo, a matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM) e a turbidez.
- Desenvolver sensores *in situ* para PCBs, PAHs, piretroides e contaminantes orgânicos emergentes, e desenvolver estratégias que combinem as abordagens de amostragem com as ferramentas que incorporem a sinergia do sensor (ou seja, medir parâmetros substitutos apropriados junto com os compostos orgânicos dissolvidos para permitir a estimativa de emissão de massa total).

**4.1.7 HIDROCARBONETOS:** os óleos e seus derivados ainda permanecem como uma das fontes de energia mais importantes do mundo. Para gerir eficazmente essas fontes de energia, devem ser implementados protocolos adequados para garantir a prevenção e rápida resposta a derrames de petróleo, uma vez que acarretam prejuízos econômicos e ambientais significativos. Os sensores de hidrocarbonetos fornecem os meios para detectar e monitorar derramamentos de óleo antes, durante e depois que eles ocorrem. Considerando as propriedades próprias dos óleos, foram projetados sensores *in situ*, de laboratório e remotos, que absorvem ou refletem a energia eletromagnética incidente sobre a água em diferentes bandas espectrais. Para levar a uma

compreensão mais abrangente dos derramamentos de óleo, será necessário um conjunto de sensores que avaliem a extensão, a localização, o movimento, a espessura, a condição e a classificação do derramamento de óleo. Um único sensor não teria a capacidade de coletar todas essas informações, só uma combinação deles para estabelecer de forma efetiva e rápida uma resposta a um derramamento de petróleo em ambientes aquáticos.

**4.1.7 FLUORÍMETROS *IN SITU*:** são instrumentos submersíveis que detectam a clorofila-a, pigmento fotossintético presente nos vegetais e em muitas espécies de cianobactérias. São particularmente úteis no fornecimento de estimativas temporais e espaciais das distribuições de clorofila. Esses equipamentos auxiliam a entender a distribuição da clorofila e a determinar a existência de aportes antrópicos que desencadeiam florações de vegetais oportunistas na água. Espera-se poder usar fluorímetros para estimar com precisão alguns dos parâmetros listados a seguir, embora se reconheça, na atualidade, que todos estes não podem ser quantificados com o uso de tecnologia e/ou métodos existentes em termos de sensores: biomassa do fitoplâncton, migrações verticais e outras variações naturais de concentrações dos produtores primários e de suas espécies, incluindo HAB (*Harmful Algal Bloom*) e o estado nutricional da comunidade.

**4.1.8 SENSORES DE PARÂMETROS GENÉTICOS:** as tecnologias automatizadas de sensores de parâmetros genéticos são muito promissoras, por exemplo, para a detecção de proliferações de vegetais nocivos, patogênicos e de bactérias transmitidos pela água. O desenvolvimento de sensores genéticos autônomos para monitorar a qualidade ambiental da água está avançando em muitas frentes, o que é uma etapa necessária para tornar esses sensores parte de um sistema de observação oceânica.

**4.1.9 MICROSSENSORES:** as nanotecnologias emergentes têm um enorme valor potencial para reduzir o custo e o consumo de energia. Entretanto, o uso de sensores químicos *in situ* já traz intrínseca uma série de dificuldades a serem vencidas. Dessa forma, o emprego de microssensores permanece incerto, tanto com relação ao tempo futuro como pelas aplicações para os quais esses pacotes avançados de sensores estarão disponíveis. No entanto, a amostragem tradicional e os procedimentos de análises baseados em laboratório não são adequados para monitorar ambientes costeiros dinâmicos onde as distribuições do analito variam rapidamente em resposta a uma série de fatores físicos, biológicos e antropogênicos. Para esse fim, um objetivo

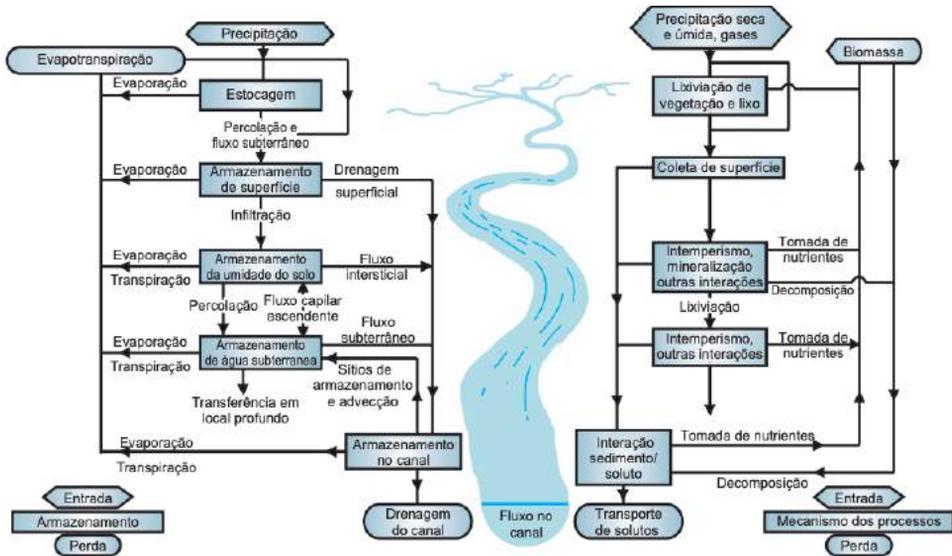
comum tanto para a comunidade científica como para os tomadores de decisão é buscar o desenvolvimento de pacotes de sensores avançados e miniaturizados que possam ser implantados para monitoramento contínuo *in situ* e que ofereçam capacidade de autocalibração, avaliação de desempenho e integração de dados.

## 5.1 APLICAÇÃO EM OUTROS COMPARTIMENTOS

**5.1.1 INTERAÇÕES ÁGUA SUPERFICIAL-SUBTERRÂNEA:** O volume e a qualidade dos recursos hídricos subterrâneos costeiros precisam ser conhecidos e quantificados, primeiro por sua importância como recurso de água doce, e também devido a sua potencial influência nos ciclos biogeoquímicos costeiros. As principais questões para obter um cálculo de volume correto são a medição da taxa de descarga de água doce para as águas costeiras, o fluxo salino para os aquíferos continentais costeiros e os processos geológicos e físicos que controlam essas taxas e fluxos ao longo de várias escalas de tempo.

Do ponto de vista da qualidade da água, é imperativo que os aportes químicos para os aquíferos costeiros sejam compreendidos, o que requer o conhecimento das fontes e das importantes transformações biogeoquímicas que ocorrem ao longo do caminho percorrido pelo fluido, bem como do tempo de residência do fluido no meio sedimentar (Figuras 7 e 8). A interface água doce-salgada é uma área particularmente interessante, pois é onde dois reservatórios de água, com propriedades químicas muito diferentes, se encontram, estabelecendo um local potencial para importantes transformações, misturas, diluições e processos biogeoquímicos.

A amplitude da descarga de água subterrânea (DAS) na zona costeira é difícil de ser avaliada usando técnicas tradicionais, principalmente porque a DAS é frequentemente difusa. Além disso, as forçantes que impulsionam a DAS doce e salina ocorrem em uma ampla escala de tempo, indo de minutos a anos. Exemplos disso incluem o efeito de “bombeamento de maré” e as trocas induzidas pela ação do efeito de ondas, bem como a recarga dos aquíferos subterrâneos, impulsionada pelos padrões sazonais de chuva. Os programas de avaliação das interações da água superficial com a subterrânea devem, absolutamente, considerar essas variáveis para que sejam corretos e precisos (Figura 9). A ACT promoveu o *workshop* “Groundwater-surface water interactions sensor technology” (2005), cujo principal objetivo foi identificar quais os parâmetros seriam úteis para a avaliação das interações entre a água da



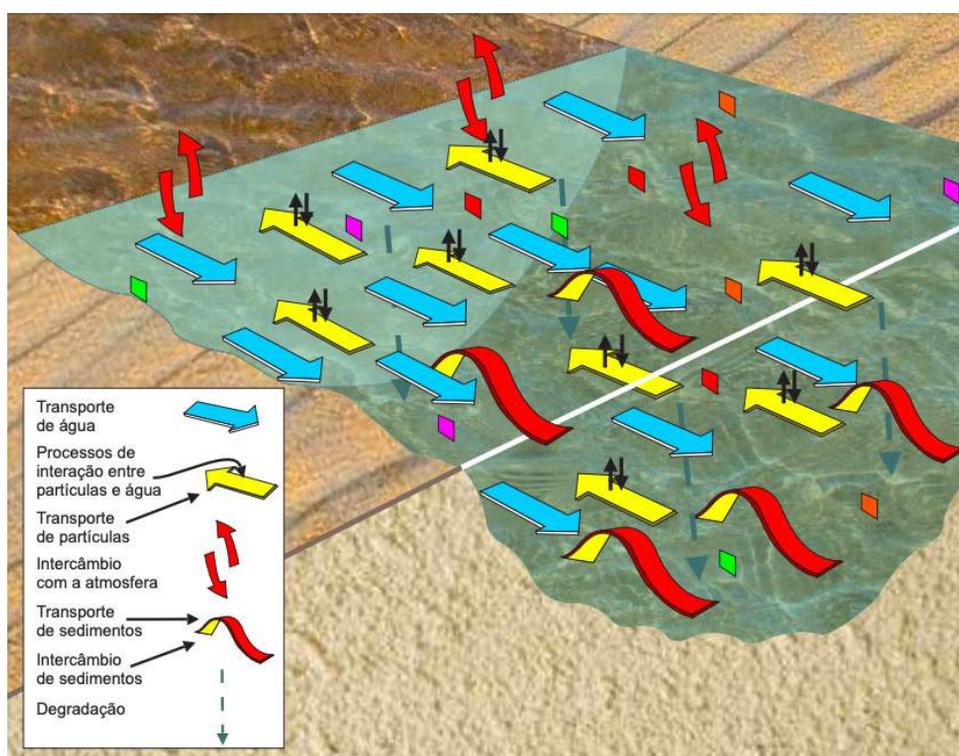
**FIGURA 7:** Esquema simplificado dos processos que operam na bacia de drenagem e mecanismos associados que governam o fluxo do material dissolvido para o oceano. Fonte: Walling e Webb, 1986.

superfície e a subterrânea na zona costeira. Os participantes identificaram tipos de sistemas de sensores que deveriam ser usados para obtenção de dados de séries temporais e indicaram quais parâmetros seriam mais adaptados ao desenvolvimento/aplicação da tecnologia de sensores (Alliance for Coastal Technologies, 2005b).

Recentemente, cientistas passaram a compreender melhor a influência da interação água subterrânea-superficial em uma ampla gama de processos biológicos e geoquímicos costeiros. Devido à natureza dinâmica desse processo, a tecnologia do uso de sensores para o seu estudo registrou avanços significativos. À medida que a importância do processo ambiental ocorrente torna-se mais bem compreendida por aqueles que estão fora da área de pesquisa científica, e a tecnologia se torna mais refinada e fácil de usar, ela se tornará disponível para um público mais amplo e talvez se torne um componente central mais usual e popular de muitos programas de monitoramento e gestão costeira.

**5.1.2 SENSORES DA INTERFACE SEDIMENTO-COLUNA D'ÁGUA:** o ecossistema costeiro apresenta uma variedade de desafios específicos e únicos em comparação com o sistema oceânico de mar aberto. Em particular, as interações com a interface sedimentar influenciam significativamente

o ecossistema costeiro. As tecnologias de observação devem ser desenvolvidas e empregadas para incorporar tanto as interações, os processos e a diversidade de habitats do fundo do mar. Sensores devem ser aplicáveis ao exame e monitoramento do leito do mar costeiro, incluindo a camada limite da zona bentônica e a camada sedimentar da interface sedimento-coluna d'água. Quanto mais forem disseminados e aplicados os sensores atuais, melhores serão as recomendações para melhorias nesses sistemas. Isso pode gerar a identificação de áreas para o desenvolvimento futuro de atividades que promovam o uso da tecnologia de sensores nas observações, monitoramento e gerenciamento do ambiente bentônico costeiro (Alliance for Coastal Technologies, 2006c).

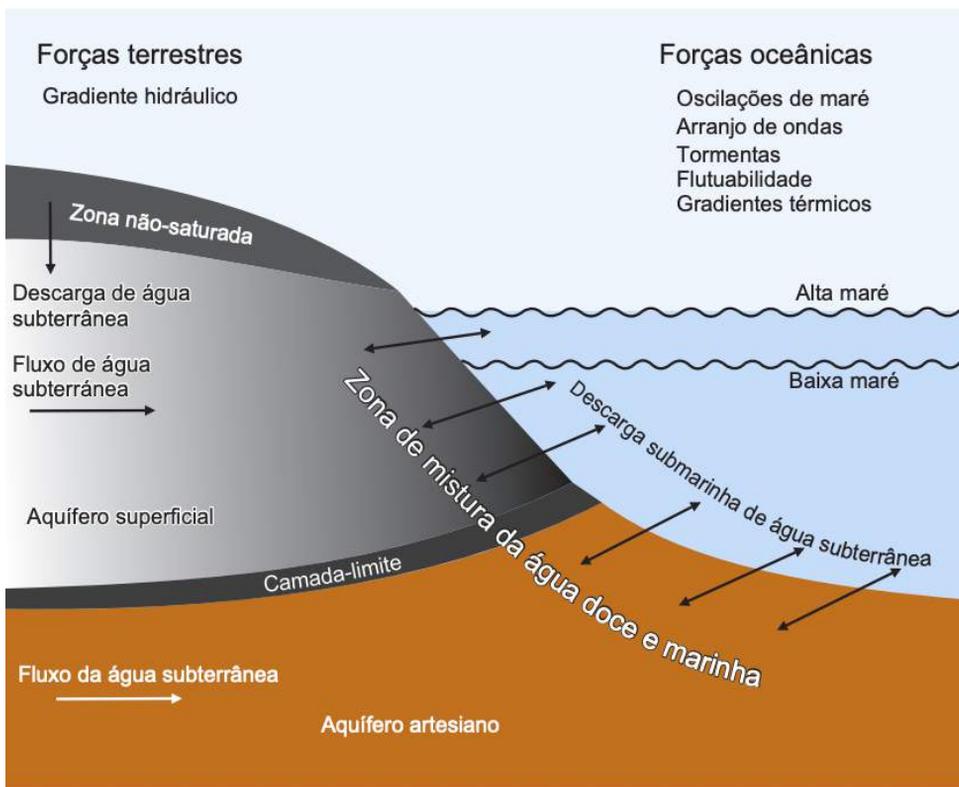


**FIGURA 8:** Representação esquemática de processos que ocorrem durante a mistura estuarina. Fonte: Programa ECOS 3.

Por fim, é consenso que a OO é necessária para atender a uma ampla gama de demandas dos serviços de informação. Para isso, necessita de esforços convergentes visando ao desenvolvimento e validação de instrumen-

tos e criação de novas tecnologias colocadas à disposição para uma eficaz transição da pesquisa/desenvolvimento para *status* operacional.

A melhor maneira para que isso seja estabelecido é uma ação conjunta entre as instituições de pesquisa, os gestores de recursos ambientais em empresas do setor privado interessadas em desenvolver e aplicar tecnologias que incrementem a OO, como é o caso do uso e criação de sensores e outros instrumentos de monitoramento e estudo sistêmicos dos sistemas costeiros e marinhos e suas interfaces.



**FIGURA 9:** Modelo conceitual de um estuário subterrâneo. Fonte: Niencheski, 2007.

### **ESTUDO DE CASO EM 00: O INCIDENTE COM O NAVIO NT BAHAMAS, CARREGADO DE ÁCIDO SULFÚRICO NO PORTO DA CIDADE DO RIO GRANDE (RS)**

O navio *Bahamas* chegou ao porto do Rio Grande em agosto de 1998, com 12.000 ton. de ácido sulfúrico. Por defeito num registro, entrou água do estuário no tanque do navio, misturando-se com o ácido e gerando reações químicas potencialmente explosivas, desencadeando um incidente de magnitude sem paralelo no mundo. Para eliminar o risco de explosão, parte da mistura ácida foi descartada no estuário durante a vazante, respeitando a sua capacidade autodepuradora. A mistura ácida que sobrou no navio provocou forte corrosão, contaminando-se com metais. Por isso, teve que ser neutralizada (fevereiro/1999), para que os metais precipitassem no fundo dos tanques, não contaminando o estuário em eventuais vazamentos e tornando possível a operação de remoção do navio do porto.

A reflutuação do navio foi feita com bolsões infláveis em seu interior (abril/1999). Todas as etapas operacionais envolvidas nesse incidente (alijamento da mistura, sua neutralização, reflutuação e remoção do navio) foram acompanhadas de monitoramentos da qualidade ambiental por uma equipe da FURG, até a sua saída definitiva do estuário (20/abril/1999) (Niencheski et al., 2001).

A participação da equipe da FURG no incidente com o navio *Bahamas* trouxe à comunidade de Rio Grande e às autoridades regionais e mesmo federais a possibilidade de identificarem e utilizarem os recursos técnicos e pessoais disponíveis na Universidade do Rio Grande, em situações de risco à comunidade e ao meio ambiente. Nesse incidente, o conhecimento acadêmico resultante dos estudos e pesquisas desenvolvidos na instituição foi efetivamente disponibilizado à comunidade.

A partir do incidente, a FURG deixou de ser vista pela comunidade regional somente como uma instituição de ensino e pesquisa, mas também como uma instituição capaz de ações extensionistas fortes, assumindo não só a disponibilização de seus conhecimentos, mas se propondo participar como parceiro ativo na solução dos problemas da comunidade. Também foram aprofundadas as discussões com as autoridades do Porto do Rio Grande

para ser instituído o monitoramento do ambiente na orla portuária de forma permanente. Hoje, o monitoramento é uma realidade, em que é também efetiva a participação da FURG em algumas etapas, demonstrando a importância da oceanografia operacional.

Outro aspecto positivo observado foi que a Defesa Civil da cidade, que até então normalmente atuava apenas em incidentes naturais, passou a constituir uma comissão de ação para o Plano de Auxílio Mútuo (PAM) das indústrias de Rio Grande, para trabalhar na conscientização da necessidade de identificação e preparação para acidentes de natureza operacional, industrial e de transporte, que possam afetar a comunidade. A FURG como um todo passou a atuar em parceria com as autoridades na prevenção de acidentes com risco à população e ao ecossistema estuarino da Lagoa dos Patos, como também no estudo e adoção de técnicas de monitoramento e controle do meio ambiente. A partir da conscientização da comunidade e das autoridades de que o impacto ambiental causado por esse incidente foi insignificante com relação a todos os riscos a que este estuário foi submetido, ficou naturalmente reconhecida a adequação dos procedimentos recomendados e adotados pela equipe da FURG. Houve então um incremento muito importante na credibilidade da atuação desta Universidade em questões ambientais. Como consequência da consciência ambiental incrementada, as possíveis alterações da qualidade ambiental causadas por atividades portuárias potencialmente poluidoras, como por exemplo, operações de dragagem, estão sendo monitoradas sob a responsabilidade da FURG. Com relação à comunidade, a atuação da FURG nesse incidente despertou a consciência ecológica da população e a necessidade de preservar esse sistema estuarino tão complexo. O reconhecimento das atividades da FURG relacionadas com o meio ambiente tem proporcionado consolidação de parcerias e consórcios com empresas da região, para a concretização de programas que visem à preservação desse meio ambiente. Esse incidente fez com que a FURG se iniciasse na OO, área que oferece na atualidade excelentes oportunidades de carreira profissional para abraçar os desafios costeiros e oceânicos de um país que possui a Amazônia Azul.

## **6 ONDE ESTÁ A MAIORIA DOS USUÁRIOS: O MONITORAMENTO OPERACIONAL DOS SERES VIVOS**

Um dos métodos da OO permite que uma embarcação que se desloca receba um grande número de informações em tempo real ou quase-real. Para que essa embarcação monitore o volume de água no qual se desloca, quanto a posição do fundo ou o tipo de substrato, a presença de plâncton, cardumes de peixes, seus formatos, a que velocidade nadam, áreas com peixes forrageiros, presas de predadores ecológica e economicamente valiosos, é preciso que o barco esteja instrumentado com acústica, especialmente.

Acústica é definida como a geração, transmissão e recepção de energia na forma de ondas mecânicas que necessitam de um meio material para se propagarem. Quando se ouve som em casa, por exemplo, com um equipamento potente, vários objetos podem vibrar, como persianas de PVC, por exemplo. Se a persiana está afastada da fonte de som e vibra é porque está sendo perturbada pela energia acústica que a atinge, gerada na fonte, como é o caso do aparelho de som. Após a passagem da energia, a persiana para de vibrar. Se esse sistema de som pudesse detectar parte da energia refletida pela persiana, seria possível calcular a distância entre o aparelho e a persiana.

Esse é o princípio do funcionamento dos sonares ou ecossondas. A hidroacústica é o estudo da propagação do som em meio líquido e necessita de uma fonte de transmissão, como veremos. A acústica é amplamente utilizada nos oceanos, em lagos, rios, reservatórios, etc., para monitorar o ambiente quanto à presença de objetos, seres vivos etc., denominados de alvos. Em hidroacústica os alvos podem ser todos aqueles mencionados no parágrafo anterior.

Na verdade, seria muito mais simples usar a visão, a óptica, para localizar objetos dentro d'água, como cardumes ou o fundo. Nosso sistema de visão é fantástico e nosso cérebro muito evoluído para interpretar imagens. Para vermos, no entanto, é preciso luz, mas a luz se atenua muito rápido na água. Águas com muito material em suspensão atenuam a luz mais rápido do que águas cristalinas, mas mesmo estas atenuam a luz muitíssimo mais que o ar. Por outro lado, as ondas acústicas propagam-se muito bem em meios materiais fluídos como a água e, ao contrário da luz, não se atenuam rapidamente.

Se evoluímos, entre outros aspectos, para enxergar e interpretar imagens, somos muito menos preparados do que outros mamíferos, como baleias

e golfinhos, quando imersos na água. Baleias, golfinhos e outros seres marinhos transmitem som e usam essa energia para localização e comunicação, justamente porque o som se propaga muito bem na água.

No entanto, somos muito criativos e desenvolvemos aparelhos para vencer dificuldades, usando inicialmente a lógica. Assim, foram criados equipamentos que transmitem som dentro d'água para localizar objetos, cardumes, o fundo etc., denominados eco sondas e sonares. Eco sondas transmitem som verticalmente para baixo (Figura 10) e sonares podem transmitir ao redor, em 360° e também para baixo (Figura 11).

O som transmitido na água se propaga, as ondas se chocam com objetos e parte da energia é refletida, diz-se espalhada, por esses objetos. Parte dessa energia é refletida na mesma direção da transmissão, portanto os equipamentos, além da capacidade de transmitir, também captam a energia refletida de volta. Ao receber essa energia o sistema converte a energia acústica em elétrica e um processador interno registra esses dados e calcula a distância do objeto que refletiu, multiplicando o tempo entre a transmissão e a recepção pela velocidade do som na água.

Os dados processados ao longo de milhares de transmissões são disponibilizados na forma de tempo, voltagem, distância e posição geográfica. Logicamente as eco sondas estão muitas vezes conectadas a aparelhos GPS ou DGPS e algumas a sensores de temperatura e, até, salinidade da água, já que a velocidade do som depende destas (mais apropriadamente, da densidade). Mas, conforme dito acima, somos muito capazes de interpretar imagens, então esses equipamentos ao final do processamento nos fornecem uma imagem em uma tela. A lógica é: utiliza-se a ótima capacidade de propagação do som na água para gerar imagens que representem o que se encontra abaixo da superfície. Podemos dizer que "imageamos o oceano com acústica". Para esse "imageamento" ficar correto, vários processamentos, correções e ajustes são necessários nos dados básicos. Por exemplo, o som se atenua pouco na água, mas atenua, isto é, perde intensidade à medida em que se propaga. Então, se colocarmos um objeto, por exemplo, um peixe de 1m a 10m do nosso equipamento e avaliarmos o eco (a quantidade de energia refletida), veremos que o eco será de X unidades de energia acústica. Se colocarmos o mesmo peixe a 100m da fonte, o eco será muito menor, mas ainda terá sido originado por um peixe de 1m. Então o processador corrige a atenuação, e o eco corrigido será de X unidades de energia, independentemente da distância do alvo. Com esses processamentos, a imagem gerada na tela é o resultado gráfico do processamento das energias refletidas por inúmeros objetos no caminho de propagação do som e o conjunto de imagens é análogo a uma paisagem.

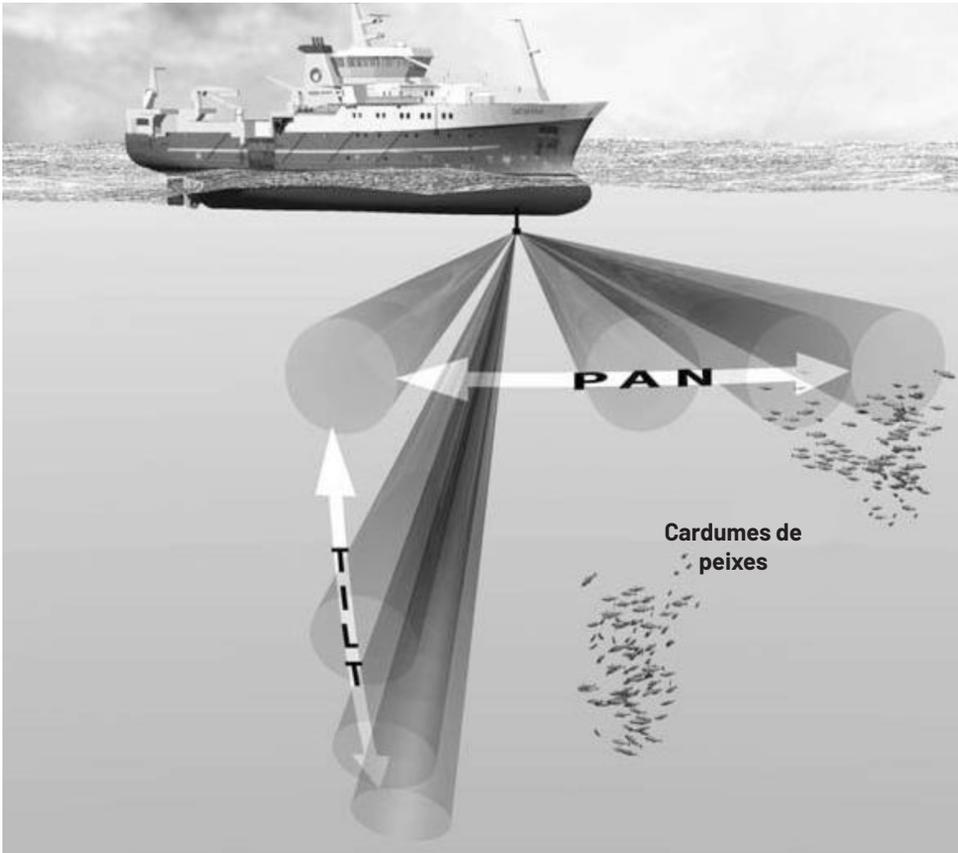


**FIGURA 10:** Configuração do sistema EK80 com seus componentes principais. Fonte: Manual de operação EK80 SIMRAD Inc.

Os equipamentos acústicos são muito variados. A Figura 10 mostra as diferentes partes de um equipamento acústico, que consta de um transdutor (algo assim como um microfone e alto-falante conjugados) e uma unidade de processamento que trabalha em parte como um relógio que dá a cadência das transmissões e mede o tempo de chegada dos ecos, processa distância e atenuações e gera imagens para o monitor. As imagens representam o histórico da viagem do som na água, que começa com a transmissão e termina com a recepção.

Este tipo de aparelho pode ser mais “básico” ou mais “sofisticado”. Os básicos são as eco sondas utilizadas na pesca, desde a amadora até a profissional. No entanto, quanto mais profissional e sofisticada for a pesca, mais os aparelhos acústicos se aproximam das denominadas eco sondas científicas (o modelo da Figura 10 é uma delas). Eco sondas científicas são aparelhos complexos, que exigem calibrações, porque além do básico são utilizadas para quantificar a densidade dos ecos, tanto em número quanto em massa. Esses equipamentos são usados para estimar a biomassa de peixes, por exemplo, sardinha e outras espécies na costa sudeste do Brasil, a anchoveta no Peru, o calamar nas Malvinas, o krill na Antártica, sardinha no Atlântico Norte e muitas outras espécies em todos os oceanos.

Os sonares são utilizados para localizar objetos, cardumes, submarinos etc. que estejam posicionados no entorno do barco. Ao transmitir som em 360°, ou seja, em todas as direções (Figura 11), podem monitorar o volume de água sobre o qual o barco se desloca na superfície.



**FIGURA 11:** Desenho ilustrativo dos lobos, ou cones acústicos, gerados com as transmissões do sonar, indicando a possibilidade de varreduras laterais (PAN) ou verticais (TILT) com o objetivo de detectar cardumes posicionados na coluna d'água. Fonte: adaptado de Mitson, R.B. (1983) Fisheries sonar. Fishinhg news Books Ltd., Farham.

## 6.1 MONITORAMENTO HIDROACÚSTICO DE PETRECHOS DE PESCA PARA AMOSTRAGEM BIOLÓGICA

A grande maioria dos aparelhos hidroacústicos, como as ecossondas e os sonares, tem a parte que transmite e recebe o som, o transdutor, instalado no casco das embarcações. Os demais componentes, processadores, monitor etc., estão a bordo. Também estão disponíveis no mercado transdutores que podem ser rebocados e equipamentos acústicos para o monitoramento dos petrechos e operações com redes de pesca de arrasto (tanto de fundo quanto pelágico) e de cerco – que constituem as denominadas sondas de rede.

As sondas de rede são desenvolvidas e confeccionadas para atender às necessidades do setor pesqueiro industrial, e a pesca científica, para

amostragem biológica, se beneficia dessa tecnologia. A utilização desses equipamentos é de fundamental importância na pesca científica, por assegurar a representatividade das amostras coletadas através da possibilidade de monitorar toda a operação de pesca, permitindo avaliar se as redes utilizadas operaram de maneira adequada.

O monitoramento hidroacústico das operações de pesca possibilita a otimização do tempo de mar, na medida em que se podem tomar decisões em tempo real sobre a duração de um arrasto, ou sobre alterações da profundidade de operação das redes e velocidade de arrasto, evitando, por vezes, a necessidade de repetição de lances de pesca.

Quando associadas à metodologia hidroacústica de prospecção, mapeamento e estimativa de abundância, as sondas de rede permitem avaliar, por exemplo, se as redes de arrasto pelágico operaram de fato nas faixas de profundidade de interesse, garantindo que os organismos coletados correspondam aos registros detectados pelas eco sondas científicas. Além disso, a partir da informação de que uma determinada quantidade de organismos entrou pela boca da rede, pode-se decidir pela finalização da operação de pesca, evitando a captura de um número excessivo e desnecessário de organismos e reduzindo o tempo empregado tanto na operação de pesca quanto nos procedimentos amostrais posteriores, como triagem, pesagem e morfometria dos organismos.

O equipamento mais comumente utilizado é um transdutor acústico (Figura 12) instalado em posição central na tralha superior das redes de arrasto (Figura 13). Esse sistema monitora a posição exata do petrecho de pesca, através de informações em tempo real sobre a profundidade da rede em relação à superfície e o fundo. Indica também o tempo efetivo de arrasto, o formato da boca da rede em operação (aberturas horizontal e vertical), a presença de organismos entrando na rede (Figura 14) ou passando por seus entornos e fuga dos alvos em relação à rede. Sensores acessórios de temperatura e salinidade podem ser acoplados ao transdutor da sonda de rede.

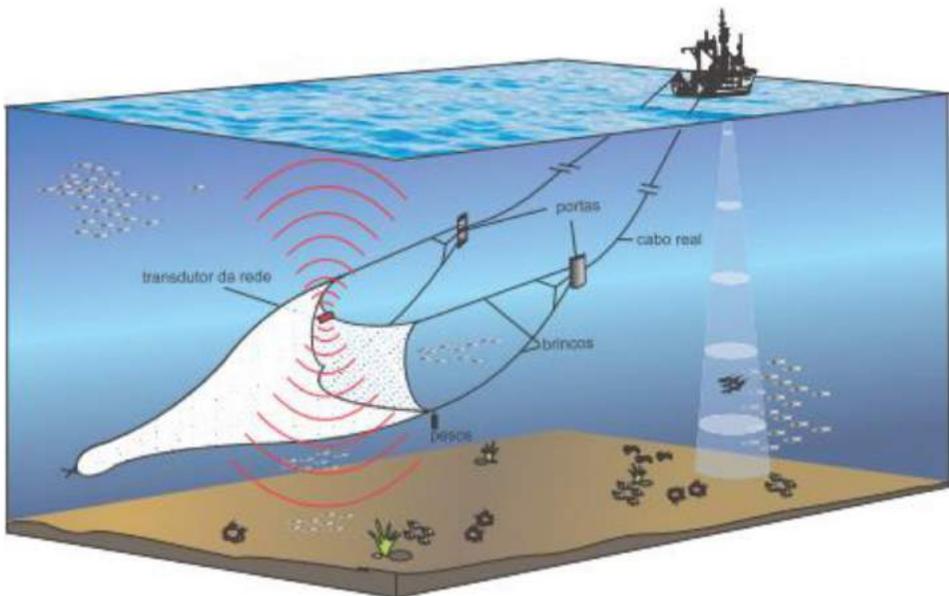
No entanto, há outros equipamentos acústicos disponíveis que possibilitam um acompanhamento mais completo das operações de pesca. Fornecem, por exemplo, informações sobre a distância entre as portas de arrasto, o momento em que as tralhas inferiores de redes de arrasto ou cerco tocam ou se afastam do leito e o volume de organismos capturados, através de sensores posicionados em diferentes porções do túnel de redes de arrasto. Todas as informações são transmitidas acusticamente para um receptor instalado no casco da embarcação ou rebocado por ela.

Portanto, equipamentos hidroacústicos são altamente eficientes para

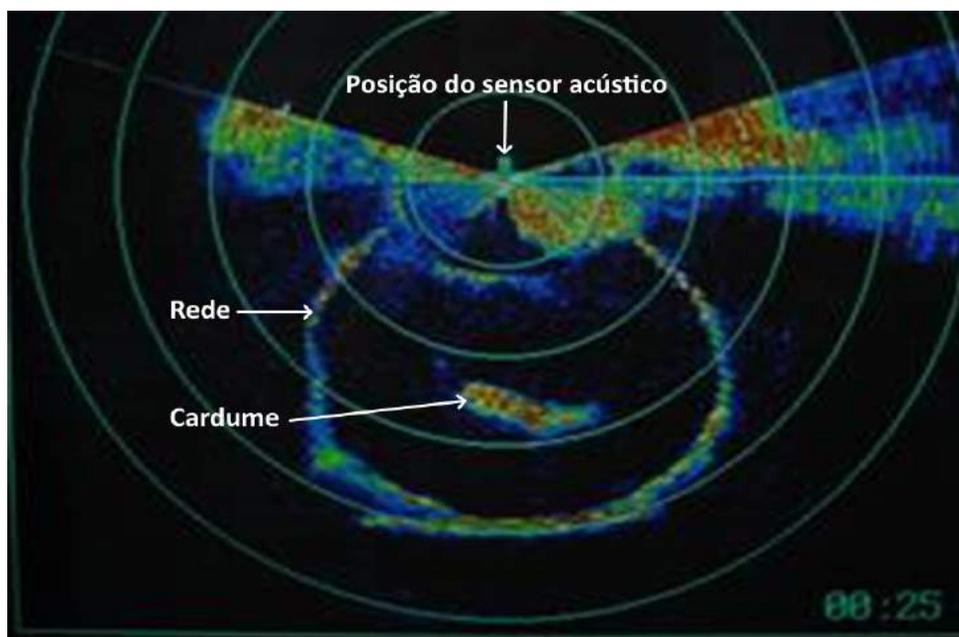
localizar objetos em distâncias na ordem de dezenas a centenas de metros, não mais que isso. A grande maioria dos peixes de valor comercial e que servem de alimento de alta qualidade tem preferências por determinadas faixas de temperatura, salinidade, concentração de plâncton, entre outras variáveis que podem ser estimadas por satélites.



**FIGURA 12:** Transdutor da sonda de rede. Fonte: Laboratório de Tecnologia Pesqueira e Hidroacústica - Instituto de Oceanografia, FURG.



**FIGURA 13:** Esquema de embarcação equipada com ecossonda científica e rede de arrasto pelágico monitorada por sonda de rede. Fonte: Estudos oceanográficos: do instrumental ao prático / organizador Danilo Calazans; colaboradores André Colling [et al.]. Pelotas: Ed. Textos, 2011. 464 p.; il.; color; 17,2 x 25cm. ISBN: 978-85-99333-06-8.



**FIGURA 14:** Exemplo de imagem gerada pela sonda de rede mostrando o formato da boca da rede e cardume entrando na rede. Fonte: Laboratório de Tecnologia Pesqueira e Hidroacústica - Instituto de Oceanografia, FURG.

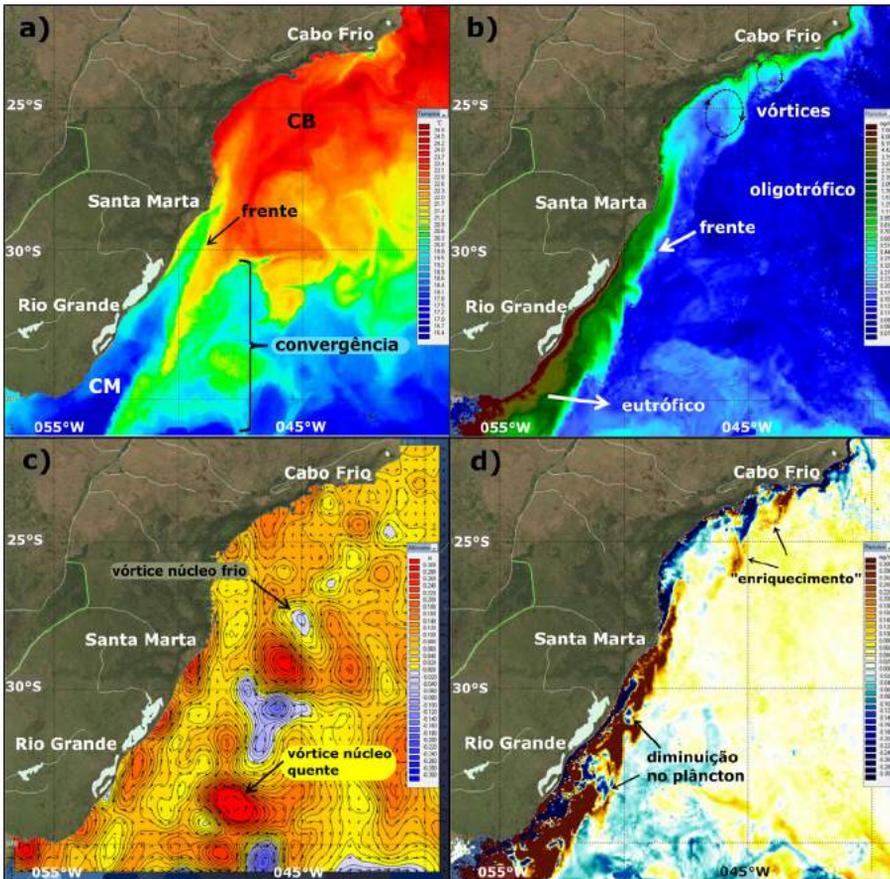
## 6.2 OO APLICADA À PESCA

Nas operações de pesca comercial, a procura por concentrações de cardumes é a principal causa de consumo de combustível e tempo de mar. Apesar de peixes e cardumes não poderem ser vistos diretamente através da tecnologia satelital, técnicas de sensoriamento remoto podem ser aplicadas na localização e na predição de áreas favoráveis à agregação de cardumes, com base em indicadores detectados remotamente (Klemas, 2013). Portanto, análises ambientais com base em dados satelitais, que descrevam as características oceanográficas de uma região, podem fornecer previsões das áreas de maior potencial para a pesca. Empresas especializadas geram esse tipo de produto para usuários como empresas, armadores ou os mestres de pesca, que geralmente pescam espécies que habitam a coluna d'água dos oceanos. Os usuários recebem o "produto" customizado, em formato útil, no tempo necessário para definição da estratégia mais eficiente para as operações no mar.

A OO aplicada à pesca possui uma componente atmosférica e outra

oceanográfica. A componente atmosférica é avaliada através de cartas sinóticas e modelos numéricos, acessados através de sites de previsão de tempo e vento (veja: [www.cptec.inpe.br](http://www.cptec.inpe.br), [www.windy.com](http://www.windy.com), por exemplo). A análise indica áreas onde as condições meteorológicas são mais adequadas à operação de pesca, assim como regiões ou períodos que, em função de limitação às operações ou eventos meteorológicos extremos, devem ser evitados.

A componente oceanográfica é composta por imagens de temperatura da superfície do mar (TSM), concentração de clorofila-a, altimetria e das correntes superficiais, principalmente. Para fins ilustrativos, a Figura 15 apresenta imagens do dia 04/12/2017 fornecidas pelo programa Catsat ([www.catsat.com](http://www.catsat.com)). Esse programa é uma ferramenta de decisão para profissionais envolvidos na pesca pelágica, aplicada a diversas pescarias ao redor do globo.



**FIGURA 15:** Produtos fornecidos pelo programa Catsat no dia 04/12/2017. Temperatura da superfície do mar (a), plâncton (b), altimetria (c) e gradiente de plâncton (7 dias). Fonte: adaptado do Software CATSAT 5.0

Na imagem de TSM, as cores vermelho e azul representam águas quentes ( $TSM > 24^{\circ}\text{C}$ ) e frias ( $TSM < 18^{\circ}\text{C}$ ), respectivamente (Figura 15a). De modo geral, a TSM diminui de norte a sul na nossa costa. A Corrente do Brasil (CB), indicada em vermelho, é a principal feição presente na imagem. Na região Sul e o setor costeiro observam-se as águas mais frias do ramo costeiro da Corrente das Malvinas (CM). A região de encontro entre as duas correntes denomina-se área de convergência, evidenciada pela transição entre as águas mais quentes (laranja-amarelo) e as águas mais frias (verde-azul). Nesse setor de encontro de massas de água distintas, temperatura, salinidade e oxigênio dissolvido variam de forma abrupta nas denominadas frentes oceanográficas.

No Catsat, o produto oriundo das imagens de cor do oceano, que é processado e convertido em concentração de clorofila-a, é chamado de “plâncton”, fazendo associação com os produtores primários do oceano. Nessa imagem, as cores marrom e azul representam águas com alta ( $> 7\text{mg}/\text{m}^3$ ) e baixa ( $< 0,070\text{mg}/\text{m}^3$ ) concentração de plâncton, respectivamente (Figura 15b). Observe que as águas com baixa concentração de plâncton (oligotróficas) correspondem às águas mais quentes da imagem de TSM, enquanto áreas com maior densidade planctônica (eutróficas) correspondem às regiões mais frias (Figura 15b). As áreas de transição entre águas oligotróficas oceânicas e produtivas costeiras são denominadas frentes de cor do oceano. Outras feições interessantes nessa figura são os meandramentos da CB, próximo à latitude  $25^{\circ}\text{S}$ .

A imagem de altimetria mostra as anomalias da altura da superfície do oceano (Figura 15c). As anomalias positivas em vermelho, as negativas em azul, as quais podem formar giros de núcleo quente e frio, respectivamente. A direção das correntes é indicada pelas setas ou vetores, com comprimento proporcional a intensidade da corrente.

Outra ferramenta fornecida pelo Catsat, denominada “gradiente”, permite visualizar a variação de uma componente oceanográfica em período de tempo selecionado pelo usuário. Vejamos um exemplo de gradiente de plâncton (Figura 15d). As áreas indicadas em amarelo/vermelho representam locais onde ocorreu aumento no plâncton, enquanto áreas em azul representam diminuição. Observe que os meandramentos destacados na imagem de plâncton (Figura 14b) correspondem a áreas de “enriquecimento” no gradiente de 7 dias, associado com transporte de água eutrófica da plataforma em direção às áreas até então pouco produtivas. Por outro lado, áreas de diminuição no plâncton podem evidenciar concentração de consumidores de plâncton, tornando essas áreas atrativas a pequenos peixes e seus predadores.

Perceba que as imagens de TSM, plâncton e altimetria permitem a observação do cenário oceanográfico no momento da passagem do satélite. Por outro lado, o gradiente possibilita a interpretação da evolução destas variáveis ao longo do tempo. Para finalizar, tenha em mente que as frentes térmicas e de cor do oceano, os processos de mesoescala como giros de núcleo quente e frio e as correntes oceânicas são determinantes da produtividade e da distribuição dos organismos marinhos, incluindo os recursos pelágicos (Mugo et al., 2011; Klemas, 2013). Neste sentido, a OO é uma ferramenta para auxílio à identificação das áreas mais produtivas à pesca, com potencial para redução dos deslocamentos associados à procura, e consequente redução do gasto de combustível e a menor emissão de gases de efeito estufa.

Dentro do contexto da obtenção de informações de forma remota na pesca comercial ou na pesquisa científica, com hidroacústica obtêm-se dados de cardumes, formados por dezenas a milhares de indivíduos, ou do plâncton, com milhares a milhões de indivíduos. Com satélites procuramos por áreas consideradas mais propícias para a ocorrência desses agrupamentos de organismos, mas organismos individuais podem ser também usados para gerar informações muito específicas e igualmente relevantes, como veremos a seguir.

### 6.3 A OCEANOGRAFIA OPERACIONAL APLICADA AO MONITORAMENTO DE INDIVÍDUOS

O monitoramento de animais silvestres se iniciou na captura e marcação de espécimes na esperança de que fossem posteriormente recapturados, fornecendo informações sobre seus deslocamentos. A anilhagem de aves é um exemplo. Nos anos 50 essa atividade avançou de forma significativa, com os transmissores de rádio que permitiram os primeiros estudos de monitoramento sistemático dos movimentos individuais de animais com mínima interferência humana. Posteriormente, o lançamento de novas tecnologias como o sistema satelital ARGOS (anos 70) e o *Global Position System* - GPS (anos 90), e os constantes avanços na miniaturização de componentes eletrônicos, permitiram o desenvolvimento de dispositivos menores e mais sofisticados que, fixados nos animais, são capazes de fornecer a sua localização geográfica e informações básicas do organismo e do ambiente que o cerca.

Atualmente, as *tags*, ou marcas eletrônicas, têm sido bastante utilizadas para acompanhamento de animais marinhos. A fauna carismática, da qual fazem parte as baleias, golfinhos e tartarugas, são os animais mais bem observados remotamente. No entanto, não são os únicos, como veremos.

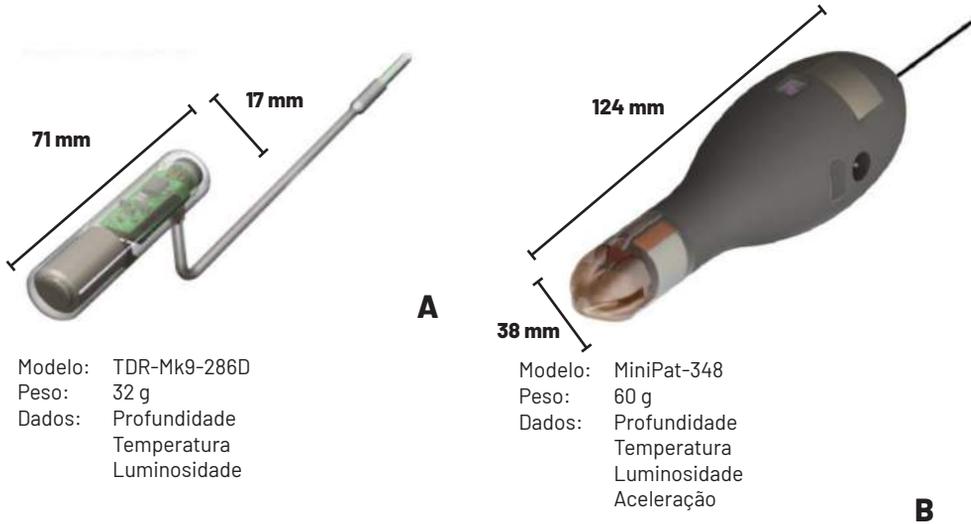
Atualmente, entre 800 e 1000 tartarugas são rastreadas no mundo através do sistema de satélites ARGOS (<http://www.argos-system.org>). Alguns desses animais são monitorados pelo Projeto TAMAR ([www.tamar.org.br](http://www.tamar.org.br)) (Figura 16A). Cada um desses animais representa uma plataforma científica autônoma, fornecendo não só dados sobre sua distribuição geográfica (Figura 16B), permitindo identificar as suas áreas de alimentação, descanso ou desova, mas também valiosas informações acerca do ambiente, tais como temperatura da água, oxigênio dissolvido, entre outras, dependendo dos sensores contidos na marca.



**FIGURA 16:** Tartaruga com marca satelital (A) e mapa com a trajetória dos animais rastreados (B). Fonte: Projeto TAMAR.

As marcas eletrônicas também são utilizadas para estudar personagens da fauna marinha não tão carismáticos como as baleias e tartarugas, mas de grande importância econômica e social, caso dos grandes peixes pelágicos, como os atuns. Nesse caso, são utilizadas marcas específicas para animais que passam pouco tempo na superfície, quando há transmissão de dados por satélite em tempo real. Essas marcas têm grande capacidade de armazenamento de dados e autonomia de baterias, e são, basicamente, de dois tipos: as implantadas (Figura 17A), que têm como desvantagem a necessidade de recaptura do animal para recuperação da marca e dos dados, e as marcas satelitais externas do tipo *pop-up* (Figura 17B), que após um período pré-programado cessam a coleta de dados, liberando-se em seguida do corpo do animal (*pop-up*) até a superfície, quando os dados são então transmitidos via satélite pelo sistema ARGOS. Em uma iniciativa pioneira no Brasil, as marcas do tipo *pop-up* foram utilizadas para marcação de 12 exemplares do atum bonito-listrado, no âmbito do Projeto Bonito, financiado pelo FUNBIO

(<https://www.funbio.org.br/>), para entender o deslocamento desse peixe no período reprodutivo.



**FIGURA 17:** Marca satelital implantável (A). Marca satelital pop-up (B). Fonte: WildlifeComputers.com

A observação de animais marinhos *in situ* é uma tarefa complicada. Além dos aspectos logísticos e financeiros de expedições com embarcações, os mares e oceanos são, com frequência, hostis à presença humana, sem falar nas imensas dimensões espaciais, gigantescos volumes com variadas profundidades. Nesse contexto, a OO, representada pelo uso de marcas eletrônicas, surge como uma ferramenta de transposição das dificuldades impostas pelo próprio ambiente, permitindo o incremento de informações biológicas e ambientais de forma remota e sistemática, proporcionando assim o avanço do conhecimento sobre a fauna marinha.

## REFERÊNCIAS

- Aarninkhof, S.; Ruessink, B.G.; Roelvink, J.A. 2005. Nearshore subtidal bathymetry from time-exposure video images. *Journal of Geophysical Research*, 110, C06011.
- Agüera-Vega, F.; Carvajal-Ramírez, F.; Martínez-Carricondo, P. 2017. Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. *Measurement*, 98: 221-227.
- Alliance for Coastal Technologies (2005a). In situ measurement of dissolved inorganic carbon speciation in natural waters, pH, pCO<sub>2</sub>, TA, & TC0<sub>2</sub>, Honolulu, Hawaii, February 16-18, 2005: workshop proceedings. Solomons, MD, Alliance for Coastal Technologies, (ACT 05-02, UMCES CBL 05-076).
- Alliance for Coastal Technologies (2005b). Ground water-surface water interactions sensor technology, Savannah, Georgia, March 7-9, 2005: workshop proceedings. Solomons, MD, Alliance for Coastal Technologies, (ACT 05-04, UMCES CBL 05-084).
- Alliance for Coastal Technologies (2006a). Dissolved oxygen probes: making oxygen measurements routine like temperature, St Petersburg, Florida, January 4-6, 2006: workshop proceedings. Solomons, MD, Alliance for Coastal Technologies, (ACT 06-01, UMCES CBL 06-074).
- Alliance for Coastal Technologies (2006b). Evaluating approaches and technologies for monitoring organic contaminants in the aquatic environment, Ann Arbor, MI, July 21-23, 2006: workshop proceedings. Solomons, MD, Alliance for Coastal Technologies, (ACT 06-05, UMCES CBL 07-022).
- Alliance for Coastal Technologies (2006c). Seabed Sensor Technology, Savannah, Georgia, February 1-3, 2006: workshop proceedings. Solomons, MD, Alliance for Coastal Technologies, (ACT 06-03, UMCES CBL 06-065).
- Alliance for Coastal Technologies (2014). Proceedings of the Nutrient Sensor Challenge Workshop. September 17-18, 2014. Washington DC.
- Awidson, R. E.; Bowman, J. D.; Dunham, C. D.; Anderson, R. C.; Baches, P.; Baumgartner, E.; Bell, J.; Dworetzky, S. C.; Klug, S.; Peck, N.; Sherman, D.; Squyres, S.; Tuttle, D.; Waldron, A. M. Operational Oceanography: Shall We Dance? *Eos*, 81 (11), March 14, 2000.
- Brassington, G. B.; Pugh, T.; Spillman, C.; Schulz, E.; Beggs, H. BLUElink: Development of Operational Oceanography and Servicing in Australia. *Journal of Research and Practice in Information Technology*, 39 (2), May 2007.
- Brunier, G.; Fleury, J.; Anthony, E. J.; Gardel, A.; Dussouillez, P. 2016. Close-range airborne Structure-from-Motion Photogrammetry for high-resolution beach morphometric surveys: Examples from an embayed rotating beach. *Geomorphology*, 261: 76-88.

- Clapuyt, F.; Vanacker, V.; Van Oost, K. 2016. Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms. *Geomorphology*, 260: 4–15.
- Down, S. J. 1999. Analysis of surface current velocities using video-imaging techniques at Teignmouth, Devon. Master thesis, University of Plymouth, Institute of Marine Studies.
- Dronkers, J. 2005. *Dynamics of Coastal Systems*. Advanced Series on Ocean Engineering – vol. 25. World Scientific. 519 pp.
- Flather R. A. Existing operational oceanography. Coastal Engineering. Volume 41, Issues 1–3, September 2000, pages 13–40. Elsevier. - [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839\(00\)00025-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839(00)00025-9)
- Flemming, N. C.; Vallerga, S.; Pinardi, N.; Behrens, H. W. A.; Manzella, G.; Prandle, D.; Stel, J. H. Operational Oceanography: Implementation at the European and Regional Scales. Volume 66, Elsevier Oceanography Series Elsevier, 05 giu 2002 – 572 pp.
- Gonçalves, J. A.; Henriques, R. 2015. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104: 101–111.
- Hansen S. E. *Operational Oceanography*. *Journal of Atmospheric & Ocean Science*, 8 (2-3), 2002.
- Holland, K.T. 1998. Beach cusp formation and spacings at Duck, USA. *Continental Shelf Research*, 18: 1081–1098.
- Holman, R. A. 1994. The ARGUS Program. Bulletin of the Coastal Imaging Lab. Oregon State University, Corvallis, OR 97331.
- Holman, R. A.; Lippmann, T. C.; O'Neill, P. V.; Hathaway, K. 1991. Video estimation of subaerial beach profiles. *Marine Geology*, 97: 225–231.
- Holman, R. A.; Sallenger Jr., A. H.; Lippmann, T. C.; Haines, J. W. 1993. The application of video image processing to the study of nearshore processes. *Oceanography*, 6(3): 78–85.
- James, M. R.; Robson, S.; d'Oleire-Oltmanns, S.; Niethammer, U. 2017. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology*, 280: 51–66.
- Klemas V. 2013. Fisheries applications of remote sensing: An overview. *Fisheries Research*, 148: 124–136. doi:10.1016/j.fishres.2012.02.027.
- Lippmann T. C.; Holman, R. A. 1989. Quantification of sand bar morphology: a video technique based on wave dissipation. *Journal of Geophysical Research*, 94(C1):99–1011.
- Lippmann, T. C.; Holman, R. A. 1991. Phase speed and angle of breaking waves measured with video techniques. *Proceedings of Coastal Sediments '91*, ASCE. pp. 542–556.
- Mancini, F.; Dubbini, M.; Gattelli, M.; Stecchi, F.; Fabbri, S.; Gabbianelli, G. 2013 Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: the

structure from motion approach on coastal environments. *Remote Sensing*, 5, 6880-6898.

Marone E.; Camargo, R. 2001. The fate of new Sea Level Stations along the Brazilian Coast. *Afro-America Gloss News*, 5(1).

Mitson, R.B. 1983 Fisheries sonar. Fishinhg news Books Ltd., Farham.

Mugo, R.; Saitoh, S.; Nihira, A.; Kuroyama, T. 2011. Application of multi-sensor satellite and fishery data, statistical models and marine-GIS to detect habitat preferences of skipjack tuna. In: Morales, J.; Stuart, V.; Platt, T.; Sathyendranath, S. (Eds.) *Handbook of Satellite Remote Sensing Image Interpretation: Applications for Marine Living Resources Conservation and Management*. EU PRESPO and IOCCG, Dartmouth, Canada. pp 166-185.

Niencheski, L. F.; Baumgarten, M. G.; Baraj, B.; Bernardelli, H. C. 2001. O incidente com o navio NT *Bahamas*, carregado de ácido sulfúrico no porto da cidade de Rio Grande (RS): sua inundação e remoção. *Pesquisa Naval* (ISSN 1414-8595). *Revista Marítima Brasileira*, 14 (supl. esp.), cap. XV: 197-207.

Niencheski, L.F. H.; Windom, H.L.; Moore, W. S. e Jahnke, R.A. 2007. Submarine groundwater discharge of nutrients to the ocean along a coastal lagoon barrier, southern Brazil. *Mar. Chem.* 106(3-4):546-561.

Niencheski, L. F. H. 2015. Propriedades químicas da água do mar. In: Castello, J; P.; Krug, L. C. (Orgs.). *Introdução às Ciências do Mar*. Pelotas: Ed. Textos. Cap. 6. ISBN: 978-85-68539-00-2.

Plant, N. G.; Holman, R. A. 1997. Intertidal beach profile estimation using video images. *Marine Geology*, 140: 1-24.

Programa ECOS 3, Plymsolve, Centre for Coastal and Marine Sciences; Plymouth Marine Laboratory.

Ranasinghe, R.; Symonds, G.; Holman, R. A. 1999. Quantitative characterisation of rip dynamics via video imaging. *Proceedings of Coastal Sediments'99*, ASCE, Long Island, USA. pp. 987-1002.

Reniers, A.; Symonds, G.; Thornton, E. 2001. Modelling of rip currents during RDEX. *Proceedings of Coastal Dynamics'01*, ASCE, Lund, Sweden. pp. 493-499.

Scarelli, F. M.; Sistilli, F.; Fabbri, S.; Cantelli, L.; Barboza, E. G.; Gabbianelli, G. 2017. Seasonal dune and beach monitoring using photogrammetry from UAV surveys to apply in the ICZM on the Ravenna coast (Emilia-Romagna, Italy). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 7: 27-39.

Siegle, E.; Huntley, D. A.; Davidson, M. A. 2006. Combining video imaging and numerical modelling for the extraction of intertidal morphology. *Journal of Coastal Research*, SI39: 478-482.

Siegle, E.; Huntley, D. A.; Davidson, M. A. 2007. Coupling video imaging and numerical modeling for the study of inlet morphodynamics. *Marine Geology*, 236: 143-163.

- Smit, M. W. J.; Aarninkhof, S. G. J.; Wijnberg, K. M.; González, M.; Kingston, K. S.; Southgate, H. N.; Ruessink, B. G.; Holman, R. A.; Siegle, E.; Davidson, M. A.; Medina, R. 2007. The role of video imagery in predicting daily to monthly coastal evolution. *Coastal Engineering*, 54: 539-553.
- Stockdon, H. F.; Holman, R. A. 2000. Estimation of wave phase speed and nearshore bathymetry from video imagery. *Journal of Geophysical Research*, 105(C9): 22,015-22,033.
- Symonds, G.; Holman, R. A.; Bruno, B. 1997. Rip currents. *Proceedings of Coastal Dynamics'97*, Plymouth, UK. pp. 584-593.
- Van Enckevort, I. M. J.; Ruessink, B. G. 2003a. Video observations of nearshore bar behaviour. Part 1: alongshore uniform variability. *Continental Shelf Research*, 23: 501-512.
- Van Enckevort, I. M. J.; Ruessink, B. G. 2003b. Video observations of nearshore bar behaviour. Part 2: alongshore non-uniform variability. *Continental Shelf Research*, 23: 513-532.
- Walling, D.E.; Webb, B.W. 1986. Estimating the discharge of contaminants to coastal waters by rivers: some cautionary comments. *Marine Pollution Bulletin*. 16, 488 - 492.



## CAPÍTULO 2

# PROCESSOS REGIONAIS DE INTERAÇÃO OCEANO- ATMOSFERA NO ATLÂNTICO SUL

RONALD BUSS DE **SOUZA**<sup>1</sup>

LUCIANO PONZI **PEZZI**<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Divisão de Modelagem Numérica do Sistema Terrestre, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP

<sup>2</sup> Laboratório de Estudos do Oceano e da Atmosfera (LOA), Divisão de Observação da Terra e Geoinformática, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP

## 1 INTRODUÇÃO

Os processos de interação oceano-atmosfera são aqueles que ocorrem em consequência do contato entre os níveis mais baixos da atmosfera e a superfície do mar. Esses processos não estão restritos à região de contato entre esses dois sistemas, mas afetam a dinâmica e a termodinâmica do ar e da água ao longo de suas respectivas camadas limite, ou camadas de mistura. A camada limite é aquela camada de um determinado fluido próxima a suas bordas que é afetada pela fricção contra aquela borda ou contorno e também pelo transporte de calor e outras propriedades através das superfícies de contato. Em meteorologia, essa camada é chamada de camada limite atmosférica e, caso esteja sobre o mar, é chamada camada limite atmosférica marinha (CLAM). Em física ou matemática, a camada limite é a região sobre a qual alguma propriedade ou termo varia rapidamente até sua amplitude máxima, ou seja, a região fora da qual certos termos de determinadas equações podem ser negligenciados.

Segundo Woolf (2001), a interação não ocorre somente ao longo da superfície de contato entre o oceano e a atmosfera, mas também através de bolhas suspensas sobre o oceano e através de gotículas presentes na baixa atmosfera. A maior fonte de bolhas acima da superfície do mar se dá pelo aprisionamento de ar dentro do fluxo associado à quebra de ondas e pelo impacto da chuva na superfície do mar.

Woolf (2001) ainda afirma que as bolhas são fontes peculiares de processos de interação oceano-atmosfera, comportando-se de maneira distinta da superfície do mar nessa interação, porém causando respostas típicas de trocas ao longo da superfície do mar, que incluem:

- as trocas de *momentum*, calor, energia mecânica (energia de ondas, turbulência etc.) e massa (vapor d'água e outros gases, elementos particulados, gotículas marinhas, bolhas etc.);
- a geração de ondas superficiais;
- a geração de turbulência;
- a modulação dos perfis verticais atmosféricos (vento, temperatura e umidade) e correntes marinhas.

Considerando as várias escalas de tempo e espaço, o contato entre a superfície do mar e a baixa atmosfera transforma o oceano e a atmosfera em um sistema acoplado. Esse sistema troca calor, *momentum* e gases entre si.

Na escala climática, a convergência ou a divergência do transporte de calor oceânico determina as regiões fontes e sumidouros de calor para a atmosfera, modulando o clima do planeta Terra. Conforme Trenberth e Fasullo (2010), a estimativa dos fluxos entre o oceano e a atmosfera é essencial para entendermos o balanço de energia do nosso planeta, assim como para validarmos as saídas dos modelos e previsões climáticas. Essas estimativas são também necessárias para que tenhamos um melhor entendimento dos vários processos de interação oceano-atmosfera que ocorrem na interface entre esses dois sistemas e são dependentes da camada de mistura oceânica. Isso inclui o sequestro de calor e carbono pelo oceano e a variabilidade espacial e temporal da temperatura da camada de mistura e a temperatura da superfície do mar (TSM).

Csanady (2004) descreve didaticamente as leis físicas e os mecanismos envolvidos nos processos de interação oceano-atmosfera. O autor introduz seu livro com um típico exemplo de processo de interação oceano-atmosfera na escala regional: a passagem do furacão Edouard pela localidade de Cape Cod, na costa leste dos Estados Unidos, entre agosto e setembro de 1996. O furacão, de origem tropical, formou-se com categoria 3 sobre as águas quentes da Corrente do Golfo e viajou até a latitude próxima a 38° N, mantendo ventos de até 180 km/h. Segundo Csanady (2004), a força desse sistema manteve-se pela ascensão de vapor d'água na região central do furacão através das paredes em torno do seu "olho". Esse vapor d'água acaba por condensar-se, liberando calor latente de evaporação que, por consequência, aumenta a flutuabilidade do ar úmido e torna a região central do fenômeno uma enorme chaminé com imenso poder de sucção de baixo para cima. O núcleo do furacão, então, suga ar da superfície do mar, produzindo uma grande espiral na direção do seu núcleo, com enorme poder destrutivo causado pelos ventos que circundam esse núcleo. Sobre a superfície do mar, esses ventos causam grandes ondas e geram enormes ressacas em regiões costeiras próximas. O ciclo de vida de um furacão durante sua formação e translação pelo oceano é influenciado pela TSM. O rápido fluxo de ar sobre águas quentes garante uma intensa transferência de calor e vapor d'água para a atmosfera e mantém a força do fenômeno. Sobre regiões de águas frias ou sobre a costa, a transferência de calor pela umidade evaporada diminui e o furacão tende a dissipar-se.

Apesar de fenômenos como o Edouard não serem comuns em águas subtropicais, é impossível para os brasileiros não lembrar do ciclone extratropical denominado Catarina (Pezza e Simmonds, 2005). Vianna et al. (2010) foram pioneiros em descrever os aspectos de interação oceano-atmosfera

relacionados à formação e dissipação do Catarina. Embora ainda existam controvérsias em denominar esse fenômeno como ciclone extratropical ou furacão como denominado por Pezza e Simmonds (2005), o Catarina foi um fenômeno típico de interação oceano-atmosfera que ocorreu sobre o Oceano Atlântico Sul em março de 2004, com efeitos nocivos sobre o estado do mar e sobre o litoral dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Vianna et al. (2010) reportam que o Catarina sofreu uma intensificação de seus ventos em oceano aberto causada pela presença de anomalias positivas de TSM associadas à presença de vórtices de mesoescala de núcleo quente na água durante a sua translação desde o interior do oceano até o litoral sul brasileiro. Pullen et al. (2017) apresentaram um exemplo de simulação desse fenômeno, em que foi empregado um modelo regional acoplado do oceano e da atmosfera no estudo do Catarina. Os autores mostram que o modelo acoplado em altíssima resolução espacial (aproximadamente 6 km) foi capaz de simular a trajetória do Catarina, o que não correu corretamente com os modelos atmosférico sozinho ou o modelo acoplado rodado em mais baixa resolução espacial.

Segundo Csanady (2004), os furacões imitam, numa escala pequena, a circulação atmosférica global, que basicamente é também alimentada pelo calor latente liberado pelo vapor d'água condensado. Isso acontece em regiões conhecidas como "torres quentes", em regiões de ascensão de ar da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e também em casos de tempestades extratropicais, embora, nesses casos, com menos intensidade.

A influência local da TSM sobre os ventos, que modula os processos de interação oceano-atmosfera na região tropical do Oceano Pacífico, foi descrita pela primeira vez nos trabalhos de Lindzen e Nigam (1987), Hayes et al. (1989) e Wallace et al. (1989). Esses autores descreveram os processos responsáveis pela modulação da estabilidade da CLAM. Lindzen e Nigam (1987) sustentam que a modulação da CLAM é dependente da modulação dos ventos pela variabilidade da pressão atmosférica ao nível do mar (PNM). Espera-se que uma baixa PNM seja encontrada acima de águas quentes e que uma alta PNM seja encontrada acima de águas frias. Em consequência, uma alta PNM estaria associada a ventos mais intensos e a regiões com grandes gradientes de TSM. Essa hipótese é conhecida como a hipótese do balanço hidrostático.

Wallace et al. (1989), por outro lado, desenharam a hipótese da estabilidade estática. Nesse caso, os autores sustentam que anomalias positivas de TSM produziriam mudanças na estabilidade estática da CLAM. Nesse caso, sobre águas relativamente mais quentes, a flutuabilidade do ar e a turbulência aumentariam e o cisalhamento vertical do vento seria reduzido dentro da CLAM. Como consequência, seriam gerados ventos mais intensos na super-

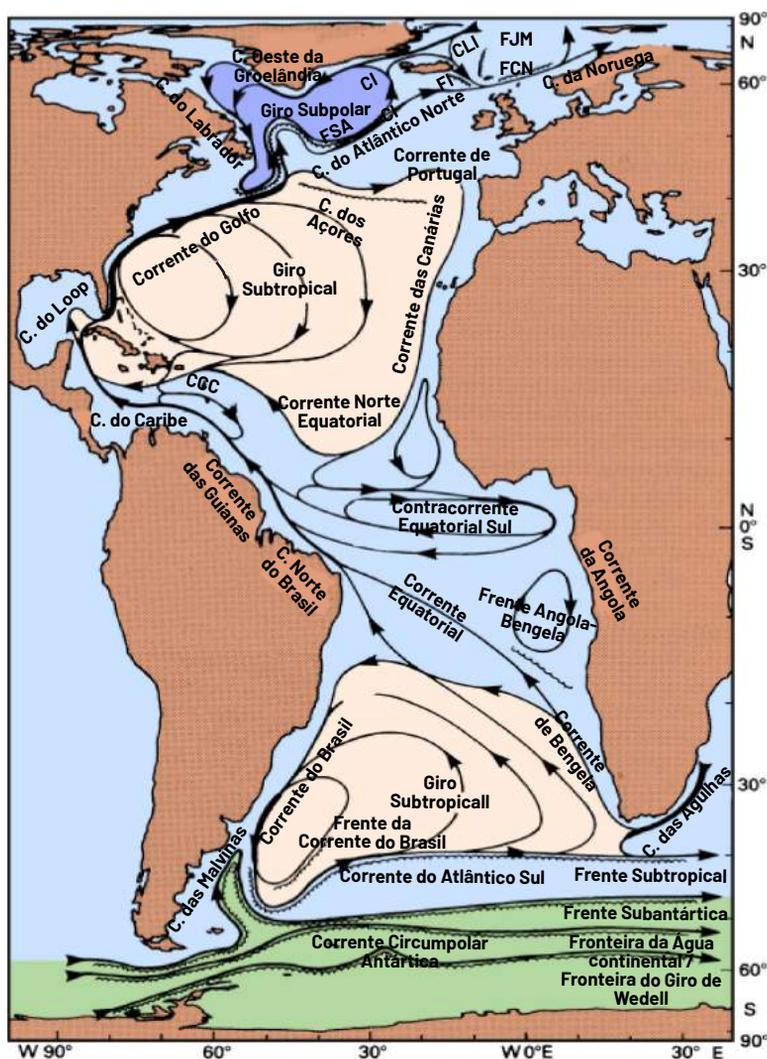
fície do mar. Anomalias negativas de TSM, por outro lado, estariam associadas a menos turbulência e a ventos mais fracos na superfície do mar, com uma CLAM mais estável e estratificada.

O objetivo deste capítulo é descrever os desenvolvimentos recentes no Brasil para o estudo dos processos regionais de interação oceano-atmosfera no Oceano Atlântico Sul. O capítulo oferece uma revisão dos estudos observacionais nessa área e das metodologias de trabalho, especialmente para a determinação dos padrões sinóticos de acoplamento oceano-atmosfera e das estimativas ou cálculos dos fluxos de calor entre esses dois sistemas, além de oferecer uma revisão sobre o modelo regional acoplado utilizado no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O texto é organizado nas seguintes seções: (1) Introdução; (2) Caracterização do Oceano Atlântico Sul; (3) Processos de interação oceano-atmosfera na escala climática; (4) Processos regionais de interação oceano-atmosfera no Oceano Atlântico Sul; (5) Observações e modelagem regional numérica e (6) Considerações finais.

## 2 CARACTERIZAÇÃO DO OCEANO ATLÂNTICO SUL

O Oceano Atlântico Sul (OAS) é um oceano peculiar sob vários aspectos. A circulação superficial geral desse oceano é caracterizada por um giro anticiclônico chamado Giro Subtropical do Atlântico Sul, delimitado em suas bordas desde a região equatorial pela Corrente Sul Equatorial, Corrente do Brasil (CB), Corrente Sul Atlântica e Corrente de Benguela (Tomczak e Godfrey, 2001 – Figura 1). A CB é uma corrente de contorno oeste relativamente fraca, que transporta águas de origem tropical ao largo da quebra da plataforma continental brasileira até latitudes próximas a 38°S, onde encontra as águas relativamente frias transportadas para o norte pela Corrente das Malvinas (CM). Essa corrente, por sua vez, é considerada um braço da Corrente Circumpolar Antártica (CCA) que deflete na direção norte, percorrendo um caminho ao largo da região de quebra da plataforma argentina e transportando águas de origem subantártica. Reid et al. (1977), Legeckis e Gordon (1982), Olson et al. (1988) e Podestá (1997), por exemplo, descreveram a região de encontro entre a CB e a CM que é conhecida como Confluência Brasil-Malvinas (CBM). Esta é uma região dominada pela variabilidade da mesoescala oceânica, com escalas temporais de semanas a meses e escalas espaciais de dezenas a centenas de quilômetros. Os autores ainda observaram que a região tipicamente

apresenta grandes gradientes laterais de TSM com alta variabilidade temporal e espacial e instabilidades associadas à presença de estruturas de mesoescala como vórtices, eddies e meandros (para suas definições, consulte Lentini e Souza, 2009). Como consequência da presença desses processos, a região da CBM é considerada uma das regiões dinamicamente mais ativas do oceano global (Chelton et al., 1990), com padrões de variabilidade espaço-temporal dominados pela mesoescala oceânica (Garzoli e Simionato, 1990; Provost e Le Traon, 1993).

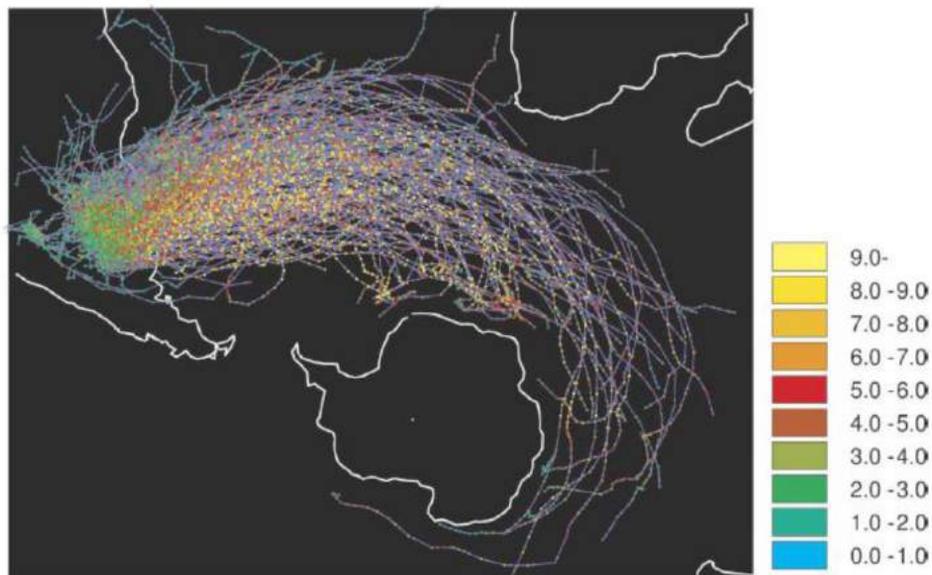


**FIGURA 1:** Correntes superficiais do Oceano Atlântico. Fonte: Adaptada de Tomczak e Godfrey (2001).

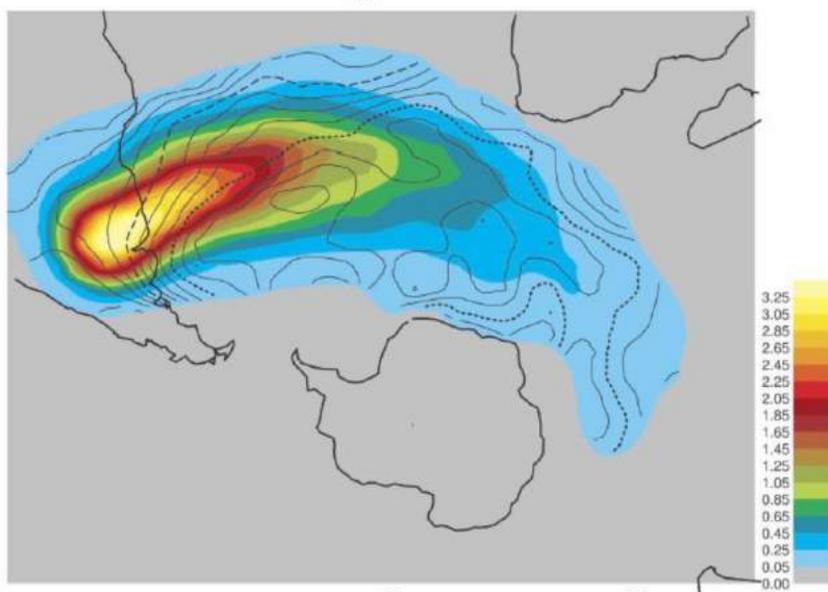
A região da CBM é uma importante região formadora de massas d'água, especialmente a Água Central do Atlântico Sul (ACAS) e a Água Modal Subtropical. A região é um dos mais importantes locais de troca de massas de água entre as bacias oceânicas do Pacífico e do Atlântico, uma vez que as águas carregadas pela CCA têm origem no Oceano Pacífico antes de serem defletidas para norte na região da Passagem de Drake, que separa a Antártica do continente sul-americano. As trocas inter-bacia no oceano global influenciam a distribuição em grande escala das propriedades oceanográficas, sendo um componente importante do sistema climático mundial (Witter e Gordon, 1999; Beal et al., 2011).

Assim como ocorre em outras regiões do oceano global onde as correntes de contorno oeste atingem seus limites máximos de penetração ao longo de seus giros subtropicais, a região da CBM e área vizinha, conhecida como a região da extensão da CB, se caracterizam pela forte interação oceano-atmosfera e, por conseguinte, são áreas importantes para o clima do planeta (Josey et al., 2008). Segundo os autores, o fluxo líquido de calor é claramente mais alto sobre as correntes de contorno oeste em latitudes médias, onde as águas mais quentes transportadas do equador em direção aos polos são resfriadas e evaporadas pelo contato com massas de ar frias e secas que em geral são transportadas pelos ventos de oeste dos giros atmosféricos subtropicais. Esses altos fluxos de calor, associados aos fluxos de vapor d'água do oceano para a atmosfera e pela presença de intensos gradientes laterais de TSM, acabam por contribuir para o desenvolvimento de distúrbios atmosféricos extratropicais. Hoskins e Hodges (2005), por exemplo, descrevem a presença de três regiões ciclogênicas distribuídas ao longo dos continentes antártico e sul-americano, entre a região norte da Península Antártica, no setor Atlântico do Oceano Austral, e a região da Bacia do Rio da Prata, na porção oeste do OAS. Centrada entre cerca de 40°S e 50°S, está a região de *storm tracks* do OAS (Figura 2).

Do lado leste da região subtropical do OAS, a frequente ejeção de vórtices da Corrente das Agulhas que vem do Oceano Índico e penetra o OAS desde a região sul da África do Sul também promove a mistura inter-bacia de massas de água desde a sua origem, na região conhecida como "Vazamento das Agulhas" e ao longo de um caminho pelo OAS conhecido como "Corredor de Vórtices das Agulhas" (CVA). Ambas as regiões são conhecidas como importantes componentes do sistema climático e da circulação oceânica global (Beal et al., 2011; Lutjeharms, 2006). Através do CVA, vórtices de mesoescala ejetados da Corrente das Agulhas percorrem o OAS numa banda de latitudes entre 35°S e 25°S, interagindo com a Corrente de Benguela e promovendo



(a)

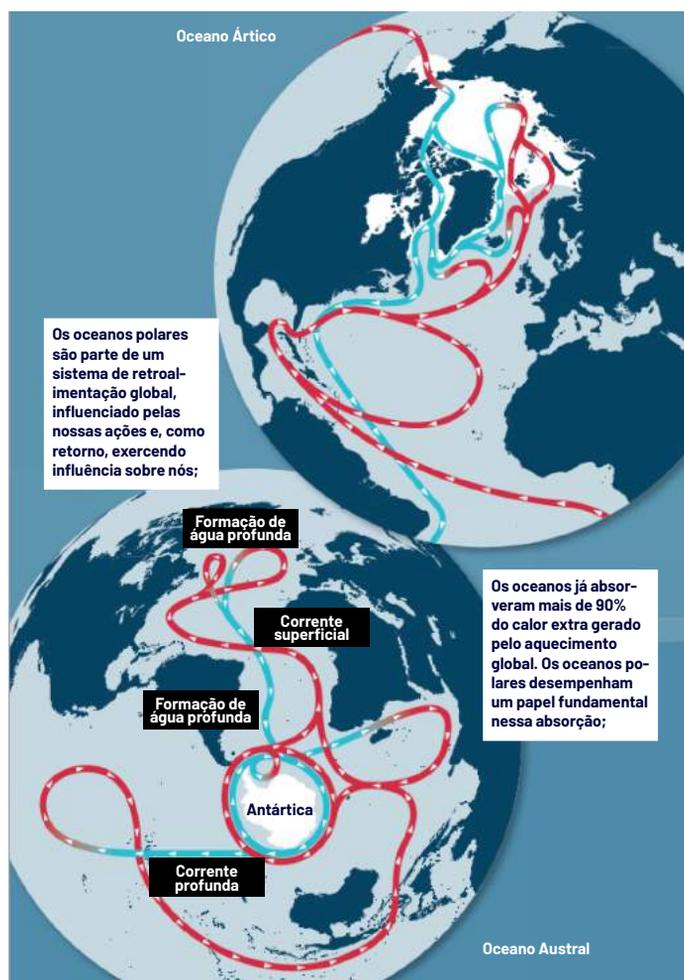


(b)

**FIGURA 2:** (a) Trajetórias de sistemas ciclônicos identificados para o nível de 850 hPa originários da região ciclogênica do Rio da Prata próximos a 30°S na costa da América do Sul. Os pontos coloridos indicam a intensidade do sistema em intervalos de 6 horas e unidade de  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ; (b) Densidade das trajetórias (cores) e intensidade média (linhas) para os mesmos sistemas. Fonte: Hoskins e Hodges (2005).

uma alta variabilidade de mesoescala regional, caracterizada, assim como a região da CBM, por uma alta energia cinética turbulenta (Garzoli e Gordon, 1996; Cecílio et al., 2014).

O limite sul do OAS é o setor Atlântico do Oceano Austral. Nessa região ocorrem importantes processos relacionados à circulação de revolvimento meridional (MOC, *Meridional Overturning Circulation*) global, com formação de massas de água controladas por processos de interação oceano-atmosfera-gelo marinho (Meredith et al., 2018). Essas massas de água circulam nas camadas superficiais, intermediárias, profundas e de fundo no oceano global. O OAS tem papel extremamente relevante, pois, sob o ponto de vista de transporte meridional de calor e ligado à MOC (Figura 3), é o único oceano no planeta que exporta calor desde o hemisfério sul até o hemisfério norte, controlando o clima daquela região remota.



**FIGURA 3:** Circulação de revolvimento meridional global. Fonte: Adaptada de Meredith et al. (2018).

### 3 PROCESSOS DE INTERAÇÃO OCEANO-ATMOSFERA NA ESCALA CLIMÁTICA

O programa *Climate Variability and Predictability* (CLIVAR), ligado ao *World Climate Research Program* (WCRP), é o programa de pesquisas responsável, nos dias de hoje, pelo estudo e entendimento dos processos de variabilidade e previsão climática do oceano global, incluindo o OAS. O CLIVAR tem como objetivo descrever e entender a dinâmica do sistema acoplado oceano-atmosfera e identificar processos responsáveis pela variabilidade climática, as mudanças e a previsibilidade nas escalas sazonal, interanual, decadal e centenal. As ferramentas de estudo do CLIVAR incluem dados observacionais e o desenvolvimento e aplicação de modelos do sistema climático (<http://www.clivar.org/about/about-clivar#Objective>).

Lembrando que o OAS não está desconectado de suas fronteiras geográficas, Hurrell et al. (2006) descrevem dois fenômenos climáticos relacionados ao Oceano Atlântico como um todo que impactam, de alguma forma, o OAS através dos trópicos: a Oscilação do Atlântico Norte (*North Atlantic Oscillation* – NAO) e a Variabilidade do Atlântico Tropical (*Tropical Atlantic Variability* – TAV). Conforme os autores, esses fenômenos, atuando de forma independente ou integrada, produzem uma série de impactos em diferentes escalas temporais, desde a escala sazonal até a interanual, com consequências importantes do ponto de vista social e ambiental nos continentes. Afora esses dois fenômenos, Hurrell et al. (2006) descrevem a importância da célula de revolvimento meridional do Atlântico (*Atlantic Meridional Overturning Circulation* – AMOC), componente atlântica da MOC, ilustrada na Figura 3.

Segundo Hurrell et al. (2006), a NAO é o padrão climático mais forte e frequente de variabilidade da circulação atmosférica, influenciando a variabilidade climática desde a costa leste norte-americana até a Sibéria e do Ártico até a região subtropical do Oceano Atlântico Norte. A NAO é caracterizada por uma modulação na posição e intensidade dos ventos de oeste sobre o Atlântico Norte. Ela exerce importante influência sobre a temperatura do ar, a precipitação e as tempestades, assim como sobre a pesca e todo o ecossistema marinho do Atlântico Norte e os continentes (Marshall et al., 2001a; Marshall et al., 2001b; Czaja e Marshall, 2001). A variabilidade atmosférica associada à NAO tem origem na dinâmica da atmosfera extratropical, sendo muito pronunciada na escala interanual. Hurrell et al. (2006) indicam que os processos de interação oceano-atmosfera no hemisfério norte, forçados pelos campos

de TSM e pela distribuição de gelo marinho no Ártico, têm impacto na evolução temporal recente da NAO. Com base nos resultados apresentados por Deser et al. (2004) para a região do Ártico, Hurrell et al. (2006) apontaram a importância dos efeitos do gelo marinho e da cobertura de neve sobre os fluxos de calor latente e sensível entre o oceano e a atmosfera. Os autores ponderam que os efeitos do gelo marinho e neve podem ter um papel importante de retroalimentação em relação às anomalias na circulação atmosférica do hemisfério norte. Deser et al. (2004) mostraram que mudanças na cobertura do gelo no Ártico estão correlacionadas com variações da NAO.

A TAV é relacionada a flutuações na intensidade dos ventos alísios na região do Oceano Atlântico tropical, associados a trocas no gradiente inter-hemisférico de TSM. Essas flutuações e trocas produzem grande impacto no regime de precipitação na região Nordeste do Brasil e na África sub-saariana. Inui et al. (2002) indicam que o entendimento das causas das flutuações relacionadas à TAV se torna difícil pela influência de vários processos que potencialmente impactam a variabilidade do Oceano Atlântico Tropical, quais sejam: (i) a influência da NAO; (ii) o forçamento remoto do ENOS (El Niño – Oscilação Sul); (iii) os processos locais de interação oceano-atmosfera no Atlântico Tropical. Os autores também apontam que, além dos gradientes de TSM ou das anomalias de TSM inter-hemisféricos, a variabilidade dos campos de TSM ao longo do equador tem certa influência sobre a modulação da intensidade do giro de circulação oceânica subtropical do hemisfério sul.

Embora poucos estudos tenham sido realizados para o hemisfério sul, especula-se que processos semelhantes àqueles determinados pela NAO no hemisfério norte também ocorram por aqui. Parise (2014) e Parise et al. (2015), por exemplo, exploraram a sensibilidade e memória do clima global ao aumento do gelo marinho antártico, considerando a sua máxima persistência em termos de concentração e espessura, sob as condições climáticas atuais. Os autores também avaliaram a sensibilidade da ciclogênese e ciclólise do hemisfério sul e seus impactos no clima da América do Sul, descrevendo que o aumento da extensão do gelo marinho antártico causou uma redução da temperatura da água do mar e da temperatura do ar ao sul de 55°S, e um aumento dessas variáveis no OAS subtropical em latitudes próximas a 35°S. Os autores apontaram ainda que o resfriamento da atmosfera e do oceano foi devido ao aumento do transporte de calor na atmosfera para sul associado a uma convergência em baixos níveis, corroborando a caracterização de um padrão típico da fase positiva do Modo Anular Sul (*Southern Annular Mode – SAM*), também conhecido como Oscilação Antártica (*Antarctic Oscillation*).

O SAM é o principal modo de variabilidade atmosférica em latitudes

médias e altas do hemisfério sul (Marshall, 2003). O SAM se caracteriza por um padrão zonalmente simétrico (anular) de propriedades sincronizadas (com diferença de fase) entre a Antártica e as médias latitudes do hemisfério sul. Esses padrões são normalmente descritos através de ferramentas estatísticas como as Análises de Componentes Principais, ou Funções Ortogonais Empíricas, aplicadas a diversos campos atmosféricos, incluindo a temperatura do ar e PNM, altura geopotencial e a componente zonal do vento. A fase positiva do SAM indica que o campo de pressão sobre a Antártica é mais baixo que nas latitudes médias do hemisfério sul. Na fase negativa, os campos de PNM são mais altos na Antártica.

Apesar de ser relativamente bem conhecida a dinâmica dos processos de interação oceano-atmosfera na escala climática no hemisfério sul, Summerhayes (2009) sustenta que a complexidade do sistema global de transporte de calor e a sua interação com o gelo marinho e continental torna a predição das mudanças globais uma tarefa muito árdua. O autor nos lembra que há diferenças muito grandes na circulação atmosférica e oceânica entre o hemisfério norte e o sul. Enquanto no hemisfério norte a região polar é caracterizada por um oceano cercado por continentes, no hemisfério sul temos o Oceano Austral circundando a Antártica, de maneira inversa ao que ocorre no norte. A forma quase circular da Antártica localizada sobre o polo sul e as características batimétricas do Oceano Austral produzem um fluxo atmosférico e oceânico predominantemente circumpolar, na direção zonal.

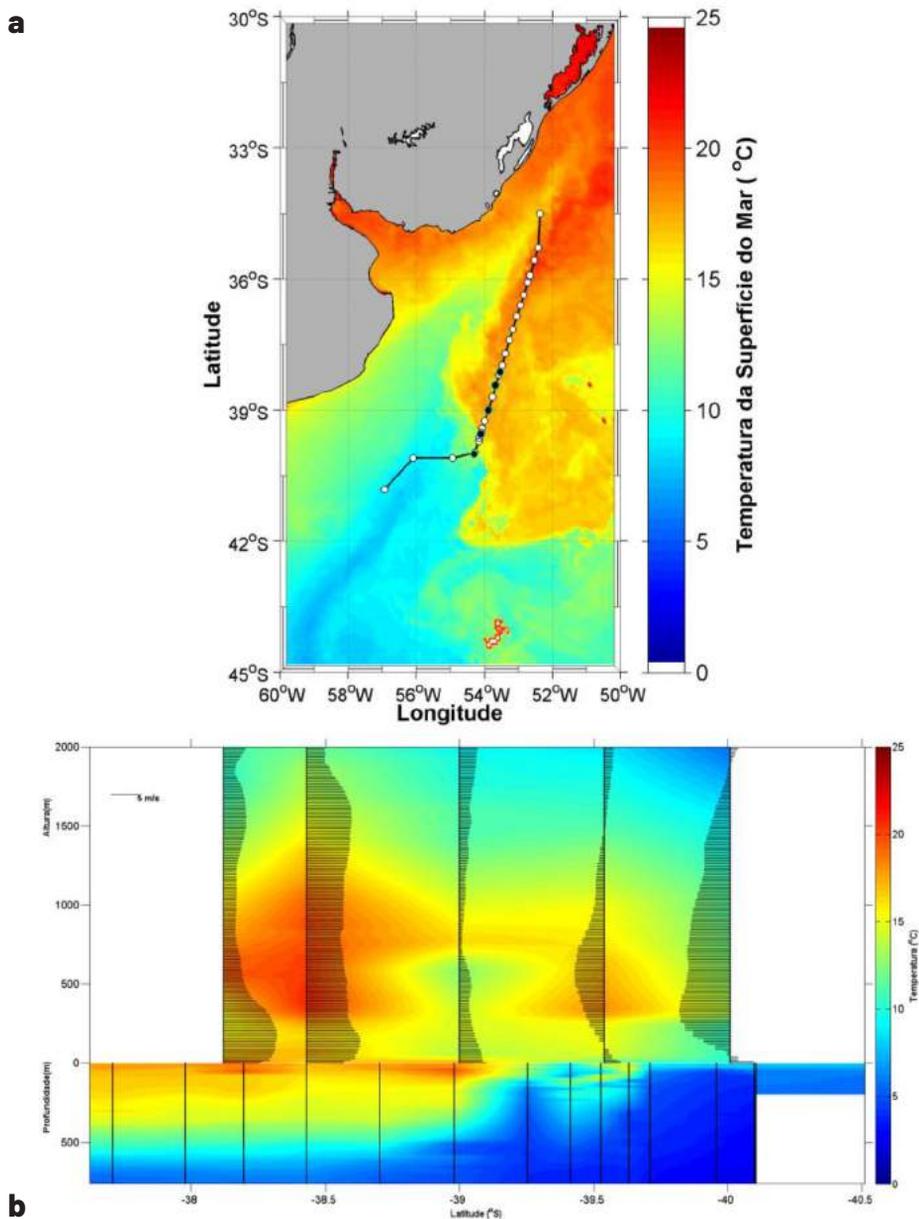
## 4 PROCESSOS REGIONAIS DE INTERAÇÃO OCEANO-ATMOSFERA NO OCEANO ATLÂNTICO SUL

Tokenaga et al. (2005) e Pezzi et al. (2005) foram os primeiros a descrever os impactos locais da TSM e dos ventos na superfície do mar sobre a estabilidade da CLAM na porção oeste do OAS. Esses autores trabalharam com dados tomados *in situ* na região da CBM, onde era esperado que os altos gradientes laterais de TSM produzissem um impacto local sobre a camada limite atmosférica, conforme a hipótese de Wallace et al. (1989). Os resultados de Tokenaga et al. (2005) incluíram uma climatologia detalhada dos padrões de acoplamento oceano-atmosfera, onde percebeu-se uma correlação positiva entre a TSM e a intensidade dos ventos na superfície do mar. Pezzi et al. (2005), por outro lado, descreveram pela primeira vez para a região da CBM que a troca de propriedades entre a CLAM e a camada de mistura oceânica mantém dependência estreita com os campos de TSM locais. Os autores

estimaram que os fluxos de calor entre o oceano e a atmosfera são mais altos sobre o lado quente da CBM, onde as altas TSMs da CB predominam. Pezzi et al. (2005) também reportaram que a presença de ventos mais intensos na superfície do mar sobre a região da CBM está relacionada às maiores intensidades dos fluxos de calor entre o oceano e a atmosfera e a uma maior diferença entre a TSM e a temperatura do ar.

Os trabalhos de Pezzi et al. (2005; 2009), Acevedo et al. (2010), Camargo et al. (2013) e Hackerott et al. (2018), na região da CBM, demonstraram que os intensos gradientes de TSM locais são os principais forçantes para a modulação da CLAM na região durante períodos de tempo relacionados à escala meteorológica sinótica. Apesar de a área de estudo desses autores se encontrar numa região de storm tracks e de alta variabilidade atmosférica ligada à ciclogênese e à passagem de sistemas atmosféricos transientes (Hoskins e Hodges, 2005 – Figura 2), quando os padrões de alta pressão predominam sobre essa área de estudo, as águas quentes da CB transferem calor do oceano para a atmosfera. Esse processo promove uma convecção atmosférica que resulta numa CLAM mais bem misturada, instável, com ventos mais intensos e uniformes ao longo da altura da camada limite atmosférica. A temperatura e a umidade do ar também tendem a ser maiores do lado quente da frente oceanográfica. Em contrapartida, o lado frio da CBM, quando sistemas atmosféricos transientes não estão presentes, é caracterizado por uma atmosfera mais fria, seca e com ventos mais fracos na superfície do mar. A CLAM é estável e apresenta um cisalhamento vertical do vento, que fica mais intenso à medida que se aumenta a altura afastando-se da superfície do mar (Figura 4).

Para a região da CBM, quando estão presentes sistemas atmosféricos transientes, a modulação local da TSM sobre a CLAM é suprimida. Os resultados de Acevedo et al. (2010), obtidos através de dados tomados em várias situações sinóticas atmosféricas, demonstraram que os processos de advecção atmosférica quente (massas de ar vindas de norte) ou fria (massas de ar vindas de sul) são importantes para modificar a estabilidade da CLAM em ambos os lados da frente oceanográfica presente na CBM. Acevedo et al. (2010) reportam que as diferentes fases do ciclo sinótico atmosférico causam diferentes padrões de advecção termal na região da CBM, levando a diferentes padrões de ajuste da CLAM aos contrastes de TSM presentes. Os autores também foram pioneiros em descrever que as características da atmosfera nas proximidades da superfície do mar, tais como a alta umidade e a intensa estratificação vertical das propriedades, podem contribuir para que as formulações existentes para a parametrização dos fluxos de calor sensível e la-



**FIGURA 4:** (a) Mapa de TSM com vetores de vento sinótico sobrepostos do dia 2 de novembro de 2004 para a região da CBM. Em tons de vermelho estão denotadas as águas quentes transportadas pela Corrente do Brasil e em tons de azul as águas transportadas pela Corrente das Malvinas. Os pontos pretos e brancos indicam estações de lançamento de radiossondas atmosféricas e XBTs pelo Navio de Apoio Oceanográfico Ary Rongel durante a Operação Antártica XXIII; (b) Perfil de temperatura do ar, da componente meridional do vento e da temperatura água do mar obtido entre os dias 1 e 3 de novembro de 2004 ao longo da derrota do navio indicada em (a). Fonte: Programa INTERCONF/INCT da Criosfera, adaptada de Pezzi et al. (2005).

tente entre a atmosfera e o oceano falhem.

Usando dados observacionais e do modelo atmosférico regional BRAMS (*Brazilian Regional Atmospheric Modeling System*), Camargo et al. (2013) estudaram a influência dos gradientes de TSM da região da CBM sobre a estabilidade da CLAM. Os autores tentaram determinar qual das principais hipóteses de manutenção da estabilidade da CLAM poderia ser preponderante na região de estudo: (i) o balanço hidrostático (Lindzen e Nigam, 1987) ou (ii) a estabilidade estática (Wallace et al., 1989). Após analisar os termos da equação do balanço do *momentum* com respeito a observações *in situ*, os autores descreveram que ambos os mecanismos ou hipóteses para a manutenção da estabilidade da CLAM são importantes na região da CBM. Adicionalmente, Camargo et al. (2013) sugeriram que outros efeitos locais inesperados, como um desbalanço da força de Coriolis ou os efeitos de fricção e turbulência, podem ser relevantes em períodos em que ocorrem distúrbios atmosféricos causados pela passagem de frentes atmosféricas sobre a região da CBM.

Os trabalhos anteriormente descritos de Pezzi et al. (2005; 2009), Acevedo et al. (2010) e Camargo et al. (2013) utilizaram formulações conhecidas como *bulk formulae* para a parametrização dos fluxos de calor entre o oceano e a atmosfera. Essas formulações serão explicadas na seção 5 deste texto. A partir de um esforço observacional mais complexo realizado pela primeira vez em 2012 na região da plataforma continental sul-sudeste do Brasil (PCSB), Pezzi et al. (2016) foram pioneiros em empregar no Oceano Atlântico Sul uma torre micrometeorológica de fluxos (Figura 5) para realizar observações diretas dos fluxos de calor, *momentum* e gases (vapor d'água e dióxido de carbono - CO<sub>2</sub>) entre o oceano e a atmosfera, utilizando a técnica da Covariância de Vórtices (descrita na seção 5 deste texto). Pezzi et al. (2016) também utilizaram as técnicas tradicionais anteriormente descritas aqui para investigar a possível modulação da CLAM pelos gradientes de TSM que ocorrem na direção perpendicular à costa sul-sudeste do Brasil no inverno durante a presença da Corrente Costeira do Brasil (CCB) (Souza e Robinson, 2004) na região da PCSB.

Embora mais fraca quando comparada a outras regiões de frentes oceanográficas do oceano global, a frente formada pelos contrastes termais entre a CCB e a CB durante o mês de junho de 2012 reproduziu exatamente o que ocorrera anteriormente na região da CBM: há coexistência dos mecanismos de controle da estabilidade da CLAM (balanço hidrostático e estabilidade estática), e os fluxos de calor sensível e latente entre o oceano e a atmosfera são dependentes dos gradientes zonais de TSM. O contraste termal entre as águas quentes da CB e as águas frias da CCB produziu diferenças de até 100 W.m<sup>-2</sup>

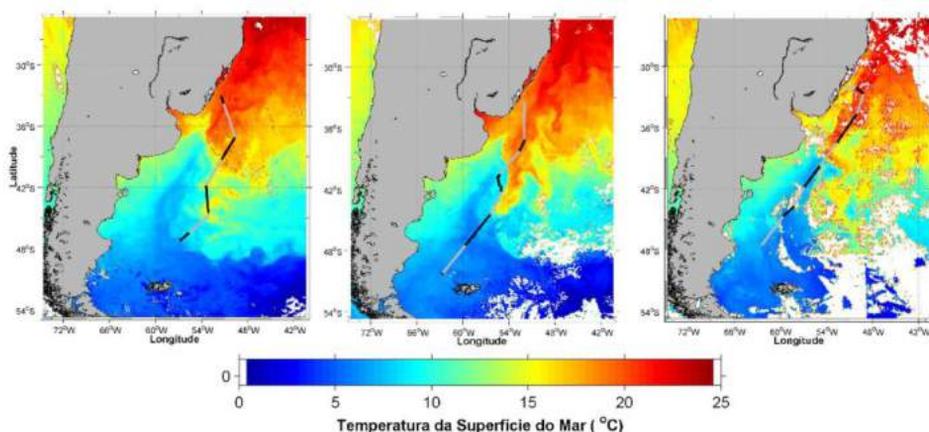
nos fluxos de calor entre a atmosfera e o oceano. Ao mesmo tempo, a presença de um ciclone extratropical na região sul da área de estudo modificou a advecção atmosférica local, tendo efeito tanto sobre os fluxos de calor quanto sobre a estabilidade da CLAM.



**FIGURA 5:** Torre micrometeorológica de fluxos empregada pelo INPE no Oceano Austral em novembro de 2018 a bordo do Navio Polar *Almirante Maximiano*. Essa torre, semelhante à utilizada por Pezzi et al. (2016) e Hackerott et al. (2018), mantém instrumentos meteorológicos que estimam os fluxos de calor, *momentum* e gases entre o oceano e a atmosfera através da técnica da Covariância de Vórtices. Fonte: Programa INTERCONF/INCT da Criosfera.

Recentemente, os trabalhos complementares de Mendonça et al. (2017) e Gonçalves-Araújo et al. (2018) descreveram as características físicas e biológicas das águas da região da PCSB durante o período em que os dados descritos em Pezzi et al. (2016) foram coletados. Resultados ainda não publicados indicam que os fluxos de  $\text{CO}_2$  entre o oceano e a atmosfera, medidos em paralelo com as medidas de fluxos de calor descritas por Pezzi et al. (2016), são diretamente dependentes dos contrastes zonais (perpendiculares à costa) da concentração de clorofila superficial entre as águas mais ricas (eutróficas) da CCB e as águas mais pobres (heterotróficas) da CB. Isso demonstra uma modulação local desses fluxos, em que as áreas mais ricas em fitoplâncton são áreas de sequestro de  $\text{CO}_2$ , enquanto as áreas mais pobres são fontes de  $\text{CO}_2$ , conforme esperado (Takahashi et al., 2009). Da mesma forma que ocorre com os fluxos de calor entre o oceano e a atmosfera, os fluxos de  $\text{CO}_2$  são altamente dependentes da variabilidade atmosférica na escala sinótica.

O trabalho recente de Hackerott et al. (2018) apresentou os primeiros resultados de medidas diretas de fluxos de *momentum* entre o oceano e a atmosfera realizadas através de torres micrometeorológicas instaladas pelo INPE a bordo do Navio Polar *Almirante Maximiano*. Essas medidas foram realizadas na região da CBM e na porção sudoeste do OAS, durante os meses de outubro de 2013, 2014 e 2015, ao longo das derrotas descritas na Figura 6.



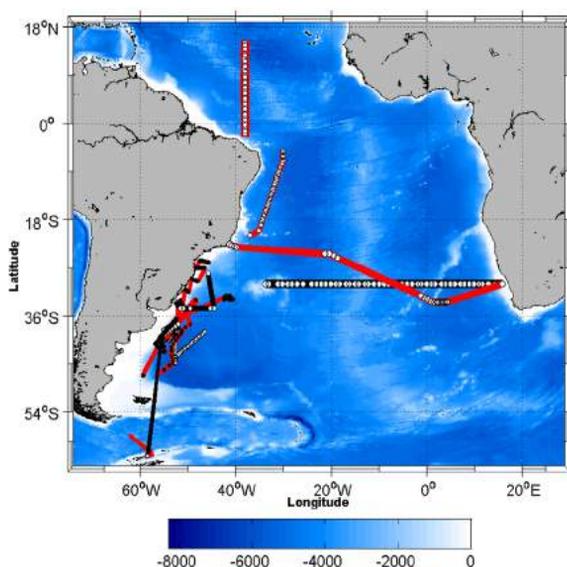
**FIGURA 6:** Derrotas do Navio Polar *Almirante Maximiano* cruzando a região da CBM e a porção sudoeste do OAS nos meses de outubro de 2013 (esq.), 2014 (centro) e 2015 (dir.) para a coleta de dados micrometeorológicos com torre. Fonte: Programa INTERCONF/INCT da Criosfera, adaptada de Hackerott et al. (2018).

Hackerott et al. (2018) também investigaram a influência das ondas superficiais e a estabilidade atmosférica sobre a CLAM. Como resultado, comprovaram um comportamento peculiar do coeficiente de arrasto durante o período de estudo na CBM: uma tendência negativa foi encontrada sob condições de ventos fracos (menores que  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), quando a altura significativa de ondas foi menor que 2,5 m. Em situações em que a altura significativa de ondas foi maior que 2,5 m, há uma relação inversa entre o coeficiente de arrasto e a velocidade do vento. Os autores sugerem que as ondas superficiais atuam como elementos de rugosidade durante as condições de mar com altas ondas, induzindo um deslocamento do plano zero ( $\sim 0,1$  a  $1 \text{ m}$ ) e indicando uma camada de rugosidade imposta pelas ondas. Analisando o balanço de energia cinética turbulenta, Hackerott et al. (2018) indicaram a ocorrência de um transporte vertical de energia quando a CLAM apresentava condições estáveis. Os padrões de dissipação da energia cinética turbulenta, no entanto, foram semelhantes àqueles presentes sobre superfícies em terra.

