

Série Livros Museu Nacional

Conhecendo os Recifes Brasileiros

Rede de Pesquisas Coral Vivo



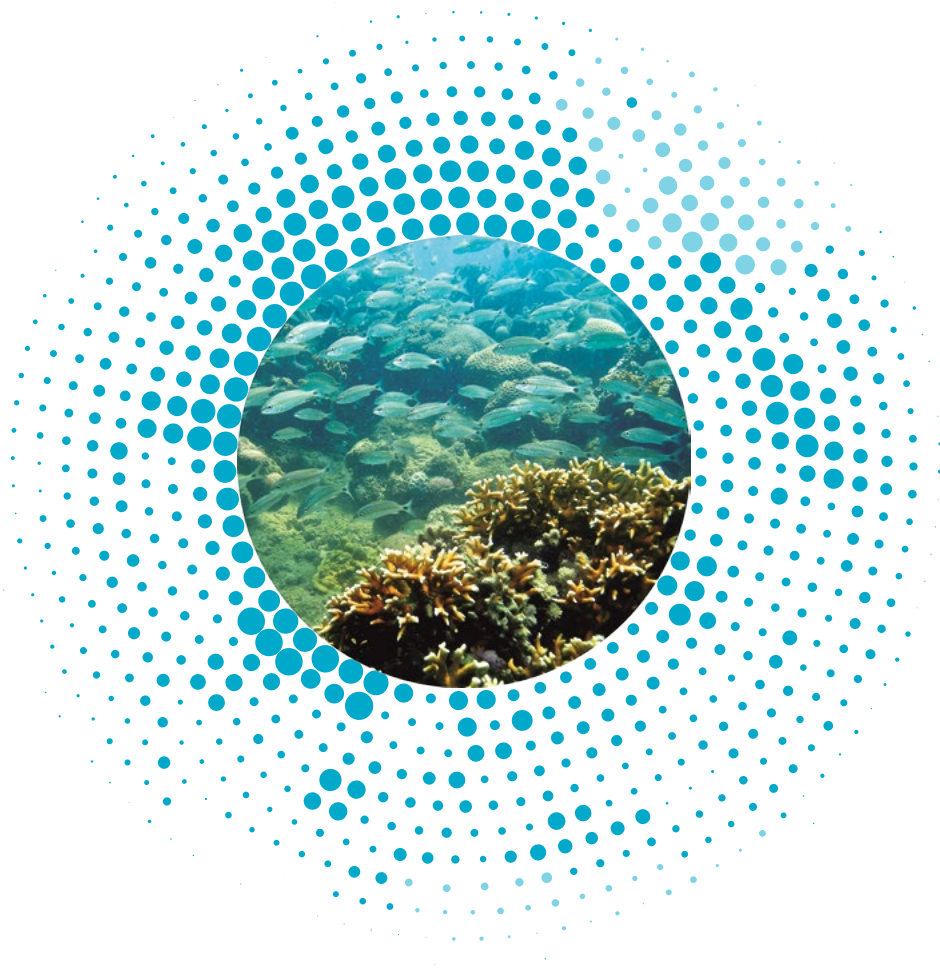
Editores : Carla Zilberberg / Douglas Pinto Abrantes / Joseane Aparecida Marques
Laís Feitosa Machado / Laura Fernandes de Barros Marangoni



Série Livros 58
Museu Nacional

Conhecendo os Recifes Brasileiros

Rede de Pesquisas Coral Vivo



Editores:

Carla Zilberberg / Douglas Pinto Abrantes / Joseane Aparecida Marques
Laís Feitosa Machado / Laura Fernandes de Barros Marangoni

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Reitor: Roberto Leher

Museu Nacional

Diretora: Cláudia Rodrigues Ferreira de Carvalho

Comissão de Publicações do Museu Nacional

Presidente: Ulisses Caramaschi

Projeto Coral Vivo

Coordenação Geral: Clovis Barreira e Castro (Museu Nacional/Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ)

Coordenação de Comunicação: Débora de Oliveira Pires (Museu Nacional/UFRJ)

Coordenação de Educação: Maria Teresa de Jesus Gouveia (Instituto Coral Vivo – ICV)

Coordenação de Pesquisa: Emiliano Nicolas Calderon (Museu Nacional/UFRJ)

Coordenação Regional Bahia: Flávia Maria Guebert (Associação Amigos do Museu Nacional – SAMN)

Líder do Grupo de Pesquisas: Adalto Bianchini (Instituto de Ciências Biológicas/Universidade Federal do Rio Grande – FURG)

Comissão Editorial do Volume

Carla Zilberberg (Instituto de Biologia/UFRJ)

Douglas Pinto Abrantes (Programa de Pós-Graduação em Zoologia, Museu Nacional/UFRJ)

Joseane Aparecida Marques (Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Biológica, Instituto de Ciências Biológicas/FURG)

Laís Feitosa Machado (Programa de Pós-Graduação em Ciências (Microbiologia), Instituto de Microbiologia Paulo de Góes/UFRJ)

Laura Fernandes de Barros Marangoni, (Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Biológica, Instituto de Ciências Biológicas/FURG)

Revisão de Linguagem: Mercia Ribeiro (Influência Comunicação)

Revisão e normalização: Lia Ribeiro (Comissão de Publicações do Museu Nacional)

Artes, Capa, Ilustração e Diagramação: Liana Ventura Coutinho Amaral e Maria Gabriela Fernandes Dias

Museu Nacional – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Quinta da Boa Vista, São Cristóvão

Rio de Janeiro, RJ, 20940-040

Realização Patrocínio



Ficha Catalográfica

C749 Conhecendo os Recifes Brasileiros: Rede de Pesquisas Coral Vivo / Editores:
Carla Zilberberg et al. – Rio de Janeiro: Museu Nacional, UFRJ, 2016.

360 p. ; 24 cm. – (Série Livros ; 58)

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-7427-057-9

1. Recifes e ilhas de coral – Brasil. 2. Conservação da natureza – Brasil.
3. Divulgação científica – Brasil. I. Zilberberg, Carla. II. Projeto Coral Vivo.
III. Museu Nacional (Brasil). IV. Universidade Federal do Rio de Janeiro. V. Série.

CDD 551.42

Autores e filiações

ADALTO BIANCHINI

Instituto de Ciências Biológicas
Universidade Federal do Rio Grande
Instituto Coral Vivo
E-mail: adaltobianchini@furg.br

ALEXANDRE SCHIAVETTI

Departamento de Ciências Agrárias e Ambientais,
Área de Recursos Naturais
Universidade Estadual de Santa Cruz
Instituto Coral Vivo
E-mail: aleschi@uesc.br

ALEXANDRE SOARES ROSADO

Instituto de Microbiologia Paulo de Góes
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto Coral Vivo
E-mail: asrosado@micro.ufrj.br

AMANA GUEDES GARRIDO

Programa de Pós-Graduação em Zoologia
Museu Nacional
Universidade Federal do Rio de Janeiro
E-mail: amana.garrido@gmail.com

BÁRBARA SEGAL

Departamento de Ecologia e Zoologia
Universidade Federal de Santa Catarina
Instituto Coral Vivo
Rede SISBIOTA Mar
E-mail: segal.barbara@gmail.com

CARLA ZILBERBERG

Departamento de Zoologia
Instituto de Biologia
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto Coral Vivo
Rede SISBIOTA Mar
E-mail: carla.zilberberg@biologia.ufrj.br

CARLOS EDUARDO L. FERREIRA

Departamento de Biologia Marinha
Universidade Federal Fluminense
Instituto Coral Vivo
Rede SISBIOTA Mar
E-mail: carlosferreira@id.uff.br

CARLOS FREDERICO GURGEL

Departamento de Botânica
Universidade Federal de Santa Catarina
E-mail: f.gurgel@ufsc.br

CAROLINA MARQUES RÜDE

Departamento de Biologia Marinha
Instituto de Biologia
Universidade Federal do Rio de Janeiro
E-mail: carolrude@gmail.com

CÁTIA FERNANDES BARBOSA

Departamento de Geoquímica
Universidade Federal Fluminense
Instituto Coral Vivo
E-mail: catiafb@id.uff.br

CINTIA MARTINS

Programa de Pós-Graduação em Ecologia
Departamento de Ecologia e Zoologia
Universidade Federal de Santa Catarina
E-mail: cintia_ufpr@yahoo.com.br

CLEVERSON ZAPELINI

Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação
da Biodiversidade
Departamento de Ciências Agrárias e Ambientais, Área
de Recursos Naturais
Universidade Estadual de Santa Cruz
E-mail: czapelini@yahoo.com.br

CLOVIS BARREIRA E CASTRO

Museu Nacional
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto Coral Vivo
E-mail: clovis.castro@coralvivo.org.br

CRISTIANO MACEDO PEREIRA

Programa de Pós-Graduação em Zoologia
Departamento de Ciências Agrárias e Ambientais, Área
de Recursos Naturais
Universidade Estadual de Santa Cruz
Instituto Coral Vivo
E-mail: cristiano.pereira@coralvivo.org.br

DANIELE A. VILA-NOVA

Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação
Setor de Ciências Biológicas
Universidade Federal do Paraná
Rede SISBIOTA Mar
E-mail: daniele.avn@gmail.com

DÉBORA DE OLIVEIRA PIRES

Museu Nacional
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto Coral Vivo
E-mail: debora.pires@coralvivo.org.br

DEBORAH CATHARINE DE ASSIS LEITE

Programa de Pós-Graduação em Ciências (Microbiologia)
Instituto de Microbiologia Paulo de Góes
Universidade Federal do Rio de Janeiro
E-mail: deborah.leite@gmail.com

DOUGLAS PINTO ABRANTES

Programa de Pós-Graduação em Zoologia
Museu Nacional
Universidade Federal do Rio de Janeiro
E-mail: douglasabrantess86@hotmail.com

EDINILSON CONCEIÇÃO DO CARMO

Associação Amigos do Museu Nacional – SAMN
Rio de Janeiro, RJ
E-mail: beach.docarmo@coralvivo.org.br

EDUARDO DE OLIVEIRA BASTOS

Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia e
Biotecnologias
Departamento de Microbiologia, Imunologia e
Parasitologia
Universidade Federal de Santa Catarina
E-mail: bastos_e@hotmail.com

ELLIE BERGSTROM

Programa de Pós-Graduação em Biologia de Fungos,
Algas e Plantas
Departamento de Botânica
Universidade Federal de Santa Catarina
E-mail: bergs270@umn.edu

EMILIANO NICOLAS CALDERON

Museu Nacional
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto Coral Vivo
E-mail: emiliano.calderon@coralvivo.org.br

FLÁVIA LIMA DO CARMO

Instituto de Microbiologia Paulo de Góes
Universidade Federal do Rio de Janeiro
E-mail: flavialcbio@hotmail.com

GUILHARDO J. M. MARTINS

Centro de Ciências Aplicadas e Educação
Universidade Federal do Paraiba - Campus IV
E-mail: guilhardo_martins@yahoo.com.br

GUSTAVO A. S. DUARTE

Programa de Pós-Graduação em Zoologia
Museu Nacional
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto Coral Vivo
E-mail: gust.duarte@gmail.com

HENRIQUE FRAGOSO DOS SANTOS

Instituto de Microbiologia Paulo de Góes
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto Coral Vivo
E-mail: henriquefrag@hotmail.com

JHONE CAETANO DE ARAÚJO

Programa de Pós-Graduação em Geologia
Departamento de Geologia
Universidade Federal do Rio de Janeiro
E-mail: jhonearaujo@gmail.com

JOSÉ BONOMI BARUFI

Centro de Ciências Biológicas
Universidade Federal de Santa Catarina - Campus Trindade
E-mail: jose.bonomi@gmail.com

JOSÉ CARLOS SÍCOLI SEOANE

Departamento de Geologia
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto Coral Vivo
E-mail: cainho.geo@gmail.com

JOSÉ RENATO M. DE B. CORREIA

Programa de Pós-Graduação em Zoologia
Museu Nacional
Universidade Federal do Rio de Janeiro
E-mail: renato.bcorreia@gmail.com

JOSEANE APARECIDA MARQUES

Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Biológica
Instituto de Ciências Biológicas
Universidade Federal do Rio Grande
E-mail: jmarques.oceano@gmail.com

LAÍS FEITOSA MACHADO

Programa de Pós-Graduação em Ciências
(Microbiologia)
Instituto de Microbiologia Paulo de Góes
Universidade Federal do Rio de Janeiro
E-mail: laisfmachado@gmail.com

LAURA FERNANDES DE BARROS MARANGONI

Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Biológica
Instituto de Ciências Biológicas
Universidade Federal do Rio Grande
E-mail: laurafbmarangoni@gmail.com

LEIDSON ALLAN DE LUCENA

Programa de Pós-Graduação em Ecologia
Departamento de Ecologia e Zoologia
Universidade Federal de Santa Catarina
E-mail: leidson_allan@yahoo.com.br

LEONARDO RUBI RÖRIG

Centro de Ciências Biológicas
Universidade Federal de Santa Catarina - Campus Trindade
E-mail: leororig@gmail.com

LÍVIA PELUSO

Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e
Biologia Evolutiva
Instituto de Biologia
Universidade Federal do Rio de Janeiro
E-mail: liviapeluso@hotmail.com

LOIANE ALVES DE LIMA

Programa de Pós-Graduação em Ciências Genômicas e
Biotecnologia
Centro de Análises Proteômicas e Bioquímicas
Universidade Católica de Brasília
E-mail: lonana87@gmail.com

MANUELLA DULTRA

Programa de Pós-Graduação em Sistemas Aquáticos Tropicais
Departamento de Ciências Agrárias e Ambientais, Área
de Recursos Naturais
Universidade Estadual de Santa Cruz
E-mail: manucadultra@gmail.com

MARCELO VIANNA

Departamento de Biologia Marinha
Instituto de Biologia
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto Coral Vivo
E-mail: mvianna@biologia.ufrj.br

MARIANA GOMES BENDER

Departamento de Ecologia e Zoologia
Universidade Federal de Santa Catarina
E-mail: marianabender.bio@gmail.com

MARINA NASRI SISSINI

Programa de Pós-Graduação em Ecologia
Departamento de Ecologia e Zoologia
Universidade Federal de Santa Catarina
E-mail: msissini@gmail.com

NATALIA HANAZAKI

Centro de Ciências Biológicas
Universidade Federal de Santa Catarina
E-mail: hanazaki@gmail.com

NATASHA PICCIANI DE SOUZA

Programa de Pós-Graduação em Zoologia
Museu Nacional
Universidade Federal do Rio de Janeiro
E-mail: n_picciani@hotmail.com

PABLO RIUL

Centro de Ciências Aplicadas e Educação
Universidade Federal da Paraíba - Campus IV
E-mail: pabloriul@gmail.com

PAULO ANTUNES HORTA

Departamento de Botânica
Universidade Federal de Santa Catarina
Instituto Coral Vivo
E-mail: paulo.horta@ufsc.br

RAQUEL SILVA PEIXOTO

Instituto de Microbiologia Paulo de Góes
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto Coral Vivo
E-mail: raquelpaixoto@micro.ufrj.br

RICARDO MOREIRA CHALOUB

Instituto de Química
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto Coral Vivo
E-mail: chaloub@iq.ufrj.br

ROBERTA AGUIAR DOS SANTOS

Centro Nacional de Pesquisa e Conservação da
Biodiversidade Marinha do Sudeste e Sul - CEPESUL
Instituto Chico Mendes de Conservação da
Biodiversidade - ICMBio
E-mail: roberta.santos@icmbio.gov.br

ROMÁRIO GUEDES DA SILVA

Associação Amigos do Museu Nacional – SAMN
Rio de Janeiro, RJ
E-mail: romario@coralvivo.org.br

SIMONI CAMPOS DIAS

Centro de Análises Proteômicas e Bioquímicas
Universidade Católica de Brasília
Instituto Coral Vivo
E-mail: si.camposdias@gmail.com

THAIS ANDRADE GALVÃO

Programa de Pós-Graduação em Geologia
Departamento de Geologia
Universidade Federal do Rio de Janeiro
E-mail: tataigalvao@gmail.com

VANESSA FREIRE

Programa de Pós-Graduação em Ecologia
Departamento de Ecologia e Zoologia
Universidade Federal de Santa Catarina
E-mail: carvalhovf2@gmail.com

VINICIUS GIGLIO

Programa de Pós-Graduação em Ecologia
Instituto de Biologia
Universidade Federal do Rio de Janeiro
E-mail: vj.giglio@gmail.com

WALTER STEENBOCK

Centro Nacional de Pesquisa e Conservação da
Biodiversidade Marinha do Sudeste e Sul - CEPESUL
Instituto Chico Mendes de Conservação da
Biodiversidade - ICMBio
E-mail: walter.steenbock@icmbio.gov.br

YURI CRUZ DE PAULA

Programa de Pós-Graduação em Sistemas Aquáticos Tropicais
Departamento de Ciências Agrárias e Ambientais, Área
de Recursos Naturais
Universidade Estadual de Santa Cruz
E-mail: yuri_c_p@hotmail.com



Sumário

Apresentação	11
Prefácio	13
Capítulo 1: Recifes brasileiros, sua importância e conservação Clovis Barreira e Castro, Carla Zilberberg	17
Capítulo 2: Recifes de coral ao longo do tempo geológico José Carlos Sícoti Seoane, Cátia Fernandes Barbosa	27
Capítulo 3: O holobionte - Micro-organismos e a saúde dos corais Laís Feitosa Machado, Deborah Catharine de Assis Leite, Alexandre Soares Rosado, Raquel Silva Peixoto	43
Capítulo 4: Fisiologia de corais - a simbiose coral-zooxantela, o fenômeno de branqueamento e o processo de calcificação Laura Fernandes de Barros Marangoni, Joseane Aparecida Marques, Adalto Bianchini	55
Capítulo 5: Do equador aos trópicos - as zooxantelas na dimensão do espaço Natasha Picciani, Amana Guedes Garrido, Clovis Barreira e Castro, Carla Zilberberg	73
Capítulo 6: Simbiose coral-zooxantelas em um mundo em transformação Amana Guedes Garrido, Natasha Picciani, Carla Zilberberg	83
Capítulo 7: A saúde de nossos recifes - uma questão de equilíbrio Deborah Catharine de Assis Leite, Laís Feitosa Machado, Alexandre Soares Rosado, Raquel Silva Peixoto	97
Capítulo 8: Reprodução de corais de águas rasas do Brasil Débora de Oliveira Pires, Clovis Barreira e Castro, Bárbara Segal, Cristiano Macedo Pereira, Edinilson Conceição do Carmo, Romário Guedes da Silva, Emiliano Nicolas Calderon	111
Capítulo 9: Renovação de comunidades coralinas em recifes Cristiano M. Pereira, Alexandre Schiavetti, Emiliano N. Calderon	129
Capítulo 10: Conectividade em recifes de coral Lívia Peluso, Carla Zilberberg	141
Capítulo 11: Papel das algas nos recifes e interferências antrópicas Paulo Antunes Horta, Marina N. Sissini, Ellie Bergstrom, Vanessa Freire, Eduardo Bastos, Guilhardo Martins, Leidson Allan de Lucena, Cintia Martins, José Bonomi Barufi, Leonardo Rorig, Pablo Riul, Carlos Frederico Gurgel	157
Capítulo 12: Poluição em recifes de corais por vinhoto da cana-de-açúcar José Renato M. de B. Correia, Henrique F. dos Santos, Gustavo A. S. Duarte, Raquel S. Peixoto, Ricardo M. Chaloub, Clovis B. Castro	169

Capítulo 13: Contaminação de recifes de coral por petróleo e seus derivados	183
Henrique Fragoso dos Santos, Flávia Lima do Carmo, Alexandre Soares Rosado e Raquel Silva Peixoto	
Capítulo 14: Mudança de fase em recifes de coral	195
Douglas Pinto Abrantes, Emiliano Nicolas Calderon, Clovis Barreira e Castro	
Capítulo 15: Como eram os recifes brasileiros? Mudanças na percepção individual do ambiente e da diversidade marinha	205
Mariana G. Bender, Carlos E. L. Ferreira, Natalia Hanazaki, Cleverson S. Zapelini, Vinicius J. Giglio	
Capítulo 16: Bioindicadores e biomarcadores	221
Joseane A. Marques, Laura F. B. Marangoni, Adalto Bianchini	
Capítulo 17: Avaliando impactos de estresses ambientais em recifes de coral – o uso de mesocosmos	233
Gustavo Duarte, Emiliano N. Calderon, Cristiano M. Pereira, Laura F. B. Marangoni, Henrique F Santos, Raquel S Peixoto Adalto Bianchini, Clovis B. Castro	
Capítulo 18: Mapeamento físico de recifes de coral	245
Jhone Caetano de Araújo, Jose Carlos Sícoli Seoane	
Capítulo 19: Sensoriamento remoto e recifes de coral	259
Thais Andrade Galvão, José Carlos Sícoli Seoane	
Capítulo 20: Pesca do polvo: estudo sobre a situação atual no Sul da Bahia	273
Manuella Dultra, Alexandre Schiavetti	
Capítulo 21: Os peixes recifais e o turismo	285
Yuri Cruz de Paula, Emiliano Nicolas Calderon, Alexandre Schiavetti	
Capítulo 22: Produtos naturais provenientes de recifes de coral	299
Simoni Campos Dias, Loiane Alves de Lima.	
Capítulo 23: Pescadores do Sul da Bahia: preservando saberes e fazeres tradicionais	311
Carolina Rüde, Marcelo Vianna	
Capítulo 24: Unidades de conservação marinha no Brasil e conservação de recifes de coral	329
Daniele A. Vila-Nova, Carlos Eduardo L. Ferreira	
Capítulo 25: Plano de Ação Nacional para a Conservação dos Ambientes Coralíneos (PAN Corais)	345
Clovis Barreira e Castro, Roberta Aguiar dos Santos, Walter Steenbock, Débora de Oliveira Pires	

Apresentação

Os recifes de coral e os ambientes coralíneos são ecossistemas de grande importância em termos de biodiversidade e de serviços e produtos utilizados pela sociedade. Nas últimas décadas, têm recebido atenção considerável por causa do estado de degradação avançado que muitos exibem globalmente e pela compreensão de que o esgotamento desses recursos terá repercussões bastante negativas para a sociedade. Com o processo de mudanças climáticas e de qualidade da água ao redor do mundo, esses ambientes ganharam o centro das atenções, principalmente pelo entendimento de que eles podem estar em risco de desaparecer mundialmente.

O Coral Vivo surgiu no Museu Nacional/Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ – basicamente como um projeto de pesquisas sobre a formação e a renovação de comunidades coralíneas. Porém, a conservação e uso sustentável de recursos naturais são uma temática que perpassa inúmeras áreas de atuação – é transversal! Assim, ao longo de sua história, o Coral Vivo aprofundou linhas de atuação em pesquisa, educação, sensibilização da sociedade e políticas públicas. Na área de pesquisas, sempre teve colaborações fortes com diversas instituições e atores. Mais recentemente, desde 2011, com a realização dos Workshops de Pesquisas Coral Vivo para discutir os resultados obtidos e planejar ações conjuntas futuras, formalizou essa atuação de grupo colaborativo e a nomeou Rede de Pesquisas Coral Vivo. Em 2013, os pesquisadores associados escolheram o Dr. Adalto Bianchini (Instituto de Ciências Biológicas/Universidade Federal do Rio Grande – FURG) como seu líder e foi formado o Grupo de Pesquisas Coral Vivo no Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). No ano seguinte, foi ministrado um curso multidisciplinar no âmbito do projeto “Capacitação Transdisciplinar para Estudos do Efeito de Estresses Ambientais em Recifes de Coral”, agraciado no Edital CAPES Ciências do Mar II, com a coordenação geral do Dr. Alexandre Rosado (Instituto de Microbiologia Paulo de Góes/UFRJ) e com a presença de cerca de 40 professores e alunos de diversas universidades. Esse caldeirão de ações em diferentes áreas, muitas delas com públicos não acadêmicos, e o convívio com pesquisadores e alunos de diferentes especialidades levaram à constatação da carência de textos centrados nos recifes brasileiros, escritos em português, que apresentassem conteúdos de qualidade, em linguagem acessível, sobre alguns dos principais temas relacionados à situação desses ambientes, seu funcionamento e como são afetados pelos estressores ambientais em ação. Assim, este livro foi planejado, visando preencher parte dessa lacuna em temas relacionados a linhas de estudos dos pesquisadores associados da Rede de Pesquisas Coral Vivo, seus alunos e colaboradores.

Para levar a tarefa de elaborar e produzir este livro, foi convidada para liderar o Comitê Editorial a professora Dra. Carla Zilberberg (Instituto de Biologia/UFRJ), bióloga com experiência em ecologia e biologia molecular de organismos recifais, contando com a inestimável participação de alunos de doutorado de diferentes especialidades e filiações: Douglas Abrantes (Zoologia/UFRJ), Laís Machado (Microbiologia/UFRJ), Laura Marangoni (Oceanografia Biológica/FURG) e Joseane Marques (Oceanografia Biológica/FURG). Posteriormente, participaram da produção do livro a jornalista Mercia Ribeiro (Influência Comunicação), editoração para clareza dos textos; Lia Ribeiro (Comissão de Publicações, Museu Nacional/UFRJ), consistência e padronização; e as designers Gabriela Dias e Liana Ventura (Projeto Coral Vivo/Associação Amigos do Museu Nacional/SAMN), ilustrações e diagramação. Os 25 capítulos foram elaborados por 55 autores que representam grande parte dos envolvidos na Rede de Pesquisas Coral Vivo nos últimos anos. Muitas das pesquisas realizadas pela Rede de Pesquisas Coral Vivo não poderiam ser concluídas com a excelência alcançada sem a parceria do Arraial d’Ajuda Eco Parque, onde está instalada a Base de Pesquisas em Arraial d’Ajuda, Porto Seguro (BA); e do patrocínio da Petrobras, através do Programa Petrobras Socioambiental, que permitiu não só o financiamento de toda a logística necessária para os trabalhos em terra e no mar na Costa do Descobrimento (BA), mas também a construção e operação do mesocosmo recifal. Desde já, em nome do Coral Vivo, agradeço a todos pelo empenho em fazer deste livro um produto de grande utilidade para os que queiram saber um pouco mais sobre os ambientes coralíneos brasileiros ou iniciar seus estudos no tema.

Dr. Clovis Barreira e Castro

Coordenador geral do Projeto Coral Vivo

Professor e pesquisador do Museu Nacional/UFRJ

Prefácio

Este livro traz uma compilação de temas relacionados aos estudos realizados na Rede de Pesquisas Coral Vivo. Cabe informar que ela surgiu a partir da atração sobre a forma de trabalho colaborativa realizada pelo Projeto Coral Vivo, que nasceu em 2003, no Museu Nacional/Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Um passo importante foi a realização de workshops a partir de 2011, quando pesquisadores e alunos de instituições públicas e particulares de diferentes estados começaram a trocar conhecimentos complementares e de fontes distintas sistematicamente. Isso resultou em um salto de abrangência e qualidade para todos os envolvidos.

O foco principal dos estudos é a compreensão dos aspectos físicos, químicos, biológicos, ecológicos, geológicos, sociais e socioeconômicos dos recifes brasileiros. Ao escrever esta obra, buscou-se usar uma linguagem clara e acessível para aproximar os estudantes de iniciação científica, e o público em geral, da beleza e importância dos recifes de coral. Há um universo de detalhes que ainda precisam ser explorados e esclarecidos para conter a destruição desses ambientes frágeis e consideravelmente desprotegidos. É como se fosse um convite para o leitor também contribuir com estudos e estratégias para a conservação e o uso sustentável ou participar de ações em seu benefício. Todos os autores são pesquisadores associados da Rede de Pesquisas Coral Vivo, seus alunos ou colaboradores.

Na Introdução são apresentados aos leitores os aspectos básicos sobre recifes de coral e os principais causadores de estresses nesses ambientes, além de algumas iniciativas no Brasil para a conservação dos recifes. Passa-se, então, para o capítulo 2, onde é apresentada, de forma resumida, a história da formação dos recifes, pontuando como sua estrutura e biodiversidade variaram ao longo do tempo geológico e como eventos globais levaram à distribuição e formação dos atuais recifes de coral. No capítulo 3 são transmitidos conhecimentos sobre os corais formadores de recifes, com conceitos como “holobionte”, e sobre a estreita relação estabelecida entre microrganismos e corais, incluindo as principais vantagens para as espécies envolvidas e como fatores ambientais podem influenciar na estabilidade dessas relações e na saúde dos organismos associados.

Já nos capítulos 4, 5 e 6, os autores discorrem sobre diversos aspectos da relação simbiótica entre o coral hospedeiro e as algas unicelulares, chamadas de zooxantelas. Para começar, os leitores terão acesso à fundamentação teórica dos processos fisiológicos dos corais construtores de recifes, incluindo a estreita relação simbiótica entre corais e zooxantelas, assim como a fisiologia da calcificação dos corais, sua importância na formação de recifes biogênicos e os possíveis impactos da acidificação dos oceanos sobre esse processo. O capítulo 5 apresenta a grande diversidade de zooxantelas encontradas na simbiose coral-alga, suas características fisiológicas e como diferentes fatores

ambientais interagem e controlam a distribuição geográfica delas. O tema coral-alga leva ao capítulo 6, que trata dos possíveis efeitos das mudanças climáticas globais e impactos locais nessa relação. Nesse contexto, chega-se ao capítulo 7, onde são destacadas algumas das doenças que acometem os corais. É discutido, ainda, como as atividades humanas podem estar relacionadas à disseminação dessas enfermidades e as principais estratégias para esses animais se defenderem contra possíveis patógenos.

Saindo da relação simbiótica, o capítulo 8 apresenta aspectos sobre a reprodução dos corais recifais, sendo descritos os de principal ocorrência na costa brasileira. Continuando nessa temática, no capítulo 9 o leitor pode ter uma rápida visão de como são lentos os processos de desenvolvimento e renovação das comunidades coralíneas e como esses processos dependem de sensores bastante específicos, presentes nas larvas dos corais. Sendo a fase de larva o único estágio do ciclo de vida dos corais capaz de se dispersar, o capítulo 10 mostra como é possível usar ferramentas moleculares para estudar a conexão entre as populações de espécies recifais que habitam áreas geograficamente separadas.

No capítulo 11 são apresentadas as macroalgas e a importância delas para o ecossistema marinho, como a incrível capacidade de algumas espécies de produzirem esqueletos de carbonato de cálcio e, assim, contribuírem para a formação de enormes recifes. Também é discutido o efeito negativo dos impactos antrópicos que estão alterando a dinâmica das macroalgas nos ambientes recifais. Ainda sobre os impactos antrópicos, o capítulo 12 trata dos efeitos da poluição química – especificamente do resíduo do vinhoto da cana-de-açúcar – na sobrevivência e metamorfose das larvas de corais endêmicos brasileiros, assim como na atividade fotossintética das zooxantelas e na comunidade bacteriana dos corais. A poluição também é abordada no capítulo 13, mas com os resultados de estudos sobre os efeitos do derramamento de petróleo na diversidade microbiana associada ao coral e sobre a descoberta da recuperação dos ambientes coralíneos de maneira sustentável por meio de probióticos que degradam o petróleo e fortalecem os corais.

Os impactos antrópicos podem levar a uma drástica mudança nas comunidades coralíneas, como é mostrado no capítulo 14. Os pesquisadores explicam o conceito de mudança de fase em recifes de coral e a fragilidade desses ambientes frente aos impactos naturais e/ou antrópicos. No capítulo 15 o livro passa para o resgate histórico dos recifes brasileiros; são apontadas as mudanças na percepção individual do ambiente, envolvendo informações sobre como as populações de peixes no Brasil vêm sendo dizimadas.

No capítulo 16 é demonstrada a importância de avaliar e monitorar a saúde dos ecossistemas recifais a partir das principais ferramentas de detecção e acompanhamento dos efeitos dos impactos antrópicos sobre os organismos recifais. O capítulo 17 discute como experimentos ecológicos podem ajudar a

prever o efeito de impactos, como o aumento de temperatura, a acidificação e a poluição, nos recifes e auxiliar na definição de estratégias para minimizá-los. Nesse contexto, o Mesocosmo Marinho do Projeto Coral Vivo ganha destaque, com uma descrição detalhada desse sistema experimental.

Nos capítulos 18 e 19 o foco são as ferramentas de estudos de mapeamento e sensoriamento remoto e sua importância para os estudos em recifes de coral. São compartilhados resultados de mapeamentos recentes de recifes da Costa do Descobrimento (BA, Brasil) e informações preliminares sobre o potencial do uso de imagens de satélite para monitorar o fenômeno do branqueamento.

Mudando para aspectos da pesca, no capítulo 20 os autores contam como é feita a pesca artesanal do polvo no Sul da Bahia e os riscos que essa atividade pode trazer para a população das espécies nessa região. No capítulo 21 aprende-se mais sobre os peixes recifais e o efeito do turismo no comportamento e na distribuição desses peixes, com ênfase no Brasil. Já no capítulo 22, o leitor é levado para outra temática estudada na Rede de Pesquisas Coral Vivo: o potencial das espécies recifais na produção de fármacos.

A partir desse ponto, são expostos aspectos relacionados à importância da conservação e do uso sustentável dos recifes de coral e dos ambientes coralíneos. No capítulo 23 os autores abordam conceitos relacionados à pesca artesanal e à relação dos pescadores com os recursos naturais dos quais dependem, evidenciando a importância do resgate e da valorização das comunidades tradicionais. As unidades de conservação marinhas (UCs) sempre são abordadas no meio conservacionista. Mas o que são? Como elas são criadas? Como funcionam? Qual é a importância delas como ferramenta para a conservação? Essas e outras questões são respondidas no capítulo 24. O livro é encerrado com o capítulo sobre a elaboração do Plano de Ação Nacional para a Conservação dos Ambientes Coralíneos (PAN Corais), que é um documento de pactuação entre diferentes atores institucionais, com dezenas de ações a serem executadas até 2021.

Há muito mais para ser explorado, e espera-se que os leitores deste livro se encantem por esse mundo literalmente submerso que nós, da Rede de Pesquisas Coral Vivo, somos instigados a estudar dia após dia.

Carla Zilberberg

Douglas P. Abrantes

Laís F. Machado

Laura F. B. Marangoni

Joseane A. Marques

Recifes brasileiros, sua importância e conservação

Clovis Barreira e Castro, Carla Zilberberg

Ambientes marinhos especiais: os recifes de coral

Um recife de coral, sob o ponto de vista geomorfológico, é uma estrutura rochosa, rígida, resistente à ação mecânica das ondas e correntes marinhas, e construída por organismos marinhos (animais e vegetais) portadores de esqueleto calcário¹. Geralmente, usa-se o termo “de coral” devido ao papel preponderante que esses organismos têm em recifes de diversas partes do mundo. Sob o ponto de vista biológico, recifes coralíneos são formações criadas pela ação de comunidades de organismos denominados genericamente de “corais”. Embora a estrutura tridimensional dos recifes biogênicos seja, em geral, formada pelo acúmulo dos esqueletos desses animais, para sua formação é necessária a atuação conjunta de uma infinidade de seres, formando uma complexa teia de associações e de eventos em sucessão. Em alguns recifes, inclusive do Brasil, o crescimento de outros organismos, como algas calcárias, pode assumir uma relevância igual ou maior que a dos próprios corais.

Apesar de ocorrerem ao redor do mundo, os corais recifais são confinados a regiões rasas tropicais (entre 20°N e 20°S). Aproximadamente metade das regiões costeiras do planeta se encontra nos trópicos, e cerca de 30% das regiões costeiras tropicais são formadas por recifes coralíneos, cobrindo em média 600.000km². Podem alcançar 2.000km de extensão, como na Grande Barreira de Corais da Austrália, elevando-se de até 1.300m de profundidade, como no Atol Enewetak, no Oceano Pacífico.

Um componente crucial para a formação de recifes coralíneos de águas rasas é a associação simbiótica entre esses corais e algas unicelulares, chamadas de zooxantelas. Nessa relação, o coral hospedeiro fornece gás carbônico (CO₂) e nutrientes inorgânicos normalmente excretados por esses animais, enquanto a zooxantela simbiote, durante o dia,



1. LEÃO, Z.M.A.N. 1994. The coral reefs of Southern Bahia. p.151-159 in Hetzel, B.;Castro, C.B. (Eds). *Corals of Southern Bahia*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira.

fornece os produtos resultantes da fotossíntese, como o carbono orgânico em forma de glicerol e oxigênio (O₂). Além de suprir as demandas energéticas do coral, as zooxantelas aumentam sua taxa de calcificação, chegando a produzir de 400 a 2.000 hectares de estruturas carbonáticas por ano. O incremento na produção de esqueleto associado à presença das zooxantelas é considerado um dos principais fatores a restringirem a presença de recifes de coral tropicais a baixas profundidades, até cerca de 50m. Isso porque as algas necessitam de luminosidade para realizar a fotossíntese. A quantidade de luz presente no mar decresce à medida que a profundidade aumenta. Assim, a coluna de água funciona como um filtro azul cada vez mais intenso, até bloquear totalmente a passagem da luz, inibindo o processo de fotossíntese. Outro fator determinante no desenvolvimento dos recifes de coral é a temperatura da água, que limita a presença de recifes apenas a áreas onde a temperatura é mais elevada, em geral nas áreas tropicais com correntes de águas quentes, como é o caso da costa brasileira.

Os recifes de coral apresentam grande importância biológica por serem os ecossistemas marinhos de maior diversidade. Esses ambientes são importantes também para o homem em diversos aspectos. Em termos físicos, protegem as regiões costeiras da ação de ondas e tempestades, incluindo diversas áreas do litoral brasileiro. A enorme diversidade e abundância de organismos presentes, além de tornar os recifes pontos turísticos importantes, produz uma teia alimentar de grande complexidade. Essa teia culmina nos grandes predadores, que incluem muitos peixes utilizados para a alimentação humana. Nesse sentido, os recifes funcionam como verdadeiros criadouros de peixes, renovando estoques e, principalmente no caso de áreas protegidas, favorecendo a reposição de populações de áreas densamente exploradas.

Os ambientes coralíneos também fornecem matéria-prima para pesquisas na área farmacológica. Devido à complexidade das cadeias alimentares e à intensa competição por espaço entre os organismos sésseis (Figura 1), muitas espécies recifais produzem inúmeras substâncias químicas. Elas são utilizadas para a proteção contra predadores, a inibição da ocupação do espaço por competidores e outras funções. Pesquisadores da área de farmacologia buscam extrair e isolar essas substâncias, testando suas propriedades no tratamento de doenças e disfunções humanas.

Os recifes de coral no Brasil

A diversidade de espécies de corais nos recifes difere entre regiões do planeta de acordo com sua história geológica e biológica. Os recifes do Indo-Pacífico possuem a maior diversidade de espécies coralíneas. Por exemplo, a área que se estende das Filipinas às Ilhas Salomão (Melanésia) é chamada de Triângulo dos Corais e abriga uma fauna de 605 espécies de corais-pétreos (ou verdadeiros) zooxantelados². Em contrapartida, os recifes no oceano Atlântico possuem uma diversidade mais baixa, com o Caribe abrigando a maior concentração, com 65 espécies zooxanteladas.

O Brasil possui os únicos recifes verdadeiros do Atlântico Sul; porém, sua diversidade é baixa, contando apenas com 16 espécies de corais-pétreos zooxantelados. Entretanto, as características do sistema fazem com que mesmo os recifes brasileiros apresentem uma altíssima diversidade biológica, possuindo uma fauna distinta, com alto grau de endemismo³ (Tabela 1). Além disso, os recifes brasileiros são caracterizados por ocorrerem em águas com alto grau de turbidez, quando comparados aos recifes de outras regiões do planeta.



