

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/259705594>

Bioincrustacao marinha

Chapter · January 2009

DOI: 10.13140/RG.2.1.4572.9046

CITATIONS

5

READS

6,045

3 authors:



Bernardo Antonio Perez Da Gama
Universidade Federal Fluminense

92 PUBLICATIONS 1,773 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Renato Crespo Pereira
Universidade Federal Fluminense

188 PUBLICATIONS 3,695 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Ricardo Coutinho
Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM)

140 PUBLICATIONS 2,466 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



The effect of hydrodynamics on larval supply and recruitment of Cirripedia on cylinders: spatio-temporal variability as a function of flux [View project](#)



Antifouling activity of natural products from South American seaweeds [View project](#)

BIOINCRUSTAÇÃO MARINHA

Bernardo A.P. da Gama*, Renato C. Pereira &
Ricardo Coutinho

2009



Este material foi elaborado a partir do manuscrito original que deu origem ao Capítulo 12 do livro “Biologia Marinha”, editado por R.C. Pereira & A. Soares-Gomes, 2ª edição, publicado em 2009 pela Editora Interciência (Rio de Janeiro). Podem haver diferenças entre esta versão e a que foi publicada no livro.

Como citar este capítulo:

Da Gama, B.A.P., Pereira, R.C. & Coutinho, R. 2009. Bioincrustação marinha. *In: Pereira, R.C. & Soares-Gomes, A. (orgs.) Biologia Marinha*. 2ª edição, editora Interciência, Rio de Janeiro, pp. 299-318.

* Departamento e Programa de Pós-
Graduação em Biologia Marinha
Universidade Federal Fluminense
Niterói, RJ

bapgama@pq.cnpq.br

<http://sites.google.com/site/bapgama/>

BIOINCRUSTAÇÃO MARINHA

Bernardo Antonio Perez da Gama, Renato Crespo Pereira & Ricardo Coutinho

SUMÁRIO

- 12.1. Introdução, conceitos e definições
- 12.2. A bioincrustação como modelo ecológico
 - 12.2.1. Modelo clássico: facilitação, inibição ou indiferença?
 - 12.2.2. Modelo moderno: sucessão ecológica X disponibilidade no plâncton
 - 12.2.3. A incrustação sobre a incrustação – epibiose: prejudicial ou benéfica?
- 12.3. A bioincrustação como problema
 - 12.3.1. A bioincrustação sobre estruturas submersas feitas pelo homem
 - A bioincrustação na navegação
 - A bioincrustação sobre estruturas fixas
 - A bioincrustação na aquacultura
 - 12.3.2. Formas de combate à bioincrustação
 - Histórico
 - TBT
 - Tintas de baixa adesão
 - Antiincrustantes naturais
 - Superfícies biomiméticas
 - 12.3.3. A bioincrustação como vetor de introdução de espécies exóticas
 - No mundo
 - No Brasil
- 12.4. Quando a bioincrustação é desejável
 - 12.4.1. Recifes artificiais e FADs
 - 12.4.2. Aquacultura
- 12.5. Bibliografia

Este capítulo aborda a incrustação biológica marinha, focando-se especialmente no seu desenvolvimento sobre substratos artificiais - feitos pelo homem - ou vivos – epibiose, e nas formas de combate à incrustação, sejam elas naturais (*i.e.*, desenvolvidas pelos próprios organismos marinhos) ou artificiais (tintas antiincrustantes, etc.). Primeiramente, são introduzidos os conceitos e definições fundamentais para a delimitação do assunto. Em seguida, são apresentados os modelos clássicos e alguns estudos modernos sobre o desenvolvimento da incrustação. Posteriormente, são apresentados os problemas decorrentes da incrustação indesejável de organismos sobre estruturas arquitetadas pelo homem, com a subsequente discussão das suas várias formas de combate e da bioincrustação como vetor de introdução de espécies exóticas. Na última parte deste capítulo é apresentada, em contraposição à terceira parte, uma discussão dos efeitos benéficos da bioincrustação para o homem, pela atração e cultivo de espécies de interesse econômico.

12.1. INTRODUÇÃO, CONCEITOS E DEFINIÇÕES

A bioincrustação marinha (ou *biofouling*) é vista atualmente como um processo resultante da colonização ou do crescimento de bactérias, algas e/ou invertebrados sésseis sobre superfícies submersas, sejam elas naturais (tais como rochas, madeira, outros organismos, etc.) ou feitas pelo homem (cais, plataformas, cascos de navios, bóias, cabos, etc.). Uma definição menos utilizada, mas igualmente útil do ponto de vista prático é dada por Railkin (2004), segundo o qual a bioincrustação consiste de grandes concentrações de biomassa em substratos consolidados submersos. Cerca de 98% das espécies de animais marinhos vivem no bentos, sendo que pelo menos 127.000 vivem em fundos consolidados e somente 30.000 vivem em sedimentos marinhos. Além disso, organismos do plâncton, nécton e do próprio bentos podem atuar como substrato para comunidades de epibiontes. As comunidades incrustantes são altamente diversificadas, uma vez que podem ser formadas por uma ou mais camadas ou estratos constituídos por diversos organismos.

Wahl (1989) foi um dos primeiros a tentar sistematizar definições para incrustação e seus organismos componentes. Não obstante, um grande número de termos vem sendo usado para categorizar organismos colonizadores de substratos duros (incrustantes), alguns

dependendo do tipo de substrato colonizado (*e.g.*, animal, planta ou rocha), outros descrevendo a localização espacial do colonizador, sobre ou dentro do substrato, e ainda alguns aludindo à natureza dos organismos colonizadores (animais ou plantas). No entanto, ainda persiste grande confusão no uso destes termos. Um exemplo clássico é o uso do termo “epífita”, que é usado simultaneamente para designar qualquer organismo usando vegetais como substrato, bem como plantas utilizando qualquer organismo como substrato.

Um novo esquema de classificação para organismos incrustantes, que inclui as relações de epibiose (ou endobiose) entre estes organismos é resumido na Tabela 12.1. Cada um dos termos consiste de duas ou três raízes. A última sempre se refere à identidade do organismo colonizador, isto é, animal (*-zoário*), vegetal (*-fita*) ou ambos (*-bionte*). Este último termo torna-se útil quando, por exemplo, referimo-nos à comunidade colonizadora como um todo. Precedendo esta terminação, está o tipo de substrato, tal como rochoso (*lito-*), madeira (*xilo-*), planta viva (*fito-*) ou animal vivo (*zoo-*), e qualquer parte rígida orgânica de natureza desconhecida ou incerta, viva ou morta (*esqueleto-*). Este último termo faz-se necessário devido à freqüente dificuldade em estabelecer se a epibiose (ou endobiose) ocorreu antes ou após a morte do substrato (um exemplo típico é a incrustação encontrada sobre conchas de moluscos). Os termos usados para o substrato e para o colonizador podem ser precedidos por um termo indicando a localização espacial do colonizador, na superfície (*epi-*) ou no interior do substrato (*endo-*).

Um novo termo (esclerobionte) foi cunhado com o objetivo de incluir todos os organismos que habitem qualquer tipo de substrato consolidado, incluindo organismos sésseis (fixos) incrustados ao substrato, cimentados ou organicamente ancorados ao substrato, bem como organismos que o perfurem (perfurantes ou *borers*, no termo em inglês) ou mesmo organismos vágéis (móveis) que o habitem (Taylor & Wilson, 2003). Este termo torna-se necessário para uma distinção em relação ao termo “epibionte”, usado genericamente para comunidades que vivem sobre substratos vivos (mas não para aquelas que habitam substratos não-vivos). O termo basibionte é utilizado para designar um organismo ou substrato vivo hospedando uma comunidade ou organismo incrustante. Neste contexto, a epibiose passa a ser definida como uma associação facultativa, não-simbiótica, entre epibionte(s) e basibionte (*e.g.*, Wahl, 1989).

Tabela 12.1. Terminologia proposta para organismos marinhos incrustantes de substratos duros naturais (adaptada de Taylor & Wilson, 2003).

Substrato	Organismo colonizador					
	Animal (esclerozoário)		Vegetal (esclerófita)		Qualquer organismo (esclerobionte)	
Rocha	litozoário	epilitozoário endolitozoário	litófita	epilitófita endolitófita	litobionte	epilitobionte endolitobionte
Madeira	xilozoário	epixilozoário endoxilozoário	xilófita	epixilófita endoxilófita	xilobionte	epixilobionte endoxilobionte
Planta (viva)	fitozoário	epifitozoário endofitozoário	fitófita	epifitófita endofitófita	fitobionte	epifitobionte endofitobionte
Animal (vivo)	zoozoário	epizoozoário endozoozoário	zoófita	epizoófita endozoófita	zoobionte	epizoobionte endozoobionte
Qualquer parte orgânica (morta ou viva)	esqueletozoário	episqueletozoário endosqueletozoário	esqueletófita	episqueletófita zoosqueletófita	esqueleto- bionte	episqueletobionte endosqueletobionte

Segundo o sistema de classificação proposto, uma macroalga vivendo sobre outra seria uma epifitófita, enquanto a mesma macroalga sobre um animal seria uma epizoófita. Um briozoário sobre uma alga seria um epifitozoário. Desta forma, confusões como a decorrente do uso do termo “epífita” são facilmente evitadas.

Outros conceitos importantes ao abordarmos o tema da bioincrustação marinha dizem respeito aos processos conhecidos como estabelecimento larval, competência e recrutamento. No contexto aqui apresentado, o estabelecimento larval é definido como todo o processo que vai desde o momento em que uma larva de organismo incrustante torna-se apta para buscar o substrato (*i.e.*, torna-se “competente”) para fixação, seleciona o mesmo, fixa-se, sofre metamorfose e passa então ao contingente da população bentônica (este último processo sendo o “recrutamento”).

Durante a fase larvar planctônica, presente na vasta maioria dos organismos incrustantes, uma larva pode buscar ativamente o alimento (larva “planctotrófica” = alimenta-se de plâncton) ou não se alimentar, vivendo das reservas energéticas presentes no vitelo (larva “lecitotrófica”). Evidentemente, o tipo de nutrição larvar tem grande influência sobre o processo de dispersão e estabelecimento: larvas planctotróficas tendem a dispersar-se por mais tempo e a maiores distâncias, podendo, em alguns casos, inclusive protelar por algum tempo o estabelecimento até que um substrato apropriado seja encontrado. Por outro lado, larvas lecitotróficas têm menor tempo de permanência no plâncton, dispersando-se

por menores distâncias e sendo obrigadas a estabelecer-se assim que o vitelo se esgota. No entanto, por passar menor período no plâncton e possuir sua reserva energética, uma larva lecitotrófica tem maior probabilidade individual de sobrevivência, relativamente a uma larva planctotrófica (para maiores detalhes sobre desenvolvimento larvar, vide o capítulo 2). Alguns organismos incrustantes podem apresentar mais de um tipo de larva: crustáceos cirripédios (cracas), por exemplo, apresentam inicialmente estágios *nauplius* planctotróficos, sendo posteriormente substituídos por um estágio *cypris* lecitotrófico (Figura 12.3).

A enorme diversidade de organismos incrustantes (vide Tabela 12.2 e Figura 12.1), com origens filogenéticas, estratégias de vida, nutrição e habilidades competitivas distintas tornam o estudo da bioincrustação extremamente importante na compreensão de modelos e processos ecológicos de interesse geral, como a manutenção da diversidade de espécies, os efeitos da poluição, as formas de prevenção da incrustação em superfícies feitas pelo homem e a bioinvasão, por exemplo.