## 5 OBSERVAÇÕES E MODELAGEM REGIONAL NUMÉRICA

### 5.1 COLETA DE DADOS *IN SITU*

Todos os resultados aqui apresentados oriundos dos trabalhos de Pezzi et al. (2005), Pezzi et al. (2009), Acevedo et al. (2010), Camargo et al. (2013), Hackerott et al. (2018), Mendonça et al. (2017) e Gonçalves-Araújo et al. (2018) foram obtidos graças a um esforço observacional de mais de 15 anos promovido pelo INPE. Os dados observacionais aqui descritos foram coletados durante inúmeros cruzeiros oceanográficos realizados entre 2004 e 2018, a bordo de vários navios brasileiros operados pela Marinha do Brasil, como o Navio de Apoio Oceanográfico Ary Rongel, o Navio Polar *Almirante Maximiano*, o Navio Hidroceanográfico *Cruzeiro do Sul* e o Navio de Pesquisa Hidroceanográfico *Vital de Oliveira*. Também utilizou-se, durante um cruzeiro realizado em dezembro de 2012, o Navio Oceanográfico *Alpha Crucis*, da Universidade de São Paulo. Embora a maior parte dos cruzeiros tenha sido realizada na região da CBM, através de projetos ligados ao Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR), alguns cruzeiros foram realizados na costa sul-sudeste do Brasil e cruzando o OAS na sua porção subtropical. Desde o ano de 2017, o INPE também realiza medidas micrometeorológicas no projeto *Prediction and Research Moored Array in the Atlantic* (PIRATA), na região do Oceano Atlântico Tropical (Figura 7).



**FIGURA 7:** Trajetórias dos navios de pesquisa brasileiros sobre a batimetria do OAS e Oceano Atlântico Tropical, realizadas durante cruzeiros de pesquisa do INPE, entre os anos de 2004 e 2018. Cruzeiros com torres micrometeorológicas de fluxos estão denotados em vermelho. Círculos brancos indicam estações de lançamento simultâneo de radiossondas atmosféricas e XBTs ou CTDs. Fonte: Programa INTERCONF/INCT da Criosfera.

A metodologia de trabalho na maior parte desses cruzeiros inclui uma análise prévia dos campos de TSM e das condições atmosféricas das diversas regiões de estudo, de modo a localizar padrões e/ou feições dinamicamente importantes para serem investigadas durante as campanhas de campo. Imagens de satélite de TSM e dos canais visível e infravermelho do satélite GOES, assim como campos de reanálise atmosférica dos *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), e do *European Centre for Medium Range Weather Forecasts* (ECMWF) também são utilizados (Pezzi et al., 2005; Camargo et al., 2013; Hackerott et al., 2018).

Pezzi et al. (2005) descreveram a metodologia básica que é geralmente utilizada para amostrar simultaneamente, a partir de navios, as diversas variáveis oceanográficas e meteorológicas ao longo das trajetórias dos navios. Em geral, devido ao fato de que as condições meteorológicas mudam muito mais rapidamente que as condições oceanográficas, especialmente nas médias e altas latitudes, nossos trabalhos não podem depender de estações oceanográficas tradicionais que usem, por exemplo, o CTD (*Conductivity, Temperature, Depth*), que demora horas para ser lançado e recolhido do mar. Lembrando que apenas os campos de temperatura da água do mar, especialmente aqueles restritos à camada de mistura oceânica (até a profundidade da termoclina) são importantes para o estudo dos fluxos de calor entre o oceano e a atmosfera, normalmente os experimentos são realizados utilizando-se sondas XBT (*eXpandable Bathy-Thermographs*) e radiossondas. Esses instrumentos são descartáveis e não demandam paradas dos navios em estações tradicionais para a coleta de dados. Outros dados meteorológicos e oceanográficos são também coletados por instrumentos que medem variáveis ao longo da trajetória do navio, como a estação meteorológica automática e o termossalinógrafo de bordo. Tendo os dados dos perfis verticais de temperatura ou umidade do ar, juntamente com a componente zonal ou meridional do vento e a temperatura da água do mar, podem ser produzidos perfis verticais sinóticos acoplados oceano-atmosfera, como o visto na Figura 4.

Até a presente data, ao contrário de navios de pesquisa internacionais, nenhum navio brasileiro possui uma torre instrumentada na proa que permita a coleta de dados meteorológicos avante da estrutura dos navios durante os cruzeiros de pesquisa. Para contornar essa situação, desde 2012 o INPE, através de diversos projetos de pesquisa, tem instalado temporariamente uma torre fixa que serve para obter medidas micrometeorológicas, conforme a Figura 5. Diferentes configurações mecânicas dessas torres são montadas, dependendo das características dos navios e dos instrumentos disponíveis. Pezzi et al. (2016) e Hackerott et al. (2018) descrevem algumas das

configurações e instrumentos já utilizados. Todas as torres dispõem de pelo menos um anemômetro sônico que mede as componentes  $u$  (zonal),  $v$  (meridional) e  $w$  (vertical) do vento, um analisador de gás (que às vezes está integrado ao anemômetro sônico como um instrumento único), radiômetros ou pirgeômetros, um termo-higrômetro, um barômetro, um GPS (*global positioning system*) e uma unidade inercial ou *motion pack*. As medidas são geralmente tomadas na frequência de 20 Hz (20 medidas por segundo). O analisador de gás mede a concentração de vapor d'água e dióxido de carbono em sincronia de frequência com a medida de vento do anemômetro sônico. A temperatura do ar tomada pelo termo-higrômetro é assumida como a temperatura potencial virtual do ar na superfície do mar.

Para realizar a estimativa ou o cálculo dos fluxos de calor (ver seção 5.2 deste texto), *momentum* e gases entre o oceano e a atmosfera, uma série de correções pretéritas deverá ser aplicada aos dados originais coletados pelos sensores. Dados espúrios e falhas nas séries de tempo deverão ser removidos. O efeito do movimento 3D do navio sobre a componente vertical do vento também deverá ser corrigido. Para tal, utiliza-se a metodologia proposta por Miller et al. (2008) e adaptada por Hackerott et al. (2018). O método utiliza medidas de velocidade angular ( $\text{rad.s}^{-1}$ ) e acelerações ( $\text{m.s}^{-2}$ ) medidas pelo motion pack em paralelo a medidas do rumo e velocidade do navio registradas pelo GPS instalado na torre micrometeorológica. Para calcular os fluxos de *momentum*, são utilizados dados de reanálises atmosféricas do NCEP para a estimativa da velocidade de fricção (Hackerott et al., 2018). Todos os dados são sincronizados em tempo e espaço às respectivas coordenadas das trajetórias dos navios.

## 5.2 CÁLCULO DOS FLUXOS DE CALOR ENTRE A ATMOSFERA E O OCEANO

O método mais fácil e comumente empregado para o cálculo dos fluxos de calor entre o oceano e a atmosfera através de dados coletados in situ é a chamada parametrização bulk ou fórmulas bulk (*bulk formulae*). A mais recente versão da parametrização bulk é o algoritmo COARE 3.5, apresentado por Edson et al. (2013) como um avanço à versão anterior formulada por Fairall et al. (1996). Um dos principais avanços da nova formulação é a melhoria da estimativa da velocidade de arrasto na superfície do mar. Embora o algoritmo COARE tenha sido desenvolvido para o oceano tropical a partir de experimentos no Pacífico, ele tem sido muito utilizado no mundo todo. Através do algo-

ritmo COARE 3.5, a estimativa de calor sensível ( $H$ ) e calor latente ( $HI$ ) é dada por:

$$H = \rho C_p C_h U (\theta_{ar} - TSM) \quad (\text{Eq. 1})$$

$$HI = \rho L_e C_e U (q_s - q_{ar}) \quad (\text{Eq. 2})$$

onde:  $\rho$  é a densidade do ar,  $C_p$  é o calor específico,  $C_h$  é o coeficiente de transferência de calor,  $C_e$  é o coeficiente de transferência de umidade,  $\theta_{ar}$  é a temperatura potencial do ar,  $U$  é o vetor velocidade média do vento na superfície do mar,  $TSM$  é a temperatura da superfície do mar,  $q_s$  é a umidade específica ao nível do mar e  $q_{ar}$  é a umidade específica obtida através da medida de umidade relativa (UR) realizada por um termo-higrômetro. Para realizar a estimativa de  $q_s$ , necessita-se das medidas de temperatura do ar ( $T_{ar}$ ),  $U$ , UR e pressão ( $P$ ), também parâmetros medidos por sensores específicos.

O método da Covariância de Vórtices é um método reconhecidamente mais preciso e direto de cálculo dos fluxos de calor na interface oceano-atmosfera. Esses fluxos são medidos em alta frequência e fornecidos por (Stull, 1988; Aubinet et al., 2012):

$$H_{EC} = \rho_d C_p w' r' \quad (\text{Eq. 3})$$

$$HI_{EC} = \rho_d L_v - w' r' \quad (\text{Eq. 4})$$

onde  $H_{EC}$  é o fluxo turbulento de calor sensível entre o oceano e a atmosfera,  $HI_{EC}$  é o fluxo turbulento de calor latente entre o oceano e a atmosfera,  $\rho_d$  é a densidade do ar seco,  $L_v$  é o calor latente de evaporação,  $w'$  e  $r'$  são as flutuações da componente vertical da velocidade do vento e a razão de mistura da água, respectivamente, com respeito a suas médias.

### 5.3 MODELAGEM ACOPLADA

Para a compreensão ideal dos fenômenos acoplados oceano-atmosfera, além da realização de medidas observacionais conforme previamente expostas neste texto, a utilização de ferramentas numéricas é muito importante. Sabemos que as flutuações extremas, ou a variabilidade climática extrema, impactam severamente os recursos naturais, a vida humana e a economia de várias regiões do planeta e também do Brasil. Isto é verdadeiro

tanto nos trópicos, onde a gama de fenômenos climáticos extremos não é tão grande, como nas regiões extratropicais, onde os sistemas atmosféricos produzem grandes variações na precipitação, pressão, ventos e temperatura. No entanto, nos trópicos, uma pequena mudança no regime de precipitação pode ser devastadora.

Atenção especial deve ser dada à região costeira do Brasil, onde vive a maior parte de nossa população e onde ocorrem os impactos mais diretos dos eventos climáticos extremos. Fenômenos como ressacas, alagamentos e erosão costeira podem ser gerados ou amplificados por eventos extremos, o que representa uma ameaça à vida e ao patrimônio, podendo causar grandes prejuízos às regiões e populações impactadas. Devido a esses impactos sobre o tempo e o clima no Brasil, em específico na região Sul do país, a possibilidade de se incluir o estado oceânico com certa antecedência nas previsões numéricas nacionais é muito importante. Há uma forte motivação e necessidade de estudar e compreender os assuntos relacionados com a atmosfera, o oceano e suas interações, tanto na grande escala espacial (conexões globais) como nas escalas regionais.

A precisão das simulações numéricas depende da habilidade de modelos atmosféricos e oceânicos em capturar a física essencial dos fenômenos envolvidos. Modelos utilizados para estudos climáticos e dirigidos à previsão sazonal falham em representar todos os processos físicos que afetam as interações oceano-atmosfera. Por exemplo, os modelos acoplados e forçados tendem a apresentar um viés frio na região conhecida como “Língua Fria”, na região leste do Oceano Pacífico Tropical, onde há ressurgência das águas da Subcorrente Equatorial (Sloyan et al., 2003). Este é um problema comum encontrado no Modelo Oceânico de Circulação Global (OGCM), em que a Língua Fria é muito mais fria do que deveria ser e também se estende até posições mais oeste de sua localidade real média. Isso pode ser parcialmente causado pela má representação da atividade das Ondas de Instabilidade Tropical (OIT), conforme discutido em Pezzi (2003) e Pezzi e Richards (2003). Essas ondas são responsáveis pelo transporte de uma significativa quantidade de fluxo de calor para o equador no Oceano Pacífico (Hansen e Paul, 1984; Pezzi et al., 2004). A deficiência dos modelos em reproduzir as principais características da climatologia tropical pode ser atribuída a processos em escala espacial de sub-grade (Neelin, 1992). Estudos anteriores, tais como Maes et al. (1997) e Large et al. (2001), sugeriram que os processos de pequena escala como a mistura lateral desempenham um papel importante na simulação da TSM e da dinâmica equatorial em grande escala.

Uma promissora alternativa aos modelos globais é o uso de modelos

regionais acoplados que sejam capazes de representar, através de simulações numéricas, os principais fenômenos de tempo e clima, tanto oceânicos como atmosféricos. Nesses modelos são empregadas resoluções espaciais consideravelmente maiores do que nos modelos globais. Isso, hoje em dia, é possível graças ao aumento do poder computacional disponível. E esse fato não serviu apenas para aumentar a resolução espacial dos modelos numéricos visando resolver explicitamente uma grande gama de processos físicos, mas também para aumentar a complexidade da física simulada (Warner et al., 2010). Nesse sentido, por exemplo, novos módulos são cada vez mais agregados para representar diferentes ambientes ou sistemas e a sua interação.

Nos últimos anos, tem crescido muito a quantidade de desenvolvimentos de modelos regionais acoplados oceano-atmosfera, alguns incluindo a criosfera (gelo marinho e continental), as ondas e a dinâmica do transporte de sedimento, com vários objetivos de aplicação em várias partes do mundo (Seo et al., 2007a). Um exemplo é o sistema *Scripps Coupled Ocean-Atmosphere Regional* (SCOAR). Esse sistema combina dois modelos regionais bastante conhecidos. No oceano, é utilizado o *Regional Ocean Modeling System* (ROMS) (Shchepetkin e McWilliams, 2003, 2009; Haidvogel et al., 2008). Na atmosfera, é utilizado o *Regional Spectral Model* (RSM), que foi originalmente desenvolvido por Juang e Kanamitsu (1994) e depois foi melhorado em suas funcionalidades, eficiência computacional, física e dinâmica, como descrito em Juang et al. (1997). Esse modelo tem sido empregado em vários estudos de interação oceano-atmosfera em diversas regiões com intensos gradientes horizontais termais, tais como o Sistema de Correntes da Califórnia (Seo et al., 2007a) e o Oceano Atlântico Tropical, onde também se encontram as OIT (Seo et al., 2007b). Ainda, com esse modelo, foram estudados os processos acoplados da extensão da Corrente de Kuroshio (Prutasahan et al., 2013a) e os impactos da ressurgência, dos vórtices oceânicos e dos fluxos de calor entre o oceano e a atmosfera no Pacífico Sudoeste (Prutasahan et al., 2013b).

Outro exemplo é o sistema de modelagem *Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport* (COAWST), desenvolvido por um grupo de pesquisadores oriundos de várias instituições (Warner et al., 2010). Esse sistema, descrito com mais detalhes a seguir, permitiu avanços na representação da dinâmica costeira, devido ao acoplamento de um modelo de ondas com modelos de circulação oceânica e atmosférica (Lesser et al., 2004; Warner et al., 2008). Essas ferramentas permitem que situações dinâmicas típicas da grande escala sinótica, tanto atmosféricas quanto oceânicas, sejam regionalizadas e seus efeitos sejam representados com maiores detalhes na escala regional.

Um aspecto que deve ser ressaltado no COAWST é que ele permite um acoplamento dinâmico entre o oceano e a atmosfera, onde os fluxos são trocados ativamente nas duas direções: da atmosfera para o oceano e vice-versa. Esses modelos tridimensionais têm sido desenvolvidos e aplicados a cenários idealizados e realistas, a fim de prever, por exemplo, as interações entre um ciclone tropical e do oceano (Bender e Ginis, 2000; Bender et al., 2007; Chen et al., 2007; Pullen et al., 2017; Miller et al., 2017). Recentemente, Warner et al. (2010) utilizaram o COAWST para simular o comportamento do furacão Isabel, que atingiu a costa leste dos Estados Unidos em setembro de 2003. Os autores realizaram uma sequência de simulações, alterando as componentes e o modo de acoplamento entre os módulos atmosfera-oceano-ondas, demonstrando que a simulação do fenômeno é sensível a isso. Segundo Warner et al. (2010), a intensidade do furacão Isabel foi extremamente sensível à TSM, e essa intensidade foi reduzida quando o modelo atmosférico foi acoplado ao modelo oceânico. No módulo acoplado, o modelo produziu uma TSM mais realista.

Os recentes avanços tecnológicos das últimas décadas permitiram o desenvolvimento de modelos de previsão acoplados oceano-atmosfera, que hoje são usados para apoiar as comunidades operacionais e de pesquisa nas necessidades de previsão imediata (dias a semanas) e de médio prazo (10 a 21 dias). Um esquema de modelagem regional acoplado (ver seção 5.4 desse texto) será aqui apresentado. Vários outros esquemas são apresentados em Pullen et al. (2017) e Miller et al. (2017), por exemplo. Os autores descrevem as respectivas estruturas de acoplamento, as componentes do modelo e as diversas resoluções de grade em uso, bem como a física do acoplamento. Nessa física, examinam-se os fluxos de calor, a transferência de *momentum* e os fluxos de água doce entre a atmosfera e o oceano.

Aspectos fundamentais do estado atual da capacidade dos modelos climáticos globais e regionais em representar os processos dinâmicos climáticos nas escalas interanual, decadal e das mudanças climáticas, em que a influência dos oceanos é relevante e o potencial de previsibilidade é mais alto, são enfatizados no recente trabalho de Miller et al. (2017). As influências oceânicas no clima ocorrem em todo o oceano e se estendem à terra, afetando muitos tipos de variações climáticas, incluindo, por exemplo, as monções e o fenômeno El Niño – Oscilação Sul. Como será mostrado mais adiante neste texto, esses sistemas de modelagem podem ser executados em modos totalmente acoplados nas configurações atmosfera-oceano e atmosfera-oceano-ondas.

## 5.4 SISTEMA DE MODELAGEM ACOPLADA

O COAWST foi o sistema de modelagem acoplado escolhido para ser utilizado em diversos estudos de interação oceano-atmosfera da região sul do Brasil pelo INPE. Esse sistema é composto pelos módulos atmosférico, oceânico, de ondas e de transporte de sedimentos. Como componentes do COAWST, o modelo atmosférico é o *Weather Research and Forecasting* (WRF) (Skamarock et al., 2005), o modelo oceânico é o ROMS (Shchepetkin e McWilliams, 2005), o modelo de ondas é o *Simulating Waves Nearshore* (SWAN) (Booij et al., 1999) e o modelo de transporte de sedimentos é o *Community Sediment Transport Modeling System* (CSTMS) (Warner et al., 2008). Neste trabalho, somente os módulos oceânico e atmosférico serão descritos com um pouco mais de detalhes.

### 5.4.1 MODELO WRF

O modelo atmosférico WRF é uma sofisticada ferramenta que foi desenvolvida para fins diagnósticos e operacionais prognósticos (de previsão) da atmosfera em escala regional. Esse modelo pode ser empregado em uma grande variedade de fenômenos, com escalas espaciais de poucos metros até milhares de quilômetros. O WRF é um modelo que tem como variáveis preditivas as três componentes do vento, a pressão atmosférica e a temperatura e a umidade do ar. Entre as variáveis diagnósticas estão: temperatura do ponto de orvalho, precipitação, fluxos de calor sensível e latente, fluxos radiativos de onda curta e onda longa. Todas essas variáveis são calculadas em coordenada vertical sigma. Esse é um modelo com uma variedade muito grande de opções e parametrizações físicas para resolver processos com resolução espacial de sub-grade. O WRF pode ser rodado no modo não hidrostático, com atmosfera quase-incompressível para prever ou simular a atmosfera em micro e mesoescala de movimentos.

A versão do WRF utilizada no COAWST teve uma modificação em seu código no cálculo do cisalhamento superficial em regiões sobre o oceano. Essa modificação foi necessária de forma que o efeito das ondas de gravidade oceânicas fosse sentido no cálculo da rugosidade superficial ( $Z_0$ ). A rugosidade superficial passou a ser calculada de acordo com a equação abaixo:

$$Z_0 = 1200,0 H_{onda} (H_{onda} / L_{onda})^{4,5} + 0,11 \nu / \nu. \quad (\text{Eq. 5})$$

onde  $H_{onda}$  é a altura significativa da onda,  $L_{onda}$  é o comprimento médio de onda,  $v$  é o cisalhamento de superfície e  $\nu$  a viscosidade. Essa opção de cálculo da rugosidade é válida quando o modelo de ondas é ativado no acoplamento.

#### 5.4.2 O MODELO ROMS

O modelo oceânico ROMS, assim como o atmosférico, também é bastante sofisticado. O ROMS utiliza aproximações por diferenças finitas em coordenadas horizontais ortogonais curvilíneas com grade do tipo Arakawa C e coordenada vertical sigma, que acompanha o terreno. Este é um modelo numérico hidrodinâmico tridimensional, hidrostático, de superfície livre que resolve as equações de Navier-Stokes. Para tanto utiliza a média de Reynolds e assume a aproximação de águas rasas e de Boussineq, que considera o oceano como um fluido incompressível, restringindo o efeito da perturbação de densidade à componente vertical da equação do momentum. As equações dinâmicas que regem o modelo, na forma de coordenadas horizontais cartesianas e coordenada vertical sigma, são as seguintes (Haidvogel et al., 2008):

Componente zonal:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(H_z u)}{\partial t} + \frac{\partial(u H_z u)}{\partial x} + \frac{\partial(v H_z u)}{\partial y} + \frac{\partial(\Omega H_z u)}{\partial s} - f H_z v = \\ -\frac{H_z}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} - H_z g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial s} \left( u' w' - \frac{\nu}{H_z} \frac{\partial u}{\partial s} \right) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 6})$$

Componente meridional:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(H_z v)}{\partial t} + \frac{\partial(u H_z v)}{\partial x} + \frac{\partial(v H_z v)}{\partial y} + \frac{\partial(\Omega H_z v)}{\partial s} - f H_z u = \\ -\frac{H_z}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} - H_z g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial s} \left( v' w' - \frac{\nu}{H_z} \frac{\partial v}{\partial s} \right) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 7})$$

Componente vertical:

$$0 = \frac{-1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial s} - \frac{g}{\rho_0} H_z \rho \quad (\text{Eq. 8})$$

Com a equação da continuidade:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(H_z u)}{\partial x} + \frac{\partial(H_z v)}{\partial y} + \frac{\partial(H_z \Omega)}{\partial s} = 0 \quad (\text{Eq. 9})$$

E a equação da evolução temporal dos traçadores do modelo (Eq. 10):

$$\frac{\partial(H_z C)}{\partial t} + \frac{\partial(u H_z C)}{\partial x} + \frac{\partial(v H_z C)}{\partial y} + \frac{\partial(\Omega H_z C)}{\partial s} = \frac{-\partial}{\partial s} \left( c' w' - \frac{v}{H_z} \frac{\partial C}{\partial s} \right) + C_s \quad (\text{Eq. 10})$$

sendo que  $u, v$  e  $\Omega$  são os componentes da velocidade horizontal (zonal e meridional) e vertical (em coordenadas sigma), respectivamente;  $\zeta$  é a elevação da superfície livre do mar;  $h$  é a profundidade abaixo do nível médio do mar;  $H_z$  é o fator de refinamento da resolução vertical;  $f$  é o parâmetro de Coriolis;  $p$  é a pressão;  $\rho$  e  $\rho_0$  são as densidades total e de referência;  $g$  é a aceleração da gravidade;  $\nu$  e  $\nu_0$  são a viscosidade e a difusão moleculares, respectivamente;  $C$  é o traçador (temperatura e salinidade, por exemplo) e  $C_s$  são as fontes e os sumidouros dos traçadores.

A forma de resolução de equações do ROMS segue um esquema explícito, utilizando um passo de tempo menor para resolver a elevação da superfície do mar e o modo barotrópico e um passo de tempo maior para resolver temperatura, salinidade e o modo baroclínico. Assim, dentro de um número finito de passos de tempo barotrópicos, é efetuado cada passo de tempo baroclínico. Maiores detalhes sobre as formulações matemáticas utilizadas pelo ROMS podem ser encontrados em Shchepetkin e McWilliams (2005) e em Haidvogel et al. (2008).

O código desse modelo tem uma estrutura flexível, permitindo ao usuário uma grande variedade de opções na escolha das componentes do modelo, tais como: vários esquemas de advecção (por exemplo: segunda, terceira e quarta ordem), modelos de turbulência, parametrizações de condição lateral de contorno, modelos de camada limite inferior e superior, modelo de nutrientes, entre vários outros. Esse modelo, assim como o WRF, é um modelo de comunidade (*community model*), no qual várias instituições de pesquisa e universidades estão envolvidas no seu desenvolvimento e manutenção. O código do ROMS é escrito em Fortran 90 e pode ser utilizado em um único processador (computador pessoal), bem como pode ser utilizado em máquinas grandes com arquitetura paralela, com memória compartilhada e distribuída. O desempenho, em termos de velocidade de processamento, é um dos aspectos que está em constante evolução no ROMS.

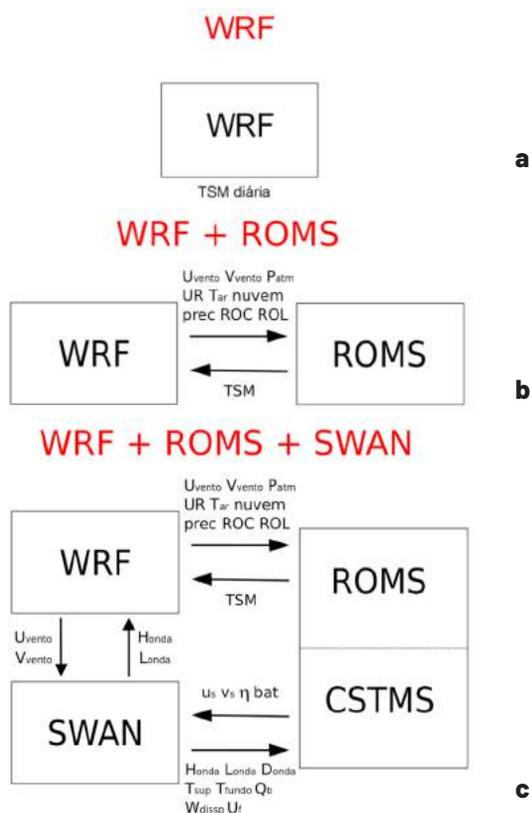
### 5.4.3 ACOPLAMENTO DOS MODELOS ATMOSFÉRICO E OCEÂNICO

No acoplamento dos modelos atmosférico WRF e oceânico ROMS dentro do COAWST, a troca dos fluxos entre oceano e atmosfera se dá através de um acoplador, que troca informações entre os modelos nas duas direções (atmosfera-oceano e oceano-atmosfera). O esquema usado no COAWST é o *Model Coupling Toolkit* (MCT). Mais informações sobre o MCT podem ser vistas em Larson et al. (2005) e Jacob et al. (2005). Cada modelo inicia sua execução com condições iniciais e de contornos próprias. Após determinados passos de tempo, selecionados pelo usuário, os modelos chegarão a um ponto de sincronização, a partir do qual o MCT irá enviar e receber os dados entre os modelos acoplados. Como cada modelo pode apresentar uma grade distinta, há uma fase de pré-processamento na qual são calculados pesos de interpolação para cada uma dessas grades, através do *Spherical Coordinate Remapping Interpolation Package* (SCRIP – Jones, 1998). Isso é necessário para que ocorram as trocas entre os campos das variáveis resultantes de cada modelo.

A Figura 8 indica quais são essas variáveis trocadas em cada configuração do sistema: (i) com o modelo atmosférico sendo rodado sem acoplamento e sendo forçado por TSM prescrita (Figura 8a); (ii) atmosfera acoplada apenas com o modelo oceânico (Figura 8b) e (iii) com um sistema totalmente acoplado, isto é, com o modelo atmosférico, o modelo oceânico, de ondas e de transporte de sedimento trocando em duas vias informações entre si (Figura 8c). Em um sistema totalmente acoplado, as trocas entre as variáveis de cada modelo acontecem da seguinte maneira:

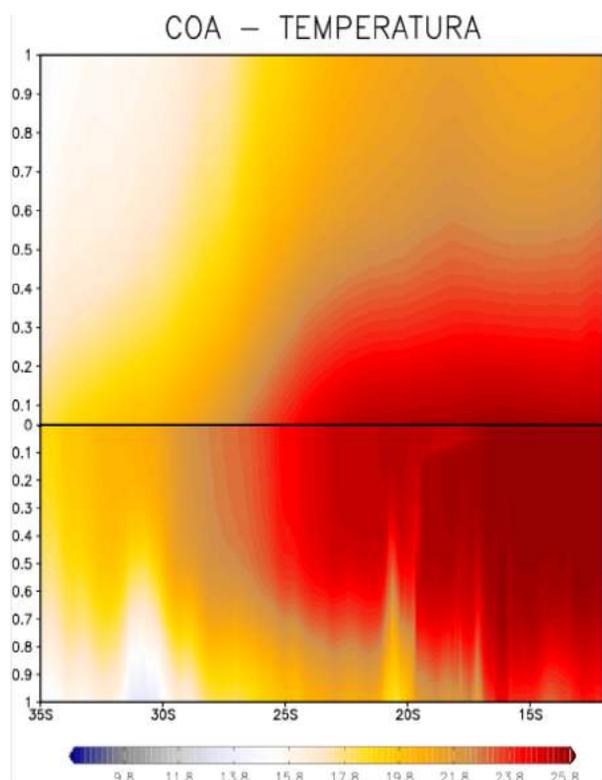
- O modelo atmosférico fornece ao modelo oceânico e ao de ondas as componentes zonal e meridional do vento a 10m ( $U_{\text{vento}}$  e  $V_{\text{vento}}$ );
- O modelo oceânico ainda recebe do modelo atmosférico a pressão atmosférica ( $P_{\text{atm}}$ ), a umidade relativa (UR), a temperatura do ar na superfície do mar ( $T_{\text{ar}}$ ), a cobertura de nuvens (*nuvem*), a precipitação (*prec*) e os fluxos de radiação de onda curta (ROC) e de onda longa (ROL). Esses parâmetros são utilizados pelo modelo oceânico para calcular os fluxos de calor entre a atmosfera e o oceano através do algoritmo COARE (Fairall et al., 1996);
- Por sua vez, o modelo oceânico fornece a TSM para o modelo atmosférico e ainda as correntes superficiais ( $u_s$  e  $v_s$ ), a elevação da superfície livre do mar ( $\eta$ ) e a batimetria para o modelo de ondas. O cálculo das correntes superficiais é feito através da integração da velocidade próxima à superfície ao longo de uma profundidade, determinada pelo número de onda e seguindo a formulação descrita por Kirb e Chen (1989);

- Por fim, o modelo de onda fornece aos modelos oceânico e atmosférico a altura significativa de onda ( $H_{\text{onda}}$ ) e o comprimento das ondas ( $L_{\text{onda}}$ ). Esses parâmetros são utilizados pelo modelo atmosférico para calcular uma rugosidade superficial do oceano mais acurada. O modelo oceânico recebe ainda do modelo de ondas a direção ( $D_{\text{onda}}$ ) e os períodos das ondas na superfície e no fundo ( $T_{\text{sup}}$  e  $T_{\text{fundo}}$ ), a porcentagem de quebra ( $Q_b$ ), a energia de dissipação ( $W_{\text{dissip}}$ ) e a velocidade orbital de fundo ( $U_b$ ), utilizando esses parâmetros para o cálculo da rugosidade superficial do oceano, através do algoritmo COARE;
- O modelo de transporte de sedimentos utiliza esses parâmetros de onda para o cálculo do transporte de sedimento de fundo e da mobilização do stress de fundo. O modelo de sedimento pode ainda fornecer a variabilidade espacial da rugosidade de fundo de acordo com os tipos de sedimentos que são transportados. Essa rugosidade variável é inserida no modelo oceânico e no de ondas.



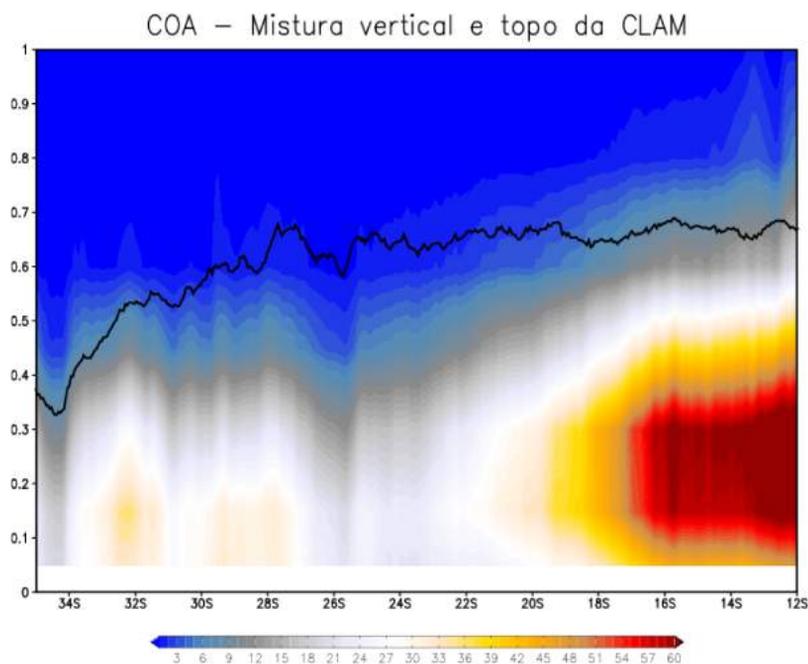
**FIGURA 8:** Principais possibilidades de uso do sistema COAWST em modo acoplado ou não, indicando em cada caso quais variáveis são trocadas entre os modelos. (a) WRF sendo utilizado sem acoplamento; (b) WRF e ROMS ativamente acoplados (c) WRF, ROMS, SWAN e CSTMS ativamente acoplados. Fonte: Adaptada de Warner et al. (2010).

Os modelos acoplados oceano-atmosfera podem ser empregados em uma grande variedade de estudos, como ressaltado nos trabalhos de Pullen et al. (2017) e Miller et al. (2017), cobrindo desde escalas regionais (mesoescala) a escalas globais. Podem ser voltados ao estudo diagnóstico e/ou prognósticos de fenômenos com duração de poucas horas, dias, meses, sazonais, anos e até décadas como no caso dos estudos de mudanças do clima. Pezzi et al. (2018) fizeram um estudo mostrando o impacto de vários casos da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) quando esta se estende ativamente sobre o oceano, denominando-a de ZCAS oceânica. Nestes casos foram empregados os modelos WRF, ROMS e SWAN ativamente acoplados. Os autores mostraram que não somente o mecanismo termodinâmico, ou seja, o bloqueio de radiação de ondas curtas causado pela nebulosidade associada a ZCAS, é o responsável pelo resfriamento da água superficial oceânica sob a ZCAS, mas também o mecanismo dinâmico, atribuído à ressurgência e ao bombeamento de Ekman causados pela circulação superficial atmosférica associada à presença de um vórtice ciclônico atmosférico e da ZCAS oceânica (Pezzi et al., 2018). O surgimento dessa circulação ciclônica é característico deste tipo de fenômeno, ZCAS oceânica, que até então foi pouco referenciado na literatura.



**FIGURA 9:** Um exemplo da temperatura das camadas limites da atmosfera e do oceano, coincidentes em região geográfica e no tempo. Seção vertical de temperatura da atmosfera estendendo-se da superfície até 1000 m de altura (parte superior da figura) e seção vertical de temperatura do oceano estendendo-se da superfície até 1000 m de profundidade (parte inferior da figura) em relação à latitude (35°S a 11°S). Localizado em 40°O e da latitude 34°S até 12°S. Média temporal para os dias 13/01/2003 a 19/01/2003, quando uma Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) oceânica estava presente nesta região. A temperatura está em °C.

Os trabalhos acima mencionados mostram algumas aplicações mais tradicionais dos modelos acoplados. Porém, os modelos acoplados permitem também que se façam análises conjuntas entre os distintos ambientes que eles simulam, como é o caso apresentado na Figura 9 e complementado pela Figura 10. Estas análises trazem um dos casos de ZCAS oceânica reportados em Pezzi et al. (2018) e mostram de forma muito clara a interação e a troca de calor entre as duas camadas limites, a oceânica e a atmosférica. A parte superior da Figura 9 mostra a temperatura da CLAM que se estende desde a superfície até aproximadamente 600m. Na parte inferior da Figura 9 está representada a camada limite oceânica. Fica claro na figura que os ambientes oceano e atmosfera tendem a se equalizar em termos de temperatura na região onde a ZCAS está ativa, que neste caso seria entre as latitudes de 23°S e 12°S, aproximadamente. Essa é a região onde a maior atividade turbulenta e também convectiva está presente e ativa (Pezzi et al., 2018), visto através dos elevados valores do coeficiente de mistura vertical do calor, chegando a  $60\text{m}^2.\text{s}^{-1}$  como mostrado na Figura 10. É interessante notar que essa troca turbulenta acaba também por modular o desenvolvimento vertical da CLAM.



**FIGURA 10:** Um exemplo do coeficiente de mistura vertical para o calor (exch\_h do WRF) em cores com a altura do topo da camada limite atmosférica marinha (CLAM) sobreposta. Seção vertical estendendo-se da superfície até 1000 metros de altura e da latitude 34°S até 12°S, localizado em 40°O. Média temporal para os dias 13/01/2003 a 19/01/2003, quando uma Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) oceânica estava presente nesta região. As unidades são  $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os principais esforços do INPE para o estudo dos processos regionais acoplados entre o oceano e a atmosfera que têm sido realizados desde o ano de 2004 a bordo de vários navios de pesquisa brasileiros, especialmente oferecidos pela Marinha do Brasil através da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). O texto também aborda as metodologias empregadas para a caracterização sinótica do acoplamento oceano-atmosfera e os métodos de estimativa e cálculo dos fluxos de calor entre o oceano e a atmosfera.

Os métodos de cálculo dos fluxos de *momentum* foram brevemente tratados, especialmente com vistas ao trabalho pioneiro e recente de Hackerott et al. (2018) na região da Confluência Brasil-Malvinas. Os métodos de cálculo dos fluxos de vapor d'água e de dióxido de carbono entre o oceano e a atmosfera, infelizmente, não puderam ser tratados aqui e serão revistos em publicações posteriores. O artigo também oferece uma ampla descrição acerca da modelagem regional acoplada. Esta é uma ferramenta recente e muito importante para o Brasil. Poderá, no futuro, ajudar muito a sociedade, em especial a população que vive nas zonas costeiras, região cada vez mais sujeita a impactos relacionados a fenômenos de interação oceano-atmosfera, tais como tempestades severas, ciclones extratropicais, ressacas, erosão costeira e outros.

O INPE, em seus laboratórios LOA e LAMOS, tem investido em pesquisas numéricas com o modelo regional acoplado COAWST, especialmente no seu módulo de acoplamento oceano (ROMS) e atmosfera (WRF). Trabalhos futuros, com certeza, farão uso desse modelo em diversas regiões costeiras do Brasil, incluindo o módulo de modelagem de ondas. Trabalhos recentes, como os de Mendonça et al. (2017), Cabrera (2018) e Lima (2018), infelizmente, não puderam ser abordados com maior detalhe aqui. Esses trabalhos pioneiros apresentam algumas aplicações do COAWST e também do ROMS para o entendimento de distintos processos dinâmicos e termodinâmicos da interação oceano-atmosfera em diferentes regiões do Oceano Atlântico Sul, bem como a assimilação de dados oceânicos, que também é uma fronteira do conhecimento científico nesta região. Eles abrem um novo leque de oportunidades para o estudo e compreensão de processos regionais de interação oceano-atmosfera, que podem se desdobrar em fenômenos catastróficos para a zona costeira do Brasil.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos o financiamento do CNPq, CAPES, FAPERGS e FINEP através do fomento aos projetos “Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia da Criosfera” (CNPq/704222/2009 + FAPERGS 17/2551-0000518-0), “Antarctic Modeling and Observation System - ATMOS (CNPq/PROANTAR 443013/2018-7), “Estudos Avançados em Oceanografia de Médias e Altas Latitudes” (CAPES 23038.004304/2014-28), “Uso e Desenvolvimento do Modelo BESM para o Estudo do Oceano-Atmosfera-Criosfera em Altas e Médias Latitudes - BESM/SOAC” (CAPES 88887-145668/2017-00), “Atlantic Carbon and Fluxes Experiment - ACEX” (CNPq/558108/2009-1). Os projetos “Sistema Integrado para o Monitoramento do Tempo, Clima e Oceano na Região Sul do Brasil - SIMTECO” e “Laboratório de Instrumentação Meteorológica Marinha e Polar - LIM2P” foram financiados pela FINEP. L. P. Pezzi é bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq (CNPq/304858/2019-6). Agradecemos aos comandantes, às tripulações e à Marinha do Brasil, assim como à Universidade de São Paulo (USP), pelo uso dos navios Ary Rongel, Almirante Maximiano, Cruzeiro do Sul, Vital de Oliveira e Alpha Crucis para a coleta de dados observacionais do oceano e da atmosfera descritos neste trabalho. Agradecemos o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), assim como a Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (SECIRM). Os autores também agradecem e dedicam este trabalho aos bolsistas e alunos do Laboratório de Meteorologia e Oceanografia por Satélites (LAMOS) e do Laboratório de Estudos dos Oceanos e Atmosfera (LOA) do INPE. Agradecemos também os programas de Pós-Graduação em Meteorologia e Sensoriamento Remoto do INPE, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

## REFERÊNCIAS

- Acevedo, O. C.; Pezzi, L. P.; Souza, R. B.; Anabor, V.; DeGrazia, G. A. (2010). Atmospheric boundary layer adjustment to the synoptic cycle at the Brazil-Malvinas Confluence, South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 115, n. D22, doi:10.1029/2009JD013785.
- Aubinet, M.; Vesala, T.; Papale, D. (Eds.). (2012). Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis. Springer Science and Business Media. Springer, Dordrecht Heidelberg, London, New York, 442p.
- Beal, L. M.; De Ruijter, W. P. M.; Biastoch, A.; Zahn, R. (2011). On the role of the Agulhas system in ocean circulation and climate, *Nature*, v. 472, n. 7344, p. 429-436.
- Bender, M.A.; Ginis, I. (2000). Real-case simulations of hurricane-ocean interaction

using a high-resolution coupled model: effects on hurricane intensity. *Monthly Weather Review*, v. 128, p. 917-946.

Booij, N.; Ris, R. C.; Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions, Part I: Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, v. 104, n. C4, p. 7649-7666.

Cabrera, M. J. (2018). *Estudo dos mecanismos físicos responsáveis pela estabilidade da camada limite atmosférica marinha na região do Atlântico Sudoeste*. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/05.18.17.56-TDI), 96p. disponível em <http://urlib.net/8JMKD3MGP-3W34R/3R5MRN5>

Camargo, R.; Todesco, E.; Pezzi, L. P.; Souza, R. B. (2013). Modulation mechanisms of marine atmospheric boundary layer at the Brazil-Malvinas Confluence region. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 118, n. 12, p. 6266-6280. doi:10.1002/jgrd.50492.

Chelton, D. B.; Schlax, M. G.; Witter, D. L.; Richman, J. G. (1990). GEOSAT altimeter observations of the surface circulation of the Southern Ocean. *Journal of Geophysical Research*, v. 95, p. 17877-17903.

Chen, S. S.; Price, J. F.; Zhao, W.; Donelan, M. A.; Walsh, E. J. (2007). The CBLAST Hurricane program and the next-generation fully coupled atmosphere-wave-ocean models for hurricane research and prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 88, p. 311-317.

Csanady, G. T. (2004). *Air-sea interaction: laws and mechanisms*. Cambridge University Press, Cambridge, 239 pp.

Czaja, A.; J. Marshall (2001). Observations of atmosphere-ocean coupling in the North Atlantic. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 127, p. 1893-1916.

Deser, C.; Magnusdittir, G.; Saravanan, R.; Phillips, A. (2004). The effects of North Atlantic SST and sea ice anomalies on the winter circulation in CCM3. Part II: Direct and indirect components of the response. *Journal of Climate*, v. 17, p. 877-889.

Edson, J. B.; Jampana, V.; Weller, R. A.; Bigorre, S. P.; Plueddemann, A. J.; Fairall, C. W.; Miller, S. D.; Mahrt, L.; Vickers, D.; Hersbach, H. (2013). On the exchange of momentum over the open ocean. *Journal of Physical Oceanography*, v. 44, n. 9, 1589. doi:10.1175/JPO-D-12-0173.1.

Fairall, C. W.; Bradley, E. F.; Rogers, D. P.; Edson, J. B.; Young, G. S. (1996). Bulk parameterization of air-sea fluxes for tropical ocean-global atmosphere coupled ocean-atmosphere response experiment. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 101, n. C2, p. 3747-3764, doi:10.1029/95JC03205.

Garzoli, S. L.; Gordon, A. L. (1996). Origins and variability of the Benguela Current. *Journal of Geophysical Research*, v. 101, n. C1, p. 897-906.

Garzoli, S.; Simionato, C. (1990). Baroclinic instabilities and forced oscillations in the

Brazil/Malvinas Confluence front. *Deep-Sea Research*, v. 37, n. 6, p. 1053-1074.

Gonçalves-Araujo, R.; Souza, M. S.; Tavano, V. M.; Mendes, C. R.; Souza, R. B.; Schultz, C.; Pollery, R. C. (2018). Phyto- and protozooplankton assemblages and hydrographic variability during an early winter survey in the Southern Brazilian Continental Shelf. *Journal of Marine Systems*, v. 184, p. 36-49, <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2018.04.005>.

Haidvogel, D. B.; Arango, H. G.; Budgell, W. P.; Cornuelle, B. D.; Curchi-T-Ser, E.; Di Lorenzo, E.; Fennel, K.; Geyer, W. R.; Hermann, A. J.; Lanerolle, L.; Levin, J.; McWilliams, J. C.; Miller, A. J.; Moore, A. M.; Powell, T. M.; Shchepetkin, A. F.; Sherwood, C. R.; Signel, R. P.; Warner, J. C.; Wolkin, J. (2008). Regional ocean forecasting in terrain-following coordinates: model formulation and skill assessment. *Journal of Computational Physics*, v. 227, p. 3595-3624.

Hansen, D. V.; Paul, C. A. (1984). Genesis and effects of long waves in the equatorial Pacific. *Journal of Geophysical Research*, v. 89, p. 10431-10440.

Hayes, S. P.; McPhaden, M. J.; Wallace, J. M. (1989). The influence of sea-surface temperature on surface wind in the eastern equatorial Pacific: Weekly to monthly variability. *Journal of Climate*, v. 2, n. 12, p. 1500-1506.

Hoskins, B. J.; Hodges, K. I. A. (2005). New perspective on Southern Hemisphere storm tracks. *Journal of Climate*, v. 18, p. 4108-4129.

Hurrell, J. W.; Visbeck, M.; Busalacchi, A.; Clarke, R. A.; Delworth, T. L.; Dickson, R. R.; Johns, W. E.; Koltermann, K. P.; Kushnir, Y.; Marshall, D.; Mauritzen, C.; McCartney, M. S.; Piola, A.; Reason, C.; Reverdin, G.; Schott, F.; Sutton, R.; Wainer, I.; Wright, D. (2006). Atlantic climate variability and predictability: A CLIVAR perspective. *Journal of Climate*, v. 19, p. 5100-5121.

Inui, T.; Lazar, A.; Malanotte-Rizzoli, P.; Busalacchi, A. J. (2002). Wind stress effects on the Atlantic subtropical-tropical circulation. *Journal of Physical Oceanography*, v. 32, p. 2257-2276.

Jacob, R.; Larson, J.; Ong, E. (2005). MN Communication and parallel interpolation in Community Climate System Model Version 3 using the model coupling toolkit. *International Journal of High Performance Computing Applications*, v. 19, p. 293-307.

Jones, P. W. (1998). A users guide for SCRIP: a spherical coordinate remapping and interpolation package. [Available online at <http://climate.lanl.gov/Software/SCRIP/>].

Josey, S.; Gulev, S.; Yu, L. (2008). Exchanges through the ocean surface. In: Steele, J. H., *Encyclopedia of Ocean Sciences*, 2nd. ed., p. 115-140.

Juang, H.-M. H.; Kanamitsu, M. (1994). The NMC nested regional spectral model. *Monthly Weather Review*, v. 122, p. 3-26.

Juang, H.-M. H.; Hong, S.-Y.; Kanamitsu, M. (1997). The NCEP regional spectral model: An update. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, v. 78, p. 2125-2143.

Large, W. G.; Danabasoglu, G.; McWilliams, J. C.; Gent, P. R.; Bryan, F. O. (2001). Equa-

torial circulation of a global ocean climate model with anisotropic horizontal viscosity. *Journal of Physical Oceanography*, v. 31, p. 518-536.

Larson, J.; Jacob, R. Ong, E. (2005). The model coupling toolkit: A new Fortran90 toolkit for building multiphysics parallel coupled models. *International Journal of High Performance Computing Applications*, v. 9, p. 277-292.

Legeckis, R.; Gordon, A. (1982). Satellite observations of the Brazil and Falkland currents – 1975 to 1976 and 1978. *Deep Sea Research*, v. 29, p. 375-401.

Lentini, C. A. D.; Souza, R. B. (2009). Eddies e vórtices de mesoescala no Oceano Atlântico Sudoeste medidos através de satélites. In: Souza, R. B. (Org.). *Oceanografia por satélites*. 2. ed. atual. ampl. São Paulo: Oficina de Textos, p. 185-198.

Lesser, G. R.; Roelvink, J. A.; van Kester, J. A. T. M.; Stelling, G. S. (2004). Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, v. 51, n. 8-9, p. 883-915.

Lima, L. N. (2018). *Estudo das incertezas na simulação por conjuntos e no uso da assimilação de dados no Oceano Atlântico Sudoeste*. 144p. IBI: <8JMKD3MGP3W34R/3QM-BU45>. (sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/03.09.19.53-TDI). Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3QM-BU45>>.

Lindzen, R. S.; Nigam, S. (1987). On the role of sea surface temperature gradients in forcing low-level winds and convergence in the tropics. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 44, n. 17, p. 2418-2436, doi:10.1175/1520-0469.

Lutjeharms, J. R. E. (2006). The Agulhas current retroflexion. In: *The Agulhas Current*. Berlin: Springer-Verlag, p. 151-206.

Maes, C.; Madec, G.; Delecluse, P. (1997). Sensitivity of an Equatorial Pacific OGCM to the lateral diffusion. *Monthly Weather Review*, v. 125, p. 958-971.

Marshall, J.; Kushnir, Y.; Battisti, D.; Chang, P.; Czaja, A.; Dickson, R.; McCartney, M.; Saravanan, R.; Visbeck, M. (2001a). North Atlantic Climate Variability: phenomena, impacts and mechanisms. *International Journal of Climatology*, v. 21, n. 15, p. 1863-1898.

Marshall, J.; Johnson, H.; Goodman, J. (2001b). Interaction of the North Atlantic Oscillation with ocean circulation. *Journal of Climate*, v. 14, n. 7, p. 1399-142.

Mendonça, L. F.; Souza, R. B.; Aseff, C. R. C.; Pezzi, L. P.; Möller, O. O.; Alves, R. C. M. (2017). Regional modeling of the water masses and circulation annual variability at the Southern Brazilian Continental Shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 122, n. 2, p. 1232-1253, doi:10.1002/2016JC011780.

Meredith, M.; Sundfjord, A.; Henson, S.; Meijers, A.; Murphy, E.; Bellerby, R.; Daase, M.; Cottier, F.; Belchier, M.; Chierici, M.; Ellingsen, I.; Falk-Petersen, S.; Hill, S.; Holland, P.; Tarling, G.; Trathan, P.; Turner, J.; Wilkinson, J.; Batchellier, L.; Capper, L.; Oliver, J. (2018). *The state of Polar Oceans 2018: Making sense of our changing world*. British Antarctic Survey, Norwegian Polar Institute (<http://www.gov.uk/government/publications>)

cations/uk-norway-memorandum-of-understanding-on-polar-research-and-cultural-heritage).

Miller, S. D.; Hristov, T. S.; Edson, J. B.; Friehe, C. A. (2008). Platform motion effects on measurements of turbulence and air-sea exchange over the open ocean. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 25, n. 9, p. 1683-1694, doi:10.1175/2008JTECH0547.1.

Miller, A. J.; Collins, M.; Gualdi, S.; Jensen, T.; Misra, V.; Pezzi, L. P.; Pierce, D. W.; Putrasahan, D.; Seo, H.; Tseng, Y. (2017). Coupled ocean-atmosphere modeling and predictions. The Sea: The Science of Ocean Prediction. *Journal of Marine Research*, v. 75, p. 361-402.

Neelin, J. D. (1992). Tropical air-sea interaction in general circulation models. *Climate Dynamics*, n. 7, p. 73-104.

Parise, C. K. *Sensitivity and memory of the current mean climate to increased Antarctic sea ice: The role of sea ice dynamics*. (2014). Tese de doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos - SP.

Parise, C. K.; Pezzi, L. P.; Hodges, K. I.; Justino, F. (2015). The influence of sea ice dynamics on the climate sensitivity and memory to increased Antarctic sea ice. *Journal of Climate*, v. 28, p. 9642-9668, doi: 10.1175/JCLID-14-00748.1.

Pezza, A. B.; Simmonds, I. (2005). The first South Atlantic hurricane: Unprecedented blocking, low shear and climate change. *Geophysical Research Letters*, v. 32, L15712, doi:10.1029/2005GL023390.

Pezzi, L. P.; Quadro, M. F. L.; Lorenzetti, J.; Miller, A. J.; Rosa, E. B.; Lima, L. N.; Sutil, U. A.; Camargo, R.; Souza, R. B. (2018). Do oceanic SACZ episodes modulate SST via upper-ocean dynamics and thermodynamics? Submetido a *Journal of Climate*.

Pezzi, L. P. (2003). *Equatorial Pacific dynamics: lateral mixing and Tropical Instability Waves*. Ph.D. Thesis. University of Southampton, UK. 126p.

Pezzi, L. P.; Richards, K. J. (2003). Effects of lateral mixing on the mean state and eddy activity of an equatorial ocean. *Journal of Geophysical Research*, v. 108, n. C12, p. 3371, doi:10.1029/2003JC001834.

Pezzi, L. P.; Vialard, J.; Richards, K. J.; Menkes, C. Anderson, D. (2004). Influence of ocean atmosphere coupling on the properties of tropical instability waves. *Geophysical Research Letters*, v. 31, L16306, doi:10.1029/2004GL019995.

Pezzi, L. P.; Souza, R. B.; Dourado, M. S.; Garcia, C. A. E.; Mata, M. M.; Silva Dias, M. A. F. (2005). Ocean-atmosphere in situ observations at the Brazil-Malvinas Confluence region. *Geophysical Research Letters*, v. 32, doi:10.1029/2005GL023866.

Pezzi, L. P.; Souza, R. B.; Acevedo, O.; Wainer, I. E. K.; Mata, M. M.; Garcia, C. A. E.; Camargo, R. (2009). Multi-year measurements of the oceanic and atmospheric boundary layers at the Brazil-Malvinas Confluence Region. *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1029/2008JD011379.

Pezzi, L. P.; Souza, R. B.; Farias, P. C.; Acevedo, O.; Miller, A. J. (2016). Air-sea interaction at the Southern Brazilian Continental Shelf: *In situ* observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 121, p. 6671-6695, doi:10.1002/2016JC011774.

Podestá, G. P. (1997). Utilización de datos satelitarios en investigaciones oceanográficas y pesqueras en el Océano Atlántico Sudoccidental. In: E.E. Boschi (Ed.), *El mar argentino y sus recursos pesqueros*. Mar del Plata, Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP), v. 1, p. 195-222.

Provost, C.; Le Traon, P.-Y. (1993). Spatial and temporal scales in altimetric variability in the Brazil-Malvinas Current Confluence region: Dominance of the semiannual period and large spatial scales. *Journal of Geophysical Research*, v. 98, n. C10, p. 18037-18051.

Pullen, J.; Allard, R.; Seo, H.; Miller, A.; Chen, S.; Pezzi, L. P.; Smith, T.; Chu, P.; Alves, J.; Caldeira, R. (2017). Coupled ocean-atmosphere forecasting at short and medium time scales. *The Sea: The Science of Ocean Prediction. Journal of Marine Research*, v. 75, p. 877-921.

Olson, D. B.; Podestá, G. P.; Evans, R. H.; Brown, O. B. (1988). Temporal variations in the separation of Brazil and Malvinas currents. *Deep-Sea Research*, v. 35, p. 1971-1990.

Reid, J. L.; Nowlin, Jr., W. D.; Patzert, W. C. (1977). On the characteristics and circulation of the southwestern Atlantic Ocean. *Journal of Physical Oceanography*, v. 7, p. 62-91.

Seo, H.; Miller, A. R. J. (2007a). The Scripps Coupled Ocean-Atmosphere Regional (SCOAR) model, with applications in the eastern Pacific sector. *Journal of Climate*, v. 20, p. 381-402.

Seo, H.; Jochum, M.; Murtugudde, R.; Miller, A. J.; Roads, J. O. (2007b). Feedback of tropical instability wave-induced atmospheric variability onto the ocean. *Journal of Climate*, v. 20, p. 5842-5855.

Skamarock W. C.; Klemp, J. B.; Dudhia, J.; Gill, D. O.; Barker, D. M.; Wang, W.; Powers, J. G. (2005). A description of the advanced research WRF Version 2. NCAR Tech. Note. NCAR/TN-468+STR, 88p.

Shchepetkin, A. F.; McWilliams, J. C. (2003). A method for computing horizontal pressure-gradient force in an oceanic model with a nonaligned vertical coordinate. *Journal of Geophysical Research*, v. 108, C3, p. 3090, doi:10.1029/2001JC001047.

Shchepetkin A. F.; McWilliams, J. C. (2005). The Regional Ocean Modeling System: a split-explicit, free-surface, topography-following coordinates ocean model. *Ocean Modelling*, v. 9, p. 347-404.

Sloyan, B. M.; Johnson, G. C.; Kessler, W. S. (2003). The Pacific Cold Tongue: a pathway for interhemispheric exchange. *Journal of Physical Oceanography*, v. 33, p. 1027-1043, [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2003\)033<1027:TPCTAP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)033<1027:TPCTAP>2.0.CO;2).

Souza, R. B.; Robinson, I. S. (2004). Lagrangian and satellite observations of the Bra-

- zilian Coastal Current. *Continental Shelf Research*, v. 24, p. 241-262.
- Stull, R. B. (1988). *An introduction to boundary layer meteorology*. Atmospheric Sciences Library, Dordrecht: Kluwer.
- Summerhayes, C. (2009). The Antarctic environment in the Global System: In: Turner, J.; Bindschadler, R.; Convey, P.; di Prisco, G.; Fahrbach, E.; Gutt, J.; Hogdson, D.; Mayewski, P.; C. Summerhayes (Eds.): Chapter 1, Antarctic Climate Change and the environment: a contribution to the International Polar Year 2007 2008. Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR), Victoire Press, Cambridge.
- Tokinaga, H.; Tanimoto, Y.; Xie, S. P. (2005). SST-induced surface wind variations over the Brazil-Malvinas confluence: Satellite and in situ observations. *Journal of Climate*, v. 18, n. 17, p. 3470-3482.
- Tomczak, M.; Godfrey, J. S. (2001). Regional Oceanography: An introduction. PDF version 1.0. Online version available in: <http://gyre.umeoce.maine.edu/physicalocean/Tomczak/regoc/pdfversion.html>.
- Trenberth, K. E.; Fasullo, J. T. (2010). Simulation of present day and twenty first century energy budgets of the Southern Oceans. *Journal of Climate*, v. 23, p. 440-454.
- Vianna, M. L.; Meneses, V. V.; Pezza, A. B.; Simmonds, I. (2010). Interactions between Hurricane Catarina (2004) and warm core rings in the South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, v. 115, C07002. doi:10.1029/2009JC005974.
- Wallace, J. M.; Mitchell, T. P.; Deser, C. (1989). The influence of sea surface temperature on surface wind in the eastern equatorial Pacific: Seasonal and interannual variability. *Journal of Climate*, v. 2, n. 12, p. 1492-1499.
- Warner, J. C.; Armstrong, B.; He, R.; Zambon, J. B. (2010). Development of a Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport (COAWST) Modeling System. *Ocean Modeling*, v. 35, p. 230-244.
- Warner, J. C.; Sherwood, C. R.; Signell, R. P.; Harris, C.; Arango, H. G. (2008). Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model. *Computers and Geosciences*, v. 34, p. 1284-1306.
- Witter, D. L.; Gordon, A. L. (1999). Interannual variability of South Atlantic circulation from 4 years of TOPEX/POSEIDON satellite altimeter observations. *Journal of Geophysical Research*, v. 104, n. C9, p. 20927-20948.
- Wolf, D. K. (2001). Bubbles. In: *Encyclopedia of Ocean Sciences* (Second Edition), Academic Press, p. 439-444, <https://doi.org/10.1016/B978-012374473-9.0>



## CAPÍTULO 3

# OCEANOGRAFIA ÓPTICA: AVANÇOS, PERSPECTIVAS E O ACOPLAMENTO DO SENSORIAMENTO REMOTO E OBSERVAÇÕES *IN SITU*

AUREA MARIA **CIOTTI**<sup>1</sup>  
MAURICIO ALMEIDA **NOERNBERG**<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratório Aquarela, Centro de Biologia Marinha da USP – São Sebastião, SP

<sup>2</sup> Laboratório de Oceanografia Costeira e Sensoriamento Remoto, Centro de Estudos do Mar da UFPR – Pontal do Paraná, PR

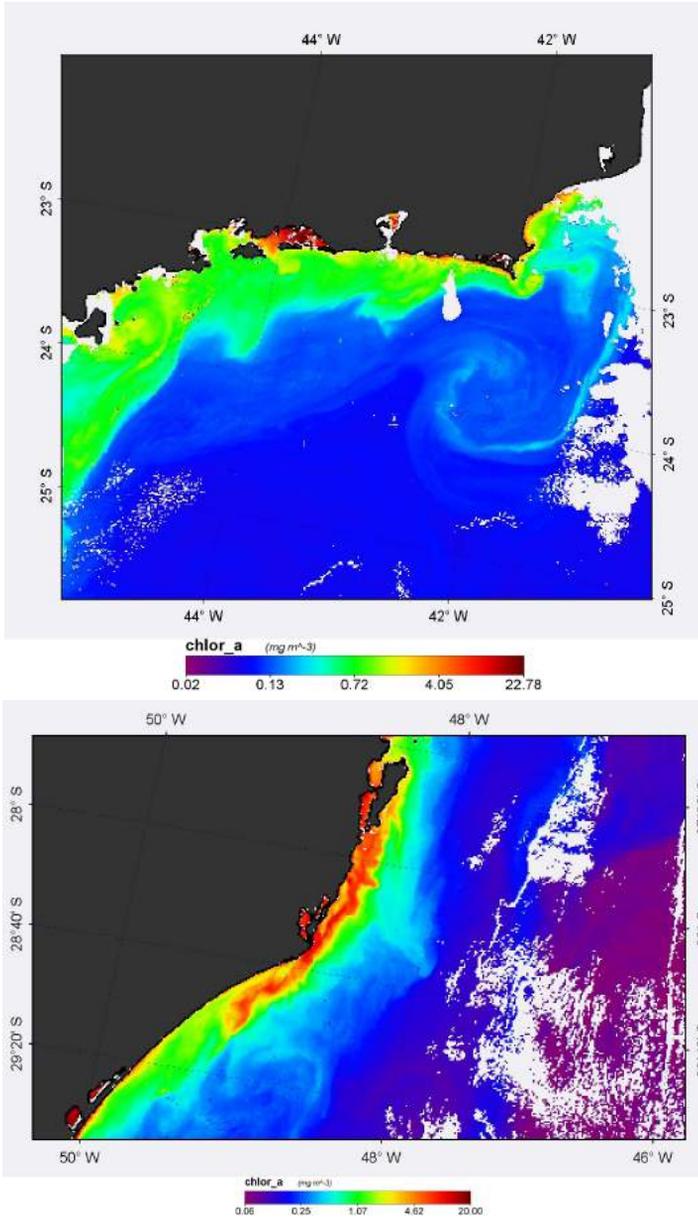
## 1 INTRODUÇÃO

A cor do oceano se tornou uma importante ferramenta de observação nas últimas décadas, mas a compreensão de seus fundamentos é uma etapa essencial para a correta interpretação dos resultados obtidos. Sensores da cor do oceano operam em duas classes de plataformas principais: i) instrumentos utilizados *in situ* com o auxílio de embarcações, ou instalados em fundeios e derivadores; ii) instrumentos a bordo de aeronaves e satélites em suas diversas órbitas (polares, geoestacionários). Esses sensores registram a reflectância espectral emergente da superfície da água do mar, que é a definição física de sua cor, resultado fundamental da interação entre os fótons da irradiação solar incidente com moléculas, substâncias dissolvidas e pequenas partículas “coloridas” presentes na água do mar. Os fótons, ao se propagarem pelos oceanos, têm dois destinos: ou são absorvidos (i.e., deixam de existir e são convertidos para outras formas de energia) ou são espalhados (i.e., a direção da sua propagação é alterada). Assim, a interpretação de observações da cor do oceanos deve inicialmente levar em conta a variabilidade da irradiância solar chegando à superfície do mar, tanto em intensidade como espectralmente. A reflectância espectral emergente possui unidades físicas, o que a torna comparável no tempo e no espaço, permitindo a construção de mapas e séries temporais, e conseqüentemente, estudos da dinâmica dos oceanos de escalas regionais a globais.

O desenho de um dado sensor de cor do oceano estabelece quais comprimentos de onda serão registrados, em geral selecionados para capturar a presença de componentes considerados opticamente mais importantes, com destaque para o conjunto de organismos compondo o fitoplâncton. Esses organismos são os principais produtores primários dos oceanos globalmente. Por essa razão, os produtos mais comumente extraídos de dados da cor do oceano são mapas ou sequências de valores da concentração do pigmento clorofila-a (O’Reilly et al., 1998), principal pigmento fotossintético. Os mapas de clorofila-a superficial, em primeira ordem, simulam a abundância no espaço desses organismos, e a utilização de sequências de imagens em um dado local permite estimar tendências temporais (e.g., análises de séries temporais).

Os mapas ou observações sinópticas da concentração da clorofila-a superficial são importantes dados de entrada em modelos capazes de estimar taxas de produtividade primária nos oceanos (Saba et al., 2011) que auxiliam na gestão de recursos pesqueiros (IOCCG, 2009). As imagens da cor do oceano

permitem observações simultâneas de processos físicos e biológicos (Figura 1) e abrem portas para estudos genuinamente multidisciplinares, e se tornaram essenciais para modelos biogeoquímicos.



**FIGURA 1:** Mapas da concentração superficial de clorofila-a derivada do sensor Modis/Aqua (Nível L2, processamento padrão), mostrando alterações associadas com: a) um vórtice da corrente do Brasil em 24 de novembro de 2017; b) a região de ressurgência costeira ao largo da costa de Santa Catarina em 11 de março de 2012. Imagens adquiridas em [oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/](https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/).

Porém, dependendo do local, existem outras fontes de material colorido, e outros componentes presentes na água do mar podem ser opticamente mais importantes do que o fitoplâncton. Globalmente, dentre esses outros componentes se destacam a matéria orgânica dissolvida colorida e os sedimentos, principalmente encontrados em regiões próximas a aportes continentais importantes. Uma vez presentes em concentrações significativas, esses outros componentes caracterizam águas do Caso 2, chamadas também de opticamente complexas. Estas se diferenciam das águas de Caso 1, no qual todos os constituintes opticamente ativos, particulados ou dissolvidos, covariam com a concentração de clorofila-a. Assim, em águas de Caso 1, tanto o desenvolvimento como a aplicação dos modelos bio-ópticos, isto é, modelos que permitem a extração de informações biológicas ou biogeoquímicas da cor do oceano, são em geral mais simples. Outras fontes de materiais para regiões mais próximas da costa incluem a drenagem continental difusa urbana e a ressuspensão de sedimentos do fundo. Águas opticamente complexas necessitam de estudos bio-ópticos dependentes de medições regionais. Medições devem ser feitas regionalmente tanto *in situ* como em laboratório. A maior parte da costa brasileira ainda carece de algoritmos regionais.

## 2 RECURSOS PARA O ENSINO DA OCEANOGRAFIA BIO-ÓPTICA

A Oceanografia Bio-Óptica se estabeleceu como linha de pesquisa ao final dos anos 1970, após o sucesso do sensor “Costal Zone Color Scanner” (CZCS), instalado a bordo do satélite Nimbus 7 (McClain, 2009), que operou de 1978 até 1986. O CZCS produziu pela primeira vez dados verdadeiramente sinóticos da concentração de clorofila-a nos oceanos, possibilitando a confecção de mapas globais. O acervo de sensores de cor do oceano a bordo de satélites desde a prova de conceito CZCS possibilitou a geração de duas décadas de informações hoje livremente acessíveis (ver: [oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/](http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/)).

Os sensores da cor do oceano atualmente em operação, como o MODIS/Aqua, registram a reflectância emergente dos oceanos com uma resolução espacial de cerca de 1 km para a maioria de suas bandas espectrais. Dessa forma, seus dados são geralmente aplicados em estudos de processos oceanográficos de mesoescala. As imagens de cor do oceano são bastante úteis para localizar e fornecer informações sobre a dinâmica de frentes, vórtices

e correntes (Figura 1). As estimativas simultâneas pelo sensor MODIS/Aqua da temperatura superficial e da abundância do fitoplâncton, além de concentrações de outros componentes ópticos, facilitam o estabelecimento de relações entre os processos físicos e os ciclos biogeoquímicos.

Há um grande número de informações sobre os sensores de cor do oceano, modelos bio-ópticos e seus produtos. Indicaremos aqui apenas algumas fontes principais. Especialmente para iniciantes, recomendamos a leitura de dois documentos: o primeiro demonstra a construção dos modelos empíricos simples que estimam a concentração de clorofila-a (Clarke et al., 1970); já o segundo descreve as premissas necessárias tanto para o desenvolvimento como para a aplicação desses modelos (Morel, 2006). Os fundamentos dos algoritmos simples para a estimativa da concentração da clorofila-a superficial dos oceanos se baseiam na capacidade de absorção de luz desse pigmento, presente nas células do fitoplâncton, que proporciona uma redução proporcional na porção azul da reflectância emergente dos oceanos.

Como apoio ao ensino da oceanografia bio-óptica em nível de graduação existem textos básicos em português, como o capítulo de Kampel e Novo (2005) que apresenta os conceitos fundamentais do sensoriamento remoto da cor do oceano, discutindo a classificação das cores das águas em função da sua dependência à concentração de clorofila e introduzindo conceitos sobre a correção atmosférica das imagens (IOCCG, 2010), uma vez que a maior parte do sinal monitorado pelos sensores vem da atmosfera. Ciotti (2005), em outro capítulo do mesmo livro, apresenta aplicações das medidas bio-ópticas obtidas por imagens de satélite e *in situ*, com exemplos para a costa brasileira, e discute algumas das abordagens empregadas na obtenção de variáveis complementares à concentração de clorofila-a. Já o livro organizado por Jensen e Epiphanyo (2009) tem capítulos que focam na descrição dos componentes da radiação registrada por um sensor remoto, e apresenta detalhes da “resposta espectral” da água do mar em função dos coeficientes de absorção e espalhamento da luz e a sua relação com constituintes orgânicos (clorofila, detritos e material orgânico dissolvido) e inorgânicos (sedimentos em suspensão).

Muitos livros sobre a oceanografia bio-óptica estão disponíveis em inglês. Uma lista completa se encontra em um *webbook* lançado em 2011 ([www.oceanopticsbook.info](http://www.oceanopticsbook.info)), que é parte dos materiais didáticos de um curso de pós-graduação intensivo oferecido, há muitos anos, pela Universidade do Maine (EUA). Os conteúdos do *webbook* são apresentados em graus distintos de aprofundamento, e cobrem desde os fundamentos físicos até o emprego de soluções matemáticas complexas. Ainda como auxílio às aulas de bio-óptica,

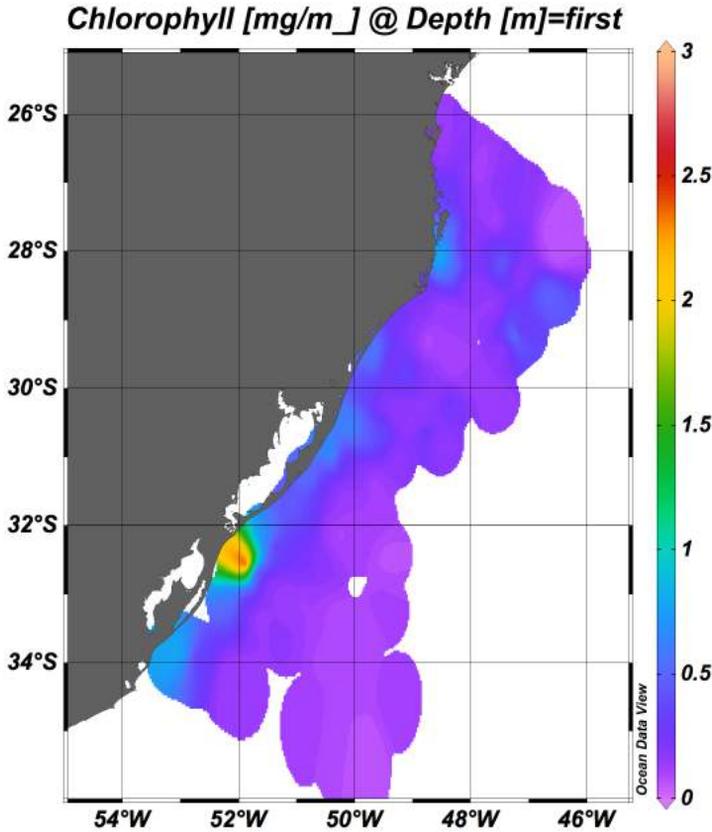
vídeos de aulas com especialistas durante o curso da Universidade do Maine estão disponíveis na Internet.

Em 1996 foi fundado o “International Ocean-Colour Coordinating Group” (IOCCG), com a finalidade de incentivar o uso de dados radiométricos em escala global e facilitar seu acesso. O IOCCG, em parceria com outros grupos, fomenta atividades de treinamento, com a participação de alunos de graduação de vários países, além de mediar encontros científicos de grupos de trabalho específicos (ver informações em: [ioccg.org](http://ioccg.org)). O sítio do IOCCG possui muitos recursos educacionais; entre os produtos que recomendamos, estão os relatórios preparados pelos diversos grupos de trabalho.

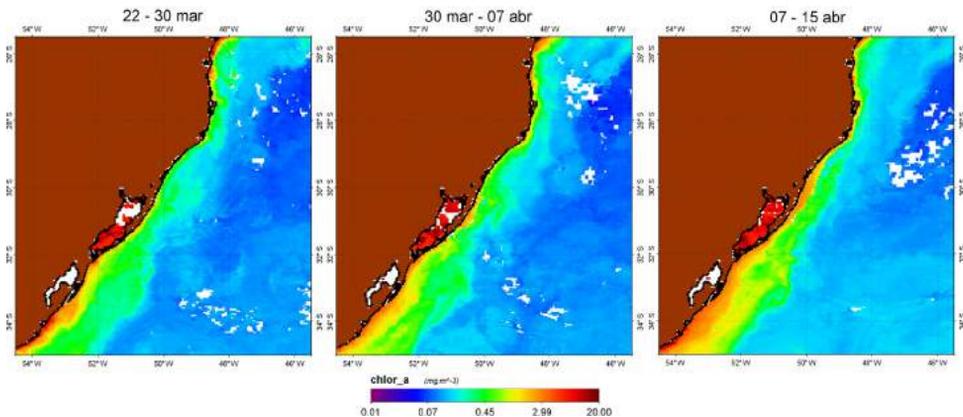
### 3 PROCÊSSAMENTO DE IMAGENS DE SATÉLITE DA **COR DO OCEANO**

A construção de mapas da concentração superficial da clorofila-a utilizando imagens de satélite é relativamente simples, se comparada às técnicas utilizadas em campo e em laboratório. As coletas *in situ* requerem viagens com navios para a realização de estações oceanográficas nas quais são lançadas garrafas para amostrar a água, da qual são retiradas alíquotas para a determinação da concentração de clorofila-a. Isso exige a filtração de volumes distintos de água, extração dos pigmentos com solventes orgânicos e a leitura desses extratos em equipamentos de laboratório (e.g., Welschmeyer, 1994). Ao final de vários dias de esforço amostral, apenas alguns pontos podem ser registrados, geralmente distantes entre si em dezenas de milhas náuticas, e os mapas de distribuição são gerados por interpolação (Figura 2).

Quando se utilizam imagens de satélite, os mapas de concentração superficial de clorofila-a são gerados com a resolução espacial das bandas espectrais (i.e., cerca de 1 km para o MODIS/Aqua), uma vez que os algoritmos podem ser aplicados em cada pixel. Durante uma única passagem do satélite sobre uma região, são registrados centenas de quilômetros quadrados em poucos minutos (Figura 3). Logicamente, a precisão dos valores pontuais de clorofila-a é maior nas coletas *in situ*, mas a visão sinóptica de processos é apenas possível com o sensoriamento remoto. A Figura 3, por exemplo, ilustra sucessivos intervalos de 8 dias (período necessário para completar o cruzeiro oceanográfico referido na Figura 2. Portanto, é fundamental verificar a performance dos algoritmos utilizados em uma determinada região (ver seção 5).



**FIGURA 2:** Mapa da concentração de clorofila-a durante o cruzeiro oceanográfico Oceano Sul, realizado entre 21 de março e 17 de abril de 2009 (dados de Giannini et al., 2013). Os dados foram obtidos em estações oceanográficas e as cores representam as concentrações interpoladas pelo programa ODV ([odv.awi.de](http://odv.awi.de)).

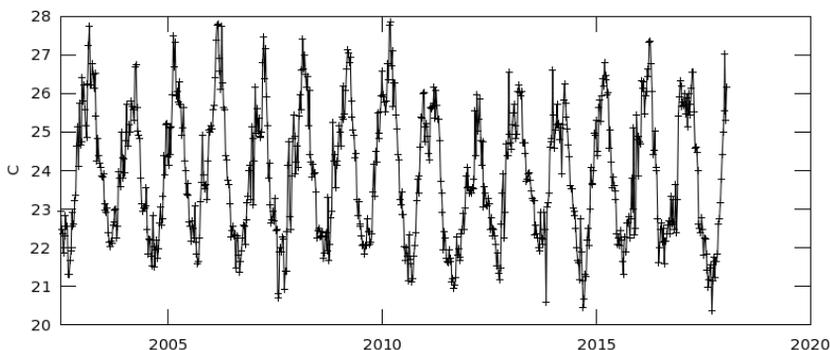


**FIGURA 3:** Mapas da concentração superficial derivada do sensor Modis/Aqua (Nível L3, processamento padrão) em mosaicos (médias) de 8 dias (veja períodos nas legendas) durante o cruzeiro Oceano Sul realizado entre 21 de março e 17 de abril de 2009. Compare com a Figura 2.

A produção de mapas da concentração de clorofila-a na superfície dos oceanos requer conhecimento dos programas de processamento e infraestrutura para lidar com arquivos grandes. Entretanto, existem dados processados disponíveis, como as imagens globais mapeadas a partir de uma grande diversidade de produtos distribuídas pela NASA ([oceancolor.gsfc.nasa.gov](http://oceancolor.gsfc.nasa.gov)).

Existem várias ferramentas gratuitas para a visualização e execução de análises básicas de dados já processados. Aqui apresentamos a *Giovanni*, que consideramos uma forma de engajar iniciantes no sensoriamento remoto da cor dos oceanos durante atividades didáticas. O sítio *Giovanni* ([giovanni.gsfc.nasa.gov](http://giovanni.gsfc.nasa.gov)) centraliza dados processados de vários sensores e os produtos disponíveis vão além daqueles derivados por dados da cor do oceano. Os iniciantes podem gerar mapas ou outras opções de gráficos de uma dada região ou intervalo de tempo em poucos minutos. Na Figura 4, ilustramos duas saídas de séries temporais da temperatura superficial e da concentração de clorofila-a, que representam médias de 8 dias na plataforma continental adjacente à região de Cabo Frio, no Rio de Janeiro. Os dados que geram mapas e figuras podem ser posteriormente baixados e utilizados em outras análises.

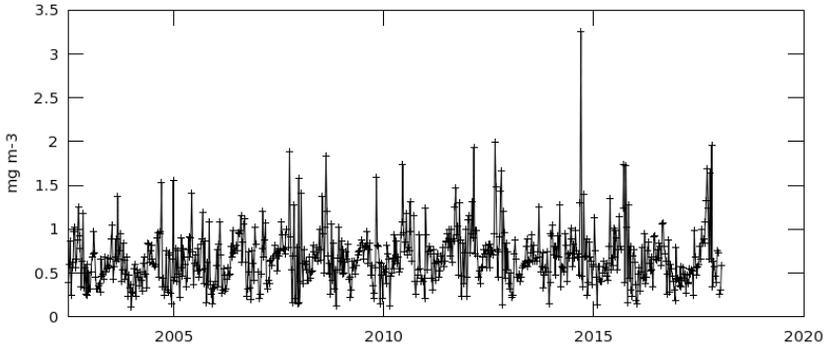
Serie Temporal da Temperatura Superficial do Mar (°C) em 11 microns (dia).  
Médias em área de 8 dias e 4 km (OBS: o restante é o a descrição da imagem que indica o sensor MODIS-Aqua e a denominação da imagem intervalo de tempo ( ano-mês-dia-hora) da série e *Region* são as coordenadas geográficas



O intervalo de tempo selecionado foi de x a y (ano,mês,dia,hora). O Título se refere ao intervalo de tempo das imagens que contribuíram para esse resultado.

**FIGURA 4:** Opções de saída gráfica do sítio Giovanni ([giovanni.gsfc.nasa.gov](http://giovanni.gsfc.nasa.gov)) para dados médios de 8 dias ao longo de toda a base disponível do sensor Modis/Aqua para uma região de plataforma continental adjacente a Cabo Frio (RJ). Acima, a temperatura superficial (°C); abaixo, a concentração de clorofila-a.

Serie Temporal da Concentração de clorofila-a superficial.  
Médias em área de 8 dias e 4 km (OBS: o restante é o a descrição da imagem que indica o  
sensor MODIS-Aqua e a denominação da imagem intervalo de tempo ( ano-mês-dia-hora)  
da série e *Region* são as coordenadas geográficas



O intervalo de tempo selecionado foi de x a y (ano,mês,dia,hora). O Titulo se refere ao  
intervalo de tempo das imagens que contribuíram para esse resultado.

**FIGURA 4 (continuação):** Opções de saída gráfica do sitio Giovanni () para dados médios de 8 dias ao longo de toda a base disponível do sensor Modis/Aqua para uma região de plataforma continental adjacente a Cabo Frio (RJ). Acima, a temperatura superficial (°C); abaixo, a concentração de clorofila-a.

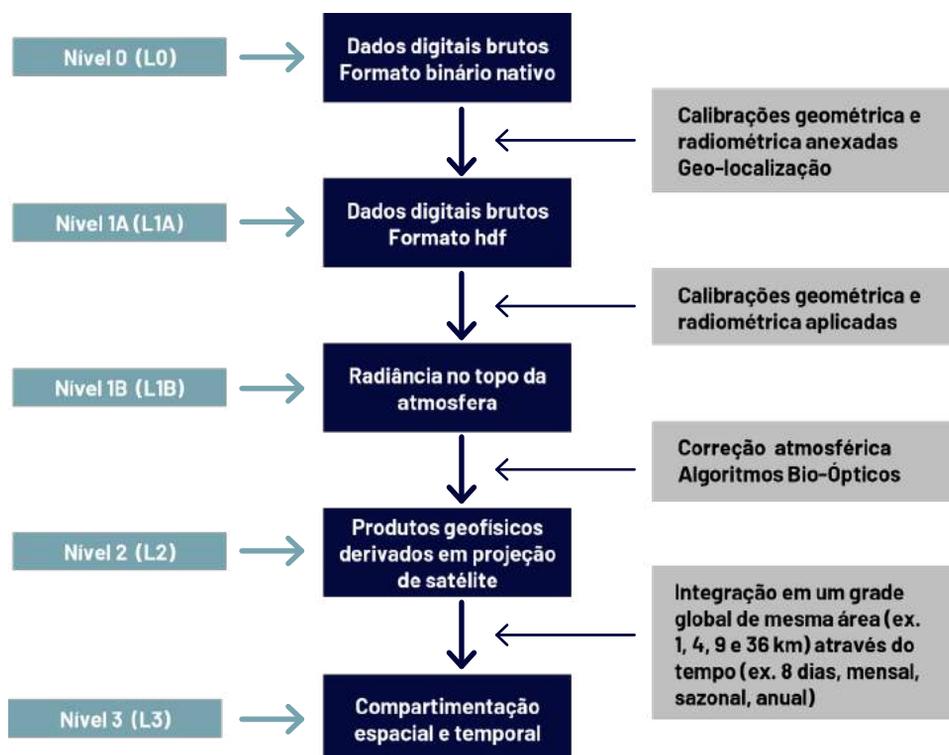
É importante destacar que os dados de cor do oceano disponibilizados pela NASA, por meio do sitio *Giovanni* ou outros portais, são preparados seguindo um processamento padrão, no qual os algoritmos aplicados, tanto para correção atmosférica como para a estimativa de variáveis geofísicas, são globais. Assim, quando necessitamos trabalhar com regiões específicas ou escalas temporais menores, é recomendado customizar o processamento das imagens. O mesmo vale para dados mais próximos da costa, onde tanto os algoritmos como as correções atmosféricas globais utilizados no processamento padrão tendem a ter baixa performance.

Existem diferentes programas para o processamento de imagens, mas aqui focaremos no *SeaDas*, um pacote de programas de código aberto para processamento, visualização, análise e controle da qualidade de dados de cor do oceano, livremente distribuído pela NASA OB.DAAC ([seadas.gsfc.nasa.gov](http://seadas.gsfc.nasa.gov)). O *SeaDAS* foi originalmente desenvolvido para dar suporte aos dados gerados pela missão do sensor da cor do oceano *SeaWiFS*, que operou até 2010, mas atualmente atende dados da maioria das missões de cor do oceano e outras variáveis geofísicas, dos EUA e internacionais, passadas e presentes (e.g., *Aquarius*, *MODIS*, *MERIS*; *VIIRS*, *GOCI*, *OCTS*, *MERIS*, *Landsat 8 OLI*). A versão atual do *SeaDAS* (7.5) é resultado da colaboração entre os seus

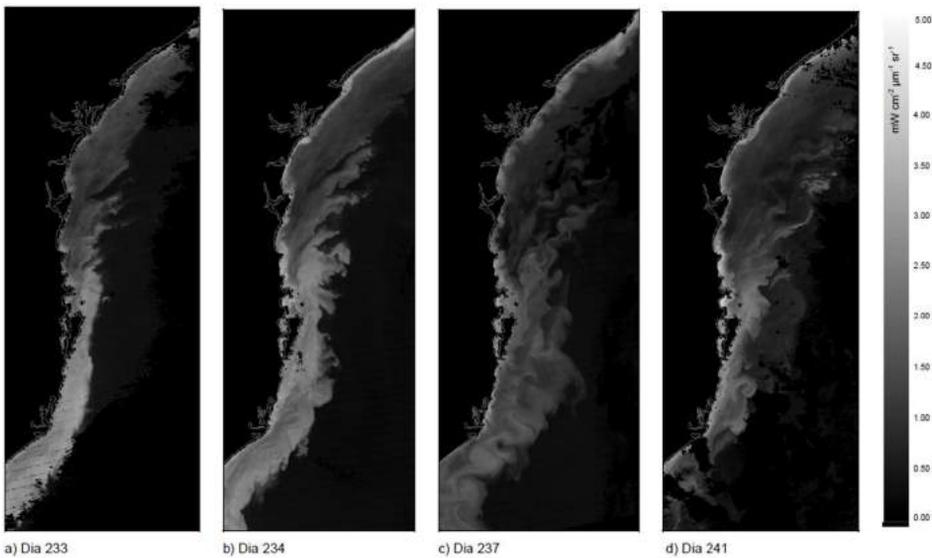
desenvolvedores e aqueles do *software* BEAM, também distribuído livremente ([www.brockmann-consult.de/cms/web/beam/](http://www.brockmann-consult.de/cms/web/beam/)), que atende as missões da Agência Espacial Europeia (ESA). Essa parceria entre agências tem padronizado o processamento, extensões e funcionalidades dos pacotes, objetivando um uso global. Para o processamento de imagens com o SeaDAS, deve-se possuir um computador com boa memória e espaço em disco, além de uma conexão rápida e estável de Internet, pois o processamento requer o download de diversos arquivos. Tutoriais sobre o processamento das imagens estão disponíveis em: [seadas.gsfc.nasa.gov/tutorials/](http://seadas.gsfc.nasa.gov/tutorials/).

A sequência completa do processamento de dados de satélite começa com as medições de reflectância e radiância feitas por um dado sensor no topo da atmosfera e termina com a saída de um produto geofísico, como, por exemplo, um mapa global de clorofila. Essas etapas são divididas em níveis de processamento que refletem distintos agrupamentos espaciais, temporais e de parâmetros, e estão resumidas no Box 1.

**BOX 1:** Diagrama com as etapas para o processamento de imagem de satélite da cor do oceano e geração de seus produtos, seguindo a estrutura do pacote SeaDas ([seadas.gsfc.nasa.gov](http://seadas.gsfc.nasa.gov)).



No nível 0, os dados dos sensores estão em formato bruto, como adquiridos pelos instrumentos, ainda não processados na resolução de aquisição (*full resolution*). Os dados estão em “unidades de engenharia” tais como volts ou *digital counts*. Dados nível 1A são os dados dos instrumentos não processados na melhor resolução espacial e espectral de cada banda, mas contêm informações sobre os coeficientes de calibração radiométrica e geométrica dos sensores e também os parâmetros para a localização dos pixels na imagem (georreferenciamento). Essas informações estão anexadas aos dados, mas ainda não aplicadas nos dados de nível 0, fazendo com que os dados no nível 1A sejam os dados preferidos. O motivo é que se a calibração dos sensores muda, os dados não precisam ser readquiridos. O mesmo não é verdadeiro para os dados do nível 1B, descritos abaixo, que devem ser substituídos sempre que a calibração do sensor mudar. Dados nível 1B são os dados do nível 1A que foram processados para unidades de sensor (e.g., unidades para radiância, em geral expressa em  $\text{microwatts.cm}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ).



**FIGURA 5:** Sequência de imagens MODIS de nível 2 dos dias 21, 22, 25 e 29 de agosto de 2006, mostrando a evolução da influência da pluma do Rio da Prata sobre a plataforma S-SE do Brasil. As imagens são da radiância ascendente da água normalizada centralizada em 555nm ( $nL_w_{555}$ ), que apresenta relação com a turbidez em águas costeiras. Fonte: Freitas, 2007.

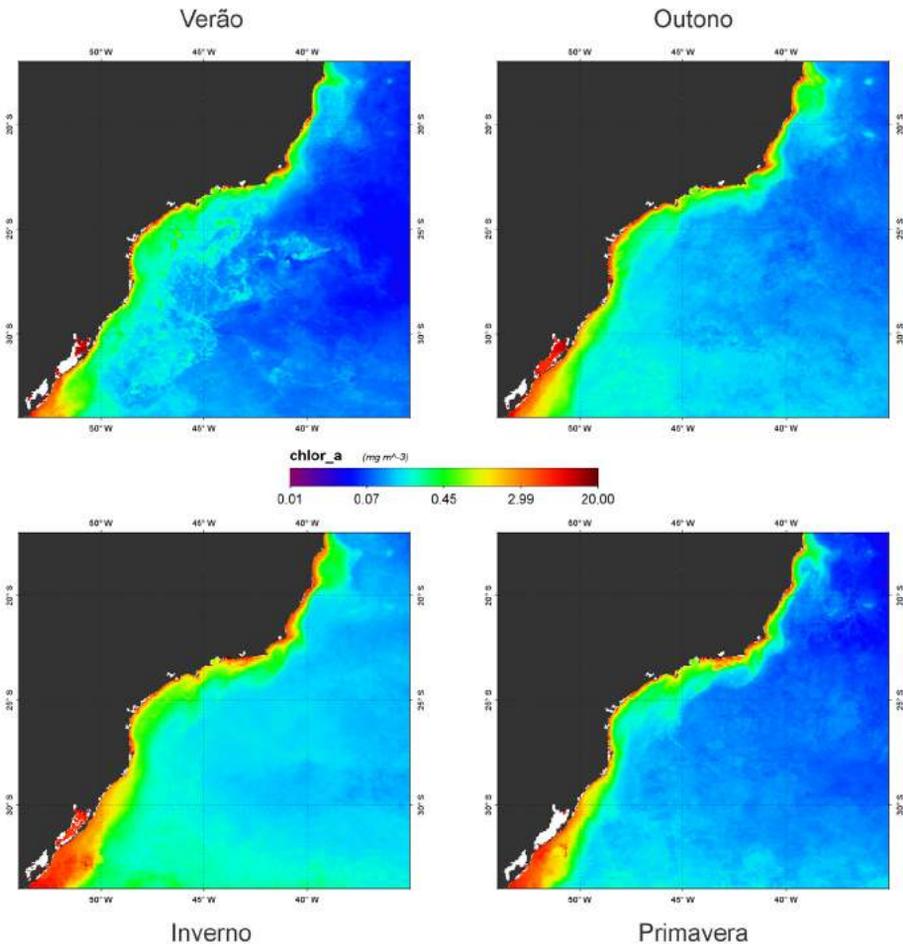
Os dados nível 2 são criados após a aplicação da correção atmosférica escolhida sobre os dados de radiância do topo da atmosfera, registradas pelos dados de nível 1B. Referem-se às variáveis geofísicas derivadas, como por exemplo a radiância ascendente da água normalizada, ( $nL_w$ ) (Figura 5), o coeficiente de atenuação vertical difusa ( $K_d$ ), espessura óptica de aerossol (AOT - 865nm), ou a concentração de clorofila (chl<sub>a</sub>), na mesma resolução e localização dos dados do nível 1, e portanto, os cálculos são aplicados pixel a pixel na imagem. Nesse nível, são escolhidos os parâmetros e modelos, e enfatizamos a necessidade de cautela durante essas escolhas, de forma a serem as mais apropriadas aos problemas científicos em questão e aos locais de estudo. Por fim, dados nível 3 são variáveis geofísicas derivadas que foram agregadas (i.e., valores médios) ou projetadas em uma grade de tempo e espaço uniforme (Figura 6), frequentemente com os pontos indefinidos/inexistentes sendo interpolados.

Os dados de nível 4 são produtos obtidos da combinação de dados de satélite com saídas de modelos numéricos, ou resultantes de análises de dados de menor nível (i.e., variáveis derivadas de múltiplas medidas). Por exemplo, mapas das taxas de produtividade primária nos oceanos geralmente integram no tempo, e em cada pixel, a concentração de clorofila-a, a luz solar incidente na faixa do visível e a temperatura superficial.

## 4 MODELOS BIO-ÓPTICOS

Os modelos bio-ópticos são aqueles que resultam em produtos para pesquisas sobre a biogeoquímica dos oceanos. Os modelos mais simples são empíricos e consistem em relações estatísticas feitas com medidas simultâneas *in situ* da reflectância emergente dos oceanos e dos produtos de interesse, como, por exemplo, a concentração de clorofila-a (e.g. O'Reilly et al., 1998). Os modelos mais complexos, chamados semi-analíticos (e.g. Lee et al., 2002), são desenvolvidos a partir de um misto de formulações matemáticas empíricas (e.g., Ciotti et al., 1999) e teóricas que relacionam as propriedades ópticas de cada componente colorido presente na água ao campo luminoso dos oceanos (Gordon et al., 1988; Morel, 1988; IOCCG, 2000).

A família de algoritmos empíricos desenvolvidos para os sensores de maior utilização pela comunidade científica é denominada OC (*Ocean Chlorophyll*). Os algoritmos OC foram iniciados por O'Reilly et al. (1998) e relacionam a concentração superficial de clorofila-a ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) com uma razão de intervalos ou bandas de reflectância ( $R_{rs}(\lambda)$ ) azul (b, *blue*) e verde (g, *green*) ou  $R_{rs}(\lambda_b)/R_{rs}(\lambda_g)$ , que não possui unidades. O'Reilly et al. (2000) propuseram para o sensor



**FIGURA 6:** Imagens MODIS/Aqua de nível 3 representando o valor médio da concentração superficial de clorofila nas estações durante o ano de 2017. Imagens adquiridas em <https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/>.

MODIS/Aqua o algoritmo OC3, que utiliza três bandas de reflectância (443, 488 e 551nm), e para o seu precursor, o SeaWiFs, o OC4, que utiliza quatro bandas (443, 490, 510 e 555nm). A banda entre aquelas disponíveis no azul (i.e., entre 443 e 510nm) que tem o máximo valor de reflectância é aquela utilizada na  $R_{rs}(\lambda_b)/R_{rs}(\lambda_g)$  em uma mesma equação.

Alguns algoritmos semi-analíticos utilizam técnicas de inversão numérica da radiância emergente dos oceanos ( $R_{rs}$ ) para estimar as variáveis biogeoquímicas, geralmente representados por magnitudes e “comportamentos” espectrais (vetores) das propriedades ópticas inerentes dos principais

grupos de substâncias dissolvidas (matéria orgânica colorida) e partículas (sedimentos, detritos e fitoplâncton) presentes em um corpo de água. As soluções utilizam aproximações da Equação de Transferência Radioativa, que em primeira ordem determina que a cor dos oceanos é diretamente proporcional ao retroespalhamento ( $b_b$ ) e inversamente à absorção da luz ( $a$ ) em cada comprimento de onda ( $\lambda$ ). Essas aproximações foram inicialmente propostas por Gordon et al. (1975a) e Morel e Prieur (1977), sendo:

$$R_{rs} = L_u(0^-) / E_d(0^-) \sim g \frac{b_b}{a}$$

onde  $L_u(0^-)$  e  $E_d(0^-)$  são a radiância ascendente e irradiância descendente logo abaixo da superfície da água em cada comprimento de onda ( $\lambda$ ), respectivamente. O termo  $g$  é um fator de proporcionalidade que leva em consideração os efeitos resultantes das direções da propagação dos fótons no meio.

Sathyendranath e Platt (1997; 1998) expressam a reflectância no oceano como uma função do coeficiente de atenuação difusa ( $K_d$ ), que por sua vez é uma função das propriedades ópticas inerentes. Já o modelo semi-analítico é o Carder-MODIS (Carder et al., 1999; Carder et al., 2004) que deriva a concentração de clorofila e as propriedades ópticas inerentes a partir de um espectro de reflectância de sensoriamento remoto. Este último é composto por uma porção algébrica, para águas com baixa absorção (geralmente oceânicas) e uma porção empírica, para altas absorções (geralmente águas costeiras).

Outra abordagem semi-analítica é a otimização espectral da relação entre a  $R_{rs}$  e os coeficientes de absorção e retroespalhamento, como o GSM (Garvel-Siegel-Maritorena), desenvolvido inicialmente por Garver e Siegel (1977) e aprimorado por Maritorena et al. (2002). Outros modelos semi-analíticos amplamente aplicados hoje são o QAA, *Quasi-Analytical Algorithm*, proposto por Lee et al. (2002) e, mais recentemente, o GIOP (*Generalized Inherent Optical Property* – Werdell et al., 2013).

## 5 OBSERVAÇÕES SOBRE A COR DO OCEANO *IN SITU*

Como exposto na Seção 1, tanto as partículas presentes, que incluem o fitoplâncton, detritos e sedimentos, como o material dissolvido colorido, que pode ser orgânico ou não, interagem com a irradiância solar que chega à superfície e a modificam conforme se transmite pelas camadas superficiais

dos oceanos em direção ao fundo. Essencialmente a cor do oceano depende:

- da irradiância solar, que varia no tempo e no espaço e espectralmente;
- da direção de propagação dos fótons pela coluna de água, regida pelas propriedades de espalhamento de todos os componentes presentes na água; e
- da probabilidade de absorção dos fótons em cada comprimento de onda pelos componentes presentes.

Assim, independentemente do instrumento utilizado *in situ*, esses três pontos principais devem ser levados em consideração tanto durante as medições como na interpretação dos resultados.

## 5.1 INSTRUMENTOS CLÁSSICOS

A instrumentação oceanográfica com foco em medições da cor do oceano possui uma história rica. Existem diversos relatos na literatura sobre o desenvolvimento e utilização de instrumentos para medir tanto a transparência como a cor do oceano. Uma recente revisão (Wernand, 2013) faz um levantamento completo dessa história até o início dos anos 1930. Aqui listaremos apenas dois instrumentos clássicos, que merecem destaque por ainda fazerem parte do acervo de muitos laboratórios.

### 5.1.1 DISCO DE SECCHI

O disco de Secchi é um disco branco, geralmente com 30cm de diâmetro, utilizado em limnologia e oceanografia desde 1865. A profundidade de seu desaparecimento na coluna de água, determinada pelas marcações da corda utilizada para o lançamento, é uma métrica relativamente quantitativa para medidas de transparência da água. A publicação oficial sobre os fundamentos das medidas é de Tyler (1968), mas a teoria e interpretação dos resultados foi recentemente revisitada por Lee et al. (2015). O disco de Secchi é um ótimo instrumento para o ensino durante aulas práticas, mas para que suas medidas sejam compatíveis entre locais e diferentes momentos, é necessário um mínimo de padronização, que inclui o procedimento de descida evitando a luz direta (i.e., na “sombra”) e manter um ângulo com a vertical que pode ser um problema em locais com correnteza forte. As publicações, inclusive atuais, que utilizam estas medidas, variam desde relatos sobre ciência participativa até a detecção de mudanças climáticas globais (Boyce et al., 2014). Existem relações robustas entre a profundidade de desapareci-

mento do disco de Secchi e a concentração de clorofila-a global nos oceanos.

### 5.1.2 ESCALA DE ULLE-FOREL

A escala de Ulle-Forel é uma coleção de tubos contendo soluções coloridas em uma escala de tons violeta, azuis, verdes, vermelhos e marrons, e para cada tom é atribuído um número. As soluções são preparadas com sulfato de cobre e de cobalto, entre outros compostos, em proporções precisas (Wernand, 2013), e levadas a campo, de forma que a coloração da água observada é comparada ao gradiente colorido. A escala de Ulle-Forel, nome dos dois pesquisadores que independentemente a propuseram, é utilizada em superfície. O observador registra a cor da água visualizada, tendo como contraste um disco de Secchi branco submerso. Essa escala comparativa é a mais difundida globalmente, e foi rotineiramente usada pela Marinha do Brasil nas décadas de 1970 e 1980 em levantamentos hidrográficos. Assim como o disco de Secchi, a escala de Ulle-Forel é um ótimo instrumento de ensino, mas, enquanto as medidas do disco de Secchi são razoavelmente quantitativas, os resultados da escala têm aplicabilidade restrita a ambientes com grandes contrastes de cor no tempo ou no espaço (Wernand et al., 2013).

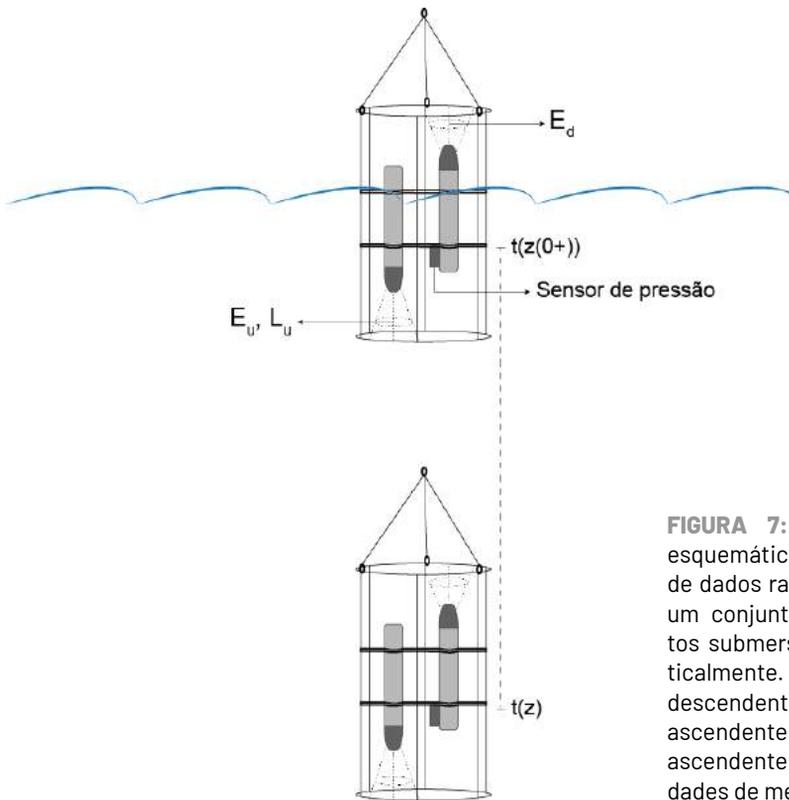
## 5.2 INSTRUMENTOS PARA RADIOMETRIA *IN SITU*

Os valores de reflectância emergente da água fornecidos pelos sensores de cor do oceano a bordo de satélites necessitam ser validados e calibrados com medidas radiométricas obtidas *in situ*, o que chamamos de “referência de campo”. A obtenção de medidas quantitativas radiométricas *in situ* tem papel chave nos estudos de sensoriamento remoto, porque destas depende o desenvolvimento de algoritmos. Porém, o grau de incerteza envolvendo a obtenção de medidas radiométricas *in situ* é normalmente alto. A definição e a clara compreensão das grandezas radiométricas envolvidas e dos princípios e leis que tratam da geração, propagação e detecção da radiação eletromagnética é fundamental para o correto processamento de dados de sensoriamento remoto da água. É necessário o rígido controle da geometria de aquisição dos dados, bem como as condições de iluminação apropriadas e a calibração dos sensores.

Existem dois grupos de instrumentos *in situ*: os destinados a medições acima da superfície da água e os apropriados para medições em submersão. No primeiro caso é necessário o uso de uma placa branca refletora de referência (superfície lambertiana), que deve estar devidamente calibrada.