Figura 1. Diversidade de organismos e competição por espaço em recife brasileiro. Recife de Fora, Porto Seguro, Bahia. Créditos: Leones Lopes/Projeto Coral Vivo.

2. Possuem simbiose com a alga unicelular (zooxantela). Ver MARANGONI et al (2016), capítulo 4 deste volume.

3. Espécies que só ocorrem em uma determinada região.

4. Além das espécies de corais-pétreos zooxantelados, foram registradas outras 5 espécies não zooxanteladas em recifes brasileiros

5. Foi sugerido, especialmente com base em dados moleculares, que essa espécie deveria ser inserida no gênero *Mussismilia*, porém, faltam estudos mais abrangentes para definir a questão. Ver BUDD, A.F.; FUKAMI, H.; SMITH, N.D.; KNOWLTON, N. 2012. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 166:465-529.

Tabela 1. Diversidade de corais em recifes e ambientes coralíneos brasileiros.

Táxon	Total (Nº)	Endêmicas (Nº)	Contribuição de espécies endêmicas (%)	Espécies endêmicas no Brasil
Corais-pétreos zooxantelados ⁴ (Ordem Scleractinia)	16	5	31%	<i>Favia leptophylla</i> ⁵ , <i>Mussismilia braziliensis</i> , <i>Mussismilia harttii</i> , <i>Mussismilia hispida</i> , <i>Siderastrea stellata</i>
Corais-negros (Ordem Antipatharia)	3	1	33%	<i>Cirripathes secchini</i>
Corais-de-fogo ou hidrocorais (Famílias Milleporidae e Stylasteridae)	5	3	60%	<i>Millepora braziliensis</i> , <i>Millepora laboreli</i> , <i>Millepora nitida</i>
Octocorais (Subclasse Octocorallia)	17	11	65%	<i>Leptogorgia pseudogracilis</i> , <i>Leptogorgia violacea</i> , <i>Muricea flamma</i> , <i>Muriceopsis metaclados</i> , <i>Neospongodes atlantica</i> , <i>Olindagorgia gracilis</i> , <i>Phyllogorgia dilatata</i> , <i>Plexaurella grandiflora</i> , <i>Plexaurella regia</i> , <i>Stephanogorgia rattoi</i> , <i>Trichogorgia brasiliensis</i>
Total	41	20	49%	

Grandes comunidades coralíneas foram registradas no Brasil desde o Parcel de Manuel Luís (MA) (cerca de 01°S) até os recifes de Viçosa, na área de Abrolhos (BA) (cerca de 18°S), e também em ilhas oceânicas, como Atol das Rocas (RN), Fernando de Noronha (PE) e Ilha da Trindade (ES), assim como em bolsões para o Sul até o Estado de Santa Catarina. Considerando apenas a distância linear em torno da costa, essas comunidades limite estariam separadas por mais de 4.000km. Como dito anteriormente, os recifes e comunidades coralíneas do Brasil apresentam relativamente poucas espécies de corais em comparação com outras regiões do planeta, além de grandes descontinuidades e, em grande parte de sua distribuição, recifes apenas como estreitas linhas próximas à costa. Entretanto, é preciso ressaltar que os chamados recifes brasileiros formam uma entidade diversificada em termos de história, morfologia e biota.

As primeiras descrições mais abrangentes dos recifes brasileiros foram realizadas no século XIX por Charles Frederick Hartt⁶. Posteriormente, merece destaque, pela grande abrangência, a contribuição de John Casper Branner⁷ no início do século XX. A grande contribuição seguinte para o conhecimento das comunidades recifais brasileiras foi realizada de 1961 a 1964 pelo pesquisador francês Jacques Laborel⁸, trabalhando no Instituto Oceanográfico (atual Departamento de Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco), que havia sido fundado no Recife. Seu trabalho foi o primeiro a utilizar mergulho autônomo (usando cilindros de ar comprimido – “scuba”, na sigla em inglês) e realizar fotografias submarinas.

A história geológica dos recifes brasileiros é melhor conhecida através de trabalhos desenvolvidos por Zelinda M. A. N. Leão e colaboradores, da Universidade Federal da Bahia, a partir do início da década de 1980⁹. A história geológica do período Quaternário indica que os recifes de coral atuais só começaram a crescer há 8 mil anos, quando o nível do mar elevou-se e, assim, inundou toda a atual plataforma continental¹⁰. Os corais, hidrocorais, algas calcárias e outros organismos foram crescendo em direção à superfície do mar, construindo uma estrutura rochosa com seus esqueletos. Essa estrutura serviu de base para a fixação de outros organismos e, assim, os recifes foram se formando. Sabendo que durante os últimos 7 mil anos o nível do mar subiu e desceu várias vezes, isto é, esteve por três vezes acima do nível hoje vigente, essas informações foram comparadas com dados das idades de corais obtidos durante uma perfuração feita no recife da Coroa Vermelha (BA). Isso revelou que os recifes cresceram acompanhando a subida do mar e alcançaram seu clímax há aproximadamente 5 mil anos antes do presente, coincidindo com a altura máxima do mar que, nessa época, estava cerca de 5m acima do nível atual¹¹. Uma fase de estabilidade do nível do mar, que durou cerca de mil anos, deve ter favorecido o crescimento de numerosas estruturas recifais ao longo de todo o litoral. Porém, de 4 mil anos para cá, devido a várias descidas bruscas do nível do mar, que deixaram os topos de diversos recifes emersos e sujeitos à erosão, as estruturas recifais só puderam crescer lateralmente, o que deve ter provocado

6. HARTT, C.F. 1870. *Geology and physical geography of Brazil*. Boston, Fields: Osgood and Co. 620p.

7. BRANNER, J.C. 1904. The stone reefs of Brazil, their geological and geographical relations, with a chapter on the coral reefs. *Bull. Mus. comp. Zool.*, 54:1-285.

8. LABOREL, J. 1970. Les peuplements de madréporaires des cotes tropicales du Brésil. *Ann. Univ. Abidjan. (Série E)*, 2(3):1-260.

9. Para mais informações sobre Zelinda Leão e sua obra, acessar o Currículo Lattes, disponível em: <<http://lattes.cnpq.br/7898440025320961>>.

10. VER SEOANE; BARBOSA (2016), capítulo 2 deste volume.

11. LEÃO, Z.M.A.N.; GINSBURG, R.N. 1997. *Proceedings of the 8th International Coral Reef Symposium*. Panama. 2:1767-1772.

12. LEÃO, Z.M.A.N. 1996. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 68(3):339-452.

13. WILKINSON, C. 2008. *Global Coral Reef Monitoring Network and Reef and Rainforest Research Centre*. Townsville, Austrália. p.298

14. Gases presentes na atmosfera que evitam a perda de calor para o espaço, mantendo, assim, a Terra aquecida.

15. Aumento de acidez (pela diminuição do pH) causado pela dissolução de CO₂ nos oceanos.

a coalescência dos chapeirões baianos e a formação de bancos recifais. Em diversos estados do Brasil, outras comunidades recifais se instalaram sobre bancos de arenito de praia, em geral estreitos, retilíneos, alongados e localizados paralelos à praia¹².

Situação mundial dos ambientes naturais e pressão do homem sobre eles

Por serem sistemas altamente especializados, os recifes de coral são extremamente sensíveis a distúrbios ambientais. Estima-se que 19% dos recifes ao redor do mundo já tenham sido efetivamente perdidos e que 35% estarão em situação crítica de declínio nos próximos 10 a 40 anos¹³. As atividades antrópicas são as principais responsáveis por essas ameaças, causando diversos impactos negativos sobre os recifes de coral, tanto em escala global quanto local. Em escala global, as atividades humanas, como a queima excessiva de combustíveis fósseis e o desflorestamento, vêm aumentando a concentração de gases do efeito estufa¹⁴, como o CO₂ e o metano. O aumento da concentração de CO₂ na atmosfera leva ao fenômeno do aquecimento global e à acidificação dos oceanos¹⁵. Cabe ressaltar que essas mudanças climáticas ameaçam diretamente os recifes de coral, já que causam doenças aos corais e organismos associados, podendo resultar na morte deles, com consequente erosão da estrutura recifal, com o passar do tempo.

Além dos impactos globais das mudanças climáticas, os impactos locais alteram o equilíbrio das cadeias tróficas e a fisiologia de organismos marinhos. Entre essas pressões, estão: o despejo excessivo de matéria orgânica (esgotos humanos não tratados e carreamento de fertilizantes utilizados na agricultura), o aumento da quantidade de sedimentos no mar (em especial pela destruição das matas nas margens dos rios), a contaminação das águas (principalmente causada por agrotóxicos e poluentes industriais) e a sobrepesca (captura de organismos em quantidade maior que sua capacidade de reprodução). Esses impactos podem levar a uma diminuição da cobertura de corais nos recifes, mudando drasticamente o ambiente. No Brasil, já foi demonstrado que os recifes localizados a menos de 5km da costa estão em piores condições que aqueles longe dela, e as hipóteses levantadas

estão relacionadas à maior taxa de sedimentação, ao aumento na concentração de nutrientes (devido ao despejo de esgoto doméstico), ao aumento da bioerosão costeira, ao turismo e à sobrepesca. O efeito dos impactos locais nos recifes do Brasil e do mundo se agrava ainda mais pelo sinergismo com os impactos globais. Evidências disso têm sido imensuráveis, e o cenário futuro não é promissor, caso não haja mudanças drásticas nos usos e nos cuidados com esses ambientes.

Porém, estudos já mostraram que recifes coralíneos não impactados localmente possuem uma melhor capacidade de lidar com as mudanças climáticas globais¹⁶. Ou seja, além da atuação para minimizar os impactos globais, existe uma necessidade urgente de controlar localmente os impactos antrópicos. Entretanto, a maioria dos estudos sobre a resiliência¹⁷ dos corais recifais em face às mudanças climáticas globais foram feitos em recifes no Indo-Pacífico e Caribe. Estudos no Brasil ainda são insipientes, e pouco se sabe sobre os efeitos das mudanças climáticas nos recifes brasileiros e como os corais no Brasil respondem a esses impactos. Com isso, pesquisadores da Rede de Pesquisas Coral Vivo vêm trabalhando em conjunto para a melhor compreensão dos impactos globais e locais nos recifes brasileiros; uma parte dos temas dos estudos realizados é apresentada neste livro.

Iniciativas para a conservação

A preocupação com a degradação ambiental e a perda de espécies levou a diversas iniciativas no Brasil e no mundo. Cabe ressaltar a Convenção da Diversidade Biológica (CDB), elaborada em um encontro das Nações Unidas sobre a Biodiversidade, realizado no Rio de Janeiro, em 1992, que definiu diversas ações e avaliações para a conservação e o uso sustentável dos ambientes naturais, incluindo os marinhos¹⁸. Por exemplo, a 11ª Conferência das Partes da CDB (“Conference of the Parties” – COP, na sigla em inglês), realizada em Hyderabad (Índia), em outubro de 2012, decidiu que diversas áreas do planeta atendem aos critérios científicos para serem consideradas “Ecologically or Biologically Significant Marine Areas” (EBSAs, na sigla em inglês), ou seja, deveriam receber

16. CARILLI, J.E.; NORRIS, R.D.; BLACK, B.A.; WALSH, S.M.; McFIELD, M. 2009. *PLoS ONE*, 4(7):e6324. Disponível em: <doi:10.1371/journal.pone.0006324>.

17. Capacidade dos corais de retornar a seu estado fisiológico normal após exposição a algum estressor.

18. Ver mais detalhes em CASTRO et al. (2016), capítulo 25 deste volume.

19 Lei Federal nº 9.985, de 18 de julho de 2000 e Decreto nº 4.340, de 22 de agosto de 2002.

20. PINHEIRO, H.T.; FERREIRA, A.L.; MOLINA, R.P.; PROTTI, L.M.C.; ZANARDO, S.C.; JOYEUX, J.-C.; DOXSEY, J.R. 2009. *Natureza & Conservação*, 7(1):67-80.

21. PRATES, A.P.L.; GONÇALVES, M.A.; ROSA, M.R. 2012. *Panorama da Conservação de Ecossistemas Costeiros e Marinhas no Brasil*. 2.ed. Brasília: MMA. 152p

22. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). Portaria 19, de 9 de março de 2016. Para mais detalhes, ver Castro et al. (2016), capítulo 25 deste volume.

atenção especial para sua conservação. Entre elas foram incluídos alguns ambientes coralíneos brasileiros, como o Parcel de Manuel Luís e o Banco do Álvaro (MA), a cadeia de bancos submarinos entre o Norte do Brasil (CE-RN) e Fernando de Noronha, abrangendo o Atol das Rocas, a plataforma continental externa entre o Ceará e o Sul da Bahia (especialmente entre 40 e 80m de profundidade), o Banco dos Abrolhos e a Cadeia Vitória-Trindade (ES).

Em todo o mundo, uma das principais iniciativas para a conservação de ambientes como um todo é a criação de áreas marinhas protegidas (AMPs). Essas AMPs podem ser reunidas em dois grandes grupos de unidades de conservação: as de proteção integral e as de uso sustentável. No Brasil, o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC¹⁹) regula os diversos tipos de áreas protegidas, indicando os usos humanos possíveis em cada uma. Em relação aos recifes de coral e às áreas marinhas protegidas, já existe um grande número de AMPs que os abrigam em esferas governamentais federais, estaduais e municipais (Tabela 2), além de haver propostas de criação de novas entre as grandes lacunas que o sistema atual apresenta, como em ilhas do Estado do Espírito Santo²⁰. Apesar da grande representação de ecossistemas recifais em unidades de conservação no Brasil, há muitos problemas de implantação e gestão em muitas delas. Isso se deve especialmente à ausência de planos de manejo, ordenação da visitação, fiscalização de atividades ilegais (como a pesca em unidades de proteção integral) e conflitos com atividades industriais em seu entorno. Porém, esse grande número de AMPs demonstra a importância que os ambientes coralíneos possuem em grande parte da costa brasileira. Nas últimas décadas, houve grandes esforços e conquistas no âmbito da avaliação e do planejamento da conservação marinha no Brasil²¹. Recentemente, um grande passo para a sistematização e o planejamento das ações necessárias para a conservação e o uso sustentável dos recursos marinhos presentes nos ambientes coralíneos brasileiros foi dado com a publicação do Plano de Ação Nacional para a Conservação dos Ambientes Coralíneos (PAN Corais²²). É preciso, agora, um grande esforço para a efetiva implantação das ações previstas.

Tabela 2. Exemplos de áreas marinhas protegidas no Brasil com ambientes coralíneos.

Áreas Marinhas Protegidas	Esfera	UF	Ano
Parque Estadual Marinho do Parcel de Manuel Luís	Estadual	MA	1991
Parque Estadual da Pedra da Risca do Meio	Estadual	CE	1997
Reserva Biológica do Atol das Rocas	Federal	RN	1979
Área de Proteção Ambiental Estadual dos Recifes de Corais (APARC)	Estadual	RN	2001
Parque Nacional Marinho de Fernando de Noronha	Federal	PE	1988
Área de Proteção Ambiental Costa dos Corais	Federal	PE-AL	1997
Área de Proteção Ambiental da Baía de Todos os Santos	Estadual	BA	1999
Parque Municipal Marinho da Pedra de Ilhéus	Municipal	BA	2011
Parque Municipal de Preservação Marinha de Coroa Alta (Santa Cruz Cabrália)	Municipal	BA	1999
Parque Natural Municipal do Recife de Fora (Porto Seguro)	Municipal	BA	1997
Reserva Extrativista Marinha de Corumbau	Federal	BA	2000
Parque Municipal Marinho do Recife da Areia (Alcobaça)	Municipal	BA	1999
Parque Nacional Marinho dos Abrolhos	Federal	BA	1983
Área de Proteção Ambiental da Ponta da Baleia	Estadual	BA	1993
Reserva Extrativista Marinha do Arraial do Cabo	Federal	RJ	1997
Área de Proteção Ambiental Estadual do Pau Brasil	Estadual	RJ	2002
Área de Proteção Ambiental Municipal Marinha de Armação dos Búzios	Municipal	RJ	2009
Parque Natural Municipal dos Corais (Armação dos Búzios)	Municipal	RJ	2009
Monumento Natural do Arquipélago das Ilhas Cagarras	Federal	RJ	2010
Estação Ecológica de Tamoios	Federal	RJ	1990
Parque Estadual Marinho do Aventureiro	Estadual	RJ	1990
Área de Proteção Ambiental da Baía de Paraty, Paraty-Mirim e Saco do Mamangá	Municipal	RJ	1984 (redimensionada em 1987)
Estação Ecológica Tupinambás	Federal	SP	1987
Parque Estadual Marinho da Laje de Santos	Estadual	SP	1993
Área de Proteção Ambiental Estadual do Litoral Centro	Estadual	SP	2008
Reserva Biológica Marinha do Arvoredo	Federal	SC	1990

Literatura recomendada

- CASTRO, C.B.; PIRES, D.O. 2001. Brazilian coral reefs: what we already know and what is still missing. *Bulletin of Marine Science*, 69(2):357-371.
- FERREIRA, B.P.; MAIDA, M. 2006. *Monitoramento dos recifes de coral do Brasil*. Brasília: MMA. 120p.
- LEÃO, Z.M.A.N. 1996. The coral reefs of Bahia: morphology, distribution and the major environmental impacts. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 68(3):439-452.
- PRATES, A.P.L. (Ed.). 2006. *Atlas dos Recifes de Coral nas Unidades de Conservação Brasileiras*. 2.ed. Brasília: MMA. 232p.
- VILLAÇA, R.C. 2009. Recifes Biológicos in PEREIRA, R.C; SOARES-GOMES, A. (Orgs). *Biologia Marinha*. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência. p.399-420.

Recifes de coral ao longo do tempo geológico

José Carlos Sícoli Seoane, Cátia Fernandes Barbosa

Os grandes eventos geológicos: extinções em massa

A paleontologia é o ramo das Geociências que estuda a evolução das formas de vida ao longo do tempo geológico. O registro de bilhões de anos da história nas rochas do planeta Terra mostra que os recifes ocorrem desde a Era Paleozóica, há cerca de 2,7 bilhões de anos (Giga-anos antes do presente, ou Ga, Figura 1). Embora ocorra há muito tempo na história do planeta, a princípio, a formação de recifes carbonáticos¹ ocorreu por organismos muito diferentes dos atuais e não predominavam exatamente corais ou metazoários como corais.

Inicialmente, recifes eram formados por estromatólitos, agregados de cianobactérias ou cianofíceas (algas azuis) que correspondem a microrganismos aeróbicos fotoautotróficos retidos em sedimentos finos, formando estruturas sedimentares em forma de domos, cujos análogos existem até hoje em raros locais de águas quentes e protegidas, como Shark Bay (Gascoyne, Austrália) e Lagoas Salgada e Vermelha, Região dos Lagos (RJ, Brasil).

As primeiras acumulações carbonáticas de origem animal preservadas como fósseis são esponjas do **Cambriano** (545-495 milhões de anos antes do presente, ou Ma), calcimicróbios e arqueociatos, juntamente com a fauna de invertebrados com esqueletos. Ao final do Cambriano, somente estromatólitos/trombolitos e calcimicróbios são encontrados como construtores recifais. No **Ordoviciano** (495-443 Ma), uma biota crescente de esponjas, algas calcárias, briozoários e corais primitivos é encontrada, correspondendo às ordens tabulata (preservados na China) e rugosa (preservados na Escócia), embora os ecossistemas recifais continuassem dominados por estromatólitos, algas calcárias e esponjas (Figura 1). O **Siluriano** (443-417 Ma) foi marcado pela evolução dos peixes, e os recifes de coral se tornaram abundantes e diversificados, primariamente formados por estômatos, atingindo enormes proporções e constituindo

1. Estruturas sedimentares rígidas formadas em plataformas carbonáticas rasas de águas mornas produzidas por calcários marinhos, bioconstruídos predominantemente por corais escleractíneos ou hermatípicos, micróbios e algas calcárias. No passado, algas calcárias vermelhas, estromatólitos, trombolitos, micróbios e metazoários esqueletais, particularmente corais tabulados, escleractíneos e estômatos dominavam a estrutura.



as primeiras plataformas carbonáticas resistentes a ondas, uma vez que dominavam ambientes inframaré rasos, enquanto os corais rugosos coloniais e tabulados eram mais comuns em águas túrbidas e mais profundas. No **Devoniano** (417-354 Ma), os calcimicróbios eram notáveis construtores em um ecossistema oceânico onde novas formas de peixes apareceram junto com o florescimento de braquiópodes, equinodermas e crinóides. Os recifes atingem seu desenvolvimento máximo para o **Paleozóico**, com alta diversidade de bioconstrutores, incluindo microbialitos, cianobactérias calcificadoras, estômatos e outras esponjas, bem como os “corais” Tabulata e Rugosa. Essa diversidade de fauna e flora é comparável a dos recifes atuais, assim como as estruturas formadas são similares às atuais. No final do Devoniano, um grande evento de extinção dizimou os estômatos, corais rugosos e tabulares, e os braquiópodes.

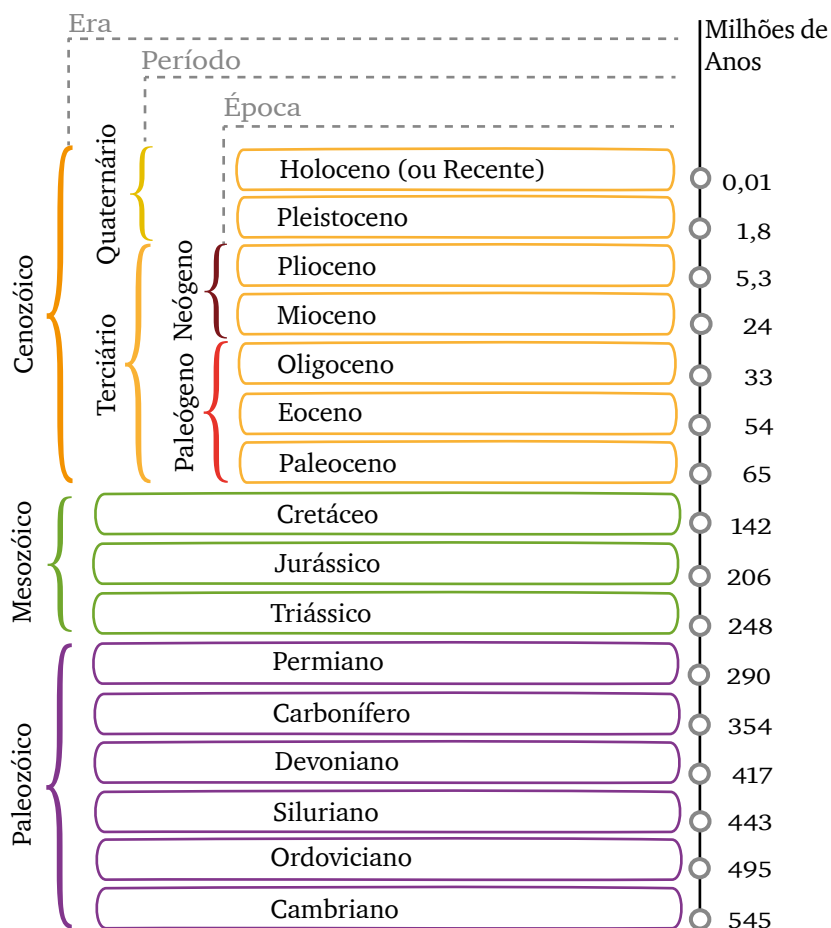
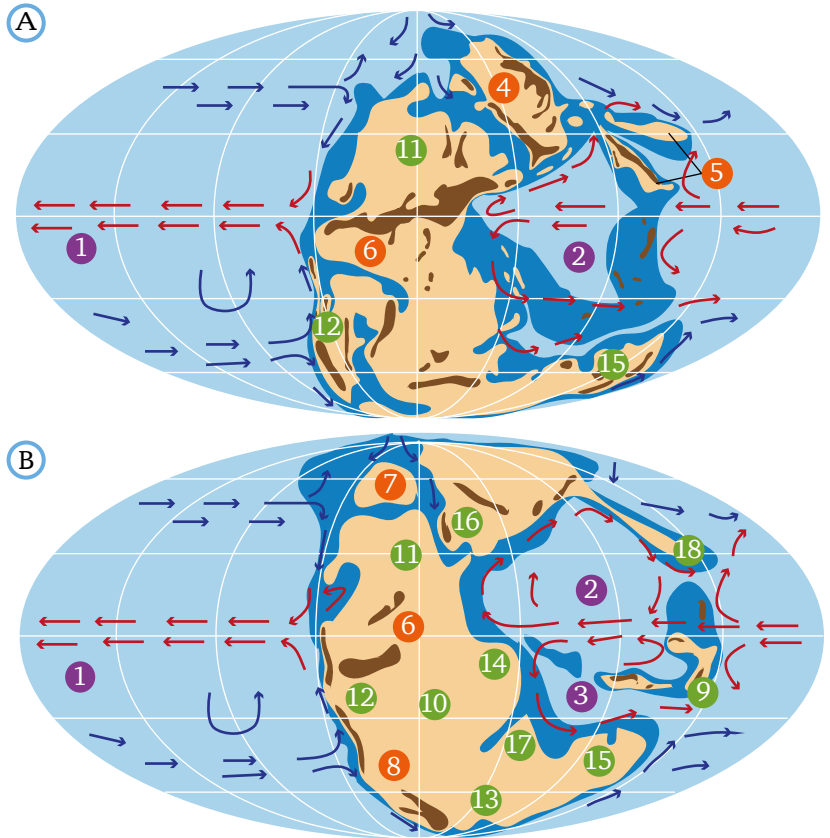


Figura 1. O tempo geológico com as eras, períodos e épocas.

No **Carbonífero** (354-290 Ma) e no **Permiano** (290-248 Ma), os recifes sofreram com as condições ambientais, ficando restritos a águas profundas. Nesses períodos geológicos predominaram grandes variações climáticas, com consequentes flutuações do nível do mar e baixas temperaturas nos oceanos. Nesse ambiente hostil para o desenvolvimento dos recifes, os corais se tornaram raros globalmente. A grande extinção do Permiano não tem causa certa, mas para os recifes, provavelmente resultou da acidificação e anoxia (falta de oxigênio livre) dos oceanos por extensivo vulcanismo; estima-se que 80-95% de todas as espécies vivas tenham sido extintas, incluindo quase todos os corais!

Entrando na **Era Mesozóica**, durante o **Triássico** (248-206 Ma), os recifes voltaram a se desenvolver nas águas rasas no grande oceano que havia se formado: o Tethys (Figura 2). Os corais passaram a ser importantes bioconstrutores nos recifes graças a uma evolução marcante: o aparecimento das zooxantelas. A fotossimbiose de Scleractinia-zooxantelados fez com que eles se destacassem como uma das poucas ordens de metazoários calcificados surgidos no Triássico, calciesponjas e algas calcárias. Assim, os fósseis mais antigos da ordem Scleractinia (ordem dos corais pétreos atuais) vêm do antigo Tethys. As principais evidências que se tem dessa evolução são os níveis dos isótopos estáveis de carbono e oxigênio em sedimentos e fósseis. Ao final do Triássico, ocorreram novas extinções e, embora os corais tenham se tornado novamente os principais construtores de recifes, as calciesponjas jamais voltaram a ser importantes como antes. No **Jurássico** (206-142 Ma), os recifes se recuperaram após 6-8 milhões de anos sem crescimento, embora, a princípio, com bem menos diversidade. Ocorreu a proliferação de ecossistemas complexos, impulsionados pelo aquecimento climático e pelo alargamento de extensas áreas de plataformas rasas.

Ao final da Era Mesozóica, no período **Cretáceo** (142-65 Ma), teve início uma mudança drástica na comunidade: o aparecimento dos bivalves rudistas, que dominaram os recifes por 30 Ma. Corais zooxantelados conviviam com rudistas, mas em habitats mais profundos, evitando a competição. Os recifes eram parecidos com os atuais recifes em franja, e em manchas destrutíveis a cada mudança do nível do mar, que



Paleoceanos

- ① Panthalassa
- ② Paleoceano Tethys
- ③ Oceano Tethys

Super continentes

- ④ Angara
- ⑤ Cathaysia
- ⑥ Pangea
- ⑦ Laurasia
- ⑧ Gondwana

Continentes atuais

- ⑨ Sul da China
- ⑩ África
- ⑪ América do Norte
- ⑫ América do Sul
- ⑬ Antártica
- ⑭ Arábia
- ⑮ Austrália
- ⑯ Eurásia
- ⑰ Índia
- ⑱ Norte da China

- Montanhas
- Terra firme
- Mares rasos
- Bacias oceânicas profundas

- Corrente de águas frias
- Corrente de águas mornas

Figura 2. Oceano Tethys durante (A) o Permiano e (B) Triássico. Modificado de SCOTESE (2001).

foram extremas, já que os registros fósseis mostram enchentes periódicas que alagavam até 40% dos continentes, expandindo o superoceano Tethys sobre quase todo o atual continente europeu. Devido a essas condições extremas, de alta produção de CO₂ por vulcanismo, de altas taxas de matéria orgânica devido às variações do nível do mar, com calotas polares mínimas ou inexistentes, e consequente desaceleração da circulação da água nos oceanos, predominavam bancos de sedimentos com cimentação de algas. Essa fase é de extrema importância na história da Terra, pois nela se formaram as grandes acumulações de petróleo.

A **Era Cenozóica** testemunhou a continuidade da quebra do supercontinente Gondwana, a ampliação da abertura do Atlântico, o fechamento do Tethys e a abertura de algumas bacias marginais no Oeste do Oceano Pacífico. Nesse período ocorreu o resfriamento progressivo do planeta, rumo a uma nova era glacial, e os corais escleractíneos se tornaram raros após o fim do Cretáceo, quando os rudistas foram extintos. Recifes **Paleógenos** (65-24 Ma) são pouco preservados devido à baixa diversidade, deposição carbonática reduzida, e raríssimos recifes tropicais. Os corais conseguiram sobreviver a amplas perturbações ambientais e no **Eoceno** os corais zooxantelados começaram a formar construções extensas. Ao final do Eoceno, um evento de extinção, combinado com o bloqueio progressivo do Tethys, causou um hiato no desenvolvimento, mas não diminuiu muito a diversidade dos corais. Dois eventos importantes sucessivos ocorreram no Neógeno (24-1.8 Ma): (1) o fechamento da passagem entre as Américas (Indo-Pacífico e Caribe separados), resultando em circulação oceânica polo-polo no Atlântico; (2) seguida por glaciações, diminuição da temperatura, abaixamento do nível do mar e muita erosão!

Um terceiro evento importante marcou o **Neógeno** na América do Sul Atlântica: o estabelecimento do atual curso do Rio Amazonas, causando a separação dos corais do Caribe e do Atlântico Sul. Não se sabe ainda precisar o exato momento desse evento, mas ele ocorreu entre 23 e 10 Ma. No Atlântico Sul, atualmente, só existe recife de coral verdadeiramente biogênico na costa brasileira, onde a fauna de corais apresenta alto endemismo, baixa abundância e diversidade, se comparada à do Caribe.

2. O “Recente” se convencionou como 1950, ano a partir do qual a datação por carbono-14 (¹⁴C) deixa de ser confiável devido aos testes atômicos que alteraram a taxa dos isótopos de carbono na atmosfera.

3. NUNES, F.; FUKAMI, H.; VOLLMER, S.V.; NORRIS, R.D.; KNOWLTON, N. 2008. *Coral Reefs*, 27:423-432.

O período geológico em que vivemos, o **Quaternário**, é representado por duas épocas distintas: o **Pleistoceno** (de 1.8 milhões de anos a 10 mil anos) e o **Holoceno** (de 10 mil anos atrás ao “Recente”²). O Pleistoceno foi marcado por mais de 20 períodos de grandes glaciações continentais, tendo as maiores mudanças nos volumes de gelo de glaciais para interglaciais ocorrido dentro dos últimos 900 mil anos. Hoje, tais eventos são amplamente reconhecidos em registros paleoceanográficos, com posição máxima do Último Máximo Glacial em aproximadamente 19-23 mil anos antes do presente (A.P.). Essas flutuações climáticas e do nível do mar tiveram influência marcante na evolução da margem continental brasileira e na deposição dos 2.400km de extensão da plataforma carbonática, que hoje suporta as populações de corais (desde a costa do Maranhão até Santa Catarina). Apesar de estar longe das áreas que sofreram glaciação direta e de estar posicionada na margem continental tectonicamente passiva, a plataforma continental brasileira deve ter sofrido ampla erosão. Essa hipótese tem sido frequentemente assumida pelos pesquisadores, embora nunca tenha sido rigorosamente testada. O último estágio glacial do Pleistoceno, em termos de registros e de impacto climático, marcou inclusive a evolução humana, deixando como um dos legados uma única espécie de homínido globalmente distribuído.

Esses eventos em sucessão acabaram por delinear a atual biogeografia dos recifes (Figura 3); percebe-se que os corais da costa brasileira não são similares aos demais, com 15 espécies de corais hermatípicos, sendo cinco endêmicos às águas brasileiras³. A evolução dos corais (Figura 4) em estudos paleoclimáticos é facilitada por esse “sub-grupo” hermatípico, que possui algas simbióticas e constrói recifes, ao contrário dos ahermatípicos.

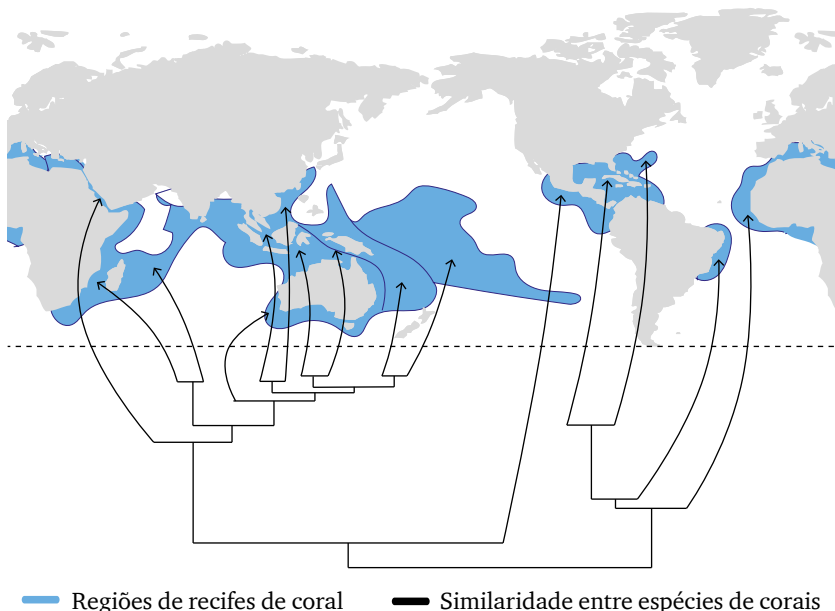


Figura 3. Similaridade entre as principais regiões biogeográficas dos corais do mundo, calculada a partir da distribuição das espécies. Quanto mais próximas da linha pontilhada estiverem duas regiões ligadas no dendrograma, maior a similaridade de suas faunas de coral. Modificada de STANLEY (2003).

Com a melhora climática no Holoceno, a plataforma carbonática testemunhou o estabelecimento mais amplo de populações de corais. Durante esse período, a paleoecologia dos ecossistemas coralíneos no Brasil já é bem mais conhecida. Desde o final da última glaciação até 5.000 anos A.P., o nível do mar subiu até atingir aproximadamente 4m acima do atual, e houve rápido acréscimo e dispersão lateral dos corais. Regressões e/ou estabilizações do nível do mar marcaram o Holoceno e ainda são tema de debate entre pesquisadores, principalmente após 5.000 anos A.P.

Desde então até o “Recente”, em escala de tempo e observação geológica, o nível do mar se encontra em regressão ou descida, o que levou à degradação dos recifes de coral. Para a oceanografia, no entanto, que envolve tempo de observação mais curto, com medições sinóticas, decadais ou, no máximo, centenárias, pequenas mas regulares elevações do nível do mar já são observadas no Brasil e no resto do mundo.

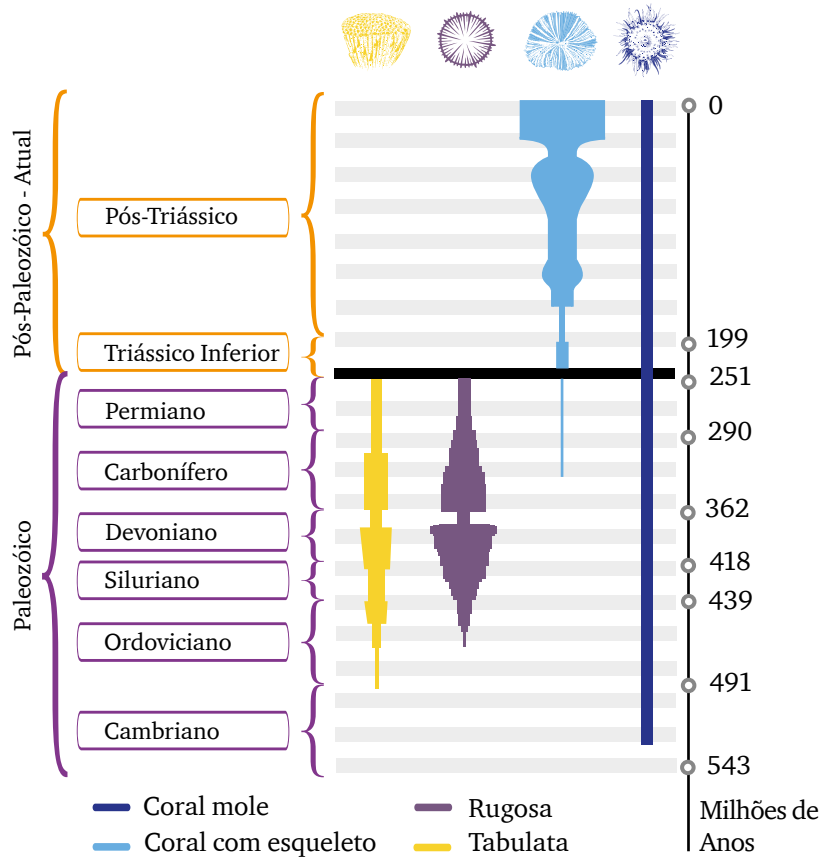


Figura 4. Evolução dos corais e principais grupos assemelhados ao longo do tempo geológico, em milhões de anos (escala à direita). A barra vertical azul escuro no lado direito reúne todos os grupos sem esqueleto preservável pelos processos de fossilização (animais semelhantes às anêmonas, de corpo mole). Modificada de STANLEY (2003).

As flutuações do nível do mar e seus registros

As flutuações do nível do mar e seus registros são fundamentais para entender como se formam e evoluem os recifes e suas criaturas. Assim, é preciso saber responder, entre outras questões: O que é nível do mar? Como varia ao longo do tempo? O que é necessário para se estabelecer um antigo nível do mar?

Para começar, **define-se nível médio do mar** (NMM por definição = om = nível de equilíbrio), por vezes denominado simplesmente **nível do mar**, como a altitude média da superfície do mar, desconsiderando as variações da maré, por exemplo. Juntamente com o volume das massas de terras acima deste, o NMM constitui a superfície da Terra, o **Geóide**, isto é, a superfície equipotencial do campo gravitacional do planeta. Assim, mudanças não periódicas afetam o NMM. Elas podem ser:

- No volume da água.
- E/ou na forma e no volume das bacias oceânicas.