Tabela 12.2. Levantamento não-exaustivo dos principais grupos taxonômicos contendo espécies tipicamente pertencentes a comunidades incrustantes. Em alguns casos são fornecidos alguns gêneros típicos, enfatizando aqueles com ocorrência no litoral brasileiro.

Grupo taxonômico	Observações
Reino Monera	Procariontes unicelulares Bactérias e cianobactérias (também chamadas cianofíceas) formadoras de biofilme ou filamentosas
Reino Protista	Eucariontes unicelulares
Foraminífera	Foraminíferos bentônicos (<i>e.g.</i> , <i>Trochammina</i> , <i>Dyocibicides</i> , <i>Homotrema</i>)
Bacillariophyta	Diatomáceas bentônicas formadoras de biofilme (<i>e.g.</i> , <i>Navicula</i> , <i>Amphora</i> , etc.)
Reino Plantae	Eucariontes multicelulares fotoautotróficos
Chlorophyta	Macroalgas verdes (<i>e.g.</i> , <i>Ulva</i> , <i>Enteromorpha</i> , <i>Codium</i> , <i>Caulerpa</i> , etc.)
Phaeophyta	Macroalgas pardas (<i>e.g.</i> , <i>Sargassum</i> , <i>Dictyota</i> , <i>Padina</i> , ectocarpáceas, etc.)
Rhodophyta	Macroalgas vermelhas eretas (<i>e.g.</i> , <i>Gelidium</i> , <i>Pterocladia</i> , <i>Hypnea</i> , <i>Laurencia</i>) ou crostosas (<i>e.g.</i> coralináceas)

	não-articuladas)
Reino Animalia	Eucariontes multicelulares heterotróficos
Porifera	Esponjas (<i>Clathrina</i> , <i>Mycale</i> , <i>Tedania</i> , etc.)
Cnidaria	Corais, anêmonas, hidrozoários, zoantídeos, gorgônias (<i>e.g.</i> , <i>Mussismilia</i> , <i>Bunodossoma</i> , <i>Obelia</i> , <i>Zoanthus</i> , <i>Phyllogorgia</i> , respectivamente)
Brachiopoda	Braquiópodos (lofoforados dotados de concha bivalve, <i>e.g.</i> , <i>Bouchardia</i>)
Ectoprocta	Briozoários (lofoforados coloniais) crostosos ou arborescentes (<i>e.g.</i> , <i>Membranipora</i> , <i>Schizoporella</i> , <i>Watersipora</i> , <i>Bugula</i> , <i>Zoobotryon</i> , etc.)
Annelida	Poliquetas tubícolas como serpulídeos (<i>Hydroides</i>), espirorbídeos, espionídeos e sabelídeos
Crustacea	Cirripédios (cracas) pedunculados (<i>e.g.</i> , <i>Lepas</i>) ou não (<i>e.g.</i> , <i>Balanus</i> , <i>Amphibalanus</i> , <i>Megabalanus</i>); anfípodas formadores de tubos; caranguejos porcelanídeos e majídeos, entre outros
Echinodermata	Lírios-do-mar (crinóides); alguns ouriços-do-mar (equinóides) e estrelas (asteróides) de mobilidade reduzida podem ser considerados membros da incrustação
Mollusca	Bivalves como mexilhões (<i>Perna</i> , <i>Mytella</i>), ostras (<i>Ostrea</i> , <i>Crassostrea</i>), etc.; gastrópodes relativamente sésseis como <i>Colisella</i> , <i>Crepidula</i> , etc.; desovas bentônicas de vários grupos de moluscos, incluindo gastrópodes e cefalópodes (lulas)
Urochordata	Ascídias solitárias (<i>e.g.</i> , <i>Styela</i> , <i>Cyona</i> , <i>Phallusia</i>) e coloniais (<i>e.g.</i> , <i>Botrylloides</i> , <i>Symplegma</i> , <i>Didemnum</i> , <i>Diplosoma</i>)
Chordata	Peixes que vivem associados à incrustação, desovas bentônicas de várias espécies (<i>e.g.</i> , blenídeos)

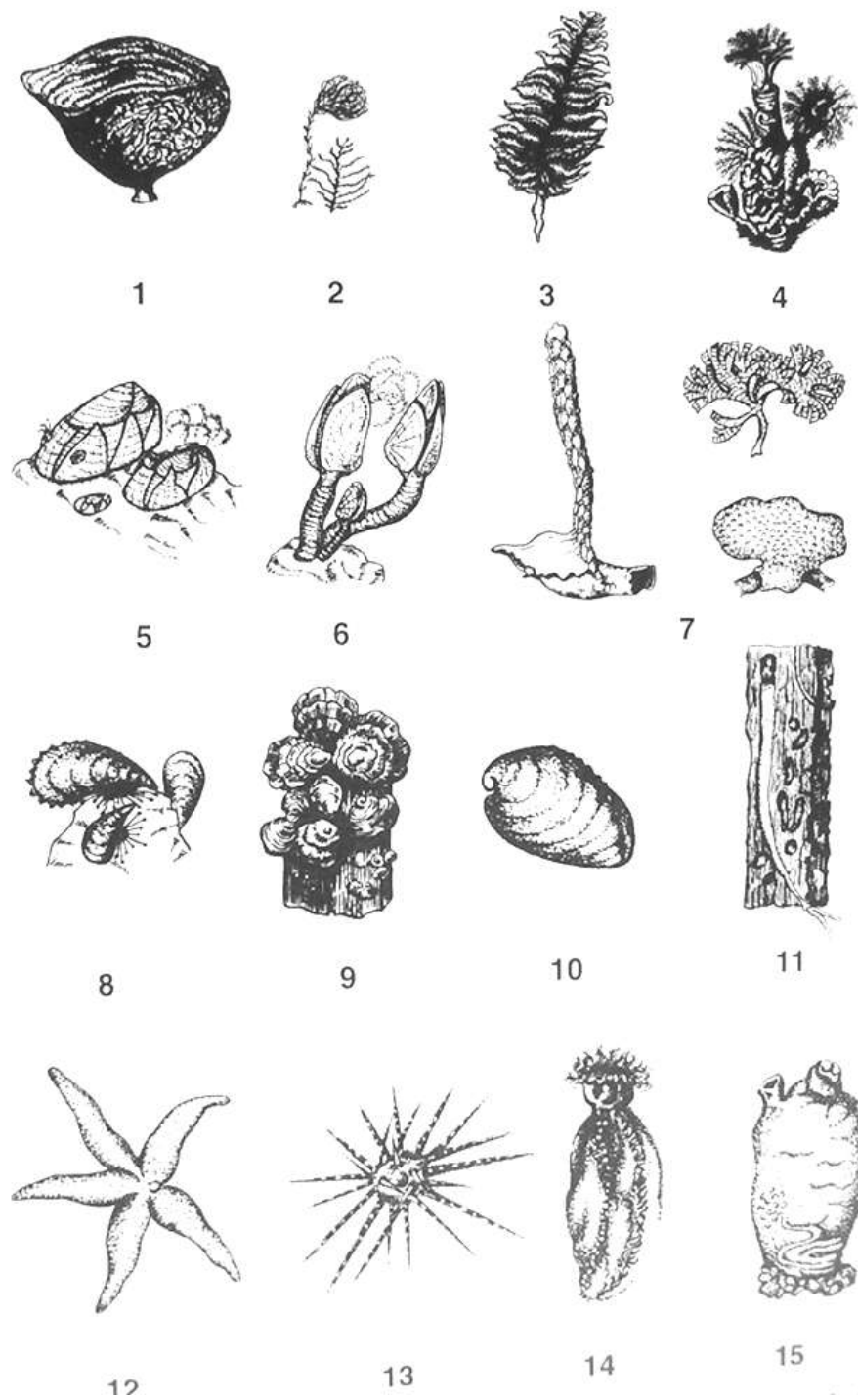


Figura 12.1. Exemplos de organismos incrustantes marinhos. (1) Esponja; (2) hidrozoários; (3) octocorais penatuláceos; (4) poliquetas da família Serpulidae; (5-6) cracas: da família Balanidae (5) e pedunculadas do gênero *Lepas* (6); (7) briozoários arborescentes ou

crostosos; (8-11) moluscos: mexilhão *Perna perna* (8), ostras do gênero *Ostrea* (9), o abalone *Haliotis* (10) e o perfurante *Teredo navalis* em seu habitat de madeira (11); (12-14) equinodermas: estrelas-do-mar (12), ouriços-do-mar (13) e pepinos-do-mar (14), e (15) uma ascídia solitária (redesenhados a partir de Railkin, 2004).

Quando nos referimos a substratos consolidados submersos, é importante destacar que estes, assim como as comunidades incrustantes sobre eles desenvolvidas, também são extremamente variáveis em estrutura e propriedades. Qualquer substrato marinho suficientemente firme e consolidado – variando desde grãos de areia relativamente grandes a grandes extensões de solo submarino litificado (petrificado) - pode ser perfurado ou incrustado. Substratos marinhos incluem materiais biogênicos (tais como conchas, carapaças, esqueletos coralíneos, rodolitos, madeira, ossos e esqueletos de outros organismos marinhos) e abiogênicos (rochas de natureza variada), bem como estruturas antropogênicas tais como píeres, docas, cascos de barcos e navios, plataformas de petróleo, defensas de pontes e portos, bóias de navegação, recifes artificiais, tubulações de resfriamento (*e.g.*, de usinas term nucleares), cabos submarinos, e até lixo flutuante à deriva nos oceanos. As estruturas feitas pelo homem têm um papel particularmente importante na dispersão de organismos incrustantes além de seus limites de distribuição naturais, em um processo hoje conhecido como bioinvasão, discutido adiante neste capítulo.

A enorme maioria dos substratos naturais e artificiais concentra-se nas zonas costeiras e plataformas continentais dos oceanos (zona nerítica), e a maior parte dos microorganismos e organismos macroscópicos marinhos habitam estes substratos. De acordo com estimativas recentes, sua área geral parece ser comparável à dos substratos inconsolidados (sedimentares) rasos, constituindo cerca de $2,74 \times 10^7 \text{ km}^2$ (*i.e.*, 27 milhões de km^2). De acordo com estes cálculos, 99% da biomassa total bentônica mundial concentra-se ao redor dos continentes, em uma área correspondente a 25% do leito submarino do planeta, sendo as plataformas continentais as zonas mais habitadas (Figura 12.2). A concentração de biomassa viva nesta área é de 10 a 1000 vezes superior à biomassa das zonas oceânicas do planeta. Em recifes de corais (vide capítulo 17), que podem ser considerados como um tipo especial de comunidade incrustante, a concentração

de biomassa pode chegar a 23 toneladas por hectare, o maior valor entre todos os biótopos marinhos.