## 5.2.1 RADIOMETRIA NA ÁGUA

Em geral, a determinação da radiância emergente da água com instrumentos que são submergidos (Figura 7) requer medidas da irradiância descendente ( $E_d(z, \lambda)$ ), da irradiância ascendente ( $E_u(z, \lambda)$ ) e da radiância ascendente da água  $L_u(z, t)$  desde próximo à superfície até ao menos o topo da profundidade óptica (i.e., a profundidade em que cerca de 37% da irradiância em superfície alcança na vertical) obtidas por meio de um conjunto de radiômetros disponíveis no mercado. Para garantir a qualidade dos dados, deve-se evitar a influência do fundo marinho na  $L_u$  e  $E_u$ . Em um oceano homogêneo, aproximadamente 90% da  $L_u$  corresponde à luz retroespalhada pelos constituintes opticamente ativos dentro da primeira profundidade óptica da coluna de água (Gordon e McCluney, 1975). Esta é a profundidade efetiva de penetração de luz na água que retorna ao sensor, representada por  $1/K_d$ . Dessa forma, medidas de  $K_d$  fornecem uma estimativa de extensão na qual o sensor remoto pode “ver” dentro do oceano e, conseqüentemente, avaliar se existe ou não influência do fundo marinho no sinal (Gordon e Morel, 1983).



**FIGURA 7:** Representação esquemática da aquisição de dados radiométricos com um conjunto de instrumentos submersos na água verticalmente.  $E_d$  = irradiância descendente;  $E_u$  = irradiância ascendente;  $L_u$  = radiância ascendente;  $t(z)$  = profundidades de medição

Há três fontes primárias de incerteza na determinação de  $E_d$ ,  $E_u$  e  $L_u$  e seus respectivos coeficientes de atenuação  $K_d$ ,  $K_u$  e  $K_{lu}$ : i) a perturbação do campo de energia radiante pela embarcação, ii) o sombreamento do volume de água medido pela embarcação ou estruturas diversas, e iii) a variabilidade na energia radiante incidente na superfície do mar durante as medições submersas, causada pela atmosfera. As variáveis associadas a essas fontes de incertezas são: o ângulo zenital solar (hora do dia); as propriedades da atenuação espectral da coluna de água, a contribuição fracionada da luz solar direta e difusa, a cobertura de nuvens e sua variação, o tamanho e cor da embarcação e a geometria de instalação dos instrumentos. Outros fatores como ondas, bolhas, espalhamento Raman e fluorescência também podem afetar a qualidade das medições.

O método *in situ* mais confiável para determinar a radiância ascendente da água ( $L_w$ ) é extrapolar para a superfície do mar medidas de um perfil submerso de  $L_u(z, \lambda)$  para estimar  $L_u(0^-, \lambda)$  através da relação:

$$L_w(\lambda) = \frac{1 - \rho}{n^2} L_u$$

onde  $\lambda$  é a reflectância Fresnel da interface ar-mar (0,025) e  $n$  é o índice de refração da água do mar (1,34).

O termo  $\frac{1-\rho}{n^2} \cong 0,543$  é a transmitância da radiância ascendente da superfície do mar para incidência normal inferior, e não é sensível à velocidade do vento.

A relação que determina a reflectância de sensoriamento remoto é:

$$R_{rs}(\gamma) = \frac{L_w(\lambda)}{E_s(\lambda)}$$

onde  $E_s(\lambda)$  é a irradiância incidente acima da superfície do mar, e é equivalente a  $E_d(0^+, \lambda)$ .

A principal incerteza nos perfis de  $K(z, \lambda)$  resulta da variação na cobertura de nuvens durante as medidas na vertical (perfilagem), causando fortes variações na irradiância incidente  $E_s(t(z), \lambda)$  medidas ao longo do tempo  $t(z)$ . Diante disso, é necessário efetuar a normalização das medidas radiométricas

( $E_d$ ,  $E_u$  e  $L_u$ ), devido às variações da iluminação durante a perfilagem. A equação abaixo demonstra a normalização para  $E_d$ , sendo a mesma relação de normalização para a correção das demais grandezas radiométricas, bastando substituir  $E_d$  pela respectiva grandeza ( $E_u$  e  $L_u$ ).

$$\hat{E}_d(z, \lambda) = E_d(z, \lambda)E_s$$

onde  $\hat{E}_d(z, \lambda)$  é a irradiância descendente normalizada medida a cada profundidade ( $z$ ).  $E_s[t(z), \lambda]$  é a irradiância medida no tempo  $t(z)$  quando o radiômetro está na profundidade  $z$  e  $E_s(t(z(0^+)), \lambda)$  é a medida no tempo  $t(z(0^+))$  quando os sensores estão na superfície.

Dessa forma, os coeficientes de atenuação difusa ( $K_d(z, \lambda)$ ,  $K_u(z, \lambda)$  e  $K_{10}(z, \lambda)$ ) podem ser derivados a partir das medidas radiométricas normalizadas. A obtenção das funções  $K$  não segue um protocolo único, e estas podem ser derivadas a partir de abordagens lineares e não-lineares (ver Mueller et al., 2003; Kirk, 2010).

## 5.2.2 RADIOMETRIA SOBRE A ÁGUA

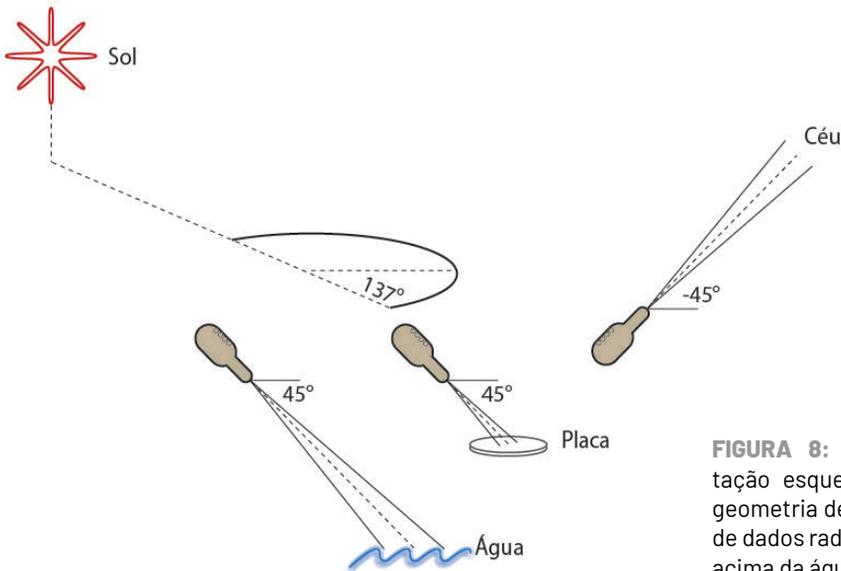
Como uma alternativa para os instrumentos que são submergidos, a radiância ascendente da água pode ser medida a partir de uma embarcação. A radiometria sobre a água é realizada normalmente com o uso de um espectrorradiômetro portátil disponível no mercado; TRIOS). Devem-se obter medidas da radiância ( $L(\lambda)$ ) emergente da água do mar, da radiância do céu e aquela de uma superfície lambertiana de referência (placa Spectralon®) para a resolução espectral do radiômetro utilizado (Figura 8). A obtenção dessas medidas em campo nem sempre é simples e tanto a geometria de aquisição dos dados quanto a redução de fatores que podem contaminar os dados devem ser cuidadosamente levadas em conta. Um detalhamento dos protocolos de aquisição radiométrica, bem como de processamento dos dados, pode ser encontrado em Mueller et al. (2003). Como princípio básico, a padronização de todas as medições é o mais desejável.

As medições sobre a água são normalmente realizadas na proa da embarcação, para evitar a interferência de ondas e espuma na superfície do mar, além da contaminação pelo efeito de sombras do navio. Recomenda-se ainda que as medições sejam realizadas nos horários com menores ângulos zenitais solares (aproximadamente entre 10h e 15h locais). As radiâncias  $L(\lambda)$  da

água, do céu e da placa Spectralon® devem ser obtidas com ângulos de visada azimutal ( $\phi$ ) e zenital ( $\theta$ ) solar, próximos a  $137^\circ$  e  $45^\circ$  respectivamente (Figura 8) para o cálculo da reflectância de sensoriamento remoto ( $R_{rs}$ ), através da seguinte equação:

$$R_{rs}(0_+, \lambda) = L_w(0_+, \lambda) E_d(0_+, \lambda) = L_T(0_+, \lambda) - L_{c\acute{e}u}(0_+, \lambda) L_{placa}(0_+, \lambda) / FC$$

onde  $L_w$  corresponde à radiância ascendente da água e  $E_d$  à irradiância solar descendente, ambas logo acima da superfície do mar ( $0^+$ ) e nos diferentes comprimentos de onda ( $\lambda$ ) disponíveis no equipamento (Mueller et al., 2003). Note-se que  $L_T$  é a radiância total ascendente da superfície da água e corresponde à soma da radiância da água  $L_w$  mais a radiância do céu que foi instantaneamente refletida na água (especular).  $L_{c\acute{e}u}$  e  $L_{placa}$  são as radiâncias medidas com o radiômetro apontado para o céu e para a placa de referência, respectivamente. FC é o fator de calibração da placa, utilizado para corrigir eventual deterioração da placa usada no campo. Esse fator é obtido pela razão da radiância da placa de campo com a radiância de uma placa padrão em laboratório;  $\rho$  é o fator de reflectância da superfície, usado para corrigir a radiância do céu refletida na superfície da água (Mobley, 1999; Doxaran et al., 2004). Para o cálculo de  $\rho$  são necessárias informações como o ângulo zenital solar, a velocidade do vento e os ângulos de visada zenital e azimutal (Hooker e Morel, 2003; Mobley, 2015).



**FIGURA 8:** Representação esquemática da geometria de aquisição de dados radiométricos acima da água.

## 6 MEDIÇÕES EM LABORATÓRIO

Uma vez sendo adquiridas as medidas radiométricas, algoritmos regionais (ou globais) empíricos podem ser construídos, validados ou melhorados, pela comparação de bandas específicas, ou razões entre bandas, com a concentração de substâncias que desejamos estimar. Dois “produtos” comuns são a concentração de clorofila-a e a concentração de sedimentos em suspensão, cujas metodologias são bem difundidas e padronizadas.

Já a construção de algoritmos semi-analíticos requer o conhecimento da variabilidade das propriedades ópticas inerentes, que incluem os coeficientes de espalhamento e de absorção da luz de todos os componentes opticamente ativos. A magnitude de ambos coeficientes varia com o comprimento de onda, em função do tipo e da concentração dos componentes dissolvidos ou particulados presentes no corpo de água. Neste texto, focaremos apenas na determinação dos coeficientes de absorção de luz.

Muito do que se conhece sobre a absorção de luz pelo fitoplâncton deriva de observações em amostras de água do mar concentradas, feitas em modo de varredura dentre os limites de comprimentos de onda entre 300 e 800nm, em espectrofotômetros de bancada. Em bio-óptica são principalmente utilizados dois tipos distintos de espectrofotômetros, o de duplo feixe de varredura, para medições do material particulado, preferencialmente equipado com uma esfera integradora, e o espectrofotômetro de caminho óptico longo, para material dissolvido.

O material particulado presente nos oceanos é definido como aquele retido em um filtro com poros de diâmetro igual a  $0,2\mu\text{m}$ . Porém, o filtro universalmente utilizado para concentrar partículas em estudos de bio-óptica nos oceanos é o GF/F (Whatman), um filtro trançado de fibra de vidro, que possui um poro nominal de  $0,7\mu\text{m}$ . Entretanto, é esperado que a filtração do GF/F seja mais eficiente, pois as fibras atraem as partículas inicialmente por eletroestática, e conforme as partículas se aderem, o tamanho do poro nominal tende a diminuir. Todavia, nesse intervalo de tamanho entre  $0,2$  e  $0,7\mu\text{m}$ , podem ainda existir bactérias, células de fitoplâncton e colóides que podem ser perdidos.

Em campo, devem ser usados sistemas de filtração para filtros de 25mm de diâmetro, e a regra geral é filtrar um volume suficiente de água até que os filtros fiquem visivelmente corados a olho nu, porém evitando excessos, já que as partículas se moverão durante o processamento. Assim, medições em cultivos de microalgas são feitas em volumes de poucos mililitros,

enquanto em oceano aberto pode ser necessário filtrar mais de 3 litros. Em regiões mais próximas à costa, volumes entre 500ml e 1L são em geral suficientes. Se as leituras em espectrofotômetro não puderem ser feitas imediatamente após as filtrações, os filtros devem ser armazenados em nitrogênio líquido até sua análise. Em laboratório, a leitura é feita diretamente sobre os filtros, alinhados para receber o feixe do espectrofotômetro perpendicularmente. Na realidade, a área da varredura em si sobre o filtro tende a ser menor que a área filtrada (diâmetro interno do sistema de filtração); assim, é necessário cuidado para que a filtração seja feita de forma que o resultado seja o mais homogêneo possível. Existem três formas distintas de medir a absorção de luz com materiais retidos em filtros: a) as que envolvem o uso de placas difusoras entre o filtro e o detector (Quantitative Filter Technique (QFT), Mitchell, 1990); b) leituras com o filtro posicionado primeiro na entrada e depois na saída de uma esfera integradora (Transmittance Reflectance (TR), Tassan e Ferrari, 1995), e c) o mais recente, em que a leitura é feita com o filtro no interior da esfera integradora (Inside the Sphere (IS), Babin e Stramski, 2002). A escolha do método é, todavia, um compromisso entre o espectrofotômetro disponível, a quantidade de amostras e o tempo recomendado para seu processamento. Deve-se considerar ainda o grau de turbidez do ambiente, sendo necessário o uso dos métodos TR e IS em amostras que contêm sedimentos.

As medidas da absorção de luz pelo fitoplâncton derivadas daquelas do material particulado total, subtraídas de novas leituras feitas aos filtros após a extração dos pigmentos com metanol puro ou com uma solução de 1% de hipoclorito de sódio. É importante que filtros sem uso, do mesmo lote utilizado para filtrar as amostras, sejam armazenados para serem utilizados como brancos durante o processamento, e deve-se tomar cuidado para manter o alinhamento dos filtros. Os valores finais para o coeficiente de absorção de luz do material particulado ( $a_{\text{particulado}}(\lambda)$ ,  $m^{-1}$ ) são obtidos pela equação:

$$a_{\text{particulado}}(\lambda) = 2.303 \times A_f/V_f \times DO_{\text{corrigida}}$$

onde  $A_f$  é a área filtrada ( $cm^2$ ),  $V_f$  é o volume filtrado de amostra ( $cm^3$ ) e a  $DO_{\text{corrigida}}$  é a densidade óptica corrigida das leituras. Seu cálculo depende do método e equipamento utilizados (ver abaixo). Após a extração dos pigmentos do filtro, são feitas novas leituras, de forma a computar, como na equação acima, a absorção de luz pelos "detritos", ( $a_{\text{detritos}}(\lambda)$ ,  $m^{-1}$ ), o que em realidade representa o material particulado não extraído pelos solventes ou oxidado pelo hipoclorito. Já a absorção de luz pelo fitoplâncton ( $a_{\text{fitoplâncton}}(\lambda)$ ,  $m^{-1}$ ) é calculada a partir da relação:

$$a_{\text{fitoplâncton}}(\lambda) = a_{\text{particulado}}(\lambda) - a_{\text{detritos}}(\lambda).$$

Para a quantificação da absorção de luz pelo material dissolvido, deve-se filtrar a amostra imediatamente após a coleta, de preferência em filtros de nylon de 0,2 $\mu\text{m}$  de poro. As leituras devem ser conduzidas em um intervalo mínimo de tempo, de horas a poucos dias, utilizando cuvetas de quartzo longas (maiores de 5cm) em espectrofotômetro de varredura de duplo feixe. Atualmente, as medidas padrão são feitas em um sistema que consiste de um radiômetro acoplado a um grupamento de capilares que simula um caminho ótico de até 2m (Miller et al., 2002). Este material tende a se degradar facilmente, por isso as amostras devem ser mantidas em geladeira e ao abrigo da luz até a análise, de preferência realizada em poucas horas após a coleta. Brancos devem ser feitos com uma solução de água ultrapura e NaCl (previamente queimado em mufla para eliminar contaminantes orgânicos), para simular a salinidade próxima àquela das amostras.

Recentemente, uma compilação de todos os métodos utilizados para medições do coeficiente de absorção da luz para os materiais particulado e dissolvido, tanto em laboratório como em instrumentos *in situ*, encontra-se em fase final de edição, porém já está disponível ([http://ioccg.org/wp-content/uploads/2017/11/chapter\\_5\\_corrigenum.pdf](http://ioccg.org/wp-content/uploads/2017/11/chapter_5_corrigenum.pdf)), e contém protocolos detalhados de coleta e análise, além das equações utilizadas em cada método. A consulta é recomendada ainda na fase do desenho amostral dos trabalhos.

## 7 EXERCÍCIOS DE **MATCH UP**

Um dos grandes desafios para a aplicação dos dados de satélite em oceanografia bio-óptica é a validação e refinamento dos modelos desenvolvidos com instrumentação *in situ*. Estas necessitam de medidas independentes de variáveis biológicas ou biogeoquímicas, simultâneas às passagens de satélite. Os chamados exercícios de *match-up* procuram criar uma base de dados de  $R_{rs}$  dos diferentes sensores e dados de amostras coletadas *in situ*. É importante considerar, em primeira ordem, a qualidade de aquisição e processamento dos dados *in situ* (ver seção 5). Idealmente, as coletas *in situ* devem ser feitas dentro de uma janela de 30 minutos até cerca de 3 horas da passagem do satélite, para evitar as alterações das características da água (Zibordi et al., 2009; Beltrán-Abaunza, et al., 2014), e o tempo deve ser ainda menor para sensores de melhor resolução. Esses exercícios devem ser plane-

dados com antecedência, já que é possível saber o horário preciso das passagens de um dado satélite sobre uma determinada coordenada geográfica, em conjunção com consultas à previsão do tempo, de forma a evitar condições desfavoráveis de mar ou alta cobertura de nuvens.

Como as escalas espaciais da coleta de amostra são pequenas em comparação com a área total de cada pixel da imagem, deve-se também evitar coletas em locais onde existam fortes gradientes horizontais nas águas, como frentes de maré, frentes termo-halinas ou limites de plumas de água doce. Por essas mesmas razões, devem ser evitados locais próximos à costa, ou pouco profundos, onde a influência dos continentes e do fundo na refletância da água é importante, a não ser que o objetivo seja a construção de um algoritmo local. Por fim, é relevante enfatizar que os dados desses exercícios sejam colocados em bases de dados públicas, para que efetivamente contribuam com os estudos globais.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A cor do oceano é uma ferramenta muito útil e de fácil acesso para estudos em oceanografia em escalas local, regional e global, mas a aplicação de dados bio-ópticos em oceanografia no Brasil é ainda modesta. Assim, muito ainda precisa ser pesquisado e é importante que os fundamentos da oceanografia bio-óptica sejam expostos aos alunos das ciências do mar ainda na graduação, para maior incentivo a esta linha de pesquisa.

São ainda poucos os modelos regionais disponíveis para a costa brasileira, como os que existem para a plataforma sul (Giannini et al., 2013), onde as águas de Caso 2, devido à descarga continental do Rio da Prata, tornam os modelos globais pouco eficientes (Garcia e Garcia, 2008). O desenvolvimento de novos modelos requer que as instituições adquiram equipamentos relativamente caros e que demandam elevados custos de manutenção para que sua calibração seja mantida confiável. Assim, há necessidade de integração de esforços interinstitucionais e da criação de um acervo de equipamentos multiusuários, além de exercícios de intercalibração para ampliar a qualidade do conhecimento bio-óptico na região.

Temos de assumir um pouco da responsabilidade de caracterizar a qualidade das nossas águas, estimular o ensino para conduzir a análise de suas mudanças no tempo, sendo a oceanografia bio-óptica uma ferramenta fundamental para esse fim. Por fim, com a iminente melhoria da resolução espacial e espectral dos sensores de cor de oceano, devemos ainda preparar

nossos alunos para lidar com a análise de grande volume de dados.

## REFERÊNCIAS

- Babin, M. and D. Stramski. 2002. Light absorption by aquatic particles in the near-infrared spectral region. *Limnol. Oceanogr.* 47: 911-915. <https://doi.org/10.4319/lo.2002.47.3.0911>.
- Beltrán-Abaunza, J. M., S. Kratzer, and C. Brockmann. 2014. Evaluation of MERIS Products from Baltic Sea coastal waters rich in CDOM. *Ocean Science* 10 (3):377-96. <https://doi.org/10.5194/os-10-377-2014>.
- Boyce, D. G., M. Dowd, M. R. Lewis, and B. Worm. 2014. Estimating global chlorophyll changes over the past century. *Progress in Oceanography* 122 (March). Elsevier:163-73. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.01.004>.
- Carder, K. L., F. R. Chen, Z. P. Lee, S. K. Hawes, and D. Kamykowski. 1999. Semi-analytic moderate-resolution imaging spectrometer algorithms for chlorophyll a and absorption with bio-optical domains based on nitrate-depletion temperatures. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 104 (C3):5403-21. <https://doi.org/10.1029/1998JC900082>.
- Carder, K. L., F. R. Chen, J. P. Cannizzaro, J. W. Campbell, and B. G. Mitchell. 2004. Performance of the MODIS semi-analytical ocean color algorithm for chlorophyll-a. *Advances in Space Research* 33 (7). Elsevier:1152-59. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00365-X](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00365-X).
- Ciotti, A. M., J. J. Cullen, and M. R. Lewis. 1999. A semi-analytical model of the influence of phytoplankton community structure on the relationship between light attenuation and ocean color. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 104 (C1):1559-78. <https://doi.org/10.1029/1998JC900021>.
- Ciotti, A. M. 2005. Fundamentos e aplicações de dados bio-ópticos em oceanografia biológica. In: Souza, R., org. *Oceanografia por satélites*. São Paulo: Oficina de Textos: 205-218.
- Clarke, G. L., G. C. Ewing, and C. J. Lorenzen. 1970. Spectra of backscattered light from the sea obtained from aircraft as a measure of chlorophyll concentration. *Science* 167(3921):1119-21. <https://doi.org/10.1126/science.167.3921.1119>.
- Doxaran, D., R. C. Nagur Cherukuru, and S. J. Lavender. 2004. Estimation of surface reflection effects on upwelling radiance field measurements in turbid waters. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* 6 (7):690-97. <https://doi.org/10.1088/1464-4258/6/7/006>.
- Freitas, F. H. 2007. *Fontes e variabilidade da turbidez costeira: o sensor MODIS como ferramenta*. Monografia (Graduação em Oceanografia). Universidade Federal do Paraná.

74p.

Garcia, C. A. E., and V. M. T. Garcia. 2008. Variability of chlorophyll-a from ocean color images in the La Plata continental shelf region. *Continental Shelf Research* 28 (13): 1568-78. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2007.08.010>.

Garver, S. A., and D. A. Siegel. 1997. Inherent optical property inversion of ocean color spectra and its biogeochemical interpretation: 1. Time series from the Sargasso Sea. *Journal of Geophysical Research* 102 (C8). Amer Geophysical Union: 18607. <https://doi.org/10.1029/96JC03243>.

Giannini, M. F. C., C. A. E. Garcia, V. M. Tavano, and A. M. Ciotti. 2013. Effects of low-salinity and high-turbidity waters on empirical ocean colour algorithms: an example for Southwestern Atlantic waters. *Continental Shelf Research* 59 (May):84-96. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.04.013>.

Gordon, H. R., O. B. Brown, R. H. Evans, J. W. Brown, R. C. Smith, K. S. Baker, and D. K. Clark. 1988. A semianalytic radiance model of ocean color. *Journal of Geophysical Research* 93 (D9):10909. <https://doi.org/10.1029/JD093iD09p10909>.

Gordon, H. R., and A. Morel. 1983. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery. In: Barber, R. T., N. K. Mooers, M. J. Bowman, Zeitzschel (eds.). *A review, lecture notes on coastal and estuarine studies*. New York, Springer-Verlag, p.114.

Gordon, H. R., O. B. Brown, and M. M. Jacobs. 1975a. Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean. *Applied Optics* 14 (2):417. <https://doi.org/10.1364/AO.14.000417>.

Gordon, H. R., and W. R. McCluney. 1975b. Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing. *Applied Optics* 14 (2):413. <https://doi.org/10.1364/AO.14.000413>.

Hooker, S., A. Morel. 2003. Platform and environmental effects on above-water determinations of water-leaving radiances. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*: 187-205.

IOCCG. 2000. *Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex, waters*. IOCCG Report. vol. 3. <http://www.vliz.be/imis/imis.php?module=ref&request=147862>.

IOCCG. 2009. *Remote sensing in fisheries and aquaculture*. IOCCG Report vol. 8. <http://www.ioccg.org/reports/report8.pdf>.

IOCCG. 2010. Atmospheric correction for remotely-sensed ocean-colour products. In Wang, M. (ed.), *Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group*, n. 10, IOCCG, Dartmouth, Canada.

Jensen, J. R. e Epiphanyo, J. C. N. 2009. *Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. São José dos Campos: Parêntese, 598p. ISBN 9788560507061.

- Kampel, M. e E. M. L. M. Novo. 2005. O sensoriamento remoto da cor da água. In: Souza, R., org. *Oceanografia por satélites*. São Paulo: Oficina de Textos: 179-196.
- Kirk, J. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge University Press, 2010. ISBN 9781139493918.
- Lee, Z. P., L. K. Carder, and R. A. Arnone. 2002. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. *Applied Optics* 41 (27). Optical Soc Amer:5755. <https://doi.org/10.1364/AO.41.005755>.
- Lee, Z. P., S. Shang, C. Hu, K. Du, A. Weidemann, W. Hou, J. Lin, and G. Lin. 2015. Secchi disk depth: a new theory and mechanistic model for underwater visibility. *Remote Sensing of Environment* 169 (November):139-49. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.002>.
- Maritorena, S., D. A. Siegel, and A. R. Peterson. 2002. Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications. *Applied Optics* 41 (15). *Optical Soc Amer*:2705. <https://doi.org/10.1364/AO.41.002705>.
- McClain, C. R. 2009. A decade of satellite ocean color observations. *Annual Review of Marine Science* 1 (1):19-42. <http://hdl.handle.net/2060/20110006943>.
- Miller, R. L., M. Belz, C. Del Castillo, and R. Trzaska. 2002. Determining CDOM absorption spectra in diverse coastal environments using a multiple pathlength, liquid core waveguide system. *Continental Shelf Research* 22 (9):1301-10. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(02\)00009-2](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(02)00009-2).
- Mitchell, B. G. 1990. Algorithms for determining the absorption coefficient for aquatic particulate using the quantitative filter technique. In *Ocean Optics 10*, Proceedings of SPIE 1302. The International Society for Optical Engineering, Bellingham, WA: 137-148.
- Mobley, C. D. 2015. Polarized reflectance and transmittance properties of windblown sea surfaces. *Applied Optics* 54 (15):4828. <https://doi.org/10.1364/AO.54.004828>.
- Mobley, C. D. 1999. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements. *Applied Optics* 38 (36):7442. <https://doi.org/10.1364/AO.38.007442>.
- Morel, A. 1988. Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (Case I Waters). *Journal of Geophysical Research* 93 (C9):10749. <https://doi.org/10.1029/JC093iC09p10749>.
- Morel, A. 2006. Meeting the challenge of monitoring chlorophyll in the ocean from outer space. Advance in photosynthesis and respiration. In B. Grimm, R. J. Porra, W. Rüdiger, and H. Scheer, eds. *Chlorophylls and bacteriochlorophylls*. 25:521-34. Springer. [http://www.obs-vlfr.fr/LOV/OMT/fichiers\\_PDF/Morel\\_ChL\\_book\\_06.pdf](http://www.obs-vlfr.fr/LOV/OMT/fichiers_PDF/Morel_ChL_book_06.pdf).
- Morel, A., and L. Prieur. 1977. Analysis of variations in ocean color1. *Limnology and Oceanography* 22 (4):709-22. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.4.0709>.
- Mueller, J. L., G. S. Fargion, C. R. McClain, J. L. Mueller, A. Morel, R. Frouin, C. Davis, R. Arnone, K. Carder, R. G. Steward, S. B. Hooker, C. D. Mobley, S. McLean, B. Holben, C. Pietras, K. D. Knobelspiesse, J. Porter. 2003. Ocean optics protocols for satellite

ocean color sensor validation, Revision 4, Vol. 3: *Radiometric Measurements and Data Analysis Protocols NASA / TM-2003* [S.I.].

O'Reilly, J. E., S. Maritorena, B. G. Mitchell, D. A. Siegel, K. L. Carder, S. A. Garver, M. Kahru, and C. McClain. 1998. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 103 (C11):24937-53. <https://doi.org/10.1029/98JC02160>.

O'Reilly, J. E., S. Maritorena, D. Siegel, M. C. O'Brien, D. Toole, B. G. Mitchell, M. Kahru, F. P. Chavez, P. Strutton, G. Cota, S. B. Hooker, C. R. McClain, K. L. Carder, F. Muller-Karger, L. Harding, A. Magnuson, D. Phinney, G. F. Moore, J. Aiken, K. R. Arrigo, R. Letelier, and M. Culver. 2000. Ocean color chlorophyll a algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: version 4. In S. B. Hooker, and E. R. Firestone, eds. *SeaWiFS Postlaunch Technical Report Series*, vol. 11. SeaWiFS postlaunch calibration and validation analyses part 3 (pp. 9 - 23). Greenbelt, MD: NASA Goddard Space Flight Center.

Saba, V. S., M. A. M. Friedrichs, D. Antoine, R. A. Armstrong, I. Asanuma, M. J. Behrenfeld, A. M. Ciotti, et al. 2011. An evaluation of ocean color model estimates of marine primary productivity in coastal and pelagic regions across the Globe. *Biogeosciences* 8 (2):489-503. <https://doi.org/10.5194/bg-8-489-2011>.

Sathyendranath, S., and T. Platt. 1997. Analytic model of ocean color. *Applied Optics* 36 (12):2620. <https://doi.org/10.1364/AO.36.002620>.

Sathyendranath, S., and T. Platt. 1998. Ocean-color model incorporating transspectral processes. *Applied Optics* 37 (12):2216. <https://doi.org/10.1364/AO.37.002216>.

Tassan, S., and M. G. Ferrari. 1995. An alternative approach to absorption measurements of aquatic particles retained on filters. *Limnology and Oceanography* 40 (8):1358-68. <https://doi.org/10.4319/lo.1995.40.8.1358>.

Tyler, J. E. 1968. The Secchi disc. *Limnology and Oceanography* 13 (1):1-6. <https://doi.org/10.4319/lo.1968.13.1.0001>.

Welschmeyer, N. A. 1994. Fluorometric analysis of chlorophyll a in the presence of chlorophyll b and pheopigments. *Limnology and Oceanography* 39(8). JSTOR: 1985-92. doi:10.4319/lo.1994.39.8.1985.

Werdell, P. J., B. A. Franz, S. W. Bailey, G. C. Feldman, E. Boss, V. E. Brando, M. Dowell, et al. 2013. Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties. *Applied Optics*. 52 (10). OSA: 2019-37. doi:10.1364/AO.52.002019.

Wernand, M.R. 2013. The history of subsea optics. In *Subsea Optics and Imaging*, 35-79. Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857093523.1.35>.

Wernand, M. R., H. J. van der Woerd, and W. W. C. Gieskes. 2013. Trends in ocean colour and chlorophyll concentration from 1889 to 2000, worldwide. Edited by Fabiano Thompson. *PLoS ONE* 8 (6):e63766. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0063766>

Zibordi, G., J.-F. Berthon, F. Mélin, D. D'Alimonte, and S. Kaitala. 2009. Validation of satellite ocean color primary products at optically complex coastal sites: Northern

Adriatic Sea, Northern Baltic Proper and Gulf of Finland. *Remote Sensing of Environment* 113(12):2574–91. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.07.013>.



## CAPÍTULO 4

# AS NOVAS FRONTEIRAS PARA EXPLORAÇÃO DOS RECURSOS NÃO VIVOS: DESAFIOS E PRECAUÇÕES

CARLOS ROBERTO **SOARES**<sup>1†</sup>  
LAURO JÚLIO **CALLIARI**<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná – UFPR

<sup>2</sup> Laboratório de Oceanografia Geológica, Instituto de Oceanografia,  
Universidade Federal do Rio Grande – FURG

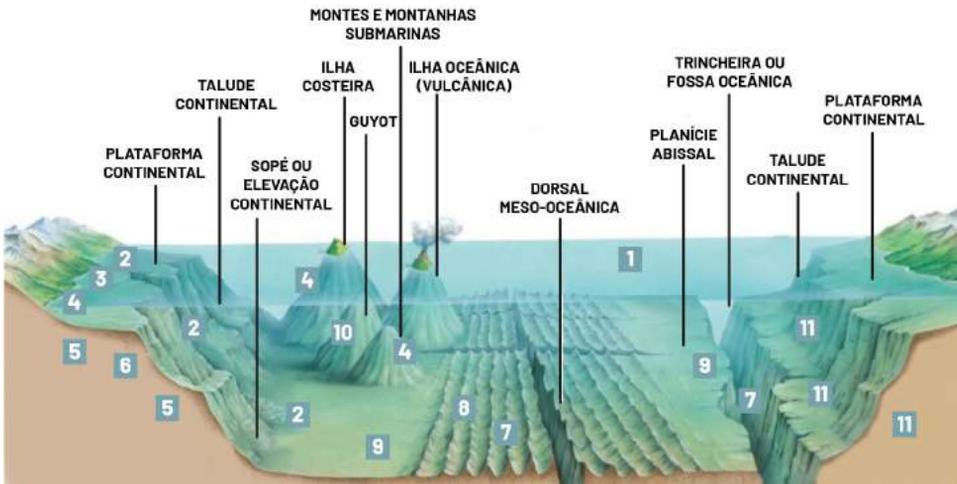
## 1 INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre os recursos não vivos dos oceanos, ou recursos minerais marinhos, intensificou-se nos últimos anos, devido às suas características estratégicas no século XXI. Embora alguns sejam conhecidos desde a primeira grande expedição oceanográfica mundial, a *Challenger*, no século XIX, foi somente a partir do final da década de 1970 que passaram a ter um papel relevante, com a descoberta das atividades vulcânicas nos fundos marinhos associadas à tectônica global. A partir desse momento, compreendeu-se não somente a dinâmica dos fundos oceânicos e suas relações com a evolução da crosta da Terra, mas também que estes estão repletos de recursos de relevada importância para a humanidade.

Do ponto de vista geomorfológico, o fundo oceânico é dividido em distintos ambientes, incluindo as plataformas continentais, os taludes continentais, os sopés ou elevações continentais (que somados compõem as “margens continentais”), as planícies abissais, as cordilheiras meso-oceânicas, as trincheiras ou fossas oceânicas, os montes submarinos (elevações que atingem de 200 a 1.000m de altitude acima do leito marinho, principalmente das planícies abissais), as montanhas submarinas (acima de 1.000m), e ainda os *guyots* e as ilhas oceânicas. Em cada um desses compartimentos existem depósitos de recursos minerais (Figura 1).

Os recursos não vivos dos oceanos que serão aqui considerados são a água e os sais nela contidos, plácidos marinhos, granulados marinhos, fosforitas, petróleo e gás, evaporitos, sulfetos maciços, sedimentos metalíferos, nódulos de manganês (polimetálicos), crostas de cobalto e clatratos (hidratos de gás). Cada um possui gênese distinta, sendo alguns formados por processos atualmente vigentes (depósitos atuais) e outros por processos que ocorreram há milhares/milhões de anos, mas que atualmente repousam nos fundos oceânicos, em lâminas d'água com distintas profundidades. Sob este último aspecto, os recursos podem ser ainda subdivididos em dois grandes grupos: a) aqueles situados em águas relativamente “rasas”, desde a zona costeira até a borda das plataformas continentais (com profundidades aproximadas de até 100m); b) e os localizados além da borda das plataformas, abrangendo os taludes e sopés continentais, planícies abissais, montes/montanhas/elevações submarinas, fossas oceânicas e as dorsais meso-oceânicas, também denominados de depósitos de águas “profundas”. Na indústria de petróleo e gás, todavia, emprega-se também o termo “águas ultraprofundas” para os depósitos situados a mais de 1.500m de profundidade. Nessa classificação,

com relação à profundidade da lâmina d'água, não se enquadra a água do mar propriamente dita e seus sais, por constituírem os componentes básicos dos oceanos.



**FIGURA 1:** Compartimentos ou ambientes dos fundos oceânicos e seus recursos não vivos (ou recursos minerais marinhos). Fonte: modificado de Sharma (2015). 1. Água do mar e sais; 2. Pláceres; 3. Granulados; 4. Fosforitas; 5. Petróleo e gás; 6. Evaporitos; 7. Sulfetos maciços; 8. Sedimentos metalíferos; 9. Nódulos de manganês; 10. Crostas de cobalto; 11. Clatratos.

No primeiro grupo de recursos, encontrados nas plataformas continentais ou de “águas rasas”, ocorrem os depósitos de granulados marinhos, pláceres e fosforitas (geralmente associadas a ilhas oceânicas), com espessuras de alguns metros até dezenas de metros, a partir do fundo marinho. Petróleo, gás e evaporitos são subsuperficiais, podendo estar localizados a milhares de metros abaixo do leito oceânico. Na plataforma continental brasileira existem depósitos de carvão, pertencentes à bacia sedimentar do Paraná, que se projeta para o Atlântico, na faixa entre Araranguá (SC) e Tramandaí (RS). Houve iniciativas de explorar esses recursos no passado pelo Serviço Geológico do Brasil. Embora existam situações similares em outros países, como no Canadá, Reino Unido e Japão, a origem desses depósitos não está relacionada aos oceanos em si, mas que por questões ligadas à evolução geológica, atualmente situam-se sob águas marinhas. Os depósitos de carvão não serão aqui abordados.

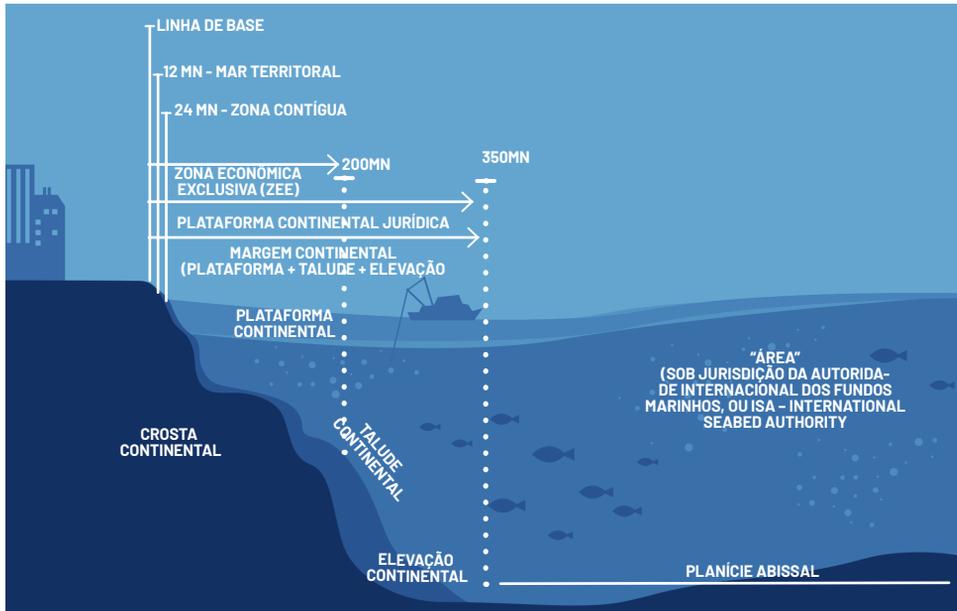
O segundo grupo de depósitos marinhos, situados em águas “profundas”, abrange os nódulos de manganês, crostas de cobalto, sulfetos maciços, sedimentos metalíferos e os clatratos. Assim como os do primeiro grupo, alguns desses depósitos situam-se superficialmente no leito oceânico, como

os nódulos, e em camadas de alguns metros a dezenas de metros a partir do fundo, como os sulfetos maciços, crostas de cobalto e sedimentos metalíferos. Os clatratos possuem distribuição mais complexa, compreendendo desde os taludes continentais até as planícies abissais, ocorrendo na superfície do fundo marinho até milhares de metros abaixo deste.

A descoberta de uma grande quantidade de recursos minerais nos oceanos, concomitantemente a conflitos de interesse pelos distintos países pelos recursos vivos, levou a Organização das Nações Unidas (ONU) a realizar, em 1958, a I Conferência das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (CNUDM), quando inúmeros temas foram debatidos. Vários outros eventos foram sendo realizados até que, em 1982, na Jamaica, chegou-se a um acordo sobre os princípios e normas gerais que os países que aderissem à CNUDM deveriam respeitar. Nessa convenção foram definidos os limites que cada país teria de direito e jurisdição sobre o(s) oceano(s) e mar(es) adjacentes às suas áreas continentais, e quais áreas são consideradas como pertencentes à humanidade.

As áreas sob jurisdição de cada país foram subdivididas em: Mar Territorial (12 milhas náuticas – MN – em direção ao oceano a partir da “linha de base”); Zona Contígua (24MN a partir da linha de base, como fator de segurança nacional); Zona Econômica Exclusiva (200MN a partir da linha de base, também denominada ZEE) e Plataforma Continental, sendo que muitas vezes esta última coincide com a ZEE, como é o caso brasileiro (Figura 2). Deve ser ressaltado que esta não é uma característica global, pois nos países voltados para o Oceano Pacífico, por exemplo, as plataformas são bastante estreitas. De forma geral, os recursos não vivos situados em áreas relativamente rasas estão associados às ZEEs. As áreas além dos limites de jurisdição de cada nação são denominadas de “Alto Mar” e “Zona Internacional do Leito Marinho”, ou ainda a “Área”, onde também existem variados recursos de interesse econômico, que são controlados pela Autoridade Internacional dos Fundos Oceânicos ou Marinhos (ou ISA – International Seabed Authority), vinculada à Organização das Nações Unidas (ONU).

Os limites sugeridos pela CNUDM procuraram dar aos seus signatários uma forma de delimitação em que um país não tivesse mais vantagens do que outro, em função das características de suas regiões costeiras/marinhas. Em alguns casos, a plataforma pode ser estendida além das 200MN, pois a CNUDM prevê como limites externos 350MN a partir da linha de base, ou 100MN da isóbata de 2.500m, passando, caso aceita, a ser denominada de “Plataforma Continental Jurídica” (PCJ), cabendo também a cada nação a sua jurisdição.



**FIGURA 2:** Divisões da Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (CNUDM): Mar Territorial, Zona Contígua, Plataforma Continental, Zona Econômica Exclusiva e “Área”.

Existem várias solicitações junto à ONU de ampliação das áreas das ZEEs através do estabelecimento de PCJs, inclusive do Brasil. De uma forma geral, os depósitos minerais considerados como de águas “profundas” situam-se nessas regiões, bem como os da “Área”, que compreendem a chamada “mineração de águas profundas” ou, na literatura técnica inglesa, *DeepSea Mining* (DSM), que abrange os depósitos minerais situados entre 400 e 6.000m.

Diversos levantamentos sobre os recursos não vivos já foram realizados na ZEE brasileira, através das operações/projetos GEOMAR, REMAC – Reconhecimento Global da Margem Continental Brasileira, e posteriormente o LEPLAC – Levantamento da Plataforma Continental Brasileira. Em 2009, começou a ser desenvolvido o Programa de Prospecção e Exploração de Recursos Minerais da Área Internacional do Atlântico Sul e Equatorial (PROAREA), que tem como propósito identificar e avaliar a potencialidade mineral de áreas com importância econômica e político-estratégica para o Brasil, com ênfase na Elevação do Rio Grande, considerada até o momento como área internacional, mas requisitada à ONU como PCJ nacional. Embora ainda no início, algumas atividades têm sido desenvolvidas no âmbito do projeto REM-PLAC (Recursos Minerais da Plataforma Continental Jurídica do Brasil), que congrega, na sua execução, o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e parceria

com várias universidades.

Em função de sua ampla extensão territorial continental e abundância de recursos minerais subaéreos, além dos aspectos econômicos, o Brasil explora muito pouco de seus recursos não vivos disponíveis em águas sob sua jurisdição. Ao mesmo tempo em que esse aspecto possa parecer vantajoso, o país deixa de investir nas tecnologias de mineração oceânica, que rapidamente se expandem internacionalmente. Nesse contexto, várias empresas de diferentes nacionalidades, com o apoio financeiro ou não de seus governos, exploram recursos não vivos há décadas em áreas sob sua jurisdição, ou mesmo na "Área", com autorização, coordenação e fiscalização da ISA.

Indubitavelmente, a indústria mineral oceânica tenderá rapidamente a se expandir, seja pela diminuição dos recursos nas áreas continentais emergentes, seja pelo promissor futuro mercado ligado às tecnologias da mineração submarina, que podem gerar muitos empregos em distintas áreas, ou ainda como papel estratégico dos Estados no cenário econômico mineral internacional. No presente capítulo veremos os recursos não vivos dos oceanos, suas aplicações e usos industriais, e as formas de exploração. Por último, serão tecidas considerações, de forma genérica, quanto a precauções a serem tomadas nessa atividade desafiadora para o homem.

## 2 OS RECURSOS **NÃO VIVOS**

### 2.1 A ÁGUA DOS OCEANOS E OS SAIS NELA CONTIDOS

A água constitui por si só o maior recurso mineral dos oceanos, seja pelos sais nela dissolvidos, passíveis de serem retirados por processos industriais, seja pela água em si, constituindo a mais relevante fonte hídrica para a humanidade. Nas últimas décadas, a geração de energia vem tendo crescimento vertiginoso, não pela água em si, mas pelas suas diferentes formas de movimentação, seja através das ondas e correntes, seja pela diferença e oscilação do nível da água – as marés. Afora estas, gera-se ainda energia pelas diferenças de temperatura e salinidade da água (processos também descritos na presente obra, no capítulo "Os oceanos: desafios para geração de energia sustentável").

A água do mar contém grandes quantidades de íons dissolvidos, sendo que Na, Mg, Ca e K são os mais extraídos comercialmente. A exploração de cloreto de sódio (NaCl) é milenar na humanidade. O problema com a extração de minerais da água do mar passa pelo enorme volume de água que necessi-

ta ser processada. Existe no Brasil uma planta de extração de Mg, em escala comercial, situada em Barra do Sul (SC), que produz compostos de alta qualidade (como o MgO), para uso na fabricação de medicamentos.

Os íons extraídos da água dos oceanos, em princípio, podem ser retirados sem processos complexos de mineração e com baixo consumo de energia. Uma importante fração dos minerais que são descartados como resíduo, no fim do processo, acaba voltando para o mar. Nesse sentido, os oceanos podem ser considerados como um depósito infinito de materiais que podem ser usados como fechamento do ciclo industrial, tendo, assim, sustentabilidade a longo prazo.

Os oceanos mundiais contêm 97,2% dos recursos de água do planeta. A elevada salinidade da água, aliada aos custos significativos de dessalinização, faz com que a maior parte do suprimento de água doce venha tradicionalmente de aquíferos subterrâneos, rios e lagos situados nos continentes. Entretanto, a mudança nos padrões climáticos, combinada com o crescimento populacional e a baixa disponibilidade de água doce de baixo custo, tem direcionado a atenção da indústria de água para obter água doce a partir da água do mar. O oceano tem duas características únicas como fonte de água – independe de estiagens e as reservas são inesgotáveis.

O processo de dessalinização da água do mar fornece apenas 1% da água potável do mundo, mas essa percentagem cresce anualmente. Esperam-se investimentos da ordem de U\$10 bilhões nos próximos cinco anos, os quais vão aumentar a capacidade de produção diária em mais de 5,7 milhões de m<sup>3</sup>, com previsão de dobrar essa capacidade em 2030 (García-Rodríguez, 2003; Baltasar & García-Rodríguez, 2012). Água dessalinizada é produzida tanto pelo processamento de água salobra (conteúdo de sal < 10g/l), ou da água do mar, com salinidades variando de 30g/l a 44g/l. A dessalinização da água salobra proporciona a obtenção de água a baixo custo, mas é improvável que esta seja a principal fonte alternativa de água para o futuro, devido ao seu volume limitado (< que 1% da água mundial).

No final de 2015 existiam aproximadamente 18.000 plantas de dessalinização no mundo, com uma capacidade de produção instalada de 86,55 milhões de m<sup>3</sup>/dia. Cerca de 44% dessa capacidade (37,32 milhões de m<sup>3</sup>/dia) estão localizados no Oriente Médio e norte da África. Embora seja previsto um aumento contínuo de 7 a 9 % ao ano nessas duas áreas, prevê-se um crescimento acelerado na Ásia, Estados Unidos e América Latina. Os principais sistemas de dessalinização desenvolvidos são: destilação solar, sistema de evaporação relâmpago (*Multistage Flash Distillation*– MSF) e osmose reversa (Earney, 1990).

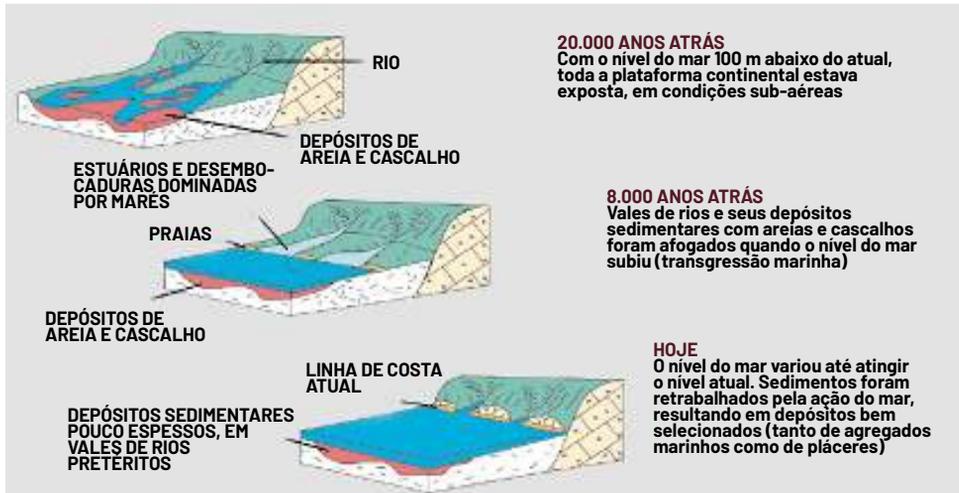
## 2.2 PLÁCERES MARINHOS

Pláceres marinhos são acumulações sedimentares formadas pela concentração mecânica de minerais detríticos (ou terrígenos) de valor econômico, incluindo diversos bens metálicos ou pedras preciosas, originados a partir da decomposição e erosão de rochas-fonte, principalmente ígneas, mas também de rochas metamórficas e sedimentares (Silva, 2000). Podem ocorrer na coluna sedimentar de toda a extensão das plataformas continentais, talude e sopé continental. Todavia, aqueles situados em águas menos profundas, como na plataforma continental interna rasa, são os que têm sido mais explorados.

Pláceres podem ser depósitos pretéritos ou atuais. Os pretéritos, ou relictos, foram formados pelas oscilações do nível relativo do mar durante o Quaternário, estando atualmente situados nas planícies costeiras (formados quando o mar estava mais alto), ou na plataforma continental (quando o mar estava mais baixo). Os depósitos atuais localizam-se nas praias, cujas acumulações se devem à reconcentração dos materiais existentes nos pláceres pretéritos, ou à concentração de material trazido do continente (rochas-fonte) pelos processos vigentes, ou a ambos (Figura 3). O nível do mar em si não é o responsável pela formação dos pláceres, mas sim a ação das ondas, correntes e rios, associados ou não às marés, ou interação de todos estes, que por sua vez mudam de posição espacial concomitantemente à variação do nível do mar.

Os principais elementos químicos/minerais encontrados nos pláceres marinhos são ouro, diamante, cromo (cromita), ferro (magnetita), estanho (cassiterita), titânio (ilmenita/rutilo) e outros minerais de bário, tório, tungstênio e zircão, além dos elementos raros, todos de elevado interesse e valor econômico. As aplicações industriais dos materiais encontrados nos pláceres são: ouro (ornamento e aplicações industriais), diamante (joias, ferramentas de corte), cassiterita (cobertura metálica), rutilo (pigmento, metal), ilmenita (pigmentos), magnetita/zircão (aço, refratários, opacificante cerâmico), granada (abrasivos), monazita (catalisadores), silimanita (refratários) e apatita (fertilizantes)(Silva, 2000).

São clássicas na literatura menções e descrições relativas aos depósitos de diamante na costa da África do Sul e Namíbia, cassiterita na Ásia (principalmente Malásia e Indonésia), ouro no Alasca e Nova Zelândia, ilmenita e rutilo em praias de diversos países em praticamente todos os continentes. Cabe ressaltar que alguns dos elementos raros, como o xenotímio (fosfato de ítrio -  $YPO_4$ ), são encontrados em depósitos de pláceres associados a ilmenita



**FIGURA 3:** Evolução geológica de uma zona costeira, cujas variações do nível do mar podem levar à formação de depósitos de pláceres ou granulados marinhos. Fonte: [http://www.bmapa.org/resources\\_and\\_operations/origins\\_and\\_geology.php](http://www.bmapa.org/resources_and_operations/origins_and_geology.php)

e rutilo, como na Austrália e Brasil.

Pláceres situados em áreas continentais e praias atuais são explorados pelos métodos tradicionais de mineração, sendo de fácil remoção, por serem constituídos basicamente por materiais inconsolidados, empregando-se o desmonte hidráulico (hidraulicking). Aqueles situados nas plataformas continentais são explorados por dragas, como diamantes na Namíbia a profundidades inferiores a 15m. É necessário um maior aprimoramento tecnológico para a exploração de depósitos de maiores profundidades, de até 100m (Gurney et al., 1991).

## 2.3 GRANULADOS MARINHOS

Granulados marinhos possuem origem similar aos pláceres (Figura 1), ou seja, associados às variações do nível relativo do mar, diferindo, todavia, na tipologia da composição dos depósitos. Enquanto os pláceres são formados por minerais de elevada densidade (designados como “minerais pesados”), os granulados marinhos possuem densidade mais baixa, próxima da densidade do quartzo ( $2,7\text{g/cm}^3$ ), e são formados basicamente por areias e cascalhos. Podem ter origem clástica ou terrígena (litoclásticos) – se compostos por  $\text{SiO}_2$  são chamados de siliciclásticos –, ou origem biológica (bioclásticos). Estes últimos constituem os calcários marinhos ( $\text{CaCO}_3$ ), formados tanto por fragmentos de conchas como por algas calcárias (denominadas na França, onde

são exploradas, por *maerl*). Por possuírem granulometria variável, incluem desde areias finas (0,250 – 0,125mm) até seixos (64 – 4mm) (Silva et al., 2000).

Os depósitos de granulados marinhos atualmente existentes nas plataformas constituem depósitos fluviais pretéritos (relictos), quando o nível do mar estava mais baixo que o atual, o qual atingiu o atual limite das plataformas continentais (profundidade média em torno de 100m). Com a subida do nível do mar, esses depósitos foram recobertos pela água (afogados) e, em muitos casos, retrabalhados pela ação das ondas e marés. Os depósitos podem medir de dezenas a centenas de metros de largura, centenas de quilômetros de extensão e de 10 a 20m de espessura (Reineck & Singh, 1980).

Os usos industriais dos granulados marinhos litoclásticos são, principalmente: a) na construção civil, na fabricação de concretos; b) em aterros, enchimento artificial em áreas portuárias, construção de estradas etc.; c) proteção costeira, através de engordas de praia e outras eventuais aplicações (Walker et al., 2016). São ainda usados na indústria química, como na indústria de vidro, em abrasivos e para moldes de fundição. Os recursos bioclásticos são usados na agricultura, como corretivos do solo, e mesmo na fabricação de rações para animais (Silva et al., 2000). Mundialmente, depois do petróleo e gás, são os depósitos marinhos mais explorados dos oceanos.

Assim como muitos dos outros recursos não vivos dos oceanos, no caso brasileiro, as areias e cascalhos disponíveis nas áreas emersas são abundantes e suprem as demandas nacionais, havendo pequena exploração dos granulados marinhos. No exterior, entretanto, os granulados marinhos são um recurso estratégico para muitos países, principalmente os de pequena extensão, densamente ocupados e fronteiros aos oceanos, como Holanda, Bélgica, Dinamarca, Inglaterra, França e Japão, entre outros tantos, cuja exploração se dá através de dragagens.

## 2.4 FOSFORITAS (FOSFATOS MARINHOS)

O fósforo (P) é um elemento essencial à vida, estando ligado ao grande ciclo exógeno desse elemento na Terra (Ciclo do Fósforo). Ocorrem acumulações ou depósitos de fosfatos/fosforitas tanto em áreas continentais como nos oceanos. Discute-se o fato de que as fosforitas são indicadores de profundidade, pois se formam particularmente entre 30 e 300m nos oceanos. Embora conhecidas desde a época da expedição *Challenger*, que relatou a existência de fosforitas entre 400 e 1.000m, não existem depósitos significativos em águas mais profundas.

As fosforitas ocorrem em quatro situações nos oceanos: (1) em pla-

taformas continentais e taludes na costa oeste de massas continentais, nas latitudes de 30° N e S, onde ventos induzem a formação de ressurgências, como os depósitos que ocorrem no Chile e Peru, Namíbia, Austrália, Baixa Califórnia (México) e na margem atlântica do Marrocos; (2) por cimentação e substituição de carbonatos em platôs submarinos e bancos, como o Platô Blake, no sudeste dos Estados Unidos, e o Chatham Rise, na Nova Zelândia; (3) em ilhas e atóis, onde a fonte de fósforo é primariamente o guano no sudoeste do Pacífico (Ilha de Nauru); (4) em montes submarinos intraplacas tectônicas, que ainda carecem de investigações (Rona, 2008).

No Brasil, durante os levantamentos realizados para o Projeto REMAC, constatou-se a existência de depósitos fosfáticos em montes submarinos no Nordeste. Depósitos fosfáticos na ZEE brasileira no Sul (nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul) também foram encontrados durante a realização do Projeto REVIZEE, destacando-se especialmente os que ocorrem na Plataforma de Florianópolis e no talude do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

Os depósitos de fosforita são de especial interesse para o Brasil, visto que existem poucas reservas desse recurso em seu território emerso. O principal uso industrial é a produção de fertilizantes, que são atualmente importados. Embora ainda não seja vantajosa a exploração oceânica das fosforitas existentes na ZEE brasileira, seja por questões econômicas, tecnológicas ou mesmo pela inexistência de estimativas mais precisas dos depósitos existentes, não deixa de ser de interesse político-estratégico governamental.

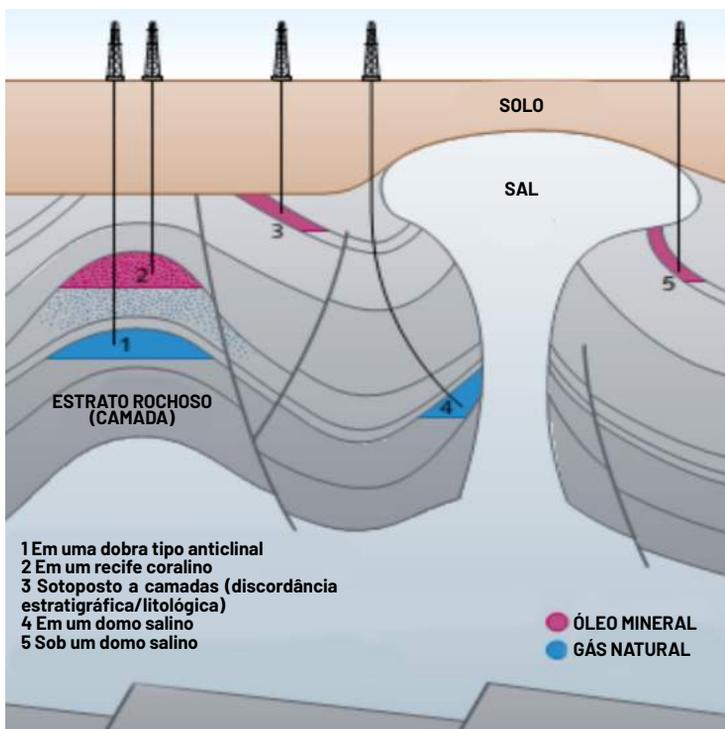
## 2.5 PETRÓLEO E GÁS NATURAL

O petróleo e o gás natural formam-se em milhões de anos, a partir da matéria orgânica advinda principalmente do plâncton (biomassa) que se acumulou no fundo do mar/oceanos, lagos e pântanos, em depósitos que atingem centenas até milhares de metros de espessura, formados através de uma série consecutiva de processos. Primeiramente, o plâncton se acumula no fundo marinho, juntamente com sedimentos finos (silte e argila, de origem continental), que formam um lodo muito rico em matéria orgânica. À medida que novas camadas são depositadas, os sedimentos mais antigos vão sendo soterrados a profundidades crescentes, nas quais as condições de pressão e temperatura propiciam a conversão da matéria orgânica em hidrocarbonetos (Milani et al., 2000). Mesmo atualmente, em camadas sedimentares a profundidades de 2.000 a 4.000m, com temperaturas entre 65 e 120°C, está ocorrendo a transformação da biomassa em óleo/gás, onde é decomposta numa

variedade de produtos químicos, compostos exclusivamente de carbono e hidrogênio, referidos genericamente como hidrocarbonetos.

As rochas nas quais o óleo se forma são chamadas de “geradoras” e contêm cerca de 20% de matéria orgânica. À medida que a formação do óleo aumenta, ele passa a escoar e ascender vagarosamente (por porosidade/permeabilidade) através das rochas e sedimentos subjacentes, podendo atingir a superfície em certos locais. Os “reservatórios” de óleo se formam sempre que na ascendência este é bloqueado por materiais impermeáveis, tais como camadas de sal ou de argila, ou por estruturas geológicas como falhamentos e dobramentos, formando as “armadilhas” (ou reservatórios, Figura 4), onde o óleo e gás acabam se acumulando.

Atualmente, a maior parte da extração de petróleo e gás natural é feita em áreas continentais, mas, do valor total da produção mundial, 37% do óleo e 28% do gás são produzidos nos oceanos (WOR, 2014). A produção antigamente restrita a águas rasas esgotou suas reservas, especialmente no Mar do Norte e áreas costeiras dos EUA como o Golfo do México, o que forçou as companhias petrolíferas a buscar esses recursos em mar profundo. Pode-se definir três diferentes categorias em termos de profundidade quanto à produção de óleo/gás: águas rasas, em profundidades menores que 400m;



**FIGURA 4:** As “armadilhas” de petróleo/gás. Fonte: WOR (2014).

águas profundas, em torno de 1.500m, e águas ultraprofundas, para os depósitos a mais de 1.500m.

A Petrobrás – Petróleo Brasileiro S.A. desenvolve certa liderança na exploração e produção de petróleo em águas profundas e ultraprofundas. Na Bacia de Santos, por exemplo, a associação da tecnologia e o conhecimento adquirido com métodos sísmicos e perfurações culminou com a incorporação de novos conceitos geológicos e geofísicos, definindo novas técnicas para exploração em profundidades superiores a 2.000m (Milani et al., 2000). Essas tecnologias de pesquisa permitem, atualmente, detalhar estratos que contêm óleo e gás a profundidades de 12.000m, contribuindo cada vez mais para a descoberta de novos depósitos.

Estudos recentes indicam que entre 2007 e 2012, em todo o mundo, 481 campos gigantes definidos como contendo quantidades mínimas de 170 milhões de barris de reservas recuperáveis foram encontrados em águas profundas e ultraprofundas, correspondendo a mais de 50% das descobertas (WOR, 2014). Chama a atenção o fato de que os campos de águas profundas são cerca de dez vezes maiores que os encontrados no continente, o que os torna atrativos, mesmo com os altos custos envolvidos. Atualmente, a produção de óleo e gás em profundidades superiores a 400m ainda é limitada e corresponde a apenas 7% da produção mundial, uma vez que somente 38% das reservas de águas ultraprofundas estão em produção, em campos que ainda se encontram em fase de pesquisa detalhada, com casos raros de perfurações realizadas. Embora a última fronteira para a produção desses recursos sejam as águas profundas e ultraprofundas, isso dependerá do preço do óleo no mercado internacional, uma vez que o custo da produção aumenta com a profundidade (Earney, 1990).

No Brasil, a Bacia de Santos contém numerosos campos de óleo e gás, os quais atingem um bilhão de toneladas de óleo e bilhões de metros cúbicos de gás natural, localizados sob uma camada maciça de depósitos de sal, que são “evaporitos” (recurso marinho que também descrevemos no presente capítulo), e que atingem milhares de metros de espessura abaixo do leito oceânico. Essa feição tem sido chamada, popularmente e na literatura técnica, como “camada pré-sal”. Nessa camada, as rochas geradoras do óleo são aquelas depositadas na fase rifte, ou fase inicial da separação entre a América do Sul e a África, com o surgimento do Oceano Atlântico, quando se criaram condições para a deposição de sedimentos ricos em material orgânico em lagos confinados e ambientes anóxicos, os quais preservaram a matéria orgânica, formando assim um óleo de boa qualidade.

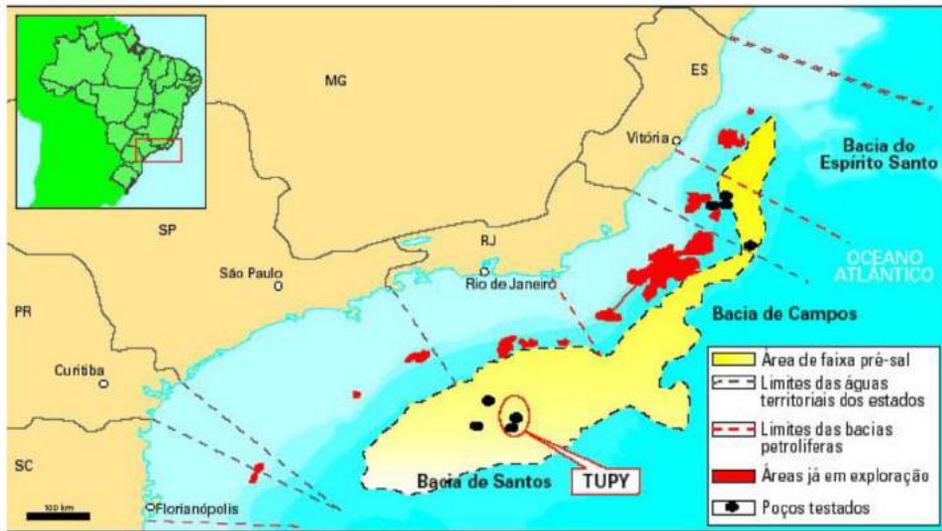
Com a continuidade da separação continental e o preenchimento do

novo oceano com a entrada de água do mar, formou-se um ambiente restrito com alta salinidade. Isso favoreceu o crescimento e a proliferação de colônias microbiais, cuja atividade originou a construção de estruturas biossedimentares litificadas, que cresceram por superposição de lâminas de sedimentos aprisionados pela precipitação de carbonato, originando os microbiólitos, que são as rochas que constituem o reservatório do pré-sal. Acima dessas rochas reservatório, em resposta ao clima, desenvolveu-se um ambiente de deposição ainda mais restrito e de baixa energia, induzindo a precipitação de uma espessa camada de sal marinho, impermeável, configurando assim uma camada selante (uma “armadilha”) muito eficiente para o petróleo, localizado nas rochas carbonáticas subjacentes. Este sistema – rochas geradoras de ambiente não marinho, reservatórios de rocha carbonática e a camada selante de sal marinho acima – constitui no atual contexto exploratório o sistema petrolífero do pré-sal (Costa Fernandes, 2012; Figura 5).

As primeiras plataformas de petróleo e gás nos oceanos surgiram na década de 1940, implantadas em locais com menos de 10 m de profundidade, sobre píers ou rampas conectadas com a terra. Mais tarde, passaram a ser fixadas no fundo do mar. Com o tempo, profundidades cada vez maiores foram sendo atingidas, tornando as plataformas fixas, principalmente em profundidades maiores que 400m, extremamente caras e laboriosas. Passou-se então a usar plataformas flutuantes, cuja exploração atinge atualmente locais com profundidades superiores a 3.000m.

As operações para produção de óleo e gás não estão mais limitadas a plataformas na superfície dos oceanos. Existem agora sistemas fixos no fundo (sistemas submarinos completos) que englobam compressores, bombas e separadores de óleo e gás, completamente selados e montados em estruturas de aço inoxidável, colocados diretamente no assoalho oceânico, montados e interligados com o auxílio de robôs submarinos. Esses equipamentos apresentam várias vantagens, especialmente por trabalharem mais eficientemente quando as bombas e compressores estão próximos à fonte, e ainda poderem separar e purificar localmente a mistura de óleo, água e areia, sem bombeá-los para a plataforma.

O desenvolvimento de equipamentos de pesquisa e exploração de óleo e gás nos oceanos ainda é desafiador, porque os componentes eletrônicos, além de terem de ser à prova d’água, devem suportar grandes pressões e ser altamente confiáveis. A complexidade aumenta com a profundidade, tanto da coluna d’água, como da localização dos depósitos a partir do leito marinho, em subsuperfície.



**FIGURA 5:** O potencial de ocorrência no sistema petrolífero do pré-sal na costa brasileira. Fonte: Costa Fernandes (2012)

## 2.6 EVAPORITOS

Os evaporitos formam-se quando a evaporação de corpos de água salgada (oceanos, mares e lagos) é alta, levando a uma supersaturação e, em consequência, precipitação de elementos/compostos solúveis, principalmente sais, como a halita ( $\text{NaCl}$ ), anidrita ( $\text{CaSO}_4$ ), gipsita ( $\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ ), distintos sais de Mg e K, além de outros minerais como calcita ou dolomita. A deposição ocorre em ambientes de sedimentação com baixo aporte de terrígenos, submetidos a clima seco. Esses depósitos estão associados a ambientes altamente produtivos em matéria orgânica, sendo que no registro geológico se conhecem associações de campos gigantes de petróleo com sequências espessas de evaporitos (que correspondem, no caso da plataforma brasileira, à camada do pré-sal, descrita anteriormente). São usados comercialmente na indústria química, eletroquímica e petroquímica de fertilizantes, além de outras aplicações.

As reservas oficiais de depósitos de evaporitos (também chamados de “sal-gema”) no Brasil somam cerca de 24,44 milhões de toneladas, distribuídas nos estados do Espírito Santo, Sergipe, Alagoas, Bahia, Pernambuco e Amazonas. Na maioria dos casos as camadas de sal estão cobertas por espessa camada de sedimentos, que possibilita a formação de domos de sal,

importantes não só como formadores de estruturas favoráveis à acumulação de petróleo/gás (“armadilhas”), mas também como depósitos de sais propriamente ditos, portadores de depósitos importantes de enxofre (S). Entretanto, são necessárias condições especiais para a ocorrência de enxofre, entre elas, a presença de petróleo.

Existe pouco valor em depósitos evaporíticos marinhos. A extração desses depósitos dá-se com a injeção de água doce aquecida, sendo então a salmoura transportada por tubulações para uma planta de evaporação e consequente precipitação, para posterior aplicação na indústria.

## 2.7 SULFETOS MACIÇOS OU POLIMETÁLICOS

Sulfetos maciços (SM) ou polimetálicos foram descobertos em 1979 na região da Baja Califórnia (México), associados principalmente às zonas de divergência tectônica, onde existem formações denominadas chaminés ou fumarolas negras (*blacksmokers*). Formam-se também nas zonas de convergência de placas, como nas trincheiras ou fossas submarinas, ou ainda em zonas de arcos de ilhas e bacias de retro-arco (ISA, 2008a). No Brasil, existe a menção à existência desse tipo de depósito na bacia oceânica adjacente aos arquipélagos de São Pedro e São Paulo (Martins et al., 2006).

Os SM ocorrem entre 1.500 e 3.700m de profundidade, em locais onde a água fria do mar penetra o fundo marinho por fissuras/fraturas, entram então em contato com o magma existente em subsuperfície, enriquecendo-se, através da dissolução de elementos/compostos, principalmente de metais. Como a água nessas condições torna-se menos densa, ocorre o seu retorno à superfície do fundo oceânico, onde encontrará condições de baixas temperaturas e elevada pressão, precipitando assim o material carreado, na forma de chaminés, composto genericamente por galena, calcopirita, esfalerita, além de metais preciosos como ouro e a prata. Próximo às chaminés depositam-se os sedimentos metalíferos (também descritos neste capítulo), que são os componentes terrígenos, que não foram dissolvidos, trazidos também para a superfície pela ação da água percolada.

As fumarolas possuem colorações variadas, incluindo preto, cinza, branco e amarelo, e o material expelido, na forma de densas nuvens, é formado por finas partículas de sulfetos, sulfatos, óxidos e/ou enxofre. Fumarolas pretas são as formadas em temperaturas mais altas (maiores que 330°C), e as partículas são predominantemente compostas por sulfetos. Fumarolas brancas são formadas por sulfatos e são geradas em temperaturas mais baixas (300 - 150°C). Fumarolas cinza expelem tanto sulfetos como sulfatos, e se for-

mam em temperaturas intermediárias. Fumarolas amarelas ocorrem em muitos locais ligados às zonas de subducção (arcos vulcânicos e bacias de retroarco), formando-se em temperaturas mais baixas e compostas basicamente por enxofre (SPC, 2013).

As concentrações de não-ferrosos e metais preciosos nos SM varia amplamente de região para região. As fumarolas, ao longo das dorsais meso-oceânicas, são em sua maior parte compostas por sulfeto de ferro, de baixo valor econômico. Somados, cobre e zinco geralmente perfazem menos de 10% dos depósitos. Concentrações de ouro são tipicamente menores do que 1g por tonelada. Um tipo especial de depósito ocorre em áreas de lenta divergência tectônica das placas, nos oceanos Atlântico e Índico, onde grandes falhas geológicas expõem a parte superior do manto. Sulfetos maciços nessas áreas possuem maiores teores de cobre e ouro. Depósitos encontrados no sudoeste do Pacífico, como na bacia de Manus, na Papua Nova Guiné, possuem as mais altas concentrações de cobre e ouro conhecidas, sendo atrativas para a mineração. Existem ainda nesses depósitos outros metais raros, de elevado interesse econômico, como o antimônio (Sb), germânio (Ge), índio (In), telúrio (Te) e bismuto (Bi).

## 2.8 SEDIMENTOS METALÍFEROS

Sedimentos metalíferos são um dos produtos da atividade hidrotermal que existem nos fundos oceânicos, principalmente nas regiões adjacentes às dorsais meso-oceânicas. Muitas vezes os depósitos de sedimentos metalíferos estão distantes dos eixos principais de divergência tectônica, pois as placas se deslocam, carreando assim os depósitos em seu leito. Ocorrem em vários locais do globo terrestre, geralmente como camadas de sedimentos basais de 20m de espessura, repousando sobre basaltos nos oceanos Atlântico e Pacífico. As composições dos principais depósitos são apresentadas por McKelvey (1986) e Gurrish (2006).

Os sedimentos metalíferos foram descobertos na expedição *Atlantis II Deep*, em 1965, na zona de divergência tectônica do Mar Vermelho (Rona, 2008). Esses depósitos são os mais conhecidos até o presente, sendo compostos por sulfetos, óxidos, carbonatos e silicatos, resultantes do sistema hidrotermal em que a água do mar percola evaporitos e basaltos no eixo de divergência das placas tectônicas, enriquecendo-se em variados elementos/compostos. Os recursos existentes nesses depósitos são considerados adequados para serem explorados, estimando-se uma produção anual de 60.000t de zinco, juntamente com 10.000t de cobre, 100t de prata e 1t de ouro, por um

período aproximado de 20 anos (ISA, 2004).

Não existem relatos de depósitos de sedimentos metalíferos na ZEE brasileira, pois esta é extensa e abrange praticamente depósitos associados à plataforma continental. Se existirem, devem localizar-se nas adjacências do arquipélago de São Pedro e São Paulo, Trindade e Martim Vaz, que são os pontos mais próximos à zona de divergência tectônica do Atlântico.

## 2.9 NÓDULOS DE MANGANÊS (NM) OU NÓDULOS POLIMETÁLICOS

Os recursos não vivos dos oceanos que possuem maior número de informações na literatura técnico-científica são os nódulos de manganês (NM). Tais informações estão disponibilizadas principalmente pela ISA em sua página eletrônica, abaixo sintetizados. Os nódulos são concreções rochosas formadas por camadas concêntricas de hidróxidos de ferro e manganês ao redor de um núcleo central (areias ou fragmentos biodetríticos, por exemplo), microscopicamente pequeno, a partir do qual se desenvolvem camadas concêntricas, formadas pelos sucessivos estágios de crescimento.

Os nódulos ocorrem em profundidades entre 4.000 e 6.000m nos oceanos, em temperaturas próximas do congelamento da água, altas pressões, e onde a luz do sol não chega (Baker & Beaudoin, 2013). O tamanho dos NM varia desde muito pequenos (microscópicos) a mais de 20cm de diâmetro, mas a maior parte tem entre 5 e 10cm de diâmetro. A sua superfície é comumente lisa, às vezes enrugada, mamilada ou mesmo irregular. O lado do nódulo voltado para os sedimentos do leito marinho é geralmente mais áspero.

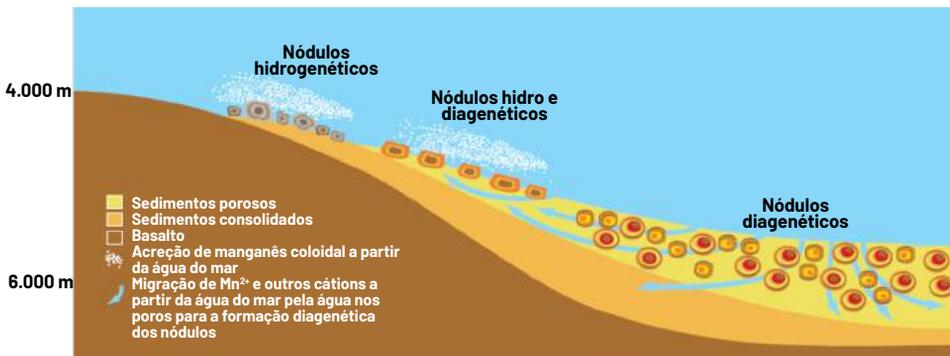
Os nódulos repousam sobre os sedimentos do fundo marinho, semi-enterrados, alguns completamente encobertos por sedimentos. Variam grandemente em abundância, mas passam a ter importância econômica quando excedem 10kg/m<sup>2</sup>. As maiores concentrações de nódulos polimetálicos ocorrem na Zona Clarion-Clipperton (ZCC), que se estende da costa oeste do México até o extremo oeste do arquipélago do Havaí, onde a abundância chega a atingir 75kg/m<sup>2</sup>, com média de 15kg/m<sup>2</sup>. Ocorrem também concentrações significativas na Bacia do Peru, no Pacífico, e em profundidades abissais dos oceanos Índico e Atlântico.

A composição dos nódulos é relativamente simples: vernadita (vernadite, uma forma de óxido de manganês) que se precipita a partir da água do mar; todorokita (*todorokite*, outro óxido de manganês), que se precipita a partir dos poros intersticiais na interface água/sedimentos do fundo marinho, e birnessita (birnessite, uma terceira forma de óxido de manganês), que se forma

a partir da todorokita.

As taxas de crescimento muito lentas dos nódulos sugerem que as reações relacionadas a atividades bacterianas não são os mecanismos mais importantes de crescimento. Todavia, as bactérias possuem importante papel na diagênese sedimentar, que libera manganês, níquel, cobre e lítio, que fazem parte da formação dos nódulos (Hein & Koshinski, 2013; apud SPC, 2013). A atividade bacteriana e a precipitação da matéria orgânica devem ter também algum papel no processo de mineralização.

Vários processos têm sido propostos para explicar a formação dos diferentes tipos de nódulos, que podem ocorrer concomitantemente ou passar de um para o outro durante a formação (Figura 6). São eles: a) hidrogênico ou hidrógeno, no qual os nódulos são formados pela lenta precipitação de compostos metálicos a partir da água do mar, produzindo nódulos com um teor similar de ferro e manganês, e um teor relativamente alto de níquel, cobre e cobalto; b) diagenético, no qual o manganês é remobilizado através da coluna sedimentar do fundo marinho, precipitando-se na interface água/sedimento, e os nódulos são ricos em manganês, mas pobres em ferro, níquel, cobre e cobalto; c) hidrotermal, no qual os metais derivam de fontes quentes associadas a atividades vulcânicas; d) halmirolítico, no qual os componentes metálicos provêm de rochas basálticas pela ação da água do mar; e e) biogênico, no qual a atividade dos micro-organismos catalisa a precipitação dos hidróxidos metálicos.



**FIGURA 6:** Formação dos nódulos de manganês, que ocorre em águas entre 4.000 e 6.500m de profundidade. Fonte: Baker & Beaudoin (2013).

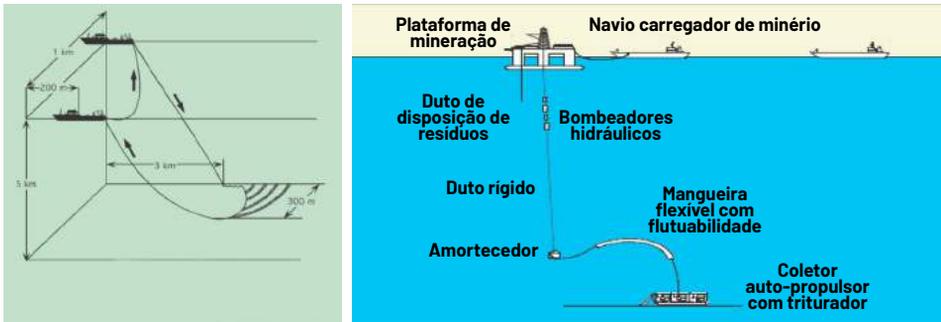
Uma série de fatores em comum aos nódulos foram estabelecidos: a) a sua formação requer uma baixa taxa de sedimentação no local onde eles se

formam, ou algum processo de remoção destes ocorre antes de se formarem, o que possibilitaria que os nódulos se formassem antes de serem encobertos pelos sedimentos; b) O plâncton que concentra elementos traços como cobre, níquel e a matéria orgânica que se deposita no fundo marinho quando esses organismos morrem seria provavelmente a fonte desses metais, sendo eles incorporados aos nódulos; c) o manganês na água do mar provém principalmente de fontes hidrotermais, sendo lixiviado pela ação da água fria que penetra por fendas/fissuras em regiões fundas da crosta, aquecendo-se e enriquecendo-se em metais e outros compostos minerais ao aproximar-se do magma; após esse aquecimento, a água torna-se menos densa, retornando para a superfície do fundo marinho, trazendo esses elementos/compostos.

O crescimento dos nódulos é um dos processos geológicos mais lentos conhecidos – na ordem de 1 cm a cada vários milhões de anos. A idade dos nódulos do Pacífico é de dois a três milhões de anos. Todavia, uma rápida formação de nódulos ferromagnesianos foi registrada próximo a navios afundados durante a Primeira Guerra Mundial. Esse rápido crescimento tem implicação quanto à origem dos seus componentes, e na forma com que se combinaram. Se os nódulos se formam lentamente, processos hidrógenos e diagenéticos devem estar envolvidos. Mas se crescerem rapidamente, outras fontes podem atuar, não somente a água do mar ou sedimentos. Nesses casos, devem acontecer, provavelmente, processos hidrotermais e até mesmo halmirolíticos (SPC, 2013).

Outro fato que requer explicação é: por que os nódulos permanecem na superfície do leito marinho se as taxas de sedimentação são muito maiores do que as de crescimento desses recursos? Supostamente, os nódulos deveriam estar encobertos sob vários metros de sedimentos. Assume-se que organismos bênticos (poliquetas ou vermes de equiúros) limpam os sedimentos recém depositados, dispersando-os para as áreas adjacentes, e até mesmo debaixo dos nódulos, evitando assim o seu soterramento. Sistemas de retirada dos NM vem sendo testados e desenvolvidos desde a década de 1970, por empresas de distintos países, envolvendo dois tipos básicos: a) CLB (*Continuous Line Bucket*); e b) SMH – Sistema de Mineração Hidráulica (*Hydraulic Mining*)(Figura 7).

No Brasil, existem poucas informações sobre os nódulos de manganês nas águas sob jurisdição nacional. Todavia, Martins et al. (2006) mencionam a sua existência nas bacias oceânicas adjacentes à Ilha de Trindade.



**FIGURA 7:** Métodos de exploração dos nódulos de manganês: a) CLB (Continuous Line Bucket); e b) SMH – Sistema de Mineração Hidráulica (Hydraulic Mining). Fonte: <https://www.isa.org.jm/files/documents/EN/Brochures/ENG7.pdf>

## 2.10 CROSTAS RICAS EM COBALTO

Também são denominadas como crostas ferromagnesianas, crostas polimetálicas ou ainda crostas ferromagnesianas ricas em cobalto. Os metais depositados abrangem cobalto, titânio, níquel, platina, molibdênio, telúrio, zircônio e elementos raros. As crostas possuem similaridades e diferenças com os nódulos de manganês (Hein et al., 2000; ISA, 2014). Assim como os nódulos, as crostas são formadas lentamente a partir de metais que estão dissolvidos na água do mar, provindos de fontes continentais, mas também pelas atividades hidrotermais dos fundos oceânicos. Similarmente aos nódulos, as crostas são compostas por uma suíte de metais, cujos conteúdos variam com a proximidade das distintas fontes. Diferentemente dos nódulos de manganês, entretanto, que se formam nas planícies abissais, as crostas se formam em camadas associadas às encostas dos montes e montanhas submarinas, nas cordilheiras meso-oceânicas e nos guyots, geralmente com espessuras menores que 25cm. As condições químicas para sua gênese envolvem um baixo conteúdo de oxigênio em águas frias, inexistência de sedimentos inconsolidados e auxílio de atividade bacteriana. Ocorrem em profundidades entre 400 e 4.000m. Estima-se que o processo de deposição seja de um a seis milímetros a cada milhão de anos – também um dos processos mais lentos conhecidos da Terra (ISA, 2004; 2008b). Devido a esse fator, as crostas têm sido utilizadas em estudos paleoclimáticos e paleoceanográficos.

Comparando-se o alto conteúdo de cobalto nas crostas em relação aos nódulos de manganês localizados nas planícies abissais, a exploração das

crostas é vista como vantajosa, devido à alta qualidade e à sua localização em águas mais rasas, muitas vezes dentro das ZEEs próximas à costa, ou a ilhas oceânicas (ISA 2004; 2008b).

As crostas ocorrem mais significativamente no Oceano Pacífico, onde existem aproximadamente 30.000 montes submarinos, cujos depósitos são mais conhecidos do que os do Atlântico e Índico. A ISA estima que existam 6,35 milhões de km<sup>2</sup> de depósitos, correspondendo a 1,7 % dos fundos oceânicos, com um total aproximado de um bilhão de toneladas de cobalto. Os metais encontrados nas crostas, notadamente o cobalto, manganês e níquel, são adicionados para gerar propriedades específicas na indústria do aço (siderurgia), como dureza e resistência à corrosão. Nos países industrializados, ¼ a ½ do consumo de cobalto é usado na indústria aeroespacial, na obtenção de superligas. Esses metais são também utilizados na indústria química e de alta tecnologia, como células solares fotovoltaicas, supercondutores, sistemas avançados a laser, instrumentos para corte etc.

A exploração das crostas é mais difícil do que os nódulos de manganês, por localizarem-se em encostas submarinas. Opostamente aos nódulos de manganês soltos sobre o leito oceânico, elas estão fortemente grudadas no substrato rochoso. Para uma mineração eficiente, é importante retirar as crostas, mas sem retirar muito substrato. Um método possível consiste no uso de veículos rastejadores (*bottom-crawling vehicles*) interligados a uma embarcação por um sistema de bombeamento elétrico. Braços mecanizados cortadores devem fragmentar as crostas, de forma a minimizar o total de substrato de rocha minerada. Sistemas inovadores têm sido sugeridos, como sistemas de jatos visando à decapagem, lixiviação química nos próprios depósitos, e ainda separação sônica. O Japão é o país líder no desenvolvimento de pesquisas e tecnologias relacionadas às crostas. Várias ideias têm surgido, mas as pesquisas e tecnologias ainda se encontram em estado inicial (ISA, 2004; 2008). Até o presente, emprega-se o método de corte com dentes escarificadores e o corte a jato (*jetcutting*).

## 2.11 CLATRATOS, HIDRATOS DE GÁS (HG) OU HIDRATOS DE METANO

Clatratos (em latim, *gaiolas*) são sólidos formados a partir da combinação entre a água e um ou mais gases (CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>). Fisicamente, são semelhantes a neve compactada ou gelo. São compostos cristalinos, nos quais as moléculas de água, associadas umas às outras, com ligações de hidrogênio, encapsulam gases. Não existe ligação química entre a água (hos-

pedreiro) e o metano ou outros gases (hóspede).

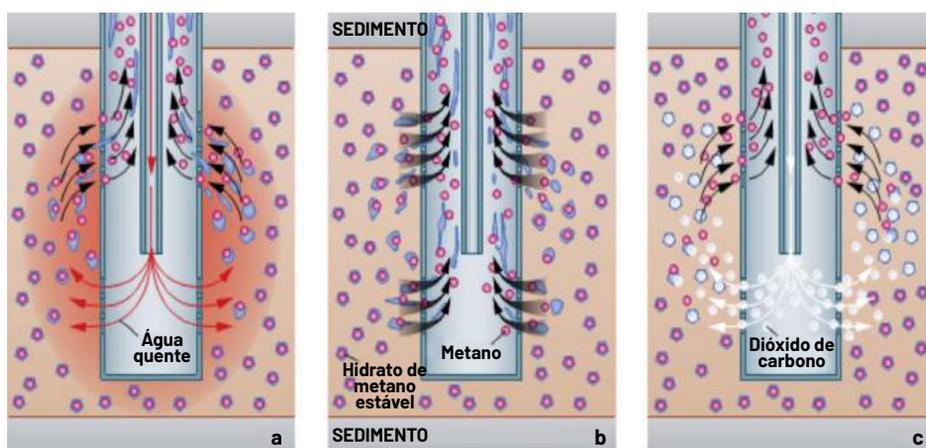
Quando os gases migram para condições apropriadas de pressão e temperatura, na chamada zona de estabilidade dos hidratos de gás, o movimento das partículas gasosas gera uma reação exotérmica, congelando a água adjacente, acabando por formar a cápsula que aprisiona o gás. Quando trazido à superfície, é liberado um volume de gás aproximadamente 164 vezes maior do que seu volume original, e uma pequena quantidade de água. Especula-se que os depósitos de HG possam conter duas vezes mais energia do que todos os combustíveis fósseis já descobertos pelo homem, e seriam a maior reserva de metano do planeta. Como a combustão do  $\text{CH}_4$  não gera compostos de enxofre, nem materiais particulados, considera-se que o seu eventual uso seja menos “sujo” do que os recursos usados atualmente.

Os HG existem no mundo todo e em diversos ambientes. Nos continentes, as condições ideais para sua formação ocorrem nas regiões de altas latitudes com permafrost, que são solos onde a temperatura está permanentemente abaixo do ponto de congelamento da água. Nos sedimentos marinhos, a zona de estabilidade é função da temperatura, pressão, composição da mistura dos gases e impureza iônica dos elementos contidos nos espaços porosos dos sedimentos. As condições ideais para a sua ocorrência são encontradas em sedimentos superficiais e subsuperficiais do talude e elevação continental, onde a pressão hidrostática e a baixa temperatura favorecem a sua formação, em temperaturas que são baixas, mas acima do ponto de congelamento da água (Clennell, 2000).

As jazidas de HG estão em sua maior parte concentradas na costa dos territórios localizados no hemisfério norte, mas existem alguns locais na costa brasileira que possivelmente contêm reservas. O imenso tamanho dos depósitos de HG é razão suficiente para torná-los economicamente importantes, especialmente para os países com depósitos limitados e importadores de combustíveis fósseis.

Vários projetos internacionais vêm estudando como os HG podem ser explorados. É necessário primeiramente determinar se é possível liberar grandes quantidades de metano dos hidratos, método este que seria o mais prático. A produção de metano é fundamentalmente diferente da extração de óleo e gás natural, pois estes últimos fluem naturalmente através das rochas reservatório para as “armadilhas”. Hidratos são sólidos e precisam ser primeiramente dissociados, antes que o gás metano possa ser extraído. Três diferentes procedimentos estão sendo considerados para a sua extração: circulação de água, despressurização e injeção de gás carbônico (Figura 8). No primeiro, água quente é bombeada através de um poço, elevando assim a temperatura,

até o ponto em que o hidrato se rompe, liberando o gás. Na depressurização, o fato de altas pressões prevalecerem nas camadas onde se localizam os HG (pelo peso da coluna d'água e camadas sedimentares), torna-se possível que seja feito um furo diretamente na camada de HG, liberando a pressão, e por fim dissociando o hidrato. No terceiro procedimento, quando é injetado gás carbônico, o metano é liberado, uma vez que o  $\text{CO}_2$  desloca o metano do clatrato, formando uma ligação mais forte com a molécula de água. O hidrato de  $\text{CO}_2$  é significativamente mais estável do que o hidrato de metano. Os pesquisadores sugerem que o  $\text{CO}_2$  necessário para a injeção poderia ser obtido da liberação dos gases emitidos pelas usinas de gás ou carvão. Assim, o  $\text{CO}_2$  não seria liberado para a atmosfera, mas transportado na forma líquida por navios ou gasodutos (absorvido).



**FIGURA 8:** Métodos propostos para a extração de metano dos hidratos de gás: (a) injeção com água quente; (b) depressurização usando bombas; e (c) injeção de  $\text{CO}_2$  nos hidratos. Modificado de WOR (2014).

O primeiro teste de campo no oceano foi feito no início de 2013. Através de um poço na passagem de Nankai, situada a 80 quilômetros da costa japonesa, os pesquisadores recuperaram metano até a superfície numa lâmina d'água de 1.000m (WOR,2014), pelo método da depressurização. Entretanto, a tecnologia necessária para operações a longo prazo necessita ainda ser desenvolvida. Independentemente do método de extração, as taxas de produção dependem fundamentalmente de quão rápido o hidrato se dissocia em subsuperfície.

Recentemente o potencial de impacto negativo sobre o clima da Terra que poderia advir com a mineração do hidrato do ambiente marinho tem sido uma fonte de calorosos debates na comunidade científica (WOR,2010). Preocupações têm sido expressas de que extraíndo hidratos, enorme quantidade de CH<sub>4</sub> seria liberada para a atmosfera. Os gases que provocam o efeito estufa são principalmente o vapor d'água, o CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub> e os CFCs. Particularmente, o metano é um gás 20 vezes mais potente, no sentido de produzir o efeito estufa, do que o CO<sub>2</sub>. Assim, alguns cientistas acreditam que uma maciça liberação de CH<sub>4</sub> dos oceanos poderia acelerar as mudanças climáticas. A possibilidade de HG desestabilizar e levar a deslizamentos submarinos também tem sido aventada, tanto em cenários de degelo, como em glaciações (Ferreira, 2007).

### 3 DESAFIOS E PRECAUÇÕES NA EXPLORAÇÃO DOS RECURSOS NÃO VIVOS DOS OCEANOS

Nos últimos 50 anos, a utilização dos recursos minerais do mar profundo ainda estava distante, mas nos últimos cinco a dez anos houve uma brusca mudança e hoje há consenso de que esses bens de oceano profundo vão ser efetivamente úteis (WOR, 2010). Todavia, por décadas persistem algumas dificuldades para a mineração marinha, tanto em ambientes de plataforma continental, como no oceano profundo: a distância da mina (depósito) ao mercado de consumo, que pode ser de milhares de quilômetros; a construção dos equipamentos de mineração e processamento do minério, juntamente com a engenharia adequada, a requerer muito tempo e investimentos consideráveis, só viabilizados por meio de consórcios internacionais. No caso de mineração na plataforma continental, os custos aumentam em função de problemas meteorológicos, que forçam interrupções no processo de mineração.

Fundamentalmente, a mineração de um dado recurso do leito marinho depende: a) do grau de competitividade econômica e tecnológica em comparação aos depósitos continentais; b) da disponibilidade de substitutos que contemplem as qualidades físicas e químicas necessárias à indústria do bem mineral; c) do reaproveitamento de rejeitos da mineração, explorados muitas vezes por métodos ultrapassados, e que com tecnologias mais modernas podem ser novamente beneficiados; d) de mudanças estratégicas relacionadas aos governos das nações.

Os depósitos de recursos não vivos em áreas emersas ou continentais tendem a ser exauridos ao longo do tempo, com um custo de produção cada vez mais elevado, frente a teores cada vez mais baixos, podendo vir a ser inviáveis economicamente, embora esse cenário, por enquanto, ainda esteja num futuro distante. Mudanças na economia global, com a ascensão, por exemplo, de alguns países orientais que são grandes importadores de *commodities* e fabricantes de produtos eletrônicos, fazem com que os preços dos minerais variem consideravelmente no mercado internacional, além de outros fatores, como a instabilidade política de determinados países (ricos em determinados minérios), que afetam o cenário econômico mineral global.

Existe, assim, uma dimensão geopolítica na qual alguns recursos importantes, como as *terras raras*, com larga aplicação em comunicação e armamentos militares, estão atualmente monopolizados por uma única nação, no caso, a China. Tais fatos suscitam aspectos de suprimento e estratégia nacional, que forçam a procura de independência de mercados externos. Novas tecnologias, como as empregadas em células fotovoltaicas, na indústria aeroespacial, e até mesmo na de telefones celulares, empregam grande quantidade de elementos e compostos químicos, especialmente os metais. Além desses, como explicitamos acima, as terras raras, que são pouco abundantes em nosso planeta, passaram a ser usadas na indústria de vários produtos. Nesse contexto, surgirá a necessidade, quando houver escassez ou exaustão nos continentes, de exploração em outros locais, como os fundos oceânicos, ou mesmo no espaço sideral, já que o consumo de bens minerais pela humanidade historicamente é crescente.

No caso da exploração dos recursos minerais nos fundos oceânicos, existem, a princípio, dois cenários que merecem precauções e que são desafiadores (WOR, 2014): o primeiro abrange aqueles que se situam em águas e fundos marinhos sob jurisdição de uma determinada nação (ZEEs); o segundo abrange os que se localizam em águas internacionais, na chamada "Área", que são considerados uma herança ou bem comum da humanidade e que devem ser compartilhados entre todas as nações, conforme estabelecido pela Conferência das Nações Unidas sobre os Direitos do Mar (CNUDM/1982).

No primeiro caso, o de recursos sob jurisdição de uma determinada nação, cabe a cada Estado legislar sobre as atividades de exploração/pesquisa e exploração. Os compartimentos geomorfológicos (plataforma, talude, sopés continentais etc.) e os recursos não vivos existentes dentro das 200MN (ou mais – em determinadas situações, 350MN) variam entre os países, podendo ser explorados para o consumo interno nacional, principalmente no caso de não haver disponibilidade nas áreas jurisdicionais emersas, e sendo

os preços de importação elevados. Todavia, dependendo da demanda internacional, recursos minerais marinhos de um determinado país podem vir a ser exportados.

No segundo caso, o de recursos situados na “Área”, cabe à Autoridade Internacional dos Fundos Oceânicos (ISA) conceder as licenças ou autorização de exploração e exploração a uma determinada nação ou, mais recentemente, a parcerias entre empresas privadas e determinados governos. A ISA assegura que os lucros obtidos a partir da mineração oceânica serão compartilhados equitativamente, evitando a situação em que apenas as nações ricas tenham acesso a esses recursos.

Todavia, os processos físicos, geológicos, químicos e biológicos que ocorrem nos oceanos possuem escalas espaciais e temporais distintas, desde locais até globais. Mesmo com o estabelecimento de limites jurisdicionais pela CNUDM entre os países e a “Área”, a exploração de um ou mais recursos num determinado local pode ter reflexos/impactos sociais, ambientais e políticos nas áreas adjacentes, sob outra soberania, que pode(m) deflagrar conflitos. Em outras palavras: embora tenha havido um grande avanço com a Convenção, processos naturais dos oceanos não respeitam limites geopolíticos – nem neles se enquadram.

Um desafio que tem sido levantado pela sociedade em geral e a comunidade científica é a compreensão efetiva dos impactos decorrentes da mineração submarina, principalmente os ambientais, nos habitats cujo funcionamento e serviços ambientais prestados ainda são pouco conhecidos ou mesmo insuficientes. Este fato tem sido alertado pelas redes sociais ou outros meios de divulgação por várias organizações não governamentais (ONGs), como o Greenpeace, Deep Sea Mining Campaign e Friends of the Earth, tanto para empreendimentos em águas sob jurisdição de uma determinada nação, como aqueles já em execução ou exploração, coordenados e supervisionados pela ISA na “Área”, especialmente os nódulos de manganês.

Similarmente às jazidas de minérios continentais, os depósitos oceânicos podem estar localizados superficialmente no leito, ou em subsuperfície, independentemente da espessura da lâmina d’água. Deve ser lembrado que a água do mar, em si, é um dos recursos, e que sua exploração já é feita nas zonas costeiras de muitos países por meio de distintas tecnologias. No caso dos recursos situados no fundo marinho, mais fáceis de serem estudados/avaliados (cubados), o método de mineração empregado é o de escavação dos fundos, através de dragagens, como é o caso dos granulados marinhos, depositados na forma de estratos sedimentares, e da raspagem dos fundos, como os nódulos de manganês, que são pelotas isoladas soltas sobre

o substrato, também por meio de dragas. São esses os recursos não vivos marinhos mais efetivamente explorados na atualidade (juntamente com petróleo e gás, de subsuperfície), e não há dificuldade tecnológica no processo de sua mineração. A indústria naval de dragas tem crescido e avançado rapidamente nas últimas décadas, como reflexo das mais variadas aplicações desses equipamentos, que não se restringem à mineração oceânica, mas também são usadas na abertura/manutenção de canais de acesso aos portos em regiões costeiras, na engorda de praias em processo de erosão, entre tantas outras aplicações específicas em obras de engenharia costeiras e marinhas.

Depósitos subsuperficiais no substrato oceânico já demandam maior complexidade quanto à pesquisa/exploração e exploração. No caso de petróleo e gás, métodos geofísicos têm sido de grande valia na localização das “armadilhas”, pois esses recursos minerais dependem dessas estruturas para a sua acumulação, diferentemente dos outros recursos subsuperficiais oceânicos. Após a localização das armadilhas é que são determinados os pontos das sondagens (furos), que atingirão o depósito, em processo de mineração denominado de *fluidização*. Obviamente, a complexidade dos projetos é maior à medida em que as águas se tornam mais profundas e os depósitos localizados a milhares de metros abaixo do leito marinho. Devem ser tomadas precauções nesse tipo de depósito, que pode estar naturalmente confinado e sob pressão. Quando da realização de furos, ou falhas na operação das estruturas de exploração, óleo/gás começam a vazar, em processo denominado de *blow out*, decorrendo vazamentos difíceis de conter, ou mesmo a explosão das estruturas de exploração, como as plataformas de petróleo ou outros equipamentos mais modernos de elevada tecnologia, que são fixados no fundo marinho, à medida que a exploração desses recursos se dá cada vez em águas mais profundas.

Outros métodos de mineração nas áreas continentais, como a construção de túneis, por exemplo, também podem ser aplicados nos substratos oceânicos, além da escavação, raspagem e fluidização. Todavia, esse tipo de exploração é usado em poucos países. Existe extração submarina de carvão, por exemplo, através de túneis que se iniciam no continente, no Reino Unido, Turquia, Taiwan, Canadá, Austrália, Nova Zelândia, Chile e Japão. Em alguns casos a mineração foi abandonada, como em Lota, no Chile, a 40 km ao sul de Concepción, onde, entre outros fatores, a mecanização e mudanças nacionais nas leis trabalhistas (problemas de saúde nos mineiros) determinaram a redução dessa atividade e a tornaram inoperante.

Independentemente dos métodos de mineração, a complexidade da exploração dos recursos minerais marinhos aumenta com a profundidade da

lâmina d'água nos oceanos, cujos ambientes são de difícil acesso, relevo irregular, pressões elevadas, e temperaturas da água que variam de muito frias a muito quentes, e sem qualquer luminosidade. Sem dúvida, o uso da robótica num futuro próximo, com equipamentos conduzidos por controle remoto a partir de navios/estações de apoio, serão de grande valia tanto na exploração/pesquisa, como na exploração.

O processo de mineração oceânica é idêntico ao das áreas continentais, constituindo-se, basicamente, da extração do minério e seu transporte até uma planta de beneficiamento. Esta pode estar localizada no continente ou em ilhas. Já se discute atualmente a construção de estações "flutuantes" no mar, onde ocorrerá a concentração do(s) elemento(s)/substâncias de interesse, processo em que uma pequena parte é aproveitada (teor de concentração) e o restante torna-se "rejeito". Esse aspecto, o da destinação dos rejeitos nos oceanos, ainda é muito discutida no âmbito internacional. Jazidas oceânicas possuem, sob alguns aspectos, vantagens sobre as terrestres, visto que não requerem instalações e construção de vias de acesso, túneis, entre outras estruturas, além do fato de que navios/barcaças de apoio da exploração podem ser movidos para outros locais passíveis de mineração após o depósito estar exaurido, de modo que os custos tornam-se relativamente baixos (Kenway, 2015).

Não deve ser esquecido que, assim como as áreas continentais, os fundos oceânicos também estão sujeitos a riscos geológicos naturais – abalos sísmicos/terremotos, tsunamis, escorregamentos (principalmente nos taludes continentais), erosão, atividades vulcânicas, entre outros, muitos dos quais ainda pouco estudados. Toda e qualquer iniciativa com relação à pesquisa/exploração e exploração deve considerar tais aspectos.

Mesmo que muitos dos recursos não vivos marinhos ainda sejam pouco conhecidos ou explorados, países e empresas privadas (ou mesmo uma parceria entre estes) que executem ou venham a realizar pesquisas quanto a tecnologias de mineração deterão as patentes desse promissor futuro mercado, que poderá gerar muitos empregos.

Até o momento, o foco maior da mineração oceânica está nos nódulos de manganês, que geralmente estão localizados em profundidades superiores a 4.000m, crostas de cobalto nos flancos de montes/montanhas submarinas (entre 1.000 e 3.000m), sulfetos maciços e sedimentos metalíferos, que se formam em áreas com atividade vulcânica próximo ao contato de placas tectônicas, em profundidades entre 500 e 4.000m. Por último, existem os clatratos ou hidratos de gás, cujos depósitos estão localizados entre 350 e 5.000m de profundidade, embora sejam necessários muitos anos ainda

para viabilizar uma avaliação exata dos potenciais e riscos de sua mineração industrial, pois a extração, até o presente, só teve sucesso em experimentos laboratoriais (WOR, 2010).