E devem ser medidas em relação a um *datum* de referência, que pode ser fixo (distância ao centro da Terra, por exemplo) ou local (marca fixa não mutável da linha de costa, por exemplo).

A mudança de volume de água em um oceano afeta o nível de todos os outros oceanos. Qualquer mudança global é chamada de **Mudança do Nível do Mar Eustática**. A mudança de volume de um nível do mar medida em relação a um ponto de referência em terra é chamada de **Mudança do Nível do Mar Relativa**.

Para se estabelecer um antigo nível do mar, é necessário reconhecer algum indicador de sua presença em uma altitude acima ou abaixo da posição atual. Uma vez reconhecido o **indicador de nível do mar**, a altitude dele é obtida em relação ao atual. As principais causas de flutuações do nível do mar são apresentadas a seguir, a partir das de maior magnitude.

Tabela 1. Causas de flutuações do nível do mar.

Causa	Magnitude	Efeito
Área e espessura da cobertura de gelo continental	100m de variação a cada 100.000 anos	Diminuição provoca aumento do NMM
Movimentação das placas tectônicas em escala global	10-100m de variação por 10-100 milhões de anos	Formação e ruptura de supercontinentes, reconfigura as bacias oceânicas
Variações na temperatura da água do mar	Centímetros a metros por centenas ou milhares de anos	Expansão e contração termal
Trocas de água com os continentes (lagos, água subterrânea)	Centímetros a metros por centenas ou milhares de anos	Ainda não quantificado
Tectônica local, pequenos sismos	Muito variada	Muito variado

Curvas de flutuações do nível do mar

A representação das flutuações do nível do mar se faz pela construção de uma curva, onde o eixo horizontal é o nível do mar e, ao longo dele, coloca-se uma escala de tempo. Valores positivos ou negativos do nível do mar são plotados para cada momento em que são reconhecidos. Uma curva de flutuações do nível do mar pode ser construída para qualquer escala de tempo, centenas, milhares ou milhões de anos (Figura 5). É maior a quantidade de detalhes das posições do nível do mar para a escala de tempo mais recente: quanto mais distante é o passado, maior é a incerteza. Inicialmente, tentava-se construir uma curva do nível do mar global. No entanto, com o maior número de trabalhos sobre o tema, logo se percebeu que as variações locais têm muita importância (ver item anterior) e passou-se a trabalhar por regiões. No Brasil, existem curvas de variação do nível do mar para a maioria dos estados posicionados na margem continental para os últimos 7.000 anos (Figura 5-B).

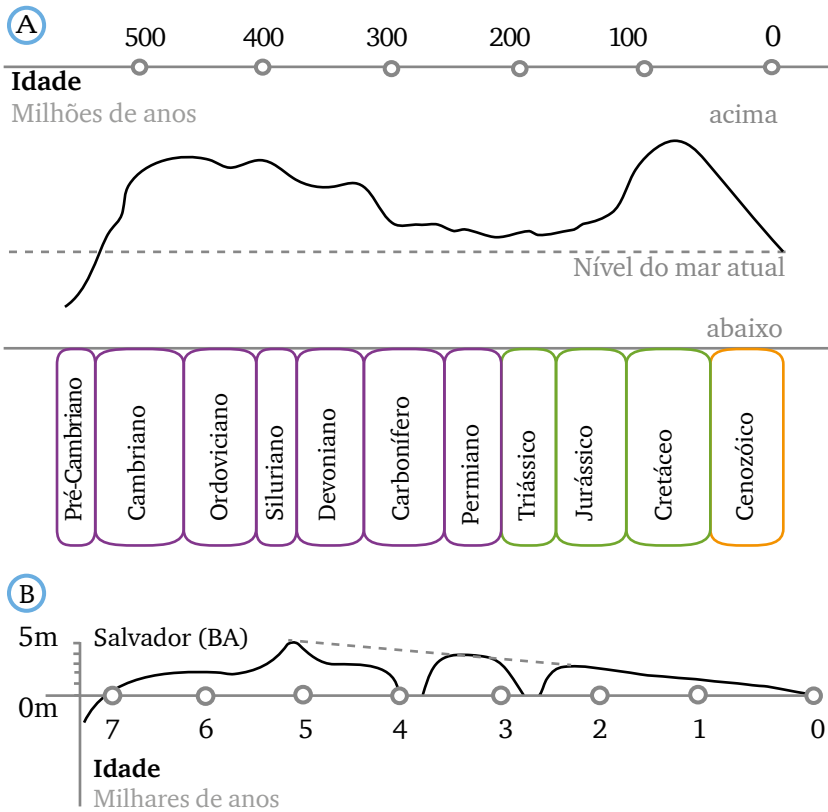


Figura 5. (A) Curva de variação do nível do mar ao longo do tempo geológico. Note que não há escala vertical da variação e que foram representados apenas os grandes eventos (de “1ª ordem”). (B) Exemplo de mudanças de NRM ao longo da costa brasileira nos últimos 7 mil anos. Essa curva de Salvador (BA, Brasil) é a mais representativa do Brasil, pois foi baseada em um grande número de evidências e datações por ^{14}C .

Como se forma um recife

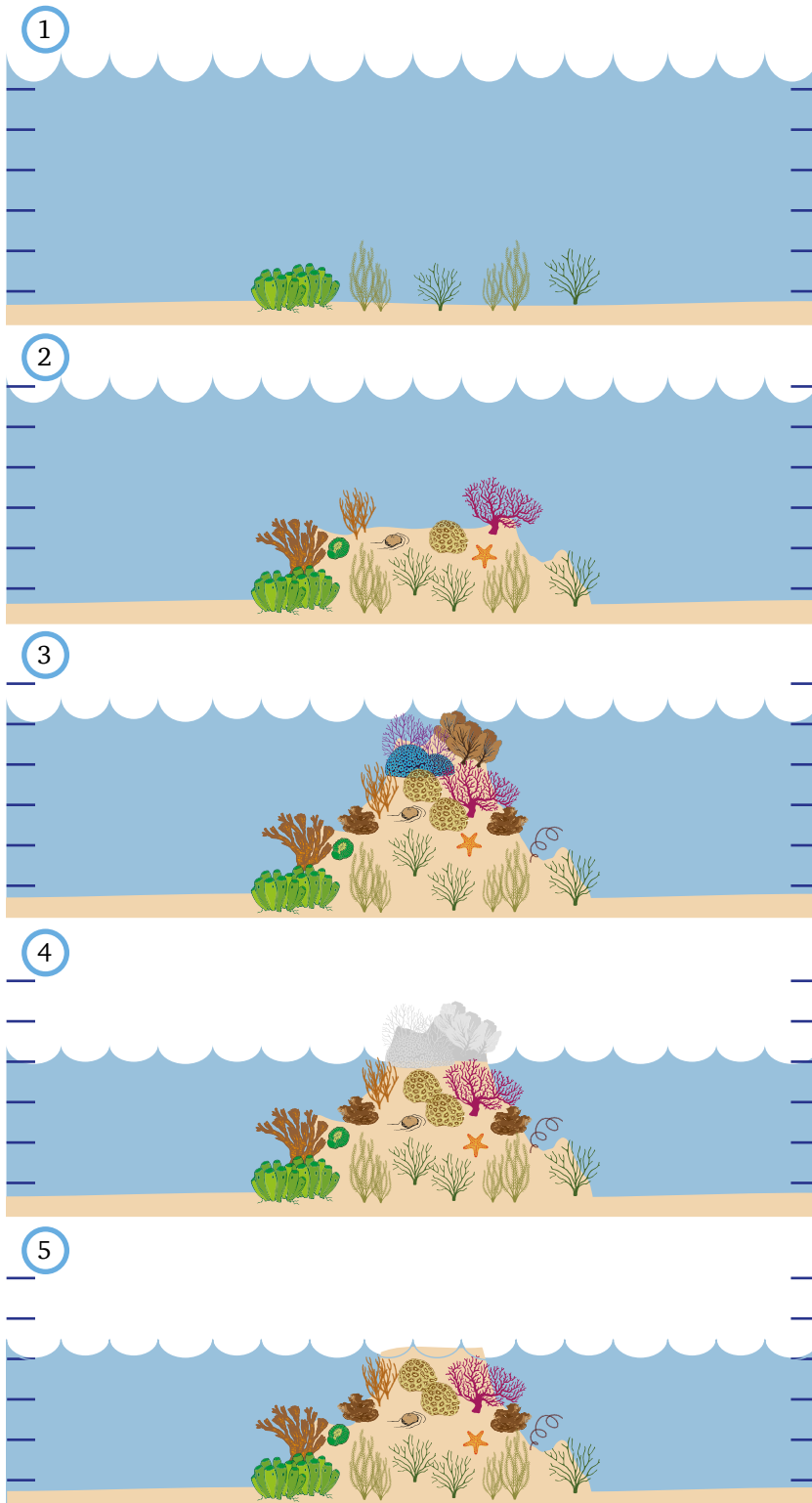
Enquanto está vivo, o coral secreta um esqueleto de carbonato de cálcio (CaCO_3). Graças à relação com seus simbiontes, os corais escleractíneos crescem muito mais rapidamente em água limpa, que facilita a penetração da luz solar e a fotossíntese para a zooxantela. Após sua morte, novas colônias desenvolvem-se sobre essa estrutura rígida, formando, com o tempo, os paredões calcários que chamamos de recife, num processo de milhares de anos. Mas nem tudo é construção. Ondas, peixes herbívoros (como o peixe-papagaio), ouriços-do-mar, esponjas e outras forças e organismos quebram

os esqueletos de corais em fragmentos que se assentam em espaços na estrutura do recife. Muitos outros organismos que vivem na comunidade do recife contribuem para o esqueleto de carbonato de cálcio do recife do mesmo modo. Algas coralíneas são realmente os principais contribuintes para a estrutura, pelo menos nas partes do recife submetidas às maiores forças das ondas (como a frente recifal face ao oceano aberto). Muitas formam nódulos, outras se desenvolvem na superfície dos fragmentos, alargando-os e cimentando-os uns aos outros.

Existem três grandes tipos de recifes de coral: franjas, barreiras e atóis. No estágio inicial da construção recifal, eles são chamados de franjas, e em geral ocorrem ao longo de costões rochosos ou sobre arenitos e rochas de praia próximos da linha de costa. Já as barreiras surgem quando a erosão das praias ou a flutuação do nível do mar afasta o recife da beira-mar. É o caso da mais famosa dessas formações, a Grande Barreira de Corais, na Austrália, com 2.000km de extensão. O atol, por sua vez, é como um anel, formado quando essas barreiras circundam alguma ilha que, também devido à erosão, à subsidência⁴ ou à flutuação do nível do mar, deixa de existir. A forma do recife revela sua relação de resposta às variações do nível do mar.

Respostas dos corais às flutuações do nível do mar

A elevação do topo do recife em relação ao nível do mar (considerando a variação das marés e seu intervalo) impõe restrições significativas ao crescimento do coral. Apenas um pequeno número de espécies pode prosperar no topo do recife, e elas não podem crescer acima de certa altura, pois os pólipos não conseguem suportar demasiada exposição ao ar na maré baixa. Então, quando o nível do mar encontra-se estável, o crescimento do recife ocorre lateralmente, pois a maior incidência de luz no topo concorre para a impossibilidade de continuar crescendo verticalmente (Figura 6, estágios 1 e 2). Nesse caso, o maior crescimento de corais ocorre nas laterais do recife, menos expostas às ondas, bem como sobre a frente recifal, em lagoas e ao longo dos canais do recife. Quando o nível do mar sobe lento o suficiente para o coral acompanhá-lo, o recife cresce verticalmente (Figura 6, estágio 3). Já quando o nível do mar desce, o topo do recife pode ficar descoberto e sujeito à erosão de seu topo pela ação das ondas (Figura 6, estágios 4 e 5, vide topo aplainado).



5. Mudanças periódicas em escala de milhares de anos na distância entre a Terra e o Sol e na relação do ângulo entre eles resultam em alterações recorrentes e previsíveis do clima global. Em períodos mais quentes, água doce é adicionada aos oceanos pelo derretimento de geleiras, e o nível do mar sobe. Durante os períodos frios (glaciações), boa parte da água do planeta fica congelada nas geleiras, e o nível do mar, consequentemente, fica mais baixo. Para mais detalhes, ver texto.

Figura 6. Nível do mar⁵.

Na parede lateral do recife, sombreada, o crescimento da estrutura é mais lento. Assim, alguns recifes do Brasil adquiriram um formato típico de cogumelo e são chamados de chapeirões (Figura 7). Os chapeirões correspondem a uma forma de recife resultante das variações do nível do mar. Em todo o Nordeste brasileiro são encontradas linhas de recifes próximas às praias. Quando retilíneos, esses recifes, em geral, são formações sedimentares cimentadas por calcário, chamadas **arenitos de praia, recifes de arenito** ou simplesmente **arrecifes**. Podem indicar antigas linhas de praia, e seus padrões são úteis para entender as variações do nível do mar ou os deslocamentos das linhas de praia ao longo do tempo. Essas estruturas minerais foram sendo colonizadas inicialmente por organismos bentônicos. Dessa forma, podem se formar recifes cheios de vida sobre o substrato rígido anterior, como já reconhecido por Charles Darwin ao trabalhar na costa brasileira.

No Brasil, os **Chapeirões** e **Paredes** na Bahia, os **Arrecifes** em Pernambuco e Alagoas, os **Parrachos** no Rio Grande do Norte e o **Parcel** de Manuel Luís, no Maranhão, são registros da variação do nível do mar e dos processos oceanográficos erosivos e/ou deposicionais sobre os ecossistemas recifais. Com 2.400km de extensão, os recifes de coral brasileiros podem ter sido, em seu ápice, análogos à Grande Barreira de Corais australiana.

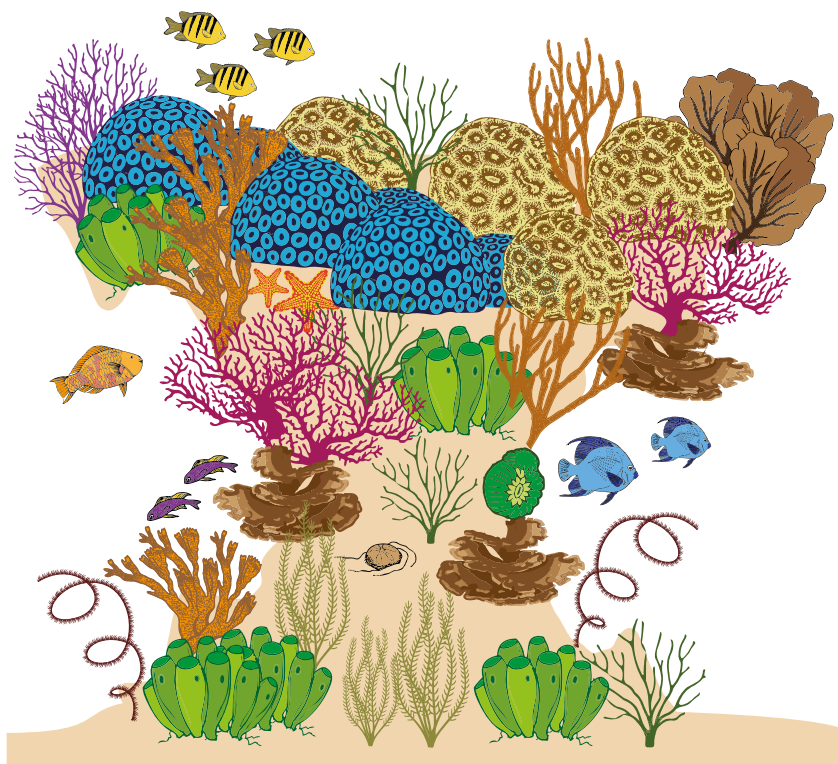


Figura 7. Esquema representando a coluna recifal chamada “chapeirão” no Sul da Bahia.

Literatura recomendada

SCOTESE, C.R., 2001. *Atlas of Earth History*. v.1. Paleogeography, PALEOMAP Project, Arlington, Texas. 52p.

STANLEY JR., G.D. 2003. The evolution of modern corals and their early history. *Earth-Science Reviews*, 60:195-225.

CORAL FACT SHEETS. Disponível em: <<http://coral.aims.gov.au/info/reefs.jsp>>. Acesso em: janeiro 2016.

A HOOPER MUSEUM WEBSITE. *The End-Permian mass extinction: a marine focus*. Disponível em: <http://hoopermuseum.earthsci.carleton.ca/pt_boundary/PTBmain.html>. Acesso em: janeiro 2016.

O holobionte - microrganismos e a saúde dos corais

Laís Feitosa Machado, Deborah Catharine de Assis Leite, Alexandre Soares Rosado, Raquel Silva Peixoto

Microrganismos marinhos e corais

Microrganismos e suas associações com seres marinhos

Durante muito tempo, a microbiologia consistiu, essencialmente, no estudo de microrganismos relacionados a doenças. No entanto, quando a vida microbiana foi descoberta em fumarolas de mar profundo e em outros ambientes antes considerados inabitáveis, os microbiologistas começaram a estudar, mais atentamente, a microbiota relacionada a outros processos além dos patogênicos.

Os oceanos sempre foram e ainda são dominados por microrganismos que exercem funções fundamentais para seu bom funcionamento. Para evidenciar isso, basta destacar que o fitoplâncton (organismos microscópicos fotossintéticos) e as cianobactérias (bactérias fotossintéticas) que habitam as colunas d'água são responsáveis pela maior parte da produção de matéria orgânica dos oceanos e pela liberação do oxigênio do qual depende todo o ecossistema marinho – e também toda a vida na Terra! Além disso, bactérias, arqueias¹ e fungos podem executar outras importantes funções para a manutenção desse ecossistema, como a ciclagem de nutrientes e a decomposição da matéria.

Os microrganismos marinhos podem ser encontrados tanto em vida livre como em relações de simbiose² com outros organismos, como camarões, corais, esponjas, foraminíferos, peixes e poliquetas, entre outros. Essas simbioses, que ocorrem amplamente na natureza, podem ser de três tipos: comensalismo, parasitismo e mutualismo. No comensalismo, apenas um dos indivíduos associados é beneficiado, sem que a simbiose produza efeitos negativos sobre o parceiro. Já no parasitismo, há benefícios para um e prejuízos para o outro, enquanto que no mutualismo, os dois indivíduos associados são beneficiados pela relação

1. Domínio biológico composto por microrganismos de estrutura celular semelhante a das bactérias.

2. Interação estabelecida entre organismos de diferentes espécies que vivem em íntima associação.



estabelecida. Os principais benefícios oriundos dessas relações envolvem proteção, provisão de nutrientes escassos ou de difícil acesso e reciclagem da matéria. No que diz respeito às relações estabelecidas entre microrganismos e corais, chama a atenção o fato de os corais viverem em estreita associação com uma microbiota bastante diversa, composta por organismos como bactérias, arqueias, microalgas, fungos, protozoários e vírus, distribuídos por todo o corpo do animal (Figura 1). A esse complexo de organismos vivos, formado pelo coral e sua microbiota associada, dá-se o nome de holobionte (do grego: *holos* = todo; *bios* = vida; *ontos* = indivíduo).

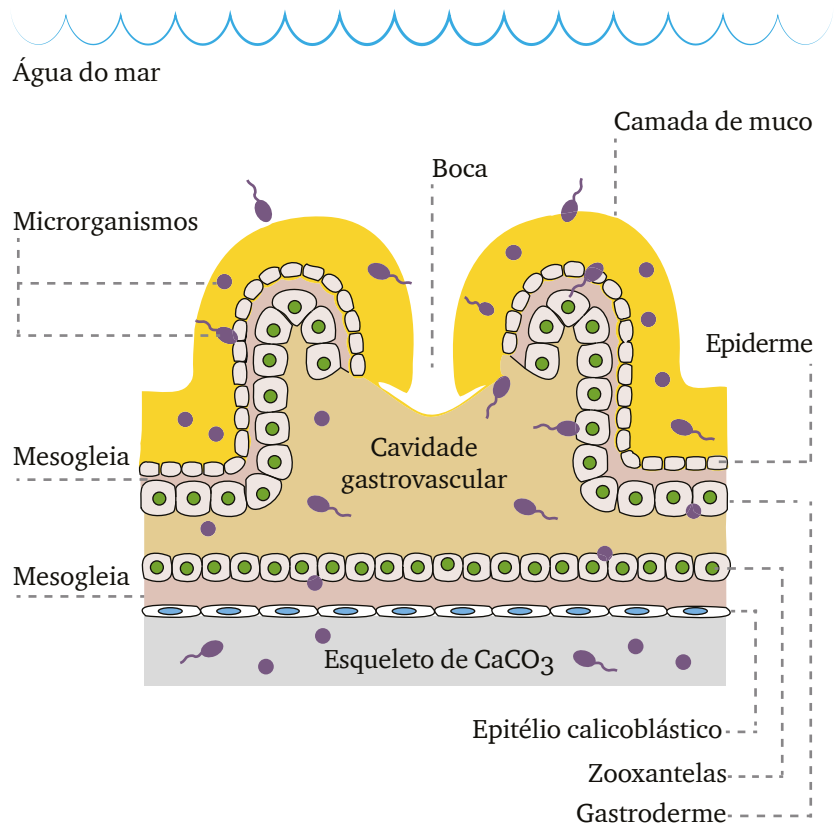


Figura 1. Distribuição de microrganismos nos tecidos dos corais. As zooxantelas são destacadas em cor verde no interior da gastroderme. Os microrganismos de outros grupos taxonômicos, como bactérias, arqueias, fungos, protozoários e vírus, encontram-se destacados em roxo. Esquema adaptado de ROSENBERG et al. (2007)³.

O holobionte coral

O termo holobionte foi cunhado há pouco mais de uma década⁴, a partir de estudos realizados com corais, e designa uma unidade viva composta por um hospedeiro e sua microbiota associada, que pode ser evolutivamente selecionada. Nesse caso, o objeto de seleção passa a ser o conjunto do genoma de todos os organismos componentes do holobionte e não mais o de cada organismo de maneira independente.

A formação de um holobionte confere vantagens adaptativas aos seres envolvidos, e a observação desse fato levou uma equipe de pesquisadores de Israel, coordenada por Leah Reshef, a propor a Hipótese do Coral Probiótico. De acordo com essa hipótese, o coral e sua microbiota estabelecem uma associação dinâmica entre si, de modo que diferentes condições ambientais selecionam o holobionte mais vantajoso para o contexto das condições prevalentes. Assim, através de modificações na estrutura das comunidades microbianas residentes nos corais, o holobionte se adequa às mudanças ambientais de maneira mais rápida e versátil do que os processos naturais de seleção do hospedeiro como um todo. Segundo os pesquisadores, o genoma do coral pode agir em consonância com o genoma da microbiota associada e criar um hologenoma, conferindo maior potencial adaptativo aos organismos que compõem o holobionte⁵. E isso só se torna possível devido a características básicas dos microrganismos associados, como suas elevadas taxas reprodutivas e seus curtos períodos de geração, fundamentais nesse processo.

4. ROWHER, F.; SEGURITAN, V.; AZAM, F.; KNOWLTON, N. 2002. *Marine Ecology Progress Series*, 243:1-10.

5. RESHEF, L.; KOREN, O.; LOYA, Y.; ZILBER-ROSENBERG, I.; ROSENBERG, E. 2006. *Environmental Microbiology*, 8:2068-2073.



A informação genética codificada pela microbiota associada aos corais pode ser modificada, pelo menos, de três maneiras: 1) Por meio da alteração da abundância relativa dos microrganismos associados ao hospedeiro, 2) Pela entrada de novos microrganismos no holobionte e 3) Pela modificação genética da microbiota residente do hospedeiro por processos de mutação (modificações aleatórias no DNA) ou transformação (captação de material genético disponível no meio ambiente).

As associações envolvendo os organismos constituintes do holobionte afetam tanto o hospedeiro quanto sua microbiota, e essas interações podem ser de natureza vantajosa, com relações de mutualismo e comensalismo, ou prejudicial, com interações patogênicas⁶.

Microbiota amiga

Microrganismos associados aos corais

Os microrganismos representam a maior parte da diversidade do planeta e são os componentes mais diversos das comunidades dos recifes, com a previsão de existirem até mais de cem novas espécies microbianas associadas a cada espécie de coral. Para se ter uma ideia, podem ser encontrados até 100 milhões de microrganismos por cm² em corais, o que corresponde a mais de dez vezes a quantidade de bactérias encontrada na pele humana ou no solo de uma floresta temperada.

Esses microrganismos, com representantes dos três domínios biológicos da vida (Bacteria, Archaea e Eukarya), podem ser diferentes dos encontrados na coluna d'água e bastante característicos, em questão de riqueza e abundância, com relação à espécie de coral com a qual estabelecem associação e de acordo com as condições ambientais às quais são expostos. No que diz respeito às bactérias, por exemplo, há evidências de que corais de uma mesma espécie, encontrados em ambientes recifais geograficamente separados, abrigam comunidades bacterianas bastante similares. Por outro lado, há também estudos mostrando que a estrutura das comunidades bacterianas dominantes em corais de uma mesma espécie varia de acordo com a localização

geográfica dos recifes, indicando uma influência dos fatores ambientais (externos aos corais) sobre a microbiota do holobionte. No que diz respeito às microalgas dos corais, especificamente as zooxantelas, há estudos indicando que, em temperaturas distintas, diferentes composições de comunidades podem ser encontradas no hospedeiro. Além disso, é importante ressaltar que as diferentes comunidades microbianas interagem de maneiras distintas com os corais e que isso pode ter reflexos diretos sobre a fisiologia do animal. Dessa forma, a composição de uma comunidade microbiana específica, como as de zooxantelas, pode, indiretamente, afetar a composição de outra, como a de bactérias.

A microbiota associada aos corais vem sendo estudada há algumas décadas. No entanto, durante muitos anos, a maior parte das pesquisas desenvolvidas se concentrou em estudar a relação estabelecida entre o coral e seus simbiontes dinoflagelados, as zooxantelas. Assim, embora vários dos aspectos dessa relação estejam hoje já bem esclarecidos e elucidados, muito pouco é sabido acerca dos outros componentes da microbiota coralínea e de sua função ecológica junto aos corais. Esse fato tem sido a principal motivação atual para a realização de pesquisas envolvendo a microbiologia coralínea. Embora ainda haja muito a ser estudado e compreendido, algumas questões já estão sendo elucidadas.

Principais funções desempenhadas pela microbiota coralínea

Dentre as funções realizadas pela microbiota coralínea, pode-se destacar o papel desempenhado pelas microalgas do gênero *Symbiodinium*, popularmente conhecidas como zooxantelas. As zooxantelas vivem no interior de células específicas dos corais (simbiossomas) e são beneficiadas com um ambiente protegido e com suprimento de compostos necessários à realização de sua fotossíntese. Em troca, elas fornecem a seus hospedeiros oxigênio, glicose, glicerol e aminoácidos oriundos do processo fotossintético, de modo que mais de 90% dos fotossintatos por elas produzidos são utilizados pelos corais. Considerando que a maioria dos corais vive em águas oligotróficas (pobres em nutrientes) e que isso dificulta a obtenção de alimentos por vias de heterotrofismo (aquisição de alimento a partir do meio), o sucesso evolutivo e ecológico dos corais está intimamente relacionado a essa associação mutualística desenvolvida com as zooxantelas^{7,8}.

7. Ver MARANGONI et al. (2016), capítulo 4 deste volume.

8. Ver GARRIDO et al. (2016), capítulo 6 deste volume.

Destaca-se também o papel de microrganismos relacionados aos processos de fixação e ciclagem do nitrogênio, nutriente essencial para a manutenção e saúde de todos os organismos vivos. As águas oligotróficas habitadas pela maioria dos corais são particularmente pobres em nitrogênio assimilável. No entanto, o nitrogênio em sua forma gasosa está presente em altas concentrações nas águas marinhas. Para que esse nutriente se torne acessível à grande maioria dos organismos, ele precisa ser convertido a amônia, a nitrato ou a nitrito, compostos nitrogenados de fácil assimilação, e esse processo de conversão é realizado por bactérias denominadas diazotróficas. Os corais apresentam uma estreita associação com esse tipo de bactérias, indicando que elas, potencialmente, estão contribuindo com a fixação de nitrogênio para o coral e para suas zooxantelas associadas. Além da microbiota diazotrófica, ressalta-se também a importância de outros microrganismos que participam da ciclagem do nitrogênio. Pesquisadores suspeitam que os microrganismos utilizem os compostos nitrogenados excretados pelos corais em seu metabolismo e os convertam a formas que possam ser novamente utilizadas, destacando que bactérias, arqueias e fungos estão potencialmente envolvidos em processos de ciclagem do nitrogênio, como assimilação da amônia, amonificação, nitrificação, nitratação e desnitrificação.

Ressalta-se ainda a produção, por parte da microbiota autótrofa coralínea, de compostos sulfurosos (como o dimetilsulfoniopropionato – DMSP – e o dimetilsulfito – DMS) com funções relacionadas à osmoproteção, à antioxidação e à ação antimicrobiana nos tecidos coralíneos. Além disso, esses compostos podem também atuar como sinalizadores moleculares, atraindo peixes herbívoros para os ambientes recifais e auxiliando, por conseguinte, no controle de crescimento de macroalgas associadas aos corais.

Há ainda os microrganismos que participam do desenvolvimento ontogenético (do grego: *ontos* = indivíduo; *genesis* = origem) dos corais. Na desova, por exemplo, podem ser observadas transmissões verticais (do progenitor para a prole) e horizontais (aquisição do ambiente) da microbiota para os indivíduos gerados. E, embora esse processo seja mais bem estudado para a transmissão das zooxantelas, há estudos demonstrando que o mesmo ocorre com as populações de bactérias e arqueias. Especula-se ainda que, em alguns casos, a transmissão vertical da microbiota ocorra antes mesmo da desova. Pesquisas recentes identificaram que a microbiota associada aos *bundles* (pacotes de gametas) de alguns corais é bastante similar à encontrada nas colônias parentais, indicando que a transmissão de microrganismos possa ocorrer já nessa etapa da ontogênese coralínea. A importância funcional da microbiota adquirida durante esses períodos permanece pouco evidente, embora seja sugerido que a atividade antimicrobiana desempenhada por ela possa proteger a desova e as larvas recém eclodidas. Além disso, a microbiota é importante ainda nas etapas de metamorfose e assentamento das larvas dos corais. Em estudos recentes, descobriu-se que, através da liberação de compostos químicos, bactérias do gênero *Pseudoalteromonas* estimulam a metamorfose de larvas de corais. Observou-se também que certas populações bacterianas podem deter o assentamento de larvas em locais inadequados através de sinalizações químicas, tendo sido demonstrado que o assentamento é evitado em locais próximos a cianobactérias bentônicas (que vivem associadas a um substrato), supostamente produtoras de metabólitos secundários tóxicos, e a algumas macroalgas.

Além de tudo isso, ainda tem-se as moléculas bioativas que são produzidas pela microbiota associada aos corais e que, uma vez isoladas e caracterizadas, podem ser produzidas em larga escala e utilizadas pelos seres humanos. Há relatos de microrganismos marinhos produzindo substâncias antitumorais, antifúngicas, antivirais e antibacterianas⁹. Essas substâncias, para muito além de poderem ser utilizadas pelos seres humanos, desempenham funções fundamentais junto ao holobionte, auxiliando potencialmente na manutenção de sua homeostase e integridade.

10. Categoria taxonômica inferior à espécie. Microorganismos pertencentes à mesma estirpe apresentam características em comum que os diferenciam, em determinado genótipo ou fenótipo, de outras estirpes da mesma espécie.

Influência de fatores ambientais sobre o holobionte coral

O ambiente e a saúde do holobionte

Como qualquer outro ser vivo, os corais apresentam preferências por determinadas condições ambientais para se desenvolverem de maneira adequada. Dentro dessas condições, esses animais suportam apenas pequenas variações em suas faixas de tolerância, sendo sensíveis a grandes variações ambientais na temperatura, na salinidade, na turbidez da água e em outros fatores físicos, químicos e biológicos que possam afetar seu ambiente natural.

Os impactos que afetam o holobionte modificam as relações existentes entre o hospedeiro e sua microbiota. Essas alterações podem provocar efeitos indesejáveis, com respostas negativas do holobionte ao estresse sofrido, ou facilitar uma adequação às novas condições ambientais impostas (Hipótese do Coral Probiótico).

Os impactos que atingem os corais são oriundos de atividades antrópicas e podem apresentar escalas locais e globais. Dentre eles, podem ser destacados:

Sobrepesca: a retirada massiva de consumidores primários e secundários das cadeias alimentares marinhas afeta a dinâmica trófica (relativa ao processo de alimentação) dos ambientes recifais. A diminuição de consumidores do topo das cadeias alimentares favorece o desenvolvimento de produtores primários (seres que produzem seu próprio alimento a partir de compostos inorgânicos), como as algas, que, por não sofrerem mais pressão de predação, crescem de maneira desordenada. O aumento da população de produtores proporciona, por consequência, o aumento da liberação de compostos orgânicos. Esses compostos nutrem as comunidades microbianas associadas aos corais, proporcionando aumento em sua densidade e facilitando o desenvolvimento de estirpes¹⁰ com potencial patogênico ao coral, promovendo um desequilíbrio da condição normal do holobionte.

Poluição: o crescimento de indústrias em regiões próximas à costa tem facilitado a liberação de substâncias tóxicas nos ambientes marinhos e o aumento da entrada de matéria orgânica nesses ecossistemas. O aumento da entrada de matéria orgânica favorece as zooxantelas associadas aos corais. Sem a restrição de nutrientes regulada pelos corais, elas aumentam suas taxas fotossintéticas e consomem grande parte dos fotossintatos produzidos, aumentando, portanto, sua biomassa e diminuindo sua contribuição à nutrição dos corais. Além disso, o aumento nas taxas fotossintéticas promove o aumento da liberação de espécies reativas de oxigênio, que, em grandes quantidades, são bastante tóxicas para os corais. Como consequência disso, os corais expulsam as zooxantelas a eles associadas e passam por períodos de restrição em sua alimentação.

Derramamento de petróleo: os derramamentos de óleo podem ser extremamente prejudiciais aos ambientes recifais. Além das borras de óleo que se formam na superfície da água, cobrindo os recifes e impedindo a chegada de luz às zooxantelas, a fração solúvel do óleo pode ser tóxica aos corais adultos e também comprometer seu processo reprodutivo, uma vez que afeta suas larvas, podendo, inclusive, matá-las¹¹.

11. Ver SANTOS et al. (2016), capítulo 13 deste volume.

Todas as ameaças supramencionadas podem inserir os corais em situações de estresse e enfraquecer as relações estabelecidas entre eles e seus simbiontes. No entanto, outra ameaça em particular tem deixado a comunidade científica em alerta: o aquecimento global.

De acordo com o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), as previsões são de que, até o final deste século, as águas do mar sofram um aumento de aproximadamente $4,8^{\circ}\text{C}$ em sua temperatura e passem por um processo de acidificação, com diminuição de 0,3 unidades de seu pH. Como resultado desse possível cenário de aquecimento global, podem ser citados:

Branqueamento dos corais: processo no qual o animal expulsa ou perde suas zooxantelas e seus pigmentos fotossintetizantes. Como resultado, o esqueleto de carbonato de cálcio fica visível sobre o tecido coralíneo, agora translúcido. A perda das zooxantelas, essenciais para a nutrição adequada do coral, pode promover modificações na estrutura de outras comunidades microbianas associadas ao animal e culminar com sua morte.

Diminuição das taxas de crescimento dos corais: 30% do dióxido de carbono oriundo de atividades humanas são absorvidos pelo ambiente marinho. O dióxido de carbono reage com moléculas de água, originando o ácido carbônico (H_2CO_3), que se ioniza e libera íons H^+ , diminuindo o pH da água do mar. Como resultado, ocorre a diminuição da concentração de íons carbonatos (requeridos para o crescimento coralíneo) disponível nos oceanos. Esse fato culmina com a menor incorporação de carbonato de cálcio pelos corais, podendo enfraquecer seu esqueleto e comprometer sua estrutura. Além disso, mudanças de pH podem promover mudanças na microbiota associada aos corais⁵.

Perspectivas microbiológicas sobre o futuro dos recifes de coral

A importância ecossistêmica dos microrganismos

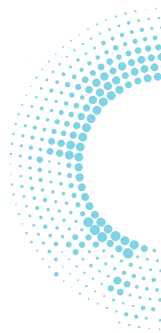
O futuro dos recifes de coral está diretamente relacionado à habilidade desses ecossistemas em responder aos distúrbios ambientais e permanecer como um ambiente minimamente estável. As comunidades microbianas recifais são extremamente importantes para tais ecossistemas e influenciam fortemente nos processos biogeoquímicos e ecológicos, fundamentais para sua manutenção. Assim, as atividades da microbiota associada aos corais são peças chave no processo de resiliência¹² dos ecossistemas recifais.

Para garantir a manutenção dos recifes de coral, é essencial compreender o papel das comunidades microbianas nos processos que governam esses ecossistemas. Para tanto, pesquisadores apontam os seguintes questionamentos como direcionadores de pesquisas futuras nesse intuito: “Como mudanças ambientais podem influenciar a interação coral-microbiota?”; “Há microrganismos específicos que indicam que o recife de coral está saudável?”; “Qual o papel da comunidade microbiana na homeostase do holobionte?”; “Quais mecanismos de resposta a estresses do coral e da microbiota permitem a proliferação de microrganismos patogênicos?”; “Mudanças na estrutura das comunidades microbianas podem mitigar estresses ambientais? Se sim, em que escala?”¹³.

O esclarecimento dessas e de outras questões ampliará os horizontes da comunidade científica acerca das consequências de impactos ambientais sobre os recifes de coral e poderá auxiliar na tomada de decisões visando à minimização dos efeitos oriundos desse processo em ambientes recifais e à conservação, em longo prazo, desse valioso ecossistema marinho.

12. Capacidade de um sistema reestabelecer seu equilíbrio após ter sofrido distúrbios.

13. TRACY, D.; AINSWORTH, T.D.; THURBER, R.V.; GATES, R.D. 2009. *Trends in Ecology and Evolution*, 25:233-240.



Literatura recomendada

GARREN, M.; AZAM, F. 2012. New directions in coral reef microbial ecology. *Environmental Microbiology*, 14:833-844.

KREDIET, C.J.; RITCHIE, K.B.; PAUL, V.J.; TEPLITSKI, M. 2013. Coral-associated microorganisms and their roles in promoting coral health and thwarting diseases. *Proceedings of the Royal Society B*, 280:1-9.

ROHWER, F.; YOULE, M. 2010. *Coral reefs in the microbial seas*. EUA: Plaid Press. 201p.

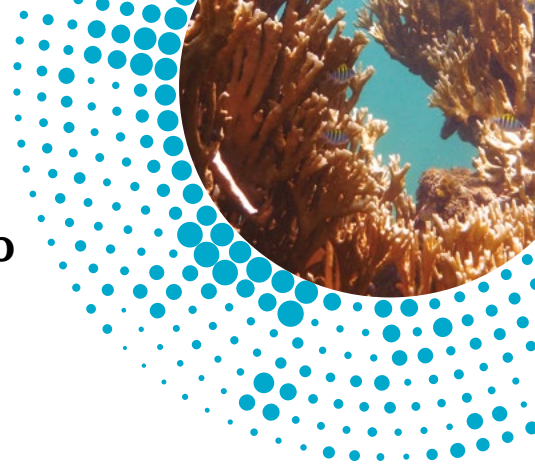
ROSEMBERG, E.; KOREN, O.; RESHEF, L.; EFRONY, R.; ZILBER-ROSENBERG, I. 2007. The role of microorganisms in coral health, disease and evolution. *Nature reviews*, 5:355-362.