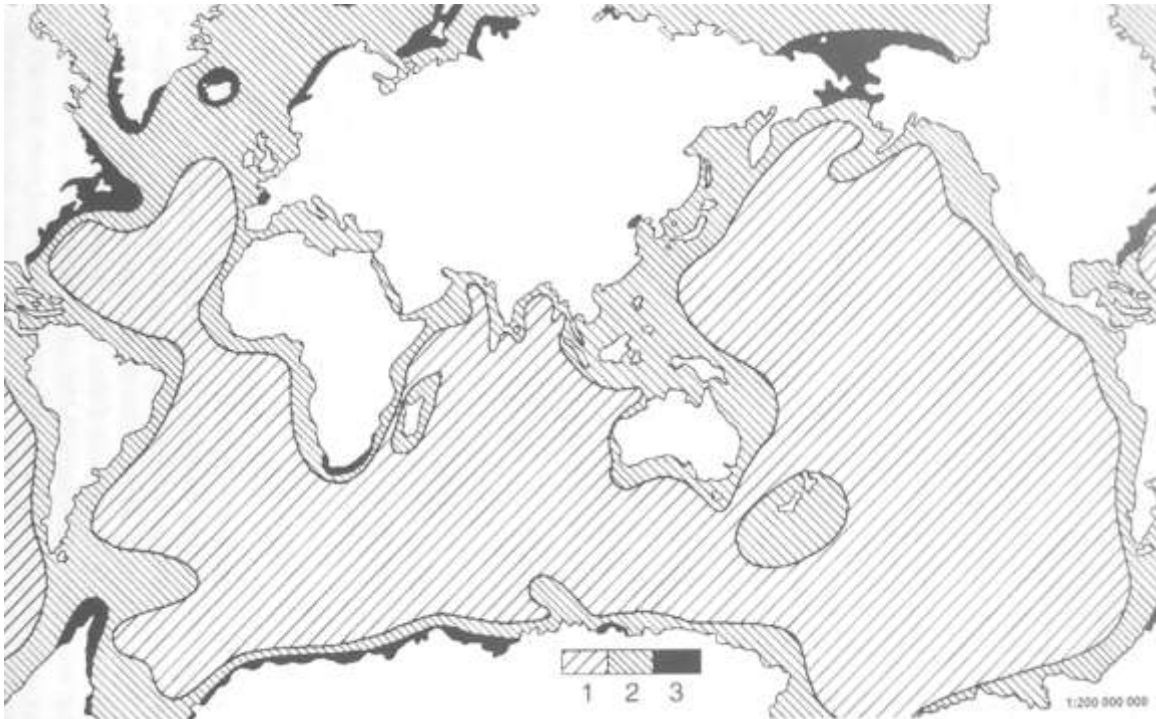


Figura 12.2. Distribuição da biomassa bentônica (em g/m^2) nos oceanos. (1) Menos que $1 \text{ g}/\text{m}^2$, (2) 1 a $100 \text{ g}/\text{m}^2$ e (3) mais que $100 \text{ g}/\text{m}^2$ (modificado de Railkin, 2004). Dados recentes mostram no entanto que a biomassa em grande parte do litoral brasileiro é consideravelmente maior que $100 \text{ g}/\text{m}^2$.

12.2. A BIOINCRUSTAÇÃO COMO MODELO ECOLÓGICO

A bioincrustação na região entremarés de costões rochosos, especialmente de regiões temperadas e do hemisfério norte, tem constituído um dos alvos clássicos de estudo de naturalistas e biólogos marinhos por muitas décadas, devido à facilidade de acesso durante a baixamar. Mais recentemente, no entanto, estudos experimentais com bioincrustação em substratos artificiais e em áreas tropicais têm permitido uma melhor compreensão do processo de bioincrustação, derrubando antigos modelos e generalizações.

12.2.1. Modelo clássico: facilitação, inibição ou indiferença?

Os estágios iniciais do desenvolvimento de comunidades incrustantes envolvem várias etapas: (1) adsorção de biopolímeros presentes na água a uma superfície; (2) atração química de bactérias; (3) adsorção reversível de bactérias; (4) adsorção irreversível de bactérias, envolvendo a fixação por fibrilas macromoleculares; (5) aglomeração e formação de colônias; (6) crescimento de uma população bacteriana secundária, assim como diatomáceas bentônicas e protozoários, bem como a adesão de material particulado. Tais etapas caracterizam-se somente pelo estabelecimento de microorganismos, por isto denominadas de comunidades de microincrustantes ou de *microfouling*. Embora considerada uma etapa inicial ou precursora, existe atualmente grande controvérsia sobre a importância real da microincrustação para o estabelecimento posterior da macroincrustação.

Posteriormente, uma comunidade de organismos macroscópicos (= macroincrustação) desenvolve-se sobre a microincrustação, incluindo cracas, briozoários, ascídias, esponjas e macroalgas, dentre outros. A esta comunidade dá-se também o nome de *macrofouling*.

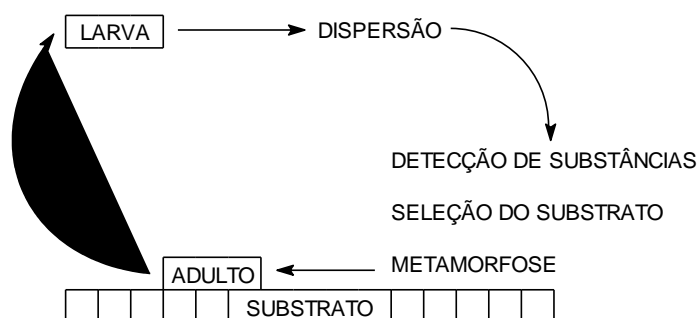


Figura 12.3. História de vida de um invertebrado marinho bentônico (modificado de Pawlik, 1992).

A fixação ou o estabelecimento das formas de dispersão (larvas ou propágulos) de organismos incrustantes (Figura 12.3) é dependente do tipo e da rugosidade do substrato, da intensidade de luz, da existência de colonizadores primários (*e.g.*, biofilme), da presença de adultos da mesma espécie, da quimiorrecepção das larvas e de outros fatores. A natureza do processo de colonização de um substrato é alterada progressivamente, compreendendo desde mudanças puramente físicas (adsorção de macromoléculas, etc.) até outras de natureza eminentemente biológica - muito embora fatores físicos como o hidrodinamismo próximo ao substrato possam ser importantes para o assentamento de larvas (Figura 12.4).

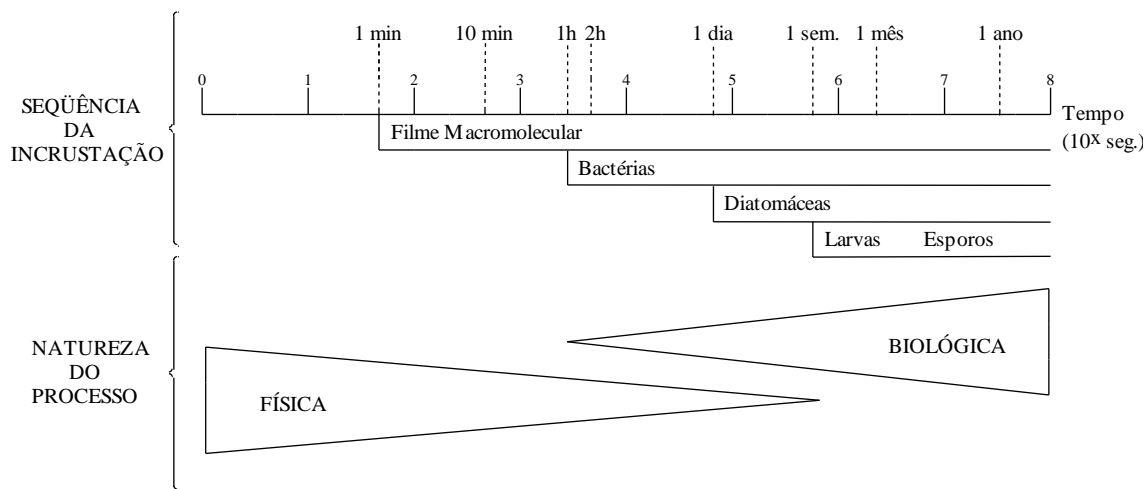


Figura 12.4. Sequência esquematizada de colonização de organismos levando ao estabelecimento de uma comunidade incrustante. A adsorção quase instantânea de macromoléculas é seguida várias horas mais tarde pela adsorção de bactérias. Diatomáceas e protozoários fixam-se tipicamente do segundo dia em diante. Larvas e esporos de algas iniciam a colonização após uma ou várias semanas (de acordo com a latitude, época do ano, etc.). Esquema adaptado de Wahl (1989).

No entanto, a sensibilidade das larvas às características químicas do substrato parece ter uma importância muito maior na sucessão, na estrutura das comunidades e nas interações entre as espécies do que se julgava previamente, tendo sido inclusive identificadas estruturas quimiossensoriais em larvas de invertebrados marinhos cuja função era anteriormente ignorada.

Existem três modelos ecológicos clássicos desenvolvidos para explicar a substituição de espécies ao longo do tempo ou em sucessões biológicas: (1) "facilitação" ou alteração das condições pelos colonizadores primários (*microfouling* constituído por biofilmes, ou *macrofouling* constituído por organismos oportunistas ou pioneiros) permitindo ou mesmo estimulando a fixação de colonizadores "tardios"; (2) "inibição", ou seja, colonizadores primários dificultam ou inibem a invasão posterior e (3) "tolerância" ou indiferença, ou seja, colonizadores primários não interferem no recrutamento posterior. Há evidências suficientes para sustentar tanto o modelo de facilitação quanto o de inibição,

embora o desenvolvimento de uma comunidade incrustante aparentemente possa seguir qualquer um destes três modelos ou uma combinação dos mesmos (Figura 12.5).