No Brasil, a mineração dos recursos existentes nas áreas sob jurisdição nacional ainda é incipiente. Está restrita à extração de magnésio da água do mar em uma planta industrial em Barra do Sul (SC), do sal marinho (em salinas, cada vez mais mecanizadas, no Nordeste), de minerais pesados de pláceres marinhos, tal como o da planta em escala industrial em Mataraca (Paraíba), algas calcárias no Maranhão, Espírito Santo e Ceará e de areia da plataforma continental, para engordamento de praias em vários setores costeiros. Existe ainda exploração no Espírito Santo, em pequena escala, de granulados bioclásticos (algas calcárias não vivas, semelhantes aos depósitos de *maerl*, explorados na França). Porém, há severas restrições ambientais para essas atividades.

## REFERÊNCIAS

- BAKER, E.; BEAUDOIN, Y. (Ed.). 2013. Manganese nodules; a physical, biological, environmental and technical review. *Deep sea minerals* 1B, 51 p.
- BALTASAR, P.; GARCÍA-RODRÍGUEZ, L. 2012. Current trends and prospects in the design of seawater reverse osmosis desalination technology. *Desalination*, 284, p. 1-8.
- COSTA FERNANDES, L.P. (Org). 2012. *O Brasil e o mar no século XXI: relatório aos tomadores de decisão do país*. Niterói, CEMBRA, 540 p.
- EARNEY, F.C.F. 1990. *Marine mineral resources*. Ocean Management and Policy Series. Routledge, 387 p.
- FERREIRA, D.B.D. 2007. Os hidratos de metano: fonte energética do futuro ou fonte de risco ambiental? *Finisterra*, v. 42, n. 83, p. 79-90.
- GARCÍA-RODRÍGUEZ, L. 2003. Renewable energy applications in desalination: state of the art. *Solar Energy*, v. 75, n. 5, p. 381-393.
- GURNEY, J.J.; LEVINSON, A.A.; MITH, H.S. 1991. Marine mining of diamonds off the West Coast of Southern Africa. *Gems & Gemology*, p. 206-219.
- GURVISH, E.G. 2006. *Metalliferous sediments of the world ocean: fundamental theory of deep-sea hydrothermal sedimentation*. Springer, Bremerhaven, 415 p.
- HEIN, J.R.; KOSCHINSKY, A.; BAU, M.; MANHEIM, F.T.; KANG, J.-T.; ROBERTS, L. 2000. Cobalt-rich ferromanganese crusts in the Pacific. In: CRONAN, D.S. (Ed). *Handbook of marine mineral deposits*. CRC Press, Boca Raton, Florida, p. 239-280. (CRC Marine Science Series).

- ISA – INTERNATIONAL SEA BED AUTHORITY. 2004. *Marine mineral resources: scientific advances and economic perspectives*. United Nations/ISA, 118 p. Disponível em: <https://www.isa.org.jm/files/documents/EN/Pubs/ISA-Daolos.pdf>
- ISA – INTERNATIONAL SEABED AUTHORITY. 2008a. *Polymetallicsulfides*. Disponível em: <https://www.isa.org>
- ISA – INTERNATIONAL SEABED AUTHORITY. 2008b. *Cobalt-rich crusts*. Disponível em: <https://www.isa.org.jm/files/documents/EN/Brochures/ENG9.pdf>
- ISA – INTERNATIONAL SEABED AUTHORITY. 2014. *Cobalt-rich crusts*. Disponível em: <https://www.isa.org.jm/documents/cobalt-rich-crusts>.
- KENWAY, S. 2015. Deep sea extractive activities: seabed mining and deep sea drilling. *RepriskEsg Business Intelligence*, 6 p.
- MARTINS, L.R.; BARBOZA, E.G.; ROSA, M.L.C.C. 2006. Nódulos polimetálicos e outros depósitos de mar profundo: o retorno do interesse. *Gravel*, n. 4, p. 125-131.
- McKELVEY, V. E. 1986. Subsea mineral resources. Dallas, U.S. *Geological Survey*, 106 p. (U.S. Geological Survey Bulletin 1689-A).
- MILANI, E.J.; BRANDÃO, J.A.S.L.; ZALÁN, P.V.; GAMBOA, L.A.P. 2000. Petróleo na margem continental brasileira: geologia, exploração, resultados e perspectivas. *Brazilian Journal of Geophysics*, v. 18, n. 3, p. 351-396.
- REINECK, H.E.; SINGH, I.B. 1980. *Depositional sedimentary environments: with reference to terrigenous clastics*. Berlin, Springer-Verlag, 439 p.
- RONA, P.A. 2008. The changing vision of marine minerals. *Ore Geology Reviews*, v. 33, p. 618-666.
- SHARMA, R. 2015. Environmental issues of deep-sea mining. *Procedia Earth and Planetary Science*, v. 11, p. 204-211.
- SILVA, G.C. 2000. Plácemes marinhos. *Brazilian Journal of Geophysics*, v. 18, n. 3, p. 327-336.
- SILVA, C.G.; FIGUEIREDO JUNIOR, A.G.; BREHME, I. 2000. Granulados litoclásticos. *Brazilian Journal of Geophysics*, v. 18, n. 3, p. 319-326.
- SPC – SECRETARIAT OF THE PACIFIC COMMUNITY. 2013. Deep sea minerals: sea-floor massive sulphides, a physical, biological, environmental, and technical review. In: BAKER, E.; BEAUDOIN, Y. (Eds.). *Deep sea minerals*, vol. 1A, Secretariat of the Pacific Community, 51 p. Disponível em: [http://dsm.gsd.spc.int/public/files/meetings/TrainingWorkshop4/UNEP\\_vol1A.pdf](http://dsm.gsd.spc.int/public/files/meetings/TrainingWorkshop4/UNEP_vol1A.pdf)
- WALKER, R.; BOKUNIEWICZ, H.; CARLIN, D.; CATO, I.; DIJKSHOORN, C.; DE BACKER, A.; VAN DALFSEN, J.; DESPREZ, M.; HOWE, L.; ROBERTSDOTTIR, B.G.; ROZEMEIJER, M.; RUSSELL, M.; STOLK, A. 2016. *Effects of extraction of marine sediments on the marine environment 2005-2011*. Copenhagen, International Council for the Exploration of the Sea. ICES Cooperative Research Report, n. 330, 206 p.
- WOR – WORLD OCEAN REVIEW. 2010. *Living with the oceans*. Maribus/Kiel Marine

Sciences/IOI/MARE, 232 p. Disponível em: <http://worldoceanreview.com/en/wor-1/>  
WOR – WORLD OCEAN REVIEW. 2014. *Marine resources: opportunities and risks. Ma-  
ribus and future ocean*, Kiel Marine Sciences. 161 p. Disponível em: [https://worldocean-  
review.com/wp-content/downloads/wor3/WOR3\\_english.pdf](https://worldocean-<br/>review.com/wp-content/downloads/wor3/WOR3_english.pdf)





## CAPÍTULO 5

# OS OCEANOS: OS DESAFIOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA SUSTENTÁVEL

XAVIER **CASTELLO**<sup>1</sup>

SEGEN FARID **ESTEFEN**<sup>2</sup>

CARLOS ROBERTO **SOARES**<sup>3†</sup>

<sup>1</sup> Vestas Wind Systems A/S, Design Centre Porto, Portugal

<sup>2</sup> Laboratório de Tecnologia Submarina, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

<sup>3</sup> Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná – UFPR

## 1 INTRODUÇÃO

Muito se fala hoje sobre o desenvolvimento de energia de forma sustentável. Isso se tornou importante ao percebermos que estamos vivendo uma crescente escassez dos recursos naturais, que antes eram abundantes e disponíveis a baixo custo de produção. Também estamos percebendo como o uso descontrolado e irresponsável pode afetar o meio ambiente e, por consequência, a nós mesmos. Em um desenvolvimento sustentável, a quantidade de energia renovável produzida é aquela que seria obtida em uma condição ideal de economia de mercado, de sistemas sociais e de retirada equilibrada de recursos do meio ambiente.

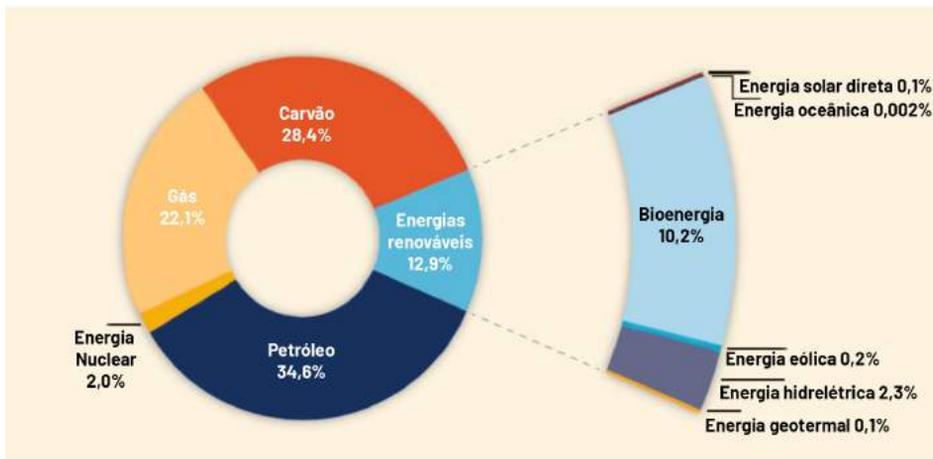
A energia renovável traz o principal benefício de não concorrer para as mudanças climáticas, mas pode ainda contribuir para o desenvolvimento social e econômico, para a obtenção de uma fonte de energia segura, e para reduzir os impactos negativos no meio ambiente e na saúde. Os oceanos oferecem um potencial amplo de fontes de energia renovável que se encaixa muito bem nos termos de sustentabilidade. Além da energia elétrica, podemos produzir calor, água potável e pressurizada, produtos da biotecnologia marinha e químicos.

Existem várias fontes de energia, renováveis ou não: bioenergia, energia solar, energia geotérmica, hidroeletricidade, energia eólica e energia dos oceanos. Os oceanos contêm um grande e variado potencial de formas de energia a serem convertidas para o nosso uso prático. Contudo, algumas delas são de produção tecnicamente difícil ou muito cara. A definição de potenciais técnicos e teóricos nos ajuda a entender como é calculada a energia disponível nos oceanos.

O **potencial técnico de energia renovável** é obtido pela total implementação das tecnologias atualmente praticadas, mas sem levar em conta os custos ou barreiras políticas de uso. Contudo, geralmente são consideradas as restrições técnicas e práticas de uso das tecnologias.

O **potencial teórico de energia renovável** é calculado levando em consideração os parâmetros naturais e climáticos (e.g., irradiação solar na superfície do continente). O cálculo pode ter boa exatidão, porém tem consideração prática mais limitada. Pode ser usado para estabelecer um limite superior de recursos energéticos disponíveis baseados nos princípios físicos e de conhecimento científico. O resultado, contudo, não considera as barreiras ou perdas por eficiência de conversão das formas de energia desde sua fonte até a disponibilização para a sociedade.

A produção de energia dos oceanos ainda é bastante limitada. De acordo com o último relatório especial sobre fontes de energia renovável do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Edenhofer et al., 2011), a energia atualmente obtida dos oceanos é da ordem de 0,002% do total, como visto na Figura 1. Mesmo a energia eólica, que tem crescido muito nos últimos anos e pode ser obtida tanto em terra como no mar, participa com a pequena fração de 0,2%.



**FIGURA 1:** Distribuição das fontes de energia primária mundiais. Fonte: Edenhofer et al. (2011).

Segundo as estimativas apresentadas no relatório do IPCC, o potencial técnico global anual de energia dos oceanos é da ordem de 331EJ (331E18 Joules), em sua estimativa máxima. O potencial teórico é da ordem de 7400EJ. Esses valores superam o consumo total mundial e, portanto, representam um potencial atrativo para desenvolvimento de energia sustentável. No Brasil, o potencial teórico de energia dos oceanos é avaliado em 114GW, levando em conta somente marés e ondas (Fernandez, 2012). Considera-se que o estágio do desenvolvimento das tecnologias para extrair energia dos oceanos está na fase pré-comercial. Nessa fase, as estimativas de custo de produção da energia são obtidas com projetos experimentais pilotos, o que implica um nível de incerteza de cerca de 30%.

A energia produzida por barragens de marés é a única fonte de energia comercial da qual se conseguiu estimar um custo de operação confiável, entre 0,12 e 0,32US\$/kWh (centavos de dólar americano por quilowatt-hora). A energia eólica *offshore* é outra fonte que avança rapidamente para uma quantificação estável de custo. Com o avanço rápido da tecnologia de conversores

e levando em conta os investimentos atuais, a Ocean Energy Systems da International Energy Agency (OES) (Melo; Villate, 2015) estima que até 2050 teremos no mundo até 330GW de capacidade instalada e a geração de 300.000 empregos diretos.

## 2 TECNOLOGIAS

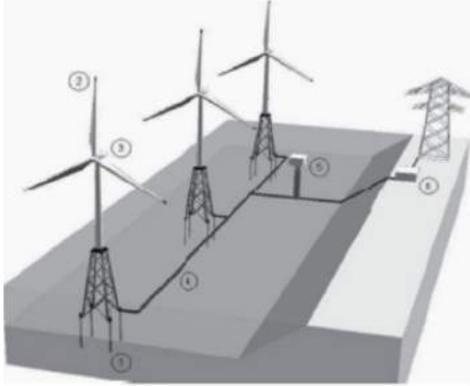
### 2.1 ENERGIA EÓLICA MARINHA/COSTA-AFORA (*OFFSHORE*)

A geração de energia eólica em regiões costeiras e/ou costa-afora (*offshore*), em conjuntos de turbinas chamados de fazendas eólicas marinhas (FEM), possui basicamente os mesmos princípios que os parques eólicos das áreas continentais, baseando-se no princípio da conversão da energia cinética dos ventos em energia potencial (eletricidade). Esta é a fonte de energia mais promissora dentre todas as demais possíveis fontes renováveis, tendo rápido crescimento nas últimas décadas, principalmente nos países desenvolvidos.

As FEM apresentam como vantagens (IRENA, 2016): benefício maior e mais consistente do que os parques eólicos localizados no continente por aproveitarem fluxos de vento com menor turbulência; na escala de produção, geram pouca emissão de carbono quando comparadas aos combustíveis fósseis, energia nuclear ou biomassa; podem produzir eletricidade próximo a áreas costeiras densamente povoadas; podem ser instaladas relativamente rápido na escala GW; comparativamente às instalações em regiões populosas, são menos percebidos os efeitos (impactos) visuais como o tamanho das turbinas e os ruídos; podem aproveitar muitas das tecnologias desenvolvidas por décadas pela indústria eólica costa-adentro (continental).

As FEM têm sido instaladas mais comumente em lâminas d'água inferiores a 50m, mas há uma forte tendência de se expandirem para áreas de maior profundidade. Os componentes das turbinas que compõem uma FEM, de maneira geral, são as torres, fundações e aparatos de geração e transmissão de energia, incluindo subestações (Figura 2). Todavia, por estarem situadas no mar, a sua construção, instalação e manutenção são mais complexas do que nos parques em áreas continentais. As turbinas das FEM podem ser fixas no leito marinho ou flutuantes na água. As fixas podem ser de três grupos ou tipos básicos: a) monoestacas (*monopiles*); b) *Jacket* (com fundações e estruturas metálicas); e c) estruturas de gravidade, cujas fundações são geralmente de concreto (Figura 3). As turbinas flutuantes podem ser: a) boia

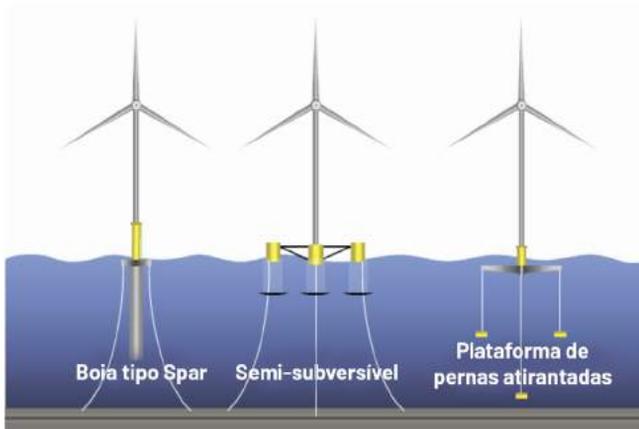
Spar (Spar buoys); b) semi-submersíveis; e c) plataformas com pernas tensionais (tension-leg platforms)(Figura 4).



**FIGURA 2:** Componentes básicos de uma fazenda eólica marinha: 1) fundação; 2) aerogerador ou turbina; 3) Nacelle; 4) Linha de transmissão; 5) subestação costa-afora; 6) conexão com as linhas de transmissão no continente. Fonte: Transportation Research Board (2013).



**FIGURA 3:** Tipos de fundações fixas ao leito de fazendas eólicas marinhas. Fonte: IRENA (2016).

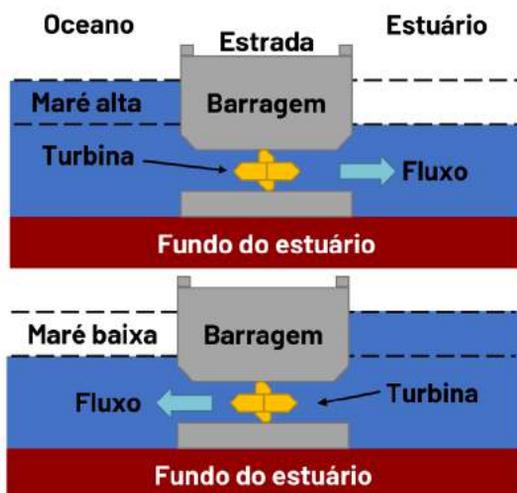


**FIGURA 4:** Diferentes tipos de fundações para fazendas eólicas marinhas flutuantes. Fonte: IRENA (2016).

## 2.2 MARÉS

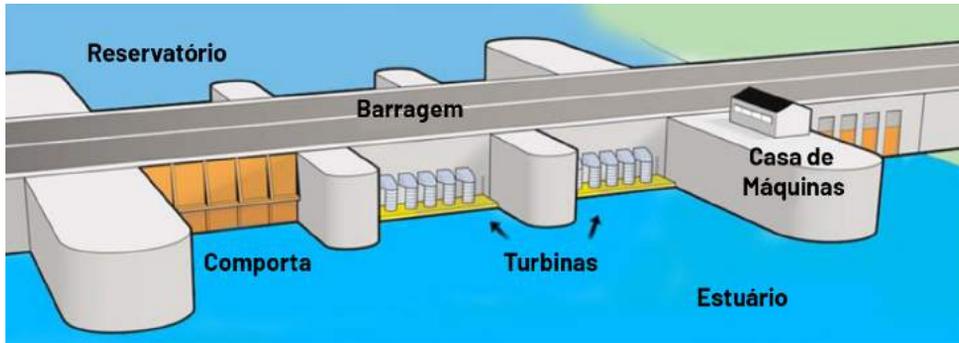
### 2.2.1 VARIAÇÃO DE NÍVEL DE MARÉ

A variação de marés é derivada das forças de atração gravitacional do Sol e da Lua sobre a Terra. A aplicação mais conhecida de uma usina maremotriz está localizada na França, no estuário do rio Rance. Foi instalada em 1966 e possui 24 turbinas que geram em média 62MW. As turbinas são do tipo Kaplan de eixo horizontal e com pás de inclinação variável que produzem torque para geração elétrica nos dois sentidos de vazão do rio, ou seja, na enchente e na vazante da maré, que varia entre 9 e 14m de altura (Charlier; Finkl, 2009). A Figura 5 mostra um esquema desse tipo de usina.



**FIGURA 5:** Esquema de funcionamento de usina de marés em barragem. Fonte: X. Castello. baseado na referência Charlier; Finkl (2009).

No Brasil, uma aplicação desse tipo de tecnologia foi estudada para a barragem do Bacanga, em São Luís, estado do Maranhão, mas o projeto original da usina não foi executado, devido à ocupação incompatível da área que teria que ser alagada para a operação da usina. No estudo mais recente, de Ferreira e Estefen (2009), foi estimada a potência média de 3,4MW. Um esquema da barragem e do posicionamento das turbinas pode ser visto na Figura 6.



**FIGURA 6:** Esquema da Barragem do Bacanga. Fonte: Ferreira; Estefen (2009).

### 2.2.2 CORRENTES DE MARÉS

As correntes de marés derivam do fluxo de água causado pelo enchimento e esvaziamento de regiões costeiras que aprisionam água, como as lagunas ou estuários. Nesses casos, a velocidade, a direção e até o sentido do fluxo de água variam conforme a alteração dos níveis de marés da região. Esse tipo de tecnologia só começou a ser desenvolvido mais recentemente com a criação de laboratórios de testes de aplicações múltiplas. No Reino Unido existem alguns destes centros de testes – EMEC, Narec, WaveHub, Fa-BTest – onde a infraestrutura e os recursos técnicos são empregados para vários tipos de sistemas de geração de energia oceânica. Os sistemas consistem basicamente de turbinas geradoras parcial ou totalmente submersas instaladas no fundo marinho ou em estruturas flutuantes. A maioria dos conceitos utilizam turbinas que funcionam similarmente às eólicas e, apesar de as correntes serem mais lentas que os ventos, o potencial de geração é semelhante, pois a densidade da água é em torno de 850 vezes maior que a do ar. A empresa Orbital Marine Power Ltd ([www.orbitalmarine.com](http://www.orbitalmarine.com)) desenvolveu uma tecnologia de turbina flutuante com baixo custo de manutenção e fácil instalação, chamado SR2000. Esta estrutura em escala comercial possui capacidade para produzir uma potência de 2 MW, operando em um casco flutuante ancorado de 63 m de comprimento e 500 toneladas. Durante um ano de operação conectado à rede elétrica da EMEC, acumulou a produção de 3 GWh de energia renovável. A estrutura pode ser vista na Figura 7.



**FIGURA 7:** Gerador de corrente de maré SR2000. Fonte: [www.orbitalmarine.com](http://www.orbitalmarine.com)

## 2.3 CORRENTES OCEÂNICAS

As correntes são movimentações de massas d'água nos oceanos, geradas pela força de Coriolis, ventos e outros processos físicos como a diferença de temperatura e salinidade da água, havendo correntes superficiais e profundas. No hemisfério norte as correntes superficiais têm sentido horário (corrente do Golfo, por exemplo) e, no sul, anti-horário (corrente do Brasil). Todavia, a denominação correntes oceânicas pode também incluir as correntes geradas pelo efeito da subida e descida do nível da água em função da atração gravitacional da Lua, ou seja, as marés nos oceanos abertos.

O comportamento físico das correntes oceânicas é similar ao dos ventos na atmosfera, todavia há diferenças quanto à densidade dos meios (água e ar, respectivamente) e velocidades de movimentação menores que os ventos. Assim, as tecnologias assemelham-se às das fazendas eólicas (continentais ou marinhas), bem como às de variação de nível de maré e correntes de maré, descritas anteriormente.

## 2.4 ONDAS

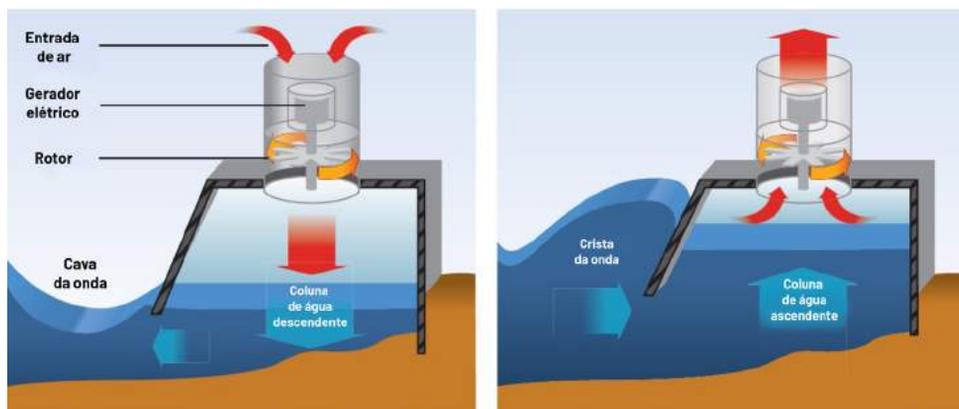
A geração de energia a partir das ondas oceânicas é mais um tipo de geração que está em fase de desenvolvimento e ainda não é madura. Ou seja, existem muitos projetos conceituais e alguns protótipos de demonstração operacional. Esses protótipos têm operado por períodos limitados em fase de testes. A maior dificuldade está na confiabilidade estrutural e dos mecanismos que convertem o movimento das ondas em eletricidade. O mar possui uma variabilidade de energia muito ampla, envolvendo não só a altura e período das ondas, mas os ventos, as correntes, as chuvas de tempestades e a alta corrosividade do meio em essas máquinas operam. Além disso, qualquer equipamento em meio marinho necessita de ancoragem, conexão elétrica e manutenção. O último fator agrega custos contínuos ao longo do tempo, sobretudo em sistemas longe da costa ou submersos. Portanto, para manter o sistema operando, a viabilidade econômica em longo prazo é crítica.

O avanço das ferramentas de análise hidrodinâmica de corpos flutuantes que são comumente utilizadas para projetos de plataformas de petróleo costa-afora, por exemplo, fluidodinâmica computacional (CFD) e teoria potencial de ondas (Wamit), proporcionam o desenvolvimento de estudos mais aprofundados para conversores de energia oceânicos, a serem posteriormente simulados em escala reduzida em testes experimentais em laboratórios com tanques de simulação de ondas. Após o projeto receber aprovação quanto às premissas de carregamento e resposta estrutural, utilizando as ferramentas computacionais, é que se avança para testes de protótipos na escala laboratorial. O uso de computadores para simulação está mais amigável e difundido atualmente e o setor de energia renovável está crescendo muito com seu uso nas universidades e centros de pesquisa. As simulações computacionais permitem testar todos os parâmetros de ondas e comportamento do conversor, assim como sua fundação no solo ou ancoragem, e ainda estimar a potência elétrica gerada e perdas do sistema. Além disso, para um determinado cenário ou local de interesse, o pesquisador pode testar diferentes tipos de conversores ou otimizá-los para sua aplicação.

A principal característica que define o tipo de conversor de energia é o tipo de movimento que ele executa. O movimento pode ser de avanço (*surge*), afundamento (*heave*) e arfagem (*pitch*). Devido aos recentes avanços ao redor do mundo, existem inúmeros modelos de conversores em desenvolvimento. As tecnologias de conversores mais comuns podem ser organizadas em três grupos, como descritos a seguir.

### 2.4.1 COLUNA D'ÁGUA OSCILANTE: FIXOS OU FLUTUANTES

O primeiro conversor de energia de coluna d'água oscilante foi instalado na ilha escocesa de Islay em 1991, com potência instalada de 75kW e ligado à rede elétrica do Reino Unido (ISLAY LIMPET WAVE POWER PLANT, 2002). A usina foi modificada algumas vezes ao longo dos anos e atingiu a potência de 250kW. Utiliza uma turbina tipo Wells, que é capaz de ser acionada no mesmo sentido de rotação para um fluxo de ar em ambos os sentidos em relação ao seu eixo central. Outras usinas deste tipo foram instaladas na ilha do Pico, nos Açores, em 1999 ([www.pico-owc.net/](http://www.pico-owc.net/)) e na cidade de Mutriku, na Espanha, em 2011 ([www.eve.eus](http://www.eve.eus)). Na Figura 8 pode-se ver o princípio de funcionamento desse sistema, onde a aproximação da cava ou crista da onda causa uma variação de volume de ar no interior de uma câmara. Essa câmara tem uma única comunicação com o ambiente externo por uma turbina Wells. Esse sistema também pode ser instalado em uma estrutura flutuante que tenha grande inércia ou resistência ao movimento de afundamento.



**FIGURA 8:** Princípio de funcionamento do conversor de coluna d'água oscilante. Fonte: Edehofer et al. (2011)

### 2.4.2 CORPOS OSCILANTES: FIXOS, FLUTUANTES NA SUPERFÍCIE OU SUBMERSOS

Os conversores de corpos oscilantes podem ser fixos em alguma estrutura do litoral. Um bom exemplo é o conversor de braço oscilante instalado no porto do Pecém, no Ceará, em 2009 (Estefen et al., 2010). Neste caso, uma estrutura fixa ao quebra-mar bombeia água para acionar uma turbina de alta



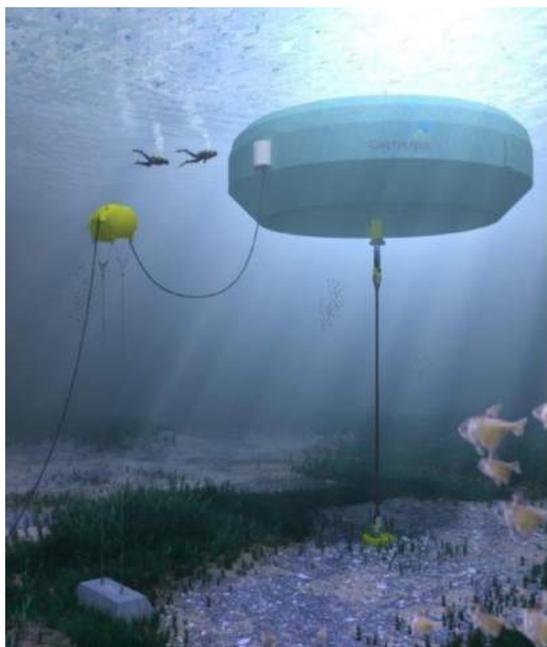
**FIGURA 9:** Foto aérea da usina de ondas do Pecém. Fonte: Estefen et al. (2010)

pressão instalada na casa de máquinas. O braço oscilante que aciona a bomba tem uma boia na extremidade, que é elevada e afundada pelas ondas que se aproximam do litoral, como ilustrado na Figura 9. A vantagem deste sistema é que a instalação e manutenção é feita por terra.

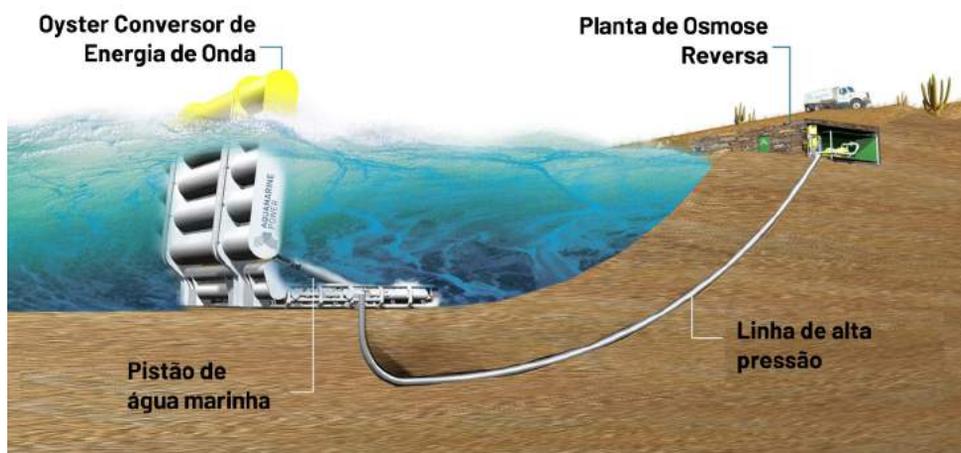
Embora a onda seja predominantemente um fenômeno de superfície da água, sua energia é transferida na forma de arraste e inércia das partículas ao longo da profundidade. Essa energia tem decaimento exponencial, portanto ela se extingue rapidamente com o aumento da profundidade. Mesmo assim, existem os conversores oscilantes submersos, próximos à superfície, que são ancorados ao fundo do mar e aproveitam a passagem da onda para obter energia cinética. A Figura 10 mostra o conversor CETO 5 instalado na Austrália ([www.carnegiece.com](http://www.carnegiece.com)), composto basicamente por uma boia de subsuperfície com gerador acoplado, ancoragem e cabo elétrico. Sua evolução, o modelo CETO 6, utiliza uma bomba hidráulica no segmento de ancoragem e uma tubulação em vez de cabo elétrico. Na estação em terra, a água pressurizada é utilizada para geração elétrica ou produção de água potável por dessalinização. Uma vantagem desse conceito é que não sofre a ação direta das ondas sobre o casco da boia, proporcionando menor risco de danos em tempestades.

Outro tipo de corpo oscilante fixo é aquele preso ao fundo do mar, onde a passagem da onda na superfície causa o movimento de uma estrutura na forma de batedor flutuante e articulado. Esse tipo de conversor é instalado próximo à área de arrebenção no litoral. O conversor denominado Oyster

(Cameron et al., 2010) bombeia fluido pressurizado por uma tubulação até uma estação de geração em terra (Figura 11). Sua vantagem está na amplificação da altura da onda que ocorre quando esta chega em águas rasas. Contudo, o ambiente turbulento da costa dificulta a instalação e a manutenção.



**FIGURA 10:** Conversor oscilante submerso CETO 5. Fonte: [www.carnegie-ce.com](http://www.carnegie-ce.com)



**FIGURA 11:** Conversor tipo oscilante fixo ao fundo do mar. Fonte: Cameron et al. (2010)

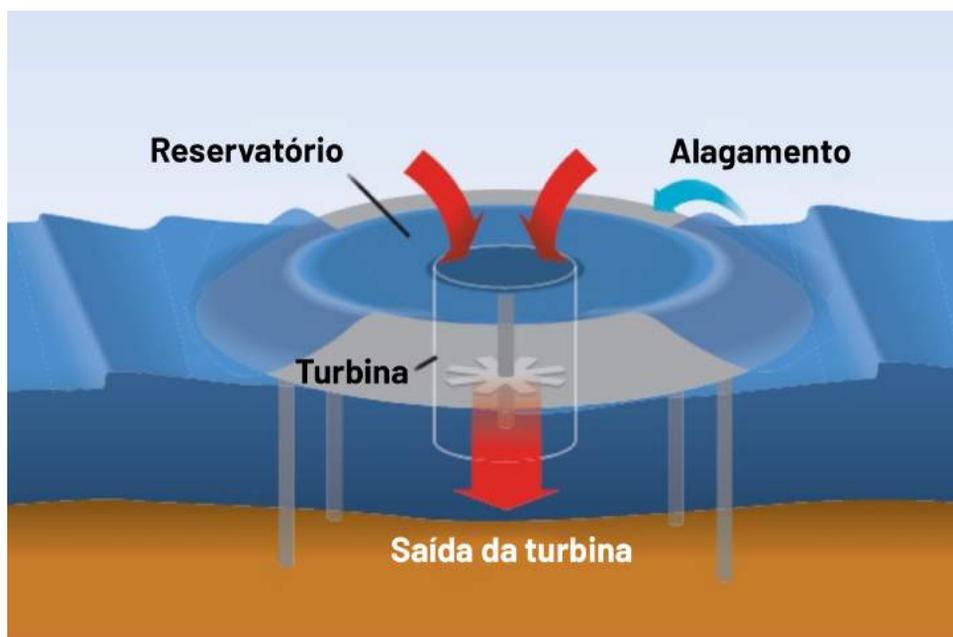
Um exemplo de conversor de corpo oscilante é o Pelamis (<http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/pelamis-wave-power/>). Nesse sistema, o princípio de conversão se dá pela área de superfície que ocupa, sendo caracterizado como um conversor atenuador de ondas. As ondas induzem a deflexões angulares entre as juntas de uma série de corpos cilíndricos e flutuantes que estão conectados por atuadores hidráulicos. Um fluido é bombeado a alta pressão cada vez que as seções do corpo flutuante defletem entre si. O fluido pressurizado aciona geradores elétricos e a energia é transportada por um cabo elétrico até a terra. Em 2004, foi o primeiro protótipo de conversor de ondas *offshore* a gerar conectado ao *grid* nacional, no laboratório de testes EMEC, Reino Unido. O segundo protótipo, visto na Figura 12, tinha 180m de comprimento, tubos de 4m de diâmetro e capacidade instalada para 750kW. Foi desmobilizado em 2014.



**FIGURA 12:** Atenuador de ondas Pelamis. Fonte: <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/pelamis-wave-power/>.

### 2.4.3 ALAGAMENTO: FIXOS OU FLUTUANTES

Os conversores com princípio de alagamento como meio de funcionamento podem ser fixos ou flutuantes, mas ambos utilizam uma turbina hidráulica para gerar energia quando uma quantidade de água do topo de uma onda invade a estrutura e entra no reservatório do gerador, como visto na Figura 13. O sistema mais conhecido desse tipo é o Wave Dragon ([www.wavedragon.net](http://www.wavedragon.net)), testado inicialmente em 2003, que utiliza refletores de ondas nas laterais e é ancorado ao fundo.



**FIGURA 13:** Conversor de alagamento. Fonte: Edenhofer et al. (2011)

#### **2.4.4 GRADIENTE TÉRMICO (OCEAN THERMAL ENERGY CONVERSION - OTEC)**

O sistema de gradiente térmico baseia-se na geração de energia pela diferença de temperatura natural existente nos oceanos, entre as águas superficiais aquecidas pelo sol (mais quentes) e as águas de maior profundidade (mais frias).

As estações geradoras de energia pela diferença de gradiente térmico, internacionalmente denominadas como OTECs, podem ser instaladas no continente, em plataformas fixas sobre o leito marinho costa-afora (*offshore*), em estruturas flutuantes nas plataformas continentais, ou ainda em navios, que podem ser movidos de um local para outro (SERI, 1989).

Vários fatores podem limitar a geração plena de energia pelas OTECs, havendo a necessidade de sítios favoráveis, onde haja: a) diferenças de temperaturas significativas entre águas superficiais e profundas, de mais de 20° C; b) correntes marinhas com baixas velocidades; c) ausência de tempestades (ventos e ondas fracas); d) proximidade dos mercados de consumo de energia (OTA, 1978).

As tecnologias relacionadas às OTECs são basicamente de três tipos

(IRENA, 2014a):

- Sistemas fechados: baseiam-se no ciclo de Rankine, sendo os mais utilizados. Um fluido de trabalho (*working fluid*), geralmente amônia, com baixa temperatura de ebulição, é evaporado com a água quente da superfície do oceano, expande-se e movimenta turbinas, assim gerando energia. Na sequência, o fluido de trabalho é condensado pela água fria de profundidade e volta para o sistema na forma líquida, fechando assim o ciclo (Figura 14). Na década de 1980, passou-se a utilizar opcionalmente o ciclo de Kalina, que não requer um fluido de trabalho puro, como no de Rankine;

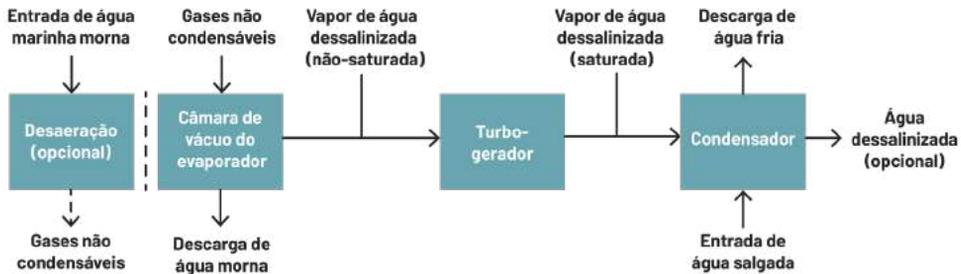


FIGURA 14: Sistema OTEC de circuito fechado. Fonte: Etemadi et al. (2011)

- Sistemas abertos: consistem no bombeamento da água superficial, mais quente, onde a baixa pressão faz com que a água se transforme em vapor superaquecido, acionando uma turbina de baixa pressão, acoplada a um gerador elétrico. Depois dessa etapa o vapor passa por um condensador, sendo resfriada pela água fria profunda (Figura 15);

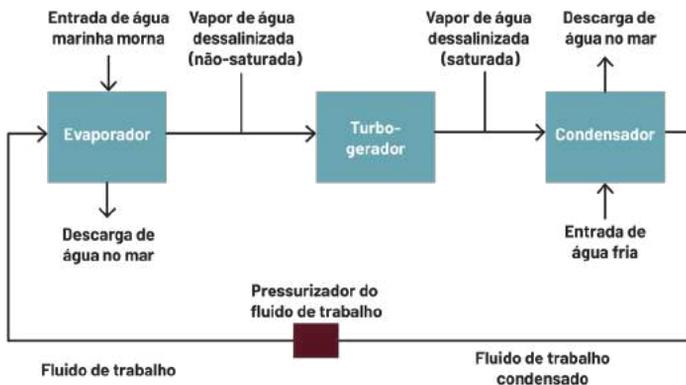
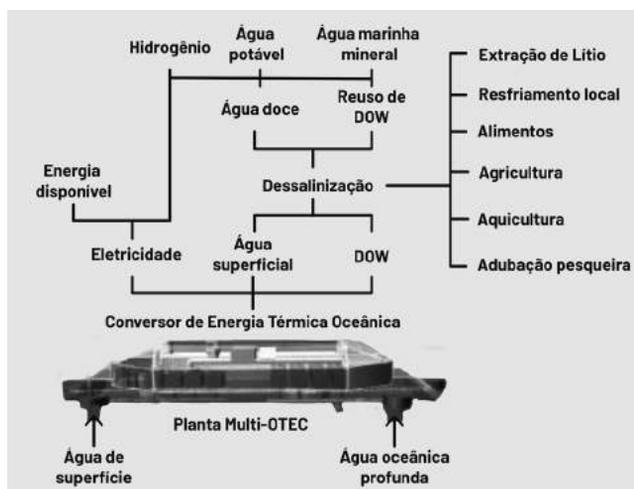


FIGURA 15: Sistema OTEC de circuito aberto. Fonte: Etemadi et al. (2011)

- Sistemas híbridos: baseiam-se na junção dos ciclos aberto e fechado. Esse tipo de sistema pode melhorar a eficiência da usina OTEC e potencializar outros aspectos benéficos, como subprodutos, ou mesmo aplicações multi-industriais.

A razão pela qual as OTECs despertam interesse na comunidade científica e do ponto de vista como uma futura e importante fonte de energia limpa é o fato de que se trata de um recurso inesgotável e que não gera qualquer tipo de emissões atmosféricas. Afora esse aspecto, as OTECs, principalmente de sistemas abertos e híbridos, podem gerar subprodutos importantes a partir dos grandes volumes de água captados, denominados na literatura como DSW (Hossain et al., 2013) – as águas oceânicas situadas abaixo de 200m de profundidade.

Entre os subprodutos ou uso multi-industrial DSW destacam-se (Figura 16): a) a produção de água doce (pela dessalinização da água do mar) para uso geral, e até mesmo de águas consideradas minerais, pelas suas características químicas; b) uso da água fria de profundidade em sistemas de refrigeração e sistemas de ar condicionado das próprias plantas operacionais OTEC ou em hotéis, residências ou outras estruturas que requeiram resfriamento; c) uso da água fria profunda, geralmente rica em nutrientes, na maricultura e aquicultura; d) extração de lítio, que já é obtido industrialmente a partir de águas oceânicas; e) na indústria de alimentos, cosméticos e produtos farmacêuticos, cujas aplicações já são comuns no Japão; e f) na agricultura em áreas continentais, pois com a água profunda mais fria pode-se produzir frutas e outros vegetais de clima frio em áreas até mesmo tropicais.



**FIGURA 16:** Subprodutos ou uso multi-industrial, designados na literatura como DSW de uma estação OTEC. Fonte: Kobahashi (2002)

As principais plantas OTEC em operação estão localizadas nos EUA (Havai), Japão, China e Coreia do Sul. Embora o Brasil tenha a matriz de seu sistema energético baseada em hidrelétricas, e secundariamente em termelétricas, haveria potencial para o desenvolvimento e implantação de OTECs no Nordeste, onde a plataforma continental é estreita e os gradientes de temperatura bem marcados. Tratando-se de uma região onde a escassez de água é praticamente constante, um eventual uso dessa energia limpa poderia não só prover energia, mas também água potável, além dos outros subprodutos associados.

### **2.4.5 GRADIENTE DE SALINIDADE (SALINITY GRADIENT POWER – SGP)**

Esta é uma das formas de geração de energia limpa, baseada na diferença no gradiente de salinidade entre a água salgada e a água doce provinda dos rios (estuários), podendo estar associada a plantas de dessalinização da água e de estações de energia solar. Comparativamente às demais possíveis formas de geração de energia a partir dos oceanos, é a mais recente e seu desenvolvimento tem tomado impulso nos últimos anos, havendo muito ainda por se fazer até que atinja um estágio efetivamente produtivo e comercial.

O SGP baseia-se no princípio de que a energia pode ser gerada a partir de dois líquidos com diferentes salinidades, pelo processo de osmose. Quando um líquido com maior concentração de sais entra em contato com outro mais diluído, o soluto irá migrar do mais concentrado para o diluído. Silva (2009) explica que se estas duas soluções estiverem separadas por uma membrana semipermeável, que impossibilite a passagem do soluto mas possibilite a passagem do solvente, verifica-se uma nova situação: ocorre a passagem de solvente do lado menos concentrado para o mais concentrado, no sentido de equilibrar as concentrações nos dois lados da membrana, gerando um gradiente de pressão osmótica, processo denominado osmose direta (OD). Se a solução mais concentrada é sujeita a uma pressão estática elevada (maior do que o gradiente de pressão osmótica), a água passa do lado mais concentrado para o menos concentrado, ficando o sal retido na membrana – processo denominado osmose reversa (OR), princípio utilizado nas centrais de dessalinização para a geração de água doce a partir da água do mar.

Somente a partir do início do século XXI, estudos relacionados à SGP passaram a ser mais significativos, relacionados principalmente ao desenvolvimento e aprimoramento das membranas usadas nos sistemas, que implicam nos custos de produção, que são de 50 a 80%. Existem dois tipos bá-

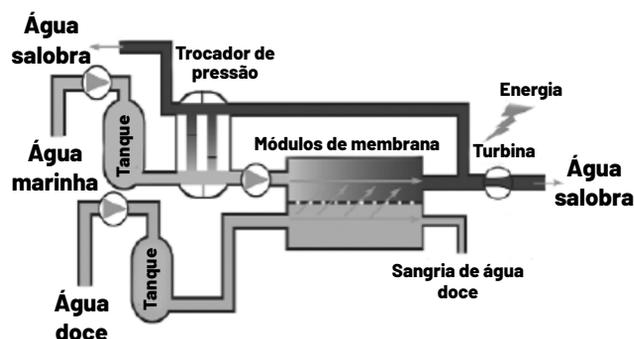
sicos de tecnologias, sendo que ambas usam membranas em seus processos (Martinez et al., 2012):

- Eletrodíálise reversa (*Reverse eletrodialysis* – RED): consiste na geração de energia a partir do transporte de íons (sal) através das membranas;
- Retardo da pressão osmótica ou osmose retardada por pressão (ORP, ou *Pressure-Retarded Osmosis* – PRO): é o método mais usado e consiste em bombear a água marinha a um reservatório, onde a pressão é inferior à pressão osmótica entre a água doce e a salgada. A água doce fluirá através de uma membrana semipermeável, incrementando o volume (ou a pressão) no reservatório. Esse aumento de pressão é utilizado por um sistema turbogenerador, assim gerando energia (Figura 17).

As membranas até agora desenvolvidas podem gerar um máximo de  $2,7\text{W}/\text{m}^2$ , e no tipo PRO, de  $14,4\text{W}/\text{m}^2$ . Maiores densidades de energia podem ser obtidas mudando o desenho das células usadas nos sistemas, particularmente a resistência das membranas, o tamanho das células e o uso de nanotecnologias, calculando-se chegar a  $20\text{W}/\text{m}^2$  (IRENA, 2014).

A primeira planta ORP foi desenvolvida pela Statkraft, na Noruega, que começou a operar em 2009, usando  $2.000\text{m}^2$  de membranas, com capacidade técnica de produção de  $10\text{kW}$ , mas produzindo  $5\text{kW}$  (IRENA, 2014b). Na Holanda, uma planta RED foi instalada na defesa (obra costeira) de Afsluitdijk.

Os desafios tecnológicos nos métodos ORP e RED incluem a qualidade das membranas, geração de biocombustíveis a partir da matéria orgânica contida na água (não desenvolvido ainda), um melhor desenvolvimento dos módulos que contêm as membranas, a diminuição dos custos de pré-tratamento da água, e criação de tecnologias relacionadas a membranas mais duráveis. Existem projetos relacionados a esses tópicos na Alemanha, Itália, Canadá, Japão, Singapura, Coreia do Sul e Estados Unidos da América (IRENA, 2014b). Até o momento, não existe qualquer tipo de estudo quanto a tecnologias ou viabilidade do uso do SGP no Brasil.



**FIGURA 17:** Diagrama simplificado de um sistema de osmose retardada por pressão (ORP), um dos métodos de geração de energia por gradiente de salinidade ou SGP (Salinity Gradient Power). Fonte: Emami et al. (2013)

## 2.5 ASSOCIAÇÕES (EÓLICA, ONDAS, CORRENTES DE MARÉ)

As possíveis formas de geração de energia a partir dos oceanos foram vistas até aqui de forma isolada, ressaltando-se os princípios básicos de funcionamento de cada uma e os avanços tecnológicos desenvolvidos até o momento. A associação de métodos de extração de energia marinha já é realidade e pode ser visto em fase avançada de desenvolvimento no conceito ARRECIFE, no qual tanto as correntes e ondas são aproveitadas no mesmo equipamento ([www.arrecifesystems.com](http://www.arrecifesystems.com)). Todavia, nos últimos anos, começou a ser debatido que em determinados locais e condições poderia haver uma combinação destas, especialmente com a construção de plataformas oceânicas multiuso, pois seriam reduzidos os custos de implantação e manutenção, facilitando aspectos logísticos. Tais estruturas ainda estão em fase inicial de desenvolvimento, devendo-se analisar a sinergia quanto aos seguintes aspectos: a) espacial; b) das instalações e infraestruturas; e c) dos processos de engenharia (Guedes Soares, 2015). A sinergia espacial refere-se a questões locacionais, ou seja, onde haja a possibilidade de combinar distintas formas de gerar energia, como a eólica, por ondas e/ou correntes. A sinergia das instalações e infraestruturas constitui a viabilização de projetos híbridos, que possibilitem a capacidade máxima de geração de energia pelos distintos métodos. Por último, a sinergia de processos de engenharia seria o desenvolvimento de plantas que combinem os processos de geração de energia dos distintos métodos (eólico, correntes, etc), bem como o seu armazenamento e/ou transferência até os locais de consumo (Karimirad, 2014). As estruturas multiuso poderiam ser construídas de forma modular ao longo do tempo e incluir também recursos de pesquisa em biologia marinha e oceanografia. Um exemplo deste tipo de aplicação é a plataforma multi-propósito PLOCAN ([www.plocan.eu](http://www.plocan.eu)), instalado nas Ilhas Canárias, Espanha.

## 3 OS DESAFIOS POLÍTICOS E ECONÔMICOS

Como a maioria das tecnologias de energia renovável marinha não está em fase madura de desenvolvimento e depende de financiamentos governamentais, o desafio está em promover políticas de incentivo para o desenvolvimento dessas tecnologias que também envolva as empresas privadas. Algumas são proprietárias da patente e financiam seus desenvolvimentos em busca de comercializar seus produtos e expandir para outros países. Normal-

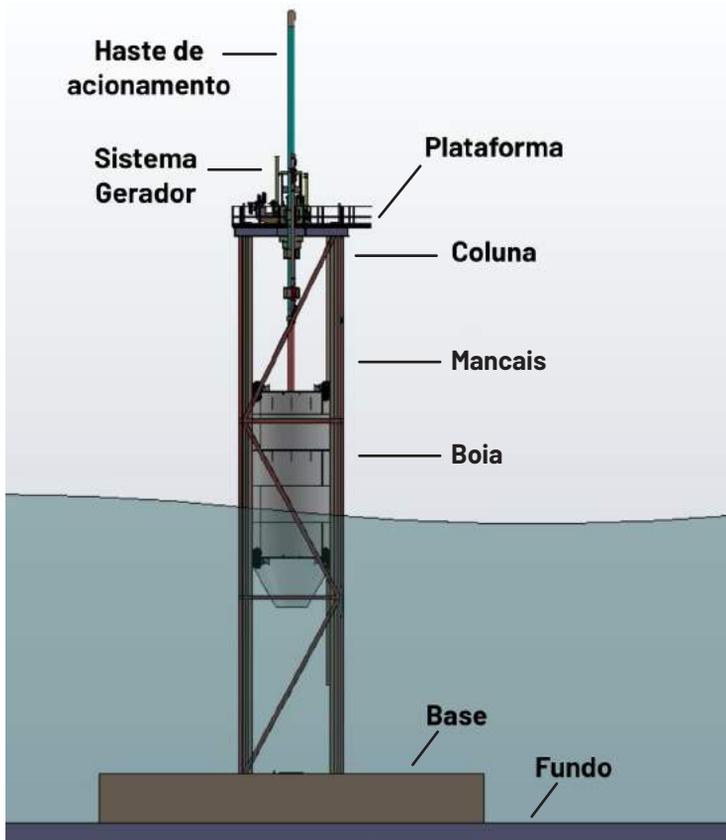
mente, recorrem a recursos do governo para a implementação de projetos de pesquisa em parceria com universidades ou centros de pesquisa. Essas empresas buscam a competitividade econômica dos projetos para viabilizar sua posterior entrada na fase comercial.

No Brasil, não existe ainda um ordenamento legal para exploração de energia oceânica. Os estudos atuais se baseiam na regulamentação existente e bem desenvolvida para a exploração de petróleo e gás costa-afora (Fernandez, 2012). Contudo, um passo foi dado para alavancar o desenvolvimento de tecnologia nacional quando foi proposto na COPPE/UFRJ o Programa Nacional de Energias Renováveis do Mar (PNERM), que busca o levantamento do potencial energético e o desenvolvimento de conversores. Entre as ações prioritárias do programa está a consolidação de uma rede de tecnologia envolvendo empresas, comunidade científica e órgãos do governo, e a implantação de laboratórios de testes de energia das ondas e energia das marés. A organização de esforços entre as regiões do país, com base no PNERM, está sendo atualmente realizada pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para as Energias Renováveis dos Oceanos (INCT – Energia dos Oceanos) (Estefen, 2009), buscando a formação de recursos humanos especializados, redução de custos e, principalmente, a realimentação do processo de desenvolvimento técnico-científico.

## **4 CASO BRASILEIRO: CONVERSOR DE ENERGIA DE ONDAS DA ILHA RASA**

Um conversor de ondas fixo foi projetado para instalação próximo à Ilha Rasa, na costa do Rio de Janeiro (Shadman, 2019). A primeira fase do projeto concluída em 2015 pelo Laboratório de Tecnologia Submarina da COPPE/UFRJ, com o financiamento de Furnas Centrais Elétricas, prevê uma estrutura com gerador elétrico acionado por cabos que são movimentados por uma boia de 4,5m de diâmetro, como visto na Figura 18. A estrutura tem uma plataforma a 10m de altura em relação ao nível do mar, onde os equipamentos mecânicos e elétricos estão montados. A boia realiza movimento vertical impulsionado pela passagem das ondas e é guiada pelas quatro colunas que sustentam a plataforma. Essas colunas estruturais estão unidas no fundo a uma base de gravidade de concreto. A vantagem desse conceito é que toda a estrutura pode ser construída em terra e sua instalação não requer o uso de onerosos navios com guindastes, uma vez que a base é projetada para flutuar

e sustentar todo o conversor durante o reboque até o local de instalação. Ao chegar no local de instalação essa base será lentamente lastreada e apoiada no fundo por gravidade. Parte do projeto foi realizada utilizando modelos numéricos hidrodinâmicos de teoria potencial de ondas e simulações no domínio do tempo. O espectro de ondas do local a 20m de profundidade foi calculado a partir de dados meteoceanográficos de águas mais profundas, mas considerando a propagação de ondas em águas rasas e a batimetria de fundo. As análises serviram tanto para estimar a produção de eletricidade como para calcular os esforços causado pelas ondas, o vento e as correntes que atuam na estrutura durante as tempestades. Os esforços serviram como dados de entrada para o dimensionamento estrutural dos componentes da usina. O conceito prevê uma potência instalada de 50kW de energia renovável e limpa que poderá suprir a necessidade da ilha. Como a disponibilidade de energia das ondas não é contínua, um banco de baterias pode ser agregado para proporcionar um abastecimento elétrico estável.



**FIGURA 18:** Vista lateral do conceito de usina de ondas. Fonte: Shadman, 2019.

## REFERÊNCIAS

- Cameron, L.; Doherty, R.; Henry, A.; Doherty, K.; Hoff, J.V.; Kaye, D.; Naylor, D.; Bourdier, S.; Whittaker, T. 2010. Design of the next generation off the Oyster Wave Energy Converter. 3<sup>rd</sup> International Conference on Ocean Energy. Bilbao.
- Charlier, R.H.; Finkl, R.W. 2009. *Ocean energy*. Tide and tidal power. Sustainable co-generation from the tides. Springer Berlin. ISBN 978-3-540-77931-5. Pp 106-107.
- Shadman, M. et al. 2019. Ocean Renewable Energy Potential, Technology, and Deployments: A Case Study of Brazil. *Energies*, 12(19), 3658; <https://doi.org/10.3390/en12193658>
- Edenhofer, O; Pichs-Madruga, R.; Sokona, Y. 2011. Special report on renewable energy and sources and climate change mitigation. *IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change*. ISBN 978-92-9169-131-9. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/srren/>
- Emami, Y; Mehrangiz, S.; Etemadi, A.; Mostafazadeh, A.; Darvishi, S. 2013. A brief review about salinity gradient energy. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, v. 2, n. 2, p. 295-300.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. 2015. *Balço energético nacional 2015: ano base 2014*. EPE, Rio de Janeiro, 292 p.
- Estefen, S.F. 2009. Energia oceânica: as múltiplas ofertas do mar. *Scientific American – Brasil*. Especial Energia. ISSN 1679-5229 32. 76-81
- Estefen, S.; Castello, X.; Lourenço, M.I.; Rossetto, R. M. 2010. Design analyses applied to a hyperbaric wave energy converter. PRADS – International Symposium on Practical Design of Ships and other Floating Structures. Rio de Janeiro, p. 1-8.
- Etemadi, A.; Emdadi, A.; Asefashar, O.; Emani, Y. 2011. Electricity generation by the Ocean Thermal Energy. *Energy Procedia*, 12, p. 936-946.
- Fernandez, L.P.C. (Coord.). 2012. *O Brasil e o mar do século XXI: relatório para os tomadores de decisão do país*. 2. ed. Niterói: CEMBRA, 540 p. Disponível em: <[https://www.marinha.mil.br/secirm/sites/www.marinha.mil.br/secirm/files/cembra-2a\\_ed.pdf](https://www.marinha.mil.br/secirm/sites/www.marinha.mil.br/secirm/files/cembra-2a_ed.pdf)>
- Ferreira, R.M.; Estefen, S. 2009. Alternative concept for tidal power plant with reservoir restriction. *Renewable Energy*, 34, p. 1151-1157.
- Guedes Soares, C. (Ed). 2015. *Renewable energies offshore*. Boca Ratón, CRC Press, 1018 p. (Proceedings of the 1st. International Conference on Renewable Energies Offshore, Lisbon, 2014).
- Hossain, A.; Azhim, A.; Jaafar, A.B.; Musa, M.N.; Zaki, S.A.; Noor Fazreen, D. 2013. Ocean thermal energy conversion: the promise of clean future. IEEE – Conference of Clean Energy Technology (CEAT), p. 23-26. Disponível em: [http://irep.iium.edu.my/44029/1/5-Ocean\\_Thermal\\_Energy\\_Conversion\\_The\\_Promise\\_of\\_a\\_Clean\\_Future.pdf](http://irep.iium.edu.my/44029/1/5-Ocean_Thermal_Energy_Conversion_The_Promise_of_a_Clean_Future.pdf)
- Islay Limpet Wave Power Plant. 2002. The Queen’s University of Belfast. Publishable

- Report. April. Disponível em: <[http://cordis.europa.eu/publication/rcn/2110\\_en.html](http://cordis.europa.eu/publication/rcn/2110_en.html)>
- IRENA – International Renewable Energy Agency. 2014a. *Ocean thermal energy conversion: technology brief*. Bonn, IRENA, 22 p. Disponível em: <[http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/Ocean\\_Thermal\\_Energy\\_V4\\_web.pdf](http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/Ocean_Thermal_Energy_V4_web.pdf)>
- IRENA – International Renewable Energy Agency, 2014b. *Salinity gradient power: technology brief*. 26 p. Disponível em: [www.irena.org](http://www.irena.org)
- IRENA – International Renewable Energy Agency. 2016. *Innovation outlook: offshore wind*. 145 p. Disponível em: <[https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA\\_Innovation\\_Outlook\\_Offshore\\_Wind\\_2016.pdf](https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Innovation_Outlook_Offshore_Wind_2016.pdf)>
- Karimirad, M. 2014. *Offshore energy structures: for wind power, wave energy and hybrid marine platforms*. Heidelberg, Springer, 301 p.
- Kobayashi, H. 2002. “Water” from the Ocean with OTEC. Forum on Desalination using Renewable Energy. Disponível em: <[https://www.ioes.saga-u.ac.jp/old\\_event/FDE2002/02\\_Hitachi%20Zosen\(f\).pdf](https://www.ioes.saga-u.ac.jp/old_event/FDE2002/02_Hitachi%20Zosen(f).pdf)>
- Martinez, J.L.V.; Ruíz-Minguela, P.; Morán, G.P. 2014. Energías renovables del medio marino. *Anales de Mecánica y Electricidad*, maio-junio, p. 28-34. Disponível em: <<http://www.mecanica.frba.utn.edu.ar/energiaundimotriz/?p=1012>>
- Melo, A. B.; Villate, J.L. 2015. *Ocean energy systems*. Annual Report. The Executive Committee of OES. Disponível em: <<https://report2015.ocean-energy-systems.org/>>
- OTA – Office of Technology Assessment/Congress of The United States. 1978. *Renewable ocean energy sources*. Part I – Ocean Thermal Energy Conversion. Washington DC, 44 p. Disponível em: <<http://ota.fas.org/reports/7815.pdf>>
- SERI – Solar Energy Research Institute. 1989. *Ocean thermal energy conversion: an overview*. Golden/USA, 36 p. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/legosti/old/3024.pdf>>
- Silva, J.J.V.G. 2009. *Produção de energia por osmose*. Dissertação [Mestrado] – Departamento de Engenharia Química, Universidade do Porto, 60 p. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58683/1/000136499.pdf>>
- Takahashi, P.; Trenka, A. 1996. *Ocean thermal energy conversion*. Chichester, John Wiley & Sons. Disponível em: <[http://www.soe.uoguelph.ca/webfiles/gej/articles/gej\\_001-017-023\\_finney\\_ocean\\_thermal\\_energy.pdf](http://www.soe.uoguelph.ca/webfiles/gej/articles/gej_001-017-023_finney_ocean_thermal_energy.pdf)>
- Transportation Research Board. 2013. *Worker health and safety on offshore wind farms*. Committee on Offshore Wind Farm Worker Safety, Safety Transportation Research Board of the National Academies, Transportation Research Board, Washington D.C., USA, 158 p. (Special Report 310). Disponível em: <<http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/sr/SR310.pdf>>
- Vega, L.A. 2010. *Economics of ocean thermal energy conversion: an update*. Texas, Offshore Technology Conference. Disponível em: <<http://hinmrec.hnei.hawaii.edu/wp-content/uploads/2010/01/OTEC-Economics-2010.pdf>>



## CAPÍTULO 6

# AVANÇOS NA GENÔMICA MARINHA

MAIKON DI **DOMENICO**<sup>1</sup>

MARCELO VISENTINI **KITAHARA**<sup>2,3</sup>

SÓNIA CRISTINA DA SILVA **ANDRADE**<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Ecologia Marinha, Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná – Pontal do Paraná, PR

<sup>2</sup> Departamento de Ciências do Mar, Universidade Federal de São Paulo, Campus Baixada Santista – Santos, SP

<sup>3</sup> Centro de Biologia Marinha (CEBIMar-USP)

<sup>4</sup> Laboratório de Diversidade Genômica, Departamento de Genética e Biologia Evolutiva, Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo

# 1 INTRODUÇÃO

A genômica pode ser definida com uma disciplina dedicada a estudar a estrutura, função e diversidade das informações genéticas de um organismo. Na prática, pode ser entendida como uma extensão tecnológica para análises e estudos de qualquer genoma, seja em um núcleo, uma célula, um organismo ou grupo de espécies. Toda a informação genética contida em um organismo pode ser expressa pelo termo genoma. Entretanto, a diferença entre abordagens genômicas e abordagens genéticas clássicas não é clara. Na literatura mais recente, o termo genômica é usado para estender as escalas de análises que foram originalmente limitadas a um pequeno número, a um grande número, ou até mesmo ao conjunto completo de genes que compõem um genoma. Neste capítulo, consideramos que não há diferença essencial entre os dois tipos de abordagem. Especialmente nas ciências do mar, nas quais existe a necessidade de desenvolvimento de metodologias de alta resolução adaptadas às análises de múltiplos conjuntos de genes e de formar recursos humanos com linhas de pesquisa em genômica, ainda precisamos avançar tecnicamente e desenvolver novas formas de pensar sobre a biologia. Com esse propósito, também apresentamos neste capítulo um histórico geral, desde as primeiras tentativas de obter dados de sequências de organismos individuais, até técnicas mais modernas de sequenciamento de nova geração.

Na introdução abordamos um breve histórico da disciplina com o estado da arte e avanços mais recentes. Separadamente incluímos conceitos gerais de hereditariedade (Box 1), extração, amplificação, sequenciamentos de DNA/RNA (Box 2), tipos de sequenciamentos (Box 3) e ferramentas para análise de dados moleculares (Box 4). As potencialidades da disciplina serão inseridas ao longo do texto, mas preferimos dedicar um tópico somente para o assunto, com temas sobre melhoramento genético, filogenia/filogenômicas e epigenética.

No tópico 2 abordamos o DNA *barcoding*, com a definição da técnica e sua utilidade para a taxonomia, sistemática, e identificação de larvas, espécies crípticas e espécies invasoras. No tópico 3, exemplos de genética populacional mostram como esse campo consegue associar o fluxo gênico de diversas populações com correntes marinhas, tectônica de placas e províncias biogeográficas. No tópico 4, mostramos como técnicas de sequenciamentos de nova geração (metagenômica, o *metabarcoding* e o DNA ambiental) podem ser utilizadas para estimativas rápidas e reais da diversidade de diversos

compartimentos marinhos. No tópico 5, trazemos exemplos relacionando associações biológicas, simbioses e relações parasita-hospedeiro com a teoria da hologenômica. No tópico 6, mostramos algumas técnicas de expressão gênica e sua utilidade no monitoramento de poluentes e na morfologia e fisiologia de animais. Por último, no tópico 7, concluímos com as perspectivas e potencialidades para o futuro da disciplina de genômica marinha no Brasil.

## 1.1 HISTÓRICO

Como disciplina, a genômica iniciou com tentativas de obtenção de sequências de genes específicos para organismos individuais, seja por sequenciamento do DNA genômico ou sequenciando um número grande de regiões genômicas. Entretanto, como essas técnicas eram dispendiosas, os primeiros esforços utilizaram organismos modelos, como a bactéria *Escherichia coli*, o fungo *Saccharomyces cerevisiae*, o nematoda *Caenorhabditis elegans*, o artrópode *Drosophila melanogaster* e a planta *Arabidopsis thaliana*. A disponibilidade de extensos dados genéticos desses organismos também facilitou o desenvolvimento de ferramentas genômicas com capacidade de obtenção de dados em escalas maiores, como sistemas de *microarray* para a análise da expressão gênica e sequências mutantes (Cock et al., 2010).

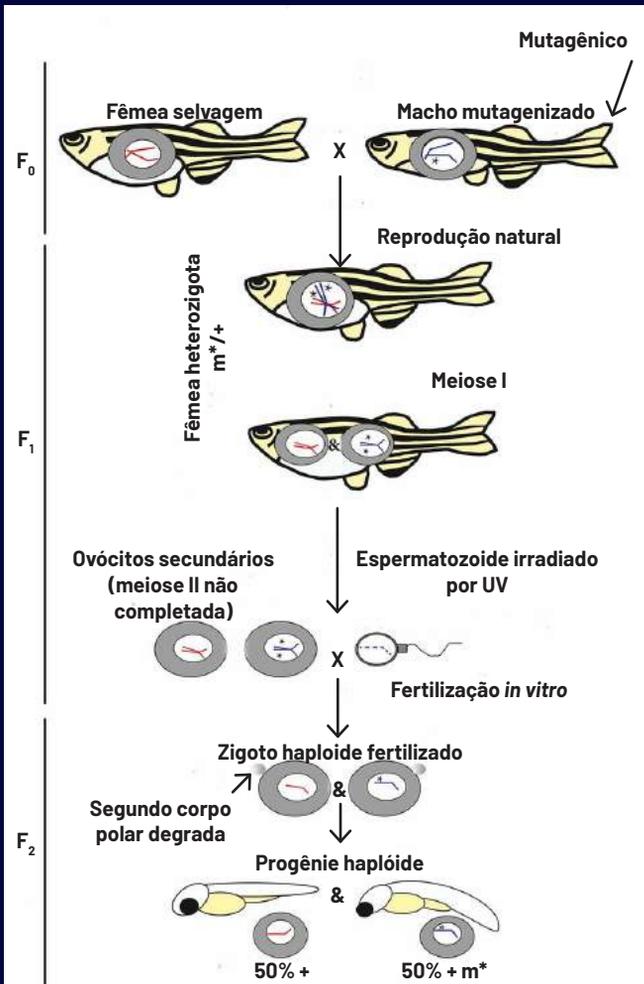
Historicamente, organismos marinhos foram negligenciados como modelos nessa primeira etapa metodológica de aprimoramento das técnicas laboratoriais e analíticas da genômica. Assim, como citado acima, organismos terrestres foram usados como modelos, permitindo uma melhor compreensão da biologia, ecologia e história evolutiva dessas espécies. Atualmente, a diminuição dos custos para sequenciamento de DNA/RNA e o maior poder de processamento dos dados resultantes, permitiram que diversos organismos marinhos fossem finalmente considerados. Esse fato não só permitiu a aplicação de abordagens genômicas para diversas espécies, mas também abriu novos campos, como metagenômica e metatranscriptômica, que utilizam metodologias de sequenciamento de nova geração, mais velozes, baratas e com maior eficiência que as metodologias antigas. Nesta "nova era", a biologia marinha está na vanguarda de muitas dessas novas aplicações (Cock et al., 2010).

Consequentemente, a aplicação destas tecnologias permitiu a resposta ou pelo menos a abordagem de diversas questões até então não respondidas nas ciências do mar. Como exemplo, a compreensão da diversidade filogenética de organismos marinhos permite explorar a evolução dos processos de desenvolvimento (Boyle et al., 2014; Martín-Durán et al., 2015),

caracterizar como os ecossistemas marinhos desempenham papéis-chave nos ciclos geoquímicos globais (Plominsky et al., 2018), buscar novas biomoléculas (Schroeder et al., 2018) e entender interações ecológicas dentro dos ecossistemas marinhos (Faria et al., 2018; Leasi et al., 2018). Destaca-se ainda que todos esses domínios tornam-se mais relevantes quando consideramos as mudanças climáticas globais que estamos vivenciando (Cock et al., 2010).

### **BOX 1. HEREDITARIEDADE**

Hereditariedade ou herança genética é um mecanismo ou um conjunto de processos biológicos, nos quais são transmitidas as informações genéticas de uma geração para outra através da reprodução. Porções de informação contidas no DNA dos indivíduos sob a forma de sequências de nucleotídeos são transmitidas através dos genes. A herança de informação genética permite no nível individual a fixação de traços e características próprias do indivíduo, e no nível específico, de características comuns que determinam a espécie. Diversos aspectos do desenvolvimento, morfologia, fisiologia e comportamento são transmitidos por hereditariedade. Por exemplo, fundamentado no conceito de hereditariedade, George Streisinger (Streisinger et al., 1981) conseguiu desenvolver a identificação de mutações em peixes-zebra que permitiram inferir modelos de triagens genéticas (Figura Box 1). Para isso, embriões haploides foram gerados por fertilização de oócitos com esperma irradiado com UV que ativam a clivagem, mas que não contribuem com qualquer DNA paterno. Os embriões haploides resultantes continuam viáveis por três a cinco dias após a fertilização e, portanto, podem ser rastreados para fenótipos morfológicos precoces.



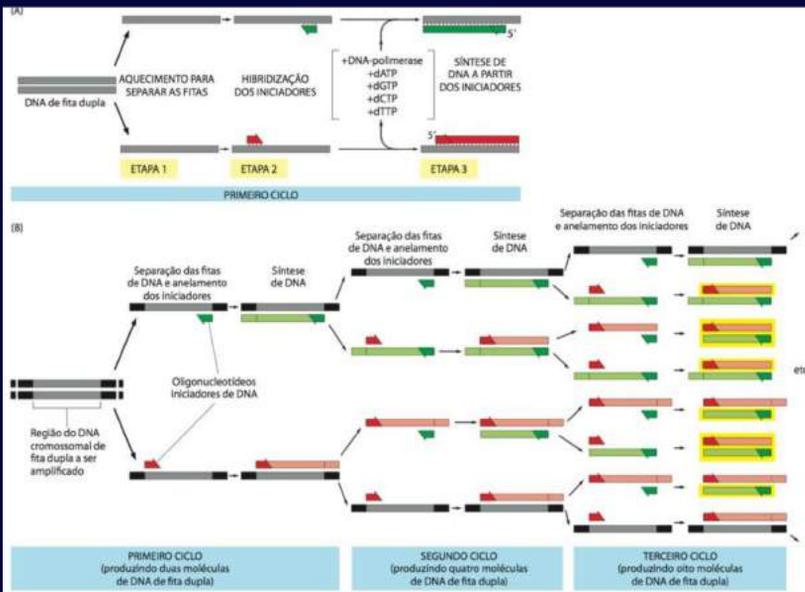
**FIGURA BOX 1:** Exemplo da aplicação do conceito de hereditariedade para triagem genética. Triagem de haploides; a geração parental (P0) e primeira geração de filiais (F1) são produzidas por reprodução natural, mas a segunda geração de filiais (F2) é produzida por fertilização in vitro com espermatozoides inativados por UV para gerar embriões haploides. Símbolo \* indica duas mutações induzidas pelo macho P0. Retirado e modificado de Holtzman et al., 2016 (doi:10.1534/genetics.116.190843/-/DC1).

## BOX 2. EXTRAÇÃO E AMPLIFICAÇÃO

**Extração.** A extração de DNA é o primeiro passo para estudos do genoma. As moléculas de DNA podem ser extraídas a partir de materiais biológicos como sangue, saliva, células epiteliais, urina, tecido e outros fluidos corporais. Apesar de existirem vários métodos para extração de DNA e RNA, todos têm por finalidade a separação do DNA ou RNA presentes nas células dos outros componentes celulares. Os procedimentos básicos para extrair (isolar) e purificar o DNA são: i) lise – quebra da célula para expor o DNA; ii) ligação – uma membrana de sílica retém e concentra o DNA; iii) lavagem – quebra e emulsão da gordura e das proteínas que formam a membrana da célula utilizando detergentes e centrifugação até restar apenas a membrana com o DNA; iv) eluição – liberação dos ácidos nucleicos (DNA/RNA) da membrana. Após essa etapa o DNA purificado está pronto para ser utilizado em diferentes aplicações. O rendimento e a qualidade do DNA extraído dependerão dos procedimentos utilizados e poderão interferir no sucesso das etapas seguintes, como amplificação e sequenciamento (Bruces et al., 2011; Qiagen, 2006; Rapley, 2000).

**Amplificação.** Geralmente a amplificação se refere ao aumento da quantidade do DNA através de técnicas de reação em cadeia da DNA polimerase (PCR – *Polymerase chain reaction*) (Figura Box. 2). Desenvolvida na década de 1980 (Rapley, 2000), a PCR revolucionou diversas áreas das ciências biológicas e médicas, ao permitir que um gene ou uma determinada região de uma molécula de DNA possa servir de molde para amplificação e produção de milhares de cópias. A PCR envolve três etapas relacionadas com mudanças na temperatura da reação (ver esquema abaixo), cada uma repetida muitas vezes: i) desnaturação – o DNA com a sequência a ser amplificada é desnaturado por aquecimento, ou seja, a dupla fita é aberta (desnaturada), tornando-se duas fitas separadas; ii) anelamento ou hibridização – após a separação das fitas, um par de iniciadores ou *primers* (uma pequena sequência de DNA específica para o gene que se quer estudar) complementa a fita oposta da sequência de DNA a ser amplificada. O molde é determinado pela

posição dos iniciadores que se anexam à fita. A temperatura requerida nessa etapa está relacionada com as características específicas dos iniciadores utilizados, além de também depender do gene, da qualidade e especificidade do produto desejado; e iii) extensão ou polimerização – com os iniciadores já unidos à região do DNA a ser copiado, a enzima DNA-polimerase adiciona as bases complementares, duplicando assim a região de interesse. Consequentemente, tem-se novamente a duplicação da fita de DNA. Posteriormente, o ciclo é reiniciado, os produtos do primeiro ciclo de replicação são então desnaturados, hibridizados e novamente replicados com a DNA-polimerase. O procedimento é repetido exponencialmente até que o nível desejado de amplificação seja obtido.



**FIGURA BOX 2:** O esquema mostra: (A) o passo de desnaturação, hibridização, extensão e polimerização no primeiro ciclo da PCR; (B) o ciclo sendo repetido três vezes. Esquema retirado de Alberts et al. (2018).

### BOX 3. SEQUENCIAMENTO

Um dos avanços mais importantes que possibilitou o estabelecimento e difusão da biologia molecular como ciência e ferramenta para as mais diversas áreas do conhecimento foi o desenvolvimento das técnicas de sequenciamento de DNA/RNA. De forma geral, o sequenciamento é uma série de processos bioquímicos que resultam na determinação das bases nitrogenadas nas suas respectivas ordens. As técnicas seminais de sequenciamento foram a de degradação de bases (Maxam & Gilbert, 1977) e o sequenciamento por terminação de cadeia ou sequenciamento didesoxi (Sanger et al., 1978). Destes, o método de terminação de cadeia utiliza didesoxinucleotídeos (ddNTPs) que não possuem um grupo hidroxila, o que, quando adicionados pela polimerase durante as reações de marcação da fita simples de DNA, resulta no término da extensão da cadeia. Esta técnica é ainda amplamente utilizada, mas foi primeiramente concebida por marcação das bases nitrogenadas através de fósforo radioativo (P32), eletroforese e posterior identificação em filmes de raio-X. Entretanto, devido ao longo processo técnico para obter as sequências, a utilização de P32 foi substituída pela utilização de ddNTPs fluorescentes, os quais são determinados por eletroforese vertical em placa ou, mais comumente, por eletroforese capilar. Na eletroforese capilar, a determinação da sequência de nucleotídeos é obtida através da emissão de diferentes comprimentos de luz decorrente da excitação dos ddNTPs por um feixe de *laser*.

Apesar de permanecer como uma das principais formas de sequenciamento de DNA, a técnica de terminação de cadeia apresenta algumas limitações referentes à quantidade de material a ser sequenciado (aproximadamente 750 pares de base, pb), amplificação específica de uma parte do genoma (através de técnicas de PCR) e marcação das fitas simples de DNA pelos ddNTPs. Dessa forma, novas tecnologias baseadas no sequenciamento por síntese (ou sequenciamento de nova e de última geração) vêm sendo desenvolvidas e visam ao aumento da quantidade de material a ser sequenciado e da qualidade dos resultados. Dentre estas, a seminal foi a técnica de piro-sequenciamento, na qual o DNA é

fragmentado, ligado a microesferas magnéticas (um único fragmento por microesfera), onde ocorre uma reação de PCR em emulsão. Posteriormente essas microesferas são capturadas individualmente em poços da placa de sequenciamento, na qual são fornecidos os reagentes para o início da liberação de pirofosfato oriundo da adição de um desoxinucleotídeo à cadeia. O pirofosfato é convertido para ATP pela ATP sulfúrilase e utilizado pela luciferase para oxidar a luciferina, o que então produz uma emissão de luz que é capturada por uma câmera acoplada ao sistema. Mesmo tendo esta tecnologia menos de 20 anos e capacidade de leitura simultânea de milhões de fragmentos de aproximadamente 400pb (gerando 350–500Mb de leituras por sequenciamento), plataformas com maior capacidade de sequenciamento tornaram-se mais populares, e o piro-sequenciamento caiu em desuso. Dentre essas novas plataformas, popularmente conhecidas como de segunda geração, temos a Solexa (também utiliza sequenciamento por síntese), Solid (hibridização e ligação) e Ion Torrent (sequenciamento por semicondutor).

A plataforma Solexa possui princípios bem similares ao piro-sequenciamento e é atualmente uma das plataformas mais utilizadas. Entretanto, difere do piro-sequenciamento na utilização de uma placa onde as fitas simples de DNA hibridizam (ao invés de microesferas) e se multiplicam por clonagem. O sequenciamento ocorre pela detecção de luz durante a incorporação de nucleotídeos marcados com fluorescência excitados por uma série de lasers. Alguns equipamentos que utilizam essa plataforma são o MiSeq, NextSeq e o HiSeq (Illumina), podendo, atualmente, chegar a leituras de até 600pb, totalizando até 1500Gb de informação (HiSeq 4000 – 2 x 150pb). Subsequentemente à plataforma Solexa, a tecnologia baseada em hibridização e ligação (Solid) foi lançada e diferenciou-se principalmente pelo fato de que cada base é lida duas vezes e utiliza, como no piro-sequenciamento, microesferas e PCR de emulsão. Entretanto, a etapa de sequenciamento ocorre por hibridização de sondas compostas por uma dupla de nucleotídeos conhecidos, seguidos de três nucleotídeos universais e outros três nucleotídeos marcados por fluoróforos. Uma vez que a sonda encontra seu alvo (DNA a ser sequenciado) junto ao iniciador do

sequenciamento, o respectivo sinal de fluorescência é lido. Após a leitura, o fluoróforo é removido, deixando um grupo fosfato na porção livre para o próximo ciclo e assim sucessivamente por mais seis ciclos (35pb). Posteriormente, a fita dupla é desnaturada e uma nova etapa de sequenciamento iniciada em uma posição anterior ao primeiro ciclo (iniciador -1). Dessa forma, obtém-se a identificação de outras bases da sequência alvo. Esse mesmo processo repete-se por mais três ciclos (totalizando cinco ciclos), e sempre que um novo ciclo se inicia, o sequenciamento começa em uma base anterior ao ciclo terminado.

Outra plataforma de sequenciamento de segunda geração, popularmente conhecida como Ion Torrent (2010), utiliza a detecção de íons de hidrogênio que são liberados durante uma reação de polimerização do DNA. Assim, diferentemente das tecnologias descritas acima, apesar de utilizar a técnica de sequenciamento por síntese, o Ion Torrent não utiliza nucleotídeos modificados ou detecção ótica. Resumidamente, um único tipo de dNTP é colocado em micropoços que contêm a fita de DNA a ser sequenciado. Se o dNTP introduzido é complementar àquele da posição a ser sequenciada, o mesmo é incorporado, o que causa a liberação de um íon de hidrogênio, que muda o pH da solução. Essa mudança é então lida por um sensor (ISFET) que indica a incorporação de dado nucleotídeo (nos micropoços onde não houve incorporação de nucleotídeo não há mudança de pH). Uma vez finalizado o ciclo, os dNTPs livres são removidos e um novo ciclo se inicia. Atualmente, esta plataforma possui leituras de até 400 ciclos.

Mais recentemente, almejando o sequenciamento de fitas longas de DNA (>20kpb), foram lançadas as plataformas (popularmente conhecidas como de terceira geração) PacBio e Oxford Nanopore, sendo a primeira baseada em sequenciamento de molécula individual em tempo real e a segunda na análise do sinal elétrico gerado pela passagem de uma fita de DNA por um poro proteico transmembrânico. Destas, a plataforma PacBio utiliza dNTPs marcados com fluoróforos no grupo fosfato que emitem suas respectivas fluorescências quando incorporados durante o processo de ligação, sendo depois clivados pela polimerase. Em contrapartida, a plataforma que utiliza nanoporos proteicos inseridos em uma

membrana polimérica sintética (*Oxford Nanopore*) detecta as modificações em uma corrente iônica durante a passagem de diferentes combinações de nucleotídeos pelo nanoporo. Essas modificações são então traduzidas e as bases determinadas.

#### **BOX 4. ANÁLISES DE DADOS MOLECULARES**

Análises genéticas podem ser realizadas a partir de uma gama de marcadores moleculares, utilizados de acordo com a hipótese a ser testada. Os marcadores moleculares mais comumente usados em análises de parentesco, populacionais ou de genética da conservação são os microssatélites, SNPs, RFLPs, AFLPs, VNTRs, entre outros. Já estudos com foco mais biogeográfico ou de sistemática geralmente empregam o sequenciamento direto de regiões gênicas de interesse. Para cada tipo de marcador molecular e objetivo, uma estratégia de análise é empregada. As análises aqui descritas estão divididas em três grupos:

##### **Análises intrapopulacionais**

Para iniciar qualquer análise, primeiro se prepara a matriz de dados de acordo com o tipo de marcador. No caso de dados genotípicos, cada loco é identificado e os genótipos individuais são padronizados e tabelados. Quando são analisadas sequências de DNA, o primeiro passo é encontrar as regiões consideradas homólogas ou similares através de análises de alinhamentos. O alinhamento de sequências pode ser global, no qual a similaridade deve compreender toda a extensão das sequências alinhadas, ou local, onde o alinhamento é feito através de “janelas” onde se procuram trechos de similaridade interna dentro das sequências. Geralmente, os alinhamentos locais são mais adequados para sequências divergentes dentro de grupo que possa ser distante geneticamente ou que apresente taxas evolutivas mais rápidas. Para tanto, existem *softwares* que trazem algoritmos diferentes para o alinhamento

das sequências, e que são escolhidos dependendo do nível de divergência e tipo de molécula estudada. Os mais utilizados são ClustalW (Chenna et al., 2003), mais apropriado para alinhar espécies próximas, MAFFT (Kato et al., 2002) e Muscle (Edgar, 2004), os quais são mais acurados e de alta performance.

Uma vez que os dados estão organizados, as análises intrapopulacionais podem ser inferidas. Estas permitem quantificar a variabilidade dentro das populações ou famílias, através de inferências de homozigotidade (Chakraborty e Weiss, 1991), estimativas de diversidade nucleotídica, as quais inferem a probabilidade de dois sítios serem homólogos; estimativas de média diferença par-a-par entre sequências (Tajima, 1983), taxas de distância genética entre sequências (Tajima e Nei, 1984) e testes de neutralidade baseados na expectativa de homozigotidade dentro da variabilidade estimada (Watterson, 1978).

### **Análises interpopulacionais**

Análises considerando mais de uma população de uma espécie permitem entender como as populações se relacionam, se há fluxo gênico entre as mesmas e sua intensidade. Análises de estruturação gênica estimam o quanto a variabilidade genética está distribuída: se há maior variabilidade entre populações do que dentro das mesmas, isso indica falta de conectividade, ou seja, falta de fluxo gênico. Porém, se há maior variabilidade dentro das populações do que entre elas, há evidência de que há ou houve migração recente e de que as populações têm se mantido estáveis. Uma das análises mais usadas para esses estudos é a Análise de Variância Molecular (AMOVA – Excoffier et al., 1992), a qual permite inferir como a diversidade genética está dividida nos diferentes níveis hierárquicos: o intrapopulacional; entre sub-populações, e entre populações.

Redes de haplótipos (utilizando *softwares* como TCS – Clemente et al., 2000) são uma forma gráfica de entender como a diversidade está alocada ao longo da distribuição da espécie. Dessa forma, é possível comparar indivíduos entre populações para inferir quais estão mais próximas e, assim, inferir a história evolutiva recente.

A fim de estimar migrações recentes, um dos softwares mais utilizados atualmente é o Migrate (Beerli e Felsenstein, 2001), que utiliza máxima verossimilhança ou algoritmos bayesianos, para inferir a direção dos migrantes por geração entre populações. Essa abordagem é bastante utilizada em estudos de conservação, permitindo inferir qual modelo de fluxo gênico se ajusta mais ao grupo estudado.

### **Análises de delimitação de espécies**

Quantificar a biodiversidade em ambientes marinhos tem se tornado extremamente urgente, devido ao aumento da perturbação antropogênica e extinções locais e globais nesses ecossistemas (Singh, 2002; Radulovici et al., 2010). Espécies são uma entidade fundamental em estudos de biologia comparativa, por isso o uso de métodos designados para a delimitação de espécies, processo no qual os limites entre espécies são determinados e novas espécies podem ser descobertas (De Queiroz, 2007), tem grande importância para estudos biológicos em geral. Complexos de espécies são comumente encontrados em ambientes marinhos intersticiais, onde, devido à convergência evolutiva, diferentes espécies apresentam morfologia similar, em decorrência de pressões ambientais para determinada forma ou fisiologia. Com o relativamente baixo custo do sequenciamento de DNA, regiões gênicas têm sido usadas para identificação de espécies através de reconstruções evolutivas de um ou mais genes (Carstens et al., 2013; Flot, 2015), permitindo identificar complexos de espécies crípticas ou, atualmente, indistinguíveis do ponto de vista morfológico. Métodos como ABGD (Automatic Barcode Gap Discovery – Puillandre et al., 2012), GMYC (General Mixed Yule Coalescent – Pons et al., 2006) e PTP (Poisson Tree Processes – Zhang et al., 2013) estão entre os mais utilizados para a delimitação da unidade de espécie a partir de uma hipótese filogenética. Esses métodos se baseiam no padrão de ramificação da topologia das reconstruções evolutivas para definir os limites de divergência das sequências e identificar grupos de indivíduos, reconhecidos então como espécies (Hubert e Hanner, 2015). A premissa do método ABGD é de que há um gap ou intervalo dos valores de distância calculados entre e dentro dos

grupos de indivíduos analisados. Já o método GMYC, baseado em análises de coalescência, separa espécies com base na identificação do ponto de transição entre o processo de coalescência (ou seja, do surgimento de um novo alelo a partir de um alelo ancestral) e do padrão de aprofundamento da ramificação da filogenia, característico do surgimento das espécies. No método PTP, o processo de especiação é diagnosticado com base no número de substituições entre as sequências em cada ramo da filogenia, onde se espera que haja um maior número de substituições entre espécies do que entre indivíduos de uma mesma espécie.

## 2 DNA BARCODING

O DNA *barcoding* (código de barras) fundamenta-se no postulado de que cada espécie provavelmente possui um código de barras exclusivo no DNA, e que a variação genética entre espécies excede a variação dentro das espécies (Hebert et al., 2003). Nesta seção discutimos a utilidade do DNA *barcoding* para o avanço na identificação de espécies, da estrutura populacional e do posicionamento filogenético das mesmas. Como ferramenta, sua aplicação pode acelerar a análise e a identificação em nível de espécie da biodiversidade marinha e facilitar os esforços de conservação. Nas ciências do mar, o *barcoding* tem sido utilizado em análises genéticas e filogeográficas de populações, identificação de presas no conteúdo estomacal, detecção de espécies invasoras, aplicação forense, segurança alimentar no consumo e produção de frutos do mar, entre outras (Zemlak et al., 2009; Bucklin et al., 2011). Em aplicações mais debatidas, o *barcoding* pode ser usado para delimitar espécies, revelar espécies crípticas e descobrir novas espécies (Gómez et al., 2006). Separada em duas partes, esta seção inclui os conceitos básicos relacionados ao método, e também estudos de casos relevantes em que a aplicação do DNA *barcoding* foi utilizada para responder questões pertinentes às ciências do mar.

De forma geral, o DNA *barcoding* tem como objetivo fornecer um método eficiente para identificações em nível de espécie e, como tal, vem contribuindo para pesquisas relacionadas à taxonomia e biodiversidade. No

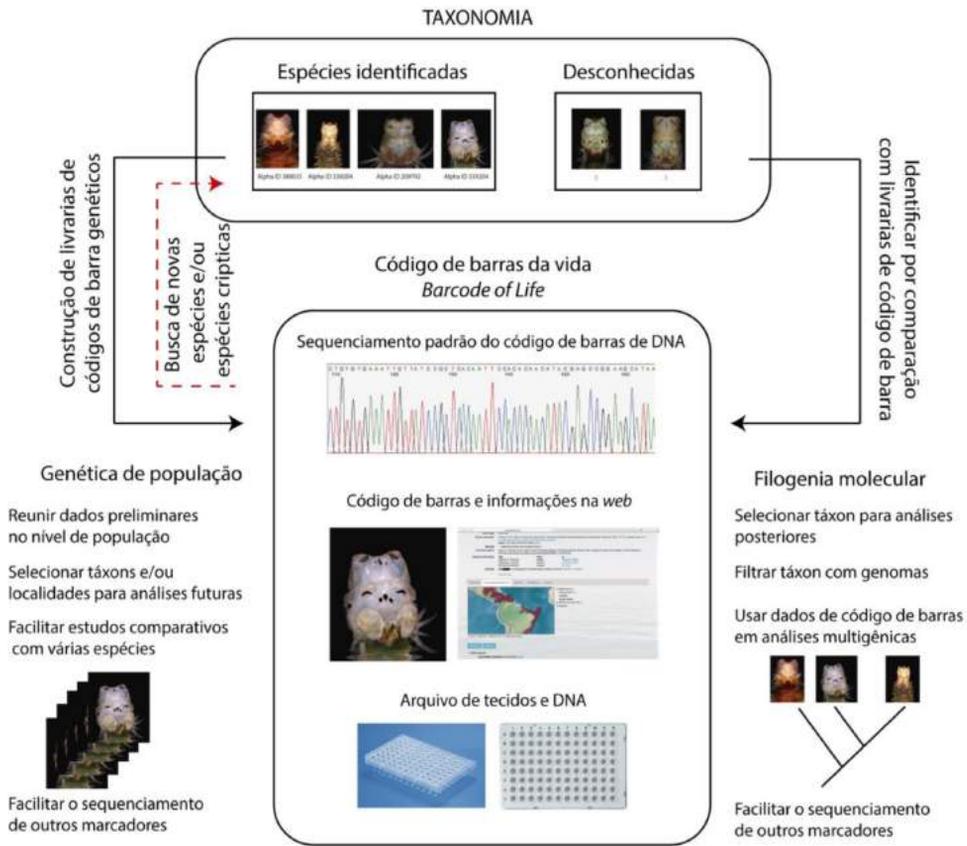
entanto, dois ramos da biologia que se concentram em diferentes níveis de organização desenvolveram ferramentas para avaliar as relações biológicas com sequências de DNA: a filogenética molecular e a genética de populações. Estudos em filogenética molecular tipicamente lidam com relações evolutivas entre níveis taxonômicos hierárquicos mais profundos, enquanto aqueles em genética populacional visam variação dentro e entre populações de uma única espécie. Em comparação, o DNA *barcoding* ocupa um meio termo, na medida em que busca uma cobertura abrangente para as espécies, mas se concentra em sua delimitação e não em seus relacionamentos. A análise de DNA *barcoding* inicia com a amplificação de uma sequência curta de DNA – o “código de barras” – de uma parte padrão do genoma (ou seja, uma região específica do gene) da amostra sob investigação. Dependendo do grupo (animal, planta, protista ou fungo) a ser investigado, existem diferentes marcadores que podem ser utilizados, apesar de que, em geral, são usados marcadores: 1) mitocondriais, como o COI (citocromo c oxidase subunidade 1) e o 16S-rRNA e CYTB (citocromo b); 2) nucleares, como o ITS1-rRNA (espaçador interno transcrito-1), ITS2-rRNA, e 18S-rRNA; e 3) marcadores dos plastídios, como p *rbcL* (large subunit of ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase) (Hajibabaei et al., 2007). Entre os marcadores destacamos a relevância da região mitocondrial de ~648 pares do COI, com centenas de milhares de sequências já determinadas, referenciadas e designadas a algum grupo. Apesar da dominância de sequências de COI, os demais marcadores também são utilizados, principalmente em grupos, como plantas e cnidários antozoários, em que o COI (e os genomas mitocondriais em geral) não evoluem com rapidez suficiente para fornecer resolução ao nível de espécie. Após obtida a sequência, essa amostra inicialmente desconhecida é então comparada com uma biblioteca de sequências de código de barras de referência derivadas de indivíduos de identidade conhecida (Figura 1). Uma amostra é identificada se a sua sequência corresponder a uma na biblioteca de códigos de barras. Existem diversos sistemas de bibliotecas de consórcios globais para padronização e curadoria de sequências, como o Barcode of Life Data Systems (<http://www.barcodinglife.org>) e o Consortium for the Barcode of Life (CBOL, <http://barcoding.si.edu>), (BOLD, <http://www.boldsystems.org>). Entretanto, a maioria das sequências são recuperadas e comparadas com a ferramenta de busca BLAST (Basic Local Alignment Search Tool, <https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>) no banco de genes do National Center for Biotechnology Information (GenBank<sup>®</sup> – NCBI – NIH).

A análise de dados de DNA *barcoding* é geralmente realizada por um método de agrupamento baseado em método de distâncias (por exem-

plo, *neighbor-joining*, NJ – Saitou e Nei, 1987) ou por modelos evolutivos de substituição de bases nitrogenadas, e/ou pela avaliação de distâncias genéticas dentro e entre espécies (ver Box 4). Caso a sequência não possa ser confiavelmente associada a nenhuma espécie já catalogada, o novo registro pode levar a uma nova sequência de códigos de barras para uma determinada espécie (ou seja, um novo haplótipo ou variante geográfica), ou ainda pode sugerir a existência de uma espécie ainda não descrita pela ciência.

O longo processo referente à coleta, classificação e identificação de espécies, ou ainda a descrição de novas espécies dos oceanos, torna nosso conhecimento acerca da diversidade limitado e até mesmo rudimentar, no caso de organismos minúsculos, raros, frágeis e/ou crípticos. As espécies marinhas podem ter amplas distribuições, abrangendo múltiplas bacias oceânicas e alcançar ambos os polos. Assim, oceanógrafos e biólogos marinhos ainda trabalham para mapear e descrever a diversidade dos oceanos, ampliando assim nosso conhecimento sobre a distribuição e abundância das espécies. Os escassos recursos humanos direcionados ao reconhecimento e identificação das espécies, que por sua vez é um dos fundamentos essenciais da pesquisa sobre biodiversidade, faz com que essa etapa seja onerosa em relação ao tempo. Assim, o DNA *barcoding* vem auxiliando e acelerando o entendimento de diversos processos biológicos e oceanográficos (Bucklin et al., 2011).

O DNA *barcoding* é particularmente útil para a identificação de espécies de organismos raros, frágeis e/ou pequenos, especialmente quando a identificação baseada em caracteres morfológicos é difícil e as interpretações são errôneas, resultantes de planos corporais simples ou evolutivamente conservados. Além disso, muitas espécies possuem distribuição geográfica circunglobal ou ainda disjuntas, assim o código de barras vem auxiliando no entendimento sobre variações geográficas e espécies crípticas (ver exemplos abaixo). Nesse sentido, diversos estudos procuraram reexaminar descrições morfológicamente. Entre os copépodes calanoides, por exemplo, o COI confirmou o diagnóstico para espécies irmãs de *Calanus* (Hill et al., 2001), *Clausocalanus* (Bucklin e Frost, 2009), *Neocalanus* (Machida et al., 2006) e *Pseudocalanus* (Bucklin et al., 2003). Para os decápodes, normalmente distinguíveis apenas quando adultos, o DNA *barcoding* auxilia na identificação das formas larvais e juvenis (Carvalho-Batista et al., 2014; Brandão et al., 2016), e foi amplamente utilizado para identificar larvas de peixes da Grande Barreira de Corais (Pegg et al., 2006), de outras partes do Oceano Pacífico (Hubert et al., 2010; Paine et al., 2008) e do Caribe (Victor, 2007). Especialmente para o manejo dos recursos pesqueiros, a identificação de larvas e sua distribuição têm implicações diretas para uma melhor gestão (Carvalho-Batista et al., 2014).



**FIGURA 1:** Principais componentes de projetos com código de barras (*barcoding*) da vida e sua contribuição para a taxonomia, reconstrução de filogenias moleculares e investigações de genética populacional. Este diagrama mostra como as bibliotecas de códigos de barras de DNA podem suportar o fluxo de trabalho taxonômico convencional através da identificação de amostras desconhecidas e ajudar a descrever espécies novas e crípticas. Sequências do código de barras e dados secundários da *web* também podem ser acessadas por meio de uma base de dados *on-line* global (por exemplo, BOLD: <http://www.barcodinglife.org>; *WORMs*: <http://www.marinespecies.org/>). Essa informação pode ser útil em outros contextos, como a filogenética e estudos em nível populacional. Além disso, o arquivamento de DNA e as amostras de tecido coletadas fornecem um excelente recurso para outras investigações. Fotografias de anelídeos da família Nereididae com seu número de identificação alpha ID do *WORMs*. Fotos de Ricardo Castro Álvarez. Esquema retirado e modificado de Hajibabaei et al. (2007) (doi:10.1016/j.tig.2007.02.001).

A aplicação de DNA *barcoding* em grupos extremamente diversos, como os anelídeos, frequentemente revela a existência de espécies crípticas dentro de grupos preteritamente reconhecidos como cosmopolitas, como *Eurythoe complanata* (Barroso et al., 2010) e *Capitella capitata* (Silva et al., 2017).

A delimitação de várias espécies de *Capitella* ao longo das águas brasileiras revelou uma diversidade local oculta e que pode melhorar as avaliações da qualidade ambiental, uma vez que essas espécies podem ser utilizadas como indicadores de poluição orgânica (Silva et al., 2017).

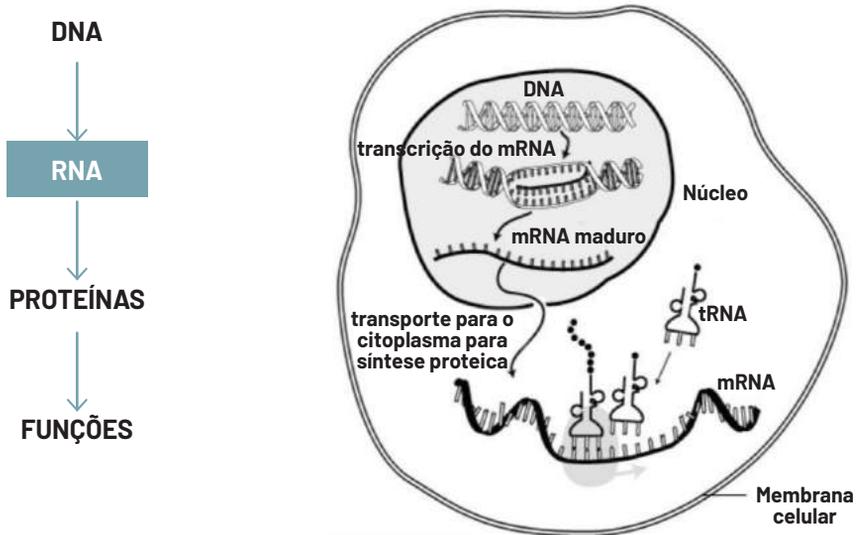
Em outras aplicações mais práticas, com base em uma biblioteca abrangente de códigos de barras (Ward et al., 2007; 2008), o DNA *barcoding* foi utilizado para identificar barbatanas de tubarão confiscadas de pescadores ilegais em águas do Norte da Austrália (Holmes et al., 2009).

### 3 EXPRESSÃO GÊNICA

Presente no núcleo de todos os seres vivos e também em outras organelas de eucariontes (p.ex. mitocôndria), o ácido desoxirribonucleico (DNA) carrega toda a informação genética/hereditária codificada em sequências de bases nitrogenadas. O DNA é formado por uma fita dupla ligada por pontes de hidrogênio composta por bases nitrogenadas (Adenina-A, Timina-T, Citosina-C e Guanina-G), pentoses (açúcar formado por cinco átomos de carbono) e grupo fosfato. Dentre a informação genética contida no DNA, ainda existe um grande hiato no conhecimento sobre as partes conhecidas como não-codificantes (p.ex. regiões inter genes); entretanto, a outra parcela é conhecida por conter a informação para a síntese de proteínas, que perfazem funções essenciais nos mais diversos processos biológicos, como enzimas, sinalizadores, receptores, hormônios, proteínas estruturais, proteínas transportadoras, proteínas de regulação de genes, entre outras. Além disso, existem genes que não codificam proteínas, como os ribossomais e de transferência, mas que são utilizados na síntese de RNAs.

De forma simplificada, durante a síntese proteica, a fita de DNA é desnaturada, ou seja, as pontes de hidrogênio que ligam cada uma das fitas são "quebradas", fazendo que cada uma seja utilizada como molde para a produção de RNA (fita simples). Esse processo acontece na região nuclear da célula eucariótica, em processo conhecido como transcrição (Figura 2), sendo seu início e fim determinados pelas regiões promotoras e terminais (cada uma composta por três nucleotídeos), respectivamente. Posteriormente, o RNA mensageiro é transportado para o citoplasma, onde é traduzido pelos ribossomos (RNA ribossômico e moléculas proteínas) em sequências de aminoácidos. O processo pelo qual o DNA é transcrito em RNA e posteriormente pode (no caso de genes codificantes) ou não (no caso de genes ribossomais) ser traduzido em proteína é conhecido como expressão gênica. Conseqüentemente,

os tipos e respectivas quantidades de RNA mensageiro em um dado momento refletem as potenciais proteínas que estão sendo ou estarão sendo produzidas pelo organismo em uma certa condição ambiental ou mesmo ontogenética. Para tanto, em cada célula existe uma série de “vias metabólicas” nas quais a produção ou degradação de transcritos de RNA é regulada de acordo com as necessidades intrínsecas das células em um espaço de tempo.



**FIGURA 2:** Processo de síntese proteica, em que a fita de DNA é desnaturada e utilizada como molde para a transcrição de RNA (processo no núcleo da célula eucariótica). O RNA mensageiro é transportado para o citoplasma, onde é traduzido pelos ribossomos em sequências de aminoácidos.