THOMPSON, J.R.; RIVERA, H.E.; CLOSEK, C.J.; MEDINA, M. 2015. Microbes in the coral holobiont: partners through evolution, development, and ecological interactions. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 4:1-20.

Fisiologia de corais: a simbiose coral-zooxantela, o fenômeno de branqueamento e o processo de calcificação

Laura Fernandes de Barros Marangoni,
Joseane Aparecida Marques, Adalto Bianchini

Este capítulo aborda processos fisiológicos característicos de corais construtores de recifes de águas rasas. Dessa forma, o termo “coral” será utilizado para designar cnidários da Ordem Scleractinia, conhecidos também como corais pétreos ou verdadeiros. A relação simbiótica entre corais e microalgas (as zooxantelas) será tratada com ênfase nos processos fisiológicos envolvidos nessa associação. Também serão descritos os principais mecanismos relacionados à perturbação dessa simbiose, fenômeno denominado branqueamento de corais. A importância da calcificação realizada por corais na formação de recifes biogênicos e a fisiologia envolvida nesse processo serão descritas, assim como os possíveis impactos da acidificação dos oceanos sobre o mesmo. A fisiologia descrita neste capítulo apresenta grande relevância ecológica e, por isso, tem sido investigada pela comunidade científica e utilizada como descritor da saúde do ambiente recifal. Experimentos de caráter ecofisiológico, como aqueles que vêm sendo realizados pela Rede de Pesquisas Coral Vivo, auxiliam no prognóstico da saúde dos recifes de coral frente a um planeta em transformação. Assim, seguindo a premissa “conhecer para conservar”, este capítulo fornece uma fundamentação teórica básica sobre os processos fisiológicos de corais escleractíneos com potencial utilização visando à conservação desses organismos.



1. Para detalhes, ver PICCIANI et al. (2016) e GARRIDO et al. (2016), capítulos 5 e 6 deste volume, respectivamente.

A relação simbiótica entre corais e zooxantelas

A associação entre cnidários e dinoflagelados do gênero *Symbiodinium* (referidos como zooxantelas) possui especial relevância ecológica em regiões tropicais, onde grande parte dos recifes de coral ocorre. O estabelecimento da associação coral-zooxantela tem importância fundamental na formação desses ecossistemas, pois permite que os corais prosperem em ambientes oligotróficos, onde a oferta de alimento e nutrientes é escassa.

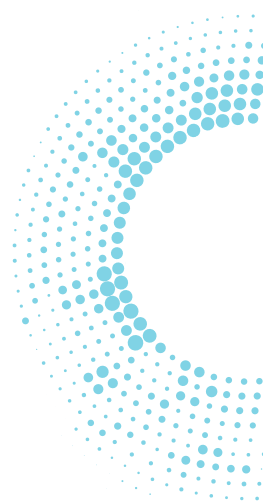
Os corais se assemelham às anêmonas-do-mar, porém, diferentemente delas, são capazes de secretar um exoesqueleto na base de seu corpo, encontrando-se assentados sobre ele. Os corais podem ser classificados como “zooxantelados”, quando estabelecem simbiose com zooxantelas, e “azooxantelados”, quando não estabelecem simbiose com zooxantelas. Por sua vez, o termo “zooxantela” não possui significado taxonômico, mas é utilizado para referir dinoflagelados endossimbiontes do gênero *Symbiodinium*, um grupo diverso de microalgas¹. Ao contrário da maioria das formas de vida livre de seu grupo, as zooxantelas residem “enclausuradas” no interior das células da endoderme de corais, em um compartimento intracelular denominado simbiossoma, entendido como a interface entre o coral hospedeiro e suas zooxantelas simbiontes (Figura 1).

Essa simbiose tem importância fundamental na nutrição de muitos corais que, apesar de serem heterotróficos, podem contar com outra fonte de nutrição advinda de seus endossimbiontes fotossintetizantes. Essa politrofia apresentada por muitos corais explica a capacidade de sobreviverem em ambientes oligotróficos. De forma geral, os produtos da fotossíntese fornecidos pelas zooxantelas dão suporte a funções vitais do coral hospedeiro. Ainda, essas microalgas auxiliam na conservação e reciclagem de nutrientes essenciais e contribuem para o aumento das taxas de calcificação do coral. Em troca, as zooxantelas beneficiam-se de uma maior proteção contra a herbivoria, uma posição estável na coluna d’água que otimiza o acesso à luz, e ainda do acesso a compostos provenientes do metabolismo do hospedeiro, essenciais para seu metabolismo fotossintético. Uma consequência importante dessa simbiose é que, devido à natureza fotossintética de seus simbiontes, as espécies de coral zooxantelados ocorrem em regiões rasas, com acesso à luz.

O estabelecimento da simbiose coral-zooxantela envolve mecanismos complexos, como o reconhecimento hospedeiro-simbionte, a incorporação do simbiote pelo hospedeiro, via fagocitose, e o estabelecimento das zooxantelas no compartimento simbioossoma. Além disso, a estabilidade e a persistência dessa simbiose exigem uma coordenação que promova o equilíbrio dinâmico entre o crescimento celular do hospedeiro e da população de endossimbiontes. Apesar da importância dos processos iniciais envolvidos no estabelecimento dessa simbiose, o foco dado no presente capítulo será apenas sobre a natureza energética e a dinâmica bidirecional de produtos metabólicos advindos dessa associação.

Processos fisiológicos associados na simbiose coral-zooxantela

A interface hospedeiro-simbionte: como previamente mencionado, o compartimento intracelular simbioossoma compõe a interface entre o coral hospedeiro e suas zooxantelas endossimbiontes (Figura 1). Sendo assim, para que seja possível a troca de metabólitos entre coral e zooxantela, esses compostos necessitam cruzar essa interface. O simbioossoma é formado por uma série de membranas derivadas do endossimbionte e outra, mais externa, derivada do hospedeiro. Evidências indicam mecanismos de controle ativo nessas membranas, tal como a presença de transportadores de solutos (ATPases) para a translocação de compostos entre o hospedeiro e endossimbiontes. Dessa forma, as “trocas” realizadas nessa simbiose não ocorrem de forma aleatória.



Fotossíntese: a fotossíntese constitui um dos aspectos chave da associação coral-zooxantela, uma vez que por meio desse processo as zooxantelas disponibilizam “combustível” ao hospedeiro para o desempenho de funções básicas essenciais para sua sobrevivência, como manutenção metabólica, crescimento, reprodução e calcificação. Basicamente, o coral utiliza os produtos da fotossíntese (oxigênio e carbono fixado fotossinteticamente) para a geração de energia e síntese de proteínas e lipídeos.

Acredita-se que o glicerol seja a principal forma pela qual o carbono fixado pelas zooxantelas seja translocado para o hospedeiro, sendo que compostos como a glicose e os aminoácidos também já foram identificados (Figura 1). A taxa de translocação de fotossintatos (carbono fixado na fotossíntese) para o coral pode variar conforme as características específicas de cada simbiose. Por exemplo, determinadas espécies de corais podem utilizar mais da heterotrofia para suprir suas necessidades metabólicas do que outras, necessitando, assim, de menores quantidades de fotossintatos. Alguns estudos indicam que até 60% do carbono fixado é fornecido ao coral, enquanto outros indicam fornecimento superior a 90%.

A aquisição de carbono inorgânico (Ci) é vital para a realização da fotossíntese e pode ser advindo (i) da respiração do coral e das zooxantelas na forma de CO_2 ; (ii) pelo processo de calcificação realizado pelo coral, em que o CO_2 é um subproduto; ou (iii) do ambiente (Figura 1). Neste último caso, o Ci é incorporado pelo coral e então fornecido às zooxantelas, uma vez que elas não possuem contato direto com a água do mar circundante. Em valores típicos de pH da água do mar ($\approx 8,2$), a maior parte do Ci encontra-se na forma de bicarbonato (HCO_3^-), o que significa que o coral tem que dispor de mecanismos específicos para captar e transportar essa forma de Ci para seus endossimbiontes. Para isso, uma enzima denominada anidrase carbônica cumpre papel fundamental ao realizar a interconversão de HCO_3^- em CO_2 , tornando possível o fornecimento de Ci do ambiente para os endossimbiontes fotossintetizantes.

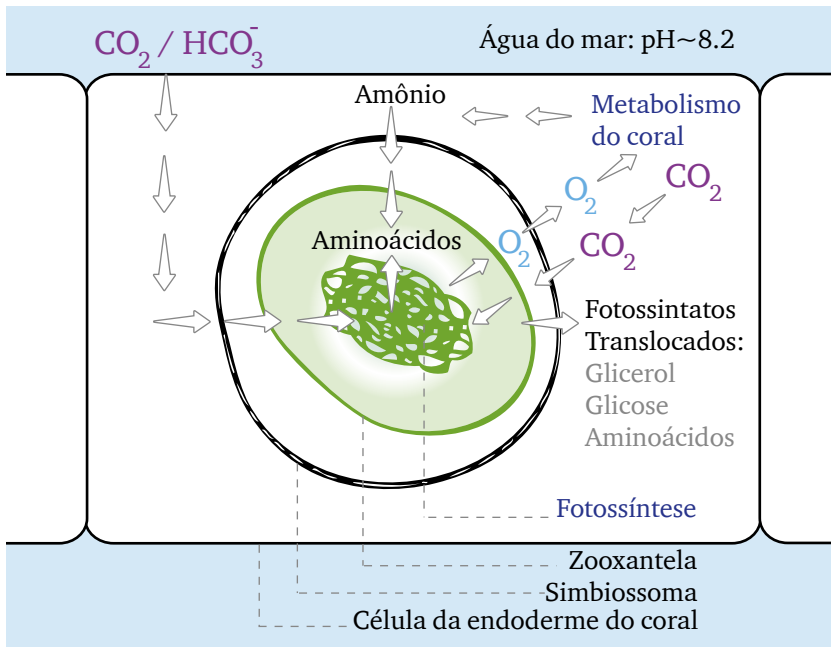


Figura 1. Ilustração das zooxantelas no interior do simbiossoma no tecido de corais e principais trocas metabólicas entre eles.

Reciclagem e conservação de nitrogênio através da interface coral-zooxantelas: dada a grande ocorrência da simbiose entre corais e dinoflagelados em águas tropicais pobres em nutrientes, uma atenção considerável tem sido dada à capacidade desses organismos, quando em associação, de conservar e reciclar o nitrogênio. Hipóteses têm sido propostas para tentar explicar como ocorre a dinâmica de compostos nitrogenados através da interface coral-zooxantelas. A reciclagem considera a hipótese da translocação bidirecional de nutrientes. Nesse caso, o nitrogênio na forma de amônio, resultante de processos catabólicos do hospedeiro (utilização de aminoácidos como substrato na respiração), é assimilado pelos endossimbiontes para que, por fim, seja translocado de volta ao hospedeiro na forma de compostos nutricionalmente importantes, como aminoácidos (Figura 1). Já a hipótese da conservação do nitrogênio considera a utilização preferencial de fotossintatos, no lugar de aminoácidos, como substrato no processo de respiração desempenhado pelo coral. De fato, esse mecanismo está em concordância com uma das formas pela qual se acredita que o coral hospedeiro controle o crescimento da população de seus endossimbiontes,

limitando o acesso deles ao nitrogênio. Nesse caso, a utilização de fotossintatos como substrato na respiração seria vantajosa, por não gerar como produto o composto nitrogenado amônio, como ocorre no caso do catabolismo de aminoácidos.

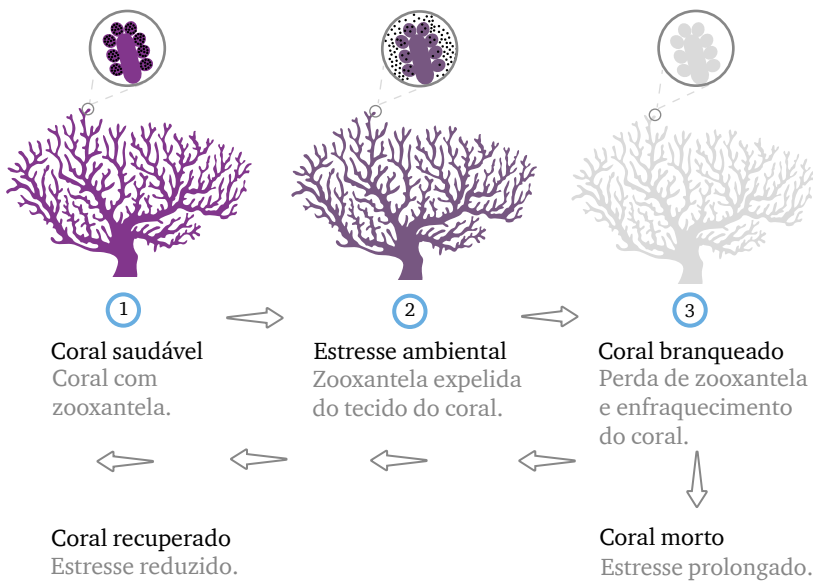
Controle do hospedeiro sobre os endossimbiontes: cresce o número de estudos que confirmam um determinado grau de controle do coral hospedeiro sobre a fisiologia de suas zooxantelas endossimbiontes. Foi demonstrado, por exemplo, que o coral é capaz de acidificar o interior do simbiossoma como forma de promover a fotossíntese de seus simbiontes, uma vez que a formação de CO_2 a partir da reação de conversão HCO_3^- a CO_2 é favorecida em pH mais ácido². Ainda, evidências indicam que o trânsito de carbono e nutrientes, como nitrogênio e fósforo, na interface entre hospedeiro-simbionte é altamente controlado. Isso permitiria ao coral controlar ativamente o crescimento populacional de simbiontes por meio da limitação de nutrientes.

O fenômeno do branqueamento

Corais saudáveis abrigam milhões de zooxantelas por centímetro quadrado de tecido, sendo a pigmentação de seus tecidos resultante da cor dos pigmentos fotossintetizantes dessas microalgas. Assim, o fenômeno de branqueamento caracteriza-se pelo declínio dessa pigmentação em decorrência da disfunção da simbiose coral-zooxantelas, que resulta na expulsão dos endossimbiontes ou na degradação dos pigmentos fotossintetizantes. Dessa forma, os corais tornam-se visivelmente branqueados quando há uma redução de 70% a 90% na pigmentação de seus tecidos, que se tornam translúcidos. Nessa condição, manifesta-se a coloração branca do esqueleto de carbonato de cálcio subjacente ao tecido, motivo pelo qual o fenômeno é denominado “branqueamento” (Figura 2).

O branqueamento de corais é um dos fenômenos ecológicos associado aos recifes de coral mais estudados da atualidade, caracterizando-se por ser uma resposta ao estresse decorrente de perturbações ambientais. Uma série de fatores, como variações de salinidade, sedimentação excessiva e poluição, entre outros, pode ocasionar esse fenômeno. No entanto, a ocorrência de branqueamento em larga escala na natureza está geralmente associada a temperaturas elevadas combinadas com alta incidência de luz.

Dependendo da duração e da intensidade do estresse, o branqueamento pode causar a mortalidade de corais (Figura 2). Porém, quando a mortalidade não ocorre, os corais que se recuperam após um evento de branqueamento, mediante a recolonização de seus tecidos por zooxantelas, apresentam declínio nas taxas de crescimento e fecundidade, e aumento da susceptibilidade a doenças. As consequências ecológicas do branqueamento não serão aprofundadas neste capítulo, porém, o aumento da mortalidade de corais e o comprometimento funcional desses organismos, devido à ocorrência desse fenômeno, podem resultar em graves consequências para o ecossistema recifal.



■ Principais causas de branqueamento

- Mudança de temperatura
- Escoamento e poluição
- Superexposição à luz solar

Figura 2. Esquema de branqueamento, recuperação e mortalidade em corais.

Fisiologia do branqueamento

Evidências sugerem que o branqueamento é uma resposta imune do coral hospedeiro frente a endossimbiontes debilitados. Nesse contexto, sabe-se que as espécies ativas de oxigênio (EAO) possuem papel central na perturbação da simbiose coral-zooxantela. A seguir, será feita uma descrição mais detalhada sobre os processos envolvidos nessa perturbação e os mecanismos que levam ao branqueamento.

A condição de estresse oxidativo: organismos aeróbicos utilizam o oxigênio para desempenhar diversos processos metabólicos. Entretanto, como resultado de sua configuração eletrônica, o oxigênio pode sofrer reduções parciais e levar à formação de espécies ativas de oxigênio (EAO). A formação dessas espécies constitui um processo contínuo e fisiológico que cumpre importantes funções biológicas, como a sinalização de processos celulares. No entanto, as EAO podem exercer tanto um papel benéfico, quando em baixas concentrações intracelulares, quanto deletério aos organismos. A produção contínua de EAO durante processos metabólicos levou ao desenvolvimento de mecanismos protetores denominados “capacidade antioxidante”, que cumpre o papel de neutralizar os compostos reativos prevenindo os efeitos adversos da EAO. No entanto, perturbações ambientais, como variação de temperatura, radiação excessiva e poluentes, entre outros, podem resultar no aumento da produção de EAO em níveis que excedem a capacidade antioxidante do organismo, levando-o à condição de estresse oxidativo. Tal condição é responsável por causar danos oxidativos às biomoléculas, como lipídios, proteínas e ácidos nucleicos, induzindo a efeitos deletérios e alterando a estrutura e/ou função dessas biomoléculas. Grande parte das EAO é produzida nas cadeias transportadoras de elétrons na mitocôndria, no retículo endoplasmático, em membranas nucleares e no sistema fotossintetizante.

O papel das EAO na perturbação da simbiose coral-zooxantela: os eventos que desencadeiam o fenômeno de branqueamento estão relacionados ao aumento na produção de EAO a níveis que excedem a capacidade antioxidante do coral e de seus simbiontes. Esse evento tem início nos cloroplastos das zooxantelas, local onde ocorre o processo de fotossíntese. Em condições normais, o aparato fotossintético, composto pelos fotossistemas I e II nos tilacóides, opera normalmente, produzindo grande quantidade de oxigênio que se difunde para os tecidos do coral hospedeiro. Nesse processo, as EAO produzidas são neutralizadas por defesas antioxidantes das zooxantelas. No entanto, em condições de estresse, danos ao aparato fotossintético podem ocorrer e gerar grandes quantidades de EAO. Na medida em que a concentração de EAO aumenta, as defesas antioxidantes dos simbiontes são excedidas, com o conseqüente acúmulo dessas espécies reativas. Em tal condição, além dos danos ao sistema fotossintético aumentarem, as EAO começam a ser difundidas para os tecidos do coral (Figura 3), onde os danos às biomoléculas procedem, conduzindo ao branqueamento. Nesse processo, apesar das zooxantelas serem a principal fonte de EAO, a geração direta de espécies ativas pelo metabolismo do coral, devido a danos às membranas mitocondriais, também contribui para o aumento da concentração de EAO (Figura 3). Apesar dos corais também contarem com um mecanismo de defesa antioxidante, este pode não ser capaz de lidar com altas concentrações de EAO em seus tecidos, o que pode resultar em danos ao DNA, proteínas e lipídios. Dessa forma, o branqueamento seria uma resposta final de defesa do coral contra o estresse oxidativo em que a fonte dominante de produção de EAO, ou seja, as zooxantelas, é erradicada. A capacidade de recuperação do coral após um evento de branqueamento depende da intensidade e da duração do estresse.

Alta temperatura
e incidência luminosa

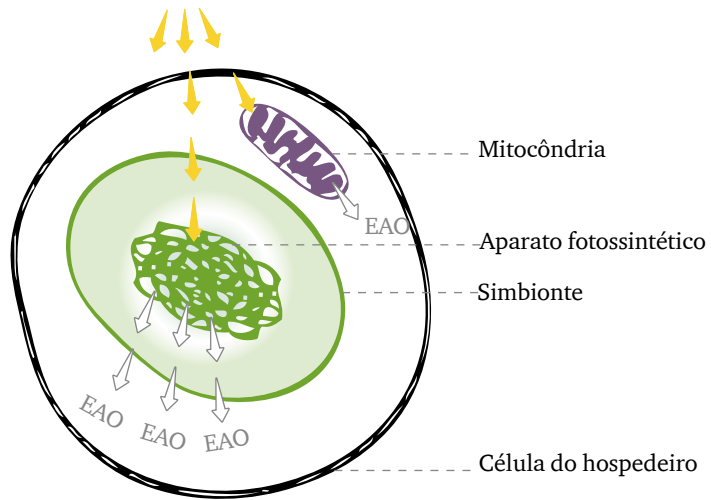


Figura3. Esquema mostrando a difusão de espécies ativas de oxigênio (EAO) das zooxantelas para o coral e os principais locais de produção de EAO no holobionte.

A formação dos recifes de coral e o processo de calcificação

Dentre os principais responsáveis pela formação e manutenção dos recifes de coral de águas rasas, merecem destaque os corais escleractíneos, responsáveis por 15% da produção global de carbonato de cálcio e, por isso, considerados um dos principais grupos de organismos calcificadores. Em sua grande maioria, os corais construtores de recife apresentam forma de vida colonial. As colônias podem chegar a ser compostas por milhares de pólipos (indivíduos geneticamente idênticos), que formam um esqueleto comum de carbonato de cálcio, com grande variedade de formas e tamanhos. Inúmeros esqueletos acrescidos ao longo de muitos milênios formam a estrutura básica dos recifes de coral. O estilo de vida colonial, combinado com processos que aceleram a produção do esqueleto, permite que a taxa de formação do esqueleto desses organismos seja maior que a capacidade de fatores físicos, químicos e biológicos de dissolvê-lo ou degradá-lo. Isso, em grande parte, torna possível a existência dos recifes de coral como são conhecidos hoje.

O processo de calcificação realizado por corais promove a segregação de seus esqueletos de carbonato de cálcio (CaCO_3), que são precipitados na forma do mineral aragonita. Para isso, corais suprem o sítio de calcificação com cálcio (Ca^{+2}) e carbono inorgânico (HCO_3^-), obtidos a partir da água ambiente, e eliminam os prótons (H^+) resultantes do processo de mineralização ($\text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}^+$). A calcificação é um processo fisiológico ativo que utiliza quantidades significativas de energia, sendo estimado que até 30% da energia metabólica dos corais seja empregada nesse processo. A seguir, serão descritos em maior detalhe os mecanismos fisiológicos que compõem o processo de calcificação. Além disso, será feita uma breve descrição da anatomia corporal dos corais, visando possibilitar uma melhor compreensão do processo de calcificação.

Uma breve descrição da anatomia dos corais: os corais têm como unidade anatômica o pólipô, que consiste de uma estrutura corporal na forma de cilindro, com uma boca central circundada por tentáculos. Por sua vez, os corais coloniais são constituídos por vários pólipos ligados por um tecido denominado cenossarco. Os tecidos que formam os pólipos e o cenossarco constituem duas camadas epiteliais denominadas epiderme e gastroderme, as quais são separadas por uma camada gelatinosa de colágeno chamada mesogleia. O tecido em contato com a água é o tecido oral, enquanto aquele adjacente ao esqueleto é denominado tecido aboral. A epiderme aboral, que está em contato com o esqueleto, é referida como ectoderme calicoblástica, ou calicoderme, e constitui uma camada única de células, denominadas células calicoblásticas (Figura 4).

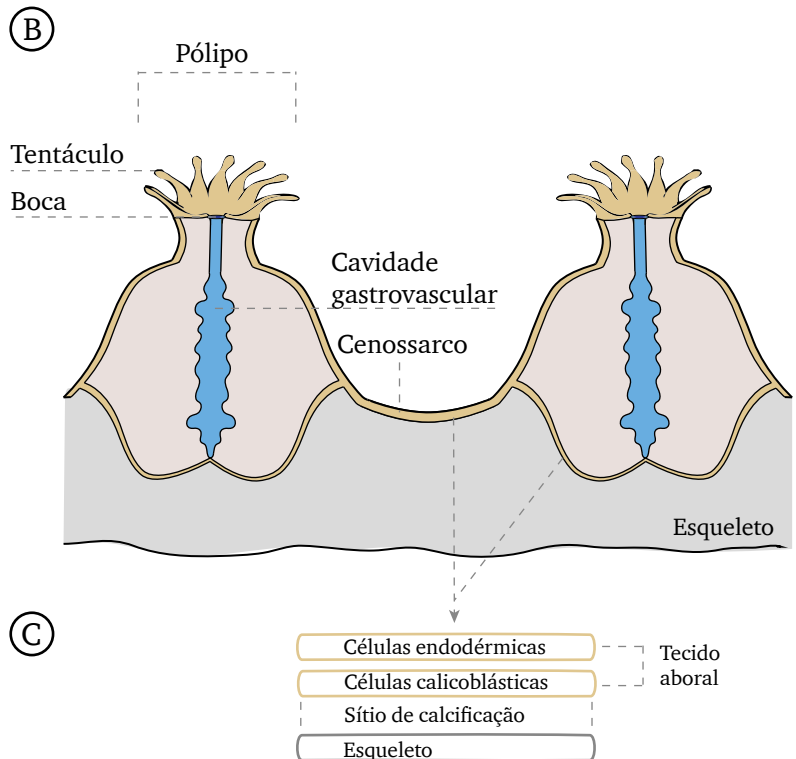
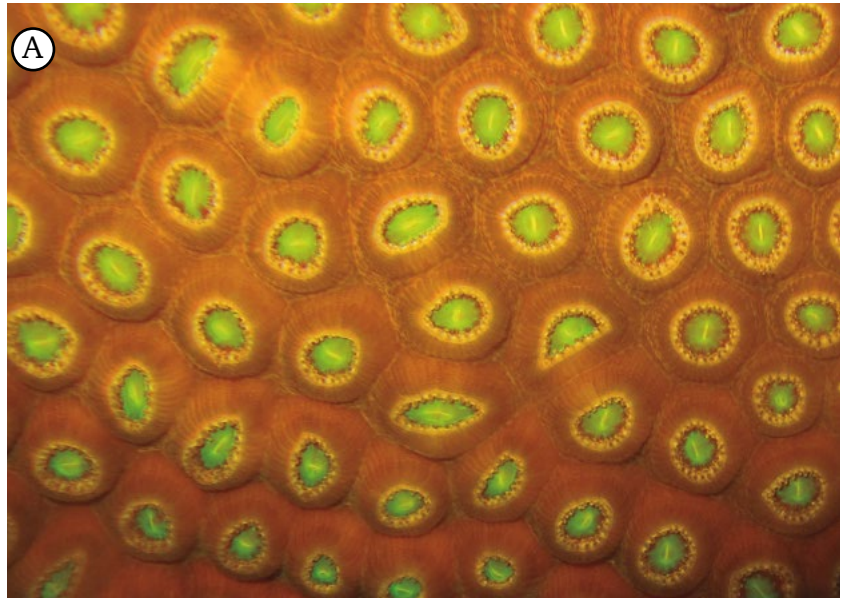


Figura 4. Anatomia básica de corais coloniais. (A) Foto mostrando pólipos conectados pelo cenossarco (foto de *Montastraea cavernosa*, créditos: Laura Marangoni); (B) representação esquemática da foto; (C) visão aproximada do tecido aboral, com destaque para o sítio de calcificação (local de deposição do esqueleto de carbonato de cálcio segregado por corais).

O sítio de calcificação: muitas terminologias têm sido utilizadas para designar a interface entre a calicoderme e o esqueleto. Neste capítulo, ela será tratada como “Meio de Calcificação Extracelular” (MCE). Nesse meio extracelular, que se acredita ser um espaço semifechado, é onde ocorre a deposição do esqueleto de CaCO_3 dos corais, sendo também conhecido como “sítio de calcificação” (Figura 4). As células calicoblásticas possuem papel central no que se refere à deposição do esqueleto, uma vez que controlam a composição iônica do MCE e regulam as taxas de calcificação. Para isso, essas células possuem transportadores iônicos, ou seja, proteínas que permitem a passagem de moléculas através da membrana celular. Além disso, secretam uma matriz orgânica que desempenha papel fundamental na nucleação e regulação da morfologia dos cristais de aragonita.

A capacidade dos corais de precipitar CaCO_3 na forma de aragonita está relacionada ao que se chama de “estado de saturação da aragonita”, representado pelo símbolo Ω_{ar} . O Ω_{ar} depende da concentração e do equilíbrio dos íons cálcio (Ca^{+2}) e carbonato (CO_3^{2-}) na água do mar, além de outros fatores físico-químicos. Ao ser transportada para o interior do sítio de calcificação, a água do mar circundante tem seu pH e concentração de Ca^{2+} e CO_3^{2-} controlados pelo coral nesse compartimento, que são muito diferentes em relação à água do mar ambiente. A eficiência do processo de calcificação é garantida pela elevação do pH no sítio de calcificação, o que promove um aumento de até 7 vezes do Ω_{ar} em relação à água do mar circundante.

Fornecimento de íons e controle do pH: os canais de cálcio e a enzima Ca^{2+} -ATPase presentes na calicoderme contribuem para o abastecimento do sítio de calcificação com Ca^{2+} . Enquanto os canais de cálcio permitem a entrada difusiva Ca^{2+} nas células, a enzima Ca^{2+} -ATPase transporta ativamente um íon de Ca^{2+} ao mesmo tempo em que remove dois prótons (H^+) desse sítio (Figura 5). Dessa forma, a atividade dessa enzima tem papel fundamental não somente no fornecimento de Ca^{2+} , mas também na manutenção de um pH mais alcalino, que garante a eficiência do processo de calcificação. Por outro lado, a enzima anidrase carbônica constitui outro elemento essencial no fornecimento dos íons necessários ao processo de calcificação. Ela promove a reação de hidratação reversível do CO_2 , proveniente do metabolismo do coral ou do ambiente, em bicarbonato ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$), sendo essencial aos corais na aquisição do carbono inorgânico (HCO_3^-) utilizado no processo de calcificação (Figura 5).

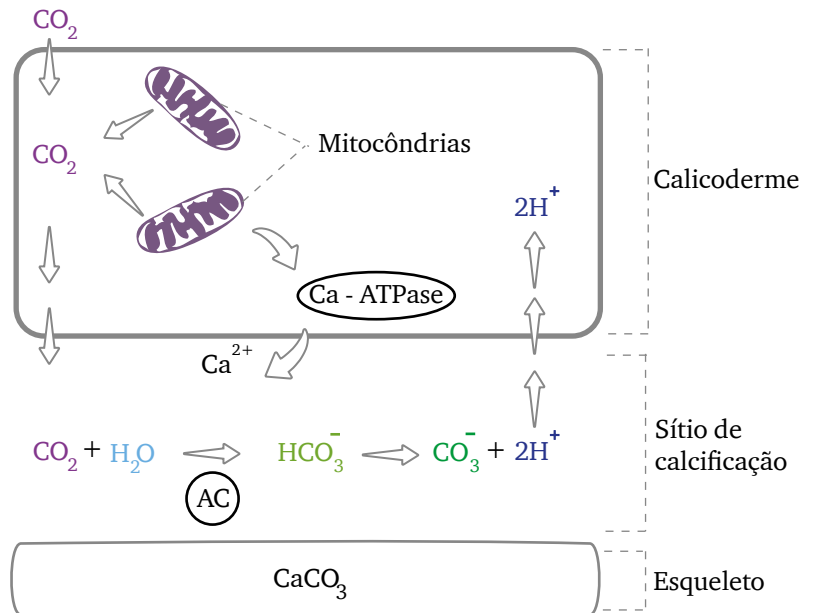


Figura 5. Esquema mostrando o funcionamento das enzimas no interior do sítio de calcificação.

Importância das zooxantelas no processo de calcificação

Corais escleractíneos zooxantelados apresentam taxas de calcificação mais elevadas na presença de luz. Acredita-se que interações entre os processos de fotossíntese e calcificação sejam a razão para maiores taxas de deposição de CaCO_3 na presença de luz. As possíveis interações entre esses processos, que seriam benéficas ao processo de deposição do exoesqueleto de corais, são: (i) a assimilação de CO_2 pela fotossíntese levaria a uma modificação do equilíbrio de espécies de carbono inorgânico dissolvido no interior dos tecidos do coral que, de forma indireta, favoreceria o processo de calcificação; nesse caso, a diminuição da pressão parcial de CO_2 no sítio de calcificação favoreceria a manutenção de um pH₂ mais alcalino, otimizando, assim, a precipitação de carbonato de cálcio pelo aumento do Ω_{ar} ; (ii) a neutralização de prótons (H^+) produzidos na precipitação de CaCO_3 por íons hidroxila (OH^-), resultantes do processo de fotossíntese, promoveria a manutenção de um pH mais alcalino, favorável ao processo de calcificação; (iii) a incorporação de compostos inibitórios ao processo de calcificação, como fosfatos, pelas zooxantelas; (iv) a produção de moléculas orgânicas pelas zooxantelas auxiliariam na síntese da matriz orgânica; nesse caso, as zooxantelas forneceriam precursores orgânicos, uma vez que a síntese da matriz orgânica é feita, exclusivamente, pelas células calicoblásticas; e (v) o incremento energético fornecido pelas zooxantelas (oxigênio e fotossintatos) seria fundamental para os processos que requerem energia (transporte de íons e síntese da matriz orgânica); nesse caso, a fosforilação oxidativa de fotossintatos seria o principal processo envolvido na disponibilização de ATP.

A acidificação dos oceanos e o processo de calcificação

O problema ambiental chamado “acidificação dos oceanos” decorre do excesso de CO_2 absorvido pelos oceanos devido às crescentes emissões desse gás na atmosfera. Em linhas gerais, o processo de acidificação acontece quando o excesso de CO_2 sequestrado reage com a água do mar tornando-a mais ácida. No entanto, para entender realmente o que é o processo de acidificação oceânica e seu impacto sobre a fisiologia de organismos calcificadores, é importante entender como o CO_2 se comporta nos oceanos.

O CO_2 absorvido pela superfície do oceano reage com uma molécula de água (H_2O) e forma um ácido fraco, denominado ácido carbônico (H_2CO_3). Grande parte desse ácido se dissocia, liberando prótons (H^+), bicarbonato (HCO_3^-) e carbonato (CO_3^{2-}). Dessa forma, quanto maior a quantidade de CO_2 incorporado pelos oceanos, maior é a concentração de prótons (H^+), o que aumenta a acidez das águas (Figura 7). A superfície marinha é ligeiramente alcalina ($\text{pH} = 8,0 \pm 0,3$), sendo importante ressaltar que o termo acidificação não se refere ao processo pelo qual o oceano se tornará ácido ($\text{pH} < 7$), mas sim ao processo de redução do pH.

As espécies de carbono inorgânico mencionadas (CO_3^{2-} e HCO_3^-) fazem parte de um sistema tampão natural importante no controle do pH da água do mar, sendo que o aumento induzido de CO_2 na água modifica o equilíbrio e a abundância relativa dessas espécies. O carbonato (CO_3^{2-}) é essencial aos organismos calcificadores na produção de seus esqueletos e de conchas de carbonato de cálcio (CaCO_3). Essas estruturas de CaCO_3 são encontradas principalmente nas formas minerais calcita e aragonita, sendo que a capacidade dos organismos de construí-las está relacionada ao estado de saturação da calcita ou da aragonita, respectivamente. O estado de saturação depende, em grande parte, da concentração de CO_3^{2-} na água. Em níveis típicos de pH da água do mar, íons CO_3^{2-} se encontram em nível suficiente para que as estruturas calcárias sejam facilmente secretadas pelos organismos marinhos calcificadores. Porém, pequenas mudanças de pH decorrentes do aumento induzido de CO_2 na água tornam os elementos que compõem os esqueletos calcários mais solúveis e promovem a reação entre H^+ e CO_3^{2-} , com consequente formação de HCO_3^- . Uma vez que a concentração de CO_3^{2-} é reduzida, ocorre também a diminuição do estado de saturação da calcita e da aragonita, com consequente redução nas taxas de calcificação.

Como mencionado, um investimento energético aumenta o pH no sítio de calcificação dos corais e, conseqüentemente, o estado de saturação da aragonita. Porém, em águas mais ácidas, que apresentam menor estado de saturação, esses organismos necessitam investir ainda mais energia para aumentar o pH no sítio de calcificação e alcançar, assim, um nível de saturação da aragonita suficientemente elevado para que a formação do esqueleto calcário ocorra em taxas mais elevadas que sua dissolução. Em tal contexto, a questão central para a qual ainda não se tem uma resposta definitiva é a seguinte: até que ponto os corais têm a capacidade de compensar energeticamente os efeitos da acidificação dos oceanos sobre o processo de calcificação?

É importante perceber que a dissolução das estruturas de CaCO_3 em condições de pH mais ácido está relacionada ao sistema tampão da água do mar, no qual o CO_3^{2-} tem grande importância. A dissolução dessas estruturas acaba por disponibilizar CO_3^{2-} na água do mar, sendo elas responsáveis pela manutenção natural do pH oceânico dentro de uma faixa estreita de variação. A dissolução dessas estruturas também depende da estrutura química em que o CaCO_3 é precipitado. A forma mineral aragonita é $\approx 50\%$ mais solúvel que a calcita pura. Sendo assim, organismos como os corais, que secretam seus esqueletos na forma de aragonita, são mais vulneráveis aos efeitos da acidificação marinha.

Estima-se que a diminuição em torno de 0,1 unidade na média do pH do oceano desde a era pré-industrial já tenha ocasionado uma redução de 20% nas taxas em que os corais formadores de recife produzem seus esqueletos. Além disso, projeções feitas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) sugerem uma diminuição em mais 0,3 unidade de pH até o fim deste século, o que poderia ocasionar um declínio de aproximadamente 50% nas taxas de calcificação de corais. Nesse contexto, o processo de acidificação pode ocasionar o aumento das taxas de erosão da estrutura física dos recifes de coral, o que pode resultar no declínio desse ecossistema, com sérias conseqüências para todos aqueles que dele dependem.

Literatura recomendada

TAMBUITÉ, S.; HOLCOMB, M.; FERRIER-PAGÈS, C.; REYNAUD, S.; TMABUITÉ, E.; ZOCCOLA, D.; ALLEMAND, D. 2011. Coral biomineralization: From the gene to the environment. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 408:58-78.

WEIS, V.M. 2008. Cellular mechanisms of Cnidarian bleaching: stress causes the collapse of symbiosis. *The Journal of Experimental Biology*, 211:3059-3066.

DAVY, S.K.; ALLEMAND, D.; WEIS, V.M. 2012. Cell biology of Cnidarian-Dinoflagellate Symbiosis. *Microbiology and Molecular Biology*, 76(2):229-261.

COHEN, A.L.; HOLCOMB, M. 2009. Why corals care about ocean acidification: Uncovering the mechanism. *Oceanography*, 22(4):118-127.

Do Equador aos trópicos: as zooxantelas na dimensão do espaço

Natasha Picciani, Amana Guedes Garrido,
Clovis Barreira e Castro, Carla Zilberberg

As zooxantelas no ecossistema marinho

A relação simbiótica entre cnidários e zooxantelas e sua importância

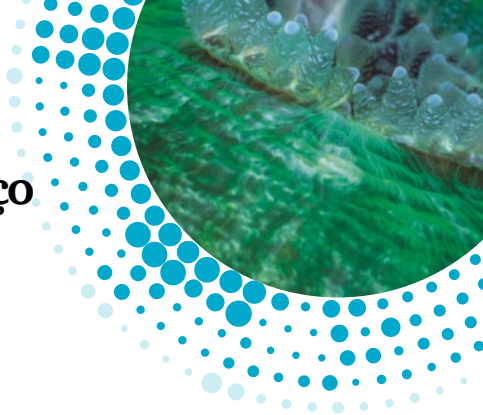
Sobreviver no oceano é um desafio constante para os organismos marinhos. Assim como outros animais marinhos, alguns cnidários (corais, águas-vivas e anêmonas-do-mar) estabelecem uma relação mutualística (de mútuo benefício) com algas unicelulares que realizam fotossíntese e são comumente chamadas de simbionte. Essas algas microscópicas são conhecidas como **zooxantelas**. Vivem no tecido dos corais, organismos que as “hospedam”, recebendo proteção física e nutrientes. Em troca, fornecem compostos orgânicos resultantes da fotossíntese para seus hospedeiros, auxiliando em suas necessidades energéticas¹.