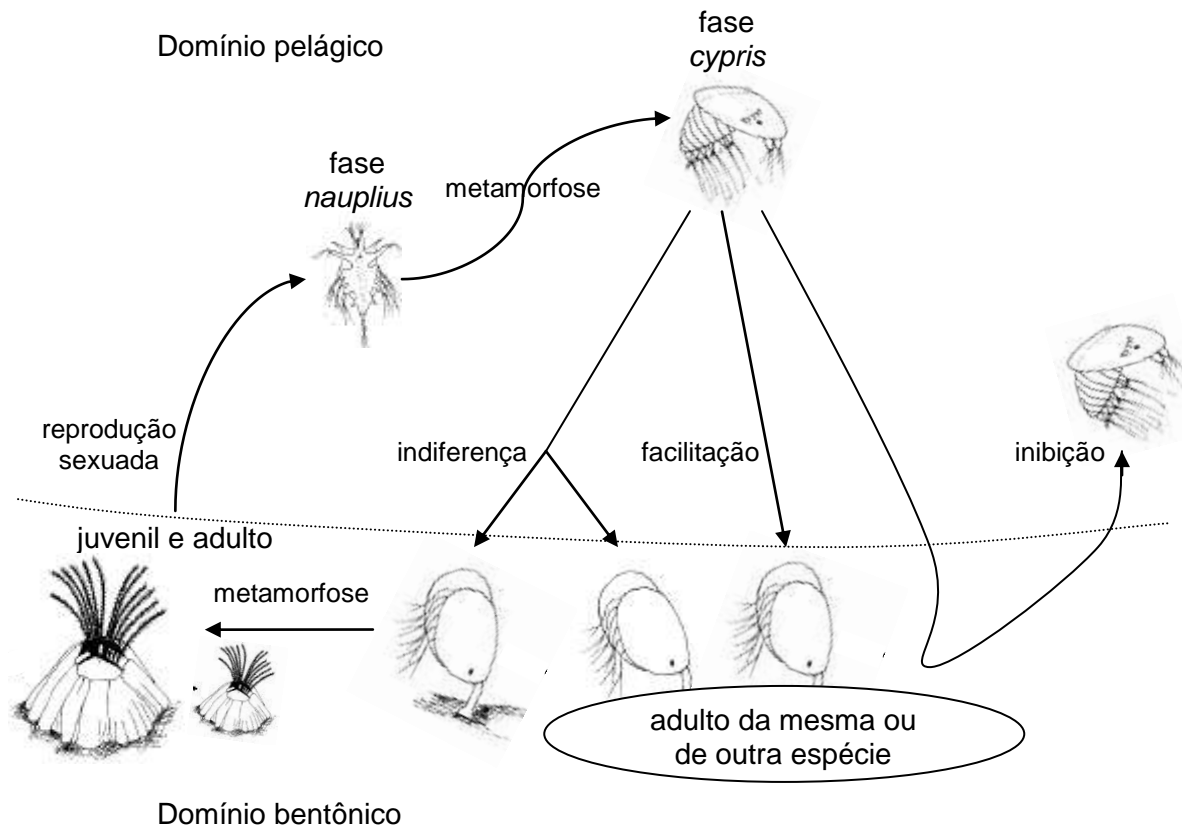


Figura 12.5. Modelos de estabelecimento de organismos incrustantes propostos na literatura. No exemplo ilustrado, uma craca (Crustacea, Cirripedia) adulta bentônica produz, por reprodução sexuada, larvas planctônicas livre-natantes. Os primeiros estágios larvais compreendem a fase *nauplius* (usualmente com vários estágios), de nutrição planctotrófica e fototropismo positivo. Após metamorfose, os náuplios passam à fase *cypris*, tornando-se competentes para o estabelecimento. Neste estágio, as larvas passarão a apresentar fototropismo negativo e nutrição lecitotrófica, o que torna sua duração no plâncton limitada. As larvas respondem então à presença prévia de organismos da mesma ou de outras espécies no substrato, podendo ser indiferentes (modelo da tolerância ou indiferença), atraídas (facilitação) ou inibidas pelos mesmos. Uma vez aderidas ao substrato, as larvas *cypris* sofrem metamorfose para sua forma definitiva (fases juvenil e adulta).

12.2.2. Modelo moderno: sucessão ecológica X disponibilidade no plâncton

Classicamente, a incrustação biológica tem sido vista como um processo sucessional direcional e ordenado, partindo inicialmente do condicionamento de uma superfície submersa por biomoléculas, sendo sucedido por microorganismos (bactérias, protozoários, microalgas) que por sua vez são sucedidos por macroorganismos como macroalgas e invertebrados (Figura 12.5). No entanto, têm sido acumuladas evidências que apontam para um modelo mais dinâmico do processo de incrustação biológica (Figura 12.6), no qual o processo é consideravelmente mais complexo, onde os diversos organismos incrustantes interagem entre si, e a colonização de uma superfície depende não apenas de um processo direcional de sucessão, mas da disponibilidade de cada um destes organismos em um dado momento (*e.g.* disponibilidade das formas de propagação no plâncton). Estes organismos, quando não se estabelecem em uma superfície, aglomeram-se e precipitam-se lentamente em direção ao fundo na forma de “neve marinha”. Este modelo vem encontrando suporte crescente em vários estudos recentes que incluem sistemas tropicais nos quais os processos sucessionais nem sempre seguem os modelos clássicos elaborados para regiões temperadas.

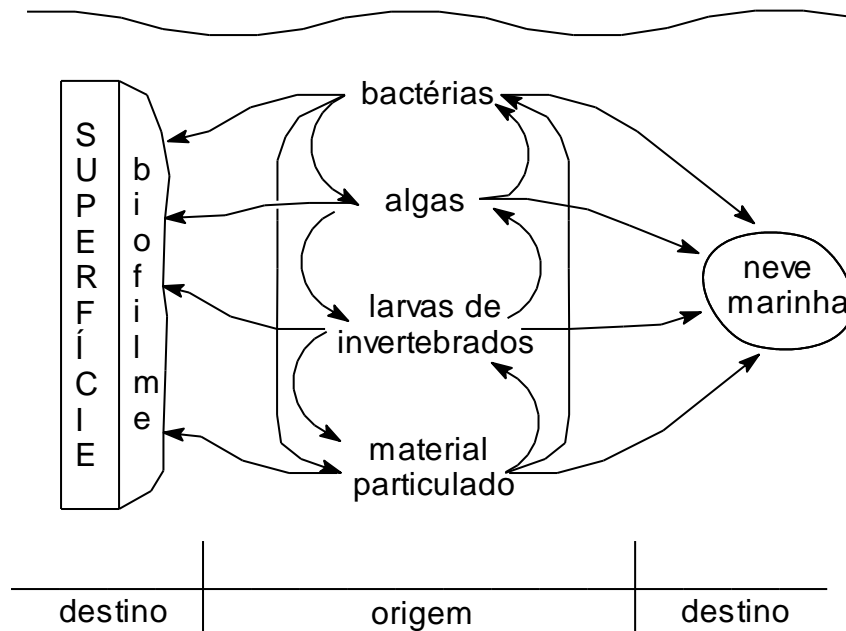


Figura 12.6. Modelo dinâmico do processo de bioincrustação (adaptado de Clare *et al.* 1992).

Uma consequência óbvia do modelo dinâmico apresentado é que a incrustação não é um processo sucessional estrito, que pode ser controlado pela interrupção dos estágios iniciais de colonização. Isto tem implicações teóricas bem como práticas, como no caso da aplicação de tintas antiincrustantes a superfícies feitas pelo homem, tais como embarcações, nas quais um tipo de organismo pode ser inibido (*e.g.*, biofilmes), sem que ocorra, no entanto, a inibição das etapas posteriores (macroincrustação) e vice-versa.

12.2.3. A incrustação sobre a incrustação - epibiose: prejudicial ou benéfica?

No ambiente marinho, sobretudo no domínio bentônico, onde ocorre uma ampla e rápida colonização do substrato, superfícies vivas e não-vivas são rapidamente cobertas com uma camada orgânica resultante da colonização por organismos vivos, tais como bactérias, protozoários, fungos, invertebrados e macroalgas. Uma vez que esta associação aconteça entre organismos vivos, o fenômeno é referido como epibiose.

A epibiose é um fenômeno tipicamente aquático. Embora ocorra ocasionalmente em ambientes terrestres, está restrita a climas úmidos e a poucos grupos epibiontes. A epibiose marinha decorre da associação fortuita entre vários animais e algas. As milhares de associações epibióticas incluem, de maneira geral, o organismo substrato (basibionte) e uma ou várias espécies de organismos colonizadores (epibiontes). Geralmente, os epibiontes são organismos como algas, briozoários, esponjas e poliquetas, que se fixam em outros organismos vivos - sésseis ou móveis - tais como crustáceos, peixes, moluscos, algas, etc.

Em ambientes marinhos densamente povoados, onde a competição por espaço é acirrada, a vantagem de colonizar um organismo ainda desocupado provavelmente é a razão dominante para a colonização de outros substratos vivos. Para algas e animais sésseis, todas as superfícies relativamente sólidas representam possíveis locais de fixação. Além disso, a alta viscosidade da água do mar em combinação com o baixo peso específico dos

organismos submersos, faz com que a adesão se torne crucial em ambientes turbulentos. Além disso, um modo de vida sésil com alimentação por filtração é mais favorável em ambientes aquáticos que terrestres. Por conseguinte, a epibiose e a bioincrustação são fenômenos muito comuns no mar, onde substratos duros desocupados podem freqüentemente tornar-se um fator limitante. Assim, qualquer basibionte potencial, *i.e.*, a maioria dos organismos bentônicos, bem como organismos do nécton e até do plâncton têm que se defender contra a incrustação ou tolerar a epibiose.

Apesar dessa “pressão de epibiose”, um grande número de organismos marinhos sésseis consegue manter a superfície corporal permanentemente livre de epibiontes. Em muitos casos, esta ausência de epibiontes em tais organismos se dá devido à presença de defesas antiincrustantes e/ou defesas adaptativas subjacentes. Uma gama inteira de possíveis mecanismos de defesa na competição por espaço por interferência pode ser utilizada tanto isoladamente como combinada: defesas mecânicas, físicas, químicas e defesas extrínsecas. Estes mecanismos incluem: estruturas e padrões de crescimento que diminuem ou impedem o crescimento de outros organismos, baixa suscetibilidade para recrutamento de epibiontes (defesas antiincrustantes físicas ou químicas), comportamentos agressivos e suscetibilidade diferencial quanto ao tipo particular de epibionte.

Um outro importante mecanismo de defesa utilizado por determinadas espécies marinhas para reduzir a epibiose é a produção de defesas químicas (às vezes chamadas neste contexto de aleloquímicos). Algumas espécies de macroalgas e invertebrados marinhos possuem como mecanismo de defesa a capacidade de sintetizar produtos naturais capazes de inibir o crescimento de outros organismos incrustantes sobre elas (vide capítulos 19 e 20). Esta produção de substâncias antiincrustantes tem, além de importância ecológica para os organismos que as produzem, aplicação evidente como novos agentes antiincrustantes em tintas (vide “Antiincrustantes naturais” a seguir).

Apesar de todos estes mecanismos de defesa, existem muitas espécies de organismos sésseis sujeitas à epibiose. Mesmo a lista de espécies incrustantes sendo longa, lamentavelmente, na maioria dos exemplos, não é possível relatar se um determinado epibionte em uma associação foi encontrado exclusivamente, em alta ou em baixa abundância, em um único basibionte particular. Não obstante, há relatos de até 180 espécies

de invertebrados epibiontes sobre a macroalga gigante *Laminaria sacharina*, enquanto quase 200 animais e algas vivem sobre sua congênere *L. japonica* em aquacultura.

A presença de epibiontes pode modificar numerosas interações entre os basibiontes e os componentes bióticos e abióticos do sistema. As conseqüências da epibiose incluem benefícios e desvantagens, tanto para os epibiontes quanto para os basibiontes. Alguns exemplos dos efeitos negativos da epibiose para os organismos basibiontes são: (1) aumento do peso e redução da fluabilidade, devido, principalmente, à epibiose por algas coralíneas crostosas, bivalves, cracas, poliquetas tubícolas calcáreas (*e.g.* serpulídeos) e briozoários calcáreas (*e.g.* *Membranipora*, *Schizoporella*, *Watersipora*); (2) redução da elasticidade e aumento da quebra em ambientes de alta turbulência, reduzindo a mobilidade devido a formas rígidas de epibiontes, como briozoários; (3) aumento da fricção superficial ou arrasto e da suscetibilidade a ser desprendido do substrato por epibiontes arborescentes e eretos; (4) danos a superfícies corporais delicadas devido às diferentes estruturas de fixação (Figura 12.7) dos epibiontes ou a alterações no pH causadas pelos mesmos; (5) redução da taxa fotossintética em algas, devido ao sombreamento causado pela epibiota (às vezes de até 80%); (6) redução da absorção de nutrientes em algas e da alimentação e trocas gasosas em invertebrados pelo recobrimento da superfície corporal; e (7) aumento da suscetibilidade do basibionte à predação: epibiontes podem aumentar a atração de predadores, que irão consumir epibionte e basibionte devido à presença do epibionte.