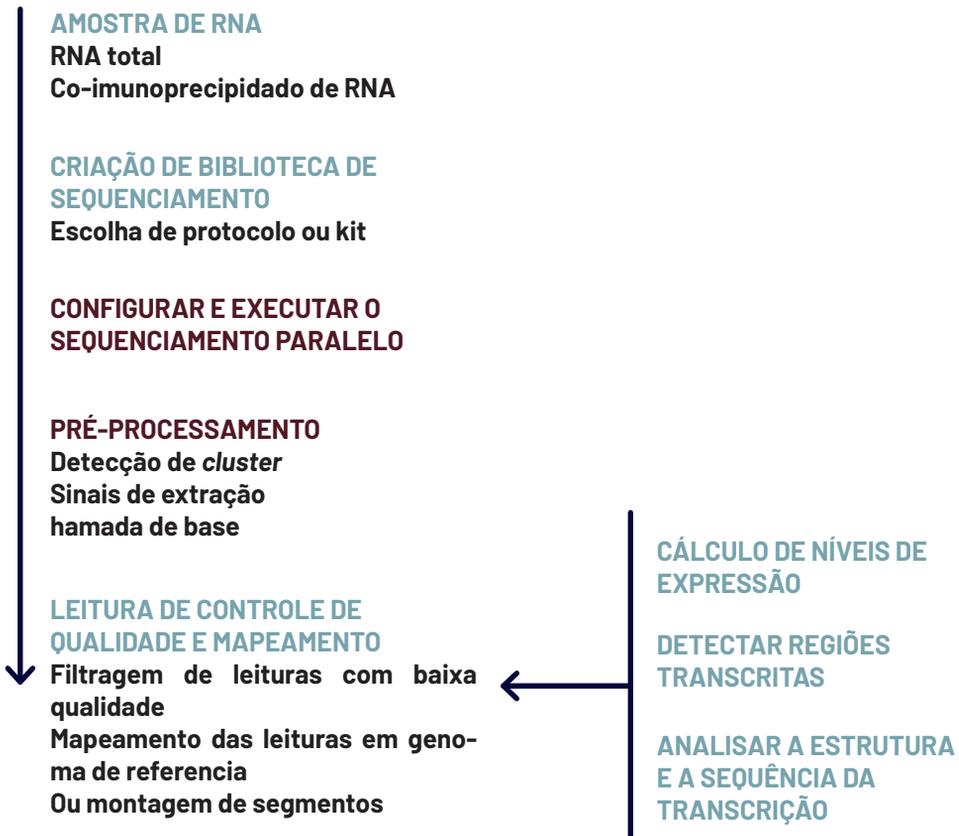
A utilização de técnicas moleculares vem possibilitando um rápido avanço no entendimento acerca da função dos genes, quando estes estão sendo transcritos para RNA e quais destes estão sendo traduzidos em proteínas. Dentre essas técnicas, as seminais foram: 1) *Northern Blot*, que possibilitou verificar se um gene estava ou não sendo transcrito em RNA através de sondas hibridizantes, e o 2) PCR quantitativo em tempo real (qPCR), que se baseia nas técnicas de PCR (ver Box 2), mas permite a visualização/quantificação do processo de amplificação do(s) gene(s) alvo(s) durante o processo. Para tanto, o qPCR utiliza sondas fluorescentes que são monitoradas a cada ciclo durante a reação do PCR (fluorescência aumenta proporcionalmente à medida que o cDNA é amplificado). Dessa forma, com a utilização de “genes controles”, é possível determinar a quantidade do gene alvo presente

na amostra. Atualmente, apesar de continuar sendo utilizada a técnica de qPCR, com o desenvolvimento de técnicas de *Microarray* que possibilitam a verificação da amplitude de expressão de centenas/milhares de genes simultaneamente e, mais recentemente, com o advento das tecnologias de sequenciamento paralelo massivo (NGS) que permite a identificação (baseado em seqüências e comparação das mesmas com bancos de dados) e quantificação total dos RNA mensageiros, as técnicas de qPCR são utilizadas mais comumente para pesquisas de genes alvo de interesse.

Para as técnicas de NGS utilizadas para os estudos de expressão gênica, temos que após o organismo alvo (ou *pool*) ser coletado no ambiente ou proveniente de testes laboratoriais, amostras de tecido são imediatamente processadas ou preservadas de modo a não haver degradação dos RNAs – essas moléculas são extremamente instáveis e começam a ser degradadas rapidamente após a morte do organismo. Algumas das formas mais utilizadas para preservar um organismo/tecido para futuras análises de expressão gênica são o congelamento imediato em nitrogênio líquido e posterior manutenção em temperatura de  $-80^{\circ}\text{C}$ , ou a utilização de preservativos ultra-salinos que inativam a ação das RNAses (i.e. ribonucleases que catalisam a degradação do RNA em componentes menores). Uma vez que os RNAs foram preservados e posteriormente extraídos, pode-se preparar as futuras bibliotecas a serem sequenciadas, ou ainda, utilizando enzima de transcriptase reversa, transformar os mesmos em cDNA para sequenciamento (Figura 3).

Dentro das mais diversas áreas relacionadas às Ciências do Mar, o sequenciamento do transcriptoma (ou seja, dos RNAs) pode ser considerado como ferramenta para o entendimento dos mais diversos fenômenos, sejam de cunho natural ou experimental. Neste contexto, como exemplos das possibilidades relacionadas com as técnicas de sequenciamento de transcriptoma, podemos quali-quantificar a expressão gênica relacionada a ciclos (p.ex. ciclo circadiano – Connor & Gracey, 2011); ação de poluentes nos organismos (p.ex. Wang et al., 2016); desenvolvimento ontogenético (p.ex. Bassim et al., 2015); acoplamento entre os organismos bentônicos e as variáveis oceanográficas (p.ex. Wong et al., 2018); melhores formas de alimentação para organismos de interesse comercial mantidos em cativeiro (aquicultura – Li e Li, 2014); desenvolvimento tecnológico (p.ex. Xie et al., 2017); respostas de organismos frente a mudanças climáticas (Goncalves et al., 2016).

A delimitação de várias espécies de *Capitella* ao longo das águas brasileiras revelou uma diversidade local oculta e que pode melhorar as avaliações da qualidade ambiental, uma vez que essas espécies podem ser utilizadas como indicadores de poluição orgânica (Silva et al., 2017).



**FIGURA 3:** Etapas laboratoriais realizadas durante o sequenciamento de RNA.

Em outras aplicações mais práticas, com base em uma biblioteca abrangente de códigos de barras (Ward et al., 2007; 2008), o DNA *barcoding* foi utilizado para identificar barbatanas de tubarão confiscadas de pescadores ilegais em águas do Norte da Austrália (Holmes et al., 2009).

## 4 GENÉTICA DE POPULAÇÕES

A genética de populações é uma das raras disciplinas da biologia em que a fundamentação teórica precedeu a obtenção de dados empíricos. Entre os responsáveis pela sua base teórica, desenvolvida entre as décadas de 1920 e 1930, estão Sewall Wright, Ronald A. Fisher e John B. S. Haldane. Genética de populações é um campo interdisciplinar que, assim como outras discipli-

nas, se divide em três tipos básicos: o teórico; o empírico; e o experimental. A abordagem teórica consiste na construção de modelos que possam explicar as observações empíricas e experimentais. Modelos como o da teoria da coalescência (Kingman, 1982) permitem, a partir de uma análise retrospectiva das frequências alélicas, compreender o papel dos processos evolutivos em populações e como estas estão se comportando demograficamente, ou seja, se estão em expansão ou declínio, por exemplo. Esse tipo de modelagem é importante nos estudos de genética de conservação em populações naturais, especialmente quando associados a análises ambientais.

A abordagem empírica consiste na observação e descrição da variação genética ao longo de um perfil geográfico ou temporal, permitindo a associação entre padrões e variabilidade genética. Para isso, marcadores genéticos (como alozimas, microssatélites, RFLPs, sequências de regiões gênicas, por exemplo) podem ser utilizados a fim de caracterizar as populações. Já a abordagem experimental proporciona suporte para hipóteses levantadas a partir de dados empíricos. A experimentação dentro da área de genética de populações pode ser feita através de transplantes de amostras entre diferentes locais ou análises de simulação de diferentes condições ambientais em laboratório. Exemplo de uma abordagem experimental foi conduzido por Bowman et al. (2018) em populações do copépodo *Epischura baikalensis*, quando indivíduos ocupando zonas de temperatura diferentes do Lago Baikal (Rússia) foram levados para o laboratório e mantidos em três temperaturas diferentes, a fim de avaliar as respectivas taxas de sobrevivência e sua associação com frequência alélica, perfil de expressão gênica e temperatura.

Quando mencionamos a palavra população, intuitivamente nos referimos a um grupo de organismos pertencentes à mesma espécie. Em genética de populações, o termo se aplica a um grupo de organismos vivendo em um ambiente geográfico restrito com possibilidade de cruzamento entre si. Porém, membros de uma espécie raramente se distribuem de maneira homogênea, especialmente quando se pensa em comunidades marinhas. As populações geralmente estão divididas ou estruturadas de acordo com a malha ambiental, a qual intercala áreas favoráveis e desfavoráveis ao longo da distribuição da espécie. Unidades de intercruzamento – ou demes – de populações grandes e geograficamente estruturadas são as principais unidades funcionais para o estudo de genética populacional, uma vez que permitem a avaliação direta do efeito dos processos evolutivos nas mudanças das frequências genotípicas e processos adaptativos. Uma forma de deduzir essas frequências genotípicas em populações naturais é assumir que o cruzamento é aleatório entre membros das populações (já que frequências genotípicas

são determinadas em parte pelo processo de cruzamento), e que o efeito dos processos evolutivos de seleção natural, deriva genética, fluxo gênico e migração é negligenciável. Essa é a hipótese nula testada pelos geneticistas de populações quando estudam mudanças nas frequências genotípicas espacial e temporalmente, conhecida como Princípio de Hardy e Weinberg (Wigginton et al., 2005). A partir da premissa de que as frequências não mudam, podemos então explicitar hipóteses para compreender a fluidez das alterações populacionais, como eventos de colonização, reduções e extinções populacionais em um determinado momento da história das espécies. Dessa forma, é possível avaliar como a diversidade genética está distribuída nas populações e quais são os fatores responsáveis pela manutenção dessa distribuição.

A malha ambiental onde as espécies se distribuem tem um papel importante na conectividade entre os indivíduos. Em organismos marinhos tem-se a ideia de que o ambiente propicia essa conectividade devido à ausência aparente de barreiras geográficas. Além disso, correntes marinhas seriam vetores eficientes de migração, aumentando assim a diversidade dentro das populações com a constante troca de migrantes (Pinheiro et al., 2017). Para a maioria das espécies marinhas bentônicas com ciclos de vida complexos, essa migração ocorre principalmente durante o estágio de desenvolvimento larval. O desenvolvimento pode ser direto, lecitotrófico (onde as larvas apresentam uma fonte de alimento no saco vitelínico que é consumido durante a dispersão) ou planctotrófico (o mais longo, onde as larvas se alimentam ativamente na coluna d'água). O diminuto tamanho das larvas, associado ao ambiente heterogêneo e fluido, torna difícil quantificar como essa conectividade ocorre. Além disso, a sobrevivência diferencial pós-recrutamento adiciona maior complexidade às medidas de conectividade. Nesse sentido, a genética de populações é uma ferramenta poderosa para inferir o fluxo gênico decorrente de diferentes tipos de desenvolvimento larval entre populações marinhas. Modelos oceanográficos baseados em dados ambientais usam a simulação de movimento de partículas nas correntes oceânicas, permitindo a inferência dos movimentos larvais (Galindo et al., 2006; 2010). Essas duas abordagens, associadas à teoria de genética de paisagens (Manel et al., 2003), onde a estrutura ambiental e suas características são inferidas e adicionadas como variáveis na análise, têm sido utilizadas para estimativas mais realistas dos movimentos das populações.

## 5 METAGENÔMICA (DNA AMBIENTAL)

O termo Metagenômica foi usado primeiramente em 1998, por Jo Handelsman, e descreve o material genético total da biota encontrada em um determinado hábitat. Dessa forma, é possível a identificação de dezenas a centenas de espécies, incluindo espécies não conhecidas pela ciência, a partir do substrato de estudo, que pode ser folhíço (Beng et al., 2016), solo (Andreote et al., 2012; Daniel, 2005), água (Ko et al., 2013; Bucklin et al., 2016), conteúdo estomacal (Leray et al., 2013), entre outros. O campo da metagenômica se iniciou com estudos de comunidades microbianas, abrindo as portas para estudos ecológicos em larga escala. A técnica se resume à extração do DNA total dos organismos de determinado ambiente ou hábitat e sequenciamento em larga escala. A partir dos resultados desse sequenciamento, os dados são então comparados e anotados de acordo com uma base de dados de referência do grupo de interesse.

Dentro da área de metagenômica surgiu o *metabarcoding*, que é o estudo da diversidade ambiental utilizando uma ou mais regiões gênicas pre-determinadas em vez de todo genoma, o que simplifica as análises principalmente para grupos ecológicos cujo conhecimento é incipiente. O isolamento dessas regiões se dá por meio de PCR, através da utilização de *primers* universais, seguido do sequenciamento em grande escala, o NGS (Next Generation Sequencing ou Sequenciamento Paralelo Massivo). O sucesso da análise de *metabarcoding* é particularmente afetado por dois fatores: a escolha dos *primers* para a região de interesse e o banco de dados de referência. Essas regiões gênicas são determinadas de acordo com o nível de conservação da sequência; devem ter variabilidade suficiente para separar as unidades taxonômicas no nível desejado, seja este de espécie, gênero ou família. Logo, os *primers* devem ter como alvo fragmentos curtos de DNA (menores que 400pb), a fim de maximizar as estimativas de riqueza (Leray et al., 2013). As pesquisas ecológicas através da identificação por *metabarcoding* aceleraram a compreensão dos padrões de diversidade, fornecendo estimativas robustas de distribuição de espécies, abundâncias relativas, tolerância ambiental e interações bióticas (Fonseca et al., 2014). A partir dos resultados do sequenciamento é possível isolar *clusters* ou grupos que corresponderiam a unidades taxonômicas operacionais moleculares (MOTUs). No entanto, a identificação dessa biodiversidade está associada fortemente a um banco de dados de referência relativamente rico, uma vez que uma composição incompleta desse banco resulta em resultados enviesados e de baixa reprodutibilidade (Guillou

et al., 2013; Leray e Knowlton, 2015). Esse desafio pode ser superado com a constante inserção de novas sequências ao conjunto de dados de referência do *GenBank* e outras bases a partir do sequenciamento direto das espécies que ocorrem no mesmo ambiente.

No ecossistema marinho, a abordagem do *metabarcoding* tem sido usada com sucesso em diferentes compartimentos biológicos, tais como na meiofauna (Radulovici et al., 2010; Fonseca et al., 2014; Faria et al., 2018), na identificação do conteúdo estomacal de peixes recifais (Leray et al., 2013), na identificação de larvas de espécies invasoras (Hatzenbuehler et al., 2017) ou na composição da fauna zooplanctônica (Bucklin et al., 2010; 2016). Os dados genéticos obtidos por essa abordagem têm se mostrado essenciais para os estudos de biodiversidade, uma vez que, além de permitir a identificação de espécies de difícil preservação, não são limitadas por características apenas conspícuas em um dos sexos ou em determinado estágio de vida. No entanto, em todos esses estudos nota-se a premente necessidade de continuar a identificação taxonômica em seu molde clássico, através de estudos morfológicos detalhados, a fim de complementar e validar os resultados genéticos e permitir um aprofundamento de estudos ecológicos.

## 6 HOLOGENÔMICA

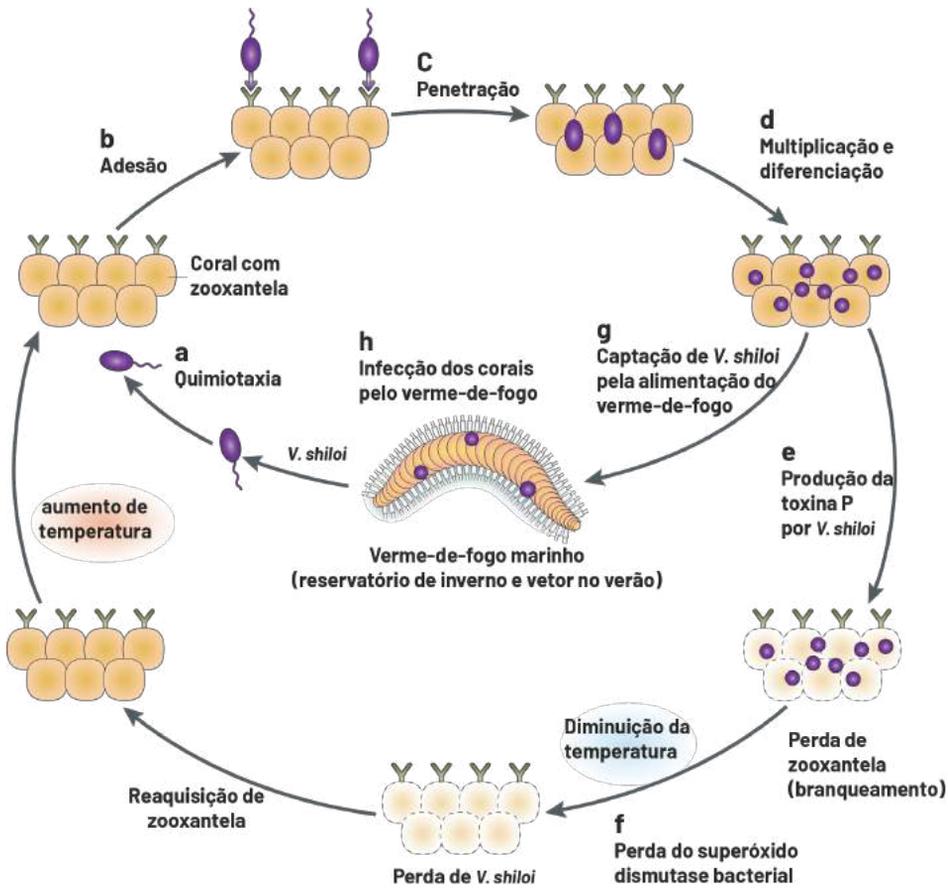
Atualmente, o interesse científico pelos micro-organismos simbiotes vem crescendo significativamente, sendo vasto o número de estudos publicados anualmente que abordam desde a descrição da diversidade bacteriana, como sua abundância (e.g. Bourne e Munn, 2005), produção de metabólitos (e.g. Wegley et al., 2007), função ecológica (e.g. Faune e Bosch, 2007) e teste de teorias/hipóteses, como, por exemplo, a teoria hologenômica (Rosenberg e Zilber-Rosenberg, 2016). Dessa forma, temos nas últimas duas décadas uma mudança de paradigma, em que a microbiologia consistiu basicamente no estudo de micro-organismos relacionados a doenças.

De maneira geral, todos os metazoários, fungos e vegetais possuem relação íntima com outros organismos, eucariontes e procariontes, mais especificamente uma relação endossimbiótica formada por bactérias, fungos, arqueias e protistas (Margulis, 1991; Rosenberg e Zilber-Rosenberg, 2016). Apesar de ainda serem recentes os estudos sobre os efeitos dessa associação, inúmeras evidências sugerem que esse tipo de consórcio exerce papel fundamental para a aptidão e adaptação/adequação do hospedeiro, gerando consequências evolutivas (Fraune e Bosch, 2010) e ecológicas. Nesse contexto,

a teoria hologenômica (Zilber-Rosenberg e Rosenberg, 2008) sugere a associação dos termos “holobionte” (proposto por Margulis, 1991) – hospedeiro e os micro-organismos que vivem em simbiose –, e “hologenoma” – somatória das informações genéticas do hospedeiro e dos micro-organismos simbiotes. Baseia-se nas premissas de que: (1) além de todas as espécies possuem relações simbióticas com bactérias, (2) essas são herdadas por gerações consecutivas, (3) sua composição reflete diretamente na aptidão do hospedeiro e (4) a variância genética do holobionte pode ser aprimorada através da incorporação de distintas populações de simbiotes (Zilber-Rosenberg e Rosenberg, 2008). Assim, todas as suas generalizações possuem grande apelo evolutivo e ecológico, uma vez que indicam que a associação entre hospedeiro e simbiote afeta diretamente a adequação do holobionte em seu ambiente.

Dentro das ciências do mar, a aplicação de técnicas moleculares (ver Box 2 e 3) vêm auxiliando no melhor entendimento de diversas facetas da teoria hologenômica. As ameaças aos ambientes marinhos vêm aumentando, desde escalas regionais, como o declínio da qualidade da água devido à poluição, até mudanças de escala global, como aumento da temperatura e acidificação dos oceanos (Hoegh-Guldberg et al., 2007; De’ath et al., 2012). Como consequência, entendemos atualmente que a quebra e/ou modificação nas relações simbióticas (holobionte e hologenoma), principalmente em questões relacionadas ao desbalanço da comunidade bacteriana (e.g. Bourne et al., 2008; Vega Thurber et al., 2009; Fan et al., 2012), pode resultar em consequências ambientais devastadoras, incluindo desde mudanças fisiológicas e aparecimento de doenças (Harvell et al., 2007) a até mesmo mudanças ecossistêmicas. Por exemplo, o crescimento anormal de *Vibrio shiloi* (bactéria) de corrente do aumento na temperatura da água do mar foi reportado como uma das causas do branqueamento em corais do Mar Mediterrâneo (Rosenberg e Falkovitz, 2004)(Figura 4).

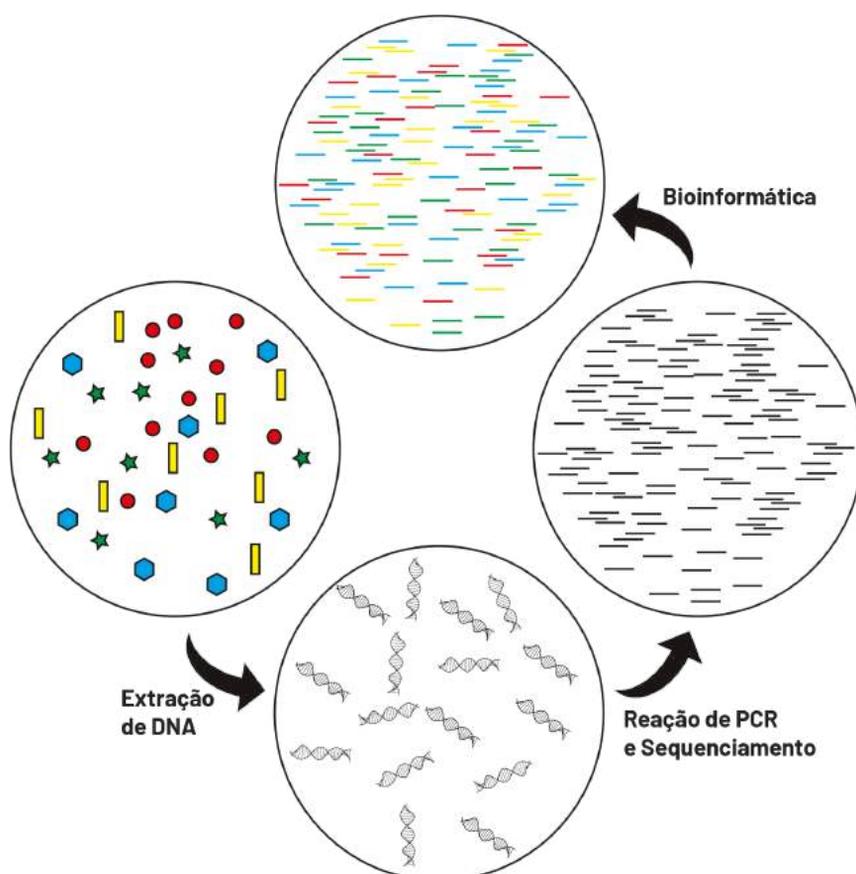
Dentre as técnicas moleculares que vêm sendo aplicadas visando à descrição quali-quantitativa da diversidade bacteriana, temos a amplificação parcial de genes através de técnicas de PCR que utilizam iniciadores universais para grupos de interesse (p.ex. 16S rRNA, 18S rRNA), associados ao posterior sequenciamento utilizando plataformas de segunda e terceira geração (Figura 5). De forma geral, essas técnicas permitem não apenas a identificação de unidades taxonômicas operacionais (OTUs, ou MOTUs conforme citado acima), mas também uma quantificação/balanço entre as mesmas (através de comparação do número de leituras - reads). Essas quali-quantificações vêm sendo estudadas à luz das mais diversas mudanças ambientais, como aumento da temperatura, diminuição do pH, presença de contaminantes,



**FIGURA 4:** Ciclo de crescimento populacional de *Vibrio shiloi* decorrente de aumento da temperatura da água do mar, e suas associações com o branqueamento de corais escleractíneos. Modificado de Rosenberg e Falkovitz (2004).

entre outras. Por exemplo, a comunidade bacteriana associada com organismos marinhos como esponjas, corais e algas inclui grupos envolvidos em processos metabólicos como nitrificação, fixação de nitrogênio, redução de sulfatos, fotossíntese, defesa química e muitos outros (Chisholm et al., 1996; Nakanishi et al., 1996; Crump e Koch, 2008; Barott et al., 2011; Orole e Adejumo, 2011).

Entretanto, como visto acima, destaca-se que, apesar de grande parte dos estudos visarem a um melhor entendimento frente a dificuldades ambientais, do ponto de vista fisiológico/ecológico, não podemos deixar de mencionar que outros estudos buscam compreender a adequação do holo-



**FIGURA 5:** Esquema exemplificando a amplificação parcial de genes através de técnicas de PCR que utilizam iniciadores universais para grupos de interesse (p.ex. 16S rRNA, 18S-rRNA), associados ao posterior sequenciamento utilizando plataformas de segunda e terceira geração e análises de bioinformática. Símbolos indicam organismos de espécies diferentes.

bionte e, respectivamente, do hologenoma, em termos evolutivos (Brucker e Bordenstein, 2012; 2013), de desenvolvimento ontogenético (McFall-Ngai e Ruby, 2000; McFall-Ngai, 2002) e de modificações genéticas no hospedeiro (Husnik et al., 2013).

Entretanto, apesar do grande avanço já ocorrido, ainda é incipiente o nosso entendimento com relação aos aspectos fisiológicos decorrentes de associação entre o hologenoma e a aptidão do holobionte e suas respectivas adequações frente a variáveis ambientais (abordagens intrinsecamente multi/interdisciplinares). Do ponto de vista oceanográfico, podemos citar a escassez de dados moleculares no que tange ao complexo acoplamento dos

sistemas pelágico e bentônico, e como essas mudanças regem as características da paisagem marinha. Entretanto, esse é um quadro que deverá avançar em curto espaço de tempo, quando investigações interdisciplinares envolvendo: a) técnicas moleculares como i) a quali-quantificação do holobionte e suas especificações perante variáveis ambientais, ii) mudanças na transcrição dos genes do hospedeiro decorrente de associações com comunidades distintas e perante variáveis ambientais; b) estudos fisiológicos do iii) hospedeiro e iv) simbioses; e c) estudos oceanográficos (características e variações ambientais) sejam aplicadas de maneira conjunta.

## 7 PERSPECTIVAS E POTENCIALIDADES PARA O FUTURO

Os oceanos são laboratórios naturais para testes de hipóteses de teorias biológicas, geológicas, físicas e químicas, e também permitem o desenvolvimento, aplicação e calibração de diversas ferramentas no campo da genômica. Enquanto os ecologistas podem usar a telemetria de dados para rastrear padrões de dispersão e um oceanógrafo físico pode usar derivadores para analisar o transporte em correntes, a genômica pode usar a informação genética para analisar a dispersão dos organismos em diversas escalas. A aplicação da genômica ao ambiente marinho permitiu revisões de dispersão de larvas, conectividade populacional (Cowen e Sponaugle, 2009), fluxo gênico (Hellberg, 2009), análises filogenéticas e filogeográficas de espécies marinhas. A genômica provou ser útil para examinar uma ampla variedade de questões fundamentais na ecologia e evolução dos metazoários, associadas a feições geográficas e processos oceanográficos, no espaço e no tempo, e em uma série de escalas. Para alguns grupos a variabilidade genética permitiu inferir os padrões de máximos pré-glaciais de expansão demográfica, com evidências de refúgios glaciais e expansão pós-glaciais (Wares e Cunningham, 2001; Crandall et al., 2008). Outros padrões filogeográficos específicos, como das espécies de gastrópodes intermareais litorínideos, são explicados pela formação, expansão e fechamento dos oceanos, intimamente ligados à tectônica de placas (Reid et al., 2006). Em outras escalas, a baixa conectividade entre as populações do copépodo pelágico *Metridia lucens* é associada ao forte comportamento de migração vertical da espécie, que ajuda na manutenção da posição geográfica e reduz a dispersão em larga escala (Blanco-Bercial et al., 2010).

No campo da Zoologia, houve a inclusão de um grande número de filos e grupos exclusivamente marinhos nas análises filogenômicas e filogenéticas para a resolução da história evolutiva dos metazoários (Dunn et al., 2014; Fonseca et al., 2017; Vinther, 2015; Quatrinni et al. 2020). Na ecologia trófica, estudos com a dieta de tubarões em águas profundas com ferramentas da genômica estimaram até 223 tipos de presas. Na aquicultura, a genômica pode ser usada na identificação de frutos do mar defumados ou processados (Smith et al., 2008).

No campo de novas teorias, como a epigenética, há um terceiro fator que serve como ponte entre o ambiente e nossos genes, e que pode operar por conta própria para moldar quem somos. Em contraste com essa visão, essa teoria apresenta a relação entre genes e forma como uma condição altamente derivada, um produto da evolução, e não sua precondição. Antes da canalização bioquímica das vias de desenvolvimento e da estabilização dos fenótipos, a interação de organismos multicelulares com seus ambientes físico-químicos dita o mapeamento entre genomas e formas. Nessa teoria, a canalização bioquímica pode ter sido gerada por mecanismos epigenéticos: processos inicialmente físicos característicos de materiais quimicamente ativos condensados e, posteriormente, interações condicionais indutivas entre os tecidos constituintes do organismo. O conceito de que os mecanismos epigenéticos são os agentes geradores da origem do caráter morfológico ajuda a explicar as descobertas como a explosão dos planos corporais no mar do Cambriano, as origens da inovação morfológica, homologia e rápida mudança de forma. Neste campo, os oceanos, seus padrões e processos certamente servirão como uma enorme fonte para o entendimento de como o ambiente pode atuar na morfologia e fisiologia de todas as formas de vida.

No campo do melhoramento genético, o sistema CRISPR (*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats* – Repetições Palindrômicas Curtas Agrupadas e Regularmente Interespaçadas) surge como uma ferramenta de edição de genoma que pode transformar a biologia, pois permite que cientistas modifiquem genomas com precisão, eficiência e flexibilidade. O CRISPR é frequentemente usado como um termo geral para se referir à edição genômica, mas é o acoplamento do CRISPR e do sistema Cas9 (*CRISPR associated protein 9*, enzima associada a sistema CRISPR) que permite a deleção seletiva do DNA. No ambiente marinho já é possível testar a função das características do genoma, de redes gênicas, organização do genoma, sequências não-codificantes conservadas, e abordar experimentalmente a relação genótipo-fenótipo (Momose e Concordet, 2016). Essa tecnologia foi usada para gerar eficientemente mutações genéticas diretas e estáveis em

microalgas, como na diatomácea marinha *Phaeodactylum tricornutum*, que, como o principal grupo de produtores primários dos oceanos e como um grupo promissor e basicamente inexplorado de organismos eucarióticos, pode ser aplicado para a bioprodução e exploração biotecnológica (Nymark et al., 2016).

No Brasil, essas ferramentas, ainda que executadas, enfrentam barreiras logísticas e financeiras. Logísticas, principalmente por ainda existirem poucas empresas de produtos, reagentes, equipamentos e centros de sequenciamento, o que dificulta o acesso e a agilidade na manutenção das rotinas de bancada e analíticas. Financeiras, porque muitos dos produtos não são produzidos no Brasil, necessitando assim serem importados. Entretanto, grupos de pesquisa espalhados pelo país trabalham para mudar esse cenário com criatividade e cooperação, e mostram com suas publicações e projetos o quanto as disciplinas das ciências do mar podem avançar com a genômica marinha.

## REFERÊNCIAS

- Alberts, Bruce; Alexander Johnson, Julian Lewis, Martin Raff, Keith Roberts, Peter Walter. 2018. *Molecular biology of the cell*. New York: Garland Science.
- Andreote, Fernando Dini; Diego Javier Jiménez; Diego Chaves; Armando Cavalcante Franco Dias; Danice Mazzer Luvizotto; Francisco Dini-Andreote; Cristiane Cipola Fasanella, et al. 2012. The microbiome of Brazilian mangrove sediments as revealed by metagenomics. *PLoS ONE* 7(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038600>.
- Barott, Katie L.; Beltran Rodriguez-Mueller; Merry Youle; Kristen L. Marhaver; Mark J. A. Vermeij; Jennifer E. Smith; Forest L. Rohwer. 2012. Microbial to reef scale interactions between the reef-building coral *Montastraea annularis* and benthic algae. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 279. <https://doi.org/10.1098/rspb.2011.2155>
- Barroso, Romulo; Michelle Klautau; Antonio M Solé-Cava; Paulo C Paiva. 2009. *Eurythoe complanata* (Polychaeta: Amphinomididae), the 'cosmopolitan' fireworm, consists of at least three cryptic species. *Marine Biology*, May 2014. <https://doi.org/10.1007/s00227-009-1296-9>.
- Beerli, Peter; Joseph Felsenstein. 2001. Maximum likelihood estimation of a migration matrix and effective population sizes in n subpopulations by using a coalescent approach. *PNAS* 98(8).
- Beng, Kingsly Chuo; Kyle W Tomlinson; Xian Hui Shen; Yann Surget-Groba; Alice C Hughes; Richard T Corlett; J W Ferry Slik. 2016. The utility of DNA metabarcoding for

studying the response of arthropod diversity and composition to land-use change in the tropics. *Scientific Reports* 6 (Oct. 2015). Nature Publishing Group:24965. <https://doi.org/10.1038/srep24965>.

Bourne, David; Colin Munn. 2005. Diversity of bacteria associated with the coral *Pocillopora damicornis* from the Great Barrier Reef. *Environmental Microbiology* 7(8). <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2005.00793.x>

Bourne, David; Yuki Lida; Sven Uthicke; Carolyn Smith-Keune. 2008. Changes in coral-associated microbial communities during a bleaching event. *The ISME Journal* 2. <https://doi.org/10.1038/ismej.2007.112>

Boyle, Michael J; Emi Yamaguchi; Elaine C Seaver. 2014. Molecular conservation of metazoan gut formation: evidence from expression of endomesoderm genes in *Capitella teleta* (Annelida). *EvoDevo*, 1–19.

Brandão, Manoela C.; Andrea Freire; Ronald S Burton. 2016. Estimating diversity of crabs (Decapoda: Brachyura) in a no-take marine protected area of the SW Atlantic Coast through DNA barcoding of larvae. *Systematics and Biodiversity*, Dec. 2017. <https://doi.org/10.1080/14772000.2016.1140245>.

Brucker, Robert M.; Seth R. Bordenstein. 2012. The roles of host evolutionary relationships (genus: *Nasonia*) and development in structuring microbial communities. *Evolution* 66. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.2011.01454.x>

Brucker, Robert M.; Seth R. Bordenstein. 2013. The hologenomic basis of speciation: gut bacteria cause hybrid lethality in the genus *Nasonia*. *Science* 341. <https://doi.org/10.1126/science.1240659>. Epub 2013 Jul 18.

Bucklin, Ann; Bruce W Frost. 2009. Morphological and molecular phylogenetic analysis of evolutionary lineages within *Clausocalanus* (Copepoda: Calanoida). *Journal of Crustacean Biology* 29 (1):111–20. <https://doi.org/10.1651/07-2879.1>.

Bucklin, Ann; Bruce W Frost; J Bradford-Grieve; LD Allen; NJ Copley. 2003. Molecular systematic and phylogenetic assessment of 34 calanoid copepod species of the *Calanidae* and *Clausocalanidae*. *Marine Biology*, Aug. 2014. <https://doi.org/10.1007/s00227-002-0943-1>.

Bucklin, Ann; Russell R Hopcroft; Ksenia N Kosobokova; Lisa M Nigro; Brian D Ortman, Robert M Jennings; Christopher J Sweetman. 2009. DNA barcoding of Arctic Ocean holozooplankton for species identification and recognition. *Deep-Sea Research Part II*. Elsevier, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2009.08.005>.

Bucklin, Ann; Penelope K. Lindeque; Naiara Rodriguez-Ezpeleta; Aitor Albaina; Maiju Lehtiniemi. 2016. Metabarcoding of marine zooplankton: prospects, progress and pitfalls. *Journal of Plankton Research*, April. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbw023>.

Bucklin, Ann; Dirk Steinke; Leocadio Blanco-Bercial. 2011. DNA barcoding of marine metazoa. *Annual Review of Marine Science*, May 2014. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120308-080950>.

- Carpenter, Kent E; Paul H Barber; Eric D Crandall; Ma Carmen A Ablan-Lagman; Ambariyanto, Gusti Ngurah Mahardika; B Mabel Manjaji-Matsumoto, et al. 2011. Comparative phylogeography of the coral triangle and implications for marine management. *Journal of Marine Biology*, May 2014. <https://doi.org/10.1155/2011/396982>.
- Carstens, Bryan C.; Tara A. Pelletier; Noah M. Reid; Jordan D. Satler. 2013. How to fail at species delimitation. *Molecular Ecology*, 4369–83. <https://doi.org/10.1111/mec.12413>.
- Carvalho-Batista, Abner; Mariana Negri; Leonardo G Pileggi; Antonio L Castilho; Rogério C Costa, Fernando L Mantelatto. 2014. Inferring population connectivity across the range of distribution of the stiletto shrimp *Artemesia longinaris* Spence Bate, 1888 (Decapoda, Penaeidae) from DNA *barcoding*: implications for fishery management. *ZooKeys* 288:271–88. <https://doi.org/10.3897/zookeys.457.6569>.
- Chenna, Ramu; Hideaki Sugawara; Tadashi Koike; Rodrigo Lopez; Toby J Gibson; Desmond G Higgins; Julie D Thompson. 2003. Multiple sequence alignment with the clustal series of programs. *Nucleic Acids Research*, May 2014. <https://doi.org/10.1093/nar/gkg500>.
- Chisholm, John R. M.; Duaga, C.; Ageron, E.; Grimont, P. A. D.; Jaubert, J. M. 1996 'Roots' in mixotrophic algae. *Nature* 381, 382.
- Clement, Mark; D Posada; Keith A Crandall. 1999. TCS: a computer program to estimate gene genealogies. *Molecular Ecology Notes*, January 2019:3–6.
- Connor, Kwasi M; Andrew Y Gracey. 2011. Circadian cycles are the dominant transcriptional rhythm in the intertidal mussel *Mytilus californianus*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, May. <https://doi.org/10.1073/pnas.1111076108>.
- Crump, Byron; Evamaria W. Koch. 2008. Attached bacterial populations shared by four species of aquatic angiosperms. *Applied Environmental Microbiology* 74. <https://doi.org/10.1128/AEM.00952-08>
- Daniel, Rolf. 2005. The metagenomics of soil. *Nature Reviews Microbiology*, June. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1160>.
- De'ath, Glenn; Katharina Fabricius; Hugh Sweatman; Marjetta L. Puotinen. 2012. The 27-year decline of coral cover on the Great Barrier Reef and its causes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 109.
- Dunn, Casey W; Gonzalo Giribet; Gregory D Edgecombe; Andreas Hejnol. 2014. Animal phylogeny and its evolutionary implications. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, November. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-120213-091627>.
- Durán, José M Martín; Bruno C Vellutini; Andreas Hejnol. 2015. Evolution and development of the adelphophagic, intracapsular Schmidt's larva of the Nemertean *Lineus ruber*. *EvoDevo*, September. BioMed Central. <https://doi.org/10.1186/s13227-015-0023-5>.
- Edgar, Robert C. 2004. MUSCLE: Multiple sequence alignment with high accuracy and high throughput. *Nucleic Acids Research* 32 (5):1792–97. <https://doi.org/10.1093/nar/>

gkh340.

Excoffier, Laurent; Peter E Smouse; Joseph M Quattro. 1992. Analysis of molecular variance inferred from metric distances among DNA haplotypes: application to human mitochondrial DNA restriction data. *Genetics Society of America* 491:479–91.

Fan, B.; Carvalhais, L.C.; Becker, A.; Fedoseyenko, D.; Von Wiren, N.; Borriss, R. 2012. Transcriptomic profiling of *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42 in response to maize root exudates. *BMC Microbiology* 12.

Faria, Laiza Cabral de; Maikon Di Domenico; Sónia C S Andrade; Monique Cristina Santos; Gustavo Fonseca; Joana Zanol; A. Cecilia Z. Amaral. 2018. The use of metabarcoding for meiofauna ecological patterns assessment. *Marine Environmental Research*, June. Elsevier:0–1. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2018.06.013>.

Fraune, Sebastian; Thomas C. G. Bosch. 2007. Long-term maintenance of species-specific bacterial microbiota in the basal metazoan *Hydra*. *Proceedings of the National Academy of Science USA* 104. <https://doi.org/10.1073/pnas.0703375104>

Fraune, Sebastian; Thomas C. G. Bosch. 2010. Why bacteria matter in animal development and evolution. *Bioessays* 32. <https://doi.org/10.1002/bies.20090019>

Fonseca, Vera G.; Gary R. Carvalho; Ben Nichols; Christopher Quince; Harriet F. Johnson; Simon P. Neill; John D. Lamshead; W. Kelley Thomas; Deborah M. Power; Simon Creer. 2014. Metagenetic analysis of patterns of distribution and diversity of marine meiobenthic eukaryotes. *Global Ecology and Biogeography* 23 (11):1293–1302. <https://doi.org/10.1111/geb.12223>.

Galindo, Heather M; Donald B Olson; Stephen R Palumbi. 2006. Report seascape genetics : a coupled oceanographic-genetic model predicts population structure of Caribbean corals. *Current Biology*, 1622–26. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2006.06.052>.

Galindo, Heather M; Anna Pfeiffer-Herbert; Margaret A McManus; Yi Chao; Fei Chai; Stephen R Palumbi. 2010. Seascape genetics along a steep cline: using genetic patterns to test predictions of marine larval dispersal. *Molecular Ecology*, Sept. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2010.04694.x>.

Gómez, Africa; Peter J Wright; David H Lunt; Juan M Cancino; Gary R Carvalho; Roger N Hughes. 2007. Mating trials validate the use of DNA *barcoding* to reveal cryptic speciation of a marine bryozoan taxon. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, May 2014. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3718>.

Guillou, Laure; Dipankar Bachar; Stéphane Audic; David Bass; Cédric Berney; Lucie Bittner; Christophe Boute, et al. 2012. The Protist Ribosomal Reference Database ( PR 2 ): a catalog of unicellular eukaryote small sub-unit rRNA sequences with curated taxonomy. *Nucleic Acids Research*, Oct. <https://doi.org/10.1093/nar/gks1160>.

Hajibabaei, Mehrdad; Gregory A.C. Singer; Paul Hebert; Donal A Hickey. 2007. DNA *barcoding*: how it complements taxonomy, molecular phylogenetics and population genetics. *Trends in Genetics* : 167–172. [10.1016/j.tig.2007.02.001](https://doi.org/10.1016/j.tig.2007.02.001).

- Handelsman, Jo; Michelle R Rondon; Sean F Brady; Jon Clardy; Robert M Goodman. 1998. Molecular biological access to the chemistry of unknown soil microbes: a new frontier for natural products. *Chemistry & Biology* 5(10): 245-249.
- Harvell, Catherine Drew; Jordan E.; Susan Merkel; Laurie J. Raymundo; Eugene Rosenberg; Garriet Smith; Ernesto Weil; Bette L. Willis. 2007. Coral disease, environmental drivers, and the balance between coral and microbial associates. *Oceanography* 20. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2007.91>
- Hatzenbuehler, Chelsea; John R Kelly; John Martinson; Sara Okum; Erik Pilgrim. 2017. Sensitivity and accuracy of high-throughput *metabarcoding* methods for early detection of invasive fish species. *Scientific Reports*, April 2016. Nature Publishing Group:1-10. <https://doi.org/10.1038/srep46393>.
- Hebert, Paul D N; Alina Cywinska; Shelley L Ball; Jeremy R DeWaard. 2003. Biological identifications through DNA *barcodes*. *The Royal Society*, July 2002:313-21. <https://doi.org/10.1098/rspb.2002.2218>.
- O. Hoegh-Guldberg; P. J. Mumby; A. J. Hooten; R. S. Steneck; P. Greenfield; E. Gomez; C. D. Harvell; P. F. Sale; A. J. Edwards; K. Caldeira; N. Knowlton; C. M. Eakin; R. Iglesias-Prieto; N. Muthiga; R. H. Bradbury; A. Dubi; M. E. Hatziolos. 2007. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science* 318. <https://doi.org/10.1126/science.1152509>
- Holmes, Bronwyn H; Dirk Steinke; Robert D Ward. 2009. Identification of shark and ray fins using DNA *barcoding*. *Fisheries Research* 95:280-88. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2008.09.036>.
- Holtzman, Nathalia; Mary Iovine; Jennifer Liang; Jacqueline Morris. 2016. Learning to fish with genetics: a primer on the vertebrate model *Danio rerio*. *Genetics*. 203. 1069-1089. [10.1534/genetics.116.190843](https://doi.org/10.1534/genetics.116.190843).
- Hubert, Nicolas; Erwan Delrieu-Trottin; Jean-Olivier Irisson; Christopher Meyer; Serge Planes. 2010. Molecular phylogenetics and evolution identifying coral reef fish larvae through DNA *barcoding* : a test case with the families Acanthuridae and Holocentridae. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 55 (3). Elsevier Inc.:1195-1203. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2010.02.023>.
- Hubert, Nicolas; Robert Hanner. 2015. DNA *barcoding*, species delineation and taxonomy: a historical perspective. *DNA Barcodes* 3:44-58. <https://doi.org/10.1515/dna-2015-0006>.
- Husnik F; Nikoh N; Koga R; Ross L; Duncan RP; Fujie M; Tanaka M; Satoh N; Bachtrog D; Wilson AC; von Dohlen CD; Fukatsu T; McCutcheon JP. 2013. Horizontal gene transfer from diverse bacteria to an insect genome enables a tripartite nested mealybug symbiosis. *Cell* 153. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2013.05.040>.
- Ko, Hui-ling; Yu-tze Wang; Tai-sheng Chiu; Ming-an Lee; Ming-yih Leu; Kuang-zong Chang; Wen-Yu Chen; Kwang-Tsao Shao. 2013. Evaluating the accuracy of morpho-

logical identification of larval fishes by applying DNA *barcoding*. *PLoS ONE*, January 2014. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0053451>.

Leasi, Francesca; Joseph L Sevigny; Eric M Laflamme; Tom Artois; Marco Curini-Galletti; Alberto de Jesus Navarrete; Maikon Di Domenico, et al. 2018. Biodiversity estimates and ecological interpretations of meiofaunal communities are biased by the taxonomic approach. *Communications Biology*. <https://doi.org/10.1038/s42003-018-0119-2>.

Leray, Matthieu; Nancy Knowlton. 2015. DNA *barcoding* and metabarcoding of standardized samples reveal patterns of marine benthic diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, March. <https://doi.org/10.1073/pnas.1424997112>.

Leray, Matthieu; Joy Y Yang; Christopher P Meyer; Suzanne C Mills; Natalia Agudelo; Vincent Ranwez; Joel T Boehm; Ryuji J Machida. 2013. A new versatile primer set targeting a short fragment of the mitochondrial COI region for metabarcoding metazoan diversity: application for characterizing coral reef fish gut contents. *Frontiers in Zoology* 10 (1). <https://doi.org/10.1186/1742-9994-10-34>.

Li, Erchao; Chao Li. 2014. Poultry, fisheries & wildlife sciences use of RNA-Seq in aquaculture research. *Poultry, Fisheries & Wildlife Sciences* 2 (2):10-11. <https://doi.org/10.4172/2375-446X.1000e108>.

Margulis, L. 1991. Symbiogenesis and symbiogenesis. In: *Symbiosis as a Source of Evolutionary Innovation: Speciation and Morphogenesis*. Margulis, L., and Fester, R. (eds). Cambridge, MA: MIT Press, pp. 1-14.

Maxam, Allan M; Walter Gilbert. 1977. A new method for sequencing DNA. *Proceedings Academy Sciences USA* 74 (2):560-64.

McFall-Ngai, M. J. 2002. Unseen forces: the influence of bacteria on animal development. *Developmental Biology* 242. <https://doi.org/10.1006/dbio.2001.0522>

McFall-Ngai, Margarete; Edward G. Ruby, 2000. Developmental biology in marine invertebrate symbioses. *Current Opinion in Microbiology* 3.

Nakanishi, Koichi; Miyuki Nishijima; Masamichi Nishimura; Kazuyoshi Kuwano; Naotsume Saga. 1996. Bacteria that induce morphogenesis in *Ulva pertusa* (Chlorophyta) grown under axenic conditions. *Journal of Phycology* 32. <https://doi.org/10.1111/j.0022-3646.1996.00479.x>

Nymark, Marianne; Amit Kumar Sharma; Torfinn Sparstad, Atle M Bones; Per Winge. 2016. A CRISPR / Cas9 system adapted for gene editing in marine algae. *Scientific Reports*, April. Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/srep24951>.

Orole, O. O.; Adejumo, T. O. 2011. Bacterial and fungal endophytes associated with grains and roots of maize. *Journal of Ecology and the Natural Environment* 3.

Paine, Melissa A.; Jan R. McDowell; John E Graves. 2007. Specific identification using COI sequence analysis of scombrid larvae collected off the Kona Coast of Hawaii Island. *Ichthyological Research*, January 2015. <https://doi.org/10.1007/s10228-007-0003-4>.

- Pegg, Graham G; Billy Sinclair; Leica Briskey; William J Aspden. 2006. MtDNA barcode identification of fish larvae in the Southern Great Barrier Reef, Australia. *Scientia Marina*, Dec.
- Pinheiro, Hudson T; Giacomo Bernardi; Thiony Simon; Jean-Christophe Joyeux; Raphael M Macieira; João Luiz Gasparini; Claudia Rocha; Luiz A Rocha. 2017. Island biogeography of marine organisms. *Nature* 549 (7670). Nature Publishing Group:82–85. <https://doi.org/10.1038/nature23680>.
- Plominsky, Alvaro M; Nicole Trefault; Sheila Podell; Jessica M Blanton; Rodrigo de Iglesia; Eric E Allen; Peter von Dassow; Osvaldo Ulloa. 2018. Metabolic potential and in situ transcriptomic profiles of previously uncharacterized key microbial groups involved in coupled carbon, nitrogen and sulfur cycling in anoxic marine zones. *Environmental Microbiology* 0. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.14109>.
- Pons, Joan; Timothy Giles Barraclough; Jesus Gomez-Zurita; Anabela Cardoso; Daniel P. Duran; Stephan Hazell; Sophien Kamoun; William D. Sumlin; Alfried P. Vogler. 2006. Sequence-based species delimitation for the DNA taxonomy of undescribed insects. *Systematic Biology*, Sept. <https://doi.org/10.1080/10635150600852011>.
- Quattrini, Andrea M.; Estefania Rodríguez; Brant C. Faircloth; Peter F. Cowman; Mercer R. Brugler; Gabriela A. Farfan; Michael E. Hellberg; Marcelo V. Kitahara; Cheryl L. Morrison; David A. Paz-García; James D. Reimer; Catherine S. McFadden (2020). Palaeoclimate ocean conditions shaped the evolution of corals and their skeletons through deep time. *Nature Ecology & Evolution*, 1-8, August. DOI: 10.1038/s41559-020-01291-1
- Queiroz, Kevin de. 2007. Species concepts and species delimitation. *Systematic Biology* 56 (6):879–86. <https://doi.org/10.1080/10635150701701083>.
- Radulovici, Adriana E; Philippe Archambault; France Dufresne. 2010. DNA barcodes for marine biodiversity: moving fast forward? *Diversity*, April. <https://doi.org/10.3390/d2040450>.
- Rosenberg, Eugene; Leah Falkovitz. 2004. The *Vibrio shiloi/Oculina patagonica* model system of coral bleaching. *Annual Review of Microbiology* 58. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.58.030603.123610>
- Rosenberg, Eugene; Ilana Zilber-Rosenberg. 2016. Microbes Drive Evolution of Animals and Plants: the Hologenome Concept. *MBio*, v. 7, n. 2. doi: 10.1128/mBio.01395-15
- Sanger, F; A R Coulson. 1978. The use of thin acrylamide gels for DNA sequencing. *FEBS Letters* 87(1).
- Schroeder, George; Stephen S Bates; Stéphane La Barre. 2018. *Bioactive marine molecules and derivatives with biopharmaceutical potential*. <https://doi.org/10.1002/9783527801718.ch19>.
- Silva, Camila F; Victor C Seixas; Romulo Barroso; Maikon Di Domenico; CZ Amaral; Paulo C Paiva. 2017. Demystifying the *Capitella capitata* complex (Annelida, Capitellidae)

diversity by morphological and molecular data along the Brazilian coast. *PLoS One*, 1–32.

Smith, Peter J; S.M. McVeagh; Dirk Steinke. 2008. DNA *barcoding* for the identification of smoked fish products. *Journal of Fish Biology*, Jan. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2007.01745.x>.

Streisinger, George; Charline Walker; Nancy Dower; Donna Knauber; Singer, Fred. 1981. Production of homozygous diploid zebra fish (*Brachydanio rerio*). *Nature*. 291. 293–6. [10.1038/291293a0](https://doi.org/10.1038/291293a0).

Tajima, Fumio. 1983. Evolutionary relationship of DNA sequences in finite populations. *Genetics Society of America*, 437–60.

Tajima, Fumio; Masatoshi Nei. 1984. Estimation evolutionary distance between nucleotide of sequences. *Molecular Biology Evolution*, 269–85.

Vega Thurber, R.; Willner-Hall, D.; Rodriguez-Mueller, C.; Desnues, C.; Edwards, R.A.; Angly, F., et al. 2009. Meta-genomic analysis of stressed coral holobionts. *Environmental Microbiology* 11.

Victor, Benjamin C. 2014. *Coryphopterus kuna*, a new goby (Perciformes: Gobiidae: Gobiinae) from the Western Caribbean, with the identification of the late larval stage and an estimate of the pelagic larval duration. *Zootaxa*, June. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.1526.1.3>.

Ward, Robert D; Bronwyn H Holmes; William T White; Peter R Last. 2008. DNA *barcoding* Australasian Chondrichthyans: results and potential uses in conservation. *Marine and Freshwater Research*, no. 2003:57–71.

Wares, John P; Clifford W Cunningham. 2001. Phylogeography and historical ecology of the North Atlantic intertidal. *Evolution*, Oct. <https://doi.org/10.1111/j.0014-3820.2001.tb00760.x>.

Wegley, Linda; Robert Edwards; Beltran Rodriguez-Brito; Hong Liu; Forest Rohwer. 2007. Metagenomic analysis of the microbial community associated with the coral *Porites astreoides*. *Environmental Microbiology* 9. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2007.01383.x>

Wong, Juliet M; Kevin M Johnson; Morgan W Kelly; Gretchen E Hofmann. 2018. Transcriptomics reveal transgenerational effects in purple sea urchins exposed to upwelling conditions, and the response of their progeny to differential P CO<sub>2</sub> levels. *Molecular Ecology*, Feb. <https://doi.org/10.1111/mec.14503>.

Xie, Bing; Yu Huang; Kate Baumann; Bryan Grieg Fry; Qiong Shi. 2017. From marine venoms to drugs: efficiently supported by a combination of transcriptomics and proteomics. *Marine Drugs*, Figure 1:1–10. <https://doi.org/10.3390/md15040103>.

Zemlak, Tyler; Robert D Ward; Allan Connel; Bronwyn H Holmes; Paul D N Hebert. 2009. DNA *barcoding* reveals overlooked marine fishes. *Molecular Ecology Resources* 9:237–42. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0998.2009.02649.x>.

Zhang, Jiajie; Paschalia Kapli; Pavlos Pavlidis; Alexandros Stamatakis. 2013. A general species delimitation method with applications to phylogenetic. *Bioinformatics*, Feb. 2014. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btt499>.

Zilber-Rosenberg, Ilana; Eugene Rosenberg. 2008. Role of microorganisms in the evolution of animals and plants: the hologenome theory of evolution. *FEMS Microbiology Reviews* 32. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2008.00123.x>



## CAPÍTULO 7

# A EXPLORAÇÃO DE RECURSOS BIOTECNOLÓGICOS DO MAR: ESTADO DA ARTE E PERSPECTIVAS

RENATO C. **PEREIRA**<sup>1</sup>

PAULO C. **ABREU**<sup>2</sup>

BERNARDO A.P. **DA GAMA**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Biologia Marinha, Universidade Federal Fluminense (UFF)

<sup>2</sup> Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande (FURG)

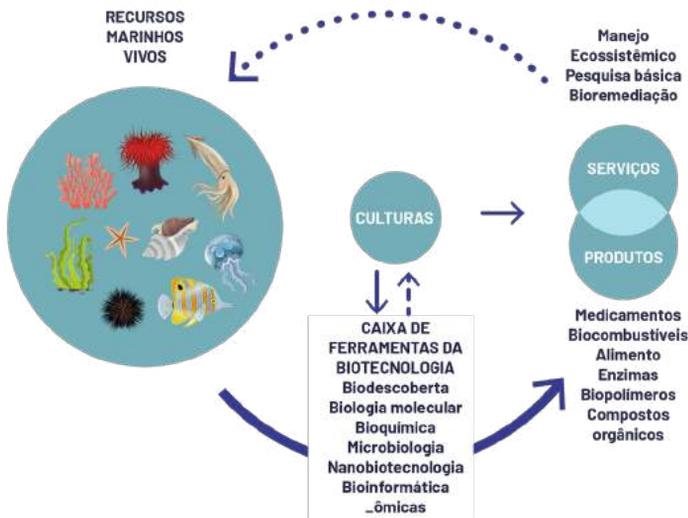
## **1 BIOTECNOLOGIA MARINHA:** INTRODUÇÃO, CONCEITOS E DEFINIÇÕES

A biotecnologia pode ser definida como uma aplicação da ciência e da tecnologia aos organismos vivos, bem como suas partes, produtos e modelos para a geração de conhecimento, bens e serviços. À biotecnologia marinha pode-se aplicar estas mesmas bases conceituais e de abordagem, mas direcionadas exclusivamente aos organismos e ambientes marinhos.

A biotecnologia marinha é uma área emergente, alicerçada na enorme biodiversidade e singularidade genética da vida no mar, estabelecidas como respostas adaptativas e evolutivas aos maiores extremos de temperatura, luz e pressão experimentados por organismos vivos. A adaptação biológica a essa ampla gama de condições ambientais tornou os organismos marinhos alvos peculiares tanto para investigações científicas básicas quanto biotecnológicas. Na verdade, nenhum outro ecossistema provê tanta diversidade (biológica e química) expressa em termos de forma, estrutura, fisiologia e tipos moleculares, propícia à geração de produtos e processos.

A biotecnologia marinha tem origem recente, tendo se desenvolvido rapidamente a partir dos anos de 1980, embora áreas marinhas cubram mais de 70% da superfície terrestre e sejam o berço da origem da evolução biológica na terra há milhões de anos. Inicialmente restrita à bioprospecção de substâncias bioativas para obtenção de fármacos ou seus protótipos, hoje a biotecnologia marinha engloba diferentes áreas que revelam enorme vigor e geram diversos benefícios sociais e econômicos (Figura 1), tornando-se uma tecnologia-chave para o desenvolvimento da bioeconomia. Por contribuir para a construção de uma sociedade eco-sustentável e altamente eficiente, a biotecnologia marinha também é conhecida como biotecnologia azul, uma denominação que tem o intuito de destacar estes aspectos “ecologicamente amigáveis”.

Este capítulo fornece um panorama não exaustivo, mas compreensivo e abrangente, sobre o desenvolvimento e os desafios da biotecnologia marinha. Em linhas gerais, ressalta como as atividades desenvolvidas nesta área podem assegurar suprimentos alimentares, fontes de recursos energéticos renováveis, promoção à saúde humana e ambiental, bem como a geração de diferentes produtos e processos industriais.



**FIGURA 1:** Exemplos de produtos e serviços advindos de aplicações tecnológicas de origem marinha. Adaptado de European Marine Board Position Paper, 15, 2010.

## 2 ÁREAS DE PESQUISA E APLICAÇÕES EM BIOTECNOLOGIA MARINHA

A biotecnologia marinha não é uma ciência nova, mas as chamadas “ômicas” (genômica, proteômica, metabolômica etc.) lhe deram recentemente um grande impulso, levando não somente à elucidação de estruturas e mecanismos antes incompreendidos, mas também ao desenvolvimento de novas técnicas e aplicações.

Estima-se que o mercado global para a biotecnologia marinha tem o potencial de atingir 4,8 bilhões de dólares até 2020, ou 6,4 bilhões até 2025. Por exemplo, um mapa para o desenvolvimento da biotecnologia marinha na Europa a divide em cinco grandes áreas temáticas que sustentam estas perspectivas promissoras de geração de recursos financeiros: (1) Exploração do ambiente marinho; (2) Produção e processamento de biomassa; (3) Inovação e diferenciação de produtos; (4) Capacitação tecnológica e de infraestrutura, e (5) Políticas de suporte e estímulo.

A atividade de pesquisa envolvendo produtos naturais marinhos, por sua vez, pode ser dividida em cinco grandes domínios principais de aplicação: nutrição, cosméticos, agricultura, química e farmacologia.

O cultivo de organismos marinhos ainda está restrito à produção de peixes, moluscos, crustáceos e, em menor extensão, algas (principalmente

macroalgas), em atividades de aquicultura costeira. Algumas espécies de microalgas estão bem estabelecidas como fontes de lipídeos e outros produtos de alto valor agregado (e.g., pigmentos), sendo cultivadas em biorreatores em terra. É esperado que essas atividades tenham continuidade, mas com níveis de produção superiores, e sejam expandidas para incluir novas espécies e novos regimes de cultivo, onde e quando possível. Um tópico ativo de pesquisa e de expansão potencial inclui a aquicultura *offshore* e em águas profundas empregando sistemas multitróficos de aquicultura integrada (MTA). As mudanças nos processos de cultivo irão provavelmente expandir o uso da biomassa cultivada de alimentos para incluir usos com fins não alimentícios, bem como o desenvolvimento de novas fontes alimentares.

A biotecnologia marinha, incluindo novas técnicas de cruzamento e genômica, se configurará como um apoio mais amplo e produtivo ao cultivo de organismos marinhos. Esta abordagem otimizada será uma oportunidade de longo prazo, mas que abrirá o caminho para a produção de substâncias de alto valor agregado de espécies selecionadas, hoje ainda não exploradas. A conversão de biomassa marinha, tanto extraída da natureza quanto cultivada, em frações utilizáveis, capazes de suportar uma variedade de aplicações e produtos, encontra-se em franco processo de expansão. Os processos de extração e bioprocessamento devem ser sustentáveis, minimizando e gerenciando os resíduos gerados, sendo energeticamente eficientes e neutros em termos de carbono, e sem geração de impactos ambientais negativos. Em curto prazo, esses pré-requisitos resultarão em um movimento a partir de um refino *single-stream* para um biorrefino *multi-stream*, de forma a se tornar completamente incorporado aos processos das biorrefinarias. Os desafios de longo prazo incluem o desenvolvimento de processos que permitam a integração da produção e processamento de biomassa marinha, bem como a criação de biorrefinarias capazes de realizar o processamento de múltiplas fontes de alimento ou outros recursos.

## 2.1 TECNOLOGIAS DE CAPACITAÇÃO E INFRAESTRUTURA

A disponibilidade de uma infraestrutura de pesquisa acessível e relevante, compreendendo recursos e capacidades físicas e humanas, é essencial para dar continuidade ao desenvolvimento e utilização de produtos advindos da biotecnologia marinha, em particular em um país como o Brasil, com um imensurável potencial para o pioneirismo nessa área, devido ao seu extenso litoral de mais de oito mil quilômetros e sua biodiversidade marinha. Esse potencial tem levado pesquisadores das ciências do mar a denominar o

litoral brasileiro de “Amazônia Azul”. O desenvolvimento científico e tecnológico da exploração dos recursos marinhos exige que se amplie a gama de ferramentas analíticas físicas, químicas e genéticas para a biotecnologia marinha. No entanto, esses aspectos permanecem como grandes desafios, especialmente em países com investimentos e prioridades inconstantes como o Brasil (Tabela 1). Cada vez mais, a biotecnologia marinha depende do desenvolvimento científico e tecnológico de outras disciplinas. O fornecimento de infraestruturas novas e melhoradas pode levar à criação de *expertise* científica, estimular a atividade de pesquisa e catalisar maior colaboração entre cientistas e entre estes e empresas.

**TABELA 1:** Países e suas prioridades de pesquisa em biotecnologia marinha

REGIÕES E PAÍSES		PRIORIDADES DE PESQUISA
África	Moçambique, Nigéria, África do Sul, Tunísia e Quênia	Biocombustíveis e bioativos
Américas Central e do Sul	<b>Brasil</b> , Chile, Argentina, México e Costa Rica	Biodescobertas, bioenergias, biorremediação e bioincrustação
América do Norte	EUA e Canadá	Biodescobertas, aquicultura e biocombustíveis
Ásia	China, Índia, Coreia do Sul, Japão e Taiwan	Biocombustíveis, biodescobertas de fármacos, alimentos, rações e cosméticos
Oriente Médio	Israel	Biotecnologia de esponjas, bioativos marinhos e biocombustíveis
Sudeste Asiático	Tailândia, Vietnã, Indonésia, Malásia, Singapura, Sri Lanka e Filipinas	Biodiversidade para novos bioativos e aquicultura
Austrália	Austrália e Nova Zelândia	Aquicultura e bioativos marinhos

(Fonte: Kim e Venkatesan, 2015).

## 2.2 A ABORDAGEM BIOMIMÉTICA

Obviamente, a biotecnologia de uma forma geral, e a biotecnologia marinha em particular, não são ciências novas, remontando à milênios a

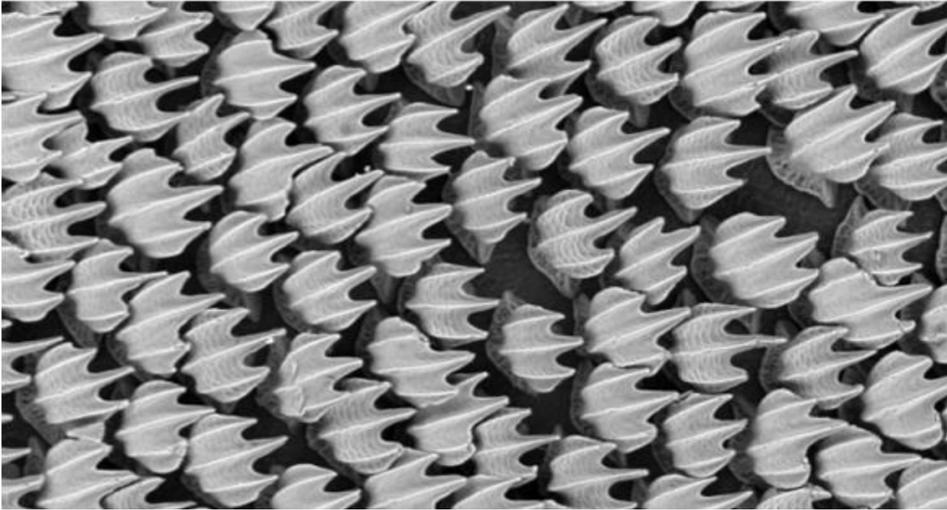
exploração e o cultivo de inúmeros recursos marinhos para usos tais como alimentos, temperos, medicamentos, ferramentas (e.g., lâminas e anzóis feitos de conchas e esponjas marinhas), ornamentos (e.g., corais, conchas, pérolas, madrepérola) e pigmentos (e.g., púrpura do Tiro, extraído de gastrópodes do gênero *Murex* pelos fenícios), entre outros.

Não obstante, a primeira reação humana a um problema qualquer envolve combatê-lo diretamente. Por exemplo, patógenos são combatidos até hoje com antibióticos, que reduzem não somente as populações-alvo, mas também as dos simbioss, dos quais também dependemos para nossa saúde. Essa abordagem levou à seleção de resistência em bactérias e abordagens emergentes ou atuais incluem o uso de probióticos. Essa mudança de visão tem levado a ciência a se inspirar na natureza, visto que os organismos vivos evoluíram e se adaptaram por bilhões de anos para lidar de muitas formas com problemas similares àqueles com que nos deparamos. A essa bioinspiração das nossas tecnologias dá-se o nome de biomimética.

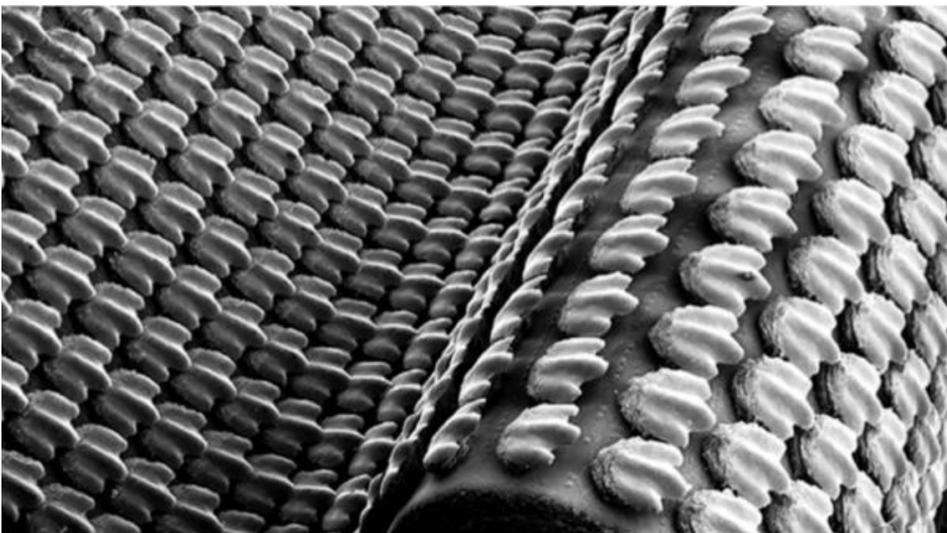
Formalmente, a biomimética é definida como a imitação de modelos, sistemas ou elementos da natureza, com o propósito de resolver problemas humanos complexos. De modo objetivo, podemos dizer que a imitação ou modelagem compreende a principal forma de aplicação da biomimética, embora algumas tecnologias atuais remetam à biomimética por convergência. A semelhança entre o formato hidrodinâmico do corpo de um tubarão e a estrutura aerodinâmica de um avião é um exemplo de convergência, pois ambos evoluíram para reduzir o atrito e a turbulência e, dessa forma, se deslocar com mais eficiência; mas conhecemos o histórico do desenvolvimento dos aviões e os primeiros modelos em nada lembram estes peixes. Por outro lado, o desenvolvimento de novos materiais hidrodinâmicos bioinspirados, impressos em 3D, é um claro exemplo de modelagem (Figuras 2 e 3). As aplicações da abordagem biomimética são incontáveis, dependendo apenas da nossa capacidade de estudar e compreender mecanismos naturais e de aplicá-los a problemas atuais. Um bom exemplo dessa abordagem é o estudo dos mecanismos anti-incrustantes dos organismos marinhos.

### **2.2.1 ANTI-INCrustANTES**

A bioincrustação marinha, quando desenvolvida sobre estruturas submersas feitas pelo homem, tais como cascos de embarcações, *piers*, docas, plataformas, boias, cabos, etc., acarreta grandes prejuízos, sendo até hoje um dos principais desafios tecnológicos às atividades humanas no mar. As primeiras tecnologias anti-incrustantes remontam ao século V a.C., quando



**FIGURA 2:** Micrografia das escamas placóides na pele de um tubarão anequim (*Isurus oxyrinchus*), capaz de nadar a impressionantes 72 km/h. (Fonte: Wen et al. 2014).



**FIGURA 3:** Pele artificial de tubarão, produzida em impressora 3D (imagem: James Weaver). (Fonte: Wen et al. 2014).

eram empregadas placas de cobre nos cascos de embarcações. O cobre continua a ser utilizado como “biocida” em tintas anti-incrustantes até os dias de hoje, mas outros metais pesados, em formulações mais elaboradas, passaram a ser empregados, tais como o tributil estanho (TBT), banido em 2008 devido aos efeitos deletérios sobre a biota marinha, incluindo disrupção

hormonal e pseudo-hermafroditismo em fêmeas de gastrópodos marinhos. Essas substâncias foram consideradas os piores poluentes já introduzidos pelo homem no mar. Não obstante, a biomimética nos permite buscar anti-incrustantes nos mecanismos de defesa dos próprios organismos marinhos.

### *Mecanismos químicos: produtos naturais marinhos*

Há décadas observa-se que muitos organismos marinhos bentônicos sésseis, tais como macroalgas, esponjas, corais e ascídias, permanecem surpreendentemente livres de epibiontes sem que haja um mecanismo evidente de limpeza ou remoção. Com o crescente interesse em produtos naturais marinhos, derivado inicialmente da busca de novos fármacos no mar, logo surgiram questões a respeito do papel dos produtos naturais de organismos marinhos na defesa contra a epibiose, ou anti-incrustantes.

Inúmeras espécies de macroalgas e invertebrados já foram testados quanto à presença de defesas químicas contra a epibiose ou incrustação, tanto em estudos de laboratório quanto em campo. Os estudos em laboratório geralmente incluem testes de extratos brutos dos organismos marinhos contra um ou mais organismos incrustantes, sejam eles micro-organismos (microincrustação ou *microfouling*) ou macro-organismos (macroincrustação ou *macrofouling*). Como micro-organismos incrustantes, temos usualmente bactérias e microalgas bentônicas, enquanto macro-organismos usualmente utilizados em testes anti-incrustantes incluem larvas de cracas (Crustacea, Cirripedia) e mexilhões juvenis (Molusca, Bivalvia), que retêm a capacidade de se refixar ao substrato mesmo após a metamorfose larvar. A compreensão dos mecanismos envolvidos no *quorum sensing* bacteriano pode se mostrar especialmente promissora no que concerne aos estudos com microincrustação, e têm avançado bastante na última década. Mas a eficácia de qualquer mecanismo anti-incrustante a ser aplicado em estruturas feitas pelo homem deve ser testada em campo, em tintas ou outros revestimentos de liberação lenta (e.g., phytigel™) que permitam avaliar seus efeitos sobre uma comunidade incrustante diversificada e sob condições naturais de fluxo e diluição. Por outro lado, os testes em laboratório têm a vantagem de permitir também a avaliação da toxidez de extratos, frações ou substâncias puras sobre os organismos-teste. Entre essas substâncias, podemos destacar os terpenos, esteróis e peptídeos de organismos marinhos como as classes de substâncias mais estudadas como agentes anti-incrustantes.

A compreensão dos mecanismos naturais de produção, armazenamento e liberação de anti-incrustantes naturais em algas marinhas avançou

bastante recentemente no Brasil, com estudos multidisciplinares especialmente nas algas vermelhas (divisão Rhodophyta) dos gêneros *Laurencia* e *Plocamium*, dotadas de organelas especiais nas células corticais envolvidas na defesa contra a bioincrustação (*corps en cerise* e mevalonossomos, respectivamente). Outras algas vermelhas possuem células glandulares aparentemente com a mesma função (*Asparagopsis* e *Delisea*). Essas estruturas podem ser mimetizadas em novos tipos de tintas e materiais que possuam, por exemplo, análogos sintéticos de anti-incrustantes naturais microencapsulados.

### *Mecanismos físicos: microtopografia*

Com os avanços da microscopia eletrônica, outros mecanismos naturais de defesa contra epibiontes (ou anti-incrustantes) vieram à tona, tais como a microtopografia (textura em escala microscópica) da superfície corporal de organismos marinhos bentônicos. Caranguejos possuem microtopografias dotadas de minúsculos pelos ou espinhos, enquanto moluscos bivalves possuem microtopografias do perióstraco que reveste a concha em forma de ondulações ou cordilheiras e vales (de 0,4 a 4µm). Teoricamente, essas superfícies reduzem os pontos de contato entre o organismo incrustante ou epibionte e a superfície do organismo colonizado ou basibionte, portanto reduzindo a adesão. Um teste em campo em escala global de biomímicas de resina da microtopografia de quatro espécies de mexilhões de oito locais diferentes, incluindo *Perna perna* do Brasil, não revelou efeitos significativos das superfícies microestruturadas isoladamente, embora parte destas mesmas réplicas tenha se mostrado eficaz em reduzir o estabelecimento de cracas em campo na Inglaterra. Essas texturas podem levar ao desenvolvimento de novos materiais micro- ou mesmo nanoestruturados para a superfície de sensores, câmeras e outros equipamentos em contato com a água. Com os avanços nesta área, está claro que os organismos marinhos utilizam, simultaneamente, mais de um tipo de mecanismo anti-incrustante, uma pista importante para o desenvolvimento de novas tintas ou materiais que evitem ou resistam à bioincrustação.

## **2.3** BIOPROSPECÇÃO

O termo bioprospecção refere-se à busca sistemática de novos produtos biológicos e atividades com aplicações biotecnológicas em habitats naturais. O prefixo *bio* significa vida, enquanto *prospecção* é definida como

expectativa, possibilidade, ou chance de sucesso ou avanço na busca por algo. A bioprospecção marinha pode ser definida como a busca sistemática por princípios ativos que constituem fontes potenciais para aplicações comerciais em organismos marinhos.

De fato, a bioprospecção é um procedimento utilizado desde o início da civilização, uma vez que a humanidade emprega materiais biológicos, de plantas e animais, para uma grande variedade de propósitos (ver item 2.1). Um exemplo bastante conhecido é o de produtos farmacêuticos baseados principalmente em substâncias derivadas da natureza, principalmente de fontes terrestres.

As buscas ou descobertas no contexto da biotecnologia englobam procedimentos sequenciais, iniciando com a escolha de ambientes, procedimentos e métodos de coleta até que resultem no desenvolvimento de um produto, ou processo comercial (Figura 4). É importante destacar a agregação de valor ao longo dessa busca. A seguir são explorados o estado da arte e diferentes abordagens emergentes no contexto da bioprospecção marinha.



**FIGURA 4:** Fluxo de trabalho nas buscas e descobertas biotecnológicas (modificado de Kim, 2015).

### 2.3.1 FÁRMACOS

A maioria dos agentes terapêuticos de nossa medicina é proveniente de recursos naturais e principalmente de organismos terrestres. No entanto, um grande esforço tem sido empreendido recentemente na busca por meta-

bólitos secundários ou produtos naturais de origem marinha, por razões como: 1. Grande diversidade estrutural ou molecular; 2. Propriedades ou atividades biológicas as mais diversas; 3. Constituem recursos praticamente inexplorados.

O quadro atual (agosto de 2017), de acordo com a *Food and Drug Administration (FDA - U. S. Department of Health and Human Services)*, registra sete substâncias de origem marinha como aprovadas para uso comercial desde 1969, a última delas em 2015. Dentre as que estão em testes, 90% possuem ação anticâncer, sendo quatro delas obtidas de esponjas. Outras 27 substâncias encontram-se em diferentes fases de avaliação clínica, 19 (56%) delas provenientes de um molusco que na verdade as obtêm por consumo de uma cianobactéria. De maneira geral, a maioria (90%) das substâncias em testes clínicos tem como alvo a ação sobre diferentes tipos de câncer.

Sem dúvida, os produtos naturais marinhos são mais frequentemente avaliados frente a diversos tipos de câncer; principalmente aqueles obtidos de esponjas. No entanto, o espectro de ação é bastante amplo, atestado por inúmeros artigos e revisões que revelam várias potencialidades: antimicrobial, antiviral, anticâncer, anti-inflamatório, anti-helmíntico, anticoagulante, antimalária, analgésico, agente para enxerto ósseo, entre diversas outras.

Os organismos marinhos produzem uma rica diversidade química que pode contribuir para a concepção e o desenvolvimento de novos fármacos. Mas, infelizmente, esses metabólitos secundários geralmente estão presentes em quantidades mínimas e os estoques naturais são muito pequenos para sustentar o desenvolvimento de medicamentos em quantidades suficientes para atender as demandas globais. Essa é uma restrição à própria bioprospecção. Atualmente, o desenvolvimento de alternativas para obtenção de grandes quantidades de metabólitos secundários é, portanto, a missão mais importante.

Por exemplo, a síntese de moléculas em laboratório ou o cultivo de organismos que as produzem podem minimizar a demanda sobre recursos silvestres e ajudar a solucionar a limitação de suprimento e o impacto sobre populações naturais. Outras pesquisas compreendem o uso de genética recombinante, síntese quimioenzimática ou cultura de tecidos, etc.

Independentemente da alternativa a ser empregada, um programa de bioprospecção marinha baseado no uso sustentável da biodiversidade tem sido o principal alvo de atenção em diversos países do mundo, mas é especialmente importante em países mega-diversos como o Brasil, por razões econômicas e de preservação.

### 2.3.2 ALIMENTOS FUNCIONAIS

Embora os termos Alimentos Funcionais e Nutracêuticos se refiram a compostos alimentícios que trazem benefício à saúde, eles não são sinônimos. A designação Alimento Funcional (AF) surgiu nos anos 80 no Japão e se refere a alimentos que, além de cumprir sua função de nutrir, trazem algum benefício adicional à saúde humana, como maior atividade fisiológica, ou prevenção de doenças. Já o termo Nutracêutico (NC) se refere a compostos bioativos (CB) presentes em alimentos que são isolados e comercializados na forma de medicamentos como comprimidos, cápsulas, soluções, géis, pós, granulados, etc. Esse termo foi cunhado pela Foundation for Innovation of Medicines, nos Estados Unidos, no começo dos anos 90, e representa um híbrido entre “nutrientes” e “farmacêuticos”.

Os Compostos Bioativos, por sua vez, se referem a compostos químicos naturais extraídos de organismos vivos, ou de seus produtos, que produzem, comprovadamente, benefícios à saúde humana e animal. Podem ser vitaminas, pigmentos, compostos fenólicos, ácidos graxos, fibras, entre outros.

Para melhor diferenciação entre os termos Alimento Funcional, Nutracêutico e Composto Bioativo, podemos dizer que peixes de água fria, ricos em ácidos graxos poli-insaturados (ômega-três), seriam AFs que ajudam a prevenir doenças coronarianas. Já o óleo de fígado de bacalhau e até mesmo cápsulas de ácidos graxos ômega-três, comercializadas em farmácias, se enquadrariam como NCs. Ambos têm como Composto Bioativo os ácidos graxos poli-insaturados de cadeias longas que, comprovadamente, reduzem e previnem os riscos de doenças cardíacas e vasculares.

A eficiência dos alimentos funcionais é determinada a partir de estudos epidemiológicos que relacionam a ausência de certas doenças com a dieta das populações. Como exemplo, podemos dizer que o baixo índice de doenças cardiovasculares em populações da região do Mediterrâneo deve-se a uma dieta rica em azeite de oliva, frutos do mar e vegetais. Da mesma forma, verificou-se que o consumo de soja por povos orientais relacionava-se à baixa incidência de câncer de mama. Estudos posteriores mostraram que, no caso da dieta mediterrânea, o fator de proteção era os ácidos graxos poli-insaturados de cadeia longa, especialmente o EPA (C 20:5) e o DHA (C 22:6), presentes em frutos do mar; já a baixa incidência de câncer de mama deve-se à presença de fitoesteróis na soja, que previnem o desenvolvimento da doença.

Evidências arqueológicas mostram que os alimentos marinhos sempre foram importantes na dieta de povos que habitavam as regiões costeiras

ao redor do mundo. Mais recentemente, verificou-se uma relação direta entre o consumo de frutos do mar e a ausência de doenças em povos específicos que, ainda hoje, têm suas dietas baseadas no consumo de peixes, crustáceos, moluscos e algas. Como exemplo, podemos citar a resistência dos povos esquimós Inuit a doenças do aparelho circulatório e coronarianas, devido, principalmente, ao consumo de produtos com elevada concentração de ácidos graxos poli-insaturados

Alguns alimentos de origem marinha comprovadamente melhoram a saúde daqueles que os consomem e, por isso, podem ser considerados como Alimentos Funcionais. Podemos citar: peixes, algas, moluscos (especialmente mariscos e mexilhões) e crustáceos. A seguir apresentamos algumas informações sobre esses AFs.

### *Peixes*

O consumo de peixes pelo homem remonta às suas origens, por ser este um alimento disponível e muitas vezes abundante na natureza. Esse recurso alimentar continua sendo de grande importância mesmo nos tempos atuais. Segundo a FAO (2016), o consumo atual de pescados coletados na natureza (marinhos e continentais) e produzidos em sistemas de aquicultura é superior a 167 milhões de toneladas, caracterizando um consumo *per capita* anual de aproximadamente 20kg. Esse consumo continua crescendo, acompanhando o incremento da população humana, mas o suprimento por meio da pesca se estabilizou desde os anos 80. O aumento no fornecimento tem sido possível pela produção em sistemas de aquicultura.

Como dito anteriormente, a caracterização do peixe como alimento funcional deveu-se à observação de que alguns povos que o consomem em maior quantidade apresentam baixa incidência de doenças, especialmente aquelas relacionadas ao coração e ao sistema circulatório. A carne de peixe contém todos os aminoácidos essenciais e apresenta alta digestibilidade. Além disso, é uma importante fonte de vitaminas D, A e B12 e de minerais como zinco, ferro e cálcio. Entretanto, é na gordura, especialmente a dos peixes de águas frias, que se esconde o segredo para a prevenção de doenças cardiovasculares. O lipídeo de peixe apresenta grandes quantidades de ácidos graxos poli-insaturados de cadeias longas, especialmente o ácido eicosapentaenoico, com 20 carbonos e 5 duplas ligações (EPA - C 20:5) e o ácido docosa-hexaenoico, com 22 carbonos e seis ligações duplas (DHA - C 22:6), ambos classificados como ácidos graxos  $\omega$ -3 (ômega-três). Esses ácidos graxos atuam no corpo humano reduzindo os níveis de colesterol "ruim" - LDL

LDL (*low density lipoprotein*). Além disso, os ácidos graxos ajudam na prevenção de inflamações, e na formação do tecido cerebral de fetos e de recém-nascidos, podendo melhorar a acuidade visual das crianças.

### **BOX 1: POR QUE PEIXES DE ÁGUA FRIA APRESENTAM MAIS ÁCIDOS GRAXOS POLI-INSATURADOS ( $\omega$ -3 E $\omega$ -6)?**

Esta é uma história complexa, mas interessante e que precisa ser contada. A primeira informação importante é que os peixes não produzem ácidos graxos poli-insaturados  $\omega$ -3 e  $\omega$ -6, nem mesmo crustáceos ou moluscos. Na verdade, os ácidos graxos poli-insaturados com cadeias longas e muitas duplas ligações são produzidos pelas microalgas, especialmente em águas frias, que são consumidas por esses animais. São as microalgas que possuem enzimas elongases, capazes de incorporar carbonos, aumentando as cadeias dos ácidos graxos e dessaturases – que incluem ligações duplas entre alguns carbonos.

E qual seria a relação da produção de ácidos graxos poli-insaturados com a temperatura da água? Na verdade, trata-se de uma resposta das microalgas para manter a fluidez e permeabilidade de suas membranas em temperaturas extremas. Explica-se: as membranas celulares de organismos pro- e eucariotos são compostas por grande quantidade de lipídeos. Em temperaturas muito baixas, membranas celulares com grandes quantidades de ácidos graxos saturados, como aqueles que compõem a manteiga, poderiam solidificar, diminuindo sua permeabilidade. Portanto, para evitar que as membranas se solidifiquem, as microalgas produzem grande quantidade de ácidos graxos poli-insaturados, similares aos presentes no azeite, tornando a membrana fluida e permeável mesmo em baixas temperaturas. O contrário acontece em ambientes de altas temperaturas, como fontes termais, onde a presença de grande quantidade de ácidos graxos poli-insaturados levaria à ruptura das membranas celulares por excesso de fluidez. Assim, os micro-organismos nesses ambientes produzem ácidos graxos saturados em maior quantidade, para garantir a integridade de suas membranas celulares.

Portanto, peixes forrageiros, crustáceos e moluscos de

águas frias consomem microalgas que possuem grandes quantidades de ácidos graxos poli-insaturados, e estes são incorporados à sua biomassa e, posteriormente, consumidos pelo ser humano. Atualmente, muitos sistemas de aquicultura onde são produzidos peixes, crustáceos e moluscos oferecem rações ricas em ácidos graxos poli-insaturados, com o intuito de melhorar a qualidade nutricional dos organismos produzidos.

## Algas

O consumo de macroalgas é bastante difundido entre povos do Oriente, especialmente do Japão, Coreia e China. Na América Latina o Chile tem larga tradição no consumo de macroalgas em sua culinária e, mais recentemente, o uso de macroalgas se popularizou em nosso país, através da culinária japonesa.

As macroalgas mais consumidas no mundo são as vermelhas do gênero *Porphyra* (Nori, em japonês), as verdes do gênero *Monostroma* (Aonori) e pardas como *Laminaria* (Konbu) e *Sargassum* (Hiziki), entre outras. No Nordeste do Brasil, várias macroalgas são coletadas, não para o consumo direto, mas sim para a extração de ficocolóides empregados na indústria alimentícia. Estas são coletadas muitas vezes diretamente nas praias após ressacas, ou simplesmente depois do recuo das águas, e são conhecidas como algas de arribação.

As macroalgas são importantes fontes de proteínas, com muitos aminoácidos essenciais; polissacarídeos que formam os ficocolóides, como ágar e carragenana; vitaminas e sais minerais, além de grande quantidade de fibras solúveis e não solúveis. Estudos mostram que o consumo de macroalgas pode reduzir a ocorrência de doenças crônicas como diabetes, obesidade, doenças cardiovasculares e alguns tipos de cânceres, especialmente devido à ingestão das fibras naturais presentes nesses vegetais.

O consumo de microalgas nunca foi tão difundido quanto de macroalgas, especialmente pela dificuldade de se produzir e coletar estes organismos tão pequenos. Entretanto, há indícios de que as cianobactérias *Spirulina* e *Arthrospira* eram e ainda são consumidas por povos africanos. Nos últimos anos o seu uso se popularizou, devido aos altos teores de proteínas e minerais,

e passaram a ser consumidas como nutracêuticos na forma de pó ou cápsulas.

### *Moluscos*

Os moluscos, especialmente mariscos e mexilhões, sempre foram um importante componente da dieta de povos que habitam as regiões costeiras. Marcas desse consumo, como grandes montes de conchas, são encontradas em vários continentes. No Brasil ocorrem na região Sul, especialmente nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, onde essas formações são pontos de destaque na paisagem costeira e recebem o nome de sambaquis.

Sambaquis são montes de conchas que atingem alturas consideráveis e eram utilizados como locais de habitação e observação pelos povos indígenas. O nome sambaqui provém do tupi-guarani e é formado pelas palavras *tamba*, que significa concha, e *ki*, monte ou amontoado.

Além de proteínas e carboidratos, os moluscos fornecem grande quantidade de lipídeos e ácidos graxos poli-insaturados que, a exemplo dos peixes, conferem proteção contra doenças cardiovasculares. Na China, o molho produzido com o mexilhão *Mytilus edulis* tem propriedades que comprovadamente melhoram o sistema imunológico, além de atuar em doenças que afetam o fígado e os rins.

### *Crustáceos*

Os crustáceos, como camarões, siris, caranguejos e lagostas sempre foram uma importante fonte alimentar, especialmente devido à sua grande abundância na região costeira e relativa facilidade para capturá-los. Também são importantes fontes de proteínas, mas o principal fator que faz desses animais um alimento funcional é a presença de pigmentos carotenoides, especialmente astaxantina, que é um potente elemento antioxidante, com capacidade de evitar a ação de espécies reativas de oxigênio que provocam o estresse oxidativo nas células e nos tecidos.

## **2.3.3 NUTRACÊUTICOS E ELEMENTOS BIOATIVOS**

A constatação da efetividade de muitos organismos marinhos como alimentos funcionais levou à pesquisa para descobrir que elementos presentes na biomassa de peixes, macroalgas, moluscos e crustáceos produziam os efeitos benéficos à saúde humana. Assim, a gama de elementos bioativos se

ampliou bastante nos últimos anos e os estudos continuam na busca de novos produtos capazes de atuar na prevenção e até mesmo no tratamento de várias doenças.

A descoberta de elementos bioativos permite que as indústrias farmacêutica e alimentícia produzam nutracêuticos que podem ser adicionados à dieta convencional, ou até mesmo utilizados como complementos alimentares ou medicamentos. Dentre os elementos bioativos de origem marinha podemos destacar: proteínas e peptídeos, polissacarídeos, ácidos graxos, compostos fenólicos, vitaminas e minerais, fibras, quitina e quitosana. A seguir descrevemos a composição e ação desses biocompostos.

### *Proteínas e peptídeos*

Proteínas são substâncias orgânicas formadas por aminoácidos, que apresentam grupamentos amina e carboxila. Peptídeos, por sua vez, são fragmentos de proteínas com 2 a 20 aminoácidos, produzidos durante o processo de digestão incompleta de proteínas, ou por ação enzimática específica. Diferentemente das plantas, os animais não conseguem sintetizar todos os aminoácidos de que necessitam, os aminoácidos essenciais, por isso necessitam obtê-los através da dieta.

Muitas das proteínas de origem marinha têm capacidade antioxidante, anticoagulante e antimicrobiana, e também podem atuar na prevenção e no tratamento de doenças cardiovasculares. Já alguns peptídeos provenientes de organismos marinhos apresentam atividade imunomodulatória, antitrombótica e anti-hipertensiva. Mais recentemente, verificou-se que alguns peptídeos provenientes de hidrolisados de proteína de peixes têm a capacidade de incrementar a absorção de cálcio, podendo ser um importante agente para evitar a osteoporose.

### *Polissacarídeos*

Polissacarídeos também são substâncias orgânicas constituídas por carbono, oxigênio e hidrogênio, que cumprem funções estruturais e de reserva energética nos organismos. Os animais aquáticos apresentam pouca quantidade de açúcares em sua biomassa. As algas são as principais fontes dessas substâncias.

Alguns polissacarídeos extraídos de macro- e microalgas apresentam ações anti-viral, anticoagulante, antitrombótica, antimicrobiana e anti-inflamatória. Polissacarídeos de macroalga também mostraram capacidade de

reduzir o colesterol ruim (LDL) do plasma sanguíneo. Além disso, os chamados ficocolóides como carragenana, alginatos e ágar são amplamente empregados na indústria alimentícia.

### *Ácidos graxos*

Os ácidos graxos são formados por uma cadeia de carbonos de diferentes tamanhos que apresentam um radical carboxila e ligações duplas entre alguns átomos de carbono que determinam o nível de saturação. Ácidos graxos que não apresentam ligações duplas são denominados saturados; os que têm uma única ligação dupla são chamados de monoinsaturados, e os com duas ou mais dessas ligações são denominados poli-insaturados. As designações  $\omega$ -3,  $\omega$ -6 ou  $\omega$ -9 referem-se à localização da primeira dupla-ligação entre pares de carbono a partir da extremidade oposta à carboxila.

Como descrito anteriormente no item sobre alimentos funcionais de origem marinha, a presença de ácidos graxos poli-insaturados produz a maior ação benéfica à saúde humana e animal. Os ácidos graxos poli-insaturados de cadeias longas como o ácido eicosapentaenoico (EPA - C 20:5) e o ácido docosa-hexaenoico (DHA - C 22:6) são os que apresentam maior atividade biológica. A presença de maiores concentrações desses ácidos graxos no sangue, decorrente de uma dieta rica em frutos do mar, comprovadamente leva à menor concentração de colesterol e, com isso, menos problemas cardíacos. Além disso, já se verificou que esses ácidos graxos (e outros poli-insaturados) também atuam na diminuição de arteriosclerose, inflamações, obesidade e diabetes.

### *Compostos fenólicos*

Compostos fenólicos, ou polifenóis, representam um grupo heterogêneo estruturalmente classificado como flavonóides, também presentes em muitas frutas. Esses elementos têm ação antioxidante, anti-inflamatória, anti-hemorrágica e até mesmo anticancerígena, mas sua ação principal é no combate ao estresse oxidativo.

### *Vitaminas, minerais e fibras*

Vitaminas e minerais são micronutrientes que atuam como cofatores de enzimas e permitem um melhor funcionamento de várias atividades metabólicas.

As micro- e macroalgas são ricas em vitaminas, mas peixes têm grande quantidade de vitamina D, que atua na incorporação de cálcio nos ossos. Além das micro- e macroalgas, muitos outros organismos marinhos apresentam altas concentrações de selênio e zinco, que têm ação preventiva contra muitos tipos de câncer.

### *Fibras, quitina e quitosana*

As macroalgas apresentam fibras em suas estruturas que ajudam em sua sustentação. O consumo dessas fibras auxilia no processo digestivo e na absorção de gordura. Entretanto, as algas também produzem fibras solúveis em água, compostas por polissacarídeos, que atuam no processo digestivo, além de funcionarem como fatores anticoagulante e anti-inflamatório.

A carapaça dos crustáceos é formada por um polímero chamado quitina. A partir dessa matéria-prima é possível obter um outro polissacarídeo, a quitosana, que tem grandes aplicações tecnológicas, como filtros biológicos e conservante de alimentos. Na área da saúde, verificou-se que a quitosana, além de atuar na absorção de gorduras, também pode ser empregada no tratamento de queimaduras.

### **2.3.4 COSMÉTICOS**

A composição geral de um cosmético inclui um ingrediente ativo, alguns excipientes e agentes espessantes, aditivos, conservantes, corantes e perfumes. Diversas substâncias advindas de organismos marinhos possuem propriedades físico-químicas e tecnológicas, bem como atividades biológicas que as tornam promissoras para aplicação em cosmética ou cosmocêutica (união entre cosméticos e produtos farmacêuticos) e proporcionam benefícios à saúde. São os chamados “cosméticos marinhos”. Nos últimos anos, foram empreendidos grandes esforços com a expectativa crescente do mercado de cosméticos e novidades nas quais são usados derivados marinhos, tanto para tratamento da pele quanto dos cabelos.

Por exemplo, os complexos proteicos de polissacarídeos produzidos por micro-organismos marinhos (bactérias) dos gêneros *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Myroides*, *Streptomyces*, *Yarrowia*, *Rhodotorula*, e *Halomonas*, ou os glicolipídeos de *Halomonas*, *Rhodococcus* e *Alcanivorax*, são bons surfactantes e emulsificantes.

Os espessantes, estabilizadores e agentes gelificantes, denominados genericamente de ficocolóides (alginato, carragenana e ágar), usados na cos-

mética ou na indústria farmacêutica, são provenientes de diversas espécies de macroalgas marinhas. Por exemplo, os alginatos são bons gelificantes e as carragenanas são amplamente usadas como emulsificantes, gelificantes, estabilizantes ou espessantes em produtos de uso diário como pasta de dente, loção, filtro solar, creme de barbear, xampu, condicionador de cabelo e desodorante.

A quitosana, biossintetizada por animais marinhos como anelídeos, crustáceos, micro-organismos, algas verdes e pardas, leveduras e fungos, assim como seus derivados, são ingredientes usados como emulsificantes, surfactantes, gelificantes, estabilizadores ou espessantes em cosméticos, esmaltes de unha, cremes dentais, loções, cremes para mãos e corpo, assim como produtos para tratamento capilar.

O colágeno, por exemplo, é um componente encontrado em organismos marinhos como esponjas, ouriços, caranguejos e moluscos bivalves.

### *Corantes*

Algas e outros organismos marinhos são fontes de uma grande variedade de pigmentos como clorofilas, carotenóides e ficobiliproteínas que possuem elevado valor agregado.

A astaxantina, dentre os carotenóides, pode ser encontrada em salmão, truta, lagosta, na bactéria *Agrobacterium aurantiacum* ou na microalga verde *Haematococcus pluvialis*. As ficobiliproteínas, incluindo ficoeritrina e ficocianina, presentes em cianobactérias, macroalgas vermelhas e em criptomonas (microalgas), são usadas na indústria de cosméticos em substituição aos corantes sintéticos que podem ser tóxicos e cancerígenos. A ficoeritrina é mais valiosa, devido à cor rosa intensa e única, estável sob calor e variações de pH, e tem sido adicionada como corante natural em batom, delineador e formulação para produtos cosméticos, enquanto a ficocianina é usada em delineador.

### *Antioxidantes*

Além de serem usados como corantes, os carotenóides produzidos por micro- e macroalgas são bons antioxidantes. Mas diversas outras classes de substâncias advindas de organismos marinhos também são comprovadamente antioxidantes, incluindo oligossacarídeos, peptídeos, florotaninos (polifenóis) e vitaminas. As macroalgas são os organismos marinhos mais estudados quanto aos antioxidantes, e extratos brutos de algas pardas são

geralmente mais eficazes do que aqueles de verdes ou vermelhas, presumivelmente devido aos florotaninos somente presentes nesse grupo de macroalgas.

Substâncias originárias de organismos marinhos também exibem diversas atividades biológicas importantes no contexto farmacológico geral, mas que também são de interesse direto da cosmética ou da cosmocêutica, tais como as capacidades fotoprotetora, antienvelhecimento, antirrugas e regeneradora da pele, clareadora da pele, antipruriginoso, anti-inflamatório, antialérgico e antimicrobial.

Diversos estudos recentes exploraram organismos marinhos como fontes de substâncias absorventes de UV como candidatas a novos protetores solares naturais e antienvelhecimento. Por exemplo, bons protetores são as micosporinas e aminoácidos semelhantes à micosporina (MAAs), acumulados por uma ampla gama de micro-organismos, cianobactérias, bem como microalgas, leveduras, fungos, diversas macroalgas e corais. Algumas substâncias de macroalgas, como o ácido sargaquinóico e o sargachromenol, obtidos de *Sargassum sagamianum*, o florotanino dieckol de *Ecklonia* e uma fucoxantina de *Sargassum siliquastrum* são bons exemplos de fotoprotetores para a formulação de produtos farmacêuticos e cosméticos, assim como diversas outras substâncias de organismos marinhos.

As macroalgas vermelhas *Porphyra atropurpurea* e *Chondrus crispus* têm propriedades regenerativas da pele e foram usadas tradicionalmente para tratar feridas e queimaduras. O extrato metanólico da macroalga vermelha *Corallina pilulifera* reduz a expressão de metaloproteínases de matriz humana MMP-2 e -9 induzidas por irradiação UV em fibroblastos.

Do mesmo modo observado na busca por fármacos, a busca por substâncias para a cosmetologia é estimulada pelo conhecimento de substâncias únicas produzidas por organismos marinhos e sem precedentes no ambiente terrestre, dotadas de potentes propriedades bioativas. Sem dúvida, essas características tornam os ingredientes de origem marinha recursos fascinantes para fabricantes de cosméticos.

### 2.3.5 AQUICULTURA

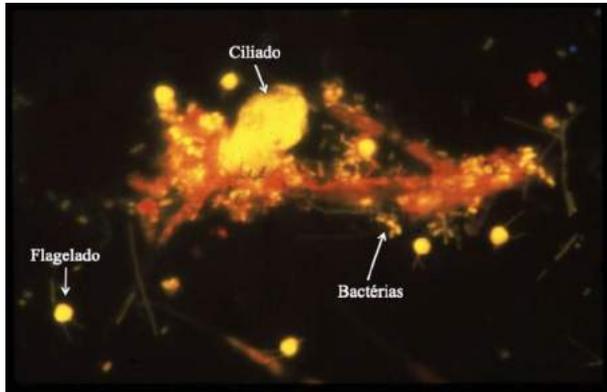
A aquicultura pode ser beneficiadora e beneficiária de processos biotecnológicos. O maior benefício que a aquicultura pode oferecer à biotecnologia marinha é o fornecimento seguro, continuado e em larga escala de matéria-prima para a produção de alimentos funcionais e nutracêuticos e também para a extração de compostos bioativos e outras moléculas para

diferentes usos industriais. A biotecnologia marinha se depara muitas vezes com o dilema de ter encontrado, em organismos marinhos, moléculas potentes e de grande aplicação, mas cujo uso em maior escala poderia resultar na exploração exagerada de um recurso, ou até mesmo na depredação de todo um ecossistema marinho. Nesse sentido, a produção em larga escala do organismo que serve como matéria-prima é a garantia de sustentabilidade e preservação ambiental.

A partir de conhecimentos básicos da biologia e do ciclo de vida de um organismo marinho de interesse, é possível estabelecer processos seguros de produção através de sistemas de aquicultura. Além disso, a produção atual de peixes, crustáceos, moluscos, micro- e macroalgas já pode fornecer matéria-prima para a produção de muitos bioelementos. Por exemplo, resíduos da produção de peixes, como carcaça, vísceras e ossos, podem ser utilizados para obter peptídeos, ácidos graxos, vitaminas e minerais. A produção de camarões fornece a quitina, necessária para a produção de quitosana; e microalgas fornecem grande quantidade de ácidos graxos poli-insaturados com elevado valor de mercado.

A aquicultura sempre foi muito criticada por causar danos ambientais, principalmente pela produção de efluentes ricos em nutrientes que causam a eutrofização do corpo d'água receptor. A adição de grande quantidade de ração, mais a excreção dos organismos produzidos, faz com que a água utilizada na produção fique muito enriquecida com fosfato e elementos nitrogenados. A amônia e o nitrito são extremamente tóxicos para peixes e crustáceos, e para mantê-los saudáveis os produtores realizam trocas de grandes volumes de água, despejando no meio ambiente um efluente com grandes cargas de nutrientes. A entrada desses nutrientes no ambiente costeiro provoca a produção acelerada de microalgas que, ao morrerem, são decompostas por bactérias que acabam exaurindo o oxigênio da água, produzindo zonas hipóxicas, ou anóxicas. Além disso, esse processo de eutrofização pode levar à ocorrência de espécies de microalgas produtoras de toxinas, que podem afetar o ecossistema e até mesmo a saúde humana.

Para resolver esse problema, a aquicultura buscou soluções tecnológicas. Entre estas, a mais exitosa é a tecnologia dos bioflocos (*biofloc technology* - BFT), desenvolvida a partir dos anos 80 em Israel e Estados Unidos, e que teve grande avanço no Brasil a partir dos anos 2000. Esse sistema se baseia na ação de micro-organismos como bactérias e protozoários, que melhoram a qualidade da água e fornecem alimento extra a peixes e camarões produzidos (Figura 5).



**FIGURA 5:** Fotomicrografia de um biofloco formado por matéria orgânica, bactérias e protozoários (magnificação 1000x)(Foto: Bopaiah Biddanda).

A BFT apresenta muitas vantagens e está se caracterizando como uma mudança de paradigma. Por exemplo, em sistemas semi-intensivos, a densidade de camarões produzidos varia entre 10 a 20 indivíduos/m<sup>2</sup>, enquanto que no sistema BFT ela pode chegar a 1.500/m<sup>2</sup>, com mínima troca de água e impacto ambiental (Figura 6). Com isso, apesar de ser um sistema superintensivo de produção, a BFT é ambientalmente amigável por produzir pouco ou nenhum efluente, utilizando área reduzida, em comparação com sistemas extensivos e semi-intensivos. Esta tecnologia continua evoluindo e, certamente, outras surpresas surgirão num futuro próximo.