Essa relação mutualística entre corais e zooxantelas é essencial para a construção de recifes em águas oligotróficas, ou seja, pobres em nutrientes. As zooxantelas transferem boa parte do carbono orgânico fixado através da fotossíntese para seus corais hospedeiros. Com essa carga extra de energia, os corais podem intensificar suas taxas de calcificação e produzir maiores quantidades de esqueleto calcário, que constitui a estrutura dos recifes de coral, juntamente com os esqueletos de outros organismos, como as algas calcárias. Essa associação entre os corais hospedeiros e suas zooxantelas simbiotes é bem sensível, a ponto de poder ser desestabilizada com um pequeno aumento de temperatura da água do mar².

Há algumas décadas, diversos indícios fisiológicos sugeriam que a única espécie de zooxantela reconhecida na época, *Symbiodinium microadriaticum*, poderia compreender grupos bem distintos. A partir de diferenças em seu DNA, a diversidade de zooxantelas passou a ser compreendida por nove grandes grupos evolutivos: os grupos A a I (chamados muitas vezes de clados), cada qual com diversos subgrupos (ou subclados).

1. Ver MARANGONI et al. (2016), capítulo 4 deste volume.

2. Ver MARANGONI et al. (2016) e GARRIDO et al. (2016), capítulos 4 e 6 deste volume, respectivamente.



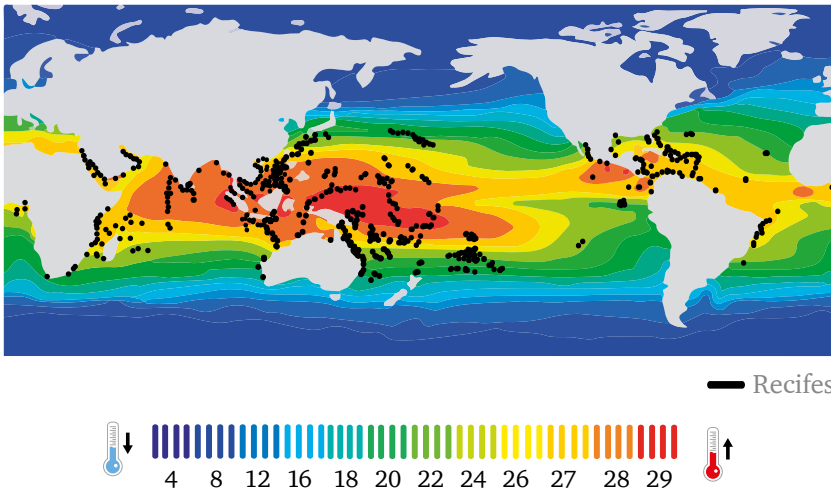
Os corais formadores de recifes se associam, em especial, aos grupos A, B, C e D, ainda que, menos frequentemente, também possam abrigar zooxantelas dos grupos F e G. Outros grupos de zooxantelas são encontrados em anêmonas, esponjas, foraminíferos e moluscos, podendo ser bastante específicos quanto ao hospedeiro, ou seja, associar-se exclusivamente a um único grupo de hospedeiros.

As zooxantelas podem ser transmitidas de geração em geração de corais hospedeiros de duas maneiras: **horizontalmente**, quando são adquiridas do ambiente a cada nova geração; e **verticalmente**, quando são transmitidas para a próxima geração pelos pais, que passam suas zooxantelas para o gameta ou para a larva. Os modos de transmissão de zooxantelas podem influenciar bastante a relação hospedeiro-simbionte. Algumas vezes, os corais hospedeiros que transmitem seus simbiontes verticalmente estabelecem uma relação bastante específica. Isso significa que eles mantêm uma associação exclusiva com um único grupo de zooxantela.

Do Equador aos trópicos: zooxantelas ao longo das latitudes

A temperatura da água do mar ao longo das latitudes

A temperatura média superficial da água do mar varia consideravelmente de acordo com intervalos latitudinais, indo de -1°C , próximo aos polos, até 28°C , na região equatorial (Figura 1). Ao contrário das regiões oceânicas em baixas latitudes (próximas ao Equador), aquelas em latitudes médias (ao redor dos trópicos de Câncer e de Capricórnio) apresentam uma forte variação sazonal, ou seja, as variações de temperatura ao longo do ano são bem marcantes. Já em altas latitudes (nas regiões próximas aos polos), a temperatura é constantemente fria, chegando algumas vezes a valores negativos.



3. COOPER, T.F.; BERKELMANS, R.; ULSTRUP K.E.; WEEKS, S.; RADFORD, B.; JONES, A.M.; DOYLE, J.; CANTO, M.; O'LEARY, R.A.; VAN OPPEN, M.J.H. 2011. *PLoS One*, 6:e25536

4 TONK, L.; SAMPAYO, E.M.; WEEKS, S.; MAGNO-CANTO, M.; HOEGH-GULDBERG, O. 2013. *PLoS One*, 8:e68533.

Figura 1. Distribuição mundial dos recifes de coral de águas rasas e sua relação com as temperaturas médias anuais das águas superficiais do oceano.

Por que as variações ambientais podem afetar a distribuição das zooxantelas?

Certas vezes, a fisiologia dos grupos de zooxantelas influencia as condições ambientais que cada conjunto coral-zooxantela pode suportar. Embora dentro de cada grupo existam variações fisiológicas, alguns são comumente encontrados em ambientes de alta luminosidade (grupo A), baixas temperaturas (grupo B), sendo outros mais resistentes a estresses ambientais, como turbidez e altas temperaturas (grupo D). Algumas evidências indicam, por exemplo, que zooxantelas do grupo B podem suportar ambientes mais frios ou onde as variações de temperatura são mais amplas porque são capazes de recuperar rapidamente o funcionamento de seu aparato fotossintético. Da mesma forma, é possível que o grupo A possua um bom desempenho em ambientes bem iluminados, por sua habilidade de produzir compostos de proteção UV – um filtro solar natural. Dessa forma, os locais onde os grupos de zooxantelas se encontram podem ser determinados por diversos fatores que interagem entre si, como especificidade a um hospedeiro, luminosidade, turbidez e temperatura. Hoje em dia, sabe-se que cada fator pode afetar a combinação hospedeiro-simbionte de maneira diferente, dependendo da espécie de coral envolvida na associação^{3, 4}.

A temperatura, os simbioss e os corais

A temperatura superficial da água do mar é, certamente, um dos parâmetros mais importantes para a relação coral-zooxantela, assim como outras variáveis ambientais. Em alguns estudos de caso, as variações de temperatura se mostraram correlacionadas a variações na diversidade de zooxantelas associadas aos corais formadores de recifes. Por exemplo, pesquisadores australianos mostraram que o coral *Plesiastrea versipora* abriga diferentes grupos de zooxantelas ao longo de um gradiente latitudinal na costa da Austrália⁵. Eles descobriram que os simbioss associados às colônias mudavam daqueles do grupo C para os do grupo B com o aumento da latitude e consequente diminuição da temperatura. No caso do coral *Turbinaria reniformis*, uma mudança do grupo C para o grupo D também pôde ser associada a um aumento na temperatura média superficial da água do mar ao longo da Grande Barreira de Corais, na Austrália⁵. Atualmente, sabe-se que outros fatores, como conteúdo do sedimento, turbidez e profundidade, também explicam as variações geográficas na diversidade de zooxantelas.

Os corais e suas zooxantelas no Brasil

Antigos habitantes, novas descobertas

Os únicos recifes de coral de águas rasas do Atlântico Sul são encontrados ao longo da costa brasileira, sendo caracterizados por uma fauna coralínea bem antiga. Embora esses recifes sejam encontrados apenas no litoral do Nordeste, comunidades coralíneas (isto é, comunidades ecológicas em que há espécies de coral, mas sem a formação da estrutura recifal) se estendem do Maranhão a Santa Catarina, cobrindo uma larga extensão de litoral. Inúmeras espécies marinhas são capazes de viver em uma enorme variedade de ambientes com características oceanográficas muito distintas.

Como mencionado anteriormente, a distribuição das zooxantelas pode estar relacionada a uma série de fatores ambientais, como temperatura e luminosidade. Ao longo do litoral brasileiro, os **corais zooxantelados** (que possuem zooxantelas) sobrevivem em águas túrbidas a límpidas, quentes

a moderadamente frias, com variações térmicas altas ou baixas, além de estarem em meio a diversas comunidades ecológicas. Mas, então, como os grupos de zooxantelas associadas a esses hospedeiros variam ao longo de tais ambientes?

A fim de discutir essa questão, importantes grupos de cnidários da fauna recifal serão aqui representados por duas espécies comumente encontradas no Brasil: o coral-cérebro *Mussismilia hispida*, um coral verdadeiro e formador de recifes pertencente à classe Anthozoa, e o coral-de-fogo, *Millepora alcicornis*, um hidrocoral pertencente à classe Hydrozoa (Figura 2).

O coral-cérebro é um dos corais mais importantes para a construção dos recifes brasileiros e pode ser encontrado apenas na costa brasileira, desde o estado do Maranhão até São Paulo. O coral-de-fogo também tem importante papel na manutenção dos recifes e ocorre no Caribe e no Brasil, desde a costa do Maranhão até o Rio de Janeiro. Por serem corais zooxantelados cuja distribuição geográfica abrange as variadas condições anteriormente mencionadas, essas duas espécies oferecem um enorme potencial para a investigação de questões relacionadas à simbiose coral-zooxantela.

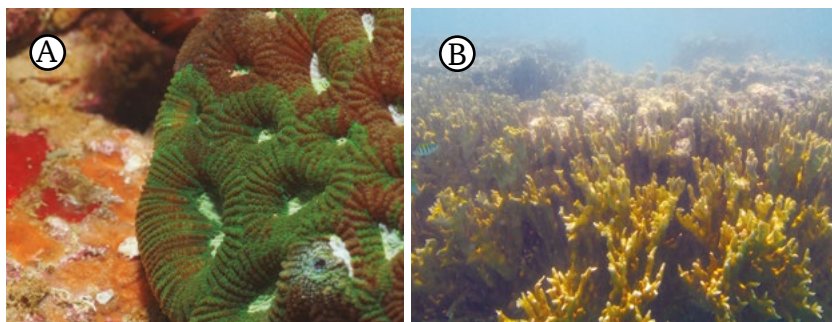


Figura 2. Os corais zooxantelados (A) *Mussismilia hispida* e (B) *Millepora alcicornis*, duas espécies fundamentais dos recifes brasileiros. Créditos: Clovis Castro/Projeto Coral Vivo.

Do Nordeste a São Paulo: revelações ao longo da costa

Utilizando o coral-cérebro e o coral-de-fogo como modelos, o grupo de pesquisa do presente trabalho, como membro da Rede de Pesquisas Coral Vivo, examinou a extensão da variação nos grupos de simbiontes desses corais ao longo de quase toda a distribuição das espécies. Por meio

de técnicas de biologia molecular, foram identificados os simbiontes associados a esses corais em várias localidades ao longo da costa, desde o Maranhão até São Paulo, e em diversas profundidades. Além dessas, foram examinadas colônias de arquipélagos e ilhas oceânicas, onde os ambientes são menos impactados por atividades antropogênicas. O coral-cérebro e o coral-de-fogo se associam a, pelo menos, três grandes grupos de zooxantelas comumente encontrados no Oceano Atlântico: A, B e C, que podem ocorrer ao mesmo tempo em uma só colônia. O grupo D também se associa ao coral-de-fogo depois de choques de estresse.

As comparações **latitudinais** entre as três espécies mostraram diferenças marcantes entre elas. Por exemplo, o coral-de-fogo se associa sempre a, pelo menos, dois ou três grupos de zooxantelas ao longo da costa, enquanto o coral-cérebro se associa, na maioria das vezes, a apenas um grupo, dependendo da latitude. No Nordeste, o coral-cérebro se associa principalmente a zooxantelas do grupo A, enquanto o coral-de-fogo se associa ao grupo B. Em locais com alta turbidez, por exemplo, o coral-cérebro abriga apenas um grupo de simbiontes, o grupo C, ao passo que o coral-de-fogo se encontra em associação com uma enorme mistura de grupos. Já em áreas com grande variação anual de temperatura, como o Sudeste, uma maior diversidade de grupos em mistura foi encontrada em associação com o coral-cérebro e o coral-de-fogo.

O conhecimento sobre os fatores que influenciam a distribuição dos corais ao longo da costa, entretanto, é bastante escasso. Ainda assim, pode-se notar algumas relações interessantes. As zooxantelas do grupo A foram encontradas em corais-cérebro de águas rasas, em locais com alta descarga de rios e possível elevada turbidez, e também em águas mais profundas (abaixo de 18m) e com alta visibilidade, como nas ilhas oceânicas, que são afastadas da costa. Portanto, o grupo A aparenta ser capaz de tolerar ambas as situações – alta turbidez e elevada luminosidade. Por ter sido o único grupo encontrado em ambos os extremos da distribuição do coral-cérebro, pode-se também acreditar que esse seja um grupo com muita tolerância a flutuações de temperatura.

Já em lugares com grandes variações nas taxas de sedimentação (variando de 9 a 104mg.cm⁻².dia⁻¹) foram encontradas todas as colônias do coral-cérebro abrigando apenas zooxantelas do grupo C, que tem a maior diversidade evolutiva e ecológica dentro do gênero *Symbiodinium*, sendo capaz de explorar diversos tipos de ambientes. O grande número de subgrupos dentro desse grupo e a alta variabilidade nas taxas de sedimentação tornam provável a ideia de que existam vários subgrupos associados ao coral-cérebro nesses lugares, cada qual adaptado fisiologicamente às condições de sedimentação locais.

No Sudeste brasileiro, foram encontrados corais crescendo nas temperaturas oceânicas mais baixas, inclusive em meio a áreas de ressurgência de águas profundas, onde a temperatura da água do mar pode ocasionalmente cair a 18°C em locais onde os corais ocorrem. Nessa região, as colônias de coral-cérebro abrigam não somente o grupo A, como também o grupo B, certas vezes em uma mesma amostra. Como mencionado anteriormente, as zooxantelas do grupo B são conhecidas por suportarem águas frias e grandes variações de temperatura, sendo comumente encontradas em zonas temperadas.

Entender os motivos pelos quais os grupos A, B e C de zooxantelas são encontrados em diferentes regiões na costa não é, entretanto, tão simples assim. Conforme explicado, fatores ambientais podem afetar as associações de maneiras diversas, dependendo do coral hospedeiro. Assim, embora essas observações sejam adequadas para o coral-cérebro, não se pode falar o mesmo para o coral-de-fogo, pois este último apresenta um padrão de associação completamente diferente. O coral-de-fogo abriga zooxantelas do grupo B em todos os locais, sendo que em alguns possui também outros grupos de zooxantelas. Até mesmo nas ilhas oceânicas, onde as águas são consistentemente mais transparentes e iluminadas, os grupos de zooxantelas associados ao coral-cérebro e ao coral-de-fogo foram diferentes, com o primeiro abrigando o grupo A, e o segundo, o grupo B. Isso mostra claramente que embora diversos fatores ambientais possam influenciar a distribuição das zooxantelas, é necessário buscá-los dentro do contexto de cada coral hospedeiro. Cada espécie de coral possui em seus tecidos um ambiente único para seus simbiontes, que pode vir a ser mais apropriado para um certo

grupo de zooxantelas. Além disso, diferentes processos, ainda não muito bem compreendidos, podem estar governando as associações com zooxantelas nos corais, sendo necessários mais estudos para esclarecê-los.

O que interfere?

Algumas hipóteses podem ser apresentadas para explicar a distribuição dos grupos de zooxantelas encontrados associadas ao coral-cérebro e ao coral-de-fogo. Uma delas seria que uma **disponibilidade local** de simbiontes bem limitada poderia estar definindo os grupos de zooxantelas acessíveis aos corais, assim determinando qual zooxantela se estabeleceria na relação simbiótica. Muito provavelmente, esses corais obtêm seus simbiontes do ambiente em seu entorno, capturando zooxantelas livres na água do mar.

Contudo, sabe-se que outras espécies de corais também presentes em algumas das localidades estudadas abrigam grupos de zooxantelas diferentes daqueles reconhecidos nos corais estudados, além deles mesmos diferirem entre si. Por exemplo, os corais-morango, corais-pedra-fêmea ou corais-estrelinha (espécies do gênero *Siderastrea*) abrigam zooxantelas dos grupos B e C, em João Pessoa (PB, Brasil)⁶, enquanto os corais-cérebro abrigam o grupo A, e os corais-de-fogo, o grupo B. Assim, a hipótese de limitação de disponibilidade de zooxantelas se torna pouco provável.

Outra possibilidade seria que um grau de **especificidade** aos grupos de zooxantelas pudesse existir entre diferentes populações de corais da mesma espécie. No caso do coral-cérebro, por exemplo, imaginava-se que corais da população do Nordeste até o Norte da Bahia pudessem se associar somente com o grupo A, enquanto os das demais regiões da Bahia e do Sudeste, com os grupos C, e A e B, respectivamente. No entanto, as populações de coral-cérebro dessas três regiões apresentam extensa troca de material genético, assim como o coral-de-fogo, o que diminui as chances de que exista especificidade a certos grupos de zooxantelas em nível de população em ambos os casos⁷. Mais estudos, entretanto, são ainda necessários para que se avalie melhor o quão específica pode ser essa relação hospedeiro-simbionte.

Muitos corais, quando estão sob estresses ambientais, principalmente ao enfrentar anomalias térmicas, são capazes de modificar a composição de seus simbiontes e passar a abrigar zooxantelas mais tolerantes a distúrbios. Como essa “flexibilidade” na associação é pouco conhecida nos corais brasileiros, é possível também que exista uma variação temporal na diversidade de simbiontes – ou seja, que os grupos de zooxantelas de uma colônia possam mudar de tempos em tempos de acordo com as condições ambientais prevalentes no momento – não reconhecida até agora. O coral-de-fogo, por sua vez, parece ser capaz de abrigar grupos que podem aumentar em dominância dependendo da situação do ambiente e, portanto, também ser sujeito a variações temporais que ainda não puderam ser caracterizadas.

Conclusões

Os corais formadores de recifes abrigam zooxantelas que os ajudam a construir a estrutura calcária dos recifes de coral. Os grupos de zooxantelas podem ser bem diferentes quanto a suas características fisiológicas, sendo capazes de explorar ambientes bastante variados desde o Equador até os trópicos. Muitos fatores ambientais que interagem entre si de maneira complexa controlam a distribuição geográfica das zooxantelas, e a contribuição de cada fator pode variar dependendo da identidade do hospedeiro.

O conhecimento sobre as zooxantelas dos corais brasileiros ainda é bastante escasso, embora seja essencial para projeções sobre a saúde dos recifes brasileiros. Outros estudos – incluindo outras espécies de corais encontradas no Brasil – que buscam entender melhor como fatores ambientais e biológicos podem estar influenciando as relações simbióticas entre corais e zooxantelas estão em andamento com o apoio da Rede de Pesquisas Coral Vivo. Compreender quais são os grupos de zooxantelas presentes e quais são os fatores que levam à ocorrência de certos grupos de zooxantelas em regiões específicas é fundamental para um melhor entendimento da natureza das relações simbióticas dos corais recifais brasileiros.

Literatura recomendada

GARRIDO, A. 2015. *Diversidade genética de zooxantelas no hidrocoral Millepora alcicornis (Linnaeus, 1758) (Cnidaria, Hydrozoa) no Brasil e suas respostas a anomalias térmicas*. 112p. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas - Zoologia.) - Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PICCIANI, N. 2013. *Diversidade molecular de zooxantelas associadas a corais do gênero Mussismilia (Cnidaria, Scleractinia) no Brasil*. 71p. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas - Zoologia) - Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

STAMBLER, N. 2011. Zooxanthellae: the yellow symbionts inside animals. p.87-106 in DUBINSKY, Z.; STAMBLER, N. (Eds) *Coral reefs: an ecosystem in transition*. New York: Springer.

Simbiose coral-zooxantela em um mundo em transformação

Amana Guedes Garrido, Natasha Picciani, Carla Zilberberg

Introdução

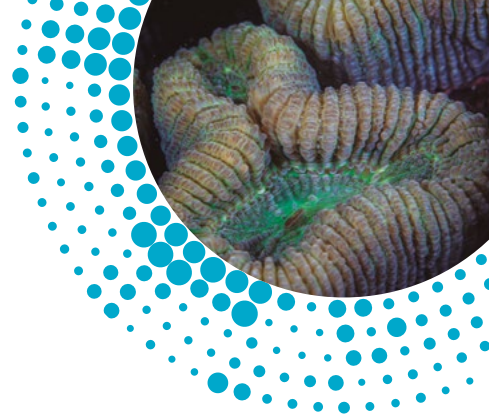
O mundo em que vivemos tem sofrido constantes mudanças ao longo de sua história. O clima na Terra já passou por uma série de ciclos caracterizados pela alternância entre eras glaciais e interglaciais, e os períodos de drásticas mudanças climáticas nas passagens de uma era para outra são marcados por eventos de extinções em massa de espécies animais e vegetais. Esses eventos ocorrem de forma natural e são comuns ao longo da história do planeta. Entretanto, as atividades humanas têm acelerado as alterações no clima, principalmente devido à queima de combustíveis fósseis, ao desmatamento e ao esgotamento das funções ambientais de diversos ecossistemas. Dessa forma, diversas espécies e ecossistemas inteiros estão em risco de extinção, devido às rápidas e acentuadas mudanças nas condições ambientais previstas para o próximo século. Um dos ecossistemas que podem ser diretamente impactados pelas mudanças climáticas são os recifes de coral.

Como foi discutido nos capítulos anteriores^{1,2,3}, os corais formadores de recifes de águas rasas abrigam dentro de si pequenas algas do grupo dos dinoflagelados, conhecidas como zooxantelas, em uma relação simbiótica em que todos os organismos são beneficiados. As zooxantelas (symbiontes) transferem para o coral (hospedeiro) grande parte da energia necessária para sua nutrição e crescimento, enquanto o coral protege as zooxantelas em seu corpo e fornece os nutrientes necessários para que elas façam fotossíntese, da mesma forma como fazem as plantas terrestres. Essa relação é bastante vantajosa, pois acelera as taxas de calcificação dos corais, favorecendo a formação dos recifes coralíneos, que abrigam uma grande variedade de outros organismos marinhos.

1. Ver MACHADO et al. (2016), capítulo 3 deste volume.

2. Ver MARANGONI et al. (2016), capítulo 4 deste volume.

3. Ver PICCIANI et al. (2016), capítulo 5 deste volume.



Mas como os corais são afetados pelas alterações nas condições do ambiente em que eles vivem? Atualmente, existe uma grande preocupação com os efeitos das mudanças climáticas globais e de impactos locais sobre os organismos marinhos. Dentre esses efeitos, estão previstos o aumento da temperatura e a acidificação da água do mar, além de impactos locais, como a poluição, a sobrepesca e o assoreamento de áreas costeiras. Os corais são extremamente susceptíveis às alterações no ambiente marinho. Para se ter uma ideia, pequenas mudanças – como a elevação de apenas 1°C na temperatura da água do mar – já acarretam a quebra dessa simbiose entre corais e zooxantelas, podendo afetar negativamente recifes inteiros.

O que acontece quando a simbiose é desfeita?

Quando a relação entre corais e zooxantelas se desfaz, o coral expulsa as zooxantelas de seu tecido. Como parte da cor do coral é dada pelas zooxantelas, com a expulsão delas, o tecido do coral fica transparente, mostrando a cor branca de seu esqueleto. Devido à nova coloração branca do coral, o processo é conhecido como **branqueamento** (Figura 1) e pode ser causado pelo aumento da temperatura da água e/ou da luminosidade, mas também, em menor frequência, por doenças^{2,4}.



Figura 1. Pólipos branqueados em meio a pólipos saudáveis do coral *Mussismilia harttii*. Créditos: Clovis Castro.

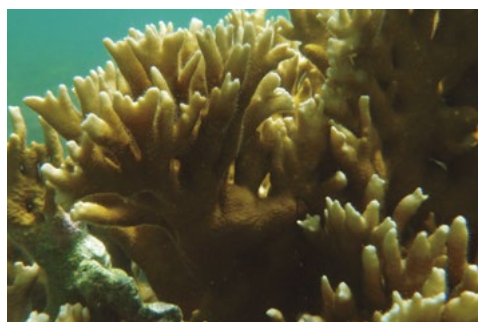
Eventos de branqueamento têm sido observados ao redor do mundo com cada vez mais frequência, principalmente durante o verão, quando as temperaturas da água do mar atingem níveis mais elevados. Esse fenômeno pode levar à morte dos corais, reduzindo a cobertura coralínea e o crescimento do recife. Sem os corais, os recifes sofrem grandes alterações em sua teia alimentar e podem passar a ser dominados por algas e, posteriormente, erodidos⁵.

5. Ver ABRANTES et al. (2016), capítulo 14 deste volume.

Diferentes tipos de zooxantelas e sua relação com os corais

Existem diversos tipos de zooxantelas. Eles são divididos em grandes grupos, denominados clados, na maioria identificados por meio de análises moleculares, de acordo com as diferenças em seu DNA. Cada grupo possui características distintas, podendo apresentar diferentes tamanhos, quantidades de pigmentos e substâncias fotoprotetoras, além de taxas de crescimento diferenciadas. Tais características também as tornam diferentes quanto ao ambiente em que são encontradas. Por exemplo, as zooxantelas que possuem substâncias fotoprotetoras geralmente são encontradas em ambientes com mais luz, uma vez que são capazes de se proteger do excesso de luminosidade³. Além disso, alguns tipos de zooxantelas podem ser mais tolerantes a estresses ambientais do que outros, sendo capazes de suportar temperaturas mais quentes ou ambientes menos iluminados, enquanto outros são bastante sensíveis a tais alterações.

Uma mesma espécie de coral pode abrigar diversos tipos de zooxantelas, o que caracteriza uma relação simbiótica **generalista**, ou pode se associar a zooxantelas de apenas um tipo, tornando a relação mais **específica** (Figura 2). As zooxantelas encontradas em um mesmo coral compõem uma comunidade de microrganismos que vive em conjunto com o hospedeiro. Alguns corais, os que abrigam mais de um tipo de zooxantelas, são capazes de modificar a composição de sua comunidade de microrganismos, associando-se a zooxantelas que estejam mais adaptadas às novas condições.



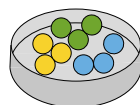
Coral-de-fogo
Millepora alcicornis

Zooxantelas



Coral-cérebro
Mussismilia hispida

Zooxantelas



Coral baba-de-boi
Palythoa caribaeorum

Zooxantelas

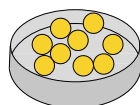


Figura 2. Diversidade de zooxantelas associadas aos corais do Brasil. A associação simbiótica pode ser generalista, como no (a) coral-de-fogo, *Millepora alcicornis*, e no (b) coral-cérebro, *Mussismilia hispida*, ou específica, como no (c) coral baba-de-boi, *Palythoa caribaeorum*. Créditos (a) e (b): Clovis Castro / (c): Carla Zilberberg.

Mudanças climáticas globais

As principais alterações no ambiente marinho decorrentes das mudanças climáticas globais previstas para o próximo século são o aumento da temperatura e a acidificação da água do mar. Esses fatores são decorrentes da aceleração do aumento da concentração de CO_2 atmosférico causado pelas atividades humanas, principalmente pela queima de combustíveis fósseis, desmatamentos e queimadas. Altas concentrações de CO_2 aumentam a temperatura atmosférica média e, conseqüentemente, também elevam a temperatura dos oceanos. Além disso, a água do mar absorve parte desse CO_2 , o que leva à formação do ácido carbônico (H_2CO_3), responsável pela acidificação dos oceanos². Tanto o aumento da temperatura quanto a acidificação da água do mar afetarão diretamente a simbiose entre corais e zooxantelas, mas de maneiras distintas.

O efeito da temperatura na relação entre corais e zooxantelas

O aumento da temperatura da água é o principal fator causador de eventos de branqueamento de corais no mundo. A expulsão das zooxantelas geralmente ocorre devido à condição de estresse oxidativo. Quando as condições de temperatura elevada aceleram o metabolismo das zooxantelas, elas passam a crescer de forma descontrolada dentro do coral, que não consegue mais suprir a demanda de nutrientes (CO_2) necessários para seus simbiontes, e o processo de fotossíntese é interrompido. Sem a quantidade de CO_2 necessária e com a interrupção do processo fotossintético, as zooxantelas passam a produzir substâncias danosas ao coral (espécies reativas de oxigênio) em maior escala que o normal, sendo, por isso, expulsas pelo hospedeiro².

A intensidade da anomalia térmica, ou seja, em quantos graus a temperatura aumentou e por quanto tempo, é fator determinante na sobrevivência dos corais. Após o branqueamento, diversas espécies de corais são capazes de retomar suas zooxantelas e reestabelecer suas funções. Nesse caso, o coral pode sobreviver ao processo, mas geralmente passa algum tempo com seu crescimento

e fecundidade reduzidos. Entretanto, quando o aumento da temperatura é muito acentuado ou as temperaturas permanecem elevadas por um longo período, o branqueamento pode levar os corais à morte; o recife sofrerá, então, uma drástica mudança, devido à perda dos corais⁵.

Um dos fatores que pode contribuir para a sobrevivência dos corais aos eventos de branqueamento é a associação com zooxantelas resistentes às temperaturas mais altas ou à maior intensidade luminosa. Como dito anteriormente, existem tipos de zooxantelas mais resistentes a estresses ambientais que outros. Após a expulsão das zooxantelas, durante o evento de branqueamento, o coral pode alterar a comunidade simbiote, substituindo-a por tipos de zooxantelas que sejam mais resistentes a altas temperaturas. Esse processo é conhecido como **Teoria do Branqueamento Adaptativo**, onde a troca da comunidade de zooxantelas do coral por uma comunidade composta por zooxantelas mais resistentes ajudaria o coral a se adaptar às novas condições ambientais.

Algumas espécies de corais podem não sofrer branqueamento em determinada condição, enquanto outras podem branquear com mais facilidade. Tais diferenças podem estar relacionadas ao tipo de zooxantelas que cada espécie de coral abriga em seu tecido, mas também à profundidade em que o coral é encontrado, além da morfologia, espessura e pigmentação do tecido. Essas características variam muito entre diferentes espécies de corais, tornando-as ambientes únicos e distintos para outros organismos e podendo influenciar no tipo de zooxantelas que cada espécie de coral abriga.

O efeito da acidificação na relação entre corais e zooxantelas

O principal efeito da acidificação nos organismos marinhos é a queda das taxas de calcificação do esqueleto e, conseqüentemente, de crescimento. O aumento da concentração de ácido carbônico (H_2CO_3) na água, como explicado anteriormente, diminui a disponibilidade do íon carbonato (CO_3^{-2}), composto essencial para o processo de calcificação realizado pelos organismos que possuem conchas ou esqueletos calcários (como é o caso dos corais²). Dessa forma, o crescimento dos corais é prejudicado e, com isso, os recifes passam a sofrer mais erosão do que construção.

Os efeitos diretos da acidificação na relação simbiótica com as zooxantelas ainda não são conhecidos. Existem apenas especulações a respeito de mudanças no aporte nutricional proveniente das zooxantelas. Como grande parte da energia fornecida por elas é utilizada para a calcificação do esqueleto dos corais, se esse processo passar a demandar mais energia, devido à acidificação, as zooxantelas podem ficar sobrecarregadas. Entretanto, se tanto o aumento da temperatura da água quanto sua acidificação forem causados pelo aumento da concentração de CO_2 atmosférico, é provável que esses efeitos aconteçam em conjunto. Sendo assim, o que acontece quando os corais e as zooxantelas são expostos aos dois efeitos simultaneamente?

O principal nutriente transferido dos corais para as zooxantelas é o CO_2 produzido durante a respiração dos corais e utilizado pelas zooxantelas para a fotossíntese. Quando a temperatura da água do mar aumenta, e as zooxantelas – com seu metabolismo acelerado – passam a crescer mais rapidamente, a quantidade de nutrientes fornecida pelo coral já não é suficiente para mantê-las. Porém, o CO_2 dissolvido na água é facilmente difundido através das membranas, e maiores concentrações desse nutriente também aumentariam sua disponibilidade para as zooxantelas. Nesse caso, o branqueamento causado pelo aumento da temperatura da água pode ser amenizado (Figura 3). Diversos estudos recentes têm buscado entender como o coral será capaz de manter as demandas de seus simbiossomas nessas novas condições. Entretanto, ainda não é possível afirmar quanto tempo essa

6. Ver CORREIA et al. (2016), capítulo 12 deste volume.

7. Ver SANTOS et al. (2016), capítulo 13 deste volume.

8. Ver CASTRO et al. (2016), capítulo 25 deste volume.

relação pode ser mantida, uma vez que o transporte de carbono inorgânico necessário para a fotossíntese para dentro das células do coral (onde ficam as zooxantelas) demanda gasto energético por parte do hospedeiro².

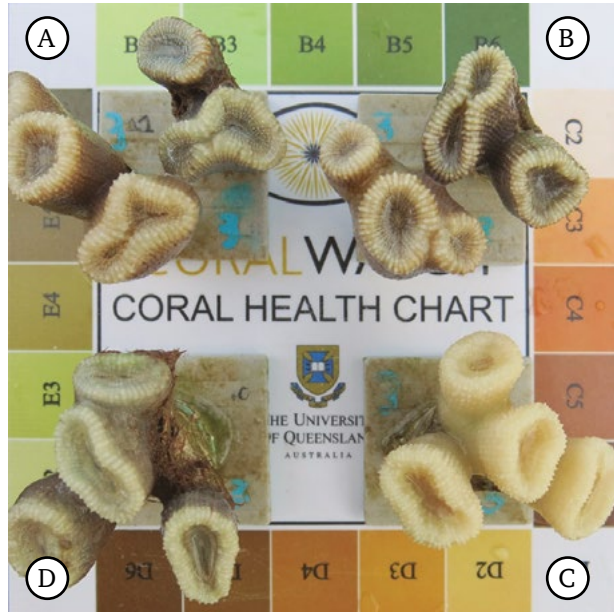


Figura 3. Diferença entre os estágios de branqueamento provocados por experimentos de acréscimo de temperatura e acidificação. (A) Controle, (B) pH, (C) Temperatura e (D) pH + Temperatura. Créditos: Amana Garrido.

Impactos locais

Além das ameaças dos impactos globais, discutidas anteriormente, os recifes de coral também têm sofrido com uma série de alterações das condições ambientais em escala local, isto é, que atingem apenas determinada região ou recife. Dentre os principais impactos podemos mencionar a poluição, o assoreamento de zonas costeiras e a sobrepesca, entre outros^{6,7,8}.

A poluição por esgoto doméstico disponibiliza um grande aporte de nutrientes no ambiente marinho, o que, além de contribuir para o aumento do crescimento de macroalgas sobre os corais, também pode afetar diretamente as zooxantelas. Sendo microalgas fotossintetizantes, as concentrações de

nutrientes na água são de extrema importância para seu metabolismo. Alterações nessas concentrações naturais podem levar ao crescimento ou à atividade desordenada das zooxantelas dentro do tecido dos corais, afetando sua atividade fotossintética e, conseqüentemente, o transporte de nutrientes para o coral, podendo interromper a relação simbiótica. Além disso, o excesso de sedimento associado ao esgoto – gerado pelo assoreamento e/ou carreado pelos rios – reduz a penetração de luz na água, tornando-a mais turva e, com isso, as zooxantelas recebem menos iluminação. Como se sabe, a luz é o principal combustível para o processo da fotossíntese, fornecendo energia para a fixação de carbono inorgânico, o que possibilita sua incorporação aos tecidos vegetais e animais. Com menos luz, a fotossíntese das zooxantelas é afetada, e elas passam a fornecer menos alimento ao coral. Além disso, o coral gasta grande parte de sua energia para retirar o sedimento que recobre seu tecido e fornecer mais luz às zooxantelas através da produção de muco. Sendo assim, com o aporte nutricional proveniente das zooxantelas reduzido e com altos gastos energéticos para a retirada de sedimento, o coral tem suas taxas de crescimento e reprodução reduzidas, a fim de poupar energia.

Essas condições adversas afetam diretamente a saúde dos corais, tornando-os mais susceptíveis a doenças causadas por diversos patógenos e ao branqueamento. Além das zooxantelas, os corais abrigam em seu corpo e sobre ele uma série de outros microrganismos (bactérias, vírus, etc.) que também fazem parte desse holobionte⁹ e podem atuar como um sistema imunológico^{1,4}. Esse conjunto de organismos, quando saudável e equilibrado, forma uma barreira que dificulta o acesso de patógenos e mantém o coral saudável. Porém, quando qualquer parte do conjunto é fragilizada, o coral torna-se mais susceptível a doenças. O principal ponto dessa questão é a ação concomitante dos impactos locais com os efeitos das mudanças climáticas globais. A previsão é que esses recifes, já fragilizados por condições adversas locais, terão menores chances de se recuperar e estarão mais susceptíveis aos eventos de branqueamento, por exemplo.

9. Unidade viva composta por um hospedeiro e sua microbiota associada. Ver MACHADO et al. (2016), capítulo 3 deste volume.

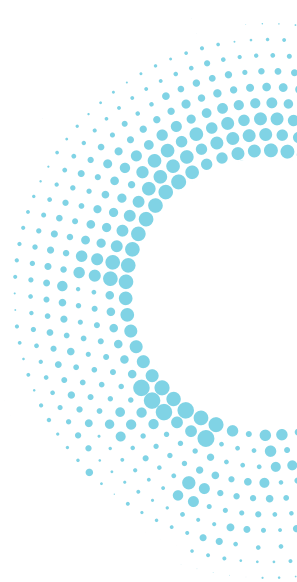
E o que pode acontecer com os corais e as zooxantelas neste mundo em transformação?

Como se sabe, existem diversos grupos diferentes de zooxantelas, alguns mais e outros menos resistentes a diferentes estresses ambientais. A investigação da verdadeira diversidade de tipos de zooxantelas e suas características fisiológicas, principalmente relacionadas a suas respostas a diferentes condições ambientais, é um campo da ciência que tem recebido especial atenção nas últimas décadas. Um dos aspectos bastante discutidos em tal cenário é o papel das zooxantelas na adaptação dos corais às novas condições climáticas do planeta. Por exemplo, se durante ou logo após um evento de branqueamento o grupo de zooxantelas mais resistente a estresses ambientais for encontrado, não será possível afirmar ao certo se elas são mesmo capazes de ajudar o coral a sobreviver ao impacto a que foi submetido ou se estão presentes apenas como oportunistas. Neste último caso, elas apareceriam apenas quando a comunidade do coral se encontrasse debilitada e quando os demais tipos, geralmente encontrados em corais saudáveis, já tivessem sido expulsos devido ao próprio branqueamento. Inúmeros estudos estão sendo realizados no Brasil e no exterior para entender melhor essa relação.