Por outro lado, os basibiontes podem beneficiar-se da presença dos epibiontes devido a efeitos como os de camuflagem visual e química, fricção reduzida (no caso da epibiose por bactérias), proteção contra dessecação (ou defesa por associação, *e.g.*, epibiose por organismos quimicamente defendidos, como hidrozóários). Como os substratos duros freqüentemente são limitados no ambiente marinho, a epibiose também é capaz de proporcionar ao epibionte este valioso recurso.

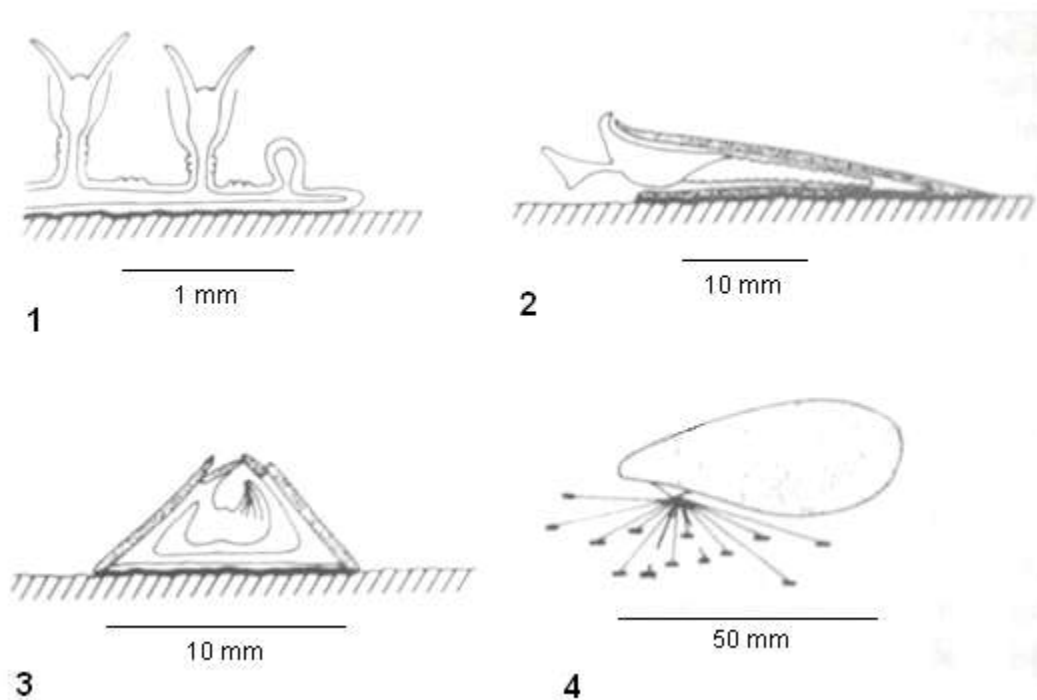


Figura 12.7. Formas de adesão permanente de alguns invertebrados marinhos. (1) Um hidrozoário colonial, (2) um poliqueta serpulídeo em seu tubo calcáreo, (3) uma craca e (4) um mexilhão aderido ao substrato por filamentos bissais. A camada de adesivo é ilustrada pela linha preta espessa entre o animal e o substrato (modificado de Railkin, 2004).

Quando os efeitos da epibiose são neutros ou positivos para uma determinada espécie de basibionte e benéficos para as espécies de epibiontes, a seleção natural tende a maximizar a atração exercida pelo basibionte (sinalização) e/ou a determinar a especificidade das espécies de epibiontes. Um caso interessante de epibiose mutuamente benéfica é o dos caranguejos-ermitões, que buscam ativamente a epibiose por anêmonas-do-mar, que os defendem de seus principais predadores – cefalópodes – obtendo em troca maior acesso a alimento.

De uma forma geral, a epibiose tem mais efeitos negativos que positivos para o basibionte. No entanto, tendo em vista que os custos para a produção de algum tipo de defesa antiincrustante parecem ser elevados (veja como exemplo as teorias de defesa e alocação de recursos apresentadas no capítulo 20) - o que fica evidente quando consideramos as perdas substanciais de biomassa envolvidas nas defesas antiincrustantes

através da secreção de muco (comuns em esponjas e alguns cnidários), descamação da superfície (mecanismo comum em macroalgas) e troca da superfície incrustada (como na ecdise ou muda dos crustáceos) – muitas espécies toleram a epibiose ou mesmo são completamente recobertas por epibiontes, o que muitas vezes leva à morte do basibionte. Se a produção de defesas não fosse metabolicamente onerosa, não haveria razões para a existência de indução de defesas, embora a indução de defesas contra a incrustação ainda seja um tópico pouco investigado. Existem, no entanto, evidências experimentais recentes de que a alga verde *Codium decorticatum* do litoral brasileiro produz defesas contra a incrustação em resposta à presença de epibiontes, um fenômeno que possivelmente também ocorre em inúmeros outros organismos marinhos.

Devido à ocorrência difundida dos epibiontes e os inumeráveis exemplos de comportamento de sinalização descritos na literatura, esperava-se que existisse uma importante proporção de associações epibióticas específicas. Em contraste, observações subaquáticas sugeriram que a maioria dos epibiontes exibe baixa especificidade por substratos, podendo ser encontrados em uma enorme variedade de organismos.

As macroalgas marinhas, por serem sésseis e restringirem-se à zona fótica – onde as condições de crescimento dos organismos incrustantes são ótimas – são extremamente suscetíveis à epibiose, que pode afetar significativamente as algas basibiontes. Portanto, conhecer os mecanismos envolvidos nas interações entre as macroalgas marinhas bentônicas, seus epibiontes e seus potenciais consumidores, pode ser de significância fundamental para a compreensão dos vários mecanismos competitivos utilizados pelos herbívoros em relação às algas marinhas e no que diz respeito aos impactos causados por herbívoros e predadores sobre a organização dessas comunidades.

Pelo menos em dois estudos recentes, os efeitos prejudiciais da epibiose foram diretamente avaliados através de experimentos. A alga vermelha brasileira *Cryptonemia seminervis* sofre um incremento significativo de peso devido à presença de epibiontes, que podem cobrir até 90% do talo em casos extremos. Por outro lado, a epibiose, independentemente da espécie epibionte (briozoários ou esponjas), aumenta significativamente a predação por ouriços-do-mar (*Lytechinus variegatus*) e anfípodos (*Elasmopus brasiliensis*) relativamente a espécimes sem epibiose. Surpreendentemente, as algas com epibiose parecem produzir mais defesas contra a incrustação, em uma clara

indicação de que a pressão seletiva exercida pela presença de epibiontes causa uma reação da alga em resposta.

Entre os invertebrados marinhos sésseis, nem sempre as evidências dos efeitos da epibiose são tão claras, exceto em alguns casos. Os efeitos da epibiose foram demonstrados através da suscetibilidade do mexilhão azul, *Mytilus edulis*, à predação pelo caranguejo *Carcinus maenas*. Mexilhões incrustados por cracas (*Balanus improvisus*) foram significativamente mais atacados que mexilhões limpos de tamanho comparável, tendo portanto um efeito promotor da predação sobre ambos basibionte e epibionte, um efeito denominado de prejuízo compartilhado (“*shared doom*”). Por outro lado, mexilhões com epibiose pelo hidrozoário *Laomedea flexuosa* obtêm maior proteção contra a predação em comparação com indivíduos sem epibiose por hidrozoários, o que foi denominado de “resistência por associação” (“*associational resistance*”).

12.2. A BIOINCRUSTAÇÃO COMO PROBLEMA

Apesar de ser um processo natural, a incrustação biológica, quando desenvolvida sobre estruturas feitas pelo homem, acarreta uma série de transtornos e prejuízos a atividades marítimas ou relacionadas ao mar, levando à visão negativa intrínseca ao próprio nome - *fouling* em inglês significa, além de incrustação, sujeira. Estima-se que, em escala global, sejam gastos pelo menos 450 milhões de dólares ao ano com a prevenção da bioincrustação, e que se este montante não fosse gasto, os prejuízos anuais seriam da ordem de 7 bilhões de dólares/ano. Os problemas derivados da incrustação estão diretamente relacionados ao tipo de estrutura em questão.

12.3.1. A bioincrustação sobre estruturas submersas feitas pelo homem

A bioincrustação na navegação

A incrustação torna a superfície dos cascos de embarcações irregular e rugosa, aumentando o arrasto, dificultando a realização de manobras e reduzindo a velocidade. Um aumento de 10 μ (1/1000 cm) na rugosidade média do casco de um barco, resulta também

em um incremento de 0,3 a 1,0% do consumo de combustível. Em águas temperadas, estima-se que a incrustação provoque um aumento de 35 a 50% no consumo de combustível de um navio há 6 meses no mar. No entanto, esta percentagem pode ser bem superior em águas tropicais, onde geralmente a incrustação se desenvolve mais rapidamente, atingindo milhares de indivíduos por m^2 e uma espessura superior a 15 cm. Além disso, a bioincrustação leva a uma sobrecarga de peso da embarcação, ao entupimento de sistemas de resfriamento e à redução da propulsão do hélice, além de sobrecarregar o motor dos navios, levando a um aumento da emissão de gases causadores de efeito estufa. Estimativas recentes sugerem que, a despeito do uso de tintas antiincrustantes, mais de 50% da frota mundial de navios apresentam algum grau de desenvolvimento de bioincrustação nos cascos ou hélices, grau este que pode levar a um aumento do arrasto que varia entre 6 e 80%. Apesar dos avanços científicos e tecnológicos das últimas décadas, ainda há muito a melhorar quanto ao desempenho das tintas antiincrustantes. Uma melhora de apenas 10% no desempenho das tintas levaria a uma economia anual de cerca de 8 milhões de dólares, além dos benefícios ecológicos – tais como menos emissão de gases estufa, menos uso de combustíveis fósseis e menor probabilidade de transporte de espécies exóticas.

A bioincrustação sobre estruturas fixas

Em instalações fixas tais como plataformas de exploração de petróleo, piers, docas, etc., a incrustação estimula a corrosão, aumenta a massa da instalação e confere uma distorção da configuração inicial da estrutura. Em instalações flutuantes e bóias de navegação, a bioincrustação atua aumentando o peso e reduzindo a flutuabilidade, entupindo orifícios ou tubulações ou interferindo com mecanismos móveis, como distorcedores de correntes. Em tubulações marítimas, como as de resfriamento de plataformas e usinas nucleares, a incrustação provoca entupimento e alteração do hidrodinamismo das tubulações, provocando assim uma maximização do desgaste pela erosão. A bioincrustação tende a tornar cabos submarinos quebradiços, reduzindo sua durabilidade. O aumento de peso sobrecarrega fortemente qualquer estrutura feita pelo homem, em alguns locais chegando a até incríveis 300 kg/m^2 .

Outros problemas compreendem efeitos sobre a transmissão de sons, prejudicando as eco sondas e a “assinatura acústica” utilizada pela marinha no reconhecimento de suas embarcações, a ação destrutiva sobre tintas com influência direta na corrosão, além da colmatação de redes de proteção e telas. Em bóias oceanográficas com equipamentos de monitoramento (por exemplo, com sensores para medição de oxigênio dissolvido, salinidade e temperatura), a bioincrustação reduz a vida útil dos sensores a apenas algumas semanas.