**FIGURA 6:** Sistema de produção intensiva de camarões utilizando bioflocos. Estação Marinha de Aquicultura - FURG (Foto: D. Krummenauer)

### 2.3.6 OUTROS BIOMATERIAIS

Além dos exemplos já detalhados, outros materiais com ampla utilização biotecnológica são de origem marinha. Um bom exemplo são as proteínas verdes fluorescentes ou GFPs (*green fluorescent proteins*). As GFPs são compostas de 238 aminoácidos (26,9 kDa) e exibem fluorescência verde quando expostas à luz na faixa entre o azul e o ultravioleta. Muitos outros organismos marinhos possuem GFP similares, mas a primeira GFP foi isolada da hidromedusa marinha *Aequorea victoria*. As GFPs são muito empregadas em biologia celular e molecular. O gene GFP é muito usado como repórter de expressão gênica, pois possui a capacidade de formar um cromóforo interno sem requerer quaisquer cofatores acessórios, enzimas ou substratos além de O<sub>2</sub> molecular. Até o momento, GFPs já foram expressas em células, tecidos e órgãos de muitas espécies, incluindo bactérias, fungos, peixes e até mamíferos, inclusive em células humanas, sendo mantidas no genoma e transmitidas à prole. Formas modificadas de GFPs têm sido muito utilizadas em biossensores.

Novos biomateriais podem ser desenvolvidos inspirados na capacidade de alguns moluscos marinhos de sequestrar cloroplastos da dieta e mantê-los funcionais por vários meses. Esse fenômeno, conhecido como cleptoplastia, pode ter inúmeras aplicações em novos materiais para geração de energia, biorremediação e absorção de CO<sub>2</sub> atmosférico, por exemplo.

Impossível falar no potencial biotecnológico de organismos marinhos sem citar os tardígrados. Também conhecidos como ursos d'água, esses animais microscópicos se tornaram famosos por resistir a uma vasta gama de condições inóspitas para quaisquer outras espécies do nosso planeta, tais como dessecação completa (anidrobiose), temperaturas extremas (de -272 a 151°C), pressão (até 6.000 atmosferas), radiação ionizante (até 5.000 Gy – vale destacar que apenas 5 a 10 Gy podem ser fatais para humanos) e até mesmo às condições extremas de vácuo e radiação cósmica do espaço. Aparentemente, essa enorme resistência está relacionada a proteínas desordenadas tardígrado-específicas. O próximo passo será compreender que mecanismos tornam isso possível, o que poderá abrir as portas para muitos avanços tanto nas biociências espaciais quanto em outras áreas.

### 2.3.7 BIOENERGIA E BIOCMBUSTÍVEIS

A queima de combustíveis fósseis é, talvez, o maior problema ambiental produzido pelo próprio homem e pode estar colocando em risco a

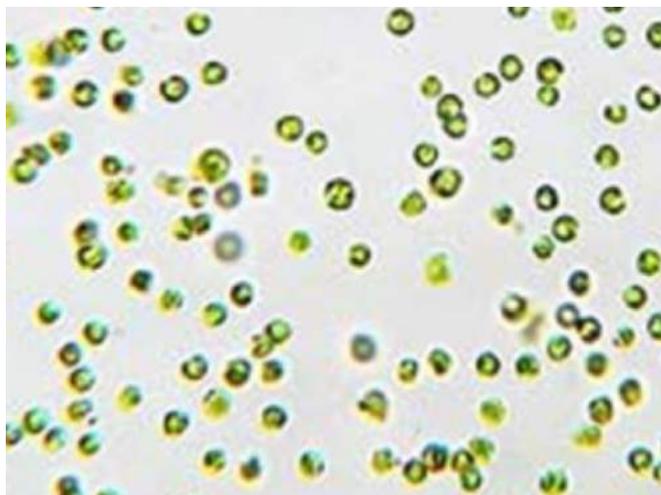
sobrevivência da humanidade. Desde a tomada de consciência desse problema, nos anos 80, têm-se buscado novos meios de geração de energia que sejam renováveis, ou provenientes de fontes não poluentes, como a energia solar, eólica, de ondas e de marés.

No caso de biocombustíveis, o Brasil tem papel de destaque desde os anos 70 com o Proálcool, programa este desenvolvido não por causa da consciência ecológica, mas sim devido ao embargo de países árabes produtores de petróleo que fez com que o preço da gasolina atingisse valores intoleráveis. De qualquer forma, o Brasil conseguiu montar uma estrutura logística de produção e distribuição de álcool, além de criar motores automotivos adaptados a esse combustível. Hoje a frota brasileira de carros tem 100% de motores Flex (bicombustíveis), diminuindo significativamente o uso de petróleo, o que deve ser motivo de grande orgulho para nós.

Mais recentemente, o Brasil começou também a desenvolver um programa de substituição do diesel de petróleo pelo biodiesel, produzido a partir da soja e até mesmo de gordura animal. Hoje, o diesel vendido nos postos de gasolina já possui 7 a 8% de biodiesel, o que gera uma enorme economia, considerando que grande parte do transporte de cargas e urbano em nosso país é feito em caminhões e ônibus com motores a diesel.

Este já parece ser um quadro bastante satisfatório, mas não é perfeito. Isso porque a matéria-prima para a produção do álcool e do biodiesel são produtos agrícolas que, inicialmente, deveriam ser prioritariamente utilizados para o consumo humano e não para a geração de energia. Existem, então, outras alternativas para a produção de energia renovável? A resposta a esta pergunta é sim, e neste novo cenário aparecem as microalgas, organismos unicelulares clorofilados que compõem a maior parte da produção primária nas regiões costeira e oceânica. Além disso, muitas espécies apresentam grande teor de lipídeo, podendo chegar até 50% do peso seco da microalga, tornando-a potencial matéria-prima para a produção de biodiesel. Além do alto teor lipídico, muitas dessas microalgas também possuem grande quantidade de ácidos graxos poli-insaturados. Por exemplo, a microalga marinha *Nannochloropsis oceanica* (Figura 7) apresenta em média 30% de lipídeos, e destes, 40% são formados pelo ácido graxo eicosapentaenoico (EPA - C 20:5), com alto valor de mercado.

As microalgas apresentam ainda outras vantagens para a produção de biocombustíveis, a saber: 1) Apesar de diminutas, têm elevada taxa de crescimento. Enquanto vegetais superiores apresentam uma ou duas safras por ano, a mesma biomassa pode ser produzida por microalgas em questão de dias; 2) Não necessitam de água doce para a sua produção, permitindo com



**FIGURA 7:** Fotomicrografia da microalga marinha *Nannochloropsis oceanica*, produzida no Laboratório de Produção de Microalgas do Centro de Biotecnologia e Diagnóstico de Organismos Marinhos do Instituto de Oceanografia – FURG (400 x)(Foto R. Sales).

que a água potável seja utilizada para usos mais nobres, como produção agrícola e consumo humano; 3) Podem ser produzidas em terrenos inapropriados para a produção agrícola, como regiões secas e com elevada insolação.

A produção das microalgas pode ser feita em sistemas fechados, como fotobiorreatores (Figura 8), ou abertos, como tanques circulares, ou *raceways* (Figura 9).



**FIGURA 8:** Fotobiorreatores para produção de microalgas com borbulamento. Estação Marinha de Aquicultura, Instituto de Oceanografia – FURG (Foto: F. Roselet).



**FIGURA 9:** Tanques circulares para produção de microalgas com borbulhamento e *raceways*, com movimentação da água por pás. Estação Marinha de Aquicultura, Instituto de Oceanografia - FURG (Foto: F. Roselet).

Os sistemas abertos, apesar de terem menor controle das variáveis ambientais, são mais efetivos para a produção de microalgas em larga escala. Isso porque sua produção, operação e manutenção são mais baratas do que os fotobiorreatores. O maior problema desses sistemas de cultivo é a contaminação por outras espécies e, para tanques descobertos, a entrada de água da chuva que pode alterar bastante a salinidade. Entretanto, estes podem gerar de 1 a 2 gramas por litro de cultivo em poucos dias. Isso significa uma produção de mais de um quilograma de biomassa seca por tanque de 1.000 litros, que é considerado pequeno. Tanques de produção em larga escala podem atingir até 50.000 litros ou mais.

Não é só o lipídeo produzido pelas microalgas que pode se tornar um biocombustível. Os açúcares também podem ser transformados em álcool. Além disso, a decomposição anóxica da biomassa produzida pode gerar metano, que tem alto poder inflamável. Por último, sabe-se que microalgas e bactérias podem produzir hidrogênio, que é considerado o combustível do futuro, por não gerar resíduo, mas somente água após a sua utilização. Entretanto, a tecnologia de células de hidrogênio abastecidas por bactérias e microalgas ainda está em desenvolvimento.

### 2.3.8 BIORREMEDIAÇÃO

Remediar significa dar remédio, mas também atenuar, minorar, corrigir. A biorremediação, portanto, refere-se ao emprego de organismos vivos para a correção de problemas, especialmente os ambientais como poluição

e contaminação. Do ponto de vista biotecnológico, a biorremediação não é só um processo de limpeza do meio ambiente, mas pode estar relacionada a vários dos processos descritos anteriormente, como produção de bioelementos e até mesmo geração de energia.

Como isso é possível? No item anterior, descrevemos a produção de microalgas para a geração de biocombustível, especialmente o biodiesel. Para a produção de microalgas é necessário, além do gás carbônico, alguns outros nutrientes, como nitrogênio e fósforo, e micronutrientes e fatores de crescimento como vitaminas que são incorporados na biomassa das novas células. A incorporação de nutrientes não se dá de forma aleatória, mas em proporções definidas, num conceito conhecido como “Número de Redfield”. Esse conceito estabelece que para cada 106 átomos de carbono incorporados, são também absorvidos 16 átomos de nitrogênio e 1 de fósforo (C:N:P = 106:16:1). Em peso (g, kg ou T), essa proporção passa a ser C:N:P = 42:7:1. Considerando essas proporções e assumindo-se que 50% do carbono presente no peso seco da alga é lipídeo e que 10% do carbono desse lipídeo se transforma em biodiesel, essa proporção passa a ser 2:7:1. Dessa forma, para produzir 1.000 toneladas de biodiesel, as algas precisariam de 1.000 toneladas de carbono, 3.500 toneladas de nitrogênio e 500 toneladas de fósforo. Portanto, a produção de biodiesel a partir de microalgas geraria grande demanda por nutrientes, especialmente fertilizantes, e conseqüentemente, uma forte concorrência com a produção de alimentos.

Diariamente são despejadas milhares de toneladas de nitrogênio e fósforo em corpos d’água, na forma de esgoto doméstico e industrial. Esses efluentes causam grande impacto ambiental, gerando redução de biodiversidade, ocorrência de zonas-mortas e transmissão de doenças. Isso diminui a qualidade de vida dos seres vivos, inclusive o homem. Mas essa “riqueza” de nutrientes pode ser aproveitada para a produção de biomassa de micro- e macroalgas e até mesmo de vegetais superiores. Durante o processo de absorção de nitrogênio e fósforo as microalgas retiram também o gás carbônico da atmosfera, diminuindo o efeito estufa.

Como se vê, é possível integrar processos biotecnológicos distintos de modo a gerar a produção de um combustível renovável e ainda biorremediar o impacto causado por esgotos domésticos em ambientes marinhos.

## 3 APLICAÇÕES INDUSTRIAIS DA BIOTECNOLOGIA MARINHA

As aplicações da biotecnologia marinha em escala industrial já são inumeráveis, e o potencial para novas aplicações depende apenas do desenvolvimento de infraestrutura e pessoal capacitado, além, obviamente, de estudos de viabilidade econômica (Tabela 2).

**TABELA 2:** Áreas de pesquisa, fontes marinhas e objetivos

ÁREA	FONTE MARINHA	OBJETIVO
Alimentação	Algas, invertebrados, peixes	Desenvolvimento de métodos inovadores para aumentar a produção da aquicultura e sistemas de recirculação com desperdício zero
Energia	Algas	Produção de biocombustíveis, biorrefinarias
Saúde	Micro-organismos, algas, invertebrados	Encontrar novas substâncias bioativas, novos bioadesivos e novas formas de produção em escala industrial
Ambiente	Micro-organismos, algas, invertebrados	Tecnologias de biossensores para monitoramento do ambiente marinho e busca de vida fora da Terra; tecnologias anti-incrustantes ambientalmente compatíveis; biorrefinarias com extremófilos GM para remoção de CO <sub>2</sub> atmosférico, metano e outros gases estufa
Construção	Invertebrados	Produção de novos bioadesivos e biopolímeros para aplicação em grande escala
Produtos industriais	Algas	Produção de biopolímeros marinhos para alimentação, cosméticos e saúde

### 3.1 BIOTECNOLOGIA DE MACROALGAS E INVERTEBRADOS MARINHOS

O quadro atual aponta a biotecnologia de macroalgas marinhas como uma área em amplo crescimento e que pode gerar recursos de baixo custo

tecnológico. Independentemente da área da biotecnologia de macroalgas marinhas, o suprimento de matéria-prima é problema crucial e constitui uma oportunidade valiosa para a inserção de países em desenvolvimento no mercado emergente da biotecnologia marinha, como revela o cenário mundial nesta área.

Por exemplo, o cultivo de macroalgas marinhas, com crescimento mundial próximo a 10% ao ano, é hoje impulsionado pela diversificação da demanda por usos desses organismos na bioenergia, na área de cosméticos e na biomedicina. A demanda crescente por macroalgas marinhas como matéria-prima também pode promover crescimento no número de patentes de custo baixo se comparadas às “patentes genéticas” que exigem tecnologias sofisticadas e que ainda são privilégios de nações desenvolvidas.

Hoje observa-se que a propriedade intelectual que impulsiona a biotecnologia de macroalgas marinhas é partilhada por poucos países asiáticos (Japão, China e Coreia do Sul detêm mais de 8% de todas as patentes registradas), enquanto países ocidentais dominam as patentes de genes marinhos. Mas a grande maioria dos pedidos de patentes se concentra na China e no Japão, países que investem significativamente em pesquisa científica e onde é tradicional o cultivo de macroalgas marinhas. Os demais registros expressivos de patentes são feitos nos Estados Unidos e na França. Por outro lado, os grandes produtores desse recurso, como Filipinas, Indonésia e Vietnã, investem muito pouco em pesquisa e não participam de modo expressivo do mercado mundial de patentes.

O mesmo raciocínio pode ser aplicado aos produtos de origem animal, especificamente invertebrados marinhos, ou seja: os países em desenvolvimento devem gerar recursos de baixo custo tecnológico, mas capazes de gerar benefícios econômicos e sociais.

Os países em desenvolvimento, mas ativos no cultivo de macroalgas marinhas e invertebrados marinhos, podem promover o desenvolvimento sustentável com base em seus próprios recursos naturais, como incentivado pela Convenção da Diversidade Biológica. No entanto, uma visão de futuro deve ser mais abrangente e vislumbrar investimentos em pesquisa científica, desenvolvimento tecnológico e fortalecimento de cooperações, visando reverter a modesta participação desses países no mercado de patentes de macroalgas marinhas. Novas e mais sofisticadas aplicações biotecnológicas advindas de macroalgas marinhas não devem manter ou mesmo ampliar a distância entre países desenvolvidos focados em aplicações de alto valor e países em desenvolvimento focados na produção de matéria-prima de baixo custo e com pouco valor agregado.

### 3.2 BIOTECNOLOGIA DE MICRO-ORGANISMOS MARINHOS

Por definição, micro-organismos não são observáveis a olho nu, por ter tamanho inferior à resolução do olho humano, ou seja, 0,5mm, ou 500 $\mu$ m. Essa designação compreende organismos procariotos e eucariotos, além de vírus.

Devido à sua imensa diversidade biológica, os micro-organismos marinhos representam uma importante fonte genética com grande potencial para a geração de bioelementos, ou até mesmo o uso integral de células e colônias em processos tecnológicos. Algumas estimativas indicam que deve haver entre  $10^3$  e  $10^9$  espécies de micro-organismos nos mares e oceanos. Além do grande número de espécies, o potencial dos micro-organismos baseia-se também em seu grande número como indivíduos. Se considerarmos, por exemplo, que cada célula bacteriana representa um indivíduo com seu genoma e que esse genoma pode possuir a chave para a produção de compostos com diferentes atividades, vemos que as possibilidades de obter esses bioelementos aumentam com o número dos próprios indivíduos. Pois bem, sabe-se que o número médio de bactérias em ambientes marinhos varia de  $10^5$  a  $10^6$  por mililitro de água. Portanto, em um único litro de água de uma região costeira existem mais bactérias (indivíduos) do que o número de seres humanos que habitam nosso planeta! Isso representa um enorme potencial genético que está longe de ser plenamente conhecido e explorado.

Esse grande número de indivíduos e a enorme biodiversidade já garantem hoje a supremacia na descoberta de organismos, ou partes destes (moléculas) com aplicações nas indústrias farmacêutica, cosmética e alimentícia, além de ter aplicação no controle e mitigação de impactos ambientais, atuando na bioremediação e na produção de energia limpa.

Certo é que, com o desenvolvimento de novas tecnologias e metodologias de análise, novos potenciais usos de micro-organismos marinhos serão descobertos e poderão auxiliar o desenvolvimento de um ser humano melhor, em um planeta melhor. Entretanto, qualquer tecnologia pode ser empregada de maneira construtiva ou destrutiva. Essa decisão dependerá da sabedoria humana e não apenas do seu conhecimento.

**BOX 2: TAQ POLIMERASE – A HISTÓRIA DE UMA PARCERIA DE SUCESSO ENTRE MICRO-ORGANISMOS E BIOTECNOLOGIA**

Se você já estudou biologia molecular ou genética sabe que o pilar que sustenta essas ciências chama-se PCR – *polymerase chain reaction*, reação em cadeia de polimerase. Por que um pilar? Porque a partir dessa metodologia é possível ampliar o ácido desoxirribonucleico, ou DNA, molécula que codifica a informação da vida. Somente com a amplificação do DNA foi possível realizar a identificação de organismos que não apresentam diferenças morfológicas perceptíveis, como bactérias e outros micro-organismos, e até mesmo a manipulação do genoma e sua caracterização através das muitas “ômicas” – genômica, proteômica e metabolômica, entre outras – que estão revolucionando a biotecnologia atual.

De maneira geral, o método consiste em separar a dupla fita de DNA, ou fazer uma desnaturação, através do aumento de temperatura. Em seguida, a temperatura é reduzida e entra em cena uma enzima chamada Taq-DNA-polimerase, que permite que nucleotídeos complementares àqueles presentes na fita se ajustem em sequência fazendo uma fita complementar. Esse processo só é possível com o uso de uma pequena sequência de DNA chamada *primer*, que reconhece o DNA e permite o início da cópia. Esse processo é repetido várias vezes (ciclos), incrementando o número de cópias do DNA de forma exponencial.

O grande avanço truque desse método foi encontrar uma enzima que funciona em altas temperaturas, o que é, digamos, uma anomalia, pois sabemos que as enzimas, feitas de proteínas, se degradam com a temperatura elevada. Esse grande salto metodológico só foi possível devido a uma bactéria termofílica chamada *Thermus aquaticus*, que foi isolada de fontes termais do Parque Yellowstone, nos EUA. Essa bactéria forneceu a enzima capaz de funcionar em altas temperaturas durante o processo de PCR.

O interessante é que, com o advento da PCR houve um grande avanço na identificação de novas bactérias que, por sua vez, fornecem novos bioelementos, ou participam em novos processos biotecnológicos. Esse exemplo representa um claro *feedback*, ou retroalimentação, entre os micro-organismos e a biotecnologia.

## 4 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

A biotecnologia marinha ainda encontra-se em estágio inicial de desenvolvimento, principalmente quando comparada à biotecnologia terrestre ou continental. No entanto, a caracterização e os diversos exemplos mencionados neste capítulo são provas inequívocas de como esta é uma área multidisciplinar que engloba toda a cadeia de valores e abrange diversos setores de relevância capital. A biotecnologia marinha não somente tem potencialidade para a geração de produtos, mas também oferece novas oportunidades para a indústria desenvolver vantagens competitivas, estimular o crescimento e criar novos empregos. Mas cabe ressaltar a biotecnologia marinha como uma força capaz de promover o desenvolvimento e oferecer oportunidades para revolucionar as atividades de bem-estar humano.

A bioprospecção marinha é constituída como atividade científica e econômica com alto impacto no desenvolvimento sustentável e na redução da pobreza, bem como no crescimento econômico para os países em desenvolvimento. A evolução alcançada pela biotecnologia marinha atesta a sua contribuição para a exploração sustentável e a conservação dos recursos biológicos marinhos de modo a beneficiar a sociedade e contribuir para o progresso econômico; esse aspecto é de importância fundamental em países megadiversos. Por exemplo, o estabelecimento de indústrias baseadas na biodiversidade produz uma apropriação social do conhecimento e que gera benefícios e aplicações para a própria biodiversidade. Além disso, a receita advinda do desenvolvimento de novos medicamentos (estima-se que uma droga de sucesso pode gerar US\$ 1 bilhão por ano) de fontes naturais contribui para a conservação da biodiversidade em países megadiversos, bem como para a proteção do conhecimento sobre medicamentos tradicionais.

Mas por razão de sua própria juventude, a biotecnologia marinha ainda permanece com grandes desafios que perduram desde a sua origem, como a necessidade de identificar novos recursos e bioprodutos, desenvolver novas tecnologias de busca, otimizar a produção e recuperação de bioprodutos e, principalmente, prover o suprimento sustentável de recursos. Mas constitui um desafio para um futuro imediato, uma vez que já existem alguns exemplos de grande sucesso nas áreas de novos fármacos, novas enzimas industriais, ingredientes alimentares, biossensores, entre outras.

No Brasil, a biotecnologia marinha ainda precisa ser reconhecida por tomadores de decisão política e pelo setor empresarial como um potencial significativo para preencher lacunas de mercado para novos produtos. Mas

o início pode ser o momento mais propício aos ajustes visando à construção correta e funcional dos esforços de bioprospecção neste país megadiverso. Uma abordagem multidisciplinar deve ter como objetivo principal o crescimento sustentável das comunidades em benefício da conservação dos ecossistemas e a promoção do desenvolvimento econômico.

## BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

Bhatia, P.; Chugh, A. 2015. Role of marine bioprospecting contracts in developing access and benefit sharing mechanism for marine traditional knowledge holders in the pharmaceutical industry. *Global Ecol. Conserv.*, 3: 176-187.

Corinaldesi, C.; Barone, G.; Marcellini, F.; Dell'Anno, A.; Danovaro, R. 2017. Marine microbial-derived molecules and their potential use in cosmeceutical and cosmetic products. *Mar. Drugs*, 15: 118.

Hurst, D.; Børresen, T.; Almesjö, L.; De Raedemaeker, F.; Bergseth, S. 2016. Marine biotechnology strategic research and innovation roadmap: Insights to the future direction of European marine biotechnology. Marine Biotechnology ERANET: Oostende. *Marine pharmacology*. <http://marinepharmacology.midwestern.edu/clinPipeline.htm>.

Juan, B. 2017. Bioprospecting and drug development, parameters for a rational search and validation of biodiversity. *J. Microb. Biochem. Technol.* 9:1.

Kim, S-K. 2015. *Handbook of marine biotechnology*. Springer-Verlag, Berlin. 1512p.

Wen, L.; Weaver, J.C.; Lauder, G.V. 2014. Biomimetic shark skin: design, fabrication and hydrodynamic function. *J. Exp. Biol.*, 217: 1656-1666.





## CAPÍTULO 8

# NOVOS MÉTODOS E ABORDAGENS MULTIDISCIPLINARES PARA O USO E GESTÃO DOS RECURSOS PESQUEIROS MARINHOS NO BRASIL E NO MUNDO

JOSÉ ANGEL ALVAREZ **PEREZ**<sup>1</sup>  
ANTÔNIO OLINTO **ÁVILA-DA-SILVA**<sup>2</sup>  
DANTE QUEIROLO **PALMA**<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Estudos Marinhos Aplicados – Escola do Mar, Ciência e Tecnologia (EMCT), Universidade do Vale do Itajaí (UNIVALI), Itajaí, SC

<sup>2</sup> Instituto de Pesca de São Paulo (IP- SP), Santos, SP

<sup>3</sup> Escuela de Ciencias del Mar, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), Chile

# 1 CRISE E RENOVAÇÃO NO USO E MANEJO DOS RECURSOS PESQUEIROS MARINHOS

Na última década, recursos pesqueiros (incluindo organismos cultivados) têm suprido 17% da demanda global de proteína animal (FAO, 2014). Em alguns países pobres, cuja base alimentar é o consumo de cereais, peixes podem atingir 20 a 50% do consumo *per capita* de proteína animal. Nesses países, estima-se que três bilhões de pessoas estejam nessa condição nutricional, o que coloca a pesca como um importante vetor de “segurança alimentar” (HLPE, 2014). Além disso, os ditos “frutos do mar” são valorizados e consumidos em países desenvolvidos e em desenvolvimento, de modo que o pescado está entre as *commodities* mais comercializadas no mundo. Japão, EUA, China e a UE são importantes mercados consumidores, que tendem a importar grande parte do pescado consumido de países em desenvolvimento. Isso faz com que recursos de maior valor sejam menos disponíveis aos consumidores mais pobres, o que, por sua vez, tende a afetar a segurança alimentar em escalas locais e regionais (Garcia e Rosemberg, 2010). Ainda assim, estima-se que 10-12% da população mundial assegure seu sustento pescando e cultivando organismos aquáticos (FAO, 2014).

Mas o papel da pesca como fonte de alimento, trabalho e riqueza deve alcançar um significado ainda maior no futuro. A população humana deverá superar os nove bilhões de habitantes até 2050, o que acarretará uma demanda adicional de aproximadamente 350 milhões de toneladas de proteínas consumíveis. Mantidas as proporções atingidas atualmente pelo pescado no consumo global de proteína animal, estima-se que a produção de pescado deveria aumentar em aproximadamente 50% nas próximas cinco décadas para atender as crescentes demandas nutricionais, o que se torna particularmente crítico nas regiões mais pobres do planeta (Rice e Garcia, 2011). Para muitos analistas ambientais, entretanto, mantidos os padrões históricos de exploração dos recursos pesqueiros (e apesar da tendência global de crescimento da aquicultura), bem como as tendências de alteração das condições ambientais do planeta, essa perspectiva parece pouco provável. Pelo contrário, para esses analistas, a atividade pesqueira marinha atravessa uma grave crise, com consequências futuras de natureza ambiental, econômica e social (Pauly et al., 2002).

A origem dessa crise global está arraigada, por um lado, na natureza extrativa da pesca, e por outro, na dinâmica das motivações humanas para

obter seus benefícios a partir dos recursos naturais. A produção da pesca é sustentada pelo bom funcionamento dos diferentes ecossistemas marinhos e sua capacidade de manter o fluxo de energia, através das cadeias tróficas, em níveis adequados ao atendimento das necessidades energéticas das espécies de interesse e seus processos populacionais. Essa condição garante as oportunidades de extração, mas também estabelece limites máximos, abaixo dos quais a reposição natural dos montantes capturados periodicamente é possível. Como a capacidade extrativa das frotas pesqueiras tem sido determinada historicamente por regimes econômicos, sociais e políticos próprios, muitas vezes pouco influenciados pelo ambiente natural e suas flutuações no tempo e espaço (Hicks et al., 2016), com frequência tem-se visto os limites naturais ultrapassados e a geração de cenários de sobrepesca e mesmo colapsos pesqueiros com drásticas repercussões para as sociedades (Srinivasan et al., 2012). Embora esses processos tenham sido exacerbados no último século, devido à maior escala da atividade pesqueira e do poderio tecnológico, é importante reconhecer que essa tendência ao desequilíbrio tem se estabelecido desde os primórdios da civilização humana em diferentes regiões e em diferentes escalas (Jackson et al., 2001). Além disso, seu impacto tem efeito acumulativo, já que, diante de eventuais colapsos, o homem-pescador tem demonstrado excepcional capacidade de adaptação, expandindo sua atuação no espaço geográfico, ocupando ambientes marinhos inexplorados e alterando seus alvos e métodos. Dessa forma, compensa perdas, e tem mantido e até aumentado o suprimento de produtos do mar, o que, para muitos, apenas tem atrasado uma crise ainda maior (Berkes et al., 2006). Apesar dessa ação compensatória, no entanto, algumas análises científicas têm demonstrado sinais de estabilização e decréscimo no suprimento global de pescado capturado (Pauly e Zeller, 2016).

Os desequilíbrios estabelecidos nos sistemas pesqueiros têm consequências ainda mais amplas do que aquelas reconhecidas pela produção pesqueira. Isso porque alterações no funcionamento dos ecossistemas marinhos, comumente causadas por perdas de diversidade biológica (incluindo habitats), repercutem indiretamente na provisão da biomassa necessária para a sustentação da pesca (Worm et al., 2006). No coração dessas alterações estão os efeitos das atividades antrópicas, inclusive a própria pesca, que tem potencial de alterar a biodiversidade de uma região de diferentes maneiras (Pauly et al., 2002), além de alterações globais nas condições ambientais do planeta, fundamentalmente motivadas pelo efeito-estufa. De fato, estima-se que, na atualidade, as mudanças climáticas e a pesca sejam os maiores estressores do ambiente marinho, ao menos em termos espaciais (Halpern et

al., 2008). No futuro, ambientes marinhos alterados pelas mudanças climáticas globais e submetidos a regimes pesqueiros intensos têm poucas perspectivas de sustentar o esperado aumento de produtividade (Rice e Garcia, 2011).

A reversão desse quadro passa necessariamente pelo processo de gestão, ou manejo pesqueiro, como mecanismo regulatório com potencial para limitar o avanço da atividade pesqueira, recuperar estoques debilitados, diminuir seu impacto sobre os ambientes marinhos e assim garantir o papel da pesca na necessária “segurança alimentar” (Rice e Garcia, 2011). Esse processo teve grande desenvolvimento no século XX, quando foram implementados mecanismos de tomada de decisão e controle das pescarias pelo poder público, buscando atingir objetivos de maximização da produção (e benefícios) e a sustentabilidade do sistema. Parte essencial desse processo foi o desenvolvimento de modelos populacionais, capazes de: (a) prever estados teóricos onde as pescarias operariam dentro dos objetivos propostos; (b) orientar a tomada decisão administrativa sobre medidas de manejo que conduzissem as pescarias a esses estados por tempo indefinido, gerando benefícios duradouros (Gulland, 1983). Ao longo do tempo, no entanto, conhecidos processos de manejo pesqueiro mostraram-se ineficazes e mesmo incapazes de evitar colapsos, sustentando a percepção de que pescarias não poderiam ser manejadas de forma sustentável por algumas razões *inter alia*:

- a perspectiva de obter riqueza através da pesca gera poder político e social que é revertido em aumento da capacidade de pesca, pressionando ainda mais o sistema natural (Ludwig et al., 1993);
- os objetivos voltados à maximização de benefícios econômicos e sociais tendem a provocar medidas que aumentam a competição e mantêm recursos altamente pressionados; outros objetivos para o manejo são necessários, mas tendem a gerar conflitos inter-setoriais (Hilborn, 2007);
- a dificuldade de obter um consenso científico a respeito do funcionamento dos sistemas naturais e as respostas ao impacto causado pela pesca gera incerteza sobre as estratégias de manejo a serem adotadas e seu sucesso em atingir objetivos predeterminados (Ludwig et al., 1993);
- os mecanismos de governança são deficientes e frequentemente enfraquecidos, pelos motivos mencionados no primeiro item acima (Hanna, 1999);
- o manejo, priorizando o(s) recurso(s)-alvo, falha em desconsiderar os efeitos da pesca sobre o ecossistema e seu funcionamento, incluindo alterações na biodiversidade, o que impede o restabelecimento da produti-

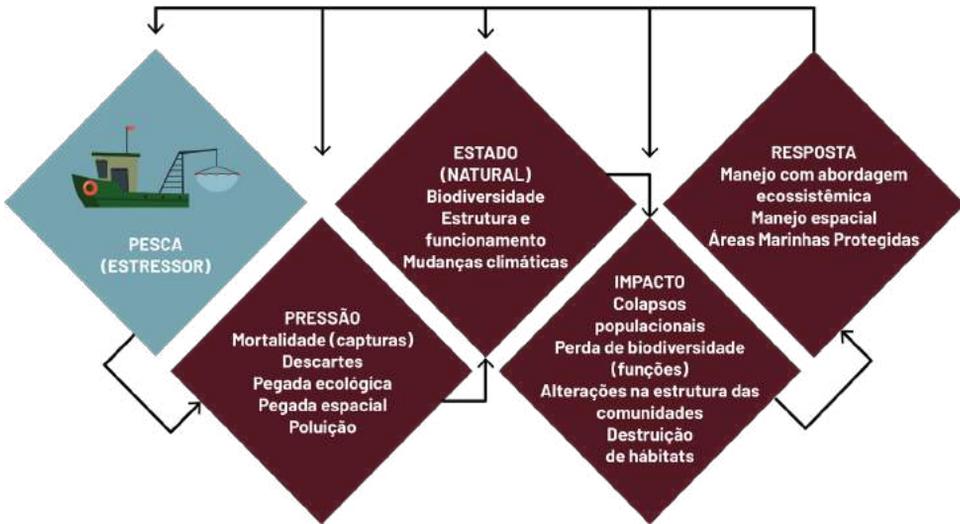
vidade dos recursos de interesse e outros serviços ecossistêmicos (Pikitch et al., 2004).

Diante desse cenário, a última década tem sido palco do debate sobre a necessária renovação do processo de manejo pesqueiro, tomando como referência sistemas bem-sucedidos, conceitos reparadores dos obstáculos acima referidos, medidas de proteção e restauração de ecossistemas, e sua aplicabilidade em diferentes regiões do planeta (por ex.: Mora et al., 2009; Costello et al., 2016). Entre estes, tem emergido, nas esferas científica e administrativa, o reconhecimento da pesca como um “estressor”, pressionando os ambientes marinhos de forma indissociada de outros estressores. A partir dessa consideração, a pesca em diversas escalas poderia ser analisada conceitualmente pelo modelo DPSIR (*driver – pressure – state – impact – response*) utilizado para descrever de que forma a sociedade afeta o estado dos ecossistemas e quais respostas poderiam se contrapor aos eventuais impactos (Martins et al., 2012)(Figura 1).

Neste capítulo adotamos a estrutura analítica DPSIR para apresentar novas abordagens e métodos aplicados para a resolução dos problemas da pesca e sua sustentação futura como atividade essencial ao desenvolvimento humano em escala global e regional (Gari et al., 2015). Nesses termos caracterizaremos, inicialmente, a atuação da pesca como forma de ocupar e explorar o ambiente marinho em meio a outras atividades antrópicas (*driver*). A seguir será dimensionada a pressão exercida sobre esse ambiente no passado, presente e futuro (*pressure*), e caracterizado o funcionamento desses ambientes, incluindo suas flutuações temporais e espaciais (*state*). As consequências da pressão exercida pela pesca sobre ecossistemas e seus componentes serão avaliadas a seguir (*impact*), bem como os mecanismos de manejo propostos para minimizar o impacto a atingir objetivos esperados para o desenvolvimento pesqueiro (*response*). O capítulo também traz um tema transversal que abrange os avanços tecnológicos e seus usos em benefício do aperfeiçoamento do conhecimento e da gestão dos recursos pesqueiros. Os temas acima serão desenvolvidos dentro de uma ótica global, buscando uma atualização do debate em torno das questões relacionadas ao uso de recursos marinhos. Porém, um estudo recente e abrangente<sup>1</sup> (Arana et al., 2016) abordou ações inovadoras aplicadas ao conhecimento e a gestão da pesca brasileira, proporcionando a oportunidade de se traçar paralelos com

<sup>1</sup> Projeto IGEPECA – Inovação e Interdisciplinaridade Aplicadas à Gestão e Desenvolvimento Sustentável da Pesca Industrial Marinha das Regiões Sudeste e Sul do Brasil (CAPES – Edital Ciências do Mar 09/2009)

a realidade nacional. Apesar do foco ambiental explorado nesta análise, reconhece-se que existem grandes avanços nas abordagens econômicas, sociais e políticas da atividade pesqueira. Esses aspectos merecem uma revisão por si só.



**FIGURA 1:** Modelo conceitual DPSIR do estudo da atividade pesqueira e seus efeitos sobre os ecossistemas marinhos. Modificado de Gari et al. (2015).

## 2 A PESCA E SUA RELAÇÃO COM OUTRAS ATIVIDADES DE USO DO AMBIENTE MARINHO

A atividade pesqueira engloba não só a captura de pescado em si, mas também as atividades de guarda e manutenção de embarcações e petrechos de pesca, transporte, processamento e comercialização de pescados. Como uma modalidade de uso do espaço, a atividade pesqueira necessita de dois territórios para ser executada – um, marinho, onde é efetuada a extração do recurso, e outro terrestre, onde é feita a armação das embarcações, a comercialização do pescado e também onde é produzida sua cultura. Ainda, considerando a influência de fatores atmosféricos sobre o ambiente aquático, pode-se dizer que a pesca se desenvolve dentro de um espaço tridimensional (Cunha, 2001).

As regiões costeiras são as mais povoadas, com uma densidade popu-

lacional aproximadamente três vezes maior do que a média global. Estima-se que cerca de 23% da população mundial viva nessas regiões, concentrando a atividade de extração de recursos pesqueiros (Small e Nicholls, 2003). No Brasil o quadro é semelhante, com 27% da população disposta em municípios litorâneos (IBGE, 2011). Coincidentemente, as áreas marinhas de plataforma que margeiam os continentes são as mais produtivas e também as mais vulneráveis à ação do homem. Embora representem apenas 7,6% da área dos oceanos, elas proporcionam de 15 a 30% de sua produção primária (Yool e Fashman, 2001) e concentram mais da metade das capturas mundiais de pescado (Watson et al., 2004; Groombridge e Jenkins, 2002). Essa produtividade, no entanto, não é homogênea geograficamente. “Grandes ecossistemas marinhos” (LMEs) são regiões particularmente produtivas que englobam desde águas costeiras até as margens das plataformas continentais, incluindo massas de água e correntes costeiras (Sherman, 2008), as quais contribuem com 95% da produção mundial de pescados marinhos (Stock et al., 2017).

No Brasil, estima-se que pelo menos 90% da produção pesqueira nacional seja proveniente de áreas costeiras, que incluem os estuários e toda a região da plataforma continental (Castello, 2010). Frotas pesqueiras industriais de Santa Catarina, por exemplo, apresentam padrões espaciais de captura e esforço densamente concentrados em áreas da plataforma continental, entre 30 e 100 metros de profundidade, ao largo de toda região Sudeste e Sul do Brasil (Rosso e Pezzuto, 2016). Da mesma forma, a pesca do estado de São Paulo utiliza especialmente áreas até a isóbata de 50 metros, a uma distância máxima de 42 milhas náuticas (78 quilômetros) da costa. Destas áreas se obtém 83% da produção pesqueira do estado e são gerados 94% dos postos de trabalho em mar (Imoto et al., 2016).

Cabe ressaltar, no entanto, que alterações nas abundâncias dos estoques costeiros, bem como oportunidades de mercado, têm impulsionado a atividade pesqueira a ocupar espaços do oceano além da plataforma continental, incluindo o talude, montanhas e dorsais submarinas, o pelagial oceânico e mesmo os oceanos polares. A tendência de expansão oceânica e “aprofundamento” da pesca comercial, por exemplo, tem sido notada nas últimas cinco décadas expandindo a pegada espacial a ambientes e recursos intocados e valiosos, porém pouco produtivos e sujeitos a rápidos processos de sobrepesca, além da degradação de habitats de alta sensibilidade (Morato et al., 2006; Swartz et al., 2010; Norse et al., 2012). Essa mesma tendência se observa na América Latina (Arana et al., 2009) e particularmente na região Sudeste-Sul do Brasil, que foi alvo de um processo episódico de desenvolvimento pesqueiro em áreas do talude, e que marcou um processo de expansão

oceânica da pesca demersal no país (Perez et al., 2009; Port et al., 2016a).

Os processos de expansão das atividades pesqueiras se dão através da adoção de diferentes estratégias espaço-temporais, a partir das quais pescadores combinam operações direcionadas a conjuntos de espécies disponíveis em áreas e épocas definidas (e.g. *métiers*). Assim, utilizam de forma oportunista diversos espaços da plataforma e talude, o que lhes permite atingir a sustentabilidade econômica (Branch et al., 2006). Estudos voltados à análise da dinâmica da pesca demersal no Sudeste e Sul do Brasil revelaram que, assim como em outras regiões do mundo, “grupos” de pescadores, inicialmente de atuação oportunista, eventualmente se “especializam” em um determinado *métier* e passam a depender de áreas e recursos específicos (Pezzuto e Mastella-Benincá, 2015; Imoto et al., 2016; Dias e Perez, 2016; Pio et al., 2016). Nesse contexto, deve-se lembrar que os recursos pesqueiros são um bem comum, de uso compartilhado e de propriedade do Estado. A exclusão ou o controle do acesso de potenciais usuários é problemática e cada usuário é potencialmente capaz de subtrair aquilo que pertence também aos demais (Berkes et al., 1989; Feeny et al., 1990). Portanto, é natural que ao longo do processo dinâmico de utilização das áreas de pesca e seus recursos, como exemplificado acima, se estabeleçam interações e conflitos entre os diferentes tipos de pesca, com sobreposição de áreas de captura e de espécies-alvo (Bennet et al., 2001; Horta e Defeo, 2012; Abreu-Mota et al., 2018).

Não apenas os recursos, mas também o espaço marinho raramente é de uso exclusivo da atividade pesqueira. Assim, pescadores, através de seus padrões dinâmicos de operação, igualmente interagem com outros usuários do espaço marinho, tornando ainda mais complexa a atuação da atividade num contexto amplo de uso dos benefícios providos pelos oceanos. Particularmente relevante é a exploração de petróleo e gás no subsolo da margem continental, cujas atividades associadas podem afetar o ambiente marinho e potencialmente a atividade pesqueira em decorrência (a) do aumento do nível de ruído, principalmente o causado pelos levantamentos sísmicos na fase de prospecção; (b) derrames de óleo em diversas magnitudes; (c) vazamentos de gás e outros descartes de subprodutos do processo produtivo, e (d) ressuspensão e contaminação de sedimentos decorrentes de perfurações (Kark et al., 2015). Além disso, as próprias atividades realizadas por embarcações atuantes nesses diferentes estágios, de diferentes tamanhos e funções, competem com embarcações pesqueiras por espaços marinhos. Essas interações têm sido particularmente relevantes no Brasil, onde a convivência entre pescadores e petroleiros na disputa pelo uso de áreas marinhas na Baía de Campos se intensificou no final dos anos 1970 e início dos anos 1980

(Bronz, 2009) e resultou na delimitação de um polígono de exclusão à pesca (Jablonski, 2008), que muito afetou a atividade pesqueira na região. No ano 2000 esse polígono deixou de ter efeito proibitivo e foi substituído por áreas de exclusão de 500 metros de raio no entorno de plataformas e outras estruturas emersas (Marinha do Brasil, 2013). Na Bacia de Santos, onde desde 2007 tem se desenvolvido processo de exploração de petróleo na camada do pré-sal, o intenso tráfego de embarcações de suporte às plataformas e navios de produção sugerem um grande potencial de interação com frotas pesqueiras que operam em áreas oceânicas e costeiras.

As plataformas de petróleo estão entre as maiores estruturas artificiais no oceano e são colonizadas por diversas comunidades que tendem a aumentar a biodiversidade local e a produtividade pesqueira, em especial de espécies pelágicas de ampla distribuição biogeográfica (Stanley e Awilson, 2000; Friedlander et al., 2014). Por exemplo, as estruturas da indústria de petróleo e gás situadas ao largo da costa californiana concentram uma produção secundária de peixes por unidade de área maior do que qualquer outro hábitat marinho, pois funcionam como grandes recifes artificiais ao fornecer habitats para diversas espécies (Helvey, 2002; Claisse et al., 2014). Nas Bacias de Campos e do Espírito Santo é frequente a observação da pesca do dourado (*Coryphaena hippurus*) e atuns (família Scombridae) nas proximidades e dentro da área de segurança de plataformas (Jablonsky, 2008; Martins e Doxsey, 2006; Silva et al., 2015). Além das plataformas, os oleodutos também são procurados como áreas de pesca por embarcações de arrasto de fundo que potencialmente se beneficiam do efeito agregador destes (Rouse et al., 2018).

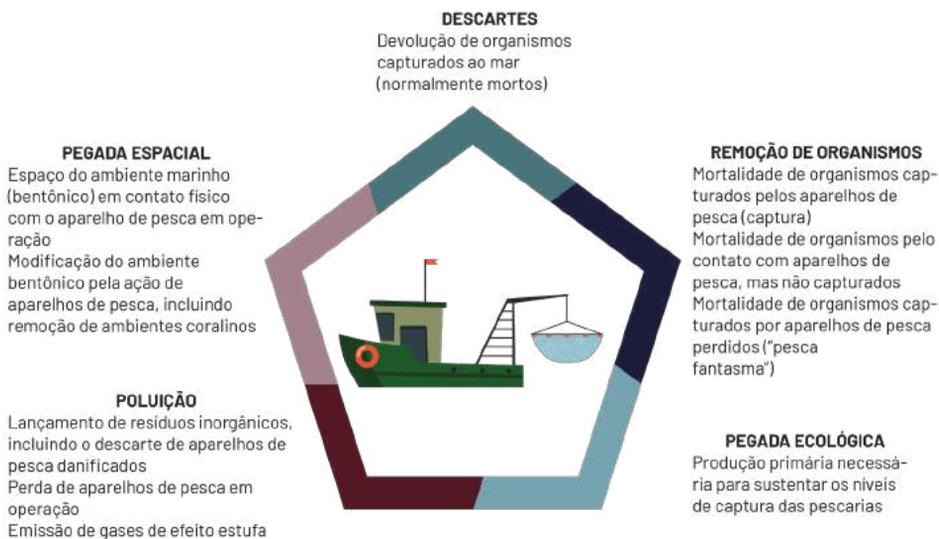
Outras atividades que se sobrepõem à pesca no uso do espaço marinho são a portuária e a de transporte de cargas. Apenas na atividade portuária, foram identificadas 21 diferentes modalidades, como tráfego marítimo e terrestre, armazenagem, dragagem, construção e reparos de navios, com diversos potenciais de impacto sobre o ambiente marinho e sobre a atividade pesqueira (Peris-Mora et al., 2005). Embora imprescindíveis aos portos, as dragagens de implantação e de aprofundamento, assim como o descarte do sedimento dragado, têm gerado conflitos com a atividade pesqueira em todo o mundo (Castro e Almeida, 2012). A pesca pode ser afetada diretamente em curto prazo pela mortalidade de peixes, moluscos e crustáceos no momento do descarte, e a longo prazo, em decorrência do efeito sobre a estrutura da população pela mortalidade de reprodutores e juvenis. Os sedimentos dragados, muitas vezes descartados sobre o fundo em áreas também utilizadas para a pesca, possuem quantidades consideráveis de arsênio, chumbo, zinco, mercúrio, entre outros (Torres et al., 2009), e tornam a área insalubre. A

macrofauna bentônica é fortemente afetada; peixes em estágios iniciais do ciclo de vida sofrem impactos letais, enquanto efeitos comportamentais são verificados em peixes adultos (Katsiaras et al., 2015; Barletta et al., 2016; Wenger et al., 2017). Outra preocupação trazida pelos portos é a introdução de espécies marinhas exóticas através da água de lastro dos navios. Com o aumento do tráfego marítimo, a bioinvasão se tornou uma das maiores questões ambientais no mundo (Xu et al., 2006). As espécies exóticas invasoras marinhas têm um impacto potencial considerável nas atividades econômicas costeiras e marinhas, principalmente através da perda de rendimento pesqueiro devido à predação e competição com espécies nativas (Groeneveld et al., 2018). No Brasil, apesar de regulada por norma específica (Marinha do Brasil, 2014), a água de lastro de navios pode ter sido responsável pela introdução do caranguejo portunideo *Charybdis hellerii* que, em alguns locais, como na Bahia, se tornou mais abundante que a espécie nativa alvo tradicional da pesca artesanal, *Callinectes larvatus*. Outros estressores associados à atividade portuária, como a delimitação de áreas de exclusão à pesca, ruído, poluição, alteração do padrão de correntes e da altura das ondas, e seus efeitos cumulativos, também têm apresentado reflexos sobre a qualidade de vida de comunidades pesqueiras e a economia familiar (Gasalla e Gandini, 2016; Oliveira et al., 2016; Turra et al., 2017).

### 3 A PESCA PRESSIONANDO O AMBIENTE MARINHO

A atividade pesqueira pode exercer diversas formas de pressão sobre o ambiente marinho (Figura 2). A primeira e mais evidente é a remoção da biomassa de inúmeras espécies que são capturadas de modo intencional ou não intencional durante as operações de pesca, ou que morrem pelo contato com o aparelho de pesca ainda que não capturadas. De fato, dependendo da maior ou menor seletividade do aparelho de pesca utilizado, dos objetivos da pescaria, do ecossistema e da região geográfica em que ela é realizada, as remoções (mortalidade) resultantes podem ser mais ou menos diversificadas e abranger diferentes grupos de espécies. A quantificação contínua dessa remoção pela pesca nos inúmeros ecossistemas marinhos do planeta é uma tarefa complexa. Isso porque os organismos mortos em sua totalidade pelas operações de pesca têm diferentes destinos, alguns deles de difícil percepção. Da captura “bruta” (*sensu* FAO, Kelleher, 2008), parte da biomassa é retida

para o desembarque comercial e se torna passível de registro por diferentes sistemas de monitoramento. Incluem-se nessa fração as “espécies-alvo” (i.e., aquelas cuja captura é o objetivo principal do pescador) e parte da chamada “captura incidental” (i.e., espécies não alvo, capturadas juntamente com estas últimas) contendo espécies que podem ser aproveitadas para consumo e/ou comercialização. Uma terceira categoria, o “descarte”, inclui indivíduos rejeitados e devolvidos ao mar (frequentemente mortos), por razões variadas como restrições legais à sua captura, condições inadequadas de conservação, ausência de mercado, não palatabilidade, e tamanho fora do padrão aceito pelo consumidor (Kelleher, 2008). Por acontecer logo após as operações de pesca, as possibilidades de registro dos volumes descartados são compreensivelmente mínimas, quando não completamente inexistentes, na maior parte das pescarias. Adicionalmente, pouco ou nada se pode registrar sobre organismos que morrem pelo contato com os aparelhos de pesca, mas que não são capturados (por ex., invertebrados esmagados por redes de fundo), ou sobre o número de organismos que morrem “capturados” por aparelhos de pesca perdidos no oceano, o que se conhece como “pesca fantasma”. Desse modo, as estatísticas disponíveis sobre a remoção de biomassa pela pesca, tanto no âmbito de cada nação como também em escala global, normalmente consideram apenas a captura desembarcada, enquanto os descartes tendem a ser estimados a partir de experimentos e/ou monitoramentos mais pontuais.



**FIGURA 2:** Pressões exercidas pela pesca sobre o ambiente marinho.

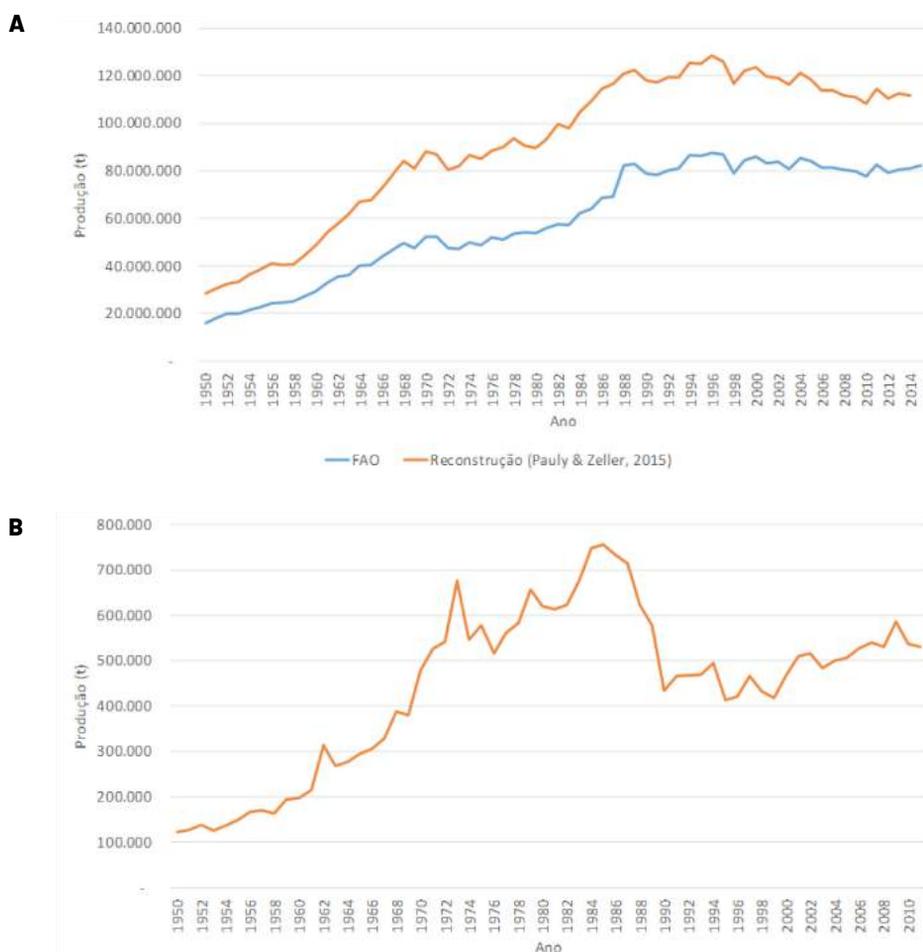
Desde 1945 a FAO (Food and Agriculture Organization, órgão das Nações Unidas) tem sido responsável por compilar, organizar e disseminar dados e informações sobre a produção pesqueira mundial, para isso utilizando dados estatísticos oficiais informados regularmente pelos países membros, além de outras fontes complementares (Ye et al., 2017). Os desembarques totais compilados pela FAO permitem evidenciar dois períodos marcadamente distintos na história da produção pesqueira marinha mundial. O primeiro caracterizou-se por um forte e contínuo incremento nos desembarques, que variaram de 16,1 milhões de toneladas em 1950 até 84,3 milhões de toneladas em 1989. Já entre 1990 e 2014 os desembarques tenderam a se estabilizar ao redor de 82,0 milhões de toneladas, com pequenas oscilações (Figura 3). Essa produção é altamente desigual entre os países e oceanos, sendo que, no último ano da série, os 25 maiores produtores mundiais de pescado marinho foram responsáveis por 82,1% dos desembarques – a China, sozinha, respondeu por 16,1 milhões de toneladas (FAO, 2016). A porção norte e central do Pacífico Oeste e o Nordeste do Atlântico sustentaram, conjuntamente, pouco mais da metade dos desembarques mundiais (53,3%). Inúmeros fatores de ordem social, econômica e ambiental contribuem para tais desigualdades, com destaque para as características oceanográficas dos mares territoriais e zonas econômicas exclusivas (ZEEs) dos diferentes países, as quais determinam grandes variações espaciais nos níveis de produtividade biológica nos oceanos (ver seção 4).

Outro fator de incerteza tem sido atribuído à representatividade e veracidade dos dados regionais oficialmente reportados pelos países à FAO, uma vez que estes tendem a ser afetados por sistemas de monitoramento pesqueiro descontínuos e ineficientes, pouco sensíveis à produção da pesca não comercial (e.g. pesca de subsistência), além de capturas ilegais, não reportadas e não reguladas (IUU – *illegal, unreported and unregulated*) (FAO, 2002). Nesse sentido, na última década, alguns cientistas pesqueiros, colaboradores do projeto *Sea Around US*, ressaltaram a importância de se “reconstruir” capturas passadas utilizando fontes alternativas de informação, normalmente desconsideradas pelas estatísticas oficiais, capazes de fornecer níveis de esforço total e taxas de captura que podem ser convertidos em volumes complementares de capturas de uma região (Pauly e Zeller, 2016). Essa prática levou à estimativa de capturas globais cerca de 50% maiores do que os valores totalizados pela FAO, além de tendências de declínio da produção global desde a década de 1990, contrariando o padrão de “estabilização das capturas globais” (Pauly e Zeller, 2017).

No Brasil as estatísticas de desembarque têm sofrido significativas

oscilações temporais em cobertura e qualidade. Os últimos dados disponíveis se referem ao ano de 2011 e revelam uma produção desembarcada de 553,7 mil toneladas (MPA, 2012). Assim como se observa na produção mundial de pescados, os desembarques registrados no país seguiram uma tendência crescente até a década de 1980, com máximo de 756.006 toneladas registradas em 1985 (Figura 3), um reflexo do auge da produção da pesca da sardinha-verdadeira (*Sardinella brasiliensis*), o principal recurso pesqueiro do país. Seguiu-se uma queda abrupta nos cinco anos seguintes, devido à sobrepesca da sardinha e outras espécies-alvo, mantendo-se entre 400.000 e 500.000 toneladas anuais durante a década de 1990 e aumentando para o patamar de 500.000 – 600.000 toneladas anuais nos anos 2000. Essas estatísticas também foram alvo de reconstrução, incluindo procedimentos específicos para a interpolação de dados faltantes, levantamento de capturas da pesca recreativa, de subsistência e descartes (Freire et al., 2015). As capturas reconstruídas foram 80% maiores do que as reportadas, com um pico de 1.181.000 toneladas em 1984, e valores anuais médios de 873.000 toneladas no final da década de 2000.

Estimativas globais produzidas em 1994 a partir de registros mundiais de desembarques compilados pela FAO e estimativas de descarte por espécie indicaram que cerca de 27 milhões de toneladas de pescado eram descartadas anualmente pela pesca marinha, cerca de um quarto dos desembarques totais (Alverson et al., 1994). Mais de uma década depois, em 2008, esses volumes foram reavaliados utilizando a mesma base de dados atualizada, porém as estimativas de descarte por “pescarias” foram definidas para um conjunto de embarcações que atuam em uma determinada área sobre um grupo de recursos (Kelleher, 2008). Os valores obtidos atingiram níveis mais baixos, totalizando 7,3 milhões de toneladas, cerca de 8% dos desembarques totais. Devido às diferentes metodologias, essas estimativas não foram consideradas comparáveis, porém Kelleher (2008) considerou provável a tendência de redução dos descartes globais no período. Essa conclusão foi corroborada pela reconstrução dos descartes globais realizada no âmbito do projeto *Sea Around US*, em que se estimou que os descartes aumentaram desde valores inferiores a 5 milhões de toneladas anuais na década de 1950 até um máximo de pouco menos de 19 milhões de toneladas em 1989, decaindo para os níveis atuais, inferiores a 10 milhões de toneladas anuais, ou seja, 10-20% das capturas totais reconstruídas (Zeller et al., 2018). Os estudos promovidos pela FAO também revelaram que mais da metade dos descartes globais é produzida pelas pescarias de arrasto, sobretudo aquelas direcionadas a camarões (Kelleher, 2008). Estudos do *Sea Around US*, por outro lado, também demons-



**FIGURA 3:** Variação anual dos desembarques da pesca marinha no mundo (A) e no Brasil (B). Na análise global (A) são comparados os volumes oficiais compilados pela FAO com os volumes “reconstruídos” (Pauly e Zeller, 2016). Na análise nacional, apenas os registros oficiais são apresentados. Fonte: FAO (<http://www.fao.org/fishery/statistics>).

traram que os descartes mundiais são predominantemente gerados pela pesca industrial e que se concentraram no Atlântico Norte até a década de 1980, passando a predominar na costa oeste da África desde então (Zeller et al., 2018). No Brasil, os descartes gerados pela pesca industrial foram estimados em 26.000 toneladas anuais na década de 1950, aumentando cerca de 10 vezes até os valores máximos de 250.000 toneladas anuais em meados da década de 1980 e decaindo para patamares de 130.000 toneladas anuais desde então (Freire et al., 2015). Em média, essas estimativas indicam um descarte

de cerca de 50% da captura bruta obtida anualmente pela pesca industrial entre 1950 e 1980, concentrado nas operações realizadas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, e sobretudo produzido pela pesca de arrasto de camarões.

Os descartes da pesca marinha são reflexos de “remoções indesejadas” e que impactam a estrutura de populações e comunidades naturais. Porém esses impactos também se dão após a devolução ao mar de organismos e resíduos (carcaças e vísceras) do processamento de espécies retidas a bordo. Isso porque o aporte de matéria orgânica serve de alimento para organismos necrófagos, principalmente de alimentação oportunista, cuja abundância relativa tende a aumentar nas regiões afetadas, incluindo aves marinhas, cetáceos, tubarões, anfípodes, isópodes, cefalópodes, ofiuroides, peixes, caranguejos-ermitões, estrelas-do-mar, moluscos gastrópodes e caranguejos (Fondo et al., 2015). Essa contribuição tem sido chamada mundialmente de “subsídios alimentares antropogênicos previsíveis” (PAFS – *predictable anthropogenic food subsidies*) (Oro et al., 2013) capaz de modificar ecossistemas pela alteração da relação consumidores – recursos, beneficiando diferentes níveis tróficos e modificando a estrutura trófica. O descarte da pesca é uma fonte significativa de PAFS para os ecossistemas marinhos, não apenas pelo volume (anualmente estimado em torno de sete milhões de toneladas), mas pela longa escala temporal, remontando a séculos em algumas regiões do planeta.

Aumentos dos níveis de mortalidade e “necrofagia” também podem ser consequências populacionais da “pesca fantasma” produzida por aparelhos de pesca, completos ou fragmentos, abandonados, perdidos ou descartados ao mar (ALDFG – *abandoned, lost, discarded fishing gear*), que podem continuar capturando uma abundante variedade de organismos (Gilman et al., 2016). Globalmente, estima-se que mais de 640.000 toneladas de aparelhos de pesca sejam perdidas no oceano a cada ano, o que representaria ao menos 10% do total de lixo marinho flutuando nos oceanos (Stelfox et al., 2016). As taxas de captura da pesca fantasma variam com a abundância da fauna, as condições ambientais, incluindo tempestades ou correntes, e os tipos de habitat. Particularmente relevantes são os efeitos sobre mamíferos marinhos, répteis e elasmobrânquios. Ao redor do planeta cerca de 40 espécies desses grupos foram registradas enredadas em redes “fantasma” (Stelfox et al., 2016). A pesca marinha também pode contribuir significativamente ao aporte de detritos inorgânicos nos ecossistemas marinhos, com ênfase nos plásticos e microplásticos. Estima-se que 48% da massa de plástico flutuante concentrada numa superfície de aproximadamente 1,6 milhões de km<sup>2</sup> no Oceano Pacífico, entre a Califórnia e o arquipélago do Havá, seja composta por restos

de redes de pesca (Lebreton et al., 2018).

As remoções de biomassa de organismos geradas pela pesca marinha e outras pressões ocorrem dentro de limites espaciais definidos pelas operações das frotas pesqueiras. Esse espaço que a pesca ocupa (e afeta) nos ecossistemas marinhos define a “pegada espacial” da pesca. Historicamente, estima-se que a pesca mundial ocupava entre 10 e 20% dos espaços marinhos entre as décadas de 1950 e 1980. No final dessa década observou-se um importante processo de expansão (pouco menos de 30%) principalmente em direção ao oceano aberto e ao hemisfério Sul (Swartz et al., 2010). Mais recentemente, utilizando registros de rastreamento satelital de mais de 70.000 embarcações de pesca entre 2012 e 2016, estimou-se que a pesca industrial ocorre em mais de 55% da área oceânica, quatro vezes mais que a agricultura no ambiente terrestre (Kroodsma et al., 2018). No Atlântico Nordeste estimou-se que a pegada espacial da pesca é de magnitude maior do que aquelas estimadas para outras atividades oceânicas, incluindo cabos submarinos, deposição de resíduos tóxicos e extração de óleo e gás (Benn et al., 2010). No Sudeste e Sul do Brasil, estima-se que 100% da área disponível na plataforma continental tenha sido utilizada historicamente pela frota de arrasto, sendo que mais de 60% dessa área foi “arrastada” entre uma e duas vezes entre 2003 e 2011 (Port et al., 2016a). Algumas regiões mais rasas, no interior dessa área *core*, sofreram arrastos de pesca em uma área equivalente a quatro a quatorze vezes a superfície disponível. Considerando essa frequência de uso como um indicador de perturbação do fundo por redes de arrasto (ver seção 5), é possível inferir que estes sejam os habitats bentônicos mais perturbados da margem continental do Brasil.

Dentro da “pegada espacial” é realizado o esforço de pesca responsável pelas remoções de biomassa, o que quase sempre demanda o consumo de combustíveis fósseis (i.e., óleo diesel) como fonte de energia e, conseqüentemente, a liberação na atmosfera de gases de efeito estufa, contribuindo para o aquecimento global do planeta. Uma análise global realizada para o ano 2000 estimou que a atividade pesqueira utilizou 1,2% de todo o óleo consumido no planeta, o equivalente a 50 bilhões de toneladas, liberando 130 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> para a atmosfera (Tyedmers et al., 2005). Um estudo similar estimou, em 2011, o consumo de 40 bilhões de litros de óleo e a emissão de 179 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, demonstrando um crescimento de 28% ao longo de 20 anos, o que marginalmente coincide com o aumento de produção de pescado no período (Parker et al., 2018). Esse consumo de energia e ação poluente varia entre métodos de pesca; os ditos métodos “passivos” (e.g. redes de emalhe, armadilhas, espinhéis) tendem a consumir menos energia e

poluir menos do que os “ativos”, principalmente a pesca de arrasto. Estimativas realizadas para a pesca de arrasto de fundo no Sudeste e Sul do Brasil entre 2003 e 2011 apontam para um consumo de 11.600–15.600 toneladas anuais de óleo, o que equivale a 5 a 22% do total consumido pela indústria produtora de alimentos no país (Port et al., 2016b). Esse consumo, calcula-se, gerou a emissão de 36,8–90,1 toneladas de CO<sub>2</sub> por ano, tendo como principal emissor os arrasteiros de camarões, um padrão semelhante ao observado mundialmente (Parker et al., 2018). Conjuntamente, o consumo de combustíveis fósseis e a liberação de gases de efeito estufa contribuem para a eficiência energética e o “custo ambiental” da atividade pesqueira. Esses custos têm sido considerados moderados quando comparados àqueles estimados para outras atividades produtoras de proteína animal para o consumo humano, como a pecuária (Hilborn et al., 2018).

Por fim, também dentro de sua pegada espacial, a remoção de biomassa pela pesca é sustentada pela produção primária da região e pelo processo de transferência de energia entre os níveis tróficos (ver seção 4). Assim, define-se como “pegada ecológica” da pesca a demanda de produção primária necessária para sustentação das capturas de organismos de diferentes níveis tróficos presentes na captura bruta, o que corresponde a uma importante pressão da atividade pesqueira sobre o funcionamento do ecossistema. A expansão mundial da pesca, já mencionada, demonstrou que em algumas regiões as capturas da pesca industrial demandam até 30% da produção primária. Considerando que menos da metade da produção primária é consumida por herbívoros e se propaga para outros níveis tróficos, nessas regiões a pesca pode demandar toda a produção primária “disponível” para os recursos pesqueiros (Swartz et al., 2010).

## 4 O ESTADO DO AMBIENTE MARINHO

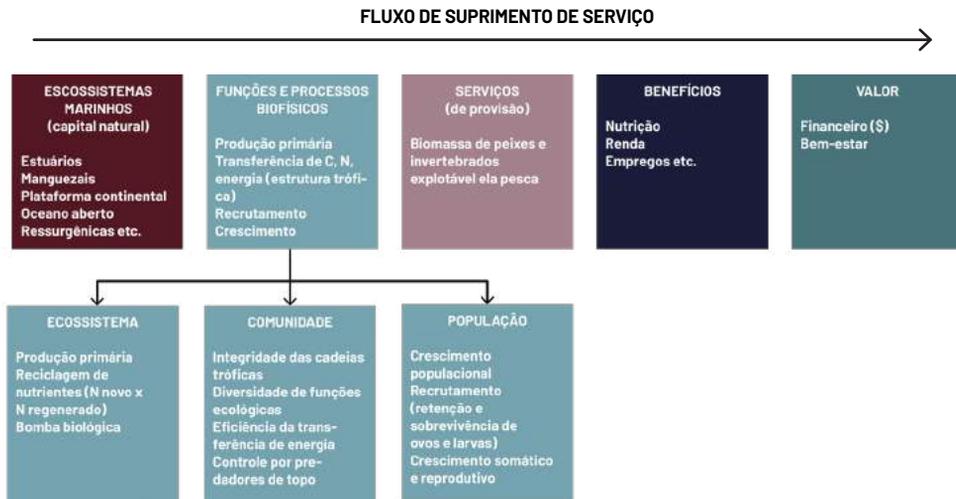
Abordagens recentes do processo de gestão ambiental têm proposto uma estrutura analítica em que os ecossistemas são definidos como o “capital natural”, do qual os humanos fazem parte, apropriando-se e beneficiando-se. Nessa estrutura, tais benefícios caracterizam os “serviços” ecossistêmicos proporcionados pelo capital natural (Van den Belt et al., 2016). A atividade pesqueira está fundamentada na extração de organismos cuja biomassa, produção e disponibilidade no tempo e espaço são resultados de processos biofísicos específicos dos ecossistemas marinhos. Nesse contexto, a pesca é

caracterizada como um “serviço” desses ecossistemas e, como tal, se compara e interconecta com outros serviços “de provisão”, necessários para a sobrevivência da humanidade (e.g. aquicultura e outros). A relação da dinâmica da produção pesqueira com o funcionamento dos ecossistemas marinhos pode ser analisada a partir de um “fluxo de suprimento do serviço”, que se estabelece através de uma sequência de cinco compartimentos básicos (Figura 4): *ecossistemas marinhos* (e.g. plataforma continental, manguezais etc.), suas *funções e processos biofísicos* (e.g. produção primária, fluxo de energia através das cadeias tróficas), os *serviços* resultantes (e.g. biomassa explotável de peixes e outros organismos de interesse humano), os *benefícios* adquiridos pelo homem (e.g. nutrição, renda, empregos) e o *valor*, percebido (monetário ou não monetário) ou não percebido pelo ser humano. Dessa forma, flutuações na integridade dos ecossistemas marinhos e de seus processos biofísicos, determinam uma reação em cadeia até a provisão do serviço, ou seja, a pesca e seus benefícios para o homem.

Pescarias marinhas ao redor do planeta são sustentadas por organismos de interesse (i.e., peixes e invertebrados que geram benefícios e têm valor para o homem) cuja produção, disponível para a pesca, está determinada pelo processo de produção primária (i.e., organismos autótrofos produzindo carbono orgânico, assimilável para organismos heterotróficos) e a conversão da matéria e energia através dos níveis tróficos.

A produção de peixes e invertebrados dependerá, além da produção primária (PP), do número de níveis tróficos abaixo da(s) espécie(s)-alvo, da eficiência da transferência de energia de um nível trófico para outro e dos níveis metabólicos dependentes da temperatura e tamanho (Pauly e Christensen, 1995). Em escala global, estima-se que a produção primária, para pelo menos 90% da área oceânica, seja de  $4,1 \times 10^{11} \text{t ano}^{-1}$  ( $\sim 1.204 \text{g m}^{-2} \text{ano}^{-1}$ ). Essa biomassa deve sustentar  $2,62 \times 10^9 \text{t}$  de organismos maiores que  $10^{-5} \text{g}$ , sendo que a biomassa aproximada de peixes maiores que 10g, mais suscetíveis à captura pela pesca, seria  $5,29 \times 10^8 \text{t}$  ( $1,65 \text{g m}^{-2}$ ) com produção de  $1,14 \times 10^8 \text{t ano}^{-1}$  ( $0,35 \text{g m}^{-2}$ ) (Jennings et al., 2008). Essa biomassa disponível para a pesca varia em função de:

- **Latitude**, com aumentos potenciais da produção pesqueira nas latitudes maiores (mais de 30%) e decréscimo nas latitudes menores (até 40%);
- **Tipos de ecossistemas marinhos**, sendo os mais produtivos as áreas de ressurgência e de plataforma continental em latitudes médias (temperadas);
- **Níveis tróficos direcionados pela pesca**, onde espécies em níveis tróficos



**FIGURA 4:** Fluxo de suprimento da produção pesqueira, como um serviço ecossistêmico. Diversos processos biofísicos e funções são necessários para o referido suprimento em níveis de ecossistema, comunidade e população, todos sensíveis às flutuações naturais do ecossistema, bem como impactos antrópicos, inclusive a pesca. Modificado de Van den Belt et al., (2016).

mais baixos disponibilizam ordens de magnitude mais energia/biomassa do que predadores de topo;

- **Flutuações temporais das condições oceanográficas**, sejam periódicas (e.g. sazonais e decadais) ou não (e.g. fenômeno do *El Niño*, ou oriundas do aquecimento global).

Assim, os processos biofísicos responsáveis pela produção primária (PP) nos ecossistemas marinhos podem “limitar” a produção pesqueira (PPE) “de baixo para cima” (*bottom-up*) (Figura 5), fato este demonstrado nos 54 “Grandes Ecossistemas Marinhos” (LMEs) do planeta (Chassot et al., 2010). Ao longo de cinco décadas, os LMEs mais produtivos foram também os que mais sustentaram a produção pesqueira global (Tabela 1), com destaque para a área de ressurgência da Corrente de Humboldt (PP = 822t C km<sup>-2</sup> ano<sup>-1</sup>; PPE = 4,0t km<sup>-2</sup> ano<sup>-1</sup>) (Chassot et al., 2010). Por outro lado, regiões marinhas tropicais, com escassez de nutrientes e pouco produtivas, sustentam capturas muito menores. Esse é o caso da costa brasileira, onde mesmo as áreas de plataforma mais produtivas nas regiões Sudeste e Sul historicamente têm sustentado capturas muito reduzidas em comparação com outras áreas do planeta (Tabela 1) (Vasconcelos e Gasalla, 2001).

O controle *bottom-up* em escalas regionais e de acordo com o tipo de

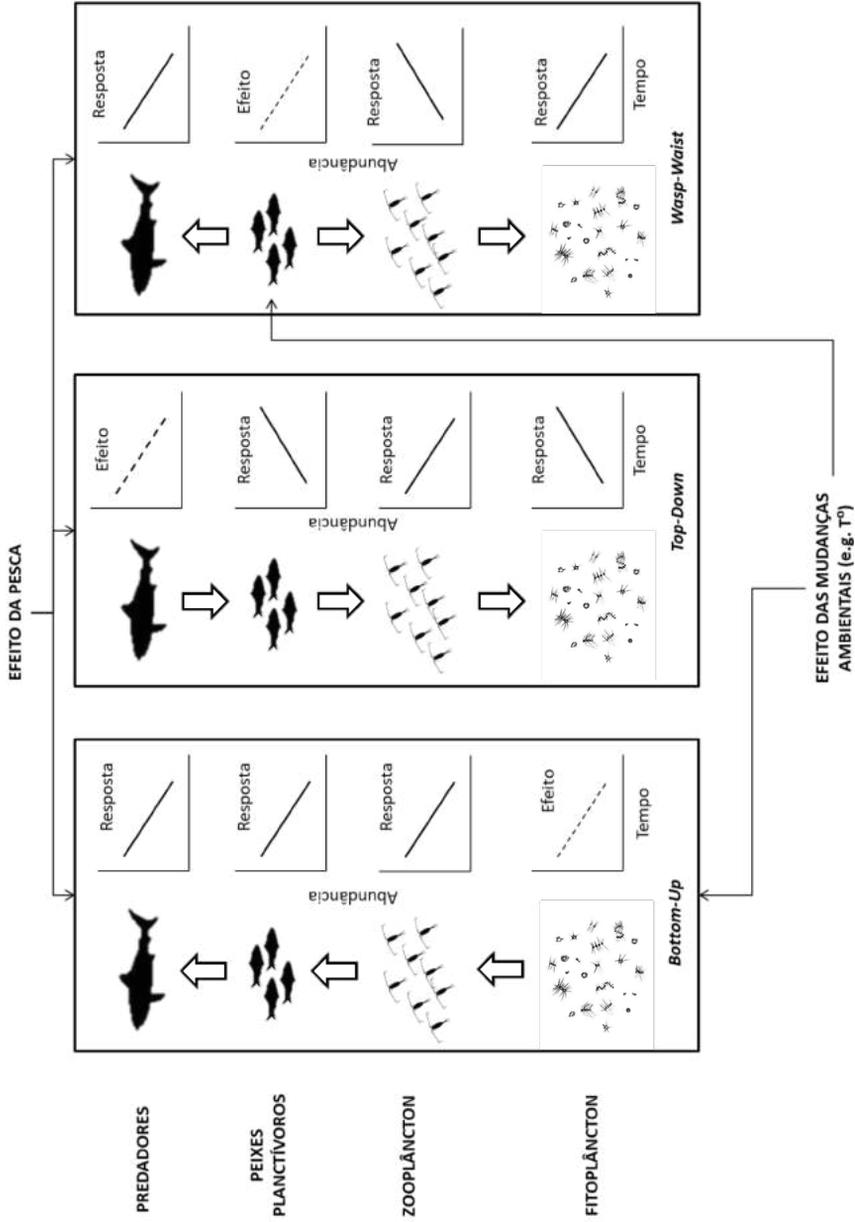
ecossistema marinho presume uma relação positiva entre a PP e a PPe, o que tem motivado cálculos reversos para estimar a “capacidade de suporte” do sistema e a “pegada ecológica” da pesca (ver seção 3), ou seja, qual a PP necessária para sustentar níveis atuais e projetados de PPe, bem como mediante cenários de alterações ambientais (Pauly e Christensen, 1995; Jennings et al., 2008; Chassot et al., 2010, e outros). Apesar de demonstrada em diversos ecossistemas marinhos, essa relação, no entanto, pode ser bastante complexa e intermediada pelas variações no processo de transferência de energia entre os níveis tróficos (Friedland et al., 2012).

Nos ecossistemas marinhos, estima-se que pequenas variações entre a relação da biomassa entre os níveis tróficos e a eficiência de transferência de um nível trófico para outro podem levar a grandes variações na biomassa estimada de organismos (Friedland et al., 2012). Essas pequenas variações podem ser motivadas pela flutuação da disponibilidade de nutrientes no sistema e da temperatura. Em ecossistemas pelágicos, a alta temperatura normalmente se associa à baixa concentração de nutrientes e a pequenas biomassas de produtores e consumidores. Isso ocorre quando existe uma acentuada estratificação da coluna d’água, que separa os produtores na zona fótica (camada iluminada, onde a fotossíntese é possível) das concentrações de nutrientes em camadas profundas.

**TABELA 1:** Intervalos da produção primária (PP) líquida anual registrada em diferentes províncias marinhas e suas correspondentes estimativas dos níveis gerais de produção pesqueira (PPE) (modificado de Pauly e Christensen, 1995; Malone et al., 2016). Também são adicionadas as plataformas das regiões SE e S do Brasil de acordo com as estimativas apresentadas em Vasconcelos e Gasalla (2001).

PROVÍNCIAS MARINHAS	PRODUÇÃO PRIMÁRIA (PP) g C m <sup>-2</sup> ano <sup>-1</sup>	PRODUÇÃO PESQUEIRA (PPE) g m <sup>-2</sup> ano <sup>-1</sup>
Giros oceânicos subtropicais centrais	150 - 170	0,01
Borda oeste dos oceanos (plataformas continentais tropicais e temperadas)	200 - 470	1,6 - 2,2
Borda leste dos oceanos (incluindo as zonas de ressurgência)	460 - 1,250	22,2
Estuários e zonas costeiras	70 - 1.890	8,0
Plataforma SE do Brasil	33 - 158	0,8 - 1,5
Plataforma S do Brasil	72 - 382	0,4

**FIGURA 5:** Representação esquemática do fluxo de energia nas cadeias tróficas pelágicas marinhas controladas pela produção primária (*bottom-up*), pelos predadores de topo (*top-down*) ou organismos dominantes (*wasp-waist*). Modificado de Cury et al. (2001).



Nesses ecossistemas, o aumento da temperatura, observado ou previsto, deve provocar poucas alterações adicionais na PP, já limitada pela escassez de nutrientes. Por outro lado, em regiões mais frias, com intenso processo de mistura da coluna d'água ou de ressurgência, o aumento de temperatura pode levar à tendência de estratificação da coluna d'água (uma "tropicalização"), além do aumento da taxa metabólica de consumidores, aumento da biomassa destes em relação à biomassa dos produtores, e redução da biomassa da cadeia trófica como um todo (O'Connor et al., 2009). Assim, a predação pode ser tão importante para o controle do fluxo de energia em uma área marinha quanto a limitação de nutrientes, fazendo com que cadeias tróficas de ecossistemas marinhos possam ser controladas de cima-para-baixo (*top-down*) ou de baixo para cima (Figura 5).

Existem evidências que demonstram que o controle *top-down* das cadeias tróficas marinhas pode ser exercido por organismos de elevado nível trófico (cetáceos, elasmobrânquios, grandes peixes teleósteos) em diversas regiões do planeta e tipos de ecossistemas oceânicos (Baum e Worm, 2009). Porém, essas evidências se limitam a relações entre dois níveis tróficos adjacentes e parecem ausentes em ecossistemas pelágicos sustentados por ressurgências. Nesses ecossistemas, por outro lado, têm sido demonstrado o controle exercido por peixes forrageiros (planctívoros) como sardinhas e manjubas, cuja queda de abundância causa, ao mesmo tempo, quedas na abundância dos níveis tróficos acima (predadores piscívoros), bem como alterações nos níveis tróficos abaixo – aumentos da abundância do zooplâncton (presas) e diminuição da biomassa do fitoplâncton. Peixes forrageiros são, nesses casos, considerados "espécies-chave" desses ecossistemas, e seu controle é chamado de *wasp-waist* (cintura de vespa) (Figura 5) (Cury et al., 2001). Os tipos de controle das cadeias tróficas marinhas não são facilmente caracterizados, devido à impossibilidade de experimentação nesses grandes ecossistemas. Por outro lado, entende-se que não são mutuamente exclusivos, podendo atuar simultânea ou alternadamente nos ecossistemas em função de interferências naturais ou antrópicas na integridade e funcionamento dos processos biofísicos. A pesca tem a capacidade de alterar a estrutura trófica, evidenciando efeitos do controle *top-down* ou *wasp-waist* (ver seção 5). As mudanças ambientais associadas ao efeito estufa, particularmente o aumento da temperatura dos oceanos, podem resultar em restrições no suprimento de nutrientes (pela alteração da estrutura da coluna d'água), evidenciando os efeitos do controle *bottom-up*, mas também na atuação (metabolismo) dos predadores (*top-down*).

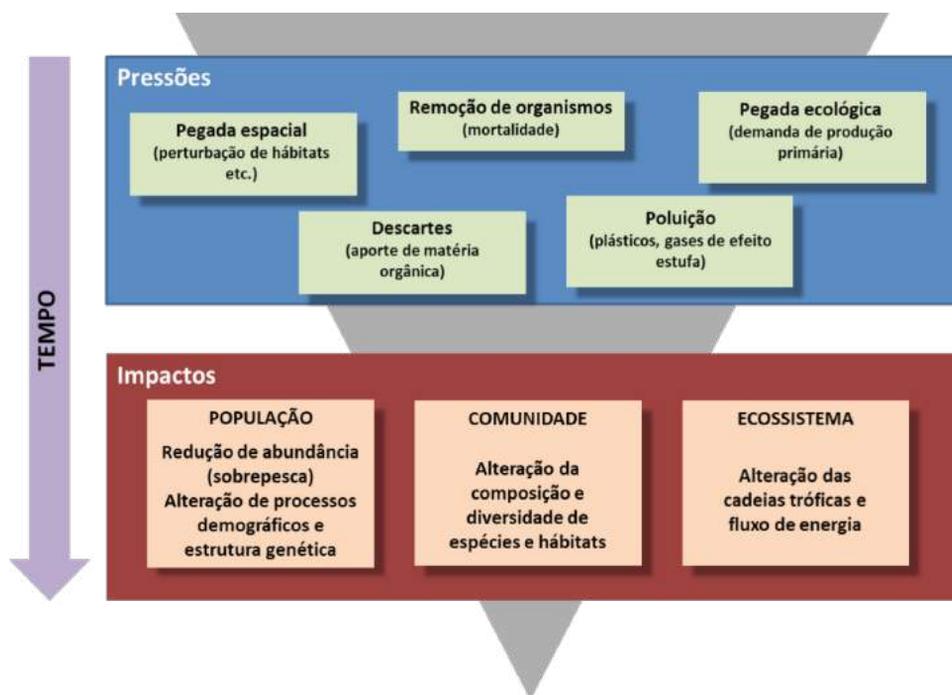
Processos biofísicos como os destacados acima, determinantes para

o bom funcionamento dos ecossistemas marinhos, são mediados por espécies biológicas que exercem funções específicas na produção e transferência de energia entre os níveis tróficos. Assim, a provisão de serviços, como a pesca, é determinada pela estabilidade da “biodiversidade” dos referidos sistemas, a qual pode ser perturbada pela própria atividade pesqueira (ver seção 5) e pelo aumento da temperatura, entre outras consequências das transformações ambientais do planeta (Rice e Garcia, 2011). As previsões globais e regionais de aquecimento dos ecossistemas marinhos têm fundamentado estudos focados na estimativa das alterações na produção das cadeias tróficas marinhas e na produção dos serviços de provisão como a pesca (Sumaila et al., 2011). Numa análise voltada às plataformas continentais do planeta, foram estimados declínios de 30-60% na produção pesqueira potencial em áreas tropicais (e.g. Indo-Pacífico oriental) e áreas de ressurgência (e.g. norte da Corrente de Humboldt e norte da Corrente das Canárias) (Blanchard et al., 2012).

Entretanto, as mudanças climáticas também afetam a história de vida e a distribuição das espécies-alvo das pescarias (Perry et al., 2005). Espécies de peixes e invertebrados normalmente respondem ao aquecimento dos ecossistemas marinhos alterando sua distribuição para latitudes e/ou profundidades maiores e, conseqüentemente, a composição de espécies nas capturas regionais. Assim, nas últimas quatro décadas tem-se verificado um aumento da proporção de espécies de águas cálidas nas capturas globais em 52 LMEs (Cheung et al., 2013). Em regiões temperadas, essa mudança se deve ao aumento da presença de espécies de águas cálidas, enquanto em regiões tropicais deve-se à diminuição da presença e abundância de espécies subtropicais nas capturas.

## 5 O IMPACTO DA PESCA SOBRE O AMBIENTE MARINHO

As pressões exercidas pela atividade pesqueira, persistentes ao longo do tempo em áreas definidas, contribuem conjuntamente para o surgimento de impactos que repercutem sobre o funcionamento das populações (exploradas ou não), comunidades e ecossistemas (Figura 6). Enquanto essas pressões podem ser diretamente observadas/dimensionadas a partir das operações de pesca, os impactos apenas podem ser dimensionados a partir de observações de longo prazo e da aplicação de análises ecológicas complexas.



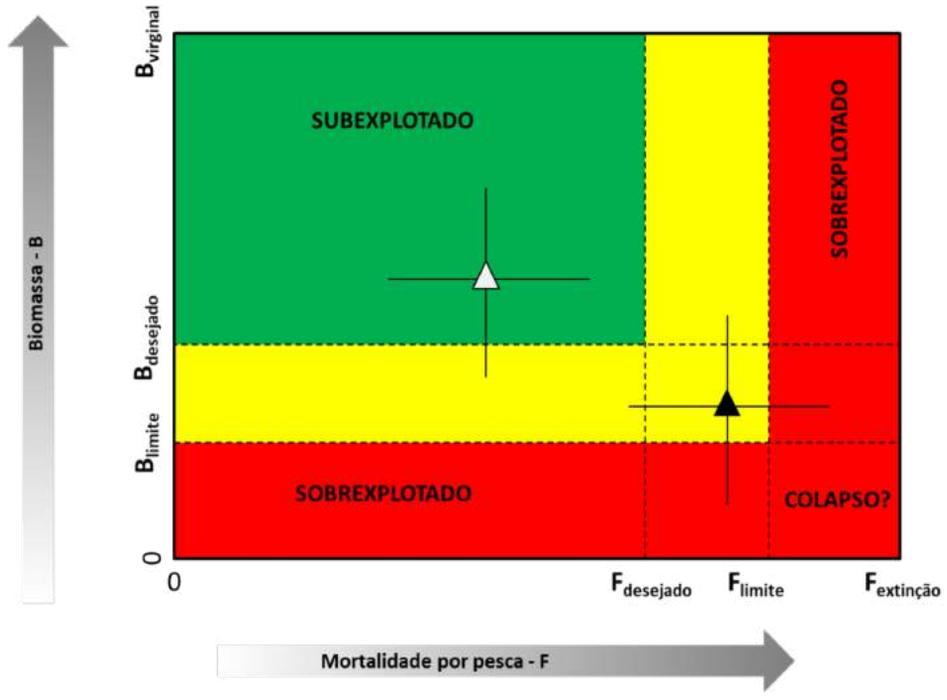
**FIGURA 6:** Impactos resultantes das pressões exercidas pela pesca sobre ambientes marinhos, em nível de população, comunidade e ecossistema.

Estoques marinhos de peixes, crustáceos, moluscos e outros grupos de organismos repõem suas perdas populacionais através do “recrutamento”, i.e., processo de incorporação de novos indivíduos à população a partir da atividade reprodutiva. A atividade pesqueira aumenta a mortalidade incidente sobre os estoques, promovendo potenciais prejuízos ao recrutamento, na medida em que podem: (a) alterar a estrutura etária, genética, de tamanhos e estados reprodutivos dos estoques, e (b) interferir em eventos da história de vida desencadeados no tempo e no espaço (e.g. acasalamento, desova, recrutamento, migrações). Em seu conjunto, quanto menor a efetividade do processo natural de reposição de perdas associadas às capturas, maior o impacto populacional da pesca.

O dimensionamento do impacto populacional tem sido uma prioridade das análises científicas e dos processos de manejo pesqueiro, tradicionalmente focados na produtividade das espécies-alvo e das pescarias. Para isso, desde meados do século XX, cientistas pesqueiros têm se concentrado no desenvolvimento e aplicação de modelos matemáticos que representam processos demográficos e que são capazes de estimar elementos quantitativos

relevantes para o manejo, incluindo a abundância do estoque explorado (e.g. biomassa total), sua variação temporal e o efeito da mortalidade causada pela pesca ( $F$ ) nessa variação (Cadrin e Dickey-Collas, 2015). Esses elementos são utilizados para o aferimento de “pontos de referência” sustentáveis, que são estados desejados (objetivos) ou não-desejados (limites) para os estoques e pescarias, previamente definidos no âmbito do manejo pesqueiro (Figura 7). Nesse sentido, a aplicação dos modelos de “avaliação de estoques” permite a construção de diagnósticos das pescarias que, por sua vez, balizam a tomada de decisão sobre medidas de manejo e conservação. Uma compilação recente das práticas de avaliação em 4.713 estoques explorados ao redor do planeta demonstrou que cerca de 50% encontram-se em estado de “sobrepesca” (i.e., pescados acima do nível da sustentabilidade biológica), enquanto 32% são explorados de forma biologicamente sustentável (Costello et al., 2016). Esses resultados expressam os níveis globais do impacto das pescarias em nível populacional, os quais podem variar amplamente de região para região. Na costa brasileira, por exemplo, 54% de um total de 92 estoques explorados, entre 1996 e 2004, foram diagnosticados como sobrexplotados, sendo o restante explorados plenamente (38%) ou subexplorados (8%) (Haimovici et al., 2006). Muito importante, no entanto, é considerar que 43 estoques explorados no Brasil até esse momento não tinham sido avaliados por nenhum dos métodos acima, ressaltando uma realidade comparável à de outras regiões do planeta, onde a avaliação de estoques não é rotineira e o manejo é realizado com menos informação biológica relevante. Essa constatação deve-se, em parte, a um conjunto de limitações identificadas na utilização de métodos de avaliação de estoques, que remetem a uma reformulação de práticas e novas abordagens (NRC, 1998; Cadrin e Dickey-Collas, 2015).

Um elemento decisivo dessa reformulação diz respeito aos elevados níveis de incerteza que cercam as estimativas obtidas pela aplicação dos modelos os quais se “propagam” sequencialmente com efeito multiplicativo, até a realização de diagnósticos sobre o estado real dos estoques explorados e o processo de tomada de decisão (Figura 7). Os modelos de avaliação de estoques normalmente quantificam os processos demográficos a partir de parâmetros populacionais ajustáveis a dados (observações empíricas) das pescarias e estoques de interesse. Adicionalmente são utilizados modelos “observacionais” que relacionam as variáveis observadas diretamente das pescarias com os atributos populacionais. As incertezas derivam de erros nas estimativas, que podem resultar da falha dos parâmetros estimados em descrever adequadamente processos populacionais (“erro no processo”) ou da coleta deficiente de dados sobre a população ou pescaria (“erro observa-



**FIGURA 7:** Pontos de referência e estado da sustentabilidade de estoques definidos a partir da mortalidade aplicada pela pesca ( $F$ ) e a biomassa do estoque ( $B$ ).  $F_{desejada}$ , mortalidade por pesca desejada;  $F_{limite}$ , máxima mortalidade por pesca tolerada;  $F_{extinção}$ , mortalidade capaz de depletar o estoque;  $B_{limite}$ , mínima biomassa tolerada;  $B_{desejada}$ , biomassa desejada;  $B_{virginal}$ , biomassa do estoque não explorado. “Subexplorado” e “Sobrexplotado”, estados de exploração onde as capturas estão abaixo e acima da capacidade de reposição, respectivamente. “Colapso” é o estado que pode derivar de uma sobrexplotação continuada. Triângulos são exemplos hipotéticos de estimativas realizadas por modelos de avaliação de estoques com os respectivos intervalos de confiança (linhas) e indicando estimativas de baixo (branco) e alto (negro) risco. Modificado de Beddington et al. (2007).

cional”). Esses erros podem ser minimizados através do aperfeiçoamento de procedimentos de coleta de amostras e/ou análise de dados, porém, ainda assim, os erros residuais tendem a ser suficientes para provocar diagnósticos e previsões equivocadas sobre o estado dos estoques e aumentar os riscos de decisões contraproduzidas de manejo. Nesse sentido, busca-se cada vez mais o uso de modelos estatísticos que incluam pressupostos sobre os tipos de erro e suas probabilidades de ocorrência, e tendem a informar com clareza os níveis de incerteza das estimativas obtidas, os quais devem ser incorporados ao processo decisório de manejo. Nessa direção tem sido crescente a utilização de “modelos bayesianos” que associam as incertezas das estimativas a opções predefinidas de medidas de manejo (NRC, 1998).

Outro ponto crítico diz respeito ao nível de complexidade estrutural dos modelos de avaliação de estoques (em termos de parâmetros a serem conhecidos ou estimados e as variáveis a serem observadas) necessário para permitir a produção de estimativas robustas a um custo operacional viável em regiões com diferentes realidades econômicas e sociais. Os modelos mais simples assumem funções univariadas, por exemplo, explicando produção de biomassa a partir de informação agregada (e.g. capturas anuais, biomassa total, esforço total). Os mais complexos (chamados “analíticos”) utilizam dados da estrutura populacional (e.g. captura por classe de idade/tamanho) para quantificar processos populacionais (e.g. mortalidade, recrutamento, crescimento) e os efeitos da atividade pesqueira (e.g. seletividade, mortalidade por pesca) (Hilborn e Walters, 1992). Ambos os tipos podem produzir estimativas comparáveis, mas os modelos analíticos permitem uma diversidade maior de ações de manejo, ainda que a um custo maior de obtenção de dados de longo prazo e esforço analítico. Esses modelos, no entanto, podem também carregar altos níveis de incerteza, já que os parâmetros e os processos populacionais necessários podem ser pouco conhecidos, mesmo em estoques muito estudados (Maunder e Piner, 2015). Soma-se a essa deficiência a constatação de que mesmo modelos analíticos podem ser demasiadamente simplificados, não incluindo, por exemplo, o efeito das relações tróficas ou flutuações do ambiente marinho.

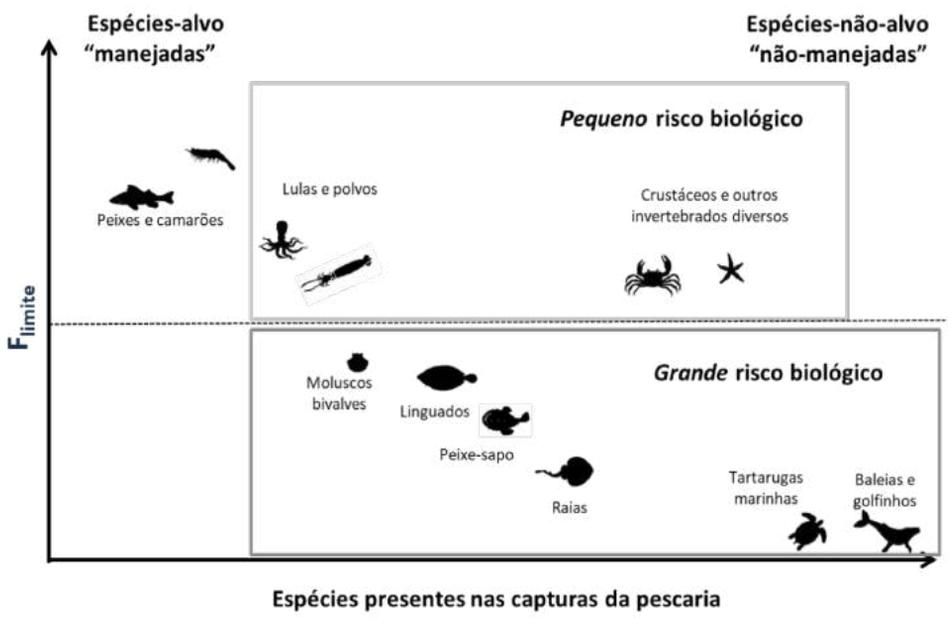
Nesse contexto, dois caminhos têm sido sugeridos para o aprimoramento da avaliação dos impactos populacionais da pesca: por um lado, o continuado esforço científico em desenvolver modelos mais abrangentes, sem comprometer em demasia sua complexidade e, portanto, sua aplicabilidade; por outro, o desenvolvimento de soluções analíticas para pescarias com limitações de informação (*data-moderate* e *data-poor*) que beneficiem o aconselhamento científico em curto prazo e em diversos cenários de desenvolvimento econômico. Esses métodos permitem o cálculo de pontos de referência previamente estabelecidos pelo processo de manejo a partir de dados históricos de captura, estimativas pontuais de abundância populacional, índices de abundância e parâmetros da história de vida das espécies exploradas (e.g. crescimento, mortalidade natural, seletividade e outros), que são elementos mais comumente disponíveis para uma ampla gama de pescarias (NRDC, 2014; Carruthers et al., 2014; Free et al., 2017).

Esses tipos de modelos também são úteis para estimar o impacto relativo de pescarias multiespecíficas e/ou geradoras de considerável captura não intencional de um conjunto de espécies além da(s) espécie(s)-alvo. Pescarias manejadas tomando como referência a(s) espécie(s)-alvo, em princípio,

teriam limites de mortalidade por pesca estabelecidos de acordo com a produtividade dessas espécies. Qualquer espécie capturada adicionalmente por essa pescaria com produtividade igual ou maior que a(s) espécie(s)-alvo estaria também protegida pelo regime de manejo, enquanto as de menor produtividade estariam em risco de sobrepesca (Figura 8). Um exemplo desses modelos é a análise de produtividade e suscetibilidade (PSA), em que são aplicados critérios qualitativos ou semiquantitativos biológicos (tamanho máximo, fecundidade, idade de primeira maturação, taxa de crescimento e outros) e pesqueiros (disponibilidade ao aparelho de pesca, hábitat, distribuição batimétrica e outros) ao conjunto de espécies capturadas por uma pescaria, permitindo a estimativa da “vulnerabilidade” dessas espécies em relação às espécies-alvo e, conseqüentemente, o “impacto” adicional gerado pela pescaria em componentes da comunidade marinha (Hobday et al., 2011). A análise, ainda que não quantitativa, auxilia à tomada de decisão sobre níveis de mortalidade de pesca mais “inclusivos” e/ou medidas espaciais de manejo que colaborem na proteção de espécies mais sensíveis que as espécies-alvo da pescaria, por exemplo.

Através da remoção da biomassa de populações, pescarias também impactam a estrutura das comunidades marinhas e suas cadeias tróficas. A atividade pesqueira remove indivíduos muitas vezes de forma seletiva no que diz respeito aos níveis tróficos (e.g., predadores de topo como atuns e afins, peixes planctívoros como sardinhas), podendo desencadear mudanças nas proporções de presas e predadores, cujo efeito se propaga em “cascatas tróficas” (Scheffer et al., 2005). Pauly et al. (1998) postularam que uma tendência da remoção preferencial de predadores de topo levaria a um redirecionamento progressivo das pescarias a espécies de níveis tróficos mais baixos, “simplificando” os ecossistemas marinhos (tendência chamada de *fishing down the food web*). Também propuseram que uma forma de caracterizar esse fenômeno em diversas regiões do planeta seria o estudo da variação temporal dos níveis tróficos médios do conjunto de espécies capturadas. Estudos posteriores mostraram, no entanto, que a redução do nível trófico médio das capturas mais frequentemente ocorre devido à adição sequencial de pescarias voltadas a espécies de baixo nível trófico, com capturas de predadores de topo mantidas constantes ou mesmo aumentando em diversas regiões; essa tendência foi chamada alternativamente de *fishing through the food web* (Es-sington et al., 2006). Outros estudos também demonstraram que em várias regiões pesqueiras as pescarias se desenvolvem inicialmente sobre espécies mais acessíveis e, à medida que diminui a abundância destas, evoluem para espécies menos acessíveis, sendo o nível trófico das espécies capturadas de

menor importância (Sethi et al., 2010).



**FIGURA 8:** Representação esquemática da captura multispecífica de uma pescaria manejada a partir de duas espécies-alvo, cuja produtividade define o nível máximo de mortalidade por pesca ( $F_{limite}$ ). Espécies com vulnerabilidade semelhante às espécies-alvo estariam relativamente protegidas pela estratégia de manejo, enquanto espécies mais sensíveis, i.e., que suportam níveis de mortalidade muito inferiores ao das espécies-alvo, estariam em risco de sobrepesca.

Assim, a variação do nível trófico médio das capturas pode não ser uma abordagem decisiva para diagnosticar impactos da pesca sobre as comunidades/cadeias tróficas, por: (a) estar sujeita a diferentes interpretações ecológicas; (b) não necessariamente refletir os padrões naturais de diversidade local (Branch et al., 2010), e (c) refletir de fato uma busca "deliberada" de pescadores por maiores capturas de espécies de menor nível trófico, independentemente da abundância de espécies de maior nível trófico (Pauly et al., 2000). Nesse último caso, uma indicação mais realista de impacto ecossistêmico da pescaria poderia ser evidenciada caso o aumento das capturas registradas num período em que o nível trófico médio diminuiu fosse menor que o esperado (considerando que a abundância aumenta 10x a cada nível trófico inferior). Nesse sentido, foi proposto o uso de um "índice da pesca em equilíbrio" (*Fishing-in-balance*) (Pauly et al., 2000), assim como modelos completos de "balanço de massa", com destaque para ECOPATH - ECOSIM (EwE,

<https://ecopath.org/>). Nesses modelos, a biomassa de grupos funcionais em um ecossistema é balanceada de acordo com informações sobre as relações tróficas, taxas de consumo, razão produção/ biomassa e capturas, o que permite simulações que informam sobre o impacto da pesca de alguns componentes do ecossistema sobre outros. Vasconcellos e Gasalla (2001) apresentam uma aplicação completa de um modelo de balanço de massa para o sul do Brasil, demonstrando que um potencial direcionamento da pesca para pequenos peixes pelágicos, como resultado da sobrepesca da sardinha-verdadeira, tem potencial para agravar a crise de sustentabilidade de espécies comerciais em níveis tróficos maiores. Além dos modelos de balanço de massa, outras abordagens matemáticas têm considerado o impacto das pescarias sobre cadeias tróficas, seja quantificando apenas um elo presa x predador ou estruturas mais complexas (ver revisão em Plagányi, 2007).

Os impactos sobre populações ou comunidades/ecossistemas acima destacados também recebem contribuições de pressões geradoras de mortalidade de organismos ainda que não diretamente pelas capturas de espécies-alvo ou incidentais. É o caso da mortalidade gerada pelo encontro com o aparelho de pesca (sem captura) – a “pesca fantasma” – e o descarte de material inorgânico, por um lado, e o favorecimento da sobrevivência de componentes necrófagos das comunidades pelo descarte de matéria orgânica, por outro (ver seção 3). A importância relativa dessas contribuições é pouco conhecida, mas pode ser maior do que a esperada. Por exemplo, uma análise recente na costa de Queensland, na Austrália, onde ocorre uma tradicional pesca de arrasto de camarões, revelou que PAFS tendem a reduzir o nível trófico de aves, tubarões e cetáceos, aumentando o número de cadeias tróficas que terminam nesses organismos (Fondo et al., 2015). Mediante potenciais banimentos do descarte nessa pescaria, estima-se uma redução na abundância desses grupos e da própria estabilidade do sistema, o que demonstra que os descartes podem fazer parte dos mecanismos de funcionamento de ecossistemas marinhos há muito explorados pela pesca. Por outro lado, a ingestão de macro e microplásticos, e demais compostos tóxicos associados, por aves marinhas, tartarugas, crustáceos e peixes (a) bloqueia o trato intestinal; (b) inibe a secreção de enzimas gástricas; (c) reduz o estímulo à alimentação, e (d) diminui os níveis de hormônios esteroides (Li et al., 2016). Combinados, esses efeitos não apenas contribuem para a mortalidade, a médio prazo, mas antes disso reduzem a ação predatória, sobretudo de predadores de topo, com consequências tróficas, e produzem atrasos na ovulação ou mesmo falhas na reprodução, com consequências demográficas relevantes.