O coral, em conjunto com seus simbioses, pode se adaptar a mudanças ambientais de formas diferentes. Quando expostos a um determinado estresse ambiental, os corais podem modificar os tipos de zooxantelas presentes em seu tecido por outros mais resistentes ao novo ambiente ou podem resistir ao estresse sem que ocorra qualquer alteração em sua comunidade de zooxantelas. Todos os organismos envolvidos na relação simbiótica – incluindo o coral, as zooxantelas e toda a microbiota – podem ser capazes de se adaptar às novas condições, de modo que esse complexo conjunto de organismos possa atuar mutuamente para a sobrevivência do holobionte.

O aumento da temperatura nas regiões tropicais e subtropicais – onde são encontrados os recifes de coral atuais – tem alcançado, e até ultrapassado, o limite térmico que os corais podem suportar. Ao longo da história do planeta Terra, os corais já realizaram uma série de migrações entre ambientes tropicais e temperados. Como são organismos sésseis, isto é, não de locomovem, essas movimentações ocorrem ao longo de muitas gerações, por meio de mudanças em seus limites de ocorrência. Acredita-se que, se as mudanças climáticas globais ocorrerem de maneira moderada, os corais serão capazes de modificar seus locais de ocorrência para regiões mais temperadas e, portanto, menos afetadas pelas altas temperaturas. Entretanto, se as mudanças acontecerem de forma muito acentuada, talvez não haja tempo suficiente para que esses corais consigam conquistar novos ambientes. Por outro lado, existe uma série de barreiras que podem conter as migrações dos corais, como luminosidade, salinidade, profundidade, presença de predadores, substrato, saturação de carbonato e nutrientes, o que torna difícil prever se as migrações para regiões temperadas serão possíveis.

Porém, de fato, os recifes encontram-se muito ameaçados pelas mudanças climáticas. Eventos de anomalias térmicas têm ocorrido com maior frequência, e branqueamentos em massa cada vez mais extensos têm sido observados ao redor do mundo. Além disso, a acidificação dos oceanos pode reduzir o crescimento dos recifes, que sofrerão mais erosão e passarão, então, a diminuir, ao invés de crescer. Sem os corais, os recifes perderão grande parte de sua complexidade estrutural, responsável por manter toda a diversidade de organismos que vivem nesse ambiente.

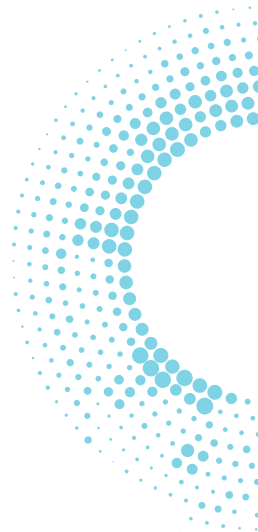


A Rede de Pesquisas Coral Vivo tem realizado diversos experimentos simulando as alterações das condições ambientais previstas pelo IPCC (sigla em inglês para Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas) para o próximo século. Utilizando o Mesocosmo Marinho do Projeto Coral Vivo¹⁰, duas espécies de corais comuns nos recifes brasileiros (*Mussismilia harttii*, o coral couve-flor, e *Millepora alcicornis*, o coral-de-fogo) foram expostas ao aumento da temperatura e à acidificação da água do mar. Análises de laboratório estão em andamento para verificar se esses corais são capazes de alterar os tipos de zooxantelas presentes em seus tecidos durante e após esses dois estresses, separados e em conjunto. Assim, espera-se entender como os recifes brasileiros podem responder às mudanças climáticas previstas. Experimentos anteriores com diferentes temperaturas mostraram que o coral-de-fogo não é capaz de sobreviver a um aumento de 4,5°C na temperatura da água, mas sobrevive a um acréscimo de 2°C. Também já foi observado, em um experimento com ação simultânea de temperatura e acidificação, que, em ambos os corais, o processo de branqueamento causado pelas altas temperaturas pode ser amenizado pela acidificação (conforme explicado anteriormente), indicando que o efeito combinado desses fatores tem grande influência sobre o coral e suas zooxantelas. Outros estudos, também com o apoio do Projeto Coral Vivo, têm buscado identificar os tipos de zooxantelas presentes nos recifes brasileiros, com o objetivo de avaliar a capacidade desses corais de se recuperarem ou resistirem aos estresses causados pelas mudanças climáticas.

Considerações finais

Muitos estudos recentes têm buscado entender os efeitos das transformações no mundo em que vivemos sobre os corais recifais. De acordo com as previsões do IPCC para o próximo século, a temperatura média global pode aumentar até 4,8°C em relação à atual em decorrência das mudanças climáticas. Frente a tal cenário, a saúde dos corais e suas zooxantelas está sendo ameaçada e, devido ao papel fundamental que exercem na formação e manutenção dos recifes, todo esse ecossistema se encontra em risco. Cada vez mais eventos de branqueamento são observados ao redor do mundo, e a busca para reduzir esses efeitos tem se tornado urgente.

Embora ainda em andamento, o conhecimento das associações entre os corais e os diferentes tipos de zooxantelas é um elemento chave para fazer previsões sobre o futuro dos recifes de coral. Além disso, sua conservação depende do modo como esse complexo conjunto de organismos será capaz de responder às novas condições ambientais. É nítida a necessidade de reduzir os impactos locais para a conservação dos recifes, tornando possível que eles permaneçam saudáveis, aumentando, assim, sua chance de sobrevivência aos impactos globais.



Literatura recomendada

BAKER, A.C.; STANGER, C.J.; McCLANAHAN, T.R.; GLYNN, P.W. 2004. Corals' adaptive response to climate change. *Nature*, 430:741.

HOEGH-GULDBERG, O.; MUMBY, P.J.; HOOTEN, A.J.; STENECK, R.S.; GREENFIELD, P.; GOMEZ, E.; HARVELL, C.D.; SALE, P.F.; EDWARDS, A.J.; CALDERA, K.; KNOWLTON, N.; EAKIN, C.M.; IGLESIAS-PRIETO, R.; MUTHIGA, N.; BRADBURY, R.H.; DUBI, A.; HATZIOLOS, M.E. 2007. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science*, 318:1737-1742.

IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. PACHAURI, R.K.; MEYER, L.A. (Eds) Geneva, Switzerland. 151p.

LEÃO, Z.M.A.N.; KIKUCHI, R.K.P.; OLIVEIRA, M.D.M. 2008. Branqueamento de corais nos recifes da Bahia e sua relação com eventos de anomalias térmicas nas águas superficiais do oceano. *Biota Neotrop*, 8(3). Disponível em: <biotaneotropica.org.br/v8n3/en/abstract?article+bn00808032008>. Acesso em: janeiro 2016.

ROWAN, R. 2004. Coral bleaching: thermal adaptation in reef coral symbionts. *Nature*, 430:742.

A saúde de nossos recifes: uma questão de equilíbrio

Deborah Catharine de Assis Leite, Laís Feitosa Machado,
Alexandre Soares Rosado, Raquel Silva Peixoto

O que é doença?

Ao buscar em um dicionário o significado da palavra “doença”, certamente uma definição será esta: “ausência de saúde, um estado que ao atingir um indivíduo provoca distúrbios das funções físicas e mentais. Pode ser causada por fatores exógenos (externos, do ambiente) ou endógenos (internos, do próprio organismo)”. De acordo com essa definição, pode-se entender a doença, também, como a quebra no equilíbrio de um organismo. Com o intuito de resgatar esse equilíbrio é que se consulta um médico ou se leva os animais de estimação (p.ex.: cães e gatos) ao veterinário. Afinal de contas, ficar doente não é uma exclusividade do homem. Entretanto, muitos desconhecem a extensão que as doenças podem alcançar na natureza e como elas podem não só afetar o equilíbrio dos organismos acometidos por elas, como trazer consequências para o ecossistema como um todo.

O que poderia ser dito sobre outras espécies, como os corais, por exemplo? Esses animais, muitas vezes confundidos com rochas, podem ficar doentes? Se podem, que fatores estão associados a esse processo? O que se pode fazer para tratá-los? É possível prevenir suas doenças? Como essas doenças são capazes de trazer consequências negativas ao ecossistema marinho?

Ao longo deste capítulo, essas perguntas serão respondidas, a fim de que se entenda como e por que essas doenças estão entre os principais fatores que têm levado os recifes de coral ao declínio.



1. Ver subtópico “O mundo invisível das bactérias de corais: olhando para as doenças em corais um pouco mais de perto” deste capítulo.

2. Ver subtópico “Adaptando-se às doenças: como os corais desenvolveram estratégias para lidar com as doenças” deste capítulo.

Por que os corais estão ficando doentes? O que os humanos têm a ver com isso?

Pesquisas atuais indicam que estressores ambientais e antrópicos (causados pelo homem) estão fortemente relacionados ao surgimento de doenças nos corais e à mortalidade deles. Entre os principais responsáveis estão: mudanças climáticas, poluição e sobrepesca.

Mudanças climáticas: o planeta Terra está passando por diversas alterações climáticas, impulsionadas pelo aumento das concentrações de gases de efeito estufa. Segundo dados do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), a temperatura da água do mar deve aumentar em até 4,8°C até o final deste século. Grande parte das doenças de corais ocorre com mais frequência e se dissemina mais rapidamente nos meses quentes do verão. Além do mais, a acidificação dos oceanos (diminuição do pH da água do mar) está relacionada ao aumento das concentrações de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, devido às ações antrópicas. Estima-se que o pH dos oceanos seja reduzido em 0,3 unidades até o final deste século, também segundo o IPCC. A mudança na composição química da água do mar já está impactando as taxas de crescimento e calcificação em algumas espécies de corais, tornando-os mais suscetíveis a doenças.

Poluição: a superabundância de nutrientes (p.ex.: fosfato, nitrato, amônia e carbono orgânico dissolvido) também está relacionada ao surgimento de doenças em corais e ao declínio dos recifes. Experimentos usando fertilizantes demonstraram que o aumento de nitrato e fosfato na água agravou doenças como aspergilose e doença da banda amarela¹. O enriquecimento por nutrientes também pode aumentar significativamente a virulência de microrganismos causadores da doença banda preta¹. Outro estudo observou que a adição de pequenas quantidades de carbono orgânico causou aumento na taxa de crescimento de microrganismos do muco², e esse desequilíbrio pode estar relacionado com a posterior morte desses corais.

Sobrepesca: a pesca excessiva reduz o número de peixes herbívoros, aumentando, assim, a concentração de algas presentes nos recifes de coral. Numerosos estudos têm mostrado que várias espécies de algas podem influenciar negativamente os corais através de mecanismos como alelopatia³, sombreamento, abrasão e crescimento excessivo. Trabalhos recentes demonstraram que as algas também podem causar mortalidade em corais por meio da estimulação excessiva da atividade microbiana, devido à liberação de compostos dissolvidos na água.

A figura 1 mostra como os fatores ambientais citados são capazes de afetar a saúde dos corais.

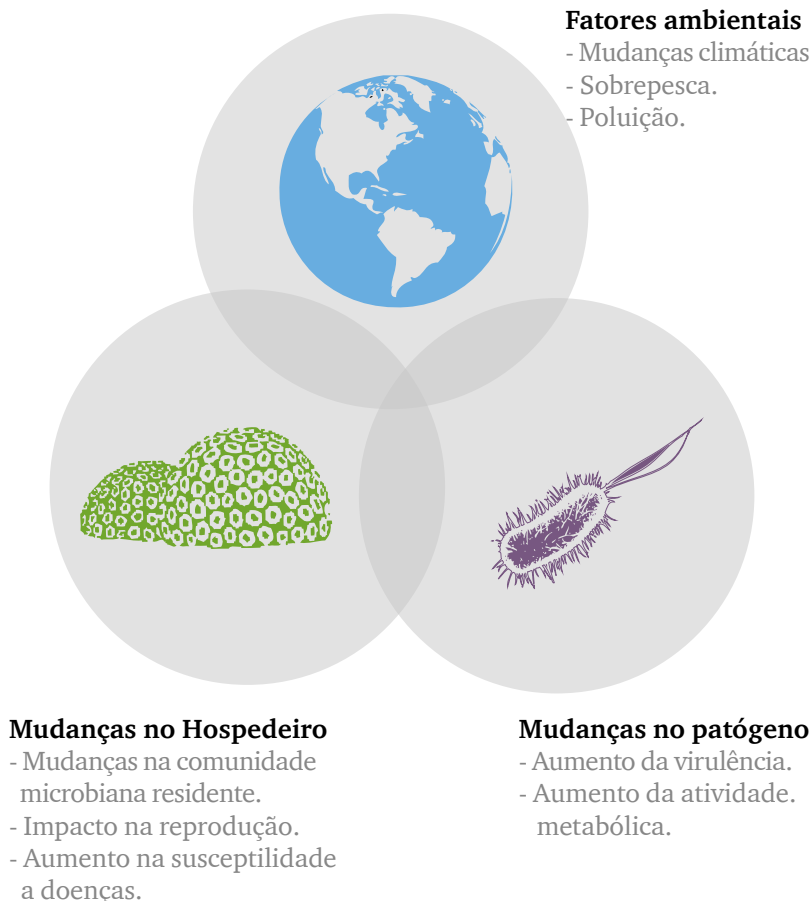


Figura 1. Relação ambiente-hospedeiro-patógeno⁴.

Estudos que relacionam impacto ambiental e doenças nos corais geram conhecimentos valiosos que podem ser utilizados na execução dos planos de monitoramento e gestão dos recifes.

3. Liberação de substâncias químicas capazes de alterar desenvolvimento de outra espécie.

4. Agente biológico capaz de causar doenças.

5. Ver subtópico “Os recifes de coral estão perdendo sua cor. Quando o branqueamento é uma doença?” deste capítulo.

O mundo invisível das bactérias de corais: olhando para as doenças em corais um pouco mais de perto

Como visto no capítulo “O holobionte – microrganismos e a saúde dos corais”, os corais vivem em um equilíbrio dinâmico com diversas comunidades microbianas mutualistas (bactérias, vírus, fungos, protozoários, arqueias e microalgas), mas a ruptura da homeostasia (estado de equilíbrio) desse sistema pode resultar em mudanças fisiológicas, levando o coral hospedeiro até mesmo à morte. Curiosamente, as bactérias, os vírus e os fungos que vivem em simbiose com seu hospedeiro coral também podem ser agentes causadores de doenças. Sendo assim, dentro do coral existem populações de microrganismos benéficos, capazes de disponibilizar nutrientes, oferecer osmoproteção e até produzir antibióticos que aumentam a resistência dos corais contra organismos patogênicos. Contudo, em condições ambientais desfavoráveis, alterações nessa microbiota podem deixar o coral mais susceptível à invasão de outros microrganismos, sejam eles agentes patogênicos ou microrganismos oportunistas, capazes de infectar o coral devido a um estresse sofrido anteriormente.

Estudos sobre o acometimento do coral por doenças têm aumentado bastante nos últimos anos, especialmente no que diz respeito à identificação dos patógenos envolvidos. Entretanto, os vetores de contaminação e os mecanismos pelos quais a doença é transmitida estão longe de ser amplamente conhecidos. Geralmente, peixes e invertebrados constituem potenciais vetores para doenças de corais, tendo em vista que os corais fazem parte da dieta desses indivíduos. Peixes predadores de corais podem transmitir patógenos tanto por via oral (mordendo os pólipos) quanto por via fecal (defecando sobre as colônias). Além disso, as cicatrizes deixadas pelos peixes nas colônias permitem que outros microrganismos penetrem e infectem o coral. Uma das doenças mais bem descritas em coral – o branqueamento causado pela bactéria *Vibrio shiloi* – tem o verme-de-fogo (*Hermodice carunculata*) como vetor⁵. Vias inusitadas, como poeira e águas de lastro dos navios, também podem atuar como reservatórios para patógenos,

a exemplo da aspergilose, que é causada por um fungo proveniente da poeira da África, mas ocorre comumente em corais do Caribe. Macroalgas também têm sido sugeridas como um possível reservatório de agentes patogênicos que causam doenças em corais.

Atualmente, mais de 35 diferentes doenças já foram descritas em corais, mas poucas tiveram seu agente patogênico identificado. Sob o ponto de vista dos agentes causadores das doenças, um dos fundamentos para a identificação são os Postulados de Koch (Tabela 1).

Tabela 1: Postulados de Koch.

Postulados de Koch

- 1) O microrganismo deve estar sempre presente nas lesões (associação constante).
- 2) O microrganismo deve ser isolado e cultivado (obtenção de cultura pura).
- 3) O microrganismo isolado deve infectar um organismo saudável quando inoculado (reproduzir os mesmos sintomas).
- 4) O microrganismo deve ser reisolado do organismo inoculado artificialmente (recuperação do microrganismo).

No entanto, esse conjunto de regras, amplamente utilizado para a identificação de agentes infecciosos, tem sido difícil de aplicar em sistemas marinhos. Um grande problema em relação a tais regras é que elas não consideram a susceptibilidade do hospedeiro ou a virulência do patógeno e sua relação com as mudanças ambientais. Outro problema é a tendência a atribuir um grupo limitado de características visíveis (sinais/sintomas), sem uma investigação detalhada em nível celular. Por fim, é muito difícil determinar se a doença encontrada no ambiente é a mesma produzida por meio de testes de laboratório utilizando-se desses postulados.

Na grande maioria das vezes, os postulados de Koch não se adequam ao contexto dos corais. Assim, descrições cada vez mais confusas sobre doenças em corais estão impedindo a compreensão – não apenas sobre a patologia, mas também sobre a capacidade de identificar e distinguir os principais microrganismos patogênicos e oportunistas que podem estar causando essas doenças. Trabalhos recentes vêm tentando realizar o diagnóstico de tais doenças com base em sinais visíveis, menos ambíguos, usando descrições específicas de

lesões observadas no campo. Ainda assim, na ausência de dados microbiológicos, a descrição rigorosa dos sinais da doença não terá muita utilidade diagnóstica.

Outra questão que atrapalha o diagnóstico é que muitas das doenças que acometem os corais são polimicrobianas (envolvem muitos microrganismos). Em tais casos, é difícil, se não impossível, atender aos postulados de Koch. Ainda, muitas bactérias marinhas são viáveis, mas não cultiváveis, e só é possível acessá-las através de métodos independentes de cultivo. Reconhecendo muitos desses problemas, foi sugerida uma versão modificada dos postulados de Koch (postulados de Koch simplificados) que prevê o uso de métodos moleculares, a fim de verificar quais são os microrganismos associados a essas doenças, sem necessariamente cultivá-los.

De qualquer forma, vale a pena salientar que o cumprimento dos postulados de Koch fornece evidências definitivas do agente infeccioso, mas o não cumprimento dessas premissas não elimina a possibilidade de que um patógeno primário esteja envolvido.

Outro aspecto importante sobre a microbiologia de corais é que a própria presença de microrganismos associados ao coral também dificulta o diagnóstico da doença, requerendo a caracterização da “microbiota saudável” de corais antes de iniciar os estudos destinados a isolar os agentes causadores da doença, sejam eles primários ou oportunistas.

Em geral, as doenças são identificadas por mudanças na coloração do coral, cujos sinais característicos deram nomes às próprias doenças: bandas pretas, bandas brancas, bandas amarelas, pontos pretos, entre outros. Veja a seguir as principais doenças que ocorrem em corais.

Doença da banda preta: foi a primeira doença em coral a ser descrita. Tem caráter polimicrobiano, incluindo bactérias redutoras de sulfato, oxidantes de sulfeto e uma cianobactéria (*Phormidium corallyticum*). Dados experimentais recentes sugerem que a transmissão desta doença pode ser mediada por peixes que, durante a alimentação, rompem a integridade do tecido coralíneo, facilitando a entrada dos microrganismos oportunistas.

Doença da banda branca: afeta corais do gênero *Acropora* e é responsável por perdas de 80-98% dessas espécies na região do Caribe, onde, anteriormente, eram predominantes. Esta doença está relacionada ao aumento de temperatura dos oceanos e é facilmente transmissível. Até o momento, apenas o *Vibrio carchariae* foi identificado como agente causal.

Doença dos pontos brancos: é causada por *Serratia marcescens*, uma bactéria bastante comum e facilmente encontrada em alimentos e em esgoto não tratado. Esse é o primeiro exemplo de um patógeno de humano capaz de infectar organismos marinhos. Foi inicialmente descrita como uma doença específica do coral *Acropora palmata*, mas há evidências de que possa ocorrer também em outras espécies.






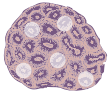
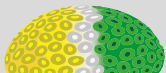

Praga branca: primeiramente descrita no final dos anos 70, em corais do Caribe e do Indo-Pacífico. Atualmente, há um grupo de três doenças que são caracterizadas por sinais semelhantes, sendo denominadas praga branca tipo I, II e III. Muito embora o conjunto de sintomas seja bastante parecido, apenas uma delas possui agente causal descrito, como é o caso da bactéria *Aurantimonas coralicida*, capaz de infectar várias espécies de coral (praga branca tipo II). Pesquisas recentes descreveram que a praga branca tipo I está relacionada à presença de vírus semelhantes ao vírus do herpes. Até o momento, nenhum agente causal ou microrganismo oportunista foi associado à praga branca do tipo III. Desde a década de 90, a doença vem se espalhando rapidamente entre os corais do Caribe, sendo alvo de grande preocupação.

Aspergilose: possui um conjunto bem definido de sinais. Através dos postulados de Koch, foi possível identificar o fungo *Aspergillus sydowii* como agente causador. A virulência de *A. sydowii* é potencializada com o aumento da temperatura da água; portanto, a disseminação desta doença pode ser agravada com as mudanças climáticas.

Doença da banda amarela: é uma doença altamente infecciosa que afeta corais do Caribe e do Indo-Pacífico. É caracterizada pela presença de anel amarelado com uma margem branca. Assim como a aspergilose, está associada ao aumento da temperatura dos oceanos. Também é uma doença polimicrobiana, causada por quatro espécies de *Vibrio*.

Observe um resumo sobre as doenças mencionadas, contendo os principais sintomas, além dos microrganismos e fatores ambientais associados a seu surgimento (Tabela 2).

Tabela 2: Doenças em corais.

Doença	Patógeno (s)	Hospedeiro (s)	Estresse ambiental associado	Curiosidades
Branqueamento 	<i>Vibrio shiloi</i>	<i>Oculina patagonica</i>	-Aumento de temperatura	Doença mais caracterizada em corais
Branqueamento e lise celular 	<i>Vibrio coralliilyticus</i>	<i>Pocillopora damicornis</i>	-Aumento de temperatura	Branqueamento ocorre entre 24-25°C e a lise em temperaturas mais elevadas
Aspergilose 	<i>Aspergillus sydowii</i>	<i>Gorgonia</i> spp.	-Aumento de temperatura -Sedimentação -Eutrofização	Fungo transportado através das tempestades de poeira da África
Doença da banda branca* 	<i>Vibrio carchariae</i>	<i>Acropora</i> spp.	-Aumento de temperatura	Altamente infecciosa
Praga branca* 	<i>Aurantimonas coralicida</i> <i>Thalassomonas loyana</i> vírus	Vários corais pétreos e octocorais.	-Aumento de temperatura -Poluição	Existem 3 tipos diferentes e pode ser causada por vírus ou bactérias
Doença dos pontos brancos 	<i>Serratia marcescens</i>	<i>Acropora palmata</i>	-Aumento de temperatura -Contaminação fecal -Precipitação	O agente causador desta doença também é capaz de infectar homens e outros animais
Doença da banda amarela 	<i>Vibrio alginolyticus</i> juntamente com outras 3 espécies de <i>Vibrio</i> ainda não identificadas	<i>Orbicella</i> spp.	-Aumento de temperatura	Mata algas simbióticas, ao alterar a mitose e danificar o aparelho fotossintético
Doença da banda preta 	Conjunto de microrganismos, incluindo cianobactérias, bactérias oxidantes de sulfeto e redutoras de sulfato	Vários corais pétreos e octocorais	-Aumento de temperatura -Eutrofização -Sedimentação -Poluição -Contaminação fecal	Não há um agente causador único, mas um grupo de microrganismos capazes de causar a doença

* Doenças encontradas no Brasil.

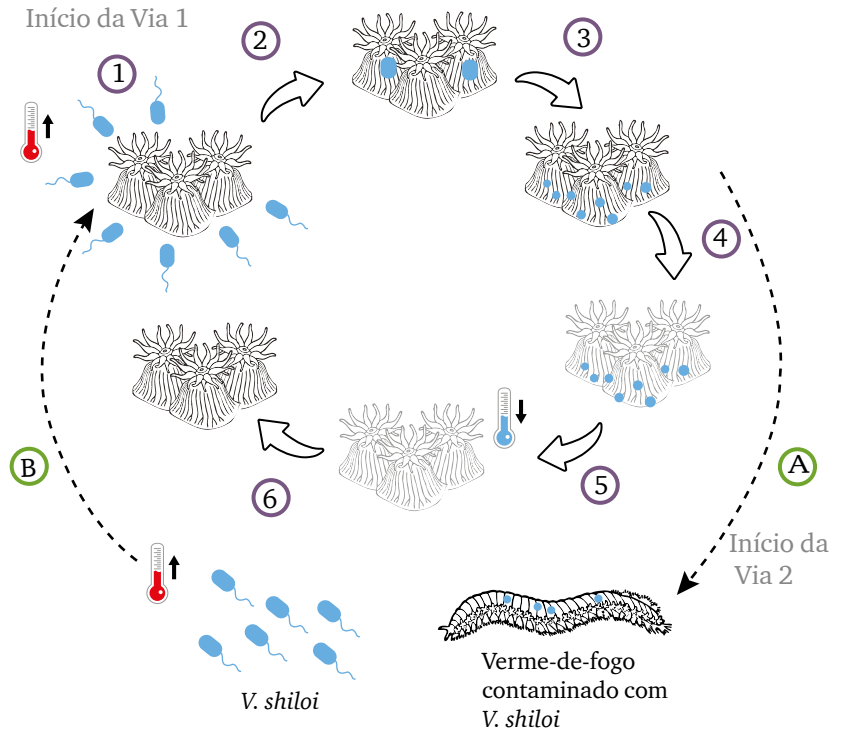
Os recifes de coral estão perdendo sua cor. Quando o branqueamento é uma doença?

É importante saber distinguir doença de branqueamento em corais. Branqueamento é basicamente a perda dos organismos fotossimbiontes (zooxantelas) presentes nos tecidos do coral⁶. Em geral, o branqueamento não é considerado uma doença, estando frequentemente relacionado ao aumento da temperatura, à acidificação dos oceanos, à alta irradiação solar e aos poluentes. Entretanto, algumas espécies do gênero *Vibrio* também são capazes de induzir o branqueamento (Quadro 2) e, somente nesses casos, ele pode ser considerado uma doença. No Mar Mediterrâneo, uma infecção pela bactéria *Vibrio shiloi* pode induzir o branqueamento do coral *Oculina patagonica*. O coral-couve-flor (*Pocillopora damicornis*) pode perder sua cor e ter suas células rompidas quando infectado por *Vibrio coralliilyticus*.

Branqueamento induzido por *Vibrio shiloi*⁷: é sem dúvida a doença mais bem caracterizada em corais em termos de etiologia e mecanismo de patogênese. Os postulados de Koch mostram que o branqueamento pode ser induzido através da infecção por *V. shiloi* em corais saudáveis mantidos a temperaturas elevadas (25 a 29°C), já que essa bactéria só adere ao muco na superfície do coral hospedeiro sob essas condições. O segundo passo no processo de infecção é a penetração do patógeno na epiderme do coral hospedeiro. Uma vez dentro dos tecidos, o patógeno pode se multiplicar e se transformar em um estado viável, mas não cultivável. Na sequência de penetração, *Vibrio shiloi* produz as toxinas capazes de inibir a fotossíntese das zooxantelas, culminando na expulsão das mesmas. Durante o verão, no Mar Mediterrâneo, o *Vibrio shiloi* está presente em todas as colônias branqueadas de *Oculina patagonica*. No entanto, durante o inverno (quando a temperatura da água cai para 16°C), o *Vibrio shiloi*, que se encontra dentro do tecido, morre, e as colônias se recuperam. No verão seguinte, a reinfecção das colônias de *O. patagonica* é facilitada pelo verme-de-fogo (*Hermodice carunculata*), vetor do *V. shiloi*. Durante o inverno, *V. shiloi* está presente dentro do verme-de-fogo no estado viável, mas não cultivável; no verão, quando o verme se alimenta do coral, o patógeno é transmitido para algumas colônias de corais. Essa transmissão indireta serve para reiniciar o processo de infecção (Figura 2).

6. Ver MARANGONI et al. (2016) e GARRIDO et al. (2016), capítulos 4 e 6 deste volume, respectivamente.

7. ROSENBERG, E.; KOREN, O.; RESHEF, L.; EFRONY, R.; ZILBER-ROSENBERG, I. 2007. *Nature Reviews Microbiology*, 5:355-362.



- ① Contato do coral com *V. shiloi* em condições de altas temperaturas (25°C-29°C)
- ② Penetração do *V. shiloi* no coral
- ③ Multiplicação e diferenciação do *V. shiloi* no interior do coral
- ④ Perda de zooxantelas (branqueamento)
- ⑤ Morte do *V. shiloi* em baixas temperaturas (~16°C)
- ⑥ Aquisição de zooxantelas
- Ⓐ Verme-de-fogo se alimenta de coral e se contamina com o *V. shiloi*
- Ⓑ Verme-de-fogo contaminado infecta coral saudável

Figura 2. Vias de infecção do coral por *Vibrio shiloi*, a partir da coluna d'água (Via 1) e do verme-de-fogo (Via 2). Sem escala. Esquema adaptado de ROSENBERG et al. (2007).

Branqueamento induzido por *Vibrio coralliilyticus*⁸: afeta o coral *Pocillopora damicornis*. Através de postulados de Koch, *Vibrio coralliilyticus* foi identificado como agente causal. A infecção por *V. coralliilyticus* induz branqueamento em temperaturas entre 24-25°C, e lise de tecidos, seguida de morte da colônia, em temperaturas entre 27-29°C. É uma doença altamente infecciosa e pode ser transmitida através do contato direto entre uma colônia e outra.

Adaptando-se às doenças: como os corais desenvolveram estratégias para lidar com as doenças

À semelhança de outros invertebrados, corais possuem imunidade inata. Estudos demonstram que as defesas básicas dos corais incluem barreiras físicas, como a epiderme e o muco, as células fagocíticas (p.ex. amebócitos)⁹ e os fatores solúveis, incluindo ácidos orgânicos e produtos antimicrobianos. Curiosamente, muitos estudos têm mostrado um grande número de bactérias capazes de colonizar a camada de muco e produzir antibióticos, o que sugere que as bactérias associadas ao coral podem inibir a invasão de agentes patogênicos e contribuir ativamente contra a manifestação de doenças infecciosas.

Barreiras físico-químicas: a primeira barreira de proteção dos corais contra potenciais patógenos é o muco. Sua liberação promove a formação de uma barreira físico-química que atua como uma armadilha para microrganismos invasores, de modo que, ao buscar interagir com o coral, a microbiota exógena fica presa no muco, não conseguindo acessar os tecidos coralíneos. Muitos corais escleractíneos e gorgônias utilizam a produção de muco como proteção contra bactérias e vírus.

Defesa celular: depende da habilidade do coral de distinguir o que é próprio e não próprio (p.ex.: sedimentos, patógenos) de seu organismo. As defesas celulares em corais escleractíneos e gorgônias incluem (1) a cicatrização de feridas: amebócitos migram de um tecido não lesionado, acumulam-se no local da lesão e se organizam em cordões de células interligadas, promovendo a cicatrização e consequente cura; (2) a fagocitose: amebócitos também reconhecem, engolfam e destroem invasores microbianos através de fagocitose, constituindo o principal mecanismo de defesa celular de patógenos e outras partículas; (3) a “memória imunológica” de curta duração: corais reconhecem fragmentos transplantados¹⁰ da mesma colônia, mas rejeitam fragmentos de colônias diferentes, sejam elas da mesma espécie ou de espécies diferentes. Esse processo de rejeição é acelerado caso o coral seja exposto a repetidos transplantes, sinalizando a presença de uma memória imunológica rudimentar.

9. Componentes celulares capazes de engolfar, ou seja, de “engolir” e destruir microrganismos.

10. Processo em que se transfere um tecido ou órgão de um organismo para o outro. No caso dos corais, também podem ser transferidos fragmentos das colônias.

11. Destruir.

12. Ver MACHADO et al. (2016), capítulo 4 deste volume.

Defesa humoral: corais se utilizam de compostos antibióticos ou produtos químicos nocivos para repelir organismos potencialmente patogênicos ou parasitas. Esses corais e/ou sua microbiota associada produzem substâncias antimicrobianas capazes de agir em uma ampla gama de microrganismos ou contra grupos de patógenos mais específicos.

Adaptação ao estresse: um caso bastante descrito sobre adaptação ao estresse ocorreu entre 1994 e 2002, em colônias do coral *O. patagonica* no Mediterrâneo. Durante esse período, a bactéria *V. shiloi* foi repetidamente isolada de corais branqueados e continuou sendo capaz de provocar o branqueamento em corais saudáveis. No entanto, desde 2003, todas as tentativas de isolar essa bactéria do tecido branqueado do coral ou a inoculação em corais saudáveis fracassaram. Na tentativa de compreender a base para a resistência de *O. patagonica* a essa bactéria, foi realizado um experimento de infecção comparando corais sensíveis e resistentes ao patógeno. Durante o experimento, a bactéria *V. shiloi* aderiu ao coral sensível, penetrou na epiderme e conseguiu se multiplicar. Já para o coral resistente, o padrão de infecção foi diferente. As bactérias aderiram ao coral, penetraram nos tecidos, mas após 24 horas, o número de células patogênicas começou a declinar, até que no 4º dia não foram mais encontradas células do patógeno no tecido. Por algum mecanismo ainda desconhecido, o coral foi capaz de lisar¹¹ o *V. shiloi* intracelular e evitar a doença. Há outros casos ainda pouco documentados, como o da *A. coralicida*, bactéria responsável pela praga branca nos recifes de coral da Flórida, que já não pode mais infectar esses corais. Com base em exemplos como esses, foi proposta a Hipótese do Coral Probiótico¹².

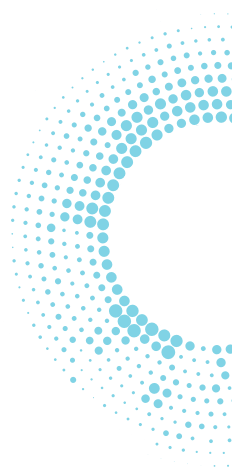
“Prevenir é melhor que remediar”: o que pode ser feito para evitar o aparecimento de doenças em corais

Pode-se observar que há uma série de evidências sobre a estreita relação entre as doenças de corais e a atividade humana. O aumento do número de novas doenças e espécies afetadas pode estar diretamente ligado às alterações induzidas pelo homem em ambientes de recifes de coral, tanto em termos de fontes de poluição terrestres, como em questões de mudanças climáticas globais. A fim de evitar novos e maiores danos, foram propostas algumas ações listadas a seguir:

(1) Continuar a apoiar os esforços de investigação para determinar os agentes causais, os vetores e as vias associadas ao vetor, bem como os efeitos sinérgicos de estressores ambientais e humanos sobre doenças em corais;

(2) Adotar e promover protocolos padronizados e métricas para o monitoramento de saúde e doença em corais, para permitir maior controle de qualidade sob os dados e gerar relatórios mais precisos sobre a situação global de doenças em corais;

(3) Implementar medidas para atenuar agressões antrópicas que possam aumentar a propagação e a gravidade de doenças, como a melhoria do tratamento de águas residuais e a eliminação de práticas de pesca destrutiva.



Literatura recomendada

BURGE, C.A.; KIM, C.J.S.; LYLES, J.M.; HARVELL, C.D. 2013. Oceans and humans health: the ecology of marine opportunists. *Microbial Ecology*. 65:869-879.

GLOBAL CORAL DISEASE DATABASE – GCDD. Disponível em: <<http://www.unep-wcmc.org/resources-and-data/global-coral-disease-database>>. Acesso em: janeiro 2016.

KLINE, D.I.; KUNTZ, N.M.; BREITBART, M.; KNOWLTON, N.; ROHWER, F. 2006. Role of elevated organic carbon levels and microbial activity in coral mortality. *Marine Ecology Progress Series*, 314:119-125.

LESSER, M.P. 2007. Coral reef bleaching and global climate change: Can corals survive the next century? *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(13):5259-5260.

SUTHERLAND, K.P.; PORTER, J.W.; TORRES, C. 2004. Disease and immunity in Caribbean and Indo-Pacific zooxanthellate corals. *Marine Ecology Progress Series*, 266:273-302.

Reprodução de corais de águas rasas do Brasil

Débora de Oliveira Pires, Clovis Barreira e Castro, Bárbara Segal, Cristiano Macedo Pereira, Edinilson Conceição do Carmo, Romário Guedes da Silva, Emiliano Nicolas Calderon

Introdução

O Brasil abriga os únicos recifes de coral verdadeiros do Oceano Atlântico Sul. Metade das espécies de corais (corais verdadeiros, octocorais, corais negros e corais-de-fogo) que vivem e/ou constroem esses recifes só existem em águas brasileiras. A reprodução é o processo fundamental para que as populações de coral sejam mantidas e renovadas. Dados sobre biologia e estratégias reprodutivas são cruciais para a conservação desses ambientes, para o aperfeiçoamento de práticas de manejo e para a recuperação de áreas degradadas. Devido à ausência de conhecimento sobre reprodução de corais no Brasil e à importância desses dados para a conservação dos recifes e ambientes coralíneos brasileiros, pesquisadores do Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de Janeiro (RJ, Brasil), iniciaram linha de pesquisa sobre processos de formação e renovação de comunidades coralíneas, em 1996. Inicialmente, estudos de reprodução foram baseados em observações de laboratório, em preparações histológicas e em disseções de material fixado. Posteriormente, em 2003, com o surgimento do Projeto Coral Vivo e dispondo de aquários e tanques à beira-mar, em sua Base de Pesquisas no Arraial d'Ajuda Eco Parque (BA, Brasil), foram incluídas as investigações sobre reprodução em colônias vivas.



Como os corais se reproduzem

Os corais têm um ciclo de vida simples que inclui duas fases: a de pólipo, que vive fixo ao fundo e desenvolve gametas; e uma fase larval livre (Figuras 1 e 2). Quando o pólipo cresce, ele pode brotar novos pólipos unidos por tecido e, assim, formar colônias. Os corais podem se reproduzir tanto sexuada como assexuadamente. Os métodos mais comuns de reprodução assexuada se dão através da produção de larvas do próprio indivíduo, do brotamento de um pólipo que se solta do pólipo parental ou da fragmentação das colônias, como ocorre no coral-couve-flor (*Mussismilia harttii*). Nesse caso, os “ramos” se quebram ou se desprendem e formam novas colônias.