A bioincrustação na aquicultura

A aquicultura marinha caracteriza-se em geral pela engorda *in situ* de espécies de interesse comercial, seja pela apreciação gastronômica das espécies cultivadas (mexilhões, ostras, vieiras, salmões e outras espécies de peixes, camarões, etc.) seja pela utilização de produtos derivados (*e.g.*, produção de pérolas – perlicultura e cultivo de abalone – gastrópodos do gênero *Haliotis*). Esta característica permite o aproveitamento da produtividade local, muitas vezes sem a necessidade de adição de alimentação, o que oneraria em muito a atividade.

No entanto, um dos maiores desafios para a aquicultura marinha compreende a manutenção de gaiolas, redes de proteção e telas, que freqüentemente tornam-se colmatadas pelo crescimento indesejado de incrustação biológica, com conseqüências para a saúde dos organismos cultivados e falhas em equipamentos. A epibiose sobre as espécies cultivadas – especialmente sobre ostras, mexilhões e vieiras – também reduz a produtividade dos cultivos. A remoção freqüente da incrustação, feita pela exposição ao ar (o chamado “castigo”), ao calor, a água doce ou a agentes químicos, é difícil e implica em um aumento de cerca de 20% nos custos de produção. Alie-se a isto o fato de que o uso de revestimentos antiincrustantes nestas superfícies é geralmente ineficaz e extremamente perigoso, visto que os biocidas liberados – geralmente à base de cobre, atualmente - podem ser ativamente concentrados nas espécies cultivadas e assim terminar contaminando o consumidor em questão – o homem. Este fato, por si mesmo, aponta para a necessidade de formas de combate à incrustação que envolvam outros tipos de ação, que não sejam baseados na toxidez dos agentes ativos.

12.3.2. Formas de combate à bioincrustação

Histórico

O problema da bioincrustação em embarcações é quase tão velho quanto os próprios oceanos - ou pelo menos tão velho quanto as tentativas do homem de neles navegar, uma vez que a bioincrustação tem reduzido o desempenho das mesmas há milênios. As primeiras tentativas conhecidas de combate à incrustação biológica remontam ao ano de 462 a.C., quando foi relatado o uso de uma mistura de arsênico e enxofre. Através dos séculos, barcos de madeira foram protegidos por misturas contendo sebo, enxofre, breu, creosoto ou através de placas de cobre ou chumbo, pregadas aos cascos dos barcos abaixo da linha d'água.

As formas de combate à bioincrustação têm sido tradicionalmente dominadas pelo campo da Química, com o uso de substâncias “biocidas”, que tradicionalmente previnem a incrustação através da toxidez. Neste contexto, o cobre tem se destacado, e formas moleculares mais avançadas ainda estão em uso nos dias de hoje, geralmente aliadas a “co-biocidas” e incorporadas às assim chamadas tintas antiincrustantes (no Brasil, às vezes conhecidas pelo alusivo nome de “tintas venenosas”), usadas principalmente nos cascos de embarcações.

Desde a 2ª Guerra Mundial, houve um grande incremento dos métodos de combate à incrustação biológica. Tradicionalmente, a superfície de um objeto, antes da imersão, é pintada com tintas antiincrustantes contendo biocidas. Estas substâncias inicialmente previnem a incrustação, mais tarde reduzem o seu desenvolvimento e posteriormente tornam-se ineficazes. As embarcações então têm que ser docadas a seco, raspadas e repintadas, e instalações fixas precisam ser periodicamente raspadas e monitoradas por mergulhadores ou ROVs (sigla em inglês para veículos operados remotamente), sendo estas soluções onerosas e nem sempre eficazes.

Como mencionado, as tintas antiincrustantes tinham como principal substância ativa o óxido de cobre ou derivados. No entanto, o cobre provoca séria corrosão por eletrólise quando em contato direto com cascos de aço e alumínio. Testes realizados pela marinha

americana verificaram que tintas antiincrustantes tendo por base óxido de cobre tornam-se ineficazes em menos de um ano. O tempo de perda da atividade deste tipo de tinta é reduzido à metade na Baía de Guanabara (dados não publicados dos autores). O cobre foi posteriormente substituído por substâncias organoestânicas, como o TBT, mas como comentado a seguir, as novas tintas antiincrustantes estão voltando a utilizar cobre em sua composição.

TBT

Em 1925, uma nova substância (um organometal) começou a ser usada comercialmente contra traças. Em 1932, esta substância passou a ser usada também como estabilizador em transformadores e capacitores, seguido pelo uso, na mesma década, como estabilizador em PVC. Na década de 50 descobriu-se que os organoestânicos eram pesticidas eficazes, ao que se seguiu rapidamente o uso como aditivo em tintas antiincrustantes. Organoestânicos são assim chamados devido aos grupos orgânicos ligados a um átomo de estanho. No TBT (tributil estanho), três butilas estão ligadas a um átomo de estanho. Há cerca de 20 diferentes TBTs, muitos dos quais foram ou são usados como antiincrustantes. Ao contrário do estanho inorgânico, os TBTs são lipossolúveis e penetram nas membranas celulares vivas, sendo esta propriedade que os torna pesticidas potentes.

A eficácia de tintas usando TBTs pode ser até 5 vezes maior do que a de tintas baseadas em óxido de cobre, com a vantagem adicional de não causar corrosão em alumínio e aço. Desde que as tintas com TBT começaram a ser utilizadas em larga escala, no início dos anos 70, alardeou-se que esta seria a solução para o antigo e oneroso problema da incrustação biológica. No entanto, nesta mesma época, surgiram as primeiras evidências de efeitos prejudiciais em muitas outras formas de vida marinha além da incrustação nos cascos de navios, incluindo espécies economicamente importantes, como ostras e mexilhões. Os efeitos sobre a biota marinha estão relacionados à quantidade de TBT que é liberada na água, tanto pelas tintas quanto pela raspagem dos cascos; esta quantidade é, por sua vez, dependente do tipo de tinta empregado comercialmente. Com o desenvolvimento mais recente, por exemplo, das tintas com matrizes de polímeros de

autopolimento (SPC, na sigla em inglês), a emissão de TBT no ambiente foi consideravelmente reduzida.

Uma vez liberado no ambiente, o TBT pode ser removido da coluna d'água aparentemente através da absorção/adsorção a lipídios e material particulado ou através da assimilação e metabolismo por plantas e animais. Uma proporção biologicamente significativa é acumulada por todos os níveis taxonômicos, tanto a partir da água quanto a partir da alimentação, atingindo altos níveis nos tecidos vivos. Algumas bactérias e organismos fitoplanctônicos acumulam TBT a concentrações entre 600 a 30000 vezes a concentração de exposição. Um fator de bioacumulação de 4400 foi relatado para o hepatopâncreas do caranguejo *Rhithropanopeus harrisi*. O TBT tende a acumular mais em certos tecidos que em outros, atingindo níveis críticos no fígado e outras vísceras. Esta acumulação pode ter conseqüências diferenciadas; a tolerância ao TBT geralmente cresce com o nível evolutivo, ou seja, invertebrados em geral têm menor capacidade de metabolizar TBT do que peixes e mamíferos.

Embora ocorra bioacumulação, parece haver pouca biomagnificação (acumulação via cadeia alimentar), devido ao fato de que o TBT é eliminado não somente pela depuração, mas também pela degradação *in vivo* por inúmeros organismos.

Os organismos aquáticos podem ser contaminados de diferentes formas; através de efeitos diretos no organismo, suas funções ou seu comportamento ou por efeitos indiretos na comunidade, através da ruptura de relações predador-presa e fluxo de energia, por exemplo. São bem estudados os efeitos sobre populações de moluscos, como o espessamento da concha de ostras *Crassostrea gigas*, e o desenvolvimento de pseudohermafroditismo (*imposex*, em inglês), ou seja, de características masculinas em fêmeas dos gastrópodes *Nucella lapillus*, *Buccinum undatum*, *Thais clavigera*, e *T. bronni*. No Brasil, estudos sobre o assunto revelaram que populações de *Stramonita haemastoma* de áreas portuárias apresentam altos índices de *imposex*. Estas evidências de contaminação por TBT são especialmente graves se considerarmos que *S. haemastoma* é, assim como os mexilhões *Perna perna*, dos quais se alimenta, uma espécie utilizada como alimento ao longo da costa brasileira.

Apesar dos efeitos do TBT em seres humanos não serem bem conhecidos, sabe-se que doses letais de TBT para mamíferos (ratos, 150 mg/kg) provocam apatia, perda de peso

e irritação gastrointestinal, enquanto inalação aguda (70 mg/m^3) causa edema pulmonar e morte. São também conhecidos os efeitos deformatórios sobre o hematócrito humano *in vitro*.

Em 1990, o Comitê de Proteção ao Ambiente Marinho da Organização Marítima Internacional (IMO) adotou pela primeira vez a resolução de controlar o uso de TBT, e recomendou ações governamentais no sentido de eliminar o uso deste poluente através de restrições em relação ao tipo de navio (porte, uso, etc), o monitoramento das vias de entrada de TBT, como a remoção das tintas e o jateamento de areia, o estímulo às possíveis alternativas e o monitoramento do sucesso destas medidas. Apesar dos esforços que vêm sendo feitos, estima-se que 60% dos navios em uso em todo o mundo ainda utilizem tintas antiincrustantes contendo TBT ou similares. Isto deve-se, certamente, ao fato das tintas modernas, sem a presença de estanho, não prevenirem a incrustação por mais de três anos, em contraste com os alardeados cinco anos de proteção fornecidos por tintas de autopolimento contendo TBT. Até o momento, somente alguns países desenvolvidos promoveram uma mudança efetiva neste quadro, através de restrições tão severas que levaram à proibição do uso destas tintas. Apesar disso, até o momento não existe legislação específica a respeito no Brasil, nem estudos amplos de avaliação direta dos níveis de contaminação por TBT de nossas águas ou mesmo testes de toxidez empregando espécies nativas. Estes estudos seriam fundamentais para o estabelecimento futuro de uma regulamentação nacional específica controlando o uso de TBT. Não obstante, estudos de *imposex* na costa brasileira sugerem níveis críticos de contaminação em grande parte do litoral, particularmente em áreas portuárias.

Por outro lado, as restrições ao uso de organoestânicos em tintas antiincrustantes estão provocando um retorno às tintas com base em cobre, acarretando problemas de contaminação por este metal. Além disso, o cobre está sendo utilizado em combinação com uma série de outros biocidas (co-biocidas) de toxicidade e efeitos ambientais desconhecidos.

Embora a extinção total do uso de TBT não seja esperada a curto prazo, há uma necessidade crescente e premente de procura por alternativas, a qual tem induzido indústrias da área de tintas antiincrustantes e pesquisadores a testar novas substâncias que associem propriedades antiincrustantes a compatibilidade ambiental.

Uma questão básica a ser levada em conta em qualquer novo biocida a ser usado em tintas antiincrustantes é a biodegradabilidade: o tempo de residência e os subprodutos da degradação. Deste modo, o produto ideal seria aquele que degradasse na água do mar em poucas horas (embora estável na tinta) e cujos subprodutos fossem inócuos.

Entre as várias alternativas em estudo, podem-se destacar as tintas de baixa adesão, os antiincrustantes naturais, produzidos pelos próprios organismos marinhos, e materiais que simulam superfícies antiincrustantes de organismos marinhos (superfícies biomiméticas).