Operações da pesca demersal envolvem o uso de aparelhos que perturbam o fundo marinho e têm potencial para (a) alterar modificar a complexidade dos habitats bentônicos, e (b) remover, matar ou danificar organismos, reduzindo a produção e modificando a estrutura das comunidades bentônicas. Esse tipo de impacto tem sido avaliado através de experimentos *in situ* do tipo “tratamento – controle”, em que a variação da abundância e riqueza do bentos em áreas arrastadas é comparada aos valores observados em áreas não-arrastadas (controle) e em função dos tipos de aparelho de pesca, tipos de substrato, profundidade e outros tratamentos. Alternativamente, experimentos “antes-depois” comparam as variáveis acima antes e depois de operações controladas de pesca. A compilação de 101 experimentos publicados, envolvendo três tipos de aparelhos de pesca de arrasto de fundo, revelou que os impactos desses aparelhos dependem do tipo de substrato. Impactos mais severos são produzidos por dragas sobre fundos biogênicos, os quais sofrem mais alterações biológicas e tardam mais em se recompor do que fundos de cascalho, areia e lama (Kaiser et al., 2006). O impacto de aparelhos de pesca de fundo é considerado crítico em habitats bentônicos formados por organismos estruturantes, com destaque para os recifes e “jardins” de corais e esponjas de águas frias. Um considerável esforço científico tem sido direcionado à identificação de concentrações desses habitats no planeta, também denominados “ecossistemas marinhos vulneráveis” (VME, sigla em inglês) (Gianni, 2004). Esse impacto é particularmente o resultado de operações de pesca de arrasto de fundo e pode ser reduzido pelo uso de outros métodos de pesca, como as linhas de fundo (Pham et al., 2014). A avaliação do impacto da pesca sobre habitats bentônicos requer também o conhecimento da “pegada espacial” estabelecida pelas pescarias de fundo (ver seção 3) e dentro da qual os focos de perturbação, e suas consequências ecológicas, se distribuem. Em algumas áreas extensamente estudadas, como o Mar do Norte, é comum que, mesmo numa ampla pegada espacial, as operações de pesca, e a perturbação do fundo, se concentrem em núcleos muito menores que permanecem em um “estado permanente de alteração” (Kaiser et al., 2002), enquanto áreas “marginais” muito maiores são pouco perturbadas. Expansões da pescaria, no entanto, podem alterar muito rapidamente essas áreas marginais e por isso podem ser consideradas prioritárias para um manejo espacial (Jennings et al., 2012). No Sudeste e Sul do Brasil, como já relatado, algumas regiões podem estar sujeitas a intensa perturbação (e.g., área arrastada 4 a 14 vezes a superfície disponível) (Port et al., 2016a).

## 6 MANEJO PESQUEIRO COMO RESPOSTA AO IMPACTO DA PESCA SOBRE O AMBIENTE MARINHO

A gestão pesqueira (ou manejo) é um processo integrado que abrange desde a coleta e análise de informações até a formulação e implementação de regras, com o objetivo de assegurar a produtividade continuada dos recursos, além da realização de outros objetivos sociais, econômicos e ambientais, para os sistemas pesqueiros (Cochrane, 2002). Em uma abordagem de precaução, também leva em conta as possíveis mudanças no meio ambiente e os valores humanos, assim como o grau de incerteza das estimativas (FAO, 1996). A gestão tem como foco geral um ou mais recursos-alvo das pescarias (manejo baseado na espécie-alvo). Porém, há pelo menos três décadas, a gestão ou “manejo baseado no ecossistema” (*ecosystem-based fisheries management* – EBFM – Pikitch et al., 2004) tem recebido atenção internacional, pois ressalta a necessidade de considerar os impactos ecossistêmicos, bem como as dimensões humanas integradas ao ecossistema, que deve ser mantido sadio, produtivo e resiliente, de modo que possa fornecer os serviços de que a humanidade necessita. A gestão pesqueira baseada no ecossistema considera ainda os impactos acumulados de diferentes setores e não só a atividade pesqueira (Long et al., 2015).

As restrições que as diferentes abordagens de gestão impõem à atividade pesqueira visam basicamente controlar a mortalidade exercida pela pesca sobre os estoques. Essas restrições podem limitar a captura (controles de “saída”), o esforço (controles de “entrada”) ou ainda serem definidas por medidas técnicas voltadas aos métodos de pesca e à proteção aos processos biológicos dos estoques, bem como ao ecossistema (Cochrane, 2005). As restrições de captura incluem a adoção de limites ou quotas (globais ou individuais) de captura. Os controles de esforço abrangem a limitação do número de embarcações, pessoas, tempo de operação (e.g. horas, dias de pesca) ou aparelhos de pesca (e.g. número de anzóis, armadilhas, redes). Os processos biológicos dos estoques podem ser “protegidos” pelo estabelecimento de tamanhos mínimos de captura, defesos e restrições espaço-temporais para a atividade, entre outros (Jennings et al., 2001; King, 2007). Medidas técnicas adicionais incluem tipos permitidos de aparelhos, suas dimensões e elementos de seletividade (e.g. tamanhos de malha), bem como restrições de captura não-intencional. A adoção de diferentes medidas num processo de gestão pesqueira segue estratégias direcionadas ao atendimento de objetivos pre-

definidos, compondo um “Plano de Manejo”. A estruturação do Plano de Manejo requer uma compreensão ampla dos diversos fatores locais envolvidos, a identificação de seus aspectos mais relevantes, a avaliação crítica da relação homem-ambiente e a escolha das políticas de manejo socialmente justas e ambientalmente sustentáveis (Finkbeiner et al., 2017).

De acordo com a Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar – CNUDM (United Nations, 1982), cada Estado deve promover a utilização ótima dos recursos vivos em sua Zona Econômica Exclusiva sem o prejuízo de sua conservação, e nesse sentido é responsável pela implementação de regimes de gestão pesqueira. Em áreas fora dos limites jurisdicionais, há uma governança baseada no cumprimento de leis e acordos internacionais, na adesão voluntária a códigos de conduta e em iniciativas de mercado e da sociedade civil (Allison, 2001). Sob o arcabouço da CNUDM existem comitês e comissões da FAO, de caráter global e transoceânico, voltados a um oceano específico ou áreas continentais. São as Organizações Regionais de Gestão Pesqueira (RFMO, sigla em inglês). Alguns exemplos que envolvem o Brasil são a Comissão Internacional para a Conservação do Atum Atlântico (ICCAT) e a Convenção para Conservação dos Recursos Vivos Marinhos Antárticos (CCAMLR). A União Europeia, cujas frotas operam em todos os oceanos, estabelece Acordos de Parceria para Pescas Sustentáveis (SFPA) bilaterais com outros países e acordos específicos para áreas geridas por RFMOs ou áreas de alto mar (Teijo, 2018).

No entanto, apesar dos esforços na gestão das pescarias, há a clara percepção de que a pesca mundial tem estado em crise há bastante tempo. Como corolário, vimos que nas últimas quatro décadas a participação dos estoques explorados a níveis biológicos não sustentáveis nas capturas mundiais cresceu de 10 para 30% (FAO, 2016). Mesmo observando esse quadro, diversos autores têm argumentado que há muitos casos de sucesso na gestão de pescarias e que as ferramentas necessárias estão disponíveis, mas, infelizmente, não têm sido aplicadas devidamente (Costello et al., 2016). As discussões atuais sobre o tema indicam que o aprimoramento da gestão deve incluir mecanismos econômicos para que os pescadores desenvolvam práticas de pesca seletivas e cooperem tanto com a coleta de dados quanto com a regulamentação da atividade. Há ênfase na necessidade de diversificação dos métodos aplicados para o cumprimento dos objetivos de sustentabilidade e de adoção de processos de gestão transparentes e participativos, com envolvimento das partes interessadas (Feeny et al., 1990; Beddington et al., 2007; Walters e Martel, 2004). A adequada gestão pode impor limites à atividade produtiva, mas objetiva principalmente sua manutenção a médio e longo

prazos. Adicionalmente, a adoção de uma abordagem ecossistêmica na gestão da pesca traz consigo a ampliação dos objetivos de sustentabilidade.

A discussão sobre a efetividade da implantação de Áreas Marinhas Protegidas (AMPs), em especial as de exclusão permanente da pesca, como uma ferramenta para a proteção da biodiversidade, ganhou destaque no início dos anos 1990, e sua prática sedimentou-se ao longo dos anos 2000 (FAO, 2011; Hilborn, 2016). No entanto, ainda há muito debate sobre sua eficácia para o alcance de objetivos ecológicos e sociais (Pendleton et al., 2017). De um lado, alguns autores consideram o estabelecimento de AMPs uma política simplista para os objetivos de desenvolvimento de uma pesca sustentável e para a proteção dos oceanos, pois apenas deslocam o esforço pesqueiro e não substituem a regulamentação das pescarias (Walters e Martel, 2004; Hilborn, 2007). De outro lado, há a argumentação de que a pesca pode se beneficiar com o aumento da abundância de pescados nas proximidades das áreas protegidas e que estas podem ajudar o ecossistema marinho a reverter sua degradação global e mitigar diversos efeitos das mudanças climáticas, como as alterações dos padrões de distribuição de espécies e a acidificação e o aumento do nível dos oceanos (Gell e Roberts, 2003; Roberts et al., 2017; Sala e Giakoumi, 2017).

Além das áreas de proteção integral, existem categorias de unidade de conservação que permitem o uso sustentável dos recursos (Horta et al., 2016). No Brasil, o Sistema Nacional das Unidades de Conservação (SNUC – Brasil, 2000) estabelece as diferentes categorias de unidades de conservação, que se dividem em dois grandes grupos: as de proteção integral e as de uso sustentável. Nas de uso sustentável são reportadas diversas experiências de uso de áreas aquáticas protegidas como instrumento de gestão pesqueira com diferentes graus de sucesso (Prates e Blanc, 2007). O Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC – Brasil, 1988) é outro instrumento de gestão espacial que prevê o zoneamento de usos e atividades na Zona Costeira, dando prioridade à conservação e proteção do ambiente. A Zona Costeira, além da faixa terrestre, possui uma faixa marítima que se estende por 12 milhas náuticas a partir da linha de costa. O Zoneamento Ecológico-Econômico Costeiro permite que estados e municípios planejem as atividades sociais e econômicas nesse território. Em seu conjunto, essas ferramentas de ordenamento territorial ou espacial determinam polígonos de exclusão total ou parcial à pesca ou distâncias e profundidade mínimas permitidas para operação.

A despeito das controvérsias, a implantação de AMPs tem se tornado uma tendência mundial, inclusive para atingir objetivos da gestão pesqueira. A décima primeira Meta para Biodiversidade de Aichi, da Convenção sobre a

Biodiversidade Biológica das Nações Unidas (*Secretariat of the Convention on Biological Diversity*, 2005), estabelece que 10% das áreas costeiras ou marinhas sejam conservadas e integradas às paisagens marinhas mais amplas até 2020 (*Secretariat of the Convention on Biological Diversity*, 2011). O Brasil, ao criar as áreas de proteção São Pedro-São Paulo e Trindade-Martin Vaz, em março de 2018 (Brasil, 2018a; 2018b), elevou de 1,5% para 25% a extensão das áreas protegidas em sua zona econômica exclusiva. Essas áreas de proteção e outras em efeito na ZEE brasileira estabelecem restrições à atividade pesqueira.

Em 1990 também começaram a ser estabelecidos padrões para a certificação ecológica de pescado, como uma alternativa não estatal e voltada para o mercado, para estimular a conservação dos estoques pesqueiros e seu ambiente (Constance e Bonanno, 2000; FAO, 2005; Stratoudakis et al., 2016). Em decorrência, nos dias atuais, há uma forte tendência mundial de aumento na demanda de pescado certificado para o atendimento de acordos e metas de grandes cadeias de restaurantes e redes varejistas. Entre 2003 e 2015, a produção mundial de pescado certificado de origem natural e aquícola cresceu a uma taxa de 35% ao ano, passando de 0,5 para 14% e atingindo o valor de US\$11,5 bilhões (Potts et al., 2016). Os processos de certificação atestam que determinada pescaria é realizada atendendo compromissos de manter as populações exploradas em níveis saudáveis e seus ecossistemas íntegros. Também se exige que a pescaria seja submetida a sistemas de gestão efetivos, seguindo leis e padrões locais, nacionais e internacionais (FAO, 2005; *Marine Stewardship Council*, 2010). Entretanto, a certificação de pescarias em países em desenvolvimento encontra diversos empecilhos, como a falta de dados e regramentos das pescarias. Dias (2012) analisou esse desenvolvimento no contexto das pescarias brasileiras, confirmando essas dificuldades. No entanto, a efetivação do processo traz, além de benefícios econômicos, o empoderamento dos pescadores e direitos de uso dos recursos. A rotulagem ecológica se tornou essencial para o mercado mundial de pescado sustentável, e com isso determina uma série de padrões a serem seguidos pelo setor produtivo pesqueiro (Parkes et al., 2010; Perez-Ramírez et al., 2012; Lallemand et al., 2016).

Uma fronteira para a gestão pesqueira advém do reconhecimento de que a pesca não está desassociada de outras formas de uso das regiões marinhas e, conseqüentemente, da necessidade de conciliação do manejo pesqueiro com a gestão dessas atividades cada vez mais diversificadas. Os usos do espaço marinho abrangem todos os setores econômicos, do primário ao quaternário; além dos recursos vivos, podem ser classificados principalmente

como de mineração e energia, obras marítimas e de engenharia costeira, transporte e recreação. Além dessas atividades, o setor público utiliza o espaço marinho para empreender ações estratégicas, de gestão e de pesquisa (Smith, 2000). Apesar dos conflitos decorrentes da multiplicidade de usos do mar, o planejamento de cada atividade tradicionalmente se dá sem que as demais sejam efetivamente consideradas (Ehler, 2018).

Uma pescaria específica pode experimentar interações, muitas delas negativas, com várias outras atividades antrópicas de forma simultânea. São comuns as situações em que pescadores em um mesmo território sofrem restrições em sua atividade devido à existência de portos, áreas de ancoragem e manobra de navios, dutos submarinos, poluição urbana ou degradação de habitats costeiros, e devido aos planos de zoneamento ou implantação de AMPs (Jablonski et al., 2006; Gasalla e Gandini, 2016). O texto da CNUDM de 1982 (*United Nations*, 1982) já considerava que os problemas do espaço oceânico estão intimamente relacionados e que devem ser tratados como um todo, pois uma gestão segmentada falha em resolver os conflitos entre os usuários e em avaliar o impacto cumulativo das diferentes atividades no mar (Ehler, 2018). Na década de 1990, países como Canadá e Austrália começaram a desenvolver políticas integradas para a proteção e desenvolvimento de extensas áreas oceânicas sob suas jurisdições. Nos anos 2000, diversos países europeus desenvolveram planos de gestão espacial voltados para a resolução de conflitos em suas áreas marinhas. O Planejamento Espacial Marinho (PEM) foi desenvolvido como “um processo público de análise e alocação espacial e temporal de atividades humanas em áreas marinhas para atingir objetivos ecológicos, econômicos e sociais especificados normalmente através de um processo político” (Ehler e Douvère, 2009). Visa dar suporte à gestão a partir de um enfoque ecossistêmico, organizando as ações humanas no ambiente marinho de forma a manter os produtos e serviços naturalmente fornecidos pelos oceanos e necessários à humanidade. Um plano espacial marinho provê uma visão de futuro para uma determinada área de mar e estabelece as prioridades para seu uso, considerando a manutenção de um ecossistema saudável (Ehler, 2018; Foley et al., 2010).

A dinâmica das pescarias inclui deslocamentos espaço-temporais de esforço pesqueiro em decorrência da movimentação dos estoques explorados (Janhsen et al., 2018). Ao determinar as formas de uso das áreas marinhas, o planejamento espacial pode afetar o comportamento e o rendimento econômico das frotas e os próprios estoques pesqueiros. A compatibilização das especificidades dos sistemas pesqueiros com outras atividades antrópicas representa um desafio aos Planos de Manejo pesqueiros, mas é uma

etapa necessária para o desenvolvimento sustentável do setor pesqueiro. O espaço marinho planejado permite que as interações entre os setores sejam identificadas e incorporadas a uma estrutura de governança, favorecendo o surgimento de uma nova economia voltada para os oceanos, que se convencionou chamar de Economia Oceânica Sustentável ou simplesmente “Economia Azul”. Esta surge quando há o manejo e o desenvolvimento integrado dos setores econômicos em equilíbrio com a capacidade dos ecossistemas oceânicos em permanecerem resilientes e saudáveis a longo prazo (Klinger et al., 2018; *The Economist Intelligence Unit*, 2015). A expectativa internacional é de que na próxima década os setores de energia marinha, biotecnologia marinha, turismo costeiro e de produção de alimentos ofereçam oportunidades inéditas de desenvolvimento e investimento (WWF, 2018), que devem ser focados no bem-estar dos oceanos e no aproveitamento sustentável de seu potencial (Kathijotes, 2013).

É evidente que a gestão e a atividade produtiva pesqueira do século XXI serão bastante distintas do que foram no século XX. O aumento dos usos econômicos do território oceânico traz consigo um incremento substancial no grau de complexidade das interações entre as atividades antrópicas, de seus efeitos cumulativos e das relações causais. A manutenção dos estoques pesqueiros em níveis que assegurem a sustentabilidade de sua exploração a longo prazo passará cada vez mais a ser apenas um entre os diversos objetivos postos para a gestão da pesca em uma paisagem de usos integrados do mar. A atenção da comunidade internacional tenderá fortemente a se voltar para os aspectos ambientais, sociais, de governança e de segurança alimentar da atividade pesqueira (Garcia e Rosemberg, 2010; McClanahan et al., 2013). O adequado manejo, em conjunto com o uso de ferramentas para rastreabilidade como o *blockchain* (Manski, 2017), e a certificação de pescarias surgem como estratégias para a renovação da atividade pesqueira e sua integração no contexto de uma Economia Azul.

## 7 TECNOLOGIAS DE SUPORTE AO USO E GESTÃO DOS RECURSOS PESQUEIROS

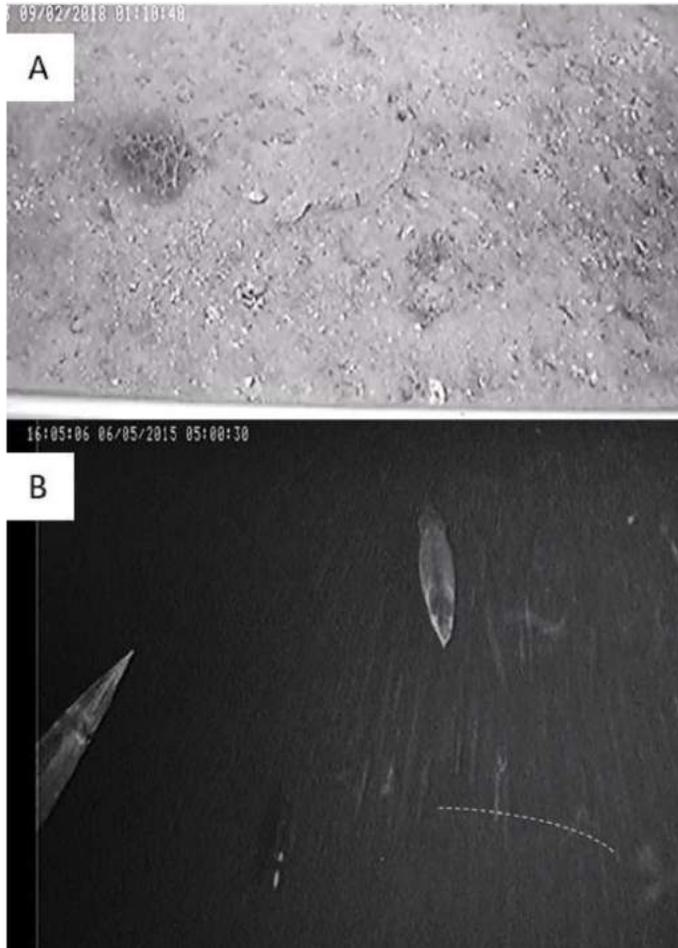
O conhecimento científico que subsidia qualquer processo de uso e gestão de recursos pesqueiros marinhos origina-se tradicionalmente da observação de: capturas (comerciais e científicas), desembarques, operações de pesca, bem como coleta e análise de material biológico. No entanto, novas tecnologias representam oportunidades para incrementar, aprofundar ou

mesmo ampliar a escala espacial e temporal do conhecimento sobre: (a) a forma de atuação da pesca (*driver*); (b) a pressão que exerce sobre os ecossistemas (*pressure*); (c) o estado das populações, comunidades e ecossistemas (*state*); (d) as consequências da pressão exercida (*impact*), e (e) a efetividade das respostas às ações de manejo pesqueiro (*response*) (Tabela 2).

Câmeras submarinas têm sido utilizadas para produzir imagens contendo informação sobre a composição de habitats, diversidade e densidade de espécies (inclusive espécies-alvo), bem como o comportamento dos equipamentos de pesca durante sua operação. Frequentemente essas câmeras são transportadas por veículos submarinos, que permitem estudar praticamente todos os ecossistemas marinhos do planeta. Existem veículos tripulados, tais como submarinos ou submergíveis, veículos rebocados (e.g., *trenós*, *tow cameras*), autônomos (*autonomous underwater vehicle*, AUV) e os operados remotamente (*remotely operated vehicle*, ROV). Em geral, esses veículos permitem contribuir para o conhecimento tanto dos recursos pesqueiros como dos ecossistemas a que pertencem, já que são capazes de incorporar diversos sensores e instrumentação oceanográfica, inclusive servindo de plataforma para avaliações acústicas de estoques pesqueiros (Fernandes et al., 2003; Smale et al., 2012). Através de seu uso pode-se, por exemplo, estimar densidades de recursos-alvo e não-alvo das pescarias, descrever a composição de habitats e avaliar a diversidade e abundância de comunidades bentônicas associadas aos fundos de pesca (Cailliet et al., 1999; Trenkel et al., 2009; Tissot et al., 2007; Söffker et al., 2011, e outros). Câmeras mantidas estacionárias e dotadas de iscas (*baited remote underwater video stations* – BRUVs), geram imagens que permitem a avaliação da diversidade e abundância de espécies de peixes teleósteos e elasmobrânquios demersais (Cappo et al., 2004; Langlois et al., 2012; Santana-Garçon et al., 2014) e pelágicos (Letessier et al., 2013).

O comportamento de espécies em contato com artes de pesca, sua vulnerabilidade e seletividade, além dos efeitos dessas artes sobre o fundo marinho, têm sido estudados a partir de sistemas de filmagem submarina montados diretamente em redes ou outros aparelhos de pesca (Figura 9). A eficácia dessas tecnologias depende das condições ambientais que influem na visibilidade no meio aquático, incluindo a turbidez, profundidade e penetração de luz, além da velocidade do arrasto, sistema de fixação das câmeras e sua orientação, ângulo de inclinação, luminosidade, entre outros. Padrões de comportamento de peixes e outros organismos expostos à ação de artes de pesca revelados nesses vídeos permitem identificar alternativas para o aumento da eficiência dos métodos de pesca e a redução da captura incidental (Queirolo et al., 2012; Chossid et al., 2012; Bayse et al., 2014, e outros). No

Brasil, a utilização pioneira de uma *trawl* câmera possibilitou observações do comportamento de escape do calamar-argentino (*Illex argentinus*) frente a redes de arrasto de fundo (Perez et al., 2018).



**FIGURA 9:** Imagens geradas por câmeras submarinas: (A) conduzidas por um trenó de reboque e (B) acopladas a uma rede de arrasto de fundo. A linha tracejada indica a tralha inferior da rede. Fonte. Laboratório de Estudos Marinhos Aplicados - EMCT-UNIVALI.

Técnicas acústicas de amostragem têm sido utilizadas para a avaliação de estoques pelágicos por décadas. No entanto, essas técnicas apresentam grande diversidade de aplicações, que permitem caracterizar desde zonas profundas até as comunidades pelágicas que as habitam (Schimel et al., 2010). Ecobatímetros monofeixe (SBES) ou multifeixe (MBES) são usados para registrar a profundidade e morfologia do fundo marinho. Mediante processamento com *softwares* especializados (e.g. RoxAnn e QTCView) é possível também determinar a rugosidade e dureza do fundo, o que permite obter uma

**TABELA 2:** Síntese das oportunidades proporcionadas por diferentes tecnologias no uso e gestão de recursos marinhos, classificadas por aspectos DPSIR.

TECNOLOGIAS	PRODUTOS	DINÂMICA DA PESCA (DRIVER)	PRESSÃO SOBRE O AMBIENTE MARINHO	ESTADO DO AMBIENTE MARINHO	IMPACTO SOBRE O AMBIENTE MARINHO	RESPOSTAS NA FORMA DE AÇÕES DE MANEJO
Câmeras - veículos submarinos	Imagens dos ambientes marinhos e organismos (microescala)		Perturbação do fundo pela pesca e outras atividades (e.g. poluição, pesca fantasma)	Tipos/ estado de habitats, biodiversidade e estrutura das comunidades	Degradação de habitats Modificação de comunidades	Recuperação de habitats/ comunidades; localização de redes fantasma
Câmeras - aparelhos de pesca	Imagens dos aparelhos de pesca em atuação sobre ambientes marinhos		Eficiência das capturas, mortalidade de espécies, perturbação do fundo	Disponibilidade de recursos-alvo e não-alvo	Alterações na disponibilidade de recursos-alvo e não-alvo	Escape de espécies não-alvo
Câmeras e sensores aéreos	Imagens da superfície do oceano e áreas costeiras	Comportamento espaço-temporal das frotas pesqueiras	"Pegada ecológica" Ocupação de habitats	Tipos/ dimensões/ localização de habitats/ comunidades/áreas de pesca	Degradação de habitats Modificação de comunidades	Mapas temáticos para manejo espacial da pesca

TECNOLOGIAS	PRODUTOS	DINÂMICA DA PESCA (DRIVER)	PRESSÃO SOBRE O AMBIENTE MARINHO	ESTADO DO AMBIENTE MARINHO	IMPACTO SOBRE O AMBIENTE MARINHO	RESPOSTAS NA FORMA DE AÇÕES DE MANEJO
Equipamentos acústicos – fundo do marinho	Mapas do fundo do oceânico (mesoescala)		“Pegada espacial”	Tipos/ dimensões/ localização de habitats/ áreas de pesca	Degradação de habitats Modificação de comunidades	Mapas temáticos para manejo espacial da pesca
Equipamentos acústicos – aparelhos de pesca	Registro visual/acústico do comportamento dos aparelhos de pesca em atuação		Eficiência das capturas e área afetada pela pesca			Cumprimento de normas técnicas
Rastreamento satelital de embarcações	Posicionamento preciso e atividade estimada das embarcações de pesca	Comportamento espaço-temporal das frotas pesqueiras	“Pegada espacial” e esforço pesqueiro			Cumprimento de medidas espaciais de manejo
Sistema de identificação automática	Posicionamento preciso e atividade estimada das embarcações de pesca	Comportamento espaço-temporal das frotas pesqueiras	“Pegada espacial” e esforço pesqueiro			Cumprimento de medidas espaciais de manejo

classificação do tipo de fundo marinho. O sonar de varredura lateral (*side-scan sonar*) é capaz de produzir uma imagem ampla e de alta resolução do fundo marinho (Kenny et al., 2003). A ecosonda *split-beam*, por sua parte, tem sido amplamente usada para a avaliação de estoques pesqueiros, basicamente porque pode registrar o movimento dos peixes e permitir o pós-processamento dos registros ecointegrados para quantificar a biomassa de uma população (Barange et al., 2009). No Brasil esses sistemas têm sido utilizados para avaliação de estoques pelágicos, como a sardinha-verdadeira (*Sardinella brasiliensis*), a anchoita (*Engraulis anchoita*) e o calamar-argentino (*Illex argentinus*) (Madureira et al., 2005; Weigert e Madureira, 2011; Costa et al., 2016). Sistemas de câmeras acústicas do tipo *dual-frequency identification sonar* (DIDSON) também têm sido desenvolvidos e usados com êxito para estudar o comportamento de espécies, pois não requerem iluminação e assim minimizam a interferência no sistema (Holmes et al., 2006).

Fotografias aéreas e imagens de satélites têm permitido mapear diretamente pradarias marinhas, recifes e manguezais, entre outros ambientes (Murphy e Jenkins, 2010; Wang et al., 2015), o que proporciona valiosa informação sobre o estado dos ecossistemas. Recentemente, imagens de alta resolução (<1 metro) têm sido produzidas por câmeras acopladas a veículos aéreos não tripulados (*unmanned aerial vehicles* – UAV) para estudar ambientes e comunidades marinhas. Entre os UAVs, destacam-se os drones por sua versatilidade e eficiência, por exemplo, para avaliar populações de elasmobrânquios em sistemas recifais (Kiszka et al., 2016), bem como mamíferos marinhos (Fiori et al., 2017).

O sensoriamento remoto tem sido utilizado para identificar as zonas onde a pesca é mais eficiente, devido à tendência de agregação de peixes pelágicos em áreas onde as condições ambientais são favoráveis e, assim, orientar a operação das frotas pesqueiras (Klemas, 2013). No entanto, o sensoriamento remoto também é amplamente utilizado para contribuir ao manejo pesqueiro em nível mundial, devido à grande cobertura, em tempo quase-real, do ecossistema marinho, particularmente de recifes de corais e pradarias de gramíneas em diferentes escalas. Para isso têm sido usados os sensores multiespectrais de resolução moderada dos satélites Landsat (com resolução de 30x30m) e SPOT (com resolução de 20x20m) (Dekker et al., 2005), ou de alta resolução espacial (e.g. Quickbird 2 – 2,4 x 2,4m; IKONOS 4 x 4m) (Mumby e Green, 2000). No Brasil foram utilizados dados da temperatura superficial do oceano (TSM) estimada por imagens satelitais para estudar os padrões de ocorrência de ovos de *Sardinella brasiliensis* e, com isso, estabelecer o hábitat da área de desova desse recurso (Gigliotti et al., 2010).

As capturas obtidas com redes de arrasto, sejam em cruzeiros de avaliação ou em atividades comerciais, têm sido amplamente utilizadas para a descrição dos padrões de distribuição e abundância de espécies marinhas, sobretudo de hábitos demersais e bentônicos (Côte e Perrow, 2006). Da mesma forma as embarcações pesqueiras também podem coletar amostras e levantar dados ambientais que permitem estudar o ecossistema marinho. Durante os arrastos comerciais, por exemplo, pode-se levantar a abundância e diversidade da macrofauna do substrato, mediante o uso de um dispositivo coletor acoplado às tralhas da rede (e.g. Almeida et al., 2016). Também tem sido possível a coleta de amostras de plâncton e dados físico-químicos da coluna d'água durante a navegação, a partir do reboque de instrumentos como o "amostrador contínuo de plâncton" e modelos digitais de veículos ondulatórios com sensores ambientais, respectivamente (Cunha e Resgalla Jr., 2016). Estes últimos podem ser operados a velocidades de 8 a 10 nós e apresentam elevado potencial para estudos científicos (Tamanaha et al., 2016).

O rastreamento satelital de embarcações (*vessel monitoring system* - VMS) é uma ferramenta eficiente e de alta relação custo-benefício para o monitoramento, controle e vigilância das atividades pesqueiras em nível mundial. Esse sistema opera com um identificador único de embarcações, e transmite em períodos regulares dados como data, hora e posição (latitude e longitude). É capaz, assim, de informar a órgãos de manejo, em tempo real, sobre o posicionamento e o deslocamento de embarcações de pesca, e comparar a localização destas com respeito a zonas de acesso restrito, áreas de pesca reguladas, áreas marinhas protegidas, entre outras. Além de uma importante opção de fiscalização de medidas espaciais de manejo, o sistema também provê informação sobre a distribuição espacial e temporal da atividade pesqueira que pode ser usada para estudos científicos e o monitoramento ambiental (Murawski et al., 2005; Lee et al., 2010; Gerritsen e Lordan, 2011; O'Farrel et al., 2017). Os primeiros dados de VMS gerados por embarcações dentro da ZEE brasileira foram essenciais para o estudo do desenvolvimento da pesca profunda por embarcações estrangeiras (Perez et al., 2003). Em 2006 foi criado o Programa Nacional de Rastreamento de Embarcações Pesqueiras por Satélite - PREPS (SEAP/MMA/MD, 2006), que, além do monitoramento da atividade pesqueira, tem propiciado estudos relevantes sobre o comportamento de estoques e pescarias. Por exemplo, dados de posicionamento e deslocamento da pesca de cerco foram utilizados para estudar os padrões de distribuição de cardumes da tainha *Mugil lisa* durante a migração reprodutiva (Lemos et al., 2016).

O Sistema de Identificação Automática (*Automatic Identification System* – AIS) foi criado para aumentar os padrões de segurança na navegação, permitindo comunicar a posição das embarcações de maneira contínua, além de poder enviar informações relevantes para o conhecimento de outras embarcações. A utilização do AIS por embarcações pesqueiras tem se tornado gradualmente obrigatória em várias regiões do planeta, podendo se tornar um importante instrumento de controle da pesca, sobretudo oceânica. Mediante diversas ferramentas de processamento de dados gerados pelo AIS, é possível interpretar se as embarcações pesqueiras estão realizando operações de pesca ou não (Hu et al., 2016; De Souza et al., 2016). Os dados gerados pelo AIS estão sendo usados em diversos aplicativos para computadores, *tablets* e telefones celulares (e.g. *Vessel Finder*, *Find Ship* e *Ship Finder*), tornando pública a observação do posicionamento das embarcações pesqueiras. Outro exemplo dessas novas tecnologias que ajudam a melhorar a observação das frotas pesqueiras a nível mundial é o programa *Global Fishing Watch* (<http://globalfishingwatch.org>).

Diversas tecnologias acústicas têm sido desenvolvidas para conhecer o comportamento das artes de pesca durante as operações de pesca, principalmente no sentido de otimizar o rendimento e melhorar a eficiência das frotas pesqueiras. No entanto, alguns sistemas foram criados para reduzir os impactos da pesca no ecossistema, tanto sobre o ambiente físico quanto sobre espécies vulneráveis. Os mais utilizados monitoram o comportamento de redes de arrasto e de cerco, que são equipamentos de grande tamanho e complexidade. Entre os sistemas mais conhecidos estão o SIMRAD (ITI e PI50, [www.simrad.com](http://www.simrad.com)), SCANMAR (*Trawl Catch System*, [www.scanmar.no](http://www.scanmar.no)), NOTUS (*Trawlmaster* e *Seinemaster*, [www.notus.ca](http://www.notus.ca)), eSONAR (*Trawlvue* e *Seinevue*, [www.e-sonar.ca](http://www.e-sonar.ca)) e MARPORT (*Trawl and Seine Explorer*, [www.marport.com](http://www.marport.com)). Para o monitoramento de redes de arrasto, os sensores mais usados permitem o registro: (a) da abertura das portas e asas da rede (*door and wing spread*), (b) do contato com o fundo (*bottom contact sensor*), (c) da profundidade e temperatura (*depth and temperature sensor*), (d) da inclinação e rolamento (*pitch and roll inclinometers*), (e) da captura (*catch sensor*), (f) da altura da tralha superior (*headline height*) e (g) da inclinação das grelhas da seleção da captura (*grid sensor*). A informação relativa à abertura das redes de arrasto é de grande relevância para delimitar a pegada espacial das frotas pesqueiras (e.g. Eigaard et al., 2016), informação que pode ser usada para a definição de estratégias espaciais de uso dos recursos marinhos. Na pesca de espinhel também se empregam tecnologias para melhorar a configuração da arte de pesca; juntamente com melhorias nas práticas operacionais, permitem a re-

dução do impacto sobre a mortalidade não-intencional de aves (Løkkeborg, 2011; Melvin et al., 2014). Associadas a essas informações operacionais, têm sido desenvolvidas ferramentas para a visualização e simulação de artes de pesca que permitem uma melhor compreensão de seu comportamento sob certos parâmetros de operação. Entre essas ferramentas, o programa AcruXsoft permite desenhar e visualizar o comportamento de redes de arrasto ([www.acruXsoft.com.uy](http://www.acruXsoft.com.uy)), e o DynamiT simula o comportamento de redes de arrasto tomando como base o método de elementos finitos ([www.ifremer.fr/dynamit\\_eng](http://www.ifremer.fr/dynamit_eng)), sendo utilizados em diversos estudos comparativos (Queirolo et al., 2009; Queirolo et al., 2016; Nguyen et al., 2015). A simulação numérica também tem sido utilizada para estudar o comportamento do espinhel pelágico utilizado para a pesca de atuns (Lee et al., 2005) e de redes de cerco (Zhou et al., 2014), e seu potencial parece ilimitado, dada a grande capacidade de processamento dos computadores atualmente disponíveis.

## 8 CONCLUSÕES: PERSPECTIVAS PARA UM FUTURO SUSTENTÁVEL DA PESCA NO BRASIL E NO MUNDO

Práticas pouco produtivas no uso e gestão de recursos pesqueiros marinhos no passado, aliadas às incertezas decorrentes das mudanças ambientais planetárias, sugerem que a pesca, como praticada no presente, deve oferecer poucas perspectivas de atendimento às demandas alimentares da população global no futuro. No entanto, contrapõe-se a essas tendências desfavoráveis, um entendimento sem precedentes dos processos de uso dos recursos pesqueiros, incluindo o papel da atividade pesqueira, a diversidade de formas de pressão sobre os ecossistemas e o potencial dessas formas para debilitar o seu funcionamento. Mais do que nunca, têm-se reconhecido as complexidades e interdependências da pesca marinha com os processos ecossistêmicos e outras atividades antrópicas. O acúmulo de dados em várias escalas espaciais e temporais tem permitido análises globalizadas de tendências, identificação de cenários críticos e de oportunidades para ações reparadoras. A diversidade e acessibilidade de novas tecnologias têm revelado processos naturais e decorrentes das operações de pesca, pouco ou nada conhecidos, esclarecendo incertezas e também contribuindo para a busca de soluções inovadoras. Se por um lado as ameaças tornam-se cada vez mais evidentes, por outro são crescentes as oportunidades que se desdobram de um entendimento também progressivamente mais completo dos processos

naturais que sustentam a pesca marinha e suas variações. Em nenhum momento do desenvolvimento pesqueiro esse entendimento foi, por outro lado, tão rapidamente gerado e socializado. Se por um lado a pesca marinha e seus benefícios nunca estiveram tão em risco, por outro nunca tivemos tantas ferramentas técnico-científicas para encontrar soluções, nem tanto poder de influenciar a sociedade no sentido de promover sua continuidade dentro de patamares ecologicamente sustentáveis e produtivos.

No Brasil são identificadas enormes deficiências no sistema de gestão de recursos pesqueiros (Castello, 2010; Arana et al., 2016). Com estrutura administrativa fragmentada e imprevisível, são infrequentes programas científicos pragmáticos, voltados a ações específicas de manejo. Ainda assim, é inegável o engajamento de pesquisadores e instituições em produzir resultados científicos alinhados com as “fronteiras do conhecimento” sobre recursos pesqueiros e pescarias marinhas aqui apresentados. Isto permite vislumbrar o desenvolvimento de novos rumos no uso dos recursos pesqueiros também no Brasil (Arana et al., 2016).

## REFERÊNCIAS

- Abreu-Mota, M.A.; Medeiros, R.P.; Noernberg, M.A. 2018. Resilience thinking applied to fisheries management: perspectives for the mullet fishery in Southern-Southeastern Brazil. *Reg Environ Change*. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1323-9>
- Allison, E.H. 2001. Big laws, small catches: global ocean governance and the fisheries crisis. *Journal of International Development*, 13: 933-950. <https://doi.org/10.1002/jid.834>
- Almeida, T.C.M.; Arana, P.M.; Sant'Ana, R.; Pezzuto, P.R. 2016. A new benthic macrofauna and sediments sampler for attaching to otter trawl nets: Comparison with the Van Veen grab. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 44(5): 1116-1122.
- Alverson, D.L., Freeberg, M.H., Murawaski, S.A.; Pope, J.G. 1994. A global assessment of fisheries bycatch and discards. *FAO Fisheries Technical Paper n. 339*. Rome, FAO. 235pp.
- Arana, P.; Perez, J.A.A.; Pezzuto, P.R. 2009. Deep sea fisheries off Latin America: an introduction. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 37(3): 281-284.
- Arana, P.M.; Pezzuto, P.R.; Ávila-da-Silva, A.O.; Queirolo, D.; Perez, J.A.A.; Arfelli, C.A. 2016. Pathways for sustainable industrial fisheries in southeastern and southern Brazil. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 44(5): 875-881. DOI: 10.3856/vol44-issue5-fulltext-1
- Barange, M.; Bernal, M.; Cergole, M.C.; Cubillos, L.A.; Daskalov, G.M.; de Moor, C.L.; De

- Oliveira, J.A.A.; Dickey-Collas, M.; Gaughan, D.J.; Hill, K.; Jacobson, L.D.; Köster, F.W.; Massé, J.; Nishida, H.; Oozeki, Y.; Palomera, I.; Saccardo, S.A.; Santojanni, A.; Serra, R.; Somarakis, S.; Stratoudakis, Y.; Uriarte, A.; van der Lingen, C.D.; Yatsu, A. 2009. Current trends in the assessment and management of stocks. *Climate Change and Small Pelagic Fish*, 191-255.
- Barletta, M.; Cysneiros, F.J.A.; A. Lima, R.A. 2016. Effects of dredging operations on the demersal fish fauna of a South American tropical-subtropical transition estuary. *Journal of Fish Biology*, 89:890-920. <https://doi.org/10.1111/jfb.12999>
- Baum, J.K.; Worm, B. 2009. Cascading top-down effects of changing oceanic predator abundances. *Journal of Animal Ecology*, 78: 699-714.
- Bayse, S.M.; He, P.; Pol, M.V.; Chosid, D.M. 2014. Quantitative analysis of the behavior of longfin inshore squid (*Doryteuthis pealeii*) in reaction to a species separation grid of an otter trawl. *Fisheries Research* 152 (2014) 55-61.
- Beddington, J.R.; Agnew, D.J.; Clark, C.W. 2007. Current problems in the management of marine fisheries. *Science*, 316: 1713-1716.
- Benn, A.R., Weaver, P.P.; Billet, D.S.M.; Hove, S.; Murdock, A.B.; Doneghan, G.B.; Bas, T.L. 2010. Human activities on the deep seafloor in the northeast Atlantic: An assessment of spatial extent. *PLoS ONE*, 5(9): e12730.
- Bennett, E.; Neiland, A.; Anang, E.; Bannerman, P.; Rahman, A.A.; Huq, S.; Bhuiya, S.; Day, M.; Fulford-Gardiner, M.; Clerveaux, W. 2001. Towards a better understanding of conflict management in tropical fisheries: evidence from Ghana, Bangladesh and the Caribbean. *Marine Policy*, 25: 365-376. [https://doi.org/10.1016/S0308-597X\(01\)00022-7](https://doi.org/10.1016/S0308-597X(01)00022-7).
- Berkes, F.; Feeny, D.; Mccay, B.J.; Acheson, J.M. 1989. The benefits of the commons. *Nature*, 340: 91-93.
- Berkes, F.; Hughes, T.P.; Steneck, R.S.; Wilson, J.A.; Bellwood, D.R.; Crona, B.; Folke, C.; Gunderson, L.H.; Leslie, H.M.; Norberg, J.; Nyström, M.; Olsson, P.; Österblom, H.; Scheffer, M.; Worm, B. 2006. Globalization, roving bandits, and marine resources. *Science* 311: 1557-1558.
- Blanchard, J.L.; Jennings, S.; Holmes, R.; Harle, J.; Merino, G.; Allen, J.I.; Holt, J.; Dulvy, N.K.; Barange, M. 2012. Potential consequences of climate change for primary production and fish production in large marine ecosystems. *Phil. Trans. R. Soc. B* (2012) 367, 2979-2989. doi:10.1098/rstb.2012.0231
- Branch, T.A.; Hilborn, R.; Haynie, A.C.; Fay, G.; Flynn, L.; Griffiths, J.; Marshall, K.N.; Randall, J.K.; Scheuerell, J.M.; Ward, E.J.; Young, M. 2006. Fleet dynamics and fishermen behavior: lessons for fisheries managers. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 63: 1647-1668.
- Branch, T.A.; Watson, R.; Fulton, E.A.; Jennings, S.; McGilliard, C.R.; Pablico, G.T.; Ricard, D.; Tracey, S.R. 2010. The trophic fingerprint of marine fisheries. *Nature* 468: 431-435.

Brasil. 1988. Lei nº 7.661, de 16 de maio de 1988. Institui o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro e dá outras providências.

Brasil. 2000. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências.

Brasil. 2018a. Decreto nº 9.312, de 19 de março de 2018. Cria a Área de Proteção Ambiental do Arquipélago de Trindade e Martim Vaz e o Monumento Natural das Ilhas de Trindade e Martim Vaz e do Monte Columbia. *Diário Oficial da União*, 20 mar. 2018, Edição 54, Seção 1, pg. 1.

Brasil. 2018b. Decreto nº 9.313, de 19 de março de 2018. Cria a Área de Proteção Ambiental do Arquipélago de São Pedro e São Paulo e o Monumento Natural do Arquipélago de São Pedro e São Paulo. *Diário Oficial da União*, 20 mar. 2018, Edição 54, Seção 1, pg. 3.

Bronz, D. 2009. *Pescadores do petróleo: políticas ambientais e conflitos territoriais na Bacia de Campos*, RJ. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais. 200p.

Cadrin, S.X.; Dickey-Collas, M. 2015. Stock assessment methods for sustainable fisheries. *ICES Journal of Marine Science* 72(1), 1-6. doi:10.1093/icesjms/fsu228

Caillet, G.M.; Andrews, A.H.; Wakefield, W.W.; Moreno, G.; Rhodes, K.L. 1999. Fish fauna and habitat analyses using trawls, camera sleds and submersibles in benthic deep-sea habitats off central California. *Oceanologica Acta*, 22 (6): 579-592.

Cappo, M.; Speare, P.; De'ath, G. 2004. Comparison of baited remote underwater video stations (BRUVS) and prawn (shrimp) trawls for assessment of fish biodiversity in interreefal areas of the Great Barrier Reef Marine Park. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 302: 123-152.

Carruthers, T.R.; Punt, A. E.; Walters, C.J.; MacCall, A.; McAllister, M.K.; Dick, E.J.; Cope, J. 2014. Evaluating methods for setting catch limits in a data-limited fisheries. *Fish. Res.* 153: 48-68.

Castello, J.P. 2010. O futuro da pesca e da aquicultura marinha no Brasil: a pesca costeira. *Ciência e Cultura*, São Paulo, 62(3): 32-35.

Castro, S.M.; Almeida, J.R. 2012. Dragagem e conflitos ambientais em portos clássicos e modernos: uma revisão. *Soc. & Nat.*, 24(3):519-534.

Chassot, E.; Bonhommeau, S.; Dulvy, N.K.; Mélin, F.; Watson, R.; Gascuel, D.; Le Pape, O. 2010. Global primary production constrains fisheries catches. *Ecology Letters*, 13: 495-505.

Cheung, W.W.L.; Watson, R.; Pauly, D. 2013. Signature of ocean warming in global fisheries catch. *Nature*, 497: 365-369.

Chossid, D.M.; Pol, M.; Szymanski, M.; Mirarchi, F.; Mirarchi, A. 2012. Development and observations of a spiny dogfish *Squalus acanthias* reduction device in a raised footrope silver hake *Merluccius bilinearis* trawl. *Fisheries Research* 114 (2012) 66-7.

Claisse, J.T.; Pondella, D.J.; Love, M.; Zahn, L.A.; Williams, C.M.; Williams, J.P.; Bull, A.S.

2014. Oil platforms off California are among the most productive marine fish habitats globally. *PNAS*, 111(43):15462-15467. [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1411477111](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1411477111)
- Cochrane, K.L. (ed.) 2002. A Fishery Manager's Guidebook – Management Measures and Their Application. *Fisheries Technical Paper* 424. 231p.
- Cochrane, K.L. (ed.) 2005. *Guía del administrador pesquero*. Medidas de ordenación y su aplicación. FAO Documento Técnico de Pesca. No. 424. Roma, FAO. 2005. 231p.
- Constance, D.H.; Bonanno, A. 2000. Regulating the global fisheries: the World Wildlife Fund, Unilever, and the Marine Stewardship Council. *Agric. Human Values*, 17: 125-139.
- Costa, P.L.; Valderrama, P.R.C.; Madureira, L.A.S.P. 2016. Relationships between environmental features, distribution and abundance of the Argentine anchovy, *Engraulis anchoita*, on the South West Atlantic Continental Shelf. *Fisheries Research*, 173: 229-235.
- Côté, I.M.; Perrow, M.R. 2006. Fish. In: Sutherland WJ (ed.). *Ecological census techniques*. 2nd Edition: 250-277. Cambridge University Press, Cambridge.
- Costello, C.; Ovando, D.; Clavelle, T.; Kent Strauss, C.; Hilborn, R.; Melnychuck, M.C.; Branch, T.A.; Gaines, S.D. Szuwalski, C.S.; Cabral, R.B.; Rader, D.N.; Leland, A. 2016. Global fisheries prospects under contrasting management regimes. *PNAS*, 113(18): 5125-5129.
- Cunha, L.H.O. 2001. *Conhecimento e práticas tradicionais. Da apropriação da natureza à construção de territórios pesqueiros*. GEOUSP – Espaço e Tempo, 14: 119-125.
- Cunha, D.M.C.G.; Resgalla Jr., C. 2016. Mechanical undulating towed vehicle for collection of oceanographic data. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 44(5): 926-934.
- Cury, F.; Shannon, L.; Shin, Y. 2001. The functioning of marine ecosystems. *Reykjavik Conference on Responsible Fisheries in the Marine Ecosystem 3 Reykjavik*, Iceland, 1-4 Oct. 2001.
- Dekker, A. G.; Brando, V. E.; Anstee, J. M. 2005. Retrospective seagrass change detection in a shallow coastal tidal Australian lake. *Remote Sensing of Environment*, 97: 415-433.
- De Souza, E.N.; Boerder, K.; Matwin, S.; Worm, B. 2016. Improving fishing pattern detection from satellite AIS using data mining and machine learning. *PLoS ONE* 11(7), e0158248.
- Dias, M.C. 2012. *Diagnóstico das pescarias industriais do Sudeste e Sul do Brasil frente aos padrões internacionais de certificação ambiental: panorama atual, ações e perspectivas*. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade do Vale do Itajaí, 115p.
- Dias, M.C.; Perez, J.A.A. 2016. Multiple strategies developed by bottom trawlers to exploit fishing resources in deep areas off Brazil. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 44(5): 1055-1068.

Ehler, C.N. 2018. Marine spatial planning. In: Yates, K.L.; Bradshaw, C.J.A. (eds.) *Offshore Energy and Marine Spatial Planning*. pp. 6-17.

Ehler, C.; F. Douvère. 2009. *Marine Spatial Planning: a step-by-step approach toward ecosystem-based management*. Intergovernmental Oceanographic Commission and Man and the Biosphere Programme. IOC Manual and Guides No. 53, ICAM Dossier No. 6. Paris: UNESCO. <http://www.unesco-ioc-marinesp.be/uploads/documentenbank/d87c0c421da4593fd93bbee1898e1d51.pdf>

Eigaard, O.R.; Bastardie, F.; Breen, M.; Dinesen, G.E.; Hintzen, N.T.; Laffargue, P.; Nielsen, J.R.; Nilsson, H.; O'Neil, F.; Polet, H.; Reid, D.G.; Sala, A.; Sköld, M.; Smith, C.; Sørensen, T.K.; Tully, O.; Zengin, M.; Rijnsdorp, A.D. 2016. Estimating seabed pressure from demersal trawls, seines, and dredges based on gear design and dimensions. *ICES Journal of Marine Science*, 73: 27-43.

Essington, T.E.; Beaudreau, A.H.; Wiedenmann, J. 2006. Fishing through marine food webs. *PNAS* 103(9): 3171-3175.

FAO, 1996. *Technical Guidelines for Responsible Fisheries – Precautionary Approach to Capture Fisheries and Species Introductions*. No. 2. FAO, Rome. 54p.

FAO, 2002. Implementation of the International Plan of Action to Prevent, Deter and Eliminate Illegal, Unreported and Unregulated Fishing. *FAO Technical Guidelines for Responsible Fisheries*. No. 9. Rome, FAO. 2002, 122p.

FAO, 2005. *Guidelines for the ecolabelling of fish and fishery products from marine capture fisheries*. FAO, Rome. 90 pp.

FAO, 2011. Fisheries management: Marine protected areas and fisheries. *FAO Technical Guidelines for Responsible Fisheries*. No. 4, Suppl. 4., Rome. 198p.

FAO, 2014. *The State of World Fisheries and Aquaculture*. Opportunities and challenges. 2014. FAO, Rome. 243 pp. <http://www.fao.org/fishery/sofia/en>

FAO, 2016. *The State of World Fisheries and Aquaculture: contributing to food security and nutrition for all*. FAO, Rome. 200 pp.

Feeny, D.; Berkes, F.; Mccay, B.J.; Acheson, J. M. 1990. The tragedy of commons - Twenty-two years later. *Human Ecology*, 18:1-19.

Fernandes, P.G.; Stevenson, P.; Brierley, A.S.; Armstrong, F.; Simmonds, E.J. 2003. Autonomous underwater vehicles: Future platforms for fisheries acoustics. *ICES Journal of Marine Science*, 60(3): 684-691.

Finkbeiner, E.M.; Bennett, N.J.; Frawley, T.H.; Mason, J.G.; Briscoe, D.K.; Brooks, C.M.; Ng, C.A.; Ourens, R.; Seto, K.; Swanson, S.S.; Urteaga, J.; Crowder, L.B. 2017. Reconstructing overfishing: Moving beyond Malthus for effective and equitable solutions. *Fish and Fisheries*, 18(6):1180-1191. <https://doi.org/10.1111/faf.12245>

Fiori, L.; Doshi, A.; Martinez, E.; Orams, M.B.; Bollard-Breen, B. 2017. The use of unmanned aerial systems in marine mammal research. *Remote Sensing* 9(6), 543. <https://doi.org/10.3390/rs9060543>

- Foley, M.M.; Halpern, B.S.; Micheli, F.; Armsby, M.H.; Caldwell, M.R.; Crain, C.M.; Prahler, E.; Rohr, N.; Sivas, D.; Beck, M.W.; Carr, M.H.; Crowder, L.B.; Duffy, J.E.; Hacker, S.D.; Mcleod, K.L.; Palumbi, S.R.; Peterson, CH.; Regan, H.M.; Ruckelshaus, M.H.; Sandifer, P.A.; Steneck, R.S. 2010. Guiding ecological principles for marine spatial planning. *Marine Policy* 34: 955-966. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2010.02.001>
- Fondo, E.N.; Chaloupka, M.; Heymans, J.J.; Skilleter, G.A. 2015. Banning fisheries discards abruptly has a negative impact on the population dynamics of charismatic marine megafauna. *PLoS ONE* 10(12): e0144543. doi:10.1371/journal.pone.0144543.
- Free, C.M.; Jensen, O.P.; Wiedenmann, J.; Deroba, J.J. 2017. The refined ORCS approach: A catch-based method for estimating stock status and catch limits for data-poor fish stocks. *Fish. Res.* 193: 60-70.
- Freire, K.M.F.; Aragão, J.A.N.; Araújo, A.R.R.; Ávila-da-Silva, A.O.; Bispo, M.C.S.; Velasco, G.; Carneiro, M.H.; Gonçalves, F.D.S.; Keunecke, A.K.; Mendonça, J.T.; Morok, P.S.; Mottal, F.S.; Olavo, G.; Pezzuto, P.R.; Santana, R.F.; Santos, R.A.; Trindade-Santos, I.; Vasconcelos, J.A.; Vianna, M.; Divovich, E. 2015. Fisheries catch reconstructions for Brazil's mainland and oceanic islands. *Fisheries Centre Research Reports* 23(4), 48p.
- Friedland, K.D.; Stock, C.; Drinkwater, K.F.; Link, J.S.; Leaf, R.T.; Shank, B.V.; Rose, J.M.; Pilskaln, C.H.; Fogarty, M.J. 2012. Pathways between Primary Production and Fisheries Yields of Large Marine Ecosystems. *PLoS ONE* 7(1): e28945. doi:10.1371/journal.pone.0028945
- Friedlander, A.M.; Ballesteros, E.; Fay, M.; Sala, E. 2014. Marine communities on oil platforms in Gabon, West Africa: high biodiversity oases in a low biodiversity environment. *PLoS ONE*, 9(8): e103709. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0103709>
- Garcia, S.M.; Rosemberg, A.A. 2010. Food security and marine capture fisheries: characteristics, trends, drivers and future perspectives. *Phil. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.*, 365: 2869-2880. doi:10.1098/rstb.2010.0171
- Gari, S.R.; Newton, A.; Icely, J.D. 2015. A review of the application and evolution of the DPSIR framework with an emphasis on coastal social-ecological systems. *Ocean & Coastal Management* 103 (2015) 103: 63-77
- Gasalla, M.A.; Gandini, F.C. 2016. The loss of fishing territories in coastal areas: the case of seabob-shrimp small-scale fisheries in São Paulo, Brazil. *Maritime Studies* 15(9):2-19. <https://doi.org/10.1186/s40152-016-0044-2>
- Gell, F.R.; Roberts, C.M. 2003. Benefits beyond boundaries: the fishery effects of marine reserves. *Trends in Ecology and Evolution*, 18(9):448-455.
- Gerritsen, H.; Lordan, C. 2011. Integrating vessel monitoring systems (VMS) data with daily catch data from logbooks to explore the spatial distribution of catch and effort at high resolution. *ICES Journal of Marine Science*, 68(1): 245-252.
- Gianni, M. 2004. High seas bottom trawl fisheries and their impacts on the biodiversity of vulnerable deep-sea ecosystems: options for international actions. *IUCN*,

Gland, Switzerland.

Gigliotti, E.S.; Gherardi, D.F.M.; Paes, E.T.; Souza, R.B.; Katsuragawa, M. 2010. Spatial analysis of egg distribution and geographic changes in the spawning habitat of the Brazilian sardine *Sardinella brasiliensis*. *Journal of Fish Biology*, 77(10): 2248-2267.

Gilman, E.; Chopin, F.; Suuronen, P.; Kuemlangan, B. 2016. Abandoned, lost or otherwise discarded gillnets and trammel nets: methods to estimate ghost fishing mortality, and the status of regional monitoring and management, *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 600*. Rome. Italy.

Groeneveld, R.A.; Bartelings, H.; Börger, T.; Bosello, F.; Buisman, E.; Delpiazzi, E.; Eboli, F.; Fernandes, J.A.; Hamon, K.G.; Hattam, C.; Loureiro, M.; Nunes, P.A.L.D.; Piwowarczyk, J.; Schasfoort, F.E.; Simons, S.L.; Walker, A.N. 2018. Economic impacts of marine ecological change: Review and recent contributions of the VECTORS project on European marine waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 201:152-163. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.04.002>

Groombridge, B; Jenkins, M.D. 2002. *World Atlas of Biodiversity*. Prepared by the UNEP World Conservation Monitoring Centre, University of California Press, Berkeley.

Gulland, J.A. 1983. *Fish Stock Assessment: a manual of basic methods*. FAO/ Wiley Series on Food and Aquaculture. John Wiley & Sons, 223p.

Haimovici, M., Cergole, M.C.; Lessa, R.P.; Madureira, L.S.; Jablonski, S.; Rossi-Wongstchowski, C.L.D.B. 2006. Capítulo 2. Panorama Nacional. In. MMA/ SQA. *Programa REVIZEE: Avaliação do Potencial Sustentável de Recursos Vivos na Zona Econômica Exclusiva*. Relatório Executivo, pp. 79-126.

Halpern, B.S.; Walbridge, S.; Selkoe, K.A.; Kappel, C.V.; Micheli, F.; D'Agrosa, C.; Bruno, J.F.; Casey, K.S.; Ebert, C.; Fox, H.E.; Fujita, R.; Heinemann, D.; Lenihan, H.S.; Madin, E.M.; Perry, M.T.; Selig, E.R.; Spalding, M.; Steneck, R.; Watson, R. 2008. A global map of human impact on marine ecosystems. *Science*; 319(5865):948-52. <https://doi.org/10.1126/science.1149345>.

Hanna, S.S. 1999. Strengthening governance of ocean fishery resources. *Ecological Economics* 31: 275-286.

Helvey, M. 2002. Are southern California oil and gas platforms essential fish habitats? *ICES Journal of Marine Science*, 59: S266-S271. <https://doi.org/10.1006/jmsc.2002.1226>

Hicks, C.C.; Crowder, L.B.; Graham, N.A.J.; Kittinger, J.N.; Le Cornu, E. 2016. Social drivers forewarn of marine regime shifts. *Front. Ecol. Environ.* 14(5): 252-260, [doi:10.1002/fee.1284](https://doi.org/10.1002/fee.1284).

Hilborn, R. 2007. Defining success in fisheries and conflicting objectives. *Marine Policy*, 31:153-158.

Hilborn, R. 2016. Marine biodiversity needs more than protection. *Nature*, 535: 224-226.

Hilborn, R.; Walters, C.J. 1992. *Quantitative Fisheries Stock Assessment: Choice, Dynamics and Uncertainty*. Chapman & Hall, 570p.

- Hilborn, R.; Banobi, J.; Hall, S.J.; Puclowsky, T.; Walsworth, T.E. 2018. The environmental costs of animal source foods. *Front. Ecol. Environ* 16(6): 329-335, doi: 10.1002/fee.1822.
- HLPE, 2014. *Sustainable fisheries and aquaculture for food security and nutrition*. A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security, Rome 2014.
- Hobday, A. J.; Smith, A.; Stobutzki, I. C.; Bulman, C.; Daley, R.; Dambacher, J. M.; Deng, R. A.; Dowdney, J.; Fuller, M.; Furlani, D.; Griffiths, S. P.; Johnson, D.; Kenyon, R.; Knuckey, I. A.; Ling, S. D.; Pitcher, R.; Sainsbury, K. J.; Sporcic, M.; Smith, T.; Turnbull, C.; Walker, T. I.; Wayte, S. E.; Webb, H.; Williams, A.; Wise, B. S.; Zhou, S. 2011. Ecological risk assessment for the effects of fishing. *Fisheries Research*, 108: 372-384.
- Holmes, J.A.; Cronkite, G.M.W.; Enzenhofer, J.; Mulligan, T.J. 2006. Accuracy and precision of fish-count data from a "dual-frequency identification sonar" (DIDSON) imaging system. *ICES Journal of Marine Science*, 63: 543-555.
- Horta, S.; Defeo, O. 2012. The spatial dynamics of the whitemouth croaker artisanal fishery in Uruguay and interdependencies with the industrial fleet. *Fisheries Research*, 125-126: 121-128.
- Horta e Costa, B.; Claudet, J.; Franco, G.; Erzini, K.; Caro, A.; Gonçalves, E.J. 2016. A regulation-based classification system for Marine Protected Areas (MPAs). *Marine Policy*, 72: 192-8. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2016.06.021>
- Hu, B.; Jiang, X.; De Souza, E.N.; Pelot, R.; Matwin, S. 2016. Identifying fishing activities from AIS data with Conditional Random Fields. Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems. *ACSIS*, 8: 47-52.
- IBGE, 2011. *Atlas Geográfico das Zonas Costeiras e Oceânicas do Brasil*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 176p.
- Imoto, R.D.; Carneiro, M.H.; Ávila-da-Silva, A.O. 2016. Spatial patterns of fishing fleets on the Southeastern Brazilian Bight. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 44(5): 1005-1018.
- Jablonski, S. 2008. The interaction of the oil and gas offshore industry with fisheries in Brazil: The "Stena Tay" experience. *Braz. J. Oceanogr.*, v. 56, p. 289-296.
- Jablonski, S.; Azevedo, A.F.; Moreira, L.H.A. 2006. Fisheries and conflicts in Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brazil. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 49(1):79-91.
- Jackson, J.B.C.; Kirby, M.X.; Berger, W.H.; Bjorndal, K.A.; Botsford, L.W.; Bourque, B.J.; Bradbury, R.H.; Cooke, R.; Erlandson, J.; Estes, J.A.; Hughes, T.P.; Kidwell, S.; Lange, C.B.; Lenihan, J. 2001. Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems. *Science*, 293: 629-838.
- Janssen, H.; Bastardie, F.; Eero, M.; Hamon, K.G.; Hinrichsen, H.H.; Marchal, P.; Nielsen, J.R.; Le Pape, O.; Schulze, T.; Simons, S.; Teal, L.R.; Tidd, A. 2018. Integration of fisheries into marine spatial planning: Quo vadis?. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 201:105-113. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2017.01.003>

- Jennings, S.; Kaiser, M.J.; Reynolds, J.D. 2001. *Marine Fisheries Ecology*. Blackwell Science Ltd., Oxford. 417p.
- Jennings, S.; Mélin, F.; Blanchard, J.L.; Forster, R.M.; Dulvy, N.K.; Wilson, R.W. 2008. Global-scale predictions of community and ecosystem properties from simple ecological theory. *Proc. R. Soc. B*: 275: 1375–1383. doi:10.1098/rspb.2008.0192
- Jennings, S.; Lee, J.; Hiddink, J.G. 2012. Assessing fishing footprints and the trade-offs between landings value, habitat sensitivity, and fishing impacts to inform marine spatial planning and an ecosystem approach. *ICES Journal of Marine Science* 69(6): 1053–1063. doi:10.1093/icesjms/fss050.
- Kaiser, M.J., Collie, J.S.; Hall, S.J.; Jennings, S.; Poiner, I.R. 2002. Modification of marine habitats by trawling activities: prognosis and solutions. *Fish Fish.*, 3: 114–136.
- Kaiser, M.J.; Clarke, K.R.; Hinz, H.; Austen, M.C.V.; Somerfield, P.J.; Karakassis, I. 2006. Global analysis of response and recovery of benthic biota to fishing. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 311: 1–14.
- Kark, S.; Brokovich, E.; Mazor, T.; Levin, N. 2015. Emerging conservation challenges and prospects in an era of offshore hydrocarbon exploration and exploitation. *Conservation Biology*, 29(6): 1573–158.
- Kathijotes, N. 2013. Keynote: Blue economy - environmental and behavioural aspects towards sustainable coastal development. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 101:7–13. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.07.173>
- Katsiaras, N.; Simboura, N.; Tsangaris, C.; Hatzianestis, I.; Pavlidou, A.; Kapsimalis, V. 2015. Impacts of dredged-material disposal on the coastal soft-bottom macrofauna, Saronikos Gulf, Greece. *Science of the Total Environment*, 508: 320–330. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.11.085>
- Kelleher, K. 2008. *Discards in the world's marine fisheries*. An update. FAO Fisheries Technical Paper. No. 470. Rome, FAO. 2005. 131p.
- Kenny, A.J.; Cato, I.; Desprez, M.; Fader, G.; Schuttenhelm, R.T.E.; Side, J. 2003. An overview of seabed-mapping technologies in the context of marine habitat classification. *ICES Journal of Marine Science*, 60: 411–418.
- King, M. 2007. *Fisheries Biology, Assessment and Management*. Blackwell, Oxford. 382p.
- Kiszka, J.J.; Mourier, J.; Gastrich, K.; Heithaus, M.R. 2016. Using unmanned aerial vehicles (UAVs) to investigate shark and ray densities in a shallow coral lagoon. *Marine Ecology Progress Series*, 560: 237–242.
- Klemas, V. 2013. Fisheries applications of remote sensing: An overview. *Fisheries Research*, 148: 124–136.
- Klinger, D.H.; Eikeset, A.M.; Davíðsdóttir, B.; Winter, A.M.; Watson, J.R. 2018. The mechanics of blue growth: Management of oceanic natural resource use with multiple, interacting sectors. *Marine Policy*, 87:356–362. <https://doi.org/10.1016/j.mar.pol.2017.09.025>.

- Kroodsmas, D.A.; Mayorga, J.; Hochberg, T.; Miller, N.A.; Boerder, K.; Ferretti, F.; Wilson, A.; Bergman, B.; White, T.D.; Block, B.A.; Woods, P.; Sullivan B.; Costello, C.; Worm, B. 2018. Tracking the global footprint of fisheries. *Science*, 359: 904-908. <https://doi.org/10.1126/science.aao5646>
- Lallemand, P.; Bergh M.; Hansen, M.; Purves, M. 2016. Estimating the economic benefits of MSC certification for the South African hake trawl fishery. *Fisheries Research*, 182:98-116.
- Langlois, T.J.; Fitzpatrick, B.R.; Fairclough, D.V.; Wakefield, C.B.; Hesp, S.A.; McLean, D.L.; Harvey, E.S.; Meeuwig, J.J. 2012. Similarities between line fishing and baited stereo-video estimations of length-frequency: novel application of Kernel density estimates. *PLoS ONE* 7(11): e45973.
- Lebreton, L.; Slat, B.; Ferrari, F.; Sainte-Rose, B.; Aitken, J.; Marthouse, R.; Hajbane S.; Cunsolo, S.; Schwarz, A.; Levivier, A.; Noble, K.; Debeljak, P.; Maral, H.; Schoeneich-Argent, R.; Brambini, R.; Reisser, J. 2018. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Nature Scientific Reports*, 8:4666. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>
- Lee, J.; South, A.B.; Jennings, S. 2010. Developing reliable, repeatable, and accessible methods to provide high-resolution estimates of fishing-effort distributions from vessel monitoring system (VMS) data. *ICES Journal of Marine Science*, 67(6): 1260-1271.
- Lee, J.H.; Lee, C.W.; Cha, B.J. 2005. Dynamic simulation of tuna longline gear using numerical methods. *Fisheries Science*, 71(6): 1287-1294.
- Lemos, V.M.; Ávila Troca, D.F.; Castello, J.P.; Vieira, J.P. 2016. Tracking the Southern Brazilian schools of *Mugil liza* during reproductive migration using VMS of purse seiners. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 44(2): 238-246.
- Letessier, T.B.; Meeuwig, J.J.; Gollock, M.; Groves, L.; Bouchet, P.J.; Chapuis, L.; Vianna, G.M.S.; Kemp, K.; Koldewey, H.J. 2013. Assessing pelagic fish populations: The application of demersal video techniques to the mid-water environment. *Methods in Oceanography* 8: 41-55.
- 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.
- Løkkeborg, S. 2011. Best practices to mitigate seabird bycatch in longline, trawl and gillnet fisheries—efficiency and practical applicability. *Marine Ecology Progress Series*, 435: 285-303.
- Long, R.D.; Charles, A.; Stephenson, R.L. 2015. Key principles of marine ecosystem-based management. *Marine Policy* 57: 53-60.
- Ludwig, D.; Hilborn, R.; Walters, C. 1993. Uncertainty, resource exploitation, and conservation: lessons from history. *Science*, 260: 17-36.
- Madureira, L.A.S.P.; Habiaga, R.; Soares, C.; Weigert, S.; Ferreira, C.; Eliseire, D.; Duvoisin, A.C. 2005. Identification of acoustic records of the Argentinian calamar *Illex*

*argentinus* (Castellanos, 1960) along the outer shelf and shelf break of the south and southeast coast of Brazil. *Fisheries Research*, 73:251-257.

Malone, T.; Azzaro, M.; Bode, A.; Brown, E.; Duce, R.; Kamykowski, D.; Kang, S.H.; Ke-dong, Y.; Thorndyke, M.; Wang, J.; Park, C.; Calumpong, H.; Eghtesadi, P. 2016. Chapter 6. Primary Production, Cycling of Nutrients, Surface Layer and Plankton. Part III, Assessment of major ecosystem services from the marine environment (other than provisioning services). *The First Global Integrated Marine Assessment*. World Ocean Assessment I. United Nations.

Manski, S. 2017. Building the blockchain world: Technological commonwealth or just more of the same? *Strategic Change*, 26:511-522. <https://doi.org/10.1002/jsc.2151>

Marine Stewardship Council, 2010. *MSC Fishery Standard Principles and Criteria for Sustainable Fishing*. London.

Marinha do Brasil. 2013. *Normas da Autoridade Marítima para Tráfego e Permanência de Embarcações em Águas Jurisdicionais Brasileiras - NORMAM-08/DPC (1ª Revisão)*. [https://www.dpc.mar.mil.br/sites/default/files/normam08\\_0.pdf](https://www.dpc.mar.mil.br/sites/default/files/normam08_0.pdf)

Marinha do Brasil. 2014. *Norma da Autoridade Marítima para o Gerenciamento da Água de Lastro de Navios - NORMAM-20/DPC (1ª Revisão, 27/01/2014)*. <https://www.dpc.mar.mil.br/sites/default/files/normam20.pdf>

Martins, A. S.; Doxsey, J. R. 2006. Diagnóstico da Pesca no litoral do Espírito Santo. In: Isaac, V.; Martins, A.S.; Haimovici, M.; Filho, J.M.A. *A pesca marinha e estuarina do Brasil no início do século XXI: recursos, tecnologias, aspectos socioeconômicos e institucionais*. Belém: Ed. Universitária UFPA. 93-116p.

Martins, J.H.; Camanho, A.s.; Gaspar, M. 2012. A review of the application of driving forces - Pressure - State - Impact - Response framework to fisheries management. *Ocean & Coastal Management* 69:273-281.

Maunder, M.N.; Piner, K. 2015. Contemporary fisheries stock assessment: many issues still remain. *ICES Journal of Marine Science* 72(1): 7-18.

McClanahan, T.; Allison, E.H; Cinner, J.E. 2013. Managing fisheries for human and food security. *Fish and Fisheries*, 16(1):78-103. <https://doi.org/10.1111/faf.12045>

Melvin, E.F.; Guy, T.J.; Read, L.B. 2014. Best practice seabird bycatch mitigation for pelagic longline fisheries targeting tuna and related species. *Fisheries Research*, 149: 5-18.

Mora, C.; Myers, R.; Coll, M.; Libralato, S.; Pitcher, T. J.; Sumaila, R.U.; Zeller, D.; Watson, R.; Gaston, K.J.; Worm, B. 2009. Management Effectiveness of the World's Marine Fisheries. *PLoS Biol* 7(6): e1000131. doi:10.1371/journal.pbio.1000131

Morato, T.; Watson, R.; Pitcher, T.J.; Pauly, D. 2006. Fishing down the deep. *Fish and Fisheries*, 7: 24-34.

MPA 2012. *Boletim Estatístico da Pesca e Aquicultura - Brasil 2010*. Ministério da Pesca e Aquicultura, Brasília, fev. 2012, 128p.

- Mumby, P. J.; Green, E. 2000. Mapping seagrass beds. In: Edwards, E.J. (ed.). *Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal Management*. Paris, UNESCO, 175-182.
- Murawski, S.A.; Wigley, S.E.; Fogarty, M.J.; Rago, P.J.; Mountain, D.G. 2005. Effort distribution and catch patterns adjacent to temperate MPAs. *ICES Journal of Marine Science*, 62(6): 1150-1167.
- Murphy, H.M.; Jenkins, G.P. 2010. Observational methods used in marine spatial monitoring of fishes and associated habitats: a review. *Marine and Freshwater Research*, 61: 236-252.
- National Research Council. 1998. *Improving Fish Stock Assessments*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/5951>.
- Nguyen, T.X.; Winger, P.D.; Orr, D.; Legge, G.; Delouche, H.; Gardner, A. 2015. Computer simulation and flume tank testing of scale engineering models: How well do these techniques predict full-scale at-sea performance of bottom trawls? *Fisheries Research*, 161: 217-225.
- Norse, E.A.; Brooke, S.; Cheung, W.W.L.; Clark, M.R.; Ekeland, I.; Froese, R.; Gjerde, K.M.; Haedrich, R.L.; Heppell, S.S.; Morato, T.; Morgan, L.E.; Pauly, D.; Sumaila, R.; Watson, R. 2012. Sustainability of deepsea fisheries. *Mar. Policy*, 36: 307-320.
- NRDC, 2014. *Improving the Science and Management of Data-Limited Fisheries: An Evaluation of Current Methods and Recommended Approaches*. Natural Resources Defense Council, report R14 - 09 - B, Oct. 2014, 38p.
- O'Connor, M.I.; Piehler, M.F.; Leech, D.M.; Anton, A.; Bruno, J.F. 2009. Warming and Resource Availability Shift Food Web Structure and Metabolism. *PLoS Biol* 7(8): e1000178. doi:10.1371/journal.pbio.1000178
- O'Farrell, S.; Sanchirico, J.N.; Chollett, I.; Cockrell, M.; Murawski, S.A.; Watson, J.T.; Haynie, A.; Strelcheck, A.; Perruso, L. 2017. Improving detection of short-duration fishing behaviour in vessel tracks by feature engineering of training data. *ICES Journal of Marine Science*, 74(5): 1428-1436.
- Oliveira, P.C.; Di Benedetto, A.P.M.; Bulhões, E.M.R.; Zappes, C.A. 2016. Artisanal fishery versus port activity in southern Brazil. *Ocean & Coastal Management*, 129:49-57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.05.005>
- Oro, D.; Genovart, M.; Tavecchia, G.; Fowler, M.S.; Martínez-Abarain, A. 2013. Ecological and evolutionary implications of food subsidies from humans. *Ecology Letters* 16: 1501-1514.
- Parker, R.W.R.; Blanchard, J.L.; Gardner, C.; Green, B.S.; Hartmann, K.; Tyedmers, P.; Watson, R. 2018. Fuel use and greenhouse gas emissions of world fisheries. *Nature Climate Change* 8: 333-337.
- Parkes, G.; Young, J.A.; Walmsley, S.F.; Abel, R.; Harman, J.; Horvat, P.; Lem, A.; MacFarlane, A.; Mens, M.; Nolan, C. 2010. Behind the signs - a global review of fish sustainability information schemes, *Reviews in Fisheries Science*, 18:4, 344-356.

- Pauly, D.; Christensen, V. 1995. Primary production required to sustain global fisheries. *Nature*, 274: 255-257.
- Pauly, D.; Zeller, D. 2016. Catch reconstructions reveal that global marine fisheries catches are higher than reported and declining. *Nature Communications* 7: 10244, DOI: 10.1038/ncomms10244
- Pauly, D.; Zeller, D. 2017. Comments on FAOs State of World Fisheries and Aquaculture (SOFIA2016). *Marine Policy* 7:176-181.
- Pauly, D.; Christensen, V.; Dalsgaard, J.; Froese, R.; Torres Jr., F. 1998. Fishing down marine food webs. *Science*. 279 (5352):860-863.
- Pauly, D.; Christensen, V.; Guénette, S.; Pitcher, T.J.; Sumaila, U.R.; Walters, C.J.; Watson, R.; Zeller, D. 2002. Towards sustainability in world fisheries. *Nature*, 418(8): 689-685.
- Pauly, D.; Christensen, V.; Walters, C. 2000. Ecopath, Ecosim and Ecospace as tools for evaluating ecosystems impact of fisheries. *ICES Journal of Marine Science*, 57: 697-706.
- Pendleton, L.H.; Ahmadi, G.N.; Browman, H.I.; Thurstan, R.H.; Kaplan, D.M.; Bartolino, V. 2017. Debating the effectiveness of marine protected areas. *ICES Journal of Marine Science*, 75(3):1156-1159 doi:10.1093/icesjms/fsx154
- Perez, J.A.A.; Wahrlich, R.; Pezzuto, P.R.; Schwingel, P.R.; Lopes, F.R.A.; Rodrigues-Ribeiro, M. 2003. Deep-sea fishery off southern Brazil: Recent trends of the Brazilian fishing industry. *Journal of Northwest Atlantic Fishery Science*, 31: 1-18.
- Perez, J.A.A., Pezzuto, P.R.; Wahrlich, R.; Soares, A.L.S. 2009. Deep-water fisheries in Brazil: history, status and perspectives. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 37(3): 513-541.
- Perez, J.A.A.; Yasunaka, B.F.O.; Visintin, M. 2018. The behavior of the Argentine short-fin squid (*Illex argentinus*) exposed to bottom trawl gear off Southern Brazil. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 46(5): 924-934.
- Perez-Ramirez, M.; Phillips, B.; Lluch-Belda, D.; Lluch-Cota, S. 2012. Perspectives for implementing fisheries certification in developing countries. *Marine Policy* 36(1):297-302.
- Peris-Mora, E.; Diez Orejas, J.M.; Subirats A.; Ibáñez S.; Alvarez, P. 2005. Development of a system of indicators for sustainable port management. *Marine Pollution Bulletin*, 50: 1649-1660.
- Perry, A.L.; Low, P.J.; Ellis, J.R.; Reynolds, J.D. 2005. Climate change and distribution shifts in marine fishes. *Science*, 308(5730):1912-1915. <https://doi.org/10.1126/science.1111322>
- Pezzuto, P.R.; Mastella-Benincá, E. 2015. Challenges in licensing the industrial double-rig trawl fisheries in Brazil. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 43(3): 495-513.
- Pham, C.K.; Diogo, H.; Menezes, G.; Porteiro, F.; Braga-Henriques, A.; Vanderperre, F.; Morato, T. 2014. Deep-water longline fishing has reduced impact on Vulnerable Marine

Ecosystems. *Sci. Rep.* 4:4837.

Pikitch, E.K.; Santora, C.; Babcock, E.A.; Bakun, A.; Bonfil, R.; Conover, D.O.; Dayton, P.; Doukakis, P.; Fluharty, D.; Heneman, B.; Houde, E.D; Link, J.; Livingstone, P.A.; Mangel, M.; McAllister, M.K.; Pope, J.; Sainsbury, K.J. 2004. Ecosystem-Based Fishery Management. *Science*, 305: 346-347.

Pio, V.M., Pezzuto, P.R.; Poblete. E.G.; Wahrlich, R. 2016. A cost analysis inter-fleet of the gillnet industrial fisheries in southeastern Brazil: an essential tool in fisheries management. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 44(5):1096-1115.

Plagányi, É.E. 2007. *Models for an ecosystem approach to fisheries*. FAO Fisheries Technical Paper. No. 477. Rome, FAO. 2007. 108p.

Port, D.; Perez, J.A.A.; Menezes, J.T. 2016a. The evolution of the industrial trawl fishery footprint off southeastern and southern Brazil. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 44(5): 908-925.

Port, D.; Perez, J. A. A.; Menezes, J. T; 2016b. Energy direct inputs and greenhouse gas emissions of the main industrial trawl fishery of Brazil. *Mar. Pollut. Bull.* 107: 251-260.

Potts, J.; Wilkings, A.; Lynch, M.; Mcfatridge, S. 2016. *State of Sustainability Initiatives Review: Standards and the Blue Economy*. International Institute for Sustainable Development, Manitoba, Canada. 207p.

Prates, A.P.; Blanc, D. 2007 *Áreas aquáticas protegidas como instrumento de gestão pesqueira*. MMA/SBF, Brasília. 272p.

Queirolo, D.; Gaete, E.; Montenegro, I.; Soriguer, M.C.; Erzini, K. 2012. Behaviour of fish by-catch in the mouth of a crustacean trawl. *Journal of Fish Biology*, 80(7): 2517-2527.

Queirolo, D.; DeLouche, H.; Hurtado, C. 2009. Comparison between dynamic simulation and physical model testing of new trawl design for Chilean crustacean fisheries. *Fisheries Research*, 97(1-2): 86-94.

Queirolo, D.; Wahrlich, R.; Molina, R.; Munari-Faccin, J.R.; Pezzuto, P.R. 2016. Industrial double rig trawl fisheries in the southeastern and southern Brazil: Characterization of the fleet, nets and trawl simulation. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 44: 898-907.

Rice, J.C.; Garcia, S. M. 2011. Fisheries, food security, climate change, and biodiversity: characteristic of the sector and perspectives on emerging issues. *ICES Journal of Marine Science*, 68(6): 1343-1353.

Roberts, C.M.; O'Leary, B.C.; McCauley, D.J.; Cury, P.M.; Duarte, C.M.; Lubchenko, J.; Pauly, D.; Sáenz-Arroyo, J.; Sumaila, U.R.; Wilson, R.W.; Worm, B.; Castilla, J.C. 2017. Marine reserves can mitigate and promote adaptation to climate change. *PNAS*, 114(24): 6167-6175.

Rosso, A.P.; Pezzuto, P.R. 2016. Spatial management units for industrial demersal fisheries in Southeastern and Southern Brazil. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 44(5): 985-1004.

- Rouse, S.; Kafas, A.; Catarino, R.; Peter, H. 2018. Commercial fisheries interactions with oil and gas pipelines in the North Sea: considerations for decommissioning. *ICES Journal of Marine Science*, 75(1), 279-286. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsx121>
- Sala, E.; Giakoumi, S. 2017. No-take marine reserves are the most effective protected areas in the ocean. *ICES Journal of Marine Science*. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsx059>
- Santana-Garcon, J.; Newman, S.J.; Harvey, E.S. 2014. Development and validation of a mid-water baited stereo-video technique for investigating pelagic fish assemblages. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 452: 82-90.
- Scheffer, M.; Carpenter, S.; de Young, B. 2005. Cascading effects of overfishing marine systems. *Trends in Ecology and Evolution* 20(11): 579-581.
- Schimmel, A.C.G.; Healy, T.R.; Johnson, D.; Immenga, D. 2010. Quantitative experimental comparison of single-beam, sidescan, and multibeam benthic habitat maps. *ICES Journal of Marine Science*, 67(8): 1766-1779.
- SEAP/ MMA/ MD, 2006. Instrução Normativa SEAP/MMA/MD n. 02, de 04 set. 2006. Programa Nacional de Rastreamento de Embarcações Pesqueiras por Satélite - PREPS.
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity 2005. *Handbook of the Convention on Biological Diversity Including its Cartagena Protocol on Biosafety*, 3rd. Ed. Montreal, Canada. Disponível em <https://www.cbd.int/doc/handbook/cbd-hb-all-en.pdf> (acesso em 18 abr. 2018).
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity 2011. *The Strategic Plan for Biodiversity 2011-2020 and the Aichi Biodiversity Targets*. United Nations Environment Programme, UNEP. Disponível em <https://www.cbd.int/sp/> (acesso em: 18 abr. 2018).
- Sethi, S.S.; Branch, T.A.; Watson, R. 2010. Global fishery development patterns are driven by profit but not trophic level. *PNAS* 107(27): 12163-12167.
- Sherman, K. 2008. The Large Marine Ecosystem Approach to Marine Resources Assessment and Management. In: Bianchi, G. & Skjoldal, H.R. *The Ecosystem Approach to Fisheries*. FAO, Rome: 47-75.
- Silva, A.C.T.; Valentin, J.L.; Vianna, M. 2015. Competition for space between fishing and exploratory oil drilling, observed from a drilling platform in the Espírito Santo Basin, southeastern Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography*, 63(1):33-41.
- Smale, D.A.; Kendrick, G.A.; Harvey, E.S.; Langlois, T.J.; Hovey, R.K.; Van Niel, K.P.; Waddington, K.I.; Bellchambers, L.M.; Pember, M.B.; Babcock, R.C.; Vanderklift, M.A.; Thomson, D.P.; Jakuba, M.V.; Pizarro, O.; Williams, S.B. 2012. Regional-scale benthic monitoring for ecosystem-based fisheries management (EBFM) using an autonomous underwater vehicle (AUV). *ICES Journal of Marine Science*, 69(6): 1108-1118.
- Small, C; Nicholls, R.J. 2003. A Global Analysis of Human Settlement in Coastal Zones. *Journal of Coastal Research*, 19(3):584-599.

- Smith, H.D. 2000. The industrialization of the world ocean. *Ocean & Coastal Management* 43:11-28. [https://doi.org/10.1016/S0964-5691\(00\)00028-4](https://doi.org/10.1016/S0964-5691(00)00028-4)
- Söffker, M.; Sloman, K.A.; Hall-Spencer, J.M. 2011. In situ observations of fish associated with coral reefs off Ireland. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 58(8): 818-825.
- Srinivasan, U.T.; Watson, R.; Sumaila, U.R. 2012. Global fisheries losses at the exclusive economic zone level, 1950 to present. *Marine Policy* 36: 544-549. doi:10.1016/j.marpol.2011.10.001
- Stanley, D.R; Awilson, C. 2000. Variation in the density and species composition of fishes associated with three petroleum platforms using dual beam hydroacoustics. *Fisheries Research*, 47(2-3):161-172.
- Stelfox, M.; Hudgins, J.; Sweet, M. 2016. A review of ghost gear entanglement amongst marine mammals, reptiles and elasmobranchs. *Marine Pollution Bulletin*, 111(1-2). <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.034>
- Stratoudakis, Y.; Mcconney, P.; Duncanc, J.; Ghofar, A.; Gitonga, N.; Mohamed, K.S.; Samoilys, M.; Symington, K.; Bourillon, L. 2016. Fisheries certification in the developing world: Locks and keys or square pegs in round holes? *Fisheries Research*, 182: 39-49.
- Stock, C.A.; John, J.G.; Rykaczewski, R.R., Asch, R.G.; Cheung, W.W.L.; Dunne, J.P.; Friedland, K.D.; Lam, V.W.Y.; Sarmiento, J.L.; Watson R.A. 2017. Reconciling fisheries catch and ocean productivity. *Proc Natl Acad Sci USA*, 114:E1441-E1449.
- Sumaila, U.R.; Cheung, W.W.L.; Lam, V.W.Y.; Pauly, D.; Herrick, S. 2011. Climate change impacts on the biophysics and economics of world fisheries. *Nature Climate Change*, 1: 449:456. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE1301>
- Swartz, W.; Sala, E.; Tracey, S.; Watson, R.; Pauly, D. 2010. The Spatial Expansion and Ecological Footprint of Fisheries(1950 to present). *PLoS ONE* 5(12): e15143. doi:10.1371/journal.pone.0015143
- Tamanaha, M.S.; Cunha, D.M.C.G.; Resgalla, C. 2016. The first continuous plankton sampling by VOR (Towed oceanographic vehicle) in southeastern and southern Brazil waters. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 44(5): 935-946.
- Teijo, C. 2018. An analysis of the legal problems arising from the application of exclusivity clauses in the European Union's dormant fisheries agreements. *Marine Policy*, <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.03.007>
- The Economist Intelligence Unit. 2015. *The blue economy: Growth, opportunity and a sustainable ocean economy*. Gordon and Betty Moore Foundation. 20p. [https://www.eiuperspectives.economist.com/sites/default/files/images/Blue%20Economy\\_briefing%20paper\\_WOS2015.pdf](https://www.eiuperspectives.economist.com/sites/default/files/images/Blue%20Economy_briefing%20paper_WOS2015.pdf)
- Tissot, B.N.; Hixon, M.A.; Stein, D.L. 2007. Habitat-based submersible assessment of macro-invertebrate and groundfish assemblages at Heceta Bank, Oregon, from 1988

- to 1990. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 352 (2007) 50-64.
- Torres, R.J.; Abessa, D.M.S.; Santos, F.C.; Maranhão, L.A.; Davanzo, M.B.; Nascimento, M.R.L.; Mozeto, A.A. 2009. Effects of dredging operations on sediment quality: contaminant mobilization in dredged sediments from the Port of Santos, SP, Brazil. *J. Soils Sediments*, 9:420-432.
- Trenkel, V.M.; Berger, L.; Bourguignon, S.; Doray, M.; Fablet, R.; Massè, J.; Mazaauric, V.; Poncelet, C.; Quemener, G.; Scalabrin, C.; Villalobos, H. 2009. Overview of recent progress in fisheries acoustics made by Ifremer with examples from the Bay of Biscay. *Aquatic Living Resources*, 22(4): 433-445.
- Turra, A.; Amaral, A.C.Z.; Ciotti, A.M.; Rossi-Wongtschowski, C.L.D.B.; Schaeffer-Novelli, Y.; Marques, A.C.; Siegle, E.; Sinisgalli, P.A.A.; Santos, C.R.; Carmo, A.B. 2017. Avaliação de impacto ambiental sob uma abordagem ecossistêmica: ampliação do porto de São Sebastião. *Ambiente & Sociedade*, 20(3):159-178.
- Tyedmers, P.H.; Watson, R.; Pauly, D. 2005. Fuelling Global Fishing Fleets. *Ambio*. 34(8): 635-638. UN 1982.
- United Nations Convention on the Law of the Sea. [http://www.un.org/depts/los/convention\\_agreements/texts/unclos/unclos\\_e.pdf](http://www.un.org/depts/los/convention_agreements/texts/unclos/unclos_e.pdf) (acesso em: 22 fev. 2018).
- United Nations 1982. *United Nations Convention on the Law of the Sea*.
- Walters, C.J.; Martell, S.J. 2004. *Fisheries Ecology and Management*. Princeton University Press, Princeton. 399p.
- Wang, A.; Chen, J.; Jing, C.; Ye, G.; Wu, J.; Huang, Z.; Zhou, C. 2015. Monitoring the invasion of *Spartina alterniflora* from 1993 to 2014 with Landsat TM and SPOT 6 satellite data in Yueqing Bay, China. *PLoS ONE* 10(8), e0135538.
- Watson, R.; Kitchingman, A.; Gelchu, A.; Pauly, D. 2004. Mapping global fisheries: sharpening our focus. *Fish and Fisheries*, 5:168-177.
- Weigert, S. C.; Madureira, L.A.S.P. 2011. Registros acústicos biológicos detectados na Zona Econômica Exclusiva da região nordeste do Brasil: uma classificação em ecotipos funcionais. *Atlântica*, 33: 15-32.
- Wenger, A.S.; Harvey, E.; Wilson, S.; Rawson, C.; Newman, S.J.; Clarke, D.; Saunders, B.J.; Browne, N.; Travers, M.J.; McIlwain, J.L.; Erftemeijer, P.L.A.; Hobbs, J.A.; Mclean, D.; Depczynski, M.; Evans, R.D. 2017. A critical analysis of the direct effects of dredging on fish. *Fish and Fisheries*, 18:967-985. <https://doi.org/10.1111/faf.12218>
- Worm, B.; Barbier, E.B.; Beaumont, N.; Duffy, J.E.; Folke, C.; Halpern, B.S.; Jackson, J.B.C.; Lotze, H.K.; Micheli, F.; Palumbi, S. R.; Sala, E.; Selkoe, K.A.; Stachowicz, J.J.; Watson, R. 2006. Impacts of Biodiversity Loss on Ocean Ecosystem Services. *Science*, 314, DOI: 10.1126/science.1132294.
- WWF 2018. *Declaration of the sustainable blue economy finance principles*. Disponível on-line em [https://www.wwf.org.uk/sites/default/files/2018-03/Declaration%20of%20the%20Sustainable%20Blue%20Economy%20Finance%20Principles\\_Bro](https://www.wwf.org.uk/sites/default/files/2018-03/Declaration%20of%20the%20Sustainable%20Blue%20Economy%20Finance%20Principles_Bro)

chure%20Insert\_2018.pdf

Van den Belt, M.; Granek, E.; Gaill.; Halpern, B.; Thorndyke, M.; Bernal, P. 2016. Chapter 3. Scientific Understanding of Ecosystem Services. Part III, Assessment of major ecosystem services from the marine environment (other than provisioning services). The First Global Integrated Marine Assessment. *World Ocean Assessment I*. United Nations.

Vasconcellos, M.A.; Gasalla, M.A. 2001. Fisheries catches and the carrying capacity of marine ecosystems in southern Brazil. *Fisheries Research*, 50: 270-285.

Ye., Y.; Barabge, M.; Beveridge, M.; Garibaldi, L.; Gutierrez, N.; Anganuzzi, A.; Taconet, M. 2017. FAO's statistic data and sustainability of fisheries and aquaculture: Comments on Pauly and Zeller (2017). *Marine Policy* 81: 401-405.

Yool, A.; Fashman, M.J.R. 2001. An examination of the 'continental shelf pump' in an open ocean general circulation model. *Global Biogeochemical Cycles* 15(4): 831-844.

Xu, H.; Ding, H.; Li, M.; Qiang, S.; Guo, J.; Han, Z.; Huang, Z.; Sun, H.; He, S.; Wu, H.; F. Wan 2006. The distribution and economic losses of alien species invasion to China. *Biol. Invasions*, 8 (7): 1495-1500.

Zeller, D.; Cashion, T.; Palomares, M.; Pauly, D. 2018. Global marine fisheries discards: A synthesis of reconstructed data. *Fish and Fisheries* 19:30-39.

Zhou, C.; Xu, L.; Zhang, X.; Ye, X. 2014. Application of numerical simulation for analysis of sinking characteristics of purse seine. *Journal of Ocean University of China*, 14(1): 135-142.



## CAPÍTULO 9

# AS DIMENSÕES SOCIAIS E HUMANAS NA ZONA COSTEIRA: UMA PERSPECTIVA SISTÊMICA SOCIOAMBIENTALISTA

CARINA CATIANA **FOPPA**<sup>1</sup>

GUSTAVO GOULART MOREIRA **MOURA**<sup>2</sup>

KATYA REGINA **ISAGUIRRE**<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Teoria e Fundamentos da Educação, Universidade Federal do Paraná.

<sup>2</sup> Faculdade de Etnodiversidade, Universidade Federal do Pará.

<sup>3</sup> Departamento de Direito Público, Faculdade de Direito, Universidade Federal do Paraná.

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a diversidade de relações que os povos e comunidades tradicionais estabelecem com a natureza tem sido desconsiderada da sua importância ecológica, histórico-cultural, potencial de desenvolvimento e na implementação de políticas públicas. Com o objetivo de orientar a atuação no campo das ciências do mar que inclua o reconhecimento das dimensões sociais e humanas na zona costeira no marco do socioambientalismo, são apresentadas questões relevantes que marcam as discussões sobre o binômio conservação e desenvolvimento, nas quais os povos e comunidades tradicionais ganham posição central.

Este capítulo está organizado em duas seções. Na primeira, são apresentados os tensionamentos decorrentes das formas de produção de conhecimento, expressos na fronteira entre ciência, política e gestão, e que têm reafirmado, por um lado, as dicotomias entre conservação e desenvolvimento e, por outro, contextos de desigualdade, exclusão social e perda de conhecimentos. Na segunda seção, são apresentadas questões normativas, bem como alguns exemplos de processos e políticas que têm induzido a perda de territórios e de direitos gerando conflitos e a invisibilidade desses grupos sociais, no sentido de expor relações a serem consideradas em processos de educação, pesquisa, gestão ou extensão na zona costeira.

## 2 CIÊNCIA, POLÍTICA E GESTÃO EM UMA PERSPECTIVA SISTÊMICA SOCIOAMBIENTALISTA

No Brasil, os conflitos relacionados à apropriação e uso da zona costeira se agravaram ao longo das últimas décadas, considerando os efeitos destrutivos da urbanização e do adensamento populacional cronicamente desordenado. A maioria desses efeitos são claramente percebidos por qualquer usuário que circule pelos balneários da costa brasileira: carência de infraestrutura e saneamento, diminuição das praias em tamanho e largura, construções irregulares e descaracterização da paisagem, entre outros (Brasil, 2002a). Embora esses fatores estejam interconectados e resultem em situações desfavoráveis aos diversos usuários da zona costeira e aos ecossistemas, destacam-se os efeitos aos modos de vida de povos e comunidades tradicionais que ocupam esses territórios.

Povos indígenas e comunidades tradicionais que vivem nos territórios marinho-costeiros têm vivenciado a descaracterização intensiva dos seus modos de vida tradicionais em meio a inúmeros conflitos, gerados pela opção do modelo desenvolvimentista, socialmente excludente e ecologicamente predatório, e de políticas públicas, de conservação e desenvolvimento, não compatíveis com seus processos históricos e expressões socioculturais. Os conflitos têm interfaces com o turismo, a pesca industrial, a aquicultura, empreendimentos de significativo impacto ambiental e Unidades de Conservação (Diegues, 2004; Vieira et al., 2005; Vasconcellos et al., 2007; Almeida, 2008).

Esse cenário desafia a olhar para as relações existentes nesses territórios, considerando as demandas sociais e as limitações da natureza, avançando numa concepção de desenvolvimento e conservação configurada além de parâmetros economicistas ou puramente ecologizantes, incorporando uma noção de integralidade dos sistemas socioecológicos (Vieira et al., 2005; Berkes, 2005; Folke et al., 2007).

Do ponto de vista da produção de conhecimento, relações de poder e dominação permeiam a crise ambiental e têm como um de seus alicerces o paradigma analítico-reducionista que hiperespecializa os saberes, cultiva a dicotomia sociedade-natureza, legitima a ética do domínio da primeira sobre a segunda, fragmenta a natureza e nega outras formas de conhecimento (Morin, 2005). Em contraposição, a abordagem sistêmica se inscreve na episteme do pensamento complexo, na qual incertezas e surpresas integram o cenário de respostas adaptativas; a interação entre elementos é considerada, e não mais a sua separação para compreender a realidade, e se sustenta no princípio dialógico que convoca o reunir, contextualizar e globalizar com o singular, o individual e o concreto (Holling et al., 1998; Morin e Le Moigne, 2000).

Nessa linha de argumentação, numa primeira perspectiva, a bibliografia associada à **Teoria dos Recursos de Uso Comuns** (Box 1) tem contribuído em contrapor a lógica perpetrada pela proposição limitada da **Tragédia dos Comuns de Garret Hardin** (1968), ao considerar o conhecimento ecológico tradicional (Box 2) e arranjos de gestão dos grupos que, historicamente, permitem o uso prolongado da natureza e a subsistência de gerações. A teoria dos *commons* propõe romper a visão disjuntiva das dimensões sociais e ecológicas, estimulada pela hegemonia da ciência reducionista, e considerá-las como sistemas complexos que influenciam e são influenciados em função dos impactos da gestão e da expansão progressiva das influências humanas e/ou ecológicas (Ostrom, 1990; Gunderson et al., 1995; Berkes e Folke, 1998; Holling et al., 1998; Berkes, 1999; Diegues, 1999; Gunderson e Holling, 2002; Ostrom et al., 2002; Folke et al., 2007; Armitage et al., 2009).

**BOX 1. TEORIA DOS RECURSOS COMUNS E SISTEMAS SOCIOECOLÓGICOS**

Pesquisas com base na Teoria dos Recursos de Uso Comum contribuem com o debate sobre a crise existente na gestão dos recursos naturais e emerge a partir da metáfora da “tragédia dos comuns”, apresentada por Hardin (1968). A metáfora de Hardin criticava o comportamento humano em relação à natureza, o processo de sobreexploração dos recursos naturais e se posicionava contrária à Declaração Universal dos Direitos Humanos. Foi fortemente questionada e deu início à construção de diversos conceitos-chave para o estudo dos sistemas socioecológicos. A visão de mundo dominante presente na gestão dos recursos naturais, pautada pela previsibilidade e certezas, confronta-se com a dinâmica complexa inerente à trama da vida. Pautados pela *perspectiva sistêmica* e pelos *sistemas complexos*, articulam conceitos na busca de uma teoria geral, entendendo a sociedade enquanto um sistema social e a natureza, um sistema ecológico. Com a contribuição do enfoque sistêmico da gestão dos recursos comuns, utiliza-se o termo *sistema socioecológico* para designar a visão não-dual de sistemas sociais e de sistemas ecológicos. Enquanto sistemas socioecológicos, o *sistema social* está associado à governança, em termos de regimes de apropriação e acesso aos recursos. Inclui também os diferentes sistemas de conhecimento pertinente à dinâmica dos ambientes, o uso dos recursos, as visões de mundo, a ética da relação humano-natureza, estruturas de significados, com “estruturas de dominação” (fluxo de poder e padrões de autoridade) e “estruturas de legitimidade” (normas, rotinas, regras, procedimentos). Já o *sistema ecológico* (ecossistemas) refere-se às comunidades auto-reguladoras de organismos que interagem entre si e com o seu ambiente. Essas relações inerentes remetem ao fato de que os sistemas sociais e ecológicos estão conectados e o delineamento entre eles é artificial e arbitrário.

Fontes: Berkes e Folke, 1998; Feeny et al., 2001; Ostrom et al., 2002; Westley et al., 2002; Berkes et al., 2003; Dietz et al., 2003; Berkes, 2005.

## BOX 2. CONHECIMENTO ECOLÓGICO TRADICIONAL

Conjunto cumulativo de saberes, crenças e práticas gerado por populações tradicionais (indígenas, pescadores, quilombolas, agricultores, seringueiros, etc.) no bojo de processos adaptativos e transmitido de geração a geração sobre as relações dos seres vivos (inclusive humanos) entre si e com seu meio ambiente. Alguns exemplos são expressos pelo conhecimento da biota e ecossistemas locais e seus ciclos, potencial para manejo adaptativo, ou seja, conhecimento de como se adaptar a situações de mudança, pelas práticas de uso sustentável e manejo dos recursos que podem auxiliar na conservação da biodiversidade.

Fontes: Diegues (1996), Berkes (1999).

Numa segunda perspectiva, o marco do socioambientalismo pressupõe a interconexão de natureza, sociedade e culturas. No Brasil, origina-se no processo de redemocratização e resulta da articulação entre povos indígenas e populações tradicionais na Amazônia, com o surgimento da Aliança dos Povos da Floresta para consolidação de políticas estratégicas entre o movimento social e o ambientalista<sup>1</sup> (Diegues, 1996; 2000; Santilli, 2005).

A perspectiva da vertente socioambientalista de conservação da natureza possui os seguintes princípios básicos, segundo Diegues (1996, 2000):

- O ser humano é a natureza e a natureza seu mundo. Ao destacar a importância dos trabalhos de Karl Marx para o entendimento da relação entre ser humano e natureza, dirige-se uma crítica à clássica oposição entre o culturalismo e o naturalismo em vertentes conservacionistas de proteção da natureza. No culturalismo, a natureza seria a enfermidade do homem; no naturalismo, ao contrário, há uma aversão à cultura, à sociedade e à visão antropocêntrica de mundo. Em uma nova perspectiva, o socioambientalismo propõe a unidade, uma nova aliança, ou relação, entre socie-

<sup>1</sup>A principal vertente do movimento ambientalista que firmou alianças com os Povos da Floresta e seus movimentos sociais é aquele influenciado pelo Novo Naturalismo que tem como um de seus principais expoentes Serge Moscovici. Para aprofundar a discussão, ver Diegues (1996, 2000).

dade, cultura e natureza, não sendo esta meio exterior ao qual o ser humano se adapta. O ser humano produz o meio que o cerca e é, ao mesmo tempo, o seu produto;

- A natureza é parte da história da sociedade humana. Partindo-se de uma crítica à busca de um reencontro com uma harmonia perdida, enquanto perspectiva de resolução de problema da proteção da natureza, compreende-se a natureza como histórica e a história é sempre natural. O problema passa a ser encontrar o estado da natureza conforme nossa situação histórica;
- A coletividade, e não o indivíduo, se relaciona com a natureza. A sociedade, como parte e criação da natureza, não necessariamente é uma força destrutiva desta, mas produz diferentes modos de relação com a natureza durante o processo evolutivo;
- Busca-se compreender como os discursos hegemônicos da vertente colonialista cultural (in)visibilizam as relações ser humano/natureza das sociedades tradicionais, atribuindo a estas, *a priori*, um modo de vida que necessariamente destrói a natureza. Muitas vezes esses discursos são produzidos e/ou legitimados por uma ciência moderna positivo-reducionista que se autodetermina universal e, contraditoriamente, neutra.

Interessante pontuar que, embora as contribuições do debate associado à abordagem sistêmica não se insiram diretamente no debate da perspectiva socioambiental latino-americana, denunciam igualmente a emergência de uma transição entre a ciência moderna para outra capaz de superar as dicotomias existentes entre natureza e cultura, observador e observado, subjetivo e objetivo, mente e corpo, etc. (Morin, 2003; Santos, 2006).