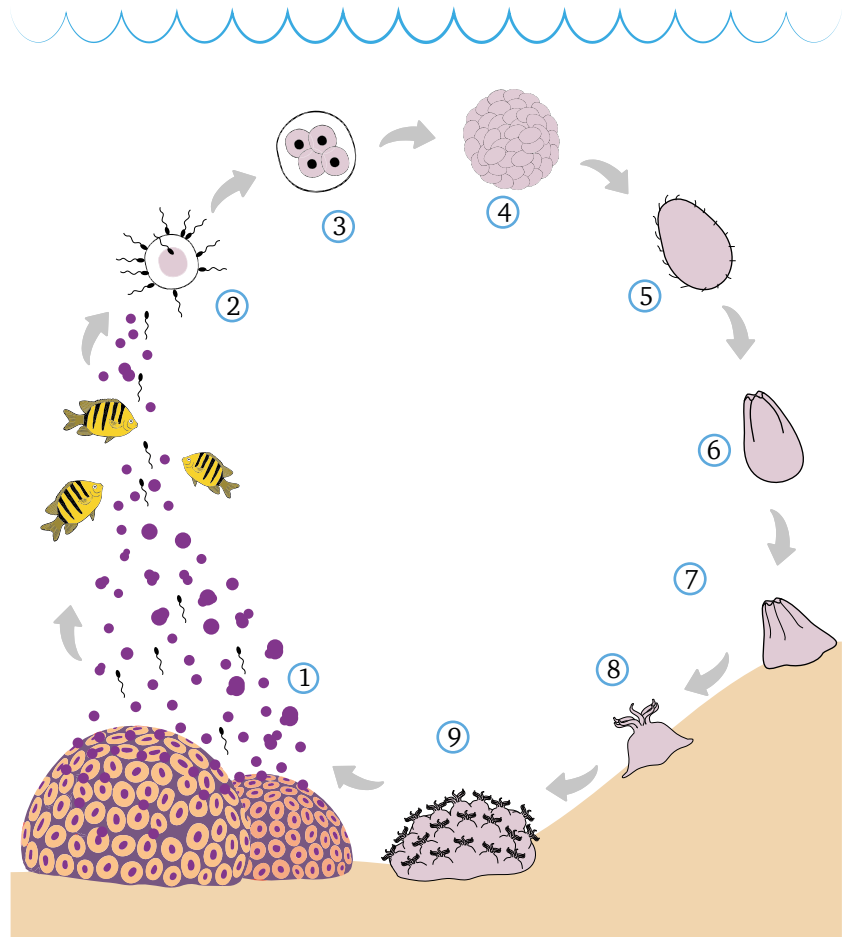


Figura 1. Ciclo de vida de corais liberadores de gametas: 1) Liberação sincronizada de pacotes de ovócitos e espermatozoides. Vários predadores se alimentam dos gametas liberados. 2) Gametas rapidamente flutuam para a superfície da água, onde ocorre a fecundação. 3) A divisão celular começa poucas horas após a desova. 4) O desenvolvimento do zigoto se dá no primeiro dia. 5) As larvas plânula se desenvolvem e se dispersam com as correntes por alguns dias. 6) Plânulas com mesentérios começam a mudar de forma. 7) As plânulas começam a procurar um local adequado para se assentarem. 8) As plânulas se assentam cerca de uma semana após a desova e se transformam em pólipos fundadores, que começam a secretar o esqueleto calcário. 9) As colônias começam a crescer através de brotamento de pólipos.

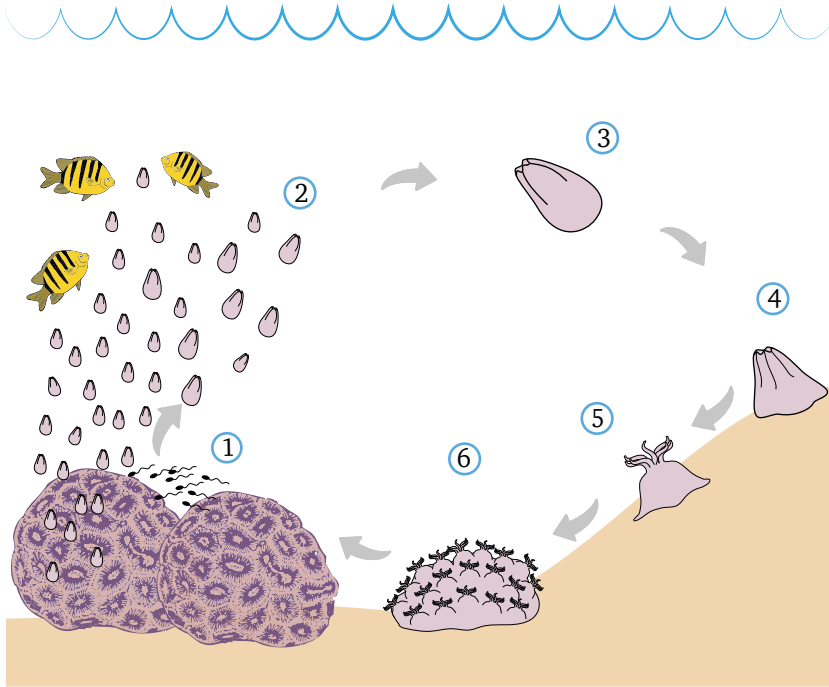
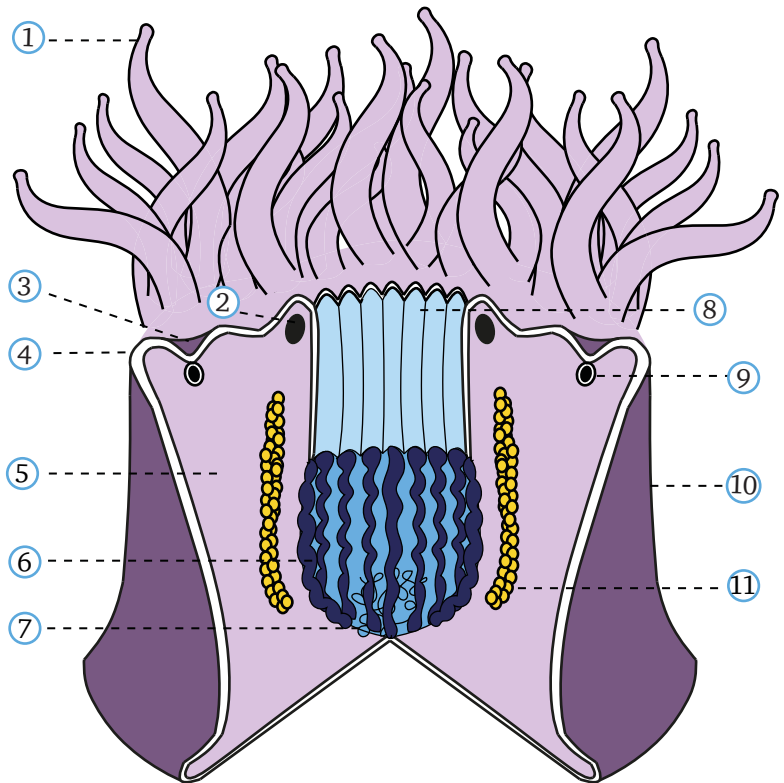


Figura 2. Ciclo de vida de corais incubadores de larvas. 1) Espermatozoides de uma colônia fecundam os ovócitos de outras colônias. As larvas plânula são desenvolvidas internamente. 2) Liberação de plânulas na coluna d'água. 3) Plânulas com mesentérios começam a mudar de forma. 4) As plânulas começam a procurar um local adequado para se assentarem. 5) As plânulas se assentam em poucos dias, normalmente próximas às colônias parentais e se transformam em pólipos fundadores, que começam a secretar o esqueleto calcário. 6) As colônias começam a crescer através de brotamento de pólipos.

A reprodução sexuada envolve a produção de gametas e cria diversidade genética por meio da fecundação cruzada (oriunda da união de gametas dos progenitores). Essa diversidade pode possibilitar às espécies sobreviverem a mudanças ambientais, porque algumas combinações genéticas podem ser mais aptas a resistir em novas situações.

Os cnidários não têm gônadas verdadeiras. Na Classe Anthozoa, à qual os corais verdadeiros e octocorais pertencem, as células sexuais surgem em áreas gametogênicas dos mesentérios nas estações reprodutivas das espécies (Figura 3).



- | | |
|---------------------------|---------------------|
| ① tentáculo | ⑦ acôncio |
| ② estoma | ⑧ faringe |
| ③ capítulo | ⑨ esfíncter |
| ④ parapeito | ⑩ coluna |
| ⑤ mesentério | ⑪ área gametogênica |
| ⑥ filamentos mesentéricos | |

Figura 3. Esquema de pólipo de Anthozoa, Actiniaria, cuja anatomia é similar a de um coral.

Os corais podem ter colônias ou pólipos solitários de um mesmo sexo – masculino ou feminino, ou seja, serem gonóricos ou dióicos, ou serem hermafroditas, ou monóicos (Figura 4). Neste último caso, um mesmo animal apresenta ambos os sexos, podendo ocorrer pólipos hermafroditas em toda a colônia, ou colônias com uma mistura de pólipos machos e pólipos fêmeas. Células sexuais de ambos os sexos podem ocorrer dentro de um mesmo mesentério, ou podem existir alguns mesentérios com células sexuais masculinas e outros com células femininas.

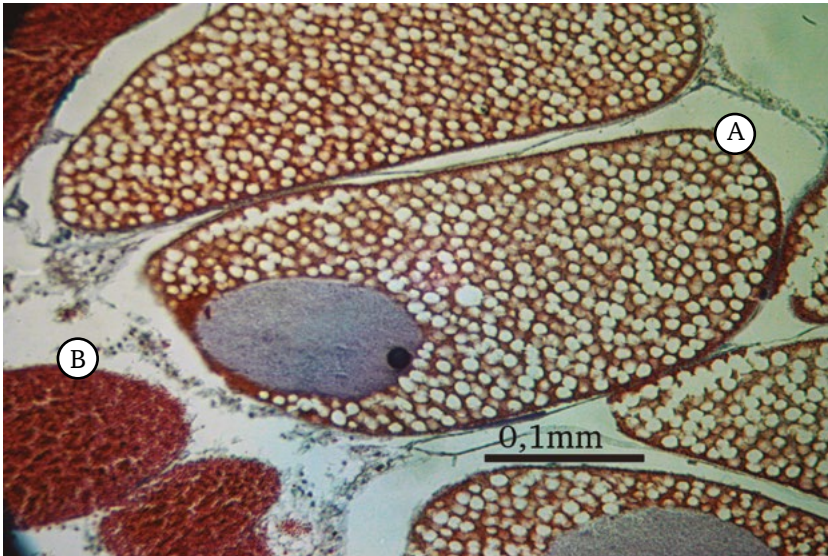


Figura 4. Corte histológico do coral hermafrodita *Mussismilia harttii*, mostrando a presença simultânea de (A) ovócitos maduros e (B) cistos espermáticos com espermatozoides no mesmo mesentério.

Em relação aos modos de reprodução, há dois tipos principais: 1) os corais que liberam gametas na água para fecundação externa (chamados de liberadores de gametas, Figura 1); e 2) os que realizam a fecundação internamente e desenvolvem as larvas plânulas dentro dos pólipos (chamados de planuladores ou incubadores, Figura 2). As planulações podem acontecer repetidamente durante um período variável de tempo (mensal, semestral, um único período no ano), enquanto as desovas, em geral, ocorrem em períodos mais restritos.

Os tamanhos máximos dos ovócitos maduros e a presença ou não de zooxantelas nos ovócitos indicam o tipo de desenvolvimento de larva produzida pela espécie. Espécies com ovócitos grandes, como a *Montastraea cavernosa* e as pertencentes à família *Mussidae* (*Mussismilia* spp. e *Scolymia wellsi*), apresentam ovócitos maduros grandes, cheios de material nutritivo (vitelo) e sem zooxantelas. Essas larvas não se alimentam de fontes externas e utilizam as reservas de vitelo para seu desenvolvimento inicial (lecitotrofia). Após alguns dias, essas larvas adquirem zooxantelas contidas na coluna d'água, passando a usar os produtos de sua fotossíntese. Por outro lado, a maioria das espécies incubadoras apresenta tamanhos máximos de ovócitos maduros bem menores, onde já há a presença de zooxantelas. Por conseguinte, as larvas dessas espécies são consideradas autotróficas, pois se nutrem dos produtos gerados pela fotossíntese de suas algas.

Normalmente, a plânula vaga ao sabor das correntes, com pequena capacidade de natação, fazendo parte do plâncton, e tem graus de dispersão variados. Quando a larva se fixa e assenta permanentemente ao substrato, ela sofre metamorfose, transformando-se em um pólipo juvenil ou fundador. Logo inicia-se o aparecimento dos primeiros elementos esqueléticos, e esse pólipo é comumente chamado de recruta.

Este capítulo aborda aspectos da reprodução sexuada de corais recifais brasileiros. Inclui uma revisão da literatura e dados inéditos dos diferentes aspectos da biologia reprodutiva de 10 espécies de corais verdadeiros (Ordem Scleractinia) zooxantelados de águas rasas da costa brasileira. Quatro são encontradas apenas no Brasil: *Mussismilia braziliensis*, *Mussismilia harttii*, *Mussismilia hispida* e *Siderastrea stellata*. Cinco também ocorrem no Caribe: *Agaricia humilis*, *Madracis decactis*, *Montastraea cavernosa*, *Porites astreoides* e *Scolymia wellsi*. E uma também ocorre no Atlântico Oriental: *Favia gravida*. Além das espécies de corais verdadeiros, foram incluídos dados da reprodução da orelha-de-elefante (o octocoral ou gorgônia *Phyllogorgia dilatata*), que só ocorre em águas brasileiras.

Como os corais brasileiros se reproduzem

Os resultados mostrados na Tabela 1 indicam que metade das espécies dos corais verdadeiros estudadas é incubadora de larvas, sendo a outra metade liberadora de gametas. Em relação à sexualidade, apenas duas espécies de corais verdadeiros com reprodução conhecida são gonocóricas (*Siderastrea stellata* e *Montastraea cavernosa*). A gorgônia orelha-de-elefante (*Phyllogorgia dilatata*) também é gonocórica. As desovas e liberações de plânulas das diferentes espécies de corais ocorrem em épocas do ano próprias, com algumas exceções. Normalmente, os corais liberadores exibem reprodução anual, enquanto os incubadores apresentam períodos reprodutivos mais extensos ou até mesmo contínuos. Registros das desovas de longo prazo mostram que as épocas de liberação de gametas são consistentes entre os anos. A gametogênese e os padrões de desova são normalmente sincrônicos dentro das espécies, e as populações exibem desovas fracionadas em diferentes ciclos lunares consecutivos, como nas espécies de coral-cérebro (*Mussismilia* spp.).



Tabela 1. Reprodução de corais verdadeiros brasileiros (Ordem Scleractinia). (G) gonocórico (sexos separados), (H) hermafrodita (ambos os sexos no mesmo pólipos ou mesma colônia), (D) desovador de gametas, (I) incubador de larvas; Ovócito indica o tamanho máximo observado (mm).

Espécie	Padrão sexual	Modo	Ovócito
<i>Agaricia humilis</i>	H	I	0,135
<i>Favia gravida</i>	H	I	0,250
<i>Madracis decactis</i>	H	I	0,113
<i>Montastraea cavernosa</i>	G	D	0,417
<i>Mussismilia braziliensis</i>	H	D	0,392
<i>Mussismilia harttii</i>	H	D	0,411
<i>Mussismilia hispida</i>	H	D	0,520
<i>Porites astreoides</i>	H	I	0,121
<i>Scolymia wellsi</i>	H	I	0,652
<i>Siderastrea stellata</i>	G	I	0,470

1. FARIA, C.C. 1999. *Estratégia reprodutiva de Agaricia agaricites (Linnaeus, 1758) (Cnidaria, Scleractinia) do Complexo Recifal dos Abrolhos, BA.* Trabalho de Conclusão de Curso (Ecologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

2. CALDERON, E.N.; CASTRO, C.B.; PIRES, D.O. 2000. *Boletim do Museu Nacional, Nova Série, Zoologia*, 429:1-12.

3. CONCEIÇÃO, T.F.; PIRES, D.O.; SEGAL, B.; BARROS, M.M.L. 2006. *Arquivos do Museu Nacional*, 64:299-308.

4. CASTRO, B.T.; PIRES, D.O. 2006. *Arquivos do Museu Nacional*, 64:19-27.

5. MURAMATSU, D.; DA SILVEIRA, F.L. 2008. *Brazilian Journal of Oceanography*, 56(4):297-305.

6. SILVA, J.V.C. 2007. *Ciclo reprodutivo do coral Montastraea cavernosa Linnaeus, 1767 (Cnidaria, Scleractinia) de recifes do sul da Bahia.* 25p. Monografia (Bacharelado em Biologia Marinha) - Instituto de Biologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

7. PIRES, D.O.; CASTRO, C.B.; RATTO, C.C. 1999. *Marine Biology*, 135:463-471.

Período da desova/ planulação	Observações, duração e horário da desova/ planulação	Fonte
Mensal.	Observações somente em lâminas histológicas.	¹
Mensal (16°S, 18°S, 22°S).	Observações de planulação iniciando-se três dias depois da lua nova, no dia do quarto crescente ou até um dia antes da lua cheia, por 7 a 15 dias consecutivos e ao longo do dia todo (16°, 18° e 22°S).	^{2,3} , dados inéditos aqui incluídos.
Abril-maio (16°S - 18°S, 23°S)	Observações de pico reprodutivo somente em lâminas histológicas. Características de espécie incubadora.	^{4,5}
Fevereiro-março (indicação por histologia, 18°S), dois meses consecutivos entre fevereiro e abril (desovas observadas em aquários e tanques, 16°S)	Desovas observadas desde um dia antes da lua cheia até 13 dias depois (16°S), com maior número de observações entre o terceiro e o sétimo dia, entre 20:10h e 22:45h.	⁶ , dados inéditos aqui incluídos.
Janeiro-abril. Até dois meses consecutivos (16°S - 18°S)	Observações de pico reprodutivo em lâminas histológicas (18°S). Desovas observadas de 5 dias antes a 5 dias depois da lua nova, entre 2 e 9 dias consecutivos, entre 19:20h e 21:00h (16°S). Ver Figura 6.	⁷ , dados inéditos aqui incluídos.
Até dois meses consecutivos entre setembro e novembro (08°S, 16°S-18°S)	Observações de pico reprodutivo em lâminas histológicas (18°S). Desovas observadas de 5 dias antes a 5 dias depois da lua nova, entre 1 e 10 dias consecutivos, entre 17:50h e 19:45h (16°S). Ver Figura 6.	⁷ , dados inéditos aqui incluídos.
Até três meses consecutivos entre agosto e novembro (16°S); entre abril e junho (18°S); entre fevereiro e março (23°S); abril (24°S)	Observações de pico reprodutivo em lâminas histológicas (18°S, 23°S). Em 24°S, desova de algumas colônias observada 5 dias antes da lua nova. Desovas observadas de 7 dias antes a 5 dias depois da lua nova, observadas entre 1 e 10 dias consecutivos de desova, entre 18:07h e 19:35h, (16°S). Ver Figura 6.	^{7,8,9} , dados inéditos aqui incluídos.
Novembro-fevereiro (18°S)	Observações de gametas maduros, embriões e plânulas somente em lâminas histológicas.	¹⁰
Agosto-dezembro (18°S)	Observações de gametas maduros, embriões e plânulas somente em lâminas histológicas.	¹¹
Fevereiro-março (03°S, 08°S, 13°S, 16°S, 18°S); dezembro-janeiro, abril (23°S)	Observação de pico reprodutivo e plânulas em lâminas histológicas de material no período de fevereiro-março (03°S, 08°S, 13°S, 16°S, 18°S). Observação de planulação em laboratório de material de dezembro-janeiro (lua minguante), abril (da lua nova à lua crescente (23°S).	^{12, 13, 14}

8. NEVES, E.G.; PIRES, D.O. 2002. *Coral Reefs*, 21:161-168.

9. FRANCINI, C.L.B.; CASTRO, C.B.; PIRES, D.O. 2002. *Invertebrate Reproduction & Development*, 42(1):17-19.

10. PIRES, D.O.; CAPARELLI, A.C. 2002. *Boletim do Museu Nacional, Nova Série, Zoologia*, 484:1-12.

11. PIRES, D.O.; CASTRO, C.B.; RATTO, C.C. 2002. *Proceedings of the 9th International Coral Reef Symposium*, Bali, 1:381-384.

12. LINS-DE-BARROS, M.M.; PIRES, D.O.; CASTRO, C.B. 2003. *Bulletin of Marine Science*, 73(3):713-724.

13. LINS-DE-BARROS, M.M.; PIRES, D.O. 2007. *Brazilian Journal of Oceanography*, 55(1):67-69.

14. NEVES, E.G.; DA SILVEIRA, F.L. 2003. *Hydrobiologia*, 501:139-147.

Os corais-cérebro (Gênero *Mussismilia*)

Os ciclos reprodutivos das três espécies de coral-cérebro (*Mussismilia*) estudadas são semelhantes e duram aproximadamente 11 meses. Há um período curto entre os ciclos consecutivos em que não há atividade reprodutiva, pois os mesentérios estão se recuperando da ruptura de suas paredes por ocasião da desova. Os gametas masculinos e femininos ocorrem no mesmo mesentério, iniciando seu desenvolvimento em épocas diferentes. Os cistos espermáticos, que abrigam espermatozoides, surgem aproximadamente no oitavo mês do desenvolvimento dos ovócitos e, portanto, seu desenvolvimento tem duração de cerca de três meses. Assim, ambos atingem a maturidade em sincronia, e a desova acontece. Quando estão totalmente maduros, a parede dos mesentérios se rompe, e os ovócitos e espermatozoides são liberados para dentro da cavidade gastrovascular dos pólipos, onde ficam envoltos por uma camada de muco. Nos dias de desova, pacotes de ovócitos e espermatozoides (em inglês *bundles*) são liberados pelas bocas dos pólipos (Figura 5), sobem e flutuam. Ovócitos e espermatozoides se separam com o movimento da água e, após um tempo, é iniciada a fecundação cruzada, onde o ovócito de uma colônia é fecundado pelo espermatozoide de outra colônia. Ainda não se sabe se pode ocorrer a autofecundação.



Figura 5. Desova do coral-couve-flor (*Mussismilia harttii*). Note o pacote de ovócitos (bolinhas laranja) e os espermatozoides (grumos branco).

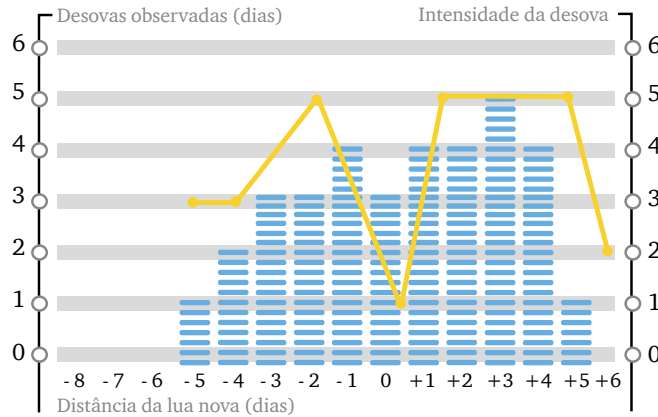
As três espécies de *Mussismilia* apresentam períodos de, pelo menos, dois a três meses consecutivos de desova por ano (Tabela 1), ditados pela fase da lua. Assim, essas épocas são previsíveis (Figura 6). Em diferentes anos foram observados em Porto Seguro (BA, Brasil) (16°S) desovas simultâneas do coral-cérebro-comum (*M. hispida*) e do coral-couve-flor (*M. harttii*). Apesar do número limitado de colônias e do fato de nem todas desovarem no mesmo período, cerca de um terço dos dias em que ocorreu desova de pelo menos uma dessas espécies em viveiros do Coral Vivo, a outra também desovou. Assim, é possível ocorrer hibridização, embora não haja confirmação disso ainda. Por outro lado, o exame de lâminas histológicas de espécimes de Abrolhos (BA, Brasil) (18°S), sugeriram que *M. hispida* pode apresentar um período de sobreposição de desova com *M. braziliensis* nessa área. Mais estudos são necessários para entender essa variação temporal dos períodos de desova da *M. hispida*, que também desova em épocas diferentes em outras áreas (Tabela 1).

Ao contrário do coral-cérebro-comum, uma sincronia marcante da época de desova ocorre com o coral-couve-flor (*M. harttii*). Em locais distantes cerca de 1.200km um do outro, foram observadas colônias desovando no mesmo dia e hora em aquários em Tamandaré (PE, Brasil), em aquários e viveiros na Base de Pesquisas do Coral Vivo, em Arraial d'Ajuda, e no mar no Arquipélago dos Abrolhos (BA, Brasil), demonstrando grande sincronia do relógio biológico da espécie.

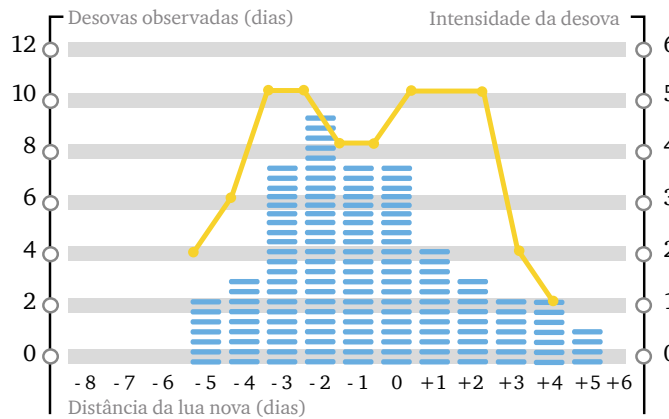


15. Desova dos corais-cérebro brasileiros. Dias de distância da lua nova, onde 0 = dia da lua nova. “Desovas observadas” indicam o número de vezes em que a desova foi observada naquele dia relativo à lua nova, em geral, em anos diferentes. “Intensidade da desova” é uma indicação do volume de pacotes de gametas e/ou número de colônias observadas desovando em viveiros ou aquários, de acordo com a seguinte situação: (0) desova não observada; (1) fraca, até 10 pacotes no total; (2) pequena, com 11 a 50 pacotes; (3) regular, com 51 a 100 pacotes; (4) forte, com 101-200 pacotes; (5) muito forte, com mais de 200 pacotes. Notar que essa intensidade é apenas um indicativo, pois o número de colônias disponíveis variou a cada período de desova.

Coral-cérebro-da-bahia (*Mussismilia braziliensis*)



Coral-couve-flor (*Mussismilia harttii*)



Coral-cérebro-comum (*Mussismilia hispida*)

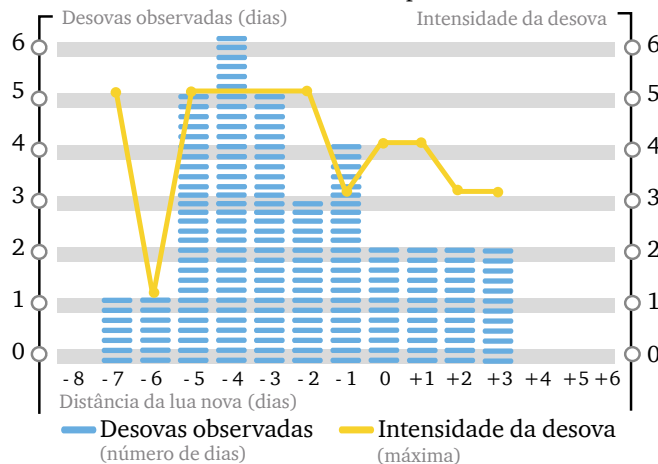


Figura 6. Desova dos corais cérebro (*Mussismilia* spp.)¹⁵.

A reprodução apresenta menos tolerância ao estresse do que outras funções vitais. Dessa forma, a fecundidade pode ser usada como um indicador sensível de perturbações subletais nos recifes porque é a primeira função a ser prejudicada. Considera-se aqui a fecundidade como o número de ovócitos produzidos em uma estação reprodutiva. Esses dados fornecem um retrato da atividade reprodutiva em um período determinado. Assim, eles podem ser comparados em anos subsequentes ou após algum impacto ambiental. A partir do conhecimento gerado sobre o pico reprodutivo, alguns estudos sobre fecundidade de corais puderam ser realizados. Uma das espécies estudadas foi o coral-cérebro-da-bahia (*Mussismilia braziliensis*) coletado no Complexo Recifal dos Abrolhos¹⁶. A fecundidade média do pólipo foi de 338,7 ovócitos ($\pm 73,5$ DP), e o número máximo de ovócitos observado em um pólipo foi de 987. Pólipos maiores produziram mais ovócitos. Assim, a fecundidade aumentou com o tamanho do pólipo e o número de seus mesentérios.

Observações esparsas sobre a fecundidade do coral-couve-flor (*Mussismilia harttii*) mostraram que a espécie pode apresentar cerca de 26 a 112 ovócitos por pacote de gametas liberado (56 ± 27 DP). Ressalta-se que um único pólipo pode liberar mais de um pacote nos dias de desova. Testes realizados sobre o tempo máximo de atividade de espermatozoides do coral-couve-flor – ou seja, por quanto tempo continuam ativos – demonstraram que eles podem apresentar mobilidade até quase 10 horas após a desova e, potencialmente, ainda serem capazes de fecundar um ovócito. Já que as características do ciclo reprodutivo e das células sexuais dos corais-cérebro estudados são iguais, acredita-se que os espermatozoides de todos continuem viáveis por tempos aproximadamente semelhantes. Embora características de cada local variem, pode-se deduzir que o espermatozoide potencialmente poderia atingir até quase 4km de distância ainda viável pela multiplicação da duração do espermatozoide pelo movimento das massas d'água superficiais ao largo da Bahia¹⁷. Tendo em vista que, em geral, a larva assenta até dez dias após a desova, ela poderia dispersar por quase 100km antes de assentar no fundo. Dependendo do momento (época do ano e, em especial, intensidade e duração do vento), essas distâncias poderiam cair para pouco mais de 1km para os espermatozoides e

16. PIRES, D.O.; SEGAL, B.; CAPARELLI, A.C. 2011. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 91(8): 1613 – 1616.

17. AMORIM, F.N.; CIRANO, M.; MARTA-ALMEIDA, M.; MIDDLETON, J.F.; CAMPOS, E.J.D. 2013. *Continental Shelf Research*, 65:121-140.

18 LINS-DE-BARROS, M.M.; PIRES, D.O. 2007. *Brazilian Journal of Oceanography*, 55:67-69.

19. Fenômeno oceanográfico onde as águas frias do fundo chegam próximas à superfície afetando a temperatura das águas rasas.

20. LINS-DE-BARROS, M.M.; PIRES, D.O. 2006. *Brazilian Journal of Oceanography*, 54:213-223.

21. LINS-DE-BARROS, M.M.; PIRES, D.O. 2006. *Invertebrate Reproduction & Development*, 49:237-244.

pouco menos de 30km para as larvas. Essas informações indicam que são necessários recifes saudáveis e protegidos a curtas distâncias uns dos outros para a manutenção de seus importantes serviços ambientais.

Os corais-pedra-fêmea (gênero *Siderastrea*)

O coral-pedra-fêmea ou coral-estrelinha (*Siderastrea stellata*) exibe uma notável sincronia na maturação de ovócitos ao longo de cerca de 1.500km na costa brasileira (de Pernambuco ao Espírito Santo), com o período de planulação restrito ao verão¹⁸. Em Armação dos Búzios (RJ, Brasil), próximo ao limite Sul de ocorrência da espécie, esse período parece começar um pouco mais cedo, sendo influenciada por águas frias de ressurgência¹⁹. A fecundidade média do pólipo de *Siderastrea stellata* variou entre áreas do litoral brasileiro. No mesmo período de pico reprodutivo da espécie (24 a 29 de janeiro de 2001), a maior fecundidade observada por pólipo foi em Guarapari (ES, Brasil) ($83 \pm 30,3$ DP), tendo sido intermediária em Fernando de Noronha (PE, Brasil) ($38 \pm 27,5$ DP) e Salvador (Bahia, Brasil) ($31 \pm 12,6$ DP), e menores em Tamandaré (PE, Brasil) ($6 \pm 6,6$ DP) e na Ponta do Corumbau (BA, Brasil) ($8 \pm 8,0$ DP).

Outro estudo analisou colônias dos Recifes Itacolomis (Ponta do Corumbau) e comparou quatro classes de tamanho: (1) até 5cm², (2) de 5,1 a 50cm², (3) de 50,1 a 125cm², (4) raras colônias com mais que 125cm². A Classe 2 foi a mais abundante, e estimou-se que essas colônias podem chegar a cerca de 50 anos de idade. As colônias menores (Classe 1) apresentaram uma fecundidade significativamente menor do que as outras três classes, que não apresentaram diferenças entre elas. Foi verificado também que o número de pólipos maduros tende a aumentar com o tamanho da colônia. Os primeiros gametas do coral-pedra-fêmea ocorreram em colônias com três anos de vida, com a planulação ocorrendo no quarto ano. As colônias menores que 1,8cm de diâmetro (ou 2,5cm²) não apresentaram gametas^{20,21}. A presença de colônias grandes (= taxa de mortalidade baixa), fecundidade alta e grande longevidade indicaram baixa probabilidade de extinção local da espécie. Porém, distúrbios que diminuam

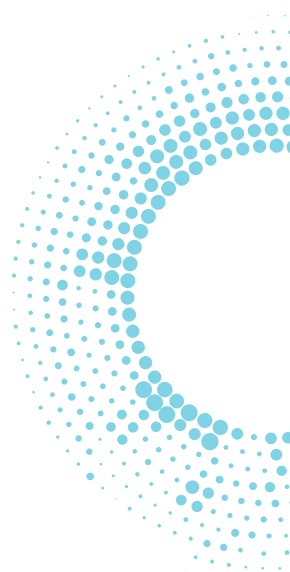
a colônia (mortalidade parcial) para menos de 20cm² (10 anos) podem reduzir a perspectiva de manutenção da população, porque abaixo disso a fecundidade máxima ainda não foi atingida.

Observações em laboratório de três colônias vivas de coral-pedra-fêmea, coletadas em Arraial do Cabo (RJ, Brasil), constataram a ocorrência de planulação em dois períodos distintos: 28 de janeiro e 10 de abril de 2000. Esses eventos duraram 48 horas. As plânulas liberadas pela boca assentaram após 48 horas. Houve fusão de larvas de uma mesma colônia. Apesar dos ovócitos maduros não apresentarem zooxantelas, elas estavam presentes em faixas na epiderme das larvas recém-liberadas. Possivelmente a aquisição das zooxantelas se dá dentro do pólipó parental, durante o desenvolvimento embrionário²².

O coral-casca-de-jaca (*Montastraea cavernosa*)

Além das informações contidas na Tabela 1, observamos que os ciclos reprodutivos dessa espécie são anuais, durando cerca de 11 meses⁶. Verificamos liberações de gametas do coral-casca-de-jaca em aquários da Base de Pesquisas Coral Vivo, em Arraial d'Ajuda, de 6 a 9 de fevereiro e de 7 a 8 de março de 2007, quatro dias após as luas cheias dos respectivos meses. Os eventos ocorreram das 21:00h às 22:20h em fevereiro, e das 20:45h às 21:30h, em março. As liberações tiveram intensidades e durações diferentes, tendo sido a de março mais intensa. Na primeira, em fevereiro, só foram observadas colônias fêmeas desovando, e na segunda, em março, foram observadas colônias de ambos os sexos liberando gametas em sincronia.

22. NEVES, E.G.; DA SILVEIRA, F.B. 2003. *Hydrobiologia*, 501:139-147. 237-244.



23. FERREIRA, M.C.C.S. 2009. *Biologia Reprodutiva de Phyllogorgia dilatata Esper, 1806 (Cnidaria, Anthozoa, Octocorallia) de recifes do Sul da Bahia*. 82p. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas - Zoologia) - Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

24. SILVEIRA, F.L. 1986. *Aspectos da biologia de Lophogorgia punicea (Milne-Edwards, 1857) (Gorgonacea, Gorgonidae) do canal de São Sebastião, Estado de São Paulo*. 211p. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas - Zoologia) - Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, Brasil.

25. BARBOSA, T.M.; GOMES, P.B.; BERGERON, A.-S.; SANTOS, A.M.; CHAGAS, C.; FREITAS, E.M.S.; PEREZ, C.D. 2014. *Hydrobiologia*, 724(1):201-212.

As gorgônias: orelha-de-elefante (*Phyllogorgia dilatata*); gorgônia-vermelha (*Leptogorgia punicea*); coral-tubo (*Carijoa riisei*)

As três espécies de octocorais com reprodução conhecida no Brasil (a orelha-de-elefante *Phyllogorgia dilatata*²³; a gorgônia-vermelha *Leptogorgia punicea*²⁴ e o coral-tubo *Carijoa riisei*²⁵) são gonocóricas, possuem colônias macho e colônias fêmea. Todas apresentam reprodução contínua, com a presença de vários estágios de desenvolvimento de gametas simultaneamente ao longo de todo o ano.

Observações em aquários da Base de Pesquisas do Coral Vivo confirmaram que a orelha-de-elefante é incubadora de plânulas. Através de monitoramentos pontuais de colônias vivas para acompanhamento de seu comportamento reprodutivo, verificou-se a liberação de plânulas a partir de 10 de outubro de 2008 (quatro dias antes da lua cheia). O fenômeno ocorreu em momentos variados do dia, durante 13 dias consecutivos (até dois dias depois do quarto minguante). As larvas observadas eram relativamente grandes, e a maior tinha 1,6mm de comprimento por 0,6mm de largura. Zooxantelas estavam ausentes de todos os ovócitos examinados, que podem atingir 0,47mm, indicando que devem ser adquiridas durante a embriogênese, que ocorre dentro das colônias parentais.

O coral-tubo é um liberador de gametas, com desovas assíncronas ao longo de todo o ano. Possui ovócitos muito grandes (até 0,6mm). As colônias fêmeas apresentaram cerca de 37% de pólipos com gônadas maduras, cada pólipos apresentando em média $3,5 \pm 2,4$ ovócitos. As colônias macho apresentaram em média 49% dos pólipos com gônadas maduras.

Conclusão

O presente capítulo mostra que houve um grande avanço no conhecimento sobre a reprodução de corais, especialmente corais-verdadeiros, no Brasil. A partir desses dados e com a possibilidade de dispor de larvas de corais, através de fecundação *in vitro* ou de planulações, diversos outros tipos de experimentos foram viabilizados e começaram a ser realizados, como o efeito das mudanças climáticas e de poluição sobre os primeiros estágios de vida desses organismos.

Agradecimentos

A todos que ajudaram nas mais diversas etapas para o conhecimento da reprodução dos corais brasileiros. Infelizmente, não é possível nomear as dezenas de pessoas que ajudaram em mais de 15 anos de trabalhos de coleta, processamento e exame de material, monitoramentos no campo e atividades na Base de Pesquisas Coral Vivo, no Arraial d'Ajuda Eco Parque.

Literatura recomendada

FAUTIN, D.G. 2002. Reproduction of Cnidaria. *Canadian Journal of Zoology*, 80:1735-1754.

HARRISON, P.L. 2011. Sexual Reproduction of Scleractinian Corals. p.59-85 in DUBINSKI, Z.; STAMBLER, N. (Eds) *Coral reefs: an ecosystem in transition*. New York: Springer.

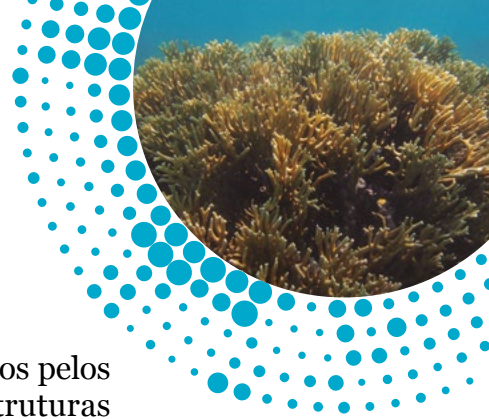
VENTURA, C.R.R.; PIRES, D.O. 2009. Ciclos de Vida de Invertebrados Marinhos. p. 71-94 in PEREIRA, R.C.; SOARES-GOMES, A. (Orgs) *Biologia Marinha*. Rio de Janeiro: Interciência.