Tintas de baixa adesão

Tintas à base de Teflon, as quais não utilizam biocidas, mas atuam pelas suas características físicas antiaderentes, encontram-se em estudo e já têm sido utilizadas em protótipos. Não obstante, a produção destas tintas em larga escala para uso comercial implica, ainda, em custos muito elevados, e a sua eficácia em diferentes ambientes marinhos ainda não é completamente compreendida.

Outras tintas antiaderentes, ou mais apropriadamente, de baixa adesão, à base de siloxanos (família de polímeros constituídos de uma cadeia de átomos de silício ligados a oxigênio) que afetam a energia superficial do substrato, estão sendo testadas com sucesso e já são utilizadas, embora sejam mais caras que as convencionais (5 a 100 vezes), de difícil aplicação e mecanicamente frágeis. Este tipo de tinta tem sido testado por indústrias de tintas em vários locais do mundo, inclusive na Baía de Guanabara (RJ), apresentando às vezes inibição seletiva da incrustação: por exemplo, ao inibir o estabelecimento de cracas, ocorre o estabelecimento massivo de poliquetas serpulídeos. No entanto, estas tintas, uma vez incrustadas, podem normalmente ser limpas com jatos de água de intensidade moderada, pois apresentam baixa adesão para organismos incrustantes.

Antiincrustantes naturais

Em 1993, durante o 8^o Congresso Internacional sobre Corrosão e Incrustação Marinha (o 13^o foi realizado no Rio de Janeiro, em 2006), surgiu um dos primeiros

trabalhos com uma nova abordagem na busca de métodos antiincrustantes: as substâncias produzidas pelos próprios organismos marinhos sésseis, como algas, corais ou esponjas como forma de prevenção ao crescimento de epibiontes, também poderiam ser empregadas como agentes antiincrustantes. Apesar desta idéia não ser nova, pois alguns autores já haviam abordado o assunto, foi objetivamente abordada deste evento em diante.

Desde então, tem sido dada atenção crescente à aplicação de produtos naturais marinhos em tintas antiincrustantes. Entre os argumentos a favor da pesquisa de antiincrustantes naturais marinhos podemos destacar:

- Organismos marinhos tais como microorganismos, algas, corais e esponjas sofrem de um problema similar ao encontrado em cascos de navios, *i.e.*, a exposição constante a uma vasta gama de organismos incrustantes. Ao longo da evolução, muitos organismos desenvolveram mecanismos de defesa, o mais importante dos quais tem sido considerado a produção de substâncias químicas antiincrustantes. De fato, têm sido encontradas substâncias com propriedades antiincrustantes até mais eficazes que organoestânicos e cobre.
- Os produtos naturais são menos danosos ao meio ambiente quando comparados a substâncias de origem antropogênica, pois degradam mais rapidamente (uma vez que já existe a via de degradação no ambiente) e a antiincrustação atua não pela toxicidade (na maioria dos casos) mas pela repelência às larvas. Não obstante, existem poucos estudos realísticos sobre a toxicidade de produtos naturais marinhos para a própria biota marinha.

Uma vasta gama de substâncias tem sido descrita (e patenteada) como apresentando atividade antiincrustante, embora na sua enorme maioria com base somente em testes de laboratório utilizando larvas de organismos incrustantes, como cracas e briozoários. Estes metabólitos, pertencentes às mais variadas classes estruturais (desde ácidos graxos simples até complexos terpenos e alcalóides), têm mostrado diversas modalidades de atividade antiincrustante (*e.g.* atividade específica *versus* de amplo espectro; atividade tóxica *versus* atividade repelente). Resultados promissores foram obtidos no Brasil com produtos naturais da alga vermelha *Laurencia obtusa*, levando ao patenteamento da substância ativa como antiincrustante. Não obstante, parece pouco provável que produtos naturais marinhos *per se* venham a ser utilizados como antiincrustantes em escala comercial, sendo mais viável que

análogos sintéticos destes produtos naturais, mais baratos e passíveis de produção em larga escala, venham a ser utilizados a curto ou médio prazo.

Superfícies biomiméticas

Uma das alternativas antiincrustantes mais recentes em estudo atualmente consiste em materiais que simulam superfícies de organismos marinhos (superfícies biomiméticas). Como já comentado, algas, invertebrados e mesmo vertebrados marinhos (tais como peixes, tartarugas marinhas e mamíferos marinhos), sofrem dos mesmos problemas que estruturas feitas pelo homem, no que concerne à bioincrustação. A diferença é que os organismos marinhos, os mais antigos seres no nosso planeta, tiveram milhares de anos de evolução para desenvolver mecanismos antiincrustantes.

As microtopografias naturais – relevo em escala microscópica – das superfícies de organismos bentônicos, tais como mexilhões, e de outros organismos, tais como tubarões, tartarugas marinhas, etc. têm sido investigadas recentemente com o intuito de elucidar os mecanismos pelos quais estas superfícies permanecem livres de epibiose. Através dos avanços recentes no campo da nanotecnologia, seria possível reproduzir estas microtopografias em materiais sintéticos produzidos em larga escala para o revestimento, por exemplo, dos cascos de embarcações. Resultados obtidos até o momento mostram que, de fato, superfícies naturais podem, meramente por efeitos físicos, inibir pelo menos em parte o desenvolvimento de bioincrustação, muito embora este pareça ser apenas parte do efeito antiincrustante encontrado na natureza. Experimentos em campo feitos no Brasil e em outros locais do mundo, com réplicas exatas em resina da microtopografia de várias espécies de mexilhão (que apresentam microtopografia similar a “cordilheiras e vales”), incluindo o mexilhão comum *Perna perna*, verificaram que a microtopografia apenas não explica a relativa ausência de epibiontes na superfície destes organismos. Aparentemente, mais de um mecanismo está envolvido, no que tem sido chamado de “sistema de defesa antiincrustante multinível”. É provável que, para encontrarmos novas soluções, realmente eficazes – e ambientalmente compatíveis – para o antigo problema da bioincrustação, tenhamos que imitar a natureza: talvez os futuros revestimentos antiincrustantes aliem propriedades antiaderentes a substâncias naturais ou seus análogos sintéticos.

12.3.3. A bioincrustação como vetor de introdução de espécies exóticas

Navios transoceânicos podem ser vistos como ilhas biológicas para espécies que vivem em áreas portuárias de todo o mundo. Atualmente, uma das principais preocupações de pesquisadores da área de Biologia Marinha e de políticos e legisladores envolvidos com a conservação da biodiversidade marinha concerne à perda de espécies via introdução de espécies exóticas. Tem sido alegado, com certa razão em muitos casos, que a água de lastro, usada para estabilizar os navios quando vazios até a chegada ao porto de embarque de mercadorias, seria um importante vetor na introdução de espécies marinhas exóticas. Parece ter ocorrido uma aceleração na introdução de espécies exóticas após a difusão da prática de lastrear navios com água do mar, após a 2^a Guerra Mundial.

No entanto, esta aparente correlação deve ser analisada com cautela, tendo em vista que: (1) Somente após a 2^a Guerra Mundial, equipamentos de mergulho autônomo (SCUBA) e navios e submarinos se tornaram disponíveis para cientistas de todo o mundo, e antes desta época os levantamentos da biota marinha restringiam-se em grande parte à região entremarés e ao bentos de sedimentos, amostrado a partir de navios; portanto, levantamentos faunísticos e florísticos mais elaborados e completos somente foram possíveis a partir da mesma época em que o uso de água de lastro se tornou mais difundido; (2) A possibilidade de introdução de espécies via bioincrustação em cascos de navios remonta, pelo menos, aos séculos XV e XVI, época das “grandes navegações”, quando os métodos de combate à incrustação eram ineficazes e, além disso, as embarcações, à vela, tendiam a seguir as correntes marinhas, confundindo os possíveis padrões de introdução por intervenção humana (cascos incrustados), com os padrões naturais de dispersão de larvas por correntes marinhas ou em detritos flutuantes naturais (troncos de madeira, cocos, ilhotas de vegetação flutuante, etc.); e (3) Muitas espécies consideradas como introduzidas apresentam larvas lecitotróficas de curta duração no plâncton, sendo pouco provável portanto que tenham se dispersado na forma larvar na água de lastro, e muito provável que tenham se dispersado como formas adultas incrustadas em cascos de navios. Não obstante, é inquestionável o papel da água de lastro como vetor de introdução de espécies

holoplanctônicas (*e.g.*, dinoflagelados, ctenóforos, etc.), bem como de patógenos e espécies de água doce.

Os impactos negativos da introdução de espécies exóticas são complexos e incluem a possível competição e exclusão de espécies nativas, redução da biodiversidade, alterações na teia trófica, prejuízos econômicos diversos (*e.g.*, redução de populações de interesse comercial, aumento da incrustação em barcos, tubulações, etc.). Algumas vias de introdução ligadas à bioincrustação têm sido particularmente negligenciadas, tais como a incrustação no interior dos tanques de lastro, em áreas protegidas dos cascos de navios, que muitas vezes não recebem tintas antiincrustantes, e em detritos flutuantes de origem antropogênica.

No mundo

O transporte marítimo responde hoje por pelo menos 80% do comércio mundial, efetuado principalmente através de navios de grande porte como graneleiros (que transportam grãos, minérios, etc.) e navios-tanque (petroleiros). Alguns estudos têm demonstrado que a incrustação em cascos de navios é tão ou mais importante que a água de lastro enquanto vetor de introdução de espécies exóticas. Não obstante, os casos mais conhecidos de prejuízos a comunidades naturais (invasões bem-sucedidas) parecem ser oriundos de transporte em água de lastro (o mexilhão zebra *Dreissena polymorpha*, o mexilhão dourado *Limnoperna fortunei*, o ctenóforo *Mnemiopsis leidyi*, etc.). Inúmeros estudos levaram a Organização Marítima Internacional (IMO) a sugerir a adoção de uma série de medidas para a prevenção de novas introduções por esta via, constituindo a base do Programa de Gerenciamento Global de Água de Lastro (“*Globalballast*”).

Não obstante, na opinião dos autores deste capítulo, e em face das evidências levantadas pelo crescente número de estudos sobre este assunto no mundo, a implantação de medidas de controle da água de lastro não é suficiente para proteger os ecossistemas marinhos da ameaça representada pela introdução de espécies exóticas. A utilização de revestimentos antiincrustantes eficazes, agora complicada pelo banimento do TBT, constitui um paradoxo de difícil solução: se, por um lado, o TBT causa sérios danos à biota marinha, por outro lado, o uso de antiincrustantes menos eficazes torna ainda maior a

ameaça de introdução de espécies via bioincrustação. Adicione-se a isto o fato descrito recentemente por Floerl *et al.* (2004), de que espécies exóticas tais como o briozoário crostoso *Watersipora subtorquata* (espécie invasora na Austrália) podem colonizar mesmo tintas antiincrustantes eficazes e, uma vez estabelecidas sobre a tinta, servir de substrato para outras espécies colonizarem a superfície pintada, facilitando portanto o transporte de espécies incrustantes potencialmente invasoras em cascos de navios. Em levantamentos feitos, por exemplo, no Havaí e no Mar do Norte, a bioincrustação parece ser um vetor de introdução de espécies exóticas consideravelmente mais importante do que a água de lastro.