A contribuição da abordagem sistêmica em denunciar os limites da ciência moderna para entender a complexidade da vida é necessária e deve considerar em seus modelos de análise os usos da natureza e a territorialidade dos povos e comunidades originários da América Latina. Quando descontextualizada, ou quando não interpreta o papel dos mercados nacional e mundial na perda da biodiversidade, também se torna limitada para entender como o modelo de desenvolvimento dos países latino-americanos conduz à concepção de uma natureza colonizada e que promove a destruição dos territórios tradicionais dos povos. No entanto, é um primeiro passo para conduzir outras análises que tenham por finalidade romper o caráter reducionista da racionalidade moderna e, em consequência, da ciência na contemporaneidade.

Falar de produção de conhecimento na perspectiva sistêmica socioambientalista na América Latina requer o reconhecimento dos limites da

ciência moderna aos contextos dos conflitos por terra e usos da natureza. A partir disso, argumenta-se sobre as limitações de diálogo das ciências entre si e se a ciência que conhecemos hoje é capaz de abrir a comunicação com o que a modernidade subjogou: os conhecimentos tradicionais, numa postura de cumplicidade epistemológica de diálogo aberto e permanente entre diferentes modos de conhecer (Santos, 2006; 2010).

No debate internacional, os conhecimentos tradicionais vêm sendo valorizados nas pesquisas acadêmicas de diversos países e em instituições intergovernamentais. Diferentes perspectivas das ciências naturais e das ciências sociais têm revelado um estreito vínculo entre a diversidade biológica e cultural, em diversas escalas, onde há predominância de modos de vida tradicionais, considerados um dos repositórios da memória biocultural humana. Apesar de representarem cerca de 4 ou 5% da população mundial, a participação dos povos “nativos” na na proteção da biodiversidade chega a 80% das áreas protegidas no mundo<sup>2</sup>. As trinta e sete das consideradas “últimas áreas virgens do mundo”, que ocupam cerca de 46% da superfície terrestre, são habitadas por apenas 2,4% da população mundial e, portanto, possuem as mais baixas densidades populacionais do planeta (Toledo e Barrera-Bassols, 2008). A Yale School of Forestry & Environmental Studies afirmou que mundialmente os pesquisadores se voltam para o que denomina como *Conhecimento Ecológico Tradicional* (Box 2), “para entender melhor o mundo em face da mudança climática e da perda acelerada da biodiversidade”<sup>3</sup>. A Organização das Nações Unidas (ONU)<sup>4</sup>, igualmente, afirma que os conhecimentos e as práticas dos povos indígenas detêm relevância para a pluralidade da identidade e para o ideal de sustentabilidade, tendo inclusive reconhecido essa importância nas Metas de Aichi<sup>5</sup>.

No Brasil há, no mínimo, 255 povos indígenas, cuja população se estima em torno de 900 mil pessoas. Trata-se de uma população plural, que fala mais de 150 línguas e dialetos e detêm uma grande diversidade de conhecimentos tradicionais<sup>6</sup>. Apesar do reconhecimento da importância desses po-

<sup>2</sup> Para saber mais: <https://e360.yale.edu/features/native-knowledge-what-ecologists-are-learning-from-indigenous-people>. Acesso em: 14 jan. 2019.

<sup>3</sup> Disponível em: <https://e360.yale.edu/features/native-knowledge-what-ecologists-are-learning-from-indigenous-people>. Acesso em: 14 jan. 2019.

<sup>4</sup> Fonte: <https://nacoesunidas.org/onu-conhecimento-indigena-e-fundamental-para-cumprir-as-metas-de-biodiversidade-global/>. Acesso em 14 jan. 2019.

<sup>5</sup> Conjunto de metas estabelecidas a partir da Convenção da Diversidade Biológica (CDB) com proposições voltadas à redução da perda da biodiversidade em âmbito mundial.

<sup>6</sup> Disponível em: [https://pib.socioambiental.org/pt/Quem\\_s%C3%A3o](https://pib.socioambiental.org/pt/Quem_s%C3%A3o)

vos em âmbito mundial, seus direitos são frequentemente desrespeitados. Em 2018, o Conselho Nacional de Direitos Humanos aprovou e publicou um relatório, o qual levanta casos de violações de direitos humanos contra povos e comunidades tradicionais que limitam sua reprodução sociocultural, entre eles destacando-se: a desterritorialização, a perda de sua autonomia, a perda ou retirada dos bens da natureza, a nucleação escolar e o ensino à distância, todas permeadas pelo constante questionamento de seu direito à autodeterminação<sup>7</sup> enquanto povo tradicional (CNDH, 2018).

A contradição entre a importância sociocultural dos povos tradicionais e os processos de violação de direitos é uma questão que pode (e deve) ser compreendida pela academia. A proposta da complexidade pode ser agregada à noção de interculturalidade na formação das identidades dos povos latino-americanos e contribuir para repensar o processo de produção de conhecimento das ciências naturais na perspectiva de preparar a formação para o fortalecimento do ser e do outro, do coletivo, da noção de comunitário e da comunalidade dos povos e da natureza, na discussão das alternativas de desenvolvimento na América Latina.

Nessa abordagem sistêmica, além de uma transição paradigmática, propõe-se um “giro pragmático” da política moderna de gestão de recursos naturais, a partir de outro ponto de vista, inaugurado por uma práxis política dos povos indígenas. Trata-se de transformar a política moderna de produção de indivíduos cooperantes com os ideais do liberalismo econômico hegemônico e recuperar a política em termos de sujeitos históricos enquanto um povo. A construção da subjetividade dos sujeitos, inclusive a construção de conhecimentos individuais e coletivos, é um processo que se dá em uma relação aberta, comunicativa, reflexiva e transformadora de si, das pessoas e das suas condições de existência no mundo. Assim, o giro pragmático recupera a política enquanto radicalidade crítica na produção de sujeitos históricos (Bautista, 2014).

A modernidade necessita ser entendida como uma narrativa complexa, que fundamenta o êxito da civilização ocidental e, ao mesmo tempo, esconde os efeitos da colonialidade sobre os países periféricos do sistema-mundo (Mignolo, 2017). Assumir os efeitos da colonialidade do ser, do saber e do poder e sua interligação com o projeto moderno é um dos primeiros passos para a discussão das alternativas para o desenvolvimento na América Latina.

Essa compreensão projeta questionamentos no tratamento que tem sido dado pelas políticas de conservação e/ou desenvolvimento no âmbito

<sup>7</sup> Sobre autodeterminação, ver próxima seção.

local, regional e nacional. Embora muitas políticas tenham sido delineadas ao longo das últimas décadas, com relações diretas ao desenvolvimento e conservação, a exemplo do Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (Brasil 1988a), ou do Sistema Nacional de Unidades de Conservação (Brasil, 2000), poucas experiências são exitosas para enfrentar, reverter, avaliar ou minimizar os contextos de desigualdades e exclusão, muitas vezes, decorrentes da sua própria implementação.

Ao contrário, o que se percebe é a atuação de profissionais e de governos a produzir desigualdades e exclusão nesses processos, a partir de racionalidades pautadas em negar outras formas de conhecimento. Negam-se, de forma estrutural, tanto no plano científico, político ou de tomada de decisão, outras formas de participação ou de monitoramento na gestão da natureza, privilegiando a lógica centralizadora do “comando e controle” pelo Estado (Holling e Meffe 1996). Essa lógica centralizadora é resultado de uma relação bidirecional exclusivista entre **ciência moderna positivo-reducionista** e poder, pautada por uma racionalidade científica moderna de visão tecnicista, totalitária e colonialista (Box 3).

Tal relação exclusivista entre ciência e poder produz uma brutal assimetria de poder entre os modos de conhecer, e, ao ser incorporada nas instituições e nas políticas de Estado, nega direitos de povos e comunidades tradicionais. As modalidades de planejamento em gestão ambiental tornam-se, então, mecanismos de solução de disputa por meio da transmissão de ideias hegemônicas e de produção de “consensos” com base nessas ideias (Moura, 2017a). Para Laura Nader (1994), essa transmissão de ideias hegemônicas, resultante da assimetria de poder entre modos de conhecer para a produção de realidades aparentemente consensuais, é um instrumento de pacificação chamado de “harmonia coercitiva”. Como consequência da harmonia coercitiva, produz-se uma reorganização radical da sociedade com base em uma ciência positivista instaurando no espaço de “participação” uma “tecnocracia sansimonista”<sup>8</sup> (Moura, 2017a).

Por outro lado, grupos de profissionais em locais institucionais “autorizados” a produzir conhecimentos considerados válidos tornam-se fontes de discussões interpretativas sobre determinada temática enviando mensagens

<sup>8</sup> Claude-Henri de Rouvroy, conde de Saint-Simon (1760-1825), é o fundador do positivismo social, cujo objetivo era utilizar a ciência e a filosofia como fundamento de uma reorganização radical da sociedade (Abbagnano 2007). Na discussão deste capítulo, a tecnocracia sansimonista seria um regime instalado nos espaços de “participação” que opera na descontextualização dos saberes tradicionais em cena e na sua recontextualização segundo uma lógica cientifizada. Para aprofundar a discussão, ver Moura (2017a).

**BOX 3. OS MITOS DA CIÊNCIA MODERNA POSITIVO-REDUCIONISTA**

Em sua vertente positivo-reducionista, a ciência moderna é estruturada com base em oito mitos: visão de mundo homogênea, neutralidade, objetividade, linearidade, universalidade, exclusivismo epistemológico ou totalitarismo epistêmico, ruptura com os conhecimentos tradicionais e razão abstrata. Citados neste capítulo estão a neutralidade e o totalitarismo epistêmico.

- O mito da *neutralidade* da ciência. Ao contrário da pureza teórica reivindicada pelos defensores da neutralidade no paradigma positivo-reducionista, a ciência está imersa em um contexto político, econômico, cultural e social e, portanto, é influenciada por eles. Um exemplo clássico é a Teoria da Evolução, de Darwin. A seleção natural da teoria de Darwin apresenta grande semelhança com a teoria econômica e política do capitalismo inicial desenvolvida pelos economistas escoceses. Darwin praticava a sobrevivência econômica do mais apto a partir dos investimentos que fazia a partir dos jornais que ele lia diariamente. Há também similaridade entre a ideia de seleção sexual e a ideia corrente do relacionamento entre homens e mulheres da classe média da Era Vitoriana.
- O mito do *totalitarismo epistêmico*. Não há nada que demonstre a supremacia da racionalidade científica, tampouco a sua capacidade única de atingir a verdade do mundo. Sobretudo após o panorama científico consolidado por Lévi-Strauss com seu livro *O pensamento selvagem* na década de 1960, ficou patente que diversas populações geograficamente distribuídas e estudadas em todos os continentes possuem um conhecimento do mundo natural que complementa e às vezes até supera o conhecimento científico em verossimilhança com a realidade. A CM não é a única, mas é uma ciência entre muitas.

Fonte: Moura (2014).

sociais ou políticas que indicam linhas de ação e permitem certa manobra interpretativa (Stepan, 2005). Dessa forma, as informações fornecidas por esses grupos de profissionais geram representações dos processos físicos e sociais e os tornam inteligíveis para a ação governamental (Haas, 1992). Por outro lado, quando se altera o contexto político, alteram-se também os grupos de profissionais e as mensagens políticas deles derivadas. Portanto, as representações científicas tanto são conformadas como formam o mundo à sua volta (Stepan, 2005).

### 3 MARCOS LEGAIS E DISPUTAS DOS POVOS E COMUNIDADES TRADICIONAIS

O debate associado aos **povos e comunidades tradicionais** (Box 4) é marcado por uma série de disputas que envolvem o reconhecimento jurídico formal de suas identidades, práticas de uso comum, sua organização social e o direito à terra (Almeida, 2008). A complexidade de relações, multiplicidade de expressões e particularidades socioculturais (Little, 2002a) estão presentes nos territórios marinho-costeiros e resultam de um processo histórico de relações entre diferentes grupos étnicos-raciais (Silva, 2001).

Como um princípio indispensável, a autodeterminação, expressa no cenário internacional, como nas Declarações de Barbados I e II e na de San José, baseada em demandas de organizações indígenas e tradicionais, delimitou o direito desses grupos a determinar suas próprias prioridades e ter poder de negociação em decisões que impactem seu território (Almudi e Kalikoski, 2009; Lima, 2014).

Do ponto de vista normativo, essas dimensões foram instituídas em tratados internacionais, tais como a Convenção da Diversidade Biológica (Brasil, 1998) e a Convenção 169 da Organização Internacional do Trabalho sobre Povos Indígenas e Tribais (OIT, 2011), bem como nacionalmente na Constituição Federal de 1988 (Brasil, 1988b)<sup>9</sup>, e reafirmadas em alguns dispositivos infraconstitucionais (Almeida, 2008).

A Convenção da Diversidade Biológica (CDB) foi o primeiro tratado mundial sobre a utilização sustentável, conservação e repartição equitativa

<sup>9</sup> Cabe referir os artigos 231 e 232 da Constituição Federal, que tratam especificamente dos povos indígenas. Os artigos 215 e 216, no componente cultural, estabelecem relações sobre o patrimônio material e imaterial das populações tradicionais. Sobre as comunidades quilombolas existem outras especificidades jurídicas no processo de reconhecimento e disputas territoriais. Para complementação, ver Almeida (2008).

dos benefícios derivados da biodiversidade, assinado durante a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento – ECO 92, no Rio de Janeiro. De acordo com o art. 8º, alínea “j” da CDB, internaliza-se no ordenamento jurídico brasileiro o dever de respeitar, preservar e manter o conhecimento, inovações e práticas das comunidades locais com estilos de vida tradicionais relevantes à conservação e à utilização sustentável da diversidade biológica<sup>10</sup>.

Já a Convenção 169 da Organização Internacional do Trabalho (OIT) foi ratificada pelo Decreto Legislativo nº 143, em 2002 (Brasil, 2002b) e incorporada ao direito brasileiro pelo Decreto nº. 5.051, de 2004 (Brasil, 2004). Essa Convenção possui a condição de norma supralegal, o que lhe confere um *status* hierárquico que a situa no sistema jurídico logo após a Constituição de 1988. Tal posição na hierarquia das normas faz com que toda a legislação infraconstitucional respeite os direitos e deveres que se extraem da OIT 169. O conjunto de direitos da Convenção 169 é relevante para a proteção das territorialidades desses grupos, sendo, portanto, uma ação estratégica do gestor público e dos profissionais vinculados às Ciências Ambientais conhecer quais são os direitos decorrentes dessa Convenção, para, posteriormente, implementá-los em diálogos com os povos indígenas e comunidades tradicionais, à luz das bases apresentadas na seção anterior.

No Brasil, a Política Nacional de Desenvolvimento Sustentável dos Povos e Comunidades Tradicionais, instituída pelo Decreto 6.040/2007 (Brasil, 2007) atrelou a noção de desenvolvimento sustentável à ocupação e uso de territórios e recursos naturais como condição para sua reprodução social, cultural, social, religiosa, ancestral e econômica, bem como dos seus conhecimentos tradicionais. O mesmo decreto reafirma o direito de autodeterminação e de consulta prévia, livre e informada, já consagrado na Convenção 169 da OIT; e reconhece o dever do Estado em promover a “articulação das políticas relacionadas aos direitos dos Povos e Comunidades Tradicionais nas diferentes esferas de governo” (art. 1º, IX). Para essa articulação o decreto reconhece a necessidade de uma sensibilização coletiva por parte dos órgãos públicos, a fim de garantir o efetivo acesso ao exercício dos direitos humanos

<sup>10</sup> O referido artigo trata da conservação *in situ* e menciona que em conformidade com sua legislação nacional, é necessário respeitar, preservar e manter o conhecimento, inovações e práticas das comunidades locais e populações indígenas com estilos de vida tradicionais relevantes à conservação e à utilização sustentável da diversidade biológica e incentivar sua mais ampla aplicação, com a aprovação e a participação dos detentores desse conhecimento, inovações e práticas, e encorajar a repartição equitativa dos benefícios oriundos da utilização desse conhecimento, inovações e práticas.

e fundamentais dos povos originários e comunidades tradicionais.

Já no Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC) (Brasil, 2000), outras disputas com os povos e comunidades tradicionais marcam o cenário da sua criação. Vale mencionar que o SNUC é uma lei infraconstitucional e, como tal, deve observar as normas superiores, tais como a Constituição Federal de 1988 e a OIT 169. Nele estão previstas doze categorias de Áreas Protegidas, divididas em dois grupos: as Unidades de Proteção Integral e as de Uso Sustentável. O primeiro tem por objetivo preservar a natureza; o segundo, compatibilizar a conservação da natureza com o uso sustentável dos recursos naturais. A lei define como uso sustentável a exploração do ambiente que garanta a perenidade dos recursos ambientais renováveis e dos processos ecológicos, de forma socialmente justa e economicamente viável (art. 2º, XI). Um dos pontos mais polêmicos na disputa em torno do texto final do SNUC foi a questão dos povos e comunidades tradicionais e a sua participação na criação e gestão das Unidades de Conservação. Durante a criação do SNUC, preservacionistas, conservacionistas, socioambientalistas e ruralistas travaram uma grande disputa na defesa de suas posições que mobilizou ONGs, a grande imprensa e grandes lobbies. No texto final, promulgado em 2000, uma visão muito mais preservacionista acabou prevalecendo, com forte apoio, inclusive, da Casa Civil da Presidência da República (Medeiros, 2006; Freitas, 2009).

Esse processo de constituição do SNUC reflete conflitos nas distintas categorias de gestão (Diegues, 2008, Acserald, 2009, Medeiros, 2009, Acserald e Bezerra, 2010, Vivacqua, 2012, Foppa et al., 2018):

- As UCs de Proteção Integral, cujos objetivos de gestão priorizam a preservação e manutenção das funções ecológicas de fragmentos ecossistêmicos considerados prioritários, se operacionalizam pelo “mito da natureza intocada” (Diegues, 1996) e não possuem, na sua maioria, instrumentos de gestão instituídos, ou procedimentos de avaliação de sua efetividade<sup>11</sup>. Prevêem de forma desmedida o reassentamento dos povos e comunidades tradicionais que, seja no plano formal da expropriação, ou da formulação dos termos de compromisso, operam, na maioria das vezes, com ameaças e coerção para inscrever temporalidades engessadas aos terri-

<sup>11</sup> Das 313 UCs federais, 43% possuem Plano de Manejo (ICMbio 2014). Em tese, o Plano de Manejo e o Conselho Gestor são considerados instrumentos de gestão centrais para prever e planejar ações de monitoramento e gestão e, conseqüentemente, avaliar sua efetividade. Sem esses instrumentos só podem ser considerados como “parques no papel”.

tórios, resultando em conflitos e injustiças socioambientais. A territorialidade dos povos e comunidades tradicionais envolve vínculos simbólicos ancestrais, o que torna a previsão do reassentamento uma violação de direitos e da sua reprodução sociocultural, devendo ser entendida como medida excepcional (Art. 15 da OIT 169 – Shiraishi, 2007).

- As UCs de uso sustentável, como as Reservas de Desenvolvimento Sustentável (RDS) e as Reservas Extrativistas (RESEX), orientadas para a proteção e conservação dos modos de vida das populações tradicionais e, claramente, um instrumento legal inspirado no socioambientalismo (Santilli, 2005), compatibilizam melhor os direitos comunitários, mas ainda possuem processos de acirramento de conflitos pela mediação de instituições governamentais que fortalecem os antagonismos entre a conservação da biodiversidade e dos direitos multiculturais<sup>12</sup>.
- Como categorias “intermediárias”, as Áreas de Proteção Ambiental (APAs) têm provocado reflexões sobre sua efetividade, considerando a permissividade que resulta dos interesses, especialmente dos usos privados em seus limites territoriais, que também conflitam com os interesses dos povos e comunidades tradicionais.

Na realidade amazônica, as ações vinculadas ao ordenamento territorial também se conflitam. Elas não têm sido tratadas pelo Estado como questão de sobrevivência dos povos que ocupam os biomas e “assumem um caráter centralizador e autoritário, fundamentado na razão instrumental do Estado e na sua exclusividade em tomar decisões sobre suas políticas” (Little, 2002b, 19). O Gerenciamento Costeiro Integrado brasileiro, por sua vez, é um exemplo do modo de ordenamento territorial que, onde quer que seja aplicado em território nacional, inclusive na Amazônia, centraliza as tomadas de decisão na medida em que constrói supostas realidades “consensuais”, pacificando coercitivamente tensões entre diferentes modos de conhecer, em favor da racionalidade científica ocidental (Moura, 2017a).

Outros exemplos vinculados aos processos de licenciamento ambiental de empreendimentos de significativo impacto ambiental têm demonstrado que o processo de avaliação de impacto ambiental e tomada de decisão é subsidiado por estudos técnicos insuficientes e facciosos que encobrem as relações simbólicas e territoriais, como no emblemático caso da hidrelétrica de Belo Monte (Hernandez e Magalhães, 2011). O fato é que os protocolos de

<sup>12</sup> A participação dos povos e comunidades tradicionais na tomada de decisões relacionadas ao seu território deve seguir o que dispõe a OIT 169 em seu artigo 6º.

licenciamento ambiental pouco consideram diferentes representações sociais sobre a natureza, ou mesmo a atribuição correta da escala dos seus efeitos e, segundo a racionalidade científica, embaraçam a conciliação entre diferentes políticas públicas (Laschefski, 2011)<sup>13</sup>.

Os passivos sociais e ambientais decorrentes da implantação e funcionamento desses empreendimentos não são definidos a partir da interpretação dos grupos sociais e acabam por se tornar nulos. As formas de compensação, mitigação e indenização criam novos passivos, já que muitas vezes silenciam os grupos, não consideram a dimensão existencial do território, ou fortalecem, por meio da destinação de recursos pecuniários, as UCs de proteção integral<sup>14</sup> que, por definição legal, são incompatíveis às territorialidades dos povos e comunidades tradicionais (Foppa et al., 2018).

Nesses processos tem sido também negligenciada a consulta livre, prévia e informada dos povos e comunidades tradicionais (Art. 6o da OIT 169), direito esse ainda pouco compreendido entre aqueles que têm o poder nos espaços de tomada de decisão na gestão ambiental, seja vinculado às UCs ou nos processos de licenciamento ambiental. Apesar da previsão legal, os procedimentos adotados são limitados em permitir o diálogo intercultural não violento, a horizontalidade e a possibilidade dos grupos em dizer não (Peruzzo, 2017).

Já no que se refere às políticas associadas à pesca artesanal, um panorama restrito desvela-se, no sentido contrário de respeitar o atributo de que famílias de pescadores se envolvem em diferentes atividades, a fim de alcançar a segurança alimentar (Allison e Ellis, 2001). O acesso ao seguro-defeso<sup>15</sup>, por exemplo, depende de uma série de documentações relacionadas ao exercício da profissão, forçando um “autorreconhecimento” exclusivo como pescador artesanal, que não retrata a realidade da maioria das comunidades pesqueiras artesanais no Brasil. Requisitos como i) a apresentação de documentos fiscais de venda do pescado e de adquirentes; ii) comprovação do exercício profissional da atividade de pesca artesanal em caráter ininterrupto e iii) o veto de vínculos de emprego, outra relação de trabalho ou outra fonte de renda diversa da decorrente da atividade pesqueira (Brasil, 2003) limitam qualquer enquadramento para algumas famílias, exigem uma minuciosa aná-

<sup>13</sup> Vale ressaltar que as iniciativas de flexibilização do licenciamento ambiental podem tornar os processos ainda mais precários no tocante à proteção dos direitos das populações atingidas.

<sup>14</sup> Conforme Art. 36 da Lei 9.985/2000 (Brasil 2000), Unidades de Conservação de Proteção Integral são definidas como categorias de gestão a serem criadas quando vinculadas ao licenciamento ambiental.

<sup>15</sup> Avaliação realizada a partir da Lei 10.779/2003 (Brasil, 2003).

lise de outras políticas associadas e dão um caráter excessivamente formal ao que se constitui na informalidade (Foppa et al, 2018).

#### **BOX 4. O CONCEITO DE POVOS E COMUNIDADES TRADICIONAIS**

A definição deriva da Convenção n.º 169\* da Organização Internacional do Trabalho. Essa importante Convenção Internacional foi ratificada pelo Brasil no ano de 2002 e integra o conjunto de normas jurídicas nacionais, e, em especial, tem conexão com a Constituição da República. “Partindo do pressuposto de que os direitos devem ser plenos, é imprescindível garantir aos povos e comunidades tradicionais a sua reprodução física e social, substanciada numa “prática social”, que se relaciona a um modo de “criar”, de “fazer” e de “viver”. O direito de viver a vida de acordo com suas especificidades se encontra disposto no inciso II do art. 216 da Constituição Federal de 1988, bem como na Convenção n.º 169 da OIT, que trata dos “povos indígenas e tribais” (Shiraishi Neto, 2007, p. 30).

A Política Nacional de Desenvolvimento Sustentável dos Povos e Comunidades Tradicionais (PNPCT) foi instituída em 2007, por meio do Decreto nº 6.040. O artigo 3º, inciso I, do Decreto 6040, de 7 de fevereiro de 2007, define Povos e Comunidades Tradicionais: grupos culturalmente diferenciados e que se reconhecem como tais, que possuem formas próprias de organização social, que ocupam e usam territórios e recursos naturais como condição para sua reprodução cultural, social, religiosa, ancestral e econômica, utilizando conhecimentos, inovações e práticas gerados e transmitidos pela tradição.

Para entender mais sobre o processo político que cria o conceito e também os direitos dos povos e comunidades tradicionais, sugere-se a seguinte leitura: Shiraishi Neto, J. (Org). *Direito dos povos e das comunidades tradicionais no Brasil: declarações, convenções internacionais e dispositivos jurídicos definidores de uma política nacional*. Manaus: UEA, 2007.

\* A OIT 169 não mudou sua vigência e força normativa com a publicação do Decreto 10088/2019.

Para muitas comunidades, a exclusividade na pesca não retrata as estratégias adotadas para alcançar os modos de vida sustentáveis, notadamente marcadas pela pluriatividade. Ao contrário, a exclusividade da atividade, para comprovar o caráter ininterrupto e, conseqüentemente, dar acesso ao seguro, pode ocasionar a intensificação da atividade pesqueira, além de acarretar outros conflitos de usos com outros usuários pela migração para outras áreas de extração/pescaria. Além disso, não equalizam as questões de gênero, já que invisibilizam as mulheres, por negar o acesso ao seguro-defeso, que representa condição para que muitas famílias não atinjam níveis abaixo da pobreza, ou em reconhecer o seu papel para manutenção dos modos de vida, dada a diversificação necessária para se adaptar às incertezas e sazonalidade da pesca (Allison e Ellis, 2001; Ellis e Allison, 2004; Vasconcelos e Kalikoski, 2012; Galvão, 2013; Foppa et al., 2018).

Embora exista alguma previsão das dimensões sociais e humanas no plano político formal das políticas ambientais, ainda são inúmeras as limitações do ponto de vista da sua implementação. De fato, o que existe é um descompasso e incongruência entre as demandas sociais e as políticas públicas. Os processos de tomada de decisão induzem uma conformação de forças que maximiza assimetrias de poder, nega e invisibiliza as demandas e produz resultados na direção contrária aos direitos humanos e fundamentais dos povos e comunidades tradicionais com efeitos diretos aos modos de vida, reprodução social, cultural e econômica.

Mesmo que os dados demonstrem a responsabilidade do Brasil, junto a outros 17 outros países, em resguardar 70% da biodiversidade do planeta pela existência de unidades de conservação, terras indígenas, territórios quilombolas e comunidades tradicionais (caiçaras, seringueiros, pescadores artesanais etc.), o modelo transversal de implementação de políticas públicas ainda não avançou na valorização dos produtos da sociobiodiversidade, por meio do acesso à políticas públicas e aos territórios, compatibilizando a conservação com a soberania alimentar e geração de renda (Diegues, 2005; Vieira e Cader, 2013).

As políticas ambientais ainda favorecem grupos de poder, nos quais os regimes de apropriação que prevalecem são de privatização, sendo a responsabilidade de gestão e desenvolvimento da propriedade privada, individual ou Estado, numa gestão excessivamente centralizada, que ignora os diferentes saberes locais (Colby, 1989). A importância de compreender a complexidade cíclica e sazonal das estratégias de subsistência e identificar o que os grupos têm, mais do que o que não têm, fortalece as soluções criativas, as dinâmicas e particularidades de cada território. As dimensões territoriais opõem-se às

alternativas neoliberais, mostrando que os espaços locais não têm como destino apenas espelhar os movimentos globais, e que estratégias concebidas “de baixo para cima” podem ser mobilizadas no sentido de valorizar suas especificidades (Andion, 2007).

Contudo, a perspectiva da aliança com os povos e comunidades tradicionais, no marco do socioambientalismo, permite conceber políticas públicas e propostas de desenvolvimento alinhadas à proteção da biodiversidade e da sociobiodiversidade (Santilli, 2005). Tal vertente sinaliza que propostas de conservação e desenvolvimento de raízes coloniais não são adequadas para proteção da natureza e suas gentes e atomiza uma série de rotas alternativas de conservação da natureza e de desenvolvimento<sup>16</sup>. Na perspectiva do processo do conhecer, a abordagem sistêmica nos coloca diante de possibilidades para transcender a dicotomia entre natureza e cultura e rejeitar a separação, previsibilidade, a neutralidade e a objetividade em que se pauta a ciência moderna, para compreender a realidade por uma ontologia que reverta a exclusão social pela elitização da conservação e do desenvolvimento.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As questões apresentadas, contornadas no debate entre ciência, política e gestão, são aqui resumidas, com o objetivo de orientar os profissionais a posicionar as consequências de suas visões e ações:

- A produção de conhecimentos, fundada no paradigma analítico reducionista, precisa ser repensada sob a ótica de uma transição paradigmática para que a política moderna da gestão ambiental, conservação e desenvolvimento incorpore a postura democrática e de comunicação aberta entre diferentes disciplinas e modos de conhecer.
- O marco do socioambientalismo combinado à abordagem sistêmica orienta *praxis* que considera os modos de vida, os processos histórico-culturais, as subjetividades, o conhecimento ecológico tradicional, e desvia as rotas da neutralidade da ciência positivo-reducionista para considerar as ontologias dos povos e comunidades tradicionais que têm, historicamente, garantido a proteção da biodiversidade.

<sup>16</sup> Existem muitas rotas alternativas de conservação da natureza e de desenvolvimento, como as propostas de Etnoconservação, de Etnodesenvolvimento e de Bem Viver. Para aprofundar a discussão dessas rotas alternativas, ver: Diegues (2000); Bonfil et al. (1982); Lima (2014); Anjos e Leitão (2009), e Acosta (2012).

- A Teoria dos Recursos de Uso Comum contrapõe a limitada proposição da Tragédia dos Comuns e da visão disjuntiva das dimensões sociais e ecológicas. Oferece modelos de análise, com base nos sistemas socioecológicos e dos sistemas adaptativos complexos, que incorporam o conhecimento ecológico tradicional, os modos de apropriação e o conjunto de regras que influenciam e são influenciados na gestão.
- O contexto socioambiental atual exige uma transição, que passa pelo reconhecimento da modernidade, enquanto narrativa complexa, e que tem em sua estrutura a colonialidade. Assumir os efeitos da colonialidade do ser, do poder e do saber é um dos primeiros passos para a discussão das alternativas ao desenvolvimento e incorpora a necessidade de mudanças nas formas de atuação de profissionais vinculados às ciências ambientais. Essas mudanças exigem reconhecer as assimetrias de poder existentes que são, historicamente, produzidas entre os modos de conhecer presentes nos espaços de tomada de decisão, que fazem dos sujeitos objetos de acomodação, para assumir uma postura que reconheça o protagonismo dos povos e comunidades tradicionais e, assim, construa caminhos para superar as desigualdades e exclusão social cronicamente estruturadas na realidade brasileira.
- Processos controversos marcam a implementação de políticas ambientais, da forma como discutidas a partir do Gerenciamento Costeiro, das Unidades de Conservação e do Licenciamento Ambiental, pois centralizam a tomada de decisão, acirram conflitos, fortalecem as dicotomias entre conservação e desenvolvimento e têm sido insuficientes para equalizar as identidades culturais e as territorialidades dos povos e comunidades tradicionais.
- As noções envolvidas no debate sobre povos e comunidades tradicionais necessariamente devem considerar os direitos previstos nos Tratados Internacionais e que foram internalizados no ordenamento jurídico brasileiro, tanto na Constituição Federal como em normas infraconstitucionais. Mecanismos de coerção e silenciamento desses grupos precisam ser suprimidos, exigindo habilidades dos profissionais de diferentes áreas para incorporar nos processos de implementação das políticas públicas os direitos de autodeterminação e da consulta prévia livre informada.
- Para subsidiar as ações e o diálogo que compatibilize políticas de conservação e desenvolvimento e que fundamenta a perspectiva sistêmica socioambientalista, parte-se do pressuposto da necessidade de revitalizar e sensibilizar os poderes executivo, legislativo e judiciário, os técnicos e administradores dos órgãos públicos, assim como pesquisadores

de todas as áreas para uma compreensão ampliada da diversidade epistemológica do mundo, a fim de garantir o efetivo acesso ao exercício dos direitos humanos e fundamentais dos povos e comunidades tradicionais.

## REFERÊNCIAS

Abbagnano, Nicola. 2007. *Dicionário de filosofia*. Ed. rev. e ampl. São Paulo: Martins Fontes.

Acosta, Alberto. 2012. O buen vivir: uma oportunidade de imaginar outro mundo. In: *Um campeão visto de perto*. Ed. Fundação Boell: 2012. 19p. Disponível em: <<http://www.br.boell.org/web/19-1448.html>>.

Achselrad, Henri. 2009. *O que é justiça ambiental*. Rio de Janeiro: Garamond.

Achselrad, Henri; Bezerra, G. N. 2010. Desregulação, deslocalização e conflitos ambientais: considerações sobre o controle das demandas sociais. In: Almeida, A.W.B. et al. *Capitalismo globalizado e recursos territoriais: fronteiras da acumulação no Brasil Contemporâneo*. Rio de Janeiro: Lamparina, p. 179-210.

Allison, Edwar. H.; Frank Ellis. 2001. The livelihoods approach and management of small-scale fisheries. *Marine Policy*, v. 25, n. 5, p. 377-388.

Almeida, Alfredo Wagner Berno de. 2008. *Terra de quilombo, terras indígenas, "babaçuais livre", "castanhais do povo", faixinais e fundos de pasto: terras tradicionalmente ocupadas*. 2. ed. Manaus: PGSCA-UFAM.

Almudi, Tiago; Daniela C. Kalikoski. 2009. Homem e "natureza" em um parque nacional do sul do Brasil: meios de vida e conflitos nos arredores da Lagoa do Peixe. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, v. 20, p. 47-57.

Andion, Carolina. 2007. *Atuação das ONGs nas dinâmicas de desenvolvimento territorial sustentável no meio rural de Santa Catarina: os casos da APACO, do Centro Vianei de Educação Popular e da AGREGO*. 2007. 427f. Tese [Doutorado] – Programa Interdisciplinar em Ciências Humanas; Doutorado Sociedade e Meio Ambiente, UFSC, Florianópolis.

Anjos, José Carlos dos; Leitão, Leonardo. 2009. *Etnodesenvolvimento e mediações políticas culturais no mundo rural*. Porto Alegre: Ed. da UFRGS. (Série Educação a Distância).

Armitage, Derek R.; Ryan Plummer; Fikret Berkes; Robert I. Arthur; Anthony T. Charles; Iain J. Davidson-Hunt; Alan P. Diduck; Nancy C. Doubleday; Derek S. Johnson; Melissa Marschke; Patrick McConney; Evelyn W Pinkerton; Eva K Wollenberg. 2009. Adaptive co-management for social-ecological complexity. *Frontiers in Ecology and Environment*, v. 7, n. 2, p. 95-102.

- Bautista, Rafael S. 2014. *La descolonización de la política: introducción a la política comunitária*. La Paz: Plural.
- Bennett, Nathan J.; Philip Dearden. 2014. From measuring outcomes to providing inputs: governance, management, and local development for more effective marine protected areas. *Marine Policy*, 50, p. 96-110.
- Berkes, Fikret; Carl Folke. 1998. *Linking social and ecological systems: management practices and social mechanisms for building resilience*. Cambridge (UK): Cambridge University Press.
- Berkes, Fikret. 2005 Sistemas sociais, sistemas ecológicos e direitos de apropriação de recursos naturais. In: Vieira, Paulo F.; Fikret Berkes; Cristiana S. Seixas. *Gestão integrada e participativa de recursos naturais: conceitos, métodos e experiências*. Florianópolis: Secco/APED. p. 45-72.
- Brasil. 1988a. Lei nº 7.661, de 16 de maio de 1988. Institui o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, n. 8633, 18 maio 1988.
- Brasil. 1988b. *Constituição da República Federativa do Brasil*, de 5 de outubro de 1988. *Diário Oficial da União*, 191-A, 05 out. 1988.
- Brasil. 1998. Decreto Federal nº 2.519, de 16 de março de 1998. Promulga a Convenção sobre Diversidade Biológica, assinada no Rio de Janeiro em 05 de junho de 1992. *Diário Oficial da União*, 17 mar. 1998.
- Brasil. Lei n. 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, 19 jul. 2000.
- Brasil. 2002a. Projeto Orla: fundamentos para gestão integrada. Brasília: MMA/SQA; MP/SPU.
- Brasil. 2002b. Decreto legislativo n. 143, de 20 de junho de 2002. Aprova o texto da Convenção nº 169 da Organização Internacional do Trabalho sobre os povos indígenas e tribais em países independentes. *Diário Oficial da União*, 21 jun. 2002.
- Brasil. 2003. Lei n.º 10.779, de 25 de novembro de 2003. Dispõe sobre a concessão do benefício de seguro desemprego, durante o período de defeso, ao pescador profissional que exerce a atividade pesqueira de forma artesanal. *Diário Oficial da União*, 26 nov. 2003.
- Brasil. 2004. Decreto 5051, de 19 de abril de 2004. Promulga a Convenção no 169 da Organização Internacional do Trabalho - OIT sobre Povos Indígenas e Tribais. *Diário Oficial da União*, 20 abr. 2004.
- Brasil. Decreto n. 6.040, de 07 de fevereiro de 2007. Institui a Política Nacional de Desenvolvimento Sustentável dos Povos e Comunidades Tradicionais. *Diário Oficial da União*, 08 fev. 2007.
- Brasil. 2019. Decreto Federal Nº 10.088, de 5 de novembro de 2019. Consolida atos normativos editados pelo Poder Executivo Federal que dispõem sobre a promulgação

de convenções e recomendações da Organização Internacional do Trabalho – OIT ratificadas pela República Federativa do Brasil. *Diário Oficial da União*, 06 dez. 2019.

CNDH. *Conselho Nacional dos Direitos Humanos*. 2018. Povos livres, territórios em luta: relatório sobre os direitos dos povos e comunidades tradicionais. Brasília: CNDH. Disponível em: <http://www.mdh.gov.br/informacao-ao-cidadao/participacao-social/conselho-nacional-de-direitos-humanos-cndh/RELATRIOSOBREOSDIREITOSDOS-POVOSECOMUNIDADESTRADICIONAISv2.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2019.

Colby, Michael E. 1989. *The evolution of paradigms of environmental management in development*. New York: The World Bank.

Diegues, Antonio C.S. 1996. *O mito moderno da teoria da natureza intocada*. São Paulo: Hucitec.

Diegues, Antonio C.S. 1999. Human populations and coastal wetlands: conservation and management in Brazil. *Ocean & Coastal Management*, v. 42, n. 2-4, p. 187-210.

Diegues, Antonio C.S. 2000. Etnoconservação da natureza: enfoques alternativos. In: Diegues, Antonio C. S. (ed.). *Etnoconservação: novos rumos para a conservação da natureza nos trópicos*. 2. ed. São Paulo: AnnaBlum; Hucitec; NUPAUB/USP, p. 1-46.

Diegues, Antonio C.S. 2004. *A pesca construindo sociedades*. São Paulo: NUPAUB-USP.

Diegues, Antonio C.S. 2005. Sociobiodiversidade. In: Ferraro Junior, Luiz Antonio (org.). *Encontros e caminhos: formação de educadoras(es) ambientais e coletivos educadores*. Brasília: MMA, Diretoria de Educação Ambiental, p. 303-312.

Diegues, Antonio C.S. 2008. Marine protected areas and artisanal fisheries in Brazil. *Samudra Monographs*. Chennai: International Collective in Support of Fishworkers.

Ellis, Frank; Edward, Allison. 2004. *Livelihood diversification and natural resource access*. Overseas Development Group University of East Anglia UK. FAO. Livelihood Support Programme (LSP).

Folke, Carl.; L. Pritchard; Fikret Berkes; J. Colding; U. Svedin. 2007. The problem of fit between ecosystems and institutions: ten years later. *Ecology and Society*, v. 12, n. 1, p. 30. Disponível em: <http://www.ecologyandsociety.org/vol12/iss1/art30/>.

Foppa, Carina C.; Giovanna C. Barreto; Francisco Quintanilha Veras Neto; Rodrigo P. Medeiros. 2018. A (re)categorização de unidades de conservação e suas implicações aos modos de vida tradicionais. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, v. 48, Edição especial: 30 Anos do Legado de Chico Mendes, p. 343-366.

Freitas, Isis F. *Unidades de conservação no Brasil: o plano estratégico nacional de áreas protegidas e a viabilização da zona de amortecimento*. Campinas, 2009. 106p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Disponível em: <http://www.repositorio.uni-camp.br/handle/REPOSIP/258146>. Acesso em: 13 ago. 2018.

Galvão, Melina C. *Diálogos entre gênero, gestão e educação ambiental: os papéis das*

- mulheres nos modos de vida na pesca artesanal*. 2013. 191 f. Dissertação [Mestrado em Educação Ambiental] – Instituto de Educação, Universidade Federal do Rio Grande.
- Gunderson, Lance H.; Holling, Crawford S.; Light, S. S. (Eds.). 1995. *Barriers and bridges to the renewal of ecosystems and institutions*. New York: Columbia University Press.
- Gunderson, Lance H.; Holling, Crawford S. (eds.) 2002. *Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems*. Washington: Island Press.
- Haas, Peter. M. 1992. *Introduction: Epistemic communities and international policy coordination*. International Organization, Knowledge, Power, and International Policy Coordination, Cambridge, v. 46, n. 1, p. 1-35.
- Hardin, Garret. 1968. The tragedy of the commons. *Science*, n. 162, p. 1243-1248.
- Hernandez, Francisco. M.; Magalhães, Sonia. M. B. 2011. Ciência, cientistas, democracia desfigurada e licenciamento ambiental sob constrangimento: o caso de Belo Monte. In: Zhouri, Andrea. *As tensões do lugar: hidrelétricas, sujeitos e licenciamento ambiental*. Belo Horizonte: Ed. UFMG, p. 295-324.
- Holling, Crawford S.; Meffe, G. K. 1996. Command and control and the pathology of natural resource management. *Conservation Biology*, n. 10, 328-337.
- Holling, Crawford S. 2003. Foreword: The backloop to sustainability. In: Berkes, F.; Colding, J. e Folke, C. (Eds.). *Navigating social-ecological systems: building resilience for complexity and change*. Cambridge: Cambridge University Press, p.xv-xxi.
- Holling, Crawford S.; Fikret Berkes; Carl Folke. 1998. Science, sustainability and resource management. In: Berkes, Fikret; Carl Folke. *Linking social and ecological systems: management practices and social mechanisms for building resilience*. Cambridge University Press, p. 342-361.
- ICMBio – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/portal/biodiversidade/unidades-de-conservacao/planos-de-manejo.html>. Acesso em: dez. 2014.
- Kalikoski, Daniela C.; Marcelo Vasconcellos. 2012. *Case study of the technical, socio-economic and environmental conditions of small-scale fisheries in the estuary of Patos Lagoon, Brazil*. FAO Fisheries and Aquaculture Circular 1075 – FIRO/C1075, 190.
- Laschefski, Klemens. 2011. Licenciamento e equidade ambiental: as racionalidades distintas de apropriação do ambiente por grupos subalternos. In: Zhouri, A (org.). *As tensões do lugar: hidrelétricas, sujeitos e licenciamento ambiental*. Belo Horizonte: Ed. UFMG, p. 21-59.
- Lima, Ismar Borges de (org.). 2014. *Etnodesenvolvimento e gestão territorial: comunidades indígenas e quilombolas*. Curitiba: Ed. CRV.
- Little, Paul. 2002a. *Etnodesenvolvimento local: autonomia cultural na era do neoliberalismo global* Campo Grande: Tellus, ano 2, n. 3, p. 33-52.
- Little, Paul. 2002b. Territórios sociais e povos tradicionais no Brasil: por uma antropologia da territorialidade. *Série Antropologia*, 322.

Medeiros, Rodrigo P. *Possibilidades e obstáculos à co-gestão adaptativa de sistemas pesqueiros artesanais: estudo de caso na área da Baía de Tijucas, litoral centro-norte do estado de Santa Catarina, no período de 2004 a 2008*. Florianópolis, 2009. Tese [Doutorado em Sociologia Política] – Universidade Federal de Santa Catarina.

Medeiros, Rodrigo. 2006. Áreas Protegidas no Brasil. *Revista Ambiente e Sociedade*, v. 9, n. 1, p. 41-65.

Mignolo, Walter D. 2017. Colonialidade: o lado mais escuro da modernidade. *Revista Brasileira de Ciências Sociais*, São Paulo, v. 32, n. 94, p. 329-402.

Morin, Edgar. 2003. *Os sete saberes necessários à educação do futuro*. 8.ed. São Paulo: Cortez; Brasília: UNESCO.

Moura, Gustavo G. M. 2014. *Guerras nos mares do sul: a produção de uma monocultura marítima e os processos de resistência*. Tese [Doutorado] – Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental, Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo.

Moura, Gustavo G. M. 2017a. Manejo de mundos e gerenciamento costeiro na Amazônia: reflexões a partir de um diálogo entre etnoceanografia e etnodesenvolvimento. In: Costa, J. M. *Amazônia: olhares sobre o território e região*. Rio de Janeiro: Autografia; Macapá: EDUNIFAP, p. 257-296.

Moura, Gustavo G. M. 2017b. Introdução: Avanços em oceanografia humana e o socioambientalismo nas ciências do mar. In: MOURA, G. G. M. (Org.). *Avanços em oceanografia humana: o socioambientalismo nas ciências do mar*. Jundiá: Paco. p. 7-48.

Moura, Gustavo G. M. 2017c. *Guerras nos mares do sul: o papel da oceanografia na destruição de territórios tradicionais de pesca*. São Paulo: Annablume.

Nader, Laura. 1994. *Harmonia coerciva: a economia política dos modelos jurídicos*. *Revista Brasileira de Ciências Sociais*, n. 26, p. 18-29.

OIT. 2011. Organização Internacional do Trabalho. Convenção nº 169 sobre povos indígenas e tribais e Resolução referente à ação da OIT/Organização Internacional do Trabalho. Brasília: OIT.

Ostrom, Elinor; Dietz, T.; Dolsak, N.; Stern, P. C.; Stonich, S. E.; Weber, E. U. (eds.). 2002. *The drama of the commons*. Washington: National Academy Press.

Ostrom, Elinor. 1990. *Governing the commons: the evolution of institution for collective action*. New York: Cambridge University Press.

Peruzzo, Pedro Pulzatto. 2017. *Direito à consulta prévia aos povos indígenas no Brasil*. *Rev. Direito Práx.*, Rio de Janeiro, v. 8, n. 4, p. 2708-2740.

Santilli, Juliana. 2005. *Socioambientalismo e novos direitos: proteção jurídica à diversidade biológica e cultural*. São Paulo: Ed. Peirópolis.

Santos, Boaventura S. 2006. *A gramática do tempo: para uma nova cultura política*. v. 4. São Paulo: Cortez.

Santos, Boaventura S. 2010. Para além do pensamento abissal: das linhas globais a

- uma ecologia de saberes. In: Santos, Boaventura S.; Meneses, Maria Paula (orgs.). *Epistemologias do Sul*. 2. ed. CES: conhecimento e instituições.
- Shiraishi Neto, Joaquim (org.). 2007. *Direito dos povos e das comunidades tradicionais no Brasil: declarações, convenções internacionais e dispositivos jurídicos definidores de uma política nacional*. Manaus: UEA. Disponível em: <http://www.direito.mppr.mp.br/arquivos/File/DireitodospovosedascomunidadesradicionaisnoBrasil.pdf>
- Silva, Luiz G. 2001. *A faina, a festa e o rito: uma etnografia histórica sobre as gentes do mar (sécs XVII ao XIX)*. Campinas: Papiрус.
- Stepan, Nancy. L. 2005. *A hora da eugenia: raça, gênero e nação na América Latina*. Rio de Janeiro: Fiocruz.
- Toleto, Victor; Barrera-Bassols, Narciso. 2008. *La memoria biocultural*. Barcelona: Icaria.
- Vasconcellos, Marcelo; Diegues, Antonio C.; Sales, Renato R. 2007. Limites e possibilidades na gestão da pesca artesanal costeira. In: Costa, A.L. (org.). *Nas redes da pesca artesanal*. Brasília: IBAMA, p.15-83.
- Vieira, Liszt; Cader, Renato. 2013. A política ambiental na década 2002-2012. In: Emir Sader (org.) *10 anos de governos pós-neoliberais no Brasil: Lula e Dilma*. São Paulo: Boitempo; Rio de Janeiro: FLACSO Brasil, p. 225-238.
- Vivacqua, M. *Dilemas da conservação e desenvolvimento na gestão compartilhada da pesca artesanal: conflitos e sinergias nos processos de criação de Reservas Extrativistas Marinho-Costeiras em Santa Catarina*. Florianópolis, 2012. Tese [Doutorado em Sociologia Política] - Universidade Federal de Santa Catarina.



## CAPÍTULO 10

# REFLEXÕES SOBRE A PERCEPÇÃO DO MAR

JORGE P. **CASTELLO**

Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande

Com frequência assistimos ao noticiário televisivo ou recebemos informações relacionadas a algum prejuízo ambiental nas áreas costeiras, no mar, nos recursos pesqueiros, nos corais e em outros compartimentos marinhos. Esses relatos nos falam da falta de sustentabilidade da pesca, da sujeira nas praias, de contaminantes nas águas estuarinas e costeiras, de partículas de plástico flutuando na superfície dos grandes giros oceânicos, de sacos plásticos e de micropartículas no conteúdo estomacal de animais como peixes, tartarugas, aves e mamíferos marinhos. Como explicar isso? Mesmo tendo avançado muito no estudo dos oceanos, com uma amplitude de recursos tecnológicos *in situ* e remotos que ampliaram significativamente o alcance espacial e temporal das informações, parecemos indiferentes ou em estado de catatonia frente aos problemas revelados, justamente quando mais preocupados deveríamos estar nesta era do Antropoceno.

A contaminação e a poluição em escala crescente, como consequências do desenvolvimento demográfico e industrial, têm afetado e modificado os ambientes costeiros, pois neles é que se concentram os assentamentos humanos. Entre 50 e 70% das populações humanas encontram-se numa faixa costeira de 50 a 100 quilômetros de largura. A ação antrópica compromete as relações dos fluxos de energia e matéria entre os compartimentos do ecossistema costeiro – por exemplo, a fixação do carbono através das plantas marinhas e as relações entre os animais predadores e suas presas. Dessa forma são perturbados ou irreversivelmente alterados os ciclos biológicos de migração da fauna marinha, são desestruturados habitats de reprodução e de criação, além de alteradas as relações de dominância entre espécies.

Para explicar essa aparente indiferença, estimo que temos um problema de percepção do ambiente marinho. Quando comparamos essa percepção com a que o cidadão comum tem sobre a floresta amazônica, podemos perceber uma diferença significativa. Tradicionalmente entendemos percepção como o ato de receber, interpretar e compreender através do psíquico os sinais sensoriais que provêm dos cinco sentidos. Por isso é que percepção, embora recorra ao organismo e às questões fisiológicas, está intimamente vinculada com a psicologia de cada indivíduo que faz desse estímulo, sinal ou percepção, algo consciente e transformador. Sustento então que, dos cinco sentidos com que fomos dotados, a visão é a mais significativa para o nosso relacionamento com o ambiente que nos rodeia.

O ambiente marinho é, por natureza, um ambiente altamente dinâmico e complexo, no qual as abordagens reducionistas são em geral insuficientes e parciais para explicar o que observamos. Por exemplo, o estudo dos mares é, por excelência, um estudo interdisciplinar, no qual recorreremos à

física, química, biologia, geologia, meteorologia e, mais recentemente, às ciências sociais e econômicas. Da mesma forma, acredito essencial entender o comportamento humano em suas expressões sociais e econômicas, uma vez que a relação do homem com o mar é praticamente inseparável da história da civilização ocidental e oriental. No presente, o ser humano é um usuário e “apropriador” dos “bens” (recursos pesqueiros e minerais como gás, petróleo, areias, carbonatos, nódulos polimetálicos, água etc.) e dos “serviços” do ecossistema marinho (modulação do clima, ventos, correntes marinhas, biodiversidade, defesa militar, equilíbrio dinâmico da natureza e sua interação com a costa).

A percepção que o ser humano tem do meio marinho é muito limitada, quando comparada com a do meio emerso. Somos animais essencialmente terrestres. Para nós, sentidos como visão, audição, tato e olfato são de valor nulo ou limitado no meio marinho. Quando estamos frente ao mar, vemos com facilidade sua interface com o continente (a costa) e depois uma superfície que se estende por centenas ou milhares de quilômetros de maneira aparentemente homogênea, ocupando quase 71% da área do planeta. Reconhecendo essa característica, o planeta deveria ser chamado de Planeta Água ou Azul, como ficou evidente para os primeiros astronautas. Nada vemos do que está presente abaixo da lâmina de água superficial. Para “ver” esse ambiente necessitamos de instrumentos, sensores, câmeras de TV, robôs submarinos e amostradores de todo tipo, além das plataformas que os transportam, como navios, satélites ou drones. No mundo emerso, temos maior consciência e facilidade de percepção das planícies, pradarias, montanhas, bosques, florestas, e de seus animais e demais organismos. Não é por acaso que o grande cientista espanhol Juan Cuatrecasas (1899-1990) chamou o homem de “animal óptico”, já que é através da visão, nosso mais importante sentido, que adquirimos informações e desenvolvemos consciência da presença.

Em 1883, Sir Thomas Henry Huxley, destacado cientista britânico, muito conhecido por sua enérgica defesa de Charles Darwin no meio científico da época, sustentava numa conferência que *“não importa o que homem faça ao mar, suas riquezas são inesgotáveis”*. Essa visão, infelizmente limitada, se afirmou ao longo do tempo e era corrente até os anos 50 do século XX.

É ainda frequente a percepção do mar como uma fonte imensa de recursos com capacidade para absorver dejetos e sofrer todo tipo de agressões. Pode-se explicar essa percepção lembrando que no presente e no mundo desenvolvido, uma geração humana tem expectativa de vida média entre 65 e 80 anos; mas antigamente, a expectativa era bem menor e, portanto, a memória coletiva de uma geração era mais limitada com relação a um

passado distante e até de umas poucas décadas. Muitos cientistas descrevem esse fenômeno como “linha de base substituída”. Ou seja, as referências espaciais e temporais que temos são limitadas, e esquecemos, por exemplo, como era o mar antes da revolução industrial, quando a tecnologia da máquina a vapor (*circa* 1750-1800) ainda era desconhecida.

Hoje é sabido que o mar gerava e abrigava uma riqueza biológica superior à presente e que a abundância dos recursos pesqueiros era tal que deixava pálida a que atualmente conhecemos. No entanto, é errado pensar que o homem antigo era capaz de viver em maior harmonia com a natureza. Registros orais pioneiros, como as sagas nórdicas, e relatos históricos, em um segundo momento, dão conta de antigas sobreexplorações de recursos pesqueiros, mesmo com a tecnologia primitiva da época (Roberts, 2007). De maneira análoga, isso se aplica a muitos povos nativos que destruíram ou esgotaram recursos terrestres e marinhos, o que desmitifica a visão comum de que a sobreexploração é um fenômeno moderno. Na verdade, a humanidade convive com essas práticas desde longa data.

Uma boa parte desse problema radica na concepção de que os recursos (e serviços) do mar são considerados como bem comum e patrimônio da humanidade. Em 1968, Garret Hardin chamou a atenção sobre o problema da sobreexploração daqueles bens com acesso livre e o chamou de “tragédia dos comuns” (Hardin, 1968). Nessa situação, a exploração de um bem finito é motivada pelo interesse que, de forma independente, visa maximizar seus próprios benefícios. Essa atitude aparentemente racional, quando praticada coletivamente, termina por destruir o bem comum. A exploração dos oceanos como um bem comum não regulamentado foi a norma durante muitas décadas. No entanto, a sobreexploração de recursos vivos em águas nacionais ou internacionais ainda é frequente. Isso ocorre mesmo depois de 1982 quando foi assinada a convenção da Nações Unidas sobre a Lei do Mar, estabelecendo direitos e deveres dos países costeiros sobre a chamada Zona Econômica Exclusiva ou quando existem tratados internacionais bilaterais ou multilaterais que não são integralmente observados.

Curiosamente, no meio continental existe maior consciência sobre a necessidade de regulamentar o uso de bens e serviços ecossistêmicos terrestres. Exemplo disso são os comitês de bacias hidrográficas para cuidar da água, normas para uso dos solos (visando inibir a erosão e degradação), uso da atmosfera (chaminés, ondas de rádio e TV, navegação aérea etc.) e as normas para exploração da madeira das florestas. No entanto, quando se consultam as estatísticas da FAO, observa-se que apesar dos avanços tecnológicos e como consequência deles, a captura mundial de pescado tem caído

caído regularmente desde 1980. A pesca, em essência, nada mais é do que uma forma de “caça aquática” e, portanto, é uma atividade primária de extração que não pode superar a capacidade natural de reposição por crescimento e reprodução. Países desenvolvidos, mesmo aqueles onde a ciência pesqueira foi desenvolvida e que contam com sistemas de governança, sofrem com a sobrexplotação, esgotamento e até colapso dos recursos pesqueiros. Poucos países no mundo (algumas pescarias de Canadá, EUA, Nova Zelândia e Austrália) partiram para alguma forma de “privatização” do bem. Nesse modelo de propriedade do bem, a autoridade pública outorga, mediante venda ou leilão, um direito (geralmente anual) de exploração. Esse direito é limitado por uma quota estabelecida de acordo com estudos científicos que avaliam o potencial de renovação e a sustentabilidade do recurso.

Frente a esse quadro, cabe perguntar: o que pode acontecer? Como em qualquer exercício de futurologia, existe a probabilidade de errarmos. No entanto, no presente, as condições parecem-me pouco auspiciosas, particularmente no Brasil. Falta ainda alcançar um maior grau de conscientização do público em geral e dos tomadores de decisão em particular. A lógica desenvolvimentista, que tem dominado o cenário econômico na grande maioria dos governos, conspira contra a conservação e sustentabilidade de recursos limitados por sua própria natureza.

Quando observamos os programas de proteção de espécies marinhas, verificamos que aqueles mais bem sucedidos têm como alvo animais “carismáticos” (baleias, golfinhos, tartarugas, aves marinhas, focas etc.). No entanto, os peixes não receberam igual atenção, com exceção dos tubarões nas últimas décadas. Eles poucas vezes são vistos na superfície ou fora da água e não recebem a mesma atenção do público. Em geral, peixes, moluscos e crustáceos são vistos apenas como fonte de alimento. Nos últimos anos a mídia tem divulgado muito os benefícios que o consumo de pescado traz para a saúde como fonte de ômega-3 e 6 e de baixo colesterol. De certa forma, esse é um estímulo para o consumo, aumentando assim a demanda e a pressão da pesca sobre os estoques. Contudo, existem programas internacionais de proteção (que recebem pouca atenção da imprensa) de espécies altamente vulneráveis por estarem em condições críticas de sobrevivência. Um deles é o CITES (sigla em inglês para *Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora*), que regula e até proíbe a comercialização de espécies terrestres e marinhas, incluindo tubarões, peixes, crustáceos e moluscos.

Acompanhando a preocupação de consumidores conscientes (sobretudo na Comunidade Europeia, Canadá, Austrália, Nova Zelândia e EUA), tem-

se estabelecido o selo “verde” ou ecológico para produtos de consumo marinho, que certifica a origem e sustentabilidade da pescaria. As Áreas de Proteção Marinha (APM) são uma ferramenta importante que tem tido sucesso em vários locais do planeta. Porém, calcula-se que a extensão total (< 0,1%) delas é bem menor do que o necessário (20% da superfície dos mares). Existem diversos modelos de APM, desde os que proíbem todo tipo de interferência humana até aqueles onde é permitida alguma atividade, como ecoturismo ou uma pescaria de subsistência. No entanto, em comparação com os ecossistemas terrestres, são ainda poucos os programas de proteção marinha.

Comparativamente, os recursos minerais do mar recebem mais atenção que os recursos vivos, por razões evidentes nas economias dinâmicas que se sustentam queimando combustíveis fósseis e procurando fontes de energia como o petróleo e o gás. A mineração marinha é muito menos desenvolvida no Brasil, por ser mais recente e ainda de altos custos frente a outras fontes exploráveis de minerais. Sem levar em consideração as jazidas costeiras (areias, carbonatos), que são de acesso relativamente fácil, as restantes (nódulos polimetálicos) ocorrem em águas profundas, e pouquíssimos países desenvolveram tecnologias sofisticadas para sua extração. A exploração de petróleo e gás é a atividade que tem maior potencial de impacto ambiental, como ficou demonstrado no Golfo de México (2010) e, anteriormente, no Alaska (1989). No entanto, o maior número de acidentes acontece durante as operações de transporte e remanejamento de óleo cru, seja em navios ou em oleodutos submarinos. Quando mais perto da costa (terminais), maior o impacto, pois é nas regiões costeiras que se encontra a fauna e flora mais rica, diversificada e vulnerável.

O impacto dos derrames de petróleo é muito influenciado pelo tipo de ambiente onde acontece ou aonde o óleo é levado pelas correntes marinhas, e também pela natureza do óleo cru, sendo os chamados petróleos leves os menos impactantes. O seguinte esquema resume as diferentes situações:

- **Manguezais e marismas.** *Impacto* pesado, com grande mortalidade de fauna e flora, modificando a abundância e comprometendo a produtividade. *Recuperação:* Lenta a moderada; a persistência do óleo prolonga a toxicidade.
- **Estuários, baías e portos.** *Impacto* pesado a moderado. Em geral depende da estação do ano e pode afetar seriamente migrações de peixes, crustáceos e aves, às vezes com fortes prejuízos para a pesca. *Recuperação:* Rápida a lenta; depende da velocidade das correntes de entrada e saída desses ambientes e da morfologia das costas.

- **Plataforma continental externa.** *Impacto* leve a moderado. Leve sobre os microrganismos (plâncton) e severa sobre ovos, larvas e juvenis de peixes, moluscos e crustáceos. *Recuperação*: rápida para o plâncton, por apresentar ciclos de vida curtos. Moderada a lenta para os organismos do fundo.
- **Oceano aberto.** *Impacto* leve. Organismos nadadores costumam evitar o local do derrame. Como as profundidades são grandes, costumam não afetar os organismos do fundo. *Recuperação*: rápida, devido à velocidade da dispersão e degradação do óleo.

A legislação estabelece salvaguardas que devem ser rigorosamente seguidas. Dessa forma, muito depende dos mecanismos de controle e fiscalização. É oportuno destacar que muitas companhias de seguro, que dão cobertura para esse tipo de danos ambientais, são as principais interessadas no cumprimento das salvaguardas.

Existem protocolos que visam minimizar acidentes nos procedimentos para perfuração, captação, processamento em plataformas e transporte até instalações em terra. Esses protocolos levam em conta o tipo de petróleo (leve ou pesado; percentual de enxofre), vias de navegação, regime de ventos, espectro de correntes marinhas (direção e velocidade), profundidade do poço, presença de fauna, rotas migratórias da fauna, etc.

Contudo, acidentes sempre podem acontecer, seja por falha humana ou mecânica ou evento climático inesperado. A história mostra que a falha de origem humana é responsável pela maior parte dos acidentes com alto impacto. Resolver ou amenizar esse problema necessariamente tem que passar por rigorosos programas de treinamento e controle das dotações das plataformas, operadores e tripulações das embarcações.

Sabemos que os oceanos têm o papel de moduladores do clima, pois a molécula de água tem altíssimo poder para conservar calor. Deve-se lembrar que os oceanos (sem considerar o gelo das calotas polares) têm 96,5% de toda a água do planeta, portanto é muito alta a sua capacidade de amortecer as variações térmicas da atmosfera. Por isso se afirma que os oceanos, com uma profundidade média de 4000 metros, têm um papel fundamental na regulação do clima, pois eles redistribuem o calor através do transporte das correntes marinhas. Mediante a evaporação, reabastecem em forma de vapor a água que precipita como chuva na terra emersa (aprox. 9%) e no próprio mar (91%). Além de água e calor, os oceanos também guardam dióxido de C (CO<sub>2</sub>) e são responsáveis pela circulação dos mesmos por todo o planeta. Quando a superfície da terra esfria ou esquentada pelo calor do sol, a mudança e amplitu-

de de temperatura é mais rápida na terra do que no mar; em consequência, o mar refrigera a terra quando ela está quente e, ao contrário, aquece-a quando está fria.

A radiação solar que chega à Terra atravessa a atmosfera sem nuvens e atinge a superfície da terra e do mar. Uma parte da radiação é reirradiada para o espaço como radiação infravermelha (RIV). O  $\text{CO}_2$  presente na atmosfera captura essa RIV e a redireciona novamente para a superfície, assim aumentando a temperatura. Esse processo natural é conhecido como “efeito estufa” (EE). Além do  $\text{CO}_2$  de origem biológica (respiração dos seres vivos na biosfera), existe a contribuição antrópica pela queima dos combustíveis fósseis (petróleo), queimadas e diferentes processos industriais. O efeito estufa é essencial para o equilíbrio de calor no planeta e, sem dúvida, ele possibilita a vida. Porém, com um excesso de EE a água poderia ferver, e sem EE ela poderia congelar. Ou seja, existe um delicado equilíbrio entre luz solar, concentração de  $\text{CO}_2$  e calor que não pode ser quebrado.

Nesta abordagem breve, cabe perguntar: quais são os fatores mais importantes que interferem na sustentabilidade dos oceanos? A ocupação costeira seria um fator determinante? Existe legislação e fiscalização eficiente? Partes dessas perguntas já foram respondidas anteriormente. No entanto, também se pode questionar o próprio conceito de sustentabilidade. Essa palavra hoje está presente no nosso cotidiano e em muitas declarações de princípios de ação política na gestão pública e industrial privada. Infelizmente, é muita vezes usada como um chavão, sem aprofundar o que ela implica.

A palavra sustentabilidade foi consagrada na conferência Rio-1992 e se destacou por conferir a essa noção uma multidimensionalidade. Ou seja, de acordo com essa proposição, a sustentabilidade deveria ser buscada segundo a dimensão biológica, tecnológica, econômica e social. Assim, quando um gestor ou tomador de decisões tem que adotar uma medida administrativa que vise à sustentabilidade de um recurso (ou serviço), ele deverá dar igual peso a todas as dimensões mencionadas. Contudo, a história contemporânea de gestão dos recursos pesqueiros mostra, tanto em países desenvolvidos como em vias de desenvolvimento, que as considerações econômicas em primeiro lugar e as sociais em segundo prevalecem sobre as outras dimensões da sustentabilidade. Com isso, deixa-se de entender que sem a sustentabilidade biológica as outras dimensões carecem de sentido. As diferentes dimensões não têm o mesmo peso e de fato existe uma hierarquia, pois é a biológica a que proporciona sustentação às demais.

Ao não reconhecer a primazia da sustentabilidade biológica, posterga-se a solução do problema. No caso da pesca, pode-se resumir a situação

a: *existem muitos pescadores para recursos naturais cada vez mais escassos.* É frequente ouvir e ler manifestações de autoridades políticas que adotam um discurso desenvolvimentista e ao mesmo tempo invocam a sustentabilidade, como se fosse possível um crescimento permanente da produção.

A ocupação costeira em si não é um problema, haja vista a dependência histórica, tecnológica e cultural do ser humano pela região costeira. O que sim é problemático é a ocupação costeira desordenada. No Brasil, o Projeto Orla e o Programa GERCO (Gerenciamento Costeiro) têm assentado as bases legais para a ocupação e gestão dessa zona costeira. O país tem 17 estados litorâneos, com cerca de 395 municípios com faixa litorânea marinha. Os instrumentos de gestão existem e estão consagrados nesses programas que têm um caráter descentralizador. Estados e municípios são os que devem traçar, dentro das orientações normativas do GERCO, os respectivos programas locais de gestão da zona costeira. Aqueles municípios com melhores quadros de profissionais aplicam e controlam os planos de gestão, porém seu número é ainda muito insuficiente para as necessidades do país como um todo.

Evitar a sobreexploração das espécies marinhas requer uma mudança de paradigma, que passa pelo reconhecimento dos limites naturais dos ecossistemas, controle do aumento demográfico das populações humanas e reconhecimento das limitações tecnológicas. Sucessivos e expressivos aumentos da capacidade de exploração dos recursos do mar (vivos e não-vivos) sempre se apoiaram em aumentos do poder de exploração sustentado por avanços tecnológicos que prometem resolver alguns problemas, mas que também criam outros novos.

As regiões costeiras são de fato as mais impactadas. Já para as águas profundas e na superfície dos oceanos abertos é difícil fazer essa afirmação, porque ainda conhecemos pouco desses ambientes e, também, falta-nos uma referência temporal contra a qual comparar. No entanto, em ecologia é necessário lembrar que as partes do ecossistema encontram-se todas interligadas. Portanto, pode ser um excesso de otimismo acreditar que os impactos sobre a região costeira não tenham repercussões nas regiões mais distantes.

Muitos sistemas vivos, terrestres e aquáticos, exibem capacidade de recuperação, mas temos que entender como funcionam e sobretudo proporcionar tempo para que isso aconteça. Obviamente isso implica uma espécie de "moratória" que poupe das agressões e alterações. Segue-se então uma consideração final. Como seria possível articular desenvolvimento com conservação marinha na sociedade presente, com claros postulados de desenvolvimento econômico? Como exposto e defendido aqui, a resposta passa por alterar a forma como percebemos o mar e reconhecer suas limitações.

## REFERÊNCIAS

- Cuatrecasas, Juan, 1962. *El Hombre, Animal Optico.*: 382p; Eudeba; Buenos Aires
- Hardin, G. 1968. The tragedy of the commons. *Science* 162 (3859):1243-1248
- Pauly, D. 1995. Anecdotes and the shifting baseline syndrome in fisheries. *Trends Ecol. Evol.* 10(10): 420
- Roberts, C. 2007. *The unnatural history of the sea.* Island Press: 456





## CAPÍTULO 11

# PERSPECTIVAS DAS CIÊNCIAS DO MAR NO BRASIL: O QUE FAZEMOS E O QUE PRECISAMOS FAZER?

PAULO DA CUNHA **LANA**

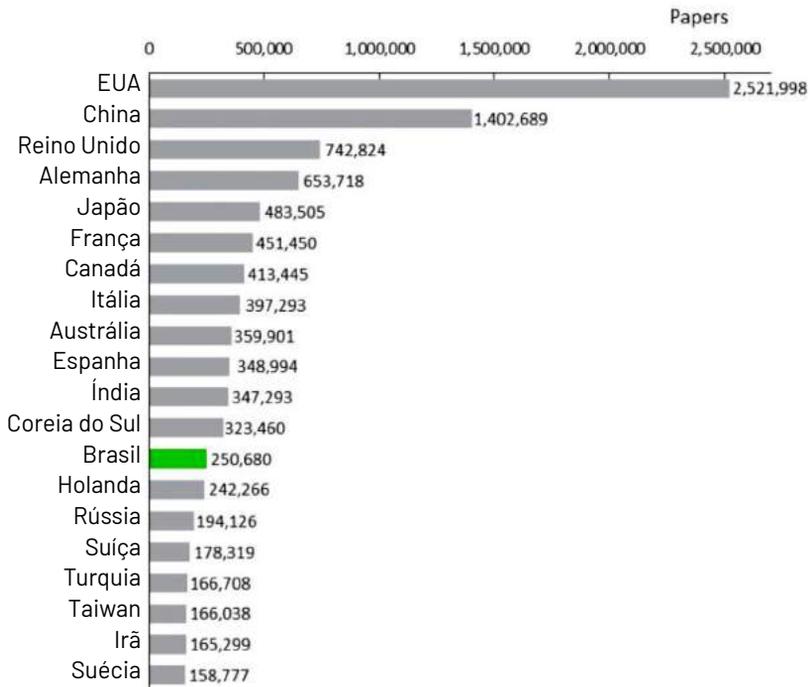
Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná, Pontal do Paraná, Paraná

## 1 NOSSA CIÊNCIA É PERIFÉRICA

Todos nós crescemos familiarizados com a noção da existência de uma “ciência brasileira”. Paradoxalmente, é mais raro ouvirmos falar em uma “ciência norte-americana”, uma “ciência alemã” ou uma “ciência inglesa”. Defendo aqui o ponto de vista de que essa frequente necessidade de autorreferência ou autonegação, com base em um critério geográfico ou geopolítico, é sintoma ou diagnóstico da ciência de periferia, ou seja, da ciência praticada à margem dos centros de excelência. Uma ciência geograficamente periférica é autocentrada. Ela procura se destacar perante a ciência global através do contraste. Para isso, busca o seu reconhecimento através de suas especificidades regionais, também chamadas de “conhecimento de interesse local”. O paradoxo é que esse reconhecimento global não virá enquanto tais especificidades permanecerem secundárias do ponto de vista quantitativo e qualitativo. Neste contexto, usamos com frequência o conceito de “ciência brasileira” porque ainda não nos reconhecemos no espaço da ciência global de excelência ou porque não nos sentimos nela inseridos. Essa argumentação é igualmente válida para o caso especial das Ciências do Mar, que se configuram como uma atividade periférica da já periférica ciência feita no Brasil. Somos todos nós, biólogos marinhos, oceanógrafos e demais cientistas do mar, uma subperiferia desprivilegiada, como se pode inferir dos melhores (ou piores) indicadores e métricas da ciência contemporânea.

São vários os fatores históricos que originam e condicionam uma ciência de periferia. O mais relevante é o pequeno tamanho e a insuficiência da massa crítica. Massa crítica é o fundamento mínimo necessário para sustentar, em quantidade e qualidade, qualquer atividade científica. A ciência e os cientistas foram desde sempre notas de rodapé na história brasileira. Poucos dos nossos cientistas do mar nos dias de hoje são capazes de citar o nome de algum pesquisador brasileiro atuante na área durante todo o período imperial ou durante a primeira metade do século XX. Esse quadro só começou a mudar a partir da década de 1950. Desde então, dinâmicas internas da sociedade e nossas próprias políticas de ciência e tecnologia passaram a lidar de forma eficaz com o problema do baixo número de cientistas, através da criação de institutos e agências financiadoras, expansão do ensino universitário e implantação de um sistema de pós-graduação razoavelmente eficiente. O aumento recente no número de cientistas brasileiros se refletiu, por exemplo, no aumento da nossa produção científica, expresso pelo número

de artigos em periódicos científicos indexados. O Brasil, quinto maior PIB do mundo em 2013 segundo o FMI, passou do 17º para o 13º lugar no ranking mundial de produção científica, entre 2001 e 2011, expresso pelo número total de artigos, segundo métricas do *Journal of Citation Reports* (JCR) da companhia Clarivate Analytics (Figura 1).



**FIGURA 1:** Ranqueamento cientométrico do Brasil, pelo número de artigos adicionados à Web of Science entre 2011 e 2016. Fonte: JCI Reports.

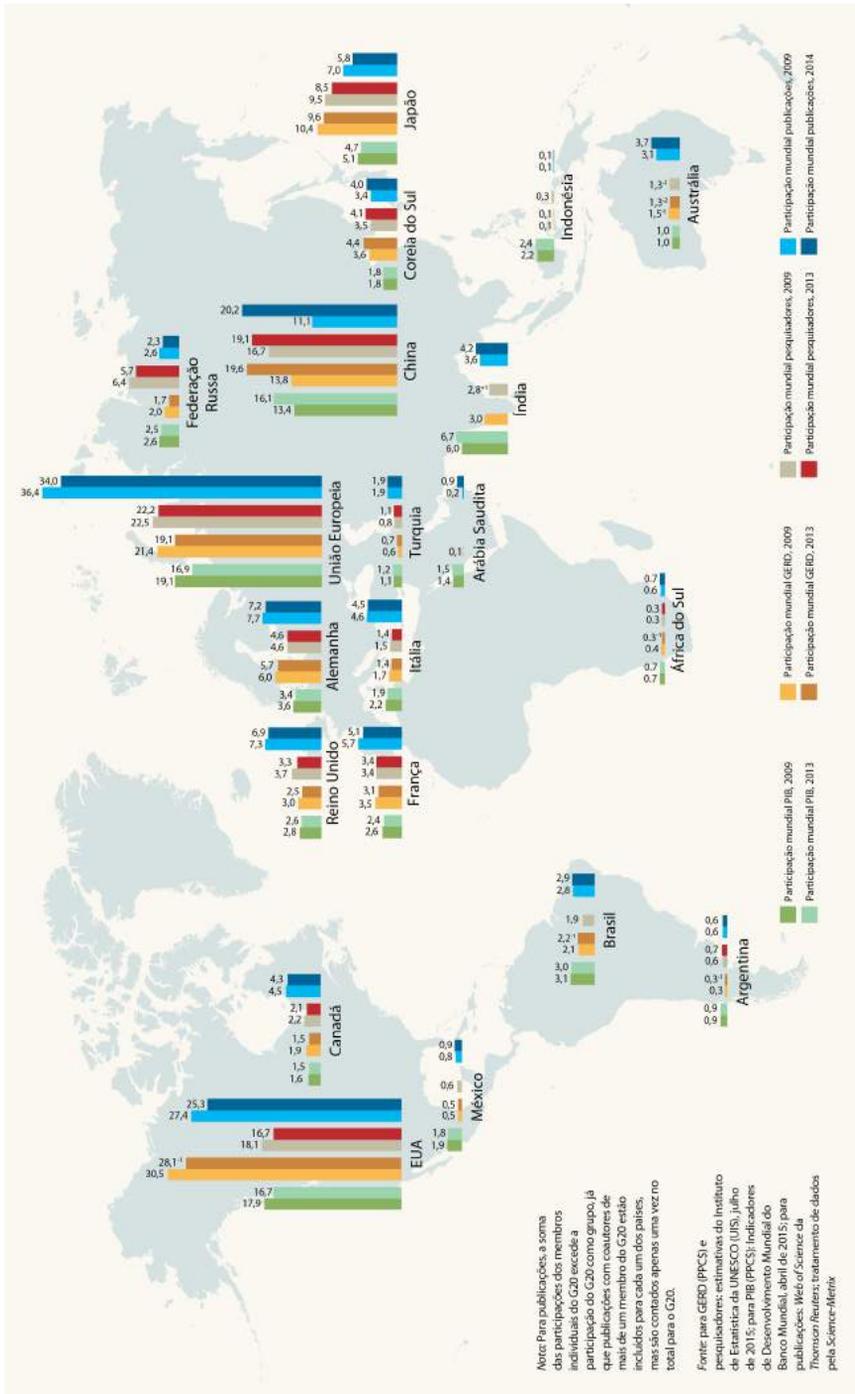
Um levantamento mais restrito do suplemento “Nature Index Global” da revista Nature, posicionou o país em 23º lugar no plano mundial, indicando um crescimento de 17,3% entre 2012 e 2013. Em termos gerais, a produção científica brasileira quintuplicou nos últimos 20 anos. A comunidade científica na área das Ciências do Mar parece acompanhar essa tendência, com crescimentos anuais significativos, como indicado pelo número de egressos em cursos correlatos. Por outro lado, se comparada com centros de excelência científica, nossa massa crítica de cientistas do mar continua insatisfatória para atender as demandas de um país heterogêneo e desigual, com 30% da população vivendo em municípios litorâneos e um enorme passivo socioambiental ao longo de seus 8.000 quilômetros de costa.

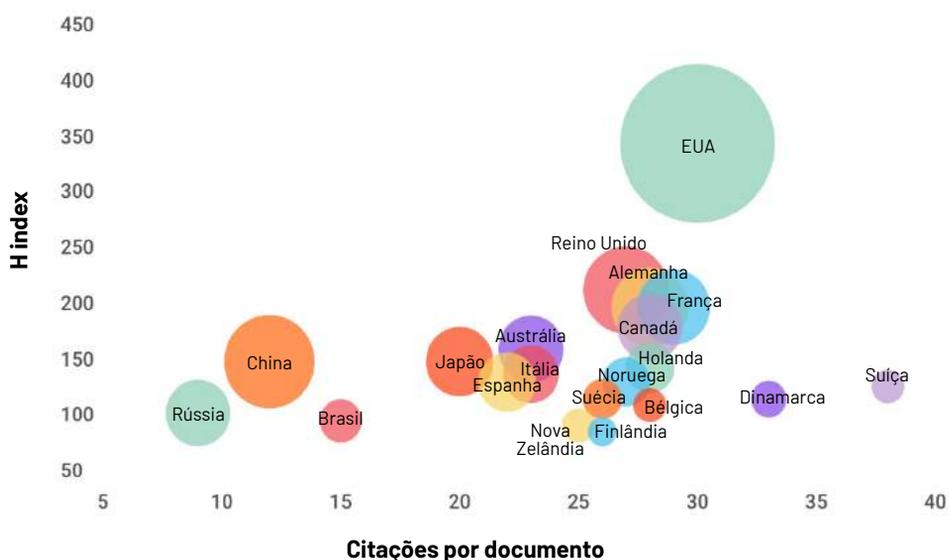
O Brasil tinha cerca de 100.000 pesquisadores em tempo integral em 2010, enquanto os Estados Unidos tinham dez vezes mais, ainda segundo dados da revista Nature. O Diretório Lattes do CNPq, em sua formatação mais recente, atualizou esse número para cerca de 200.000 pesquisadores vinculados a grupos de pesquisa. A Figura 2 ilustra essa assimetria global, agora em termos do número de pesquisadores por habitantes.

Esses números nos ajudam a denunciar o mito de que estamos formando um número excessivo de biólogos marinhos, oceanógrafos ou cientistas do mar. Essa percepção, recorrente até mesmo nos fóruns de coordenação de cursos de graduação e pós-graduação, erra ao pressupor que formamos pessoal unicamente para suprir um mercado de trabalho já saturado ou para suprir as demandas da academia, aqui entendida como o conjunto de universidades ou instituições dedicadas ao ensino, pesquisa e extensão. Formamos pessoas para que estas **criem e ampliem** mercados de trabalho de forma ativa e dinâmica e possam assim atender de fato os desafios de desenvolvimento de um país como o Brasil.

É provável que a percentagem relativa de artigos científicos publicados por brasileiros continue a crescer de forma significativa ou mesmo exponencial ao longo das próximas décadas, apesar do cenário socioeconômico desfavorável em setembro de 2020. Esse aumento significativo da produtividade tem sido visto como evidência da maturidade e internacionalização da ciência brasileira; tem sido também associado a um aumento da qualidade, do impacto ou da influência da ciência que produzimos, como sugerido, na prática, pelo sistema Qualis da CAPES. Esse segundo mito é novamente desmentido por métricas simples do JCR. A qualidade da ciência praticada no país pode ser avaliada, de forma indireta e relativamente grosseira, ainda seguindo o padrão cientométrico, pelo número de citações recebidas por artigos publicados por cientistas brasileiros. Nesse quesito, o Brasil mantinha o 43.<sup>o</sup> lugar no ranking mundial e um índice H igualmente baixo, entre 2001 e 2013. As métricas específicas mostram que o ranqueamento da área da Oceanografia é igualmente insatisfatório (Figura 3).

FIGURA 2: Número proporcional de pesquisadores em função do PIB global. Fonte: Unesco Science Report, disponível em [https://en.unesco.org/unesco\\_science\\_report](https://en.unesco.org/unesco_science_report)





**FIGURA 3:** Ranqueamento do Brasil em termos de índice H e de número de citações por documento entre 1996 e 2019, na área da Oceanografia. Fonte: SJR (Scientific Journal Rankings - SCImago, disponível em <https://www.scimagojr.com>)

Por fim, uma ciência de periferia tende a ser praticada e concentrada em instituições estatais, como as universidades públicas e alguns poucos institutos federais e estaduais. Com as esperadas exceções das indústrias do petróleo, farmacêutica, agrônômica e pecuária, a ciência de periferia não consegue motivar a iniciativa privada que, na maior parte dos casos, como indicado pelo capítulo de Oceanografia Operacional no início deste livro, nunca a vê como um investimento potencial. Isso a afasta e dissocia ainda mais das demandas concretas da sociedade, que ainda não consegue concebê-la como vetor eficiente de desenvolvimento econômico e social. Discuto a seguir como a expansão corrente da nossa massa crítica, em um quadro de pouca aderência às demandas sociais, de baixa qualidade e baixo impacto da produção, distorce o processo de competição intrínseco à atividade científica e intensifica algumas crises éticas típicas da ciência contemporânea.

## 2 COMPETIÇÃO CIENTÍFICA EM UMA CIÊNCIA DE PERIFERIA: A AMPLIFICAÇÃO DAS CRISES ÉTICAS

A competição científica pode ser vista como uma corrida para atingir, de forma rápida e eficiente, conhecimento melhor ou mais útil ou mais aplicável. Ela é paradoxalmente um dos motores da ciência de excelência. Apesar deste argumento soar perturbador no contexto ético, a competição é um fato da ciência, e pode ser rastreada e identificada com facilidade ao longo da história moderna e contemporânea. Curiosamente, cientistas ou grupos de pesquisa eficientes e de excelência, com amplo destaque na ciência contemporânea, são sempre conscientes de que o seu próprio avanço depende do avanço dos seus presumidos competidores, por mais agressivos que sejam em suas práticas e posturas. Entendem que a colaboração e interação são condições imprescindíveis para o seu próprio sucesso e fazem disso uma estratégia deliberada do processo da pesquisa.

Colaboração e interação costumam ser moedas escassas em uma ciência de periferia, cujas tradições, práticas e escolas científicas se estruturaram e se estruturam em um quadro de isolamento e autocentramento. Essa constatação nos permite apontar a primeira e talvez principal crise ética que afeta nossa ciência de periferia. Nossa ciência isolada e autocentrada, apesar da sua massa crítica numerosa, continua pouco criativa e, por causa disso, pouco útil ou influente. Continuamos a produzir conhecimento de forma incremental e reiterativa, muitas vezes de forma consciente e premeditada. Nossa ciência é também pouco criativa porque a criatividade exige esforço e empenho, únicas maneiras de transcendermos zonas de conforto e segurança intelectual. Nossa ciência é pouco criativa porque pouco dialoga ou pouco interage com a ciência global, devido ao isolamento histórico causado pela geografia e pela língua, ou mesmo autoimposto por uma certa tradição xenofóbica.

As medidas cientométricas fornecem mais um doloroso exemplo do caráter periférico da ciência praticada no Brasil. Ainda segundo a *Nature*, a média global ponderada de citações de artigos científicos indexados foi de 1 entre 2008 e 2012, enquanto a média brasileira foi de 0,6, abaixo do Peru, Argentina, Chile e Colômbia. Uma das explicações é o fato de apenas 25% dos artigos indexados publicados por pesquisadores brasileiros envolverem parcerias e co-autorias com pesquisadores estrangeiros. Essa baixa internacionalização reduz ainda mais a nossa visibilidade e nosso possível impacto. Essas

métricas seriam ainda mais baixas se a produção brasileira não indexada tivesse sido igualmente considerada.

Uma cultura científica de periferia geralmente se expressa, portanto, como imitação e reprodução da ciência de excelência. A história da ciência feita no Brasil fornece mais um reforço incômodo para essa argumentação. Tivemos e temos poucas escolas ou tradições científicas brasileiras verdadeiramente influentes no cenário internacional ou que mereçam destaque por sua inventividade e impacto. Não tivemos, por exemplo, nenhum prêmio Nobel a reconhecer alguma excelência coletiva ou individual. Simplesmente nunca fomos reconhecidos. Os poucos e grandes cientistas brasileiros só fazem reforçar esse paradigma, na medida em que só conseguiram ou conseguem destaque por quebrar, como indivíduos, a barreira do isolamento. Nesse contexto, a ciência praticada no Brasil permanece redundante em termos operacionais, apesar do evidente crescimento quantitativo nos últimos anos. Ela simula, ela adapta, ela improvisa, mas pouco cria e pouco inventa, até mesmo no sentido literal do termo. Segundo um relatório técnico de 2012 da Organização Mundial de Propriedade Intelectual (WIPO), o número de patentes válidas no Brasil foi de 41.453, contraposto a 2.200.000 dos Estados Unidos. Os números brasileiros são bastante inferiores aos de qualquer outro país do BRICS. A falta de inventividade e a marcada “redundância operativa” da pesquisa feita no Brasil já foi reconhecida até mesmo por nossas agências financiadoras que a chamam de “ciência incremental” e tentam timidamente penalizar essa tradição.

Esse quadro de isolamento internacional se reproduz internamente no caso do Brasil, um país de dimensões continentais, com enorme concentração geográfica da atividade científica. Por exemplo, o percentual da pesquisa nacional produzida pela USP, UNICAMP e UNESP foi de 37% do total entre 2012 e 2013. Apesar de saudáveis tendências de descentralização nas últimas décadas, principalmente no Norte e Nordeste, uma situação similar se repete no caso particular da pesquisa em Ciências do Mar, ainda muito concentrada no Rio Grande do Sul, em São Paulo e no Rio de Janeiro. Podemos nos sentir confortáveis e felizes com o sucesso de nossas universidades e institutos mas certamente nosso país (e nós mesmos) nos sentiríamos ainda mais confortáveis e felizes com mais universidades e mais institutos produzindo mais e melhor conhecimento.

Acredito que, sob essas condições, a competição pelo conhecimento, vista como um processo intrínseco e saudável da ciência contemporânea, pode sofrer distorções significativas no espaço da ciência de periferia de um país em desenvolvimento. Se a massa crítica se expande e se a base de sus-

tentação financeira não acompanha essa expansão, a competição científica por conhecimento passa a ser confundida com **competição por recursos**. Isso vem acontecendo em nosso país, de forma crescente e pouco saudável. Nossa base de sustentação financeira de C&T, que passou por uma brutal contração nos últimos anos, continua basicamente estatal. Há tímidas tentativas de descentralização e de melhor distribuição regional de recursos, com a saudável adoção de critérios geopolíticos pelas agências financiadoras. Apesar disso, o quadro geral que vivenciamos é o de um aprofundamento do fosso entre instituições e grupos de pesquisa regionalizados, que poderiam e deveriam se articular sob a forma de grandes redes de pesquisa e de formação de recursos humanos para lidar com os grandes problemas nacionais. Exemplo recente foi dado pelos Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia em Ciências do Mar. Apesar das explícitas boas intenções do edital, a própria cultura científica vigente em nossa ciência periférica fez com que os recursos disponíveis fossem pulverizados em redes regionalizadas, atendendo a critérios isonômicos e não necessariamente de mérito. Nesta segunda grande crise ética, instituições e grupos de pesquisa competem entre si pelos melhores recursos, cursos de pós-graduação competem entre si pelos melhores conceitos e pela maior visibilidade, e pesquisadores individuais competem entre si por recursos irrisórios e fragmentados. As tentativas de reverter esse quadro, voluntariamente ou por indução das agências financiadoras, são ainda muito tímidas.

Sob essas condições, a energia intelectual que deveria ser colocada no plano da criatividade e da imaginação e no plano da colaboração e da integração é muitas vezes investida no produtivismo individual. Isso cria uma terceira crise ética, mais grave, mais perversa e mais dolorosa. A cultura acadêmica brasileira tem desenvolvido e intensificado – de forma consciente ou inconsciente – uma série de manhas para alavancar a produção individual e enganar os sistemas de avaliação. Para isso, utiliza espertamente as próprias medidas cientométricas, que são os alicerces quantitativos da ciência contemporânea. Gestores de grandes laboratórios e de equipamentos multiusuários se tornam automaticamente cientistas prolíficos. Acordos de cavalheiros são feitos entre e dentro de grupos de pesquisa para alavancar artificialmente a produção de supervisores e alunos. O próprio mercado editorial se encarrega de dar abrigo a essas distorções, com a expansão das publicações internacionais de “acesso aberto”, que se transformaram em um grande negócio editorial. O grande drama é que essas manhas proliferam e se sustentam sob o mesmo quadro de ciência incremental e de baixa criatividade. Não há necessidade de aqui aprofundarmos esta reflexão, pois essa verdadeira crise

ética vem sendo regularmente denunciada por muitos cientistas no Brasil e no mundo. O que nos cabe é discutir estratégias e mecanismos de indução para confrontar essas distorções de forma inteligente e eficaz.

### **3 UM NOVO PARADIGMA: PARA MELHORAR A “CIÊNCIA BRASILEIRA”, NÃO PRECISAMOS APENAS AUMENTAR O NÚMERO DE CIENTISTAS, PRECISAMOS DE CIENTISTAS MELHORES ATACANDO PROBLEMAS MELHORES**

Acredito que as crises éticas que afligem a ciência feita no Brasil, e mais particularmente as Ciências do Mar, são, antes de tudo, uma crise da imaginação criadora. A falta de criatividade se reflete na qualidade da produção, no seu impacto científico e social e na sua efetiva utilidade para sociedades injustas e desiguais no país e no mundo. Nesse sentido, a simples expansão dos recursos financeiros disponíveis pode não ser a única ou a melhor solução para melhorar a qualidade da ciência que produzimos. A injeção de mais recursos não funcionará enquanto o paradigma da ciência incremental não for quebrado. Muito além de uma eventual melhoria dos indicadores quantitativos e da progressão do país no ranqueamento cientométrico mundial, precisamos agora de um verdadeiro choque de qualidade na ciência praticada no Brasil, como solução dessas crises éticas e como fundamento essencial para lidarmos com nossos problemas correntes de desenvolvimento. Esse choque de qualidade só acontecerá se desenvolvermos novos quadros de pensamento e novos quadros de formação de recursos humanos.

Que exercícios bem intencionados de futurologia podemos fazer neste momento? Temos de desenvolver estratégias para forçar a reunião de cientistas com formações e interesses muito variados em torno dos mesmos tópicos de pesquisa. Esses tópicos deverão trazer em si os principais ingredientes da pesquisa científica: bons problemas, boas perguntas e boas hipóteses de trabalho. Mais inovação e mais criatividade sabidamente surgem da interação de campos variados do conhecimento e da troca de novos métodos e tecnologias, com a quebra de barreiras disciplinares, com a transferência de conhecimento de um campo para outro e com a abordagem simultânea de

distintas escalas de espaço e tempo. Criatividade e inventividade precisarão ser induzidas, apoiadas e premiadas **de fato** pelas agências financiadoras e pelos espaços acadêmicos de formação de pessoal. Um maior potencial de inovação e uma maior criatividade nos projetos de pesquisa deverão se tornar exigência explícita das agências em seus editais de apoio à ciência e tecnologia e não apenas um discurso retórico. Processos de avaliação precisarão conferir mais peso à originalidade das propostas e aos seus presumidos impactos científicos e sociais do que aos currículos dos proponentes, principalmente se estes forem de natureza incremental, independentemente do seu encaixe em Qualis A ou Z. Existe um marcado divórcio entre as exigências teóricas e retóricas dos editais (interdisciplinaridade, multidisciplinaridade, foco integrado dos resultados, divulgação dos resultados, transferência à sociedade, sustentabilidade, inovação e criatividade etc.) e os critérios usados para avaliar e selecionar propostas. O peso dos critérios cientométricos continua muito maior do que a originalidade dos projetos ou a sua potencial relevância social.

No caso das Ciências do Mar, essa combinação certamente contribuirá para uma melhor compreensão e previsão das estruturas e processos oceanográficos. Temos aí um grande desafio para as próximas décadas: precisaremos, antes de tudo, de uma cultura científica mais original para chegarmos a uma ciência marinha menos descritiva (por mais necessária que ela ainda seja), menos correlativa, mais preditiva e mais sensível às demandas da sociedade. Teremos de encontrar novas maneiras de pensar a dicotomia entre ciência aplicada e não aplicada. A ciência oceanográfica precisará assumir rumos mais pragmáticos, na medida em que as demandas sociais se tornarão mais presentes e mais urgentes e precisarão ser explicitadas com maior intensidade e foco pela própria sociedade, como forma de sensibilização e envolvimento dos pesquisadores. O mundo continuará precisando da ciência, como tem acontecido desde que ela se organizou como um ramo legítimo da atividade intelectual humana, mas cada vez mais a ciência também precisará do mundo. As águas dos oceanos poderão ficar mais ácidas e mais quentes ao longo das próximas décadas, mas nós, cientistas do mar, precisaremos estar conscientes de que as mudanças esperadas na sociedade serão muito maiores. Se, como cientistas naturais, não compreendermos a complexidade dessa grande forçante social, só fará aumentar a imprevisibilidade das nossas projeções e reduzirá a eficácia de nossos exercícios de futurologia.

Todas as áreas das Ciências do Mar serão fortalecidas com uma massa impressionante de dados e informações, como já adiantado pelos capítu-

los de oceanografia operacional e de genômica neste livro. A massa crítica dos cientistas do mar continuará aumentando, principalmente nos países em desenvolvimento, como a China, a Índia, o Brasil e a África do Sul. A relevância social da oceanografia também aumentará, pois ela terá muito a dizer sobre as mudanças climáticas globais, sobre a produção de alimentos e segurança alimentar e sobre a ampliação da matriz energética mundial, seja ela renovável ou não. O aumento do número de cientistas do mar será uma dádiva, mas também um risco, na medida em que nossas funções de cientistas aplicados se tornarão socialmente mais relevantes, em detrimento da pesquisa exploratória de alto risco e baixo retorno. As parcerias entre universidades e a iniciativa privada deverão se expandir à medida que as novas tecnologias propiciem maior exploração dos recursos oceânicos. Teremos assim novas e grandes oportunidades para expandir as Ciências do Mar além dos espaços acadêmicos tradicionais, ainda muito dependentes dos financiamentos federais e estaduais, pelo menos no caso do nosso país.

Por fim, as Ciências do Mar terão a oportunidade de saldar uma dívida histórica com a sociedade. Com nossos modelos clássicos de Biologia e Oceanografia Pesqueira, colocamos em risco ou virtualmente levamos ao colapso muitos recursos pesqueiros importantes. Uma ciência oceanográfica mais preditiva, mais criativa e socialmente mais informada poderá reverter esse processo, possibilitando o uso mais viável ou sustentável da nossa base de recursos alimentares, com a integração dos usuários nos processos de planejamento e gestão de recursos. É fato que isso ocorre no mundo todo e não é apenas mais uma peculiaridade de nossa ciência periférica.

Por outro lado, mudanças na maneira de fazer ciência e na percepção da sua relevância social deverão ser acompanhadas por novos estilos e estratégias para a formação de pessoas. Não precisaremos apenas formar mais cientistas, precisaremos formar cientistas melhores, focados em **problemas melhores**. Devemos priorizar modelos educacionais que privilegiem a inovação e a criatividade muito mais do que o acúmulo ou simples reprodução acrítica do conhecimento. Devemos estimular os nossos alunos a não se contentarem com projetos de natureza incremental e a ousarem cientificamente, mesmo correndo o risco do fracasso. Os sistemas educacionais deverão fazer uso mais eficiente da tecnologia da informação para melhor avaliar a base de conhecimento de cada aluno. Isso deverá ser feito de forma muito mais individualizada, suprimindo lacunas e aplicando estratégias de compensação mais adequadas. Nosso foco atual, com poucas exceções, direciona o esforço pedagógico para os alunos “medianos”. Precisaremos ajustar o conteúdo e as estratégias pedagógicas não para os medianos, nem para os bons e nem para

os fracos – precisamos pensar nas necessidades individuais de cada um e de todos os alunos.

Os primeiros computadores pessoais comercialmente acessíveis datam da década de 1970. Apesar disso, ainda não conseguimos incorporar de maneira eficiente as inovações tecnológicas tornadas disponíveis pela tecnologia da informação de baixíssimo custo. Muito além dos *moodles* ou plataformas similares de ensino, presenciais ou a distância, já podemos prover na prática oportunidades de aprendizagem para alunos em qualquer momento e em qualquer lugar. São imensas as implicações e potenciais das tecnologias de nuvem para a educação, ao reduzirem a dependência dos computadores de mesa e permitirem fácil acesso à informação em qualquer espaço ou circunstância: perceber e aplicar isso ao ensino será um grande desafio intelectual e braçal. O grande desafio tecnológico será prover conectividade e acesso permanente e constante de nossos alunos à melhor e mais variada informação científica, ao mesmo tempo que os provocamos e estimulamos intelectualmente a lidar com problemas reais e instigadores. Isso poderá tornar ultrapassadas as aulas expositivas presenciais a que estamos culturalmente condicionados, forçando a própria adaptação e evolução dos professores. Somos saudosistas e tendemos a replicar as estratégias de ensino dentro das quais fomos criados e nutridos. Fazemos isso porque ainda temos dificuldade para apreender e utilizar a nosso favor todas essas possibilidades tecnológicas. Nesse sentido, precisaremos repensar até mesmo os nossos espaços de aprendizagem, tornando-os mais compatíveis com as novas tecnologias da informação. Sabemos que a sala de aula retangular com carteiras em filas ordenadas é uma relíquia da idade industrial, mas sentimos dificuldade para intervir nessa convenção espacial. Nossos espaços pedagógicos continuam pensados para o quadro-negro e para o giz, agora substituídos de forma digital pelos projetores multimídia. Mesas circulares, espaços individuais para professores e alunos e espaços menores de aprendizagem focada em projetos ou problemas específicos deveriam ser progressivamente mais utilizados. Precisaremos aperfeiçoar e repensar o papel relativo do livro-texto e dos artigos científicos no ensino. Essas estratégias certamente conflitarão com os conceitos legais de propriedade intelectual, que também precisarão ser modificados.

Como docentes nas universidades públicas, passaremos por uma transição acelerada – deveremos ser muito menos “fontes de conhecimento” e muito mais gerenciadores de informações e estimuladores do pensamento criativo. Deveremos guiar nossos estudantes de maneira individualizada, ajudando-os a identificar e reconhecer fontes úteis de informações, induzindo

mecanismos de colaboração e forçando o seu diálogo científico com o mundo. Nossos alunos deverão ser mais estimulados e provocados intelectualmente. Precisarão ser ensinados a se manter antenados e atualizados com os avanços recentes da ciência como um todo e a identificar com segurança as principais lacunas e ambiguidades do conhecimento corrente. Deverão ser treinados a manter um espírito de permanente curiosidade e abertura para novas ideias e conceitos, não restringindo seus interesses pessoais e acadêmicos às suas áreas específicas de especialização. Deverão procurar a originalidade a todo o custo, não se contentando em replicar abordagens e procedimentos já aplicados por outros cientistas. Deverão aprender a ousar, mesmo sob o risco do fracasso metodológico ou conceitual. Deverão ser orientados a desenvolver uma visão crítica e socialmente bem fundamentada do que é fazer ciência. Deverão vivenciar outras realidades acadêmicas no país e no exterior, não se contentando com as facilidades oferecidas de forma mais imediata pelos seus ninhos acadêmicos de segurança. A internacionalização da ciência brasileira, entendida como uma via de mão dupla, permanecerá a melhor estratégia para lidar com o isolamento típico de uma ciência periférica. Nesse sentido, a única crítica histórica que realmente pode e deve ser feita a um programa como o extinto Ciência sem Fronteiras foi a sua timidez. Em vez de enviar dezenas de milhares de alunos para países onde se pratica ciência de excelência, deveríamos ter enviado centenas de milhares, para que aprendessem o melhor, com as melhores pessoas, nos melhores lugares, durante uma ou duas gerações.

É fácil refletir e falar, será difícil fazer. Isso exigirá audácia da nossa parte, principalmente no caso das gerações mais antigas mas ainda motivadas a formar bons cientistas do mar. Acredito que a ideia de que podemos resolver os grandes problemas da ciência e da sociedade de forma linear e disciplinar está teórica e metodologicamente ultrapassada. As pessoas, grupos de pesquisa e instituições que derrubarem esse paradigma estarão na crista da onda para produzir conhecimento novo e relevante. Cientistas com perfil e atuação disciplinares serão ultrapassados pelos acontecimentos científicos e perderão progressivamente o seu poder de influenciar a massa crítica de que fazem parte e a sociedade em geral.

## REFERÊNCIAS E AGRADECIMENTOS

Optei por não adotar a convenção das citações e referências bibliográficas, já que este é um texto de opinião. Deixo registrado, no entanto, o meu débito intelectual e pessoal a Claude Raynaut, Magda Zanoni, Rogério Cesar Cerqueira Leite, Jorge Pablo Castello, José Milton Andriquetto Filho, Andrea Kuszewski, Marc Dourojeanni, Richard Van Noorden, Morgan Giddings e uma infinidade de articulistas das revistas *Nature* e *PlosOne Biology*. A todos eles agradeço as provocações ao vivo e em cores ou os estímulos através da palavra escrita. Nesse sentido, todos os plágios eventualmente detectados foram voluntários e motivados por uma mesma intenção – pensar os descompassos de uma “ciência de periferia” e oferecer algum consolo para a minha própria perplexidade como cientista de um país em desenvolvimento. Desnecessário dizer que estas reflexões são também uma espécie de autocrítica feita por um cientista brasileiro para jovens cientistas brasileiros. Dedico estas reflexões a Claude Raynaut, José Milton Andriquetto Filho e à memória de minha querida amiga e colega Magda Zanoni, parceiros de uma grande aventura intelectual.



Criado no escopo do VI Plano Setorial para os Recursos do Mar – PSRM, o Comitê Executivo para a Formação de Recursos Humanos em Ciências do Mar – PPG-Mar tem por objetivo apoiar a formação de profissionais com sólido embasamento teórico e prático, capacitados para contribuir com a pesquisa, a conservação e a exploração ordenada dos recursos costeiros e marinhos.

A produção de material didático, uma das vertentes da ação do PPG-Mar, contexto em que se insere o presente livro *Fronteiras do Conhecimento em Ciências do Mar*, congrega integrantes da comunidade científica para que, a partir do conhecimento construído nas diversas instituições brasileiras, elaborem títulos essenciais à melhoria da qualidade do ensino de graduação e de pós-graduação em Ciências do Mar, área do saber que se dedica à produção e disseminação de conhecimentos sobre os componentes, processos e recursos do ambiente marinho e zonas de transição.

Os livros produzidos pelo PPG-Mar são custeados pelo Ministério da Educação – MEC e distribuídos gratuitamente aos estudantes, docentes e bibliotecas das instituições voltadas ao ensino e à pesquisa em Ciências do Mar, sendo também disponibilizados digitalmente no endereço <https://cienciasdomarbrasil.furg.br/>.



MINISTÉRIO DA  
EDUCAÇÃO



PÁTRIA AMADA  
BRASIL  
GOVERNO FEDERAL