No Brasil

Em nosso país, a falta de programas de longa duração de levantamento faunístico e florístico dificulta significativamente a detecção de espécies exóticas introduzidas, meramente pelo fato de que estas podem ser confundidas com espécies nativas ainda não descritas para a costa brasileira pela falta de estudos sistemáticos. Não obstante, uma análise simples dos organismos incrustantes comuns em áreas portuárias de grande parte da nossa costa permite traçar um padrão interessante: as espécies mais abundantes, por exemplo, na Baía de Guanabara (RJ), são comuns em portos de quase todo o mundo, sendo consideradas de distribuição cosmopolita, quando muito provavelmente são exóticas (quando de origem desconhecida, denominamos tais espécies de *criptogênicas*). São exemplos disto as ascídias (Urochordata, Tunicata) da espécie *Styela plicata*, o briozoário *Bugula neritina* (Ectoprocta, Gymnolaemata) e cracas da espécie *Amphibalanus amphitrite* (Crustacea, Cirripedia), entre outros (Tabela 12.3).

O interesse nacional tem despertado para o problema da introdução de espécies marinhas exóticas, e os relatos de introdução de espécies incrustantes têm apontado fortemente para introdução via incrustação. Um exemplo surpreendente parece ser o mexilhão *Perna perna* (Mollusca, Bivalvia), até recentemente considerado nativo, mas que pode ter sido introduzido por ocasião das Grandes Navegações no século XVI, oriundo da costa africana.

A falta de fiscalização em navios e plataformas com relação à presença de espécies incrustantes exógenas, conjugada à carência de programas de monitoramento sérios e de

longo prazo apontam para uma séria ameaça aos ecossistemas marinhos da costa brasileira (sobre este assunto, vide o livro recém-publicado por Silva & Souza, 2004). Estudos recentes realizados em Arraial do Cabo (RJ) têm alertado para o alarmante potencial dos cascos de navios e das plataformas incrustadas como vetores de introdução de espécies (e.g., Ferreira *et al.*, 2004).

Tabela 12.3. Espécies da comunidade incrustante reconhecidas como exóticas (invasoras) ou possivelmente não-nativas (criptogênicas) do litoral brasileiro, situação atual e provável via de introdução (de acordo com várias fontes).

Grupo taxonômico	Situação	Provável via de introdução
Plantae		
<i>Anotrichium yagii</i>	Estabelecida	Incrustação, acidental
<i>Caulerpa sertularioides</i>	Estabelecida	Incrustação, acidental
<i>Dasya brasiliensis</i>	Estabelecida	Incrustação, acidental
<i>Eucheuma</i> sp.	Desconhecida	Aquacultura, intencional
<i>Kappaphycus alvarezii</i>	Controlada	Aquacultura, intencional
<i>Laurencia caduciramulosa</i>	Desconhecida	Incrustação, acidental
<i>Pedobesia ryukyuensis</i>	Estabelecida	Incrustação, acidental
<i>Porphyra</i> sp.	Desconhecida	Aquacultura, intencional
<i>Ulva fasciata</i>	Estabelecida	Incrustação, acidental
Cnidaria		
<i>Obelia dichotoma</i>	Estabelecida	Incrustação, acidental
<i>Garveia franciscana</i>	Estabelecida	Incrustação, acidental
<i>Tubastraea coccinea</i>	Em expansão	Incrustação, acidental
<i>Tubastraea tagucensis</i>	Em expansão	Incrustação, acidental
<i>Stereonephthya</i> aff. <i>curvata</i> *	Em expansão	Incrustação, acidental
Bryozoa		
<i>Bugula neritina</i>	Estabelecida	Incrustação, acidental
<i>Schizoporella errata</i>	Estabelecida	Incrustação, acidental
<i>Schizoporella unicornis</i> *	Estabelecida	Incrustação, acidental

Mollusca		
<i>Perna perna</i>	Estabelecida	Incrustação, acidental
<i>Isognomon bicolor</i>	Em expansão	Incrustação, acidental
<i>Limnoperna fortunei</i> **	Em expansão	Tanques de lastro, acidental
<i>Crassostrea gigas</i>	Estabelecida	Aquacultura, intencional
Crustacea		
<i>Amphibalanus amphitrite</i>	Estabelecida	Incrustação, acidental
<i>Megabalanus coccopoma</i>	Estabelecida	Incrustação, acidental
Urochordata		
<i>Styela plicata</i>	Estabelecida	Incrustação, acidental
Chordata		
<i>Hypsoblennius invemar</i>	Em expansão	Incrustação, acidental
<i>Omobranchus punctatus</i>	Em expansão	Incrustação, acidental

* Taxonomia incerta.

** Espécie de mexilhão dulcícola, mas que vem causando sérios problemas decorrentes de sua incrustação em cascos de embarcações e em estruturas de usinas hidrelétricas no Brasil. Introduzida provavelmente via água de lastro na Argentina, mas cuja dispersão rio acima e para novas bacias hidrográficas vem sendo atribuída à incrustação em embarcações.

12.4. QUANDO A BIOINCRUSTAÇÃO É DESEJÁVEL

De uma maneira geral, a incrustação é vista como o crescimento - indesejável - de uma comunidade de organismos sésseis sobre substratos feitos pelo homem, os quais devem ser projetados para permanecer pelo período de tempo mais longo possível livres de organismos incrustantes. Neste contexto, incrustações por cracas (Crustacea, Cirripedia) são vistas como as maiores vilãs entre os organismos marinhos. Mas há situações especiais em que a bioincrustação é não somente tolerável, como até desejável, sobre estruturas projetadas pelo homem.

12.4.1. Recifes artificiais e FADs

A competição por espaço é reconhecida como um dos principais fatores bióticos estruturadores das comunidades marinhas de substrato consolidado (i.e., comunidades incrustantes). Resulta disto que praticamente qualquer substrato novo submerso torna-se rapidamente incrustado, estabelecendo-se uma diversa comunidade bentônica onde antes havia apenas uma superfície inerte. A instalação de recifes artificiais no litoral de vários países do mundo tem sido realizada por diversos motivos: para proteção do leito submarino contra a pesca de arrasto de fundo, notoriamente destrutiva, para atração e proteção de peixes, para a proteção da linha costeira contra a ação das ondas, etc. O próprio conceito de recife artificial subentende o estabelecimento de comunidades incrustantes. Diversos estudos têm demonstrado que a arquitetura dos recifes artificiais não constitui, por si só, atrativo suficiente para comunidades nectônicas (peixes, lulas, tartarugas, etc.), sendo necessário que decorra um certo período de tempo para que os novos substratos constituídos pelos recifes sejam colonizados por organismos incrustantes. Esta comunidade passa então a atuar como um atrativo para uma variada comunidade de organismos, que obtêm abrigo e alimento nos recifes artificiais. No entanto, outros estudos demonstram que nem todos os tipos de substrato, nem qualquer tipo de arquitetura têm os mesmos resultados. Certas arquiteturas, bem como substratos como o concreto são mais eficazes que outros.

Objetivos semelhantes têm levado à utilização de agregadores de peixes (*fish aggregation devices* ou FADs), que podem variar desde simples bóias de superfície a emissores de sons complexos para atração de peixes. Estes agregadores parecem ser mais eficientes em sua função de atrair e estabelecer comunidades de peixes quando as bóias se tornam intensamente incrustadas, sendo possível que a incrustação biológica libere algum tipo de sinal químico na água que seria detectado por peixes.

12.4.2. Aquicultura

Como mencionado anteriormente, a incrustação sobre telas e redes causa sérios problemas à aquicultura marinha. No entanto, há determinadas situações em que a bioincrustação desempenha um papel fundamental para a aquicultura. Na maioria dos cultivos de moluscos bivalves (mexilhões, ostras, vieiras, etc.), os juvenis que serão

empregados (ou “engordados”) no cultivo não são obtidos através de larvicultura em laboratório, pois esta atividade é muitas vezes onerosa e sujeita a falhas que podem inviabilizar a produção, além de normalmente demandar também o cultivo de microalgas em laboratório para alimentação das larvas planctotróficas.

Como consequência, bancos naturais destas espécies são muitas vezes devastados para obtenção de “sementes” ou juvenis para cultivo, ou obtidos a partir de coletores. Neste último caso, torna-se extremamente desejável que a superfície destes coletores seja o mais atrativa possível, ou seja, é desejável que ela se torne facilmente incrustada. Conchas são normalmente substratos bastante atrativos, embora estudos comparando diferentes coletores tenham demonstrado que superfícies fibrosas parecem ser mais eficazes em atrair a fixação de mexilhões.

O uso de substâncias indutoras de fixação (*e.g.*, sinais químicos que atraem as larvas para o estabelecimento e metamorfose) pode vir a ser de extrema utilidade para a aquicultura. Tanto ostras quanto mexilhões são organismos gregários, ou seja, tendem a formar densos agregados monoespecíficos. Esta agregação normalmente ocorre através de sinalização química, sendo que bancos de adultos tendem a liberar substâncias na água circundante que são utilizadas pelas larvas da mesma espécie como indicativo de um habitat apropriado para estabelecimento e metamorfose. O isolamento e identificação destes “feromônios de agregação” podem levar à sua utilização em coletores, aumentando desta forma a produtividade da aquicultura marinha, bem como à preservação dos estoques naturais de espécies cultiváveis.

BIBLIOGRAFIA

- CLARE, A.S., RITTSCHOF, D., GERHART, D.J. & MAKI, J.S. 1992. Molecular approaches to nontoxic antifouling. *Invert. Reprod. Develop.* 22: 67-76.
- DA GAMA, B. A. P.; CARVALHO, A. G. V. ; COUTINHO, R. & PEREIRA, R.C. 2002. The effects of seaweed secondary metabolites on biofouling. *Biofouling* 18: 13-20.
- FERREIRA, C. E. L., GONÇALVES, J. E. A. & COUTINHO, R. 2004. Cascos de navios e plataformas como vetores na introdução de espécies exóticas. In: SILVA, J.S.V. &

- SOUZA, R.C.C.L. (orgs.) *Água de lastro e bioinvasão*. Interciência, Rio de Janeiro, p. 144-155.
- FERNANDEZ, M. A., WAGENER, A.D.R., LIMAVERDE, A.M., SCOFIELD, A.L., PINHEIRO, F.M. & RODRIGUES, E. 2005. Imposex and surface sediment speciation: A combined approach to evaluate organotin contamination in Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brazil. *Mar. Environ. Res.* 59: 435-452.
- FLOERL, O., POOL, T. K. & INGLIS, G. J. 2004. Positive interactions between nonindigenous species facilitate transport by human vectors. *Ecol. Appl.* 14: 1724-1736.
- FUSETANI, N. 2004. Biofouling and antifouling. *Nat. Prod. Rep.* 21: 94-104.
- PAWLIK, J.R. 1992. Chemical ecology of the settlement of benthic marine invertebrates. *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.* 30: 273-335.
- RAILKIN, A.I. 2004. *Marine biofouling: colonization processes and defenses*. CRC Press, Boca Raton, pp. 303.
- SILVA, J.S.V. & SOUZA, R.C.C.L. (orgs.) 2004. *Água de lastro e bioinvasão*. Interciência, Rio de Janeiro, pp. 224.
- TAYLOR, P.D. & WILSON, M.A. 2003. Palaeoecology and evolution of marine hard substrate communities. *Earth-Science Reviews* 62: 1-103.
- WAHL, M. 1989. Marine epibiosis: I. Fouling and antifouling: some basic aspects. *Marine Ecology Progress Series* 58: 175-189.
- WAHL, M. & MARK, O. 1999. The predominantly facultative nature of epibiosis: experimental and observational evidence. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 187: 59-66.