Renovação de comunidades coralíneas em recifes

Cristiano M. Pereira, Alexandre Schiavetti, Emiliano N. Calderon

Os recifes de coral são primariamente constituídos pelos esqueletos sobrepostos dos corais recifais. As estruturas calcárias de outros organismos – como algas calcárias, moluscos, crustáceos e equinodermos – também contribuem para a formação desses ambientes, mas em proporções bem menores. Assim, pode-se dizer que o recife é formado principalmente pela sobreposição de diversas gerações de colônias de corais e outros organismos. Na porção mais superficial da estrutura recifal, são encontrados os corais vivos, que mantêm o recife e promovem seu crescimento.

Os corais recifais crescem lentamente, na ordem de apenas alguns milímetros por ano, e podem chegar a atingir algumas centenas de anos de idade. Entretanto, a taxa de crescimento e longevidade é dependente da espécie e das condições ambientais a que ela está exposta. Devido ao lento crescimento e à grande longevidade dos corais, as comunidades coralíneas podem manter uma mesma estrutura por anos; entretanto, as populações desses corais não são estáticas. Esses organismos estão sujeitos às pressões competitivas, ambientais e do próprio tempo que, em algum momento, resultarão na morte de indivíduos. Portanto, a manutenção e a perpetuação das comunidades coralíneas dependem de uma constante inclusão de novos indivíduos, por reprodução sexuada ou assexuada, que, de certa forma, substituam os indivíduos perdidos pelas diferentes causas de mortalidade. A proporção entre a mortalidade de corais adultos e a chegada de novos indivíduos – juntamente com suas taxas de crescimento – irá determinar se o ambiente coralíneo está se desenvolvendo ou se retraindo.



Os corais podem se reproduzir de forma sexuada ou assexuada¹. Independentemente da forma de reprodução, a maioria dos casos implica na produção de uma larva livre-natante (de vida livre e que possui capacidade de natação) em algum momento do ciclo reprodutivo. É durante a fase larval que ocorre a dispersão e consequente colonização de novos ambientes, uma vez que os corais assumem uma forma de vida sésstil depois que se fixam ao substrato, normalmente permanecendo ali pelo resto da vida. A sobrevivência dos novos indivíduos – desde o início da vida planctônica, na forma de larva ou gametas, até atingir o estado de coral juvenil estabelecido no ambiente recifal – é influenciada por fatores tanto físicos como biológicos, refletindo diretamente na distribuição desses organismos no ambiente recifal. Devido à ação de tais fatores, o número de larvas que chegam a se fixar ao substrato, posteriormente atingindo o estado de juvenil, é muito pequeno quando comparado ao total de larvas produzidas.

Há diversos fatores que determinam aonde e em qual quantidade os novos indivíduos das diferentes espécies de corais irão se estabelecer. Esses aspectos serão abordados mais adiante. Entretanto, neste momento, é importante ter em mente que a chegada de novos indivíduos nas populações coralíneas varia no tempo e no espaço. Essa variação no estabelecimento dos novos indivíduos resulta em uma estrutura de comunidade recifal que também apresentará uma variação espacial e temporal. Mas, para que seja possível compreender como a renovação da comunidade coralínea pode alterar sua estrutura, primeiramente é preciso entender como as comunidades coralíneas se renovam.

O tempo de vida da larva na coluna d'água é influenciado em grande parte pelo modo de desenvolvimento. As espécies liberadoras, que jogam os gametas diretamente na água onde ocorre a fecundação, geralmente têm um tempo de vida maior. Isso porque a fecundação e o desenvolvimento embrionário até a larva estar formada e pronta para se assentar levam um tempo consideravelmente maior que o requerido pelas espécies incubadoras, cuja fecundação é interna, a larva já está formada no momento da liberação. Com isso, as larvas das espécies liberadoras têm o potencial de alcançar maiores distâncias pela maior duração da vida planctônica. O sucesso dos processos de reprodução e desenvolvimento na coluna d'água é consideravelmente menor do que quando ocorre no interior de cavidades ou tecidos do organismo. A probabilidade de encontro entre os gametas masculinos e femininos na imensidão do oceano é muito menor que no interior do organismo. Além disso, na coluna d'água, gametas e larvas estão expostos, por exemplo, à predação por uma grande diversidade de organismos. Dessa forma, as espécies de corais liberadores geralmente produzem grande quantidade de gametas. Já as larvas das espécies incubadoras são maiores e têm um crescimento mais rápido, algumas já sendo liberadas pela colônia parental com zooxantelas². Essas larvas, quando liberadas na coluna d'água, já estão aptas (ou se tornam rapidamente aptas) a se assentar no substrato. Com isso, o tempo de permanência na coluna d'água é menor, reduzindo igualmente sua exposição a pressões como a predação, e aumentando a probabilidade de alcançarem um substrato apropriado para assentamento. Portanto, a sobrevivência das larvas de espécies incubadoras tende a ser maior. Por outro lado, o investimento energético para gerar larvas que são liberadas já formadas na coluna d'água é consideravelmente maior e, assim, é produzida uma quantidade menor de larvas pelas espécies incubadoras. A fase planctônica dos corais-cérebros (gênero *Mussismilia*)³, espécie liberadora, dura no mínimo sete dias, enquanto que as larvas do coral-estrelinha (gênero *Siderastrea*)⁴, espécie incubadora, podem se assentar poucas horas após liberadas e, em geral, morrem após quatro dias, caso não se fixem ao substrato. Apenas 1/3 das espécies de corais recifais do mundo tem seu modo de desenvolvimento conhecido, mas a maioria parece ser liberadora.

2. Ver GARRIDO et al. (2016), capítulo 6 deste volume.

3. Ver figura 1 em PIRES et al. (2016), capítulo 8 deste volume.

4. Ver figura 2 em PIRES et al. (2016), capítulo 8 deste volume.

Na coluna d'água, as larvas estão expostas a diversas pressões, tanto físicas quanto biológicas. Apesar da capacidade natatória, elas não têm força suficiente para vencer correntes – mesmo que fracas. Sua movimentação tem um papel mais efetivo no transporte vertical. Ou seja, tem a capacidade de nadar em direção à superfície ou ao fundo, podendo migrar entre camadas de água, além de determinar o momento de descida ao fundo para o assentamento. Assim, o transporte horizontal das larvas é realizado pelas correntes que, em grande parte, determinam para onde elas irão se dispersar. Quanto maior é o tempo de duração da vida planctônica, maior é a probabilidade de as correntes locais levarem as larvas para longe de um local adequado para o assentamento – o que irá resultar em sua perda. Portanto, espécies incubadoras com vida planctônica mais curta tendem a ter maior taxa de sucesso em comparação com espécies liberadoras de gametas.

Em recifes brasileiros, foi observada uma relação aparente entre a fecundidade (quantidade de gametas em uma estação reprodutiva)¹ e o recrutamento de corais. Isso não significa necessariamente que nos locais onde tenha sido observada essa relação os recrutas de corais encontrados sejam de origem local. Considerando que existe o período de dispersão, as larvas geradas em determinado local têm o potencial de se tornarem recrutas em regiões distantes até 200km do local de origem, dependendo da espécie em questão e da velocidade das correntes marinhas. Portanto, recifes relativamente próximos estão conectados biologicamente uns aos outros. Essa conectividade biológica entre os recifes pode variar, dependendo de fatores físicos – como a dinâmica das correntes locais e a estabilidade da salinidade e da temperatura – e biológicos – como o modo de desenvolvimento dos corais, seja incubador ou liberador, e o tempo de duração das larvas na coluna d'água. Com isso, em teoria, larvas de corais geradas no Parque Natural Municipal do Recife de Fora (BA, Brasil) poderiam alcançar e colonizar os recifes de Abrolhos (BA, Brasil), locais distantes cerca de 200km.

Chegado o momento do assentamento, as larvas procuram locais para se fixarem. Diversos mecanismos podem desencadear esse processo. Os de origem endógena (internos aos organismos) estão relacionados, por exemplo, ao consumo das reservas energéticas da larva e ao desenvolvimento fisiológico que ocorre durante a vida planctônica. Já os de origem exógena (externos aos organismos) estão relacionados à percepção, por parte da larva, de um ambiente favorável para seu desenvolvimento. São exemplos de estímulos a busca por uma intensidade de luz adequada para a fotossíntese das zooxantelas ou mesmo uma atração por locais com pouca luz como mecanismo de se assentar em local protegido. Pelo menos para a intensidade e a qualidade da luz, as faixas ótimas para as larvas são as mesmas dos corais adultos. Além da luz, o hidrodinamismo (movimentação da água causada por ondas e correntes), a presença de determinadas substâncias químicas, os microrganismos, os organismos coespecíficos ou os competidores potenciais podem estimular ou inibir o assentamento das larvas. Diversos microrganismos e algumas espécies de algas calcárias podem estimular a fixação das larvas dos corais no substrato. Já o coral mole baba-de-boi (gênero *Palythoa*) (Zoantharia: Sphenopidae) produz uma toxina que inibe a fixação das larvas de vários organismos, inclusive os corais. As algas, que normalmente competem com os corais por espaço no substrato, possuem um crescimento muito rápido, podendo dominar o substrato e, assim, impedir o assentamento larval. Caso essas algas não sejam consumidas por organismos herbívoros, como peixes e ouriços, suas populações podem entrar em descontrole, crescendo em excesso, e chegar a dominar uma área toda. Sem espaço disponível para a fixação e o desenvolvimento das larvas dos corais, o recife pode parar de se desenvolver, caracterizando um desequilíbrio no ambiente. Em recifes do Caribe, o aumento de recrutas de corais em áreas marinhas protegidas ocorreu devido ao aumento de peixes-papagaio que mantinham as algas sob controle.

As larvas tocam o substrato como se experimentassem as condições do local no momento do assentamento. Caso a larva não o aprove, ela irá experimentar outro lugar, até encontrar o mais bem adequado. Feita a escolha, ela passa pela metamorfose da larva para o pólipó, assim como a lagarta se transforma em borboleta. No caso dos corais, as larvas, que são alongadas e não possuem boca, fixam-se ao substrato e dão origem ao pólipó fundador, que é arredondado e possui boca e tentáculos. Apesar de os corais ocorrerem em regiões com características peculiares, algumas espécies têm maior tolerância às variações ambientais do que outras. Além disso, as diferentes espécies podem ter exigências ambientais distintas. Lugares mais ou menos iluminados – ou com maior ou menor sedimentação – podem ser mais propícios para determinada espécie. A diferença nas condições ambientais exigidas pelas diversas espécies, assim como sua tolerância às variações dessas condições, explica porque determinadas espécies ocorrem em algumas regiões ou locais do recife. As variadas respostas das larvas aos estímulos indutores ou inibidores do assentamento podem desempenhar um papel importante nos padrões de distribuição dos adultos.

Normalmente, as larvas recém-assentadas – que passaram pela metamorfose para a forma de pólipó fundador – sofrem altas taxas de mortalidade. Os mecanismos de seletividade da larva por determinado local para assentamento nem sempre acertam o local realmente adequado para seu desenvolvimento e sobrevivência. Além disso, devido a seu pequeno tamanho e estágio inicial de desenvolvimento, o recém-assentado é muito susceptível à predação por outros invertebrados e também a interações competitivas por espaço, sendo muitas vezes recoberto por outros organismos. Assim como o assentamento, que não ocorre de maneira uniforme sobre o substrato e ao longo do tempo, a mortalidade dos recém-assentados apresenta uma heterogeneidade espacial e temporal. Fatores como o padrão de distribuição de predadores e competidores, e a heterogeneidade do ambiente, causada pela profundidade, complexidade morfológica do recife de coral, exposição a ondas e correntes, entre outros, estão entre as principais determinantes das variações de mortalidade de recém-assentados. Depois desse período de altas taxas de

mortalidade, os juvenis sobreviventes começam a ser denominados de recrutas. Recentemente, foi observado pela Rede de Pesquisas Coral Vivo que os recrutas das diferentes espécies de corais brasileiros que ocorrem nas piscinas recifais do Parque Natural Municipal do Recife de Fora podem estar em substratos com uma inclinação específica. Esse padrão já fora observado anteriormente em corais adultos nos recifes de Abrolhos, o que exemplifica a importância dos processos de recrutamento. O resultado do recrutamento pode ser o somatório do padrão de seletividade das larvas de cada espécie de coral por determinada inclinação, com uma mortalidade diferencial (menor) em determinado ângulo de substrato, resultando assim no padrão observado.

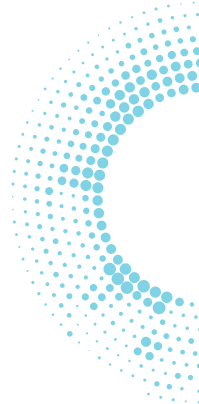
A sedimentação é um dos fatores físicos mais estudados quanto a seu efeito na biologia dos corais recifais e pode ter influência na inclinação do substrato onde ocorrem os corais. Em várias regiões do mundo, altas taxas de sedimentação têm sido apontadas como responsáveis pela inibição da fertilização, redução da sobrevivência das larvas e soterramento dos recrutas. As partículas em suspensão podem fazer com que os ovócitos se agreguem – o que acaba reduzindo as chances de que sejam fecundados. Além disso, partículas de sedimento também podem danificar fisicamente os espermatozóides e as larvas; entretanto, não parecem alterar o desenvolvimento dos embriões. No momento do assentamento, as larvas já formadas dos corais podem ter dificuldade de se estabelecer em locais cobertos por sedimentos. Vale ressaltar que o tamanho e a qualidade do material em suspensão também são fatores importantes.

Antes de se depositar sobre o recife, o sedimento em suspensão influencia outros fatores físicos, como a penetração de luz. Muitas vezes é observada uma relação entre a taxa de sedimentação, o sedimento em suspensão e a capacidade de penetração da luz na coluna d'água. Em locais e momentos com grande quantidade de sedimento em suspensão, a penetração de luz pode ser reduzida a poucos metros ou mesmo centímetros. Entretanto, a relação entre sedimento em suspensão e deposição desses sedimentos não é direta, sendo dependente de suas características (granulometria e mineralogia) e do padrão de movimentação da água, que pode ou não favorecer sua deposição. Nos locais e/ou situações de menor luminosidade, as larvas tendem a se fixar em substratos com menor inclinação (mais próximo do horizontal), possivelmente devido à necessidade de maior aproveitamento da pouca luz disponível. Por outro lado, em tal situação é que ocorre o maior risco de dano causado pela deposição de sedimento. Em recifes onde as taxas de sedimentação são moderadas ou elevadas, o assentamento muitas vezes fica restrito a substratos com maiores inclinações – com posição próxima do vertical ou com inclinação negativa (“de cabeça para baixo”). Entretanto, nesses locais, os recrutas tendem a ter um crescimento mais lento devido à menor disponibilidade de luz. Os recifes brasileiros estão muitas vezes distribuídos em regiões com altas taxas de sedimentação e sedimentos em suspensão, quando comparados aos recifes de outras partes do mundo, como Caribe e Indo-Pacífico. Assim, as espécies presentes nos recifes brasileiros têm que estar adaptadas a um ambiente com tais características. Entre os mecanismos de adaptação, pode-se mencionar a produção de grande quantidade de muco, o que ajuda na retirada do sedimento sobre a colônia. É possível que um dos fatores responsáveis pela baixa diversidade e pela alta taxa de endemismo dos recifes brasileiros seja justamente a alta taxa de sedimentação e sedimentos em suspensão encontrados neles.

As diversas espécies de corais são muitas vezes encontradas em pequenos agrupamentos de colônias, um tipo de distribuição conhecido como “em manchas”, ou “em agregado”, muito observado nos organismos de substratos duros, como costões rochosos e recifes de coral. Esse padrão de distribuição é resultado de complexas interações entre fatores físicos e biológicos, como os já apresentados, que no caso dos corais recifais agem principalmente durante as fases iniciais do ciclo de vida. O grande número de combinações entre os fatores físicos e biológicos pode gerar um mosaico de manchas que irá refletir na diversidade de organismos e de associações bentônicas. Porém, esse padrão de distribuição é dependente da escala espacial observada, pois o tamanho desses agregados e sua frequência ao longo do ambiente é consideravelmente variável. Agregados de corais recifais podem ocorrer na escala de centímetros a quilômetros.

Os organismos bênticos dos recifes de coral e suas associações também estão submetidos aos diferentes níveis de intensidade desses fatores físicos e biológicos, isso pode determinar os principais responsáveis pelo padrão de distribuição observado. Isso significa que, por exemplo, quando as associações bentônicas estão sob forte influência da ação de ondas, esse pode ser o principal fator determinando sua distribuição. Por outro lado, em um ambiente mais abrigado, com menor ação de ondas, as interações biológicas – como competição por espaço e predação – podem ser as principais responsáveis pelo padrão de distribuição observado.

O padrão de agregação também costuma apresentar uma variabilidade temporal em sua composição e abundância. Entretanto, considerando a longevidade e o lento crescimento dos corais recifais, as alterações temporais podem necessitar de anos para serem detectadas. Assim, muitas vezes não são observadas variações sazonais. O padrão das manchas e sua variabilidade resultam de contínuas perturbações ao acaso (estocásticas), causadas por fatores físicos e por interações biológicas que excluem ou impedem o estabelecimento das populações numa determinada área, originando manchas.



O efeito de uma determinada perturbação sobre o substrato vai depender de sua natureza física ou biológica, da intensidade, amplitude, periodicidade, grau de previsibilidade, estabilidade do substrato e dos organismos envolvidos. A partir da defaunação de uma determinada área do fundo – que pode ser resultado da morte de uma ou de diversas colônias de coral – segue o processo de recolonização, que varia ao longo do tempo, a partir de complexas interações biológicas. Esse processo inclui o sucesso do recrutamento, as estratégias de vida, as espécies oportunistas *versus* as espécies em equilíbrio, a competição por interferência, a predação e a bioperturbação: tudo mediado pelos efeitos físicos. Nisso resulta que diferentes áreas apresentam distintos níveis de abundância, composição e diversidade de organismos, dependendo do tempo em que ocorreu a última perturbação, do grau de estabilidade do substrato e da história natural dos organismos envolvidos.

Todos os aspectos apresentados mostram a importância da fase inicial do ciclo de vida dos corais em sua distribuição e estruturação nas comunidades coralíneas. Impactos humanos locais que modifiquem as condições ambientais podem ter efeitos negativos nos processos de recrutamento e, conseqüentemente, na reposição de corais em escalas regionais. Muitas vezes os pesquisadores se acostumam a perceber e avaliar os impactos humanos pela medição de quantos organismos adultos foram sacrificados localmente, esquecendo de pensar em quantos “filhotes” deixaram de ser produzidos regionalmente! Além disso, a degradação dos recifes em larga escala (e conseqüentemente dos corais reprodutores) produzem um efeito de retroalimentação, já que essa degradação diminui o recrutamento, que, por sua vez, reduz a quantidade de adultos. Não existe uma fonte inesgotável de larvas, elas vêm de corais adultos, maduros e saudáveis. Para que os recifes continuem a existir, novos recrutas de corais precisam ser gerados de forma relativamente contínua. Quando a renovação de indivíduos para de acontecer, os recifes ficam gravemente sujeitos ao desaparecimento. Nas últimas décadas, reduções nas taxas de aporte de larvas e recrutamento têm sido observadas em diversas partes do mundo. Para entender as mudanças no aporte das larvas e de seus recrutamentos atualmente em curso, é preciso entender como os efeitos antrópicos podem interagir com os fatores ambientais e sua variação natural. É importantíssimo que seja melhor compreendido como as interferências antrópicas influenciam as diferentes fases do processo reprodutivo e do recrutamento de novos indivíduos: produção e liberação de gametas, desenvolvimento do embrião, dispersão e estabelecimento da larva, metamorfose e vida do recém-assentado. Os pesquisadores devem atentar para que suas ações modifiquem o mínimo possível as características dos fatores ambientais. Quanto menores forem essas alterações, menores serão os impactos causados sobre os processos de renovação das comunidades recifais.

Literatura recomendada

- CALDERON, E.N.; CASTRO, C.B.; PIRES, D.O. 2000. Natação, assentamento e metamorfose de plânulas do coral *Favia gravida* Verrill, 1868 (Cnidaria, Scleractinia). *Boletim Museu Nacional, Nova Série, Zoologia*, 429:1-12.
- GROSBURG, R.K.; LEVITAN, D.R. 1992. For adults only? Supply-side ecology and the history of larval biology. *Trends in Ecology & Evolution*, 7(4):130-133.
- PIRES, D.O.; SEGAL, B.; CAPARELLI, A.C. 2011. Reproductive effort of an endemic major reef builder along an inshore-offshore gradient in south-western Atlantic. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 91(8):1613-1616.
- MUMBY, P.J.; HARBORNE, A.R.; WILLIAMS, J.; KAPPEL, C.V.; BRUMBAUGH, D.R.; MICHELI, F.; HOLMES, K.E.; DAHLGREN, C.P.; PARIS, C.B.; BLACKWELL, P.G. 2007. Trophic cascade facilitates coral recruitment in a marine reserve. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(20):8362-8367.

Conectividade em recifes de coral

Lívia Peluso, Carla Zilberberg

Os recifes de coral são ecossistemas marinhos com uma grande diversidade de organismos, possuindo grande importância ecológica e econômica. Isso porque esse ambiente tridimensional, formado pelos corais (animais do Filo Cnidaria), abriga animais e plantas únicos, além de servir como berçário para várias espécies. Por isso, compreender o funcionamento desse ecossistema é fundamental para que ele possa ser preservado, e sua diversidade, mantida. Um dos fatores chave para isso é entender como as populações das espécies recifais, que habitam áreas geograficamente separadas, estão interligadas e se elas são dependentes ou não umas das outras. Esse tipo de estudo é feito através de análises da conectividade populacional.

O que é conectividade populacional?

Normalmente, uma espécie é separada em várias populações, e elas costumam ter diferentes relações entre si, sendo tais relações dependentes da migração de seus indivíduos. Quando um indivíduo de uma população A vai para a B, ele pode se manter nessa nova população e se reproduzir lá. Assim, ele leva informações genéticas de sua população de origem para a nova. Essa troca de material genético entre populações, causada pela migração, é conhecida como fluxo gênico. Nesse cenário, as populações A e B trocam poucos migrantes, tendo, portanto, um baixo fluxo gênico (Figura 1a). Por isso, elas são geneticamente diferentes, sendo chamadas de populações estruturadas. Se a migração entre as duas populações aumenta (Figura 1b) e se torna constante (Figura 1c), as populações começam a ter um alto fluxo gênico. Com isso, elas se tornam mais parecidas geneticamente e, com o passar do tempo, serão altamente conectadas. Assim, elas podem ser consideradas como uma única população, ou seja, uma população panmítica (Figura 1c).



Os estudos de conectividade servem para identificar como ocorre esse padrão de migração entre as populações, considerando tanto a migração recente quanto a passada. Muitas vezes chama-se simplesmente de migração o deslocamento de indivíduos de uma população para outra. No entanto, do ponto de vista evolutivo, somente os indivíduos que se reproduzem em uma nova população são relevantes. Isso ocorre porque apenas a reprodução permite a troca de material genético entre as populações. Por isso, nesses estudos, a migração é sinônima de fluxo gênico e depende dos indivíduos migrantes que se reproduzem.

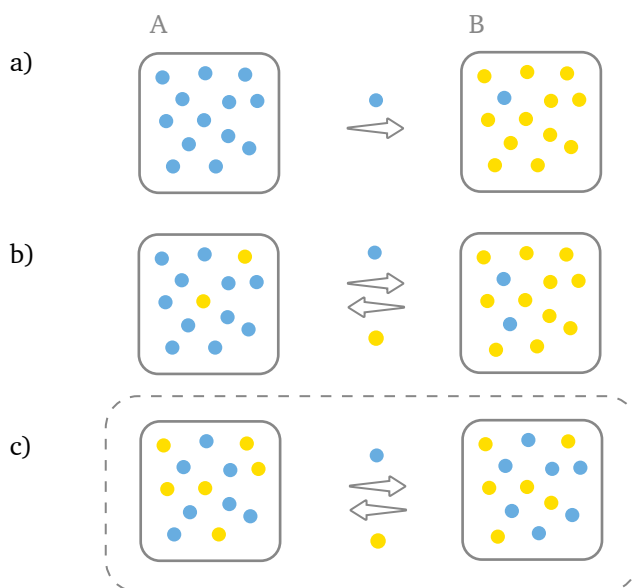


Figura 1. Duas populações A e B, onde os círculos são os indivíduos, e a diferença genética entre eles é representada pelas cores azul e amarelo. Em (a) há um baixo fluxo gênico entre A e B, já que só um migrante na cor azul é observado na população B, sendo essas populações consideradas estruturadas. Em (b) começa a existir um maior fluxo gênico entre A e B, com migrantes representados pela cor azul na população B, e migrantes de cor amarela, em A. Em (c) o fluxo gênico é alto, caracterizando populações similares geneticamente, que podem ser consideradas uma única população panmítica.

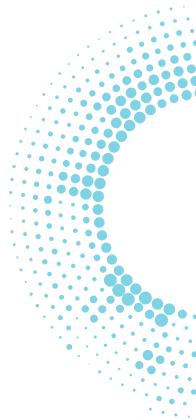
Sabe-se que forças evolutivas, como fluxo gênico, seleção natural, deriva gênica e mutação, causam a diferenciação ou a homogeneização entre as populações. Por exemplo, um baixo fluxo gênico leva ao acúmulo de diferenças genéticas em uma população isolada e, com o tempo, pode levar à formação de uma nova espécie nessa população. O fluxo gênico atua homogeneizando as populações, uma vez que aumenta a similaridade genética entre elas. Entender como ele se dá é de grande importância para o entendimento da evolução de uma espécie, porque ela depende das mudanças genéticas nas populações.

Para a maioria dos organismos recifais, o fluxo gênico depende das fases iniciais de vida, quando são gametas ou larvas¹. Isso porque grande parte desses animais marinhos possui pouca ou nenhuma mobilidade quando adultos. Assim, a migração ocorre somente nessas fases da vida, quando eles vivem na coluna d'água como plâncton. Portanto, as larvas desses animais são responsáveis por dispersar e se estabelecer em uma nova população. Neste capítulo serão discutidos apenas os aspectos da conectividade relacionados aos animais recifais, principalmente peixes e corais.

O que influencia a conectividade populacional

Como a migração de muitos animais marinhos depende da dispersão na fase larval de vida, inúmeros fatores físicos e biológicos influenciam sua conectividade. Assim, todos os processos que determinem (i) quantas larvas estão disponíveis para dispersar, (ii) para onde elas conseguem dispersar e (iii) quantas sobrevivem no novo habitat e se reproduzem, são importantes (Figura 2)¹.

1. Ver PIRES et al. (2016), capítulo 8 deste volume.



(i) Quantidade de larvas disponíveis

A quantidade de larvas disponíveis para dispersar em uma geração depende principalmente do investimento de energia dos adultos na reprodução. Esse investimento determina a quantidade de larvas produzidas e também sua qualidade, ou seja, a capacidade delas de sobreviverem. Diversos fatores influenciam o quanto os pais investem, como aspectos próprios de sua biologia (incubadores *versus* liberadores¹), além das condições ambientais pelas quais eles estão sujeitos antes do período reprodutivo. Condições favoráveis, como abundância de alimento, tendem a aumentar a energia que esses indivíduos conseguem acumular e, conseqüentemente, gastar na produção de seus gametas, resultando em mais e melhores larvas.

(ii) Para onde dispersar

Como as larvas são pequenas e possuem pouca capacidade de natação, elas normalmente são levadas pelas correntes marinhas. Por isso, o tempo que a larva fica na coluna d'água sendo levada por essas correntes antes de assentar tem influência no quanto ela vai dispersar. Além disso, a sobrevivência das larvas é determinante nesse período, já que a mortalidade é alta devido, principalmente, à predação. Muitas larvas exibem comportamento de deslocamento vertical para áreas mais profundas e escuras durante o dia, para evitar a predação, enquanto durante a noite ficam em áreas mais rasas. Esse comportamento também influencia em quais correntes essas larvas se encontram. Isso ocorre porque a velocidade e a direção das correntes marinhas não são homogêneas da superfície para o fundo. Por exemplo, existem locais com correntes superficiais quentes, que se direcionam para longe da costa e, mais abaixo, ocorre uma corrente fria, conhecida por onda interna, que vai em direção à costa. Nesse caso, se a larva permanecer na corrente superficial, ela pode dispersar. Enquanto que, se ela migrar verticalmente e for para o fundo, ela pode ficar retida na região costeira. Portanto, apesar de serem transportadas pelas correntes, as larvas possuem estratégias que permitem determinar em quais correntes elas se encontram, influenciando até onde elas podem chegar.

Assim como as correntes podem aumentar a dispersão de larvas, elas também podem funcionar como barreiras. Isso ocorre quando, por exemplo, a larva encontra uma corrente que não consegue atravessar. Além dessas barreiras causadas por correntes, existem outras no meio marinho, como a salinidade e a temperatura. Barreiras desse tipo normalmente impedem a dispersão, por causar a mortalidade das larvas que passam por elas. Identificar essas barreiras no mar nem sempre é fácil, uma vez que as correntes, principalmente costeiras, possuem um padrão complexo e mutável. Do mesmo modo, a temperatura e a salinidade podem variar muito, fazendo com que muitas barreiras sejam sazonais.

Essa fase de dispersão da larva é complexa de prever, já que depende de diversos fatores que mudam com a espécie analisada, pois cada uma apresenta características biológicas e resistência às condições ambientais distintas. Assim, todos esses processos interagem e a combinação deles determina até onde as larvas conseguem chegar.

(iii) Sobrevivência na nova população e reprodução

As larvas que sobreviveram ao período de dispersão na coluna d'água precisam escolher um novo habitat propício. Na fase conhecida como recrutamento, as larvas sofrem metamorfose e deixam de viver na coluna d'água, tornando-se juvenis. Esses novos recrutas passam por uma série de fatores adversos, incluindo predação, competição, mudanças ambientais, entre outros. Somente aqueles poucos que conseguem chegar à fase adulta e se reproduzir nessa nova população contribuem para a conectividade populacional. Portanto, a conectividade populacional de uma espécie depende da integração de inúmeros fatores complexos, que formam seus padrões de dispersão (Figura 2).



Dispersão

- Mortalidade.
- Transporte pelas correntes.
- Barreiras.

Recrutamento

- Habitat favorável.
- Predação.
- Condições ambientais.

Reprodução

- Qualidade dos gametas.
- Quantidade dos gametas.
- Condições ambientais.

Sobrevivência até a fase adulta

- Habitat favorável.
- Predação.
- Condições ambientais.

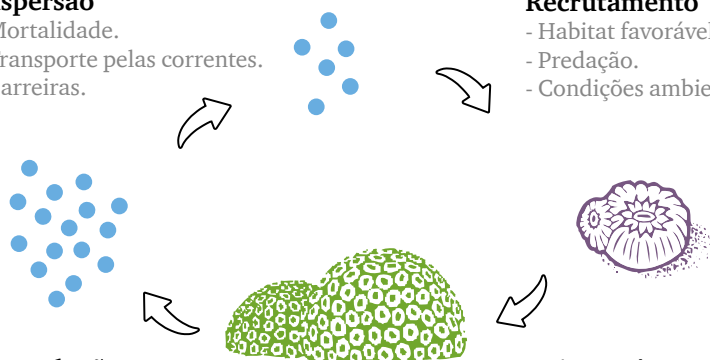


Figura 2. Fatores que influenciam a conectividade entre populações. Após a reprodução, um número grande de larvas está disponível e pode migrar. Durante a dispersão, as larvas são transportadas pelas correntes, mas diversos fatores, como mortalidade e barreiras, limitam a quantidade de larvas que conseguem chegar a uma nova população. As que chegam precisam sobreviver ao período do recrutamento, encontrando um habitat favorável para assentar e sobreviver à predação, competição e condições ambientais adversas. Os recrutas que conseguirem sobreviver, chegar à fase adulta e se reproduzir na nova população poderão produzir mais larvas, essas também aptas a migrar, assim contribuindo para a conectividade populacional da espécie.

Como medir a conectividade populacional

A conectividade entre populações pode ser medida por métodos diretos ou indiretos. Um dos métodos diretos mais utilizados, principalmente para larvas de peixes, é o de marcação e recaptura. Para esse método, a marcação é feita por meio da impregnação com fluorescência, ou elementos químicos raros na natureza, em estruturas ósseas. Nesses métodos, indivíduos são capturados, marcados e depois recapturados para avaliar a capacidade das larvas de chegarem a uma nova população. No entanto, esse tipo de metodologia possui desvantagens, como a necessidade de matar uma grande quantidade de larvas e adultos, além de não poder ser usado para os organismos recifais que não possuem estruturas ósseas na fase larval. Outra

grande desvantagem é que ele só identifica os animais que dispersaram, não sendo possível inferir a existência de fluxo gênico, já que não há como saber se os indivíduos que dispersaram irão se reproduzir na nova população.

Nos últimos anos, métodos indiretos, como a assinatura química natural e as análises genéticas, vêm sendo muito utilizados para estimar a conectividade de diversos animais marinhos. O método de assinatura química natural envolve análises da composição de elementos químicos raros presentes nas larvas e no local estudado, a fim de avaliar a origem das larvas coletadas. Mais uma vez, este método não é muito eficaz, pois não é possível avaliar a contribuição genética das larvas para a nova população. O método genético tem sido o mais utilizado em análises de conectividade populacional em organismos marinhos. Nesse caso, regiões do DNA de vários indivíduos de diferentes populações são identificadas e comparadas e, assim, pode-se definir quais populações são mais similares geneticamente. Essas regiões do DNA analisadas são chamadas de marcadores moleculares, e diferentes marcadores possuem maior ou menor precisão. Isso ocorre porque a quantidade de alterações que o DNA sofre ao longo de diversas gerações não é homogênea. Ou seja, existem regiões que acumulam mais alterações e outras que se mantêm mais estáveis. Assim, os marcadores localizados nas regiões que sofrem maiores alterações são os mais variáveis, fornecendo informações populacionais mais recentes, enquanto que marcadores em regiões com poucas alterações fornecem informações mais antigas. Com a identificação molecular dos indivíduos, são utilizados métodos estatísticos complexos, que definem quantas populações existem, quais são mais diferenciadas e quais recebem mais ou menos migrantes, entre outros fatores. Dessa forma, as análises moleculares conseguem estimar o fluxo gênico e, conseqüentemente, a conectividade populacional de uma determinada espécie.

Apesar dos métodos genéticos definirem populações e até a direção da migração entre elas, nem todas as perguntas podem ser respondidas. O que causa o padrão de diferenciação observado entre as populações, por exemplo, não pode ser inferido por esses métodos. Para ambientes marinhos e, principalmente, para recifes de coral, modelos

biofísicos são também muito utilizados. Esses modelos avaliam fatores físicos, como a direção e a velocidade das correntes. Além disso, fatores biológicos, como a época do ano em que uma espécie se reproduz e o tempo que sua larva fica no plâncton, podem ser incorporados nesses modelos, tornando-os mais realistas. Esses modelos complexos fornecem projeções da direção e do local de maior probabilidade de assentamento das larvas, sendo relevantes para identificar as barreiras para a dispersão.

Importância para a conservação dos ambientes recifais

Visto os impactos antrópicos atuais, como poluição, aquecimento global e sobrepesca, a grande maioria dos recifes no mundo se encontra extremamente degradada. Para proteger esses ambientes já bastante fragilizados, é essencial entender a conectividade entre populações, para que as medidas de conservação sejam feitas de modo correto. Isso porque a dinâmica e a diversidade genética das populações são importantes na determinação de áreas protegidas eficazes. Quando essas áreas são definidas, espera-se que grande parte da diversidade genética de uma espécie esteja representada, e que os padrões de fluxo gênico sejam mantidos. Como as populações de uma espécie são interligadas, tais medidas são necessárias para a viabilidade das espécies em longo prazo e para que esses ambientes possam existir por muitas gerações.

Um aspecto chave para a conservação de uma espécie é identificar populações fonte e sumidouro na dinâmica populacional (Figura 3). Populações fonte são aquelas que contribuem com larvas para outras populações e não precisam de migrantes para se sustentar. Já as populações sumidouro são aquelas que só recebem larvas de outras, normalmente de várias populações, sem exportar migrantes. Entender isso no mosaico de populações existentes é importante, pois permite a identificação de populações que dependem da migração para continuar existindo ou que são necessárias para a sobrevivência de outras.

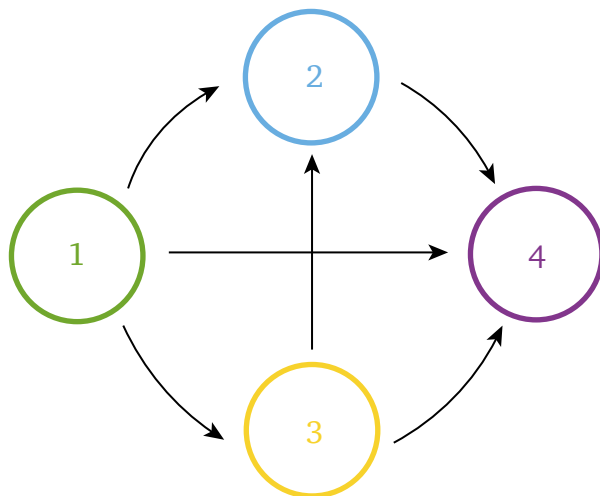


Figura 3. Dinâmica entre as populações de um determinado organismo. Os círculos representam as populações (1 a 4), e as setas, a direção da migração entre elas. A população 1 é considerada uma população fonte, pois exporta migrantes para as demais e não recebe nenhum migrante. A população 4 é considerada uma população sumidouro, já que recebe migrantes das demais e não exporta para nenhuma.

Outra característica fundamental para conservação é a diversidade genética das populações. As que possuem alta diversidade genética têm maior probabilidade de se recuperar após distúrbios ambientais. Por isso, sua proteção é necessária, já que elas podem resistir aos impactos causados pelo homem. Populações com baixa diversidade genética normalmente são populações isoladas, ou seja, com baixo fluxo gênico, estando mais propensas à extinção. Algumas populações podem ter, ainda, uma composição genética distinta das demais, apresentando diversidade genética única. Se essas populações forem localmente extintas, essa diversidade é perdida para toda a espécie. Assim, a diversidade genética das populações influencia sua sobrevivência, sendo esse conhecimento fundamental para saber quais áreas priorizar para a conservação.

Saber quais regiões são mais relevantes para serem protegidas também depende de quantas populações existem para cada espécie e quais são seus padrões de migração. Ao supor que existam ambientes recifais distribuídos em diversas manchas (Figura 4a) e podendo criar somente duas reservas, a localização dessas reservas, inicialmente,

seria determinada com base na distância entre elas, de modo que não ficassem muito próximas, para poder proteger duas populações distintas. No entanto, após um estudo de conectividade e diversidade genética, descobre-se que existem populações geneticamente diferentes nessa área, devido à existência de barreiras, porém as duas áreas protegidas pertencem à mesma população. Com isso, as duas reservas criadas só protegem essa única população, enquanto as outras ficam desprotegidas (Figura 4c). Consequentemente, se essa espécie só ocorrer nessa área, apenas uma pequena parcela da diversidade genética dessa espécie estará sendo protegida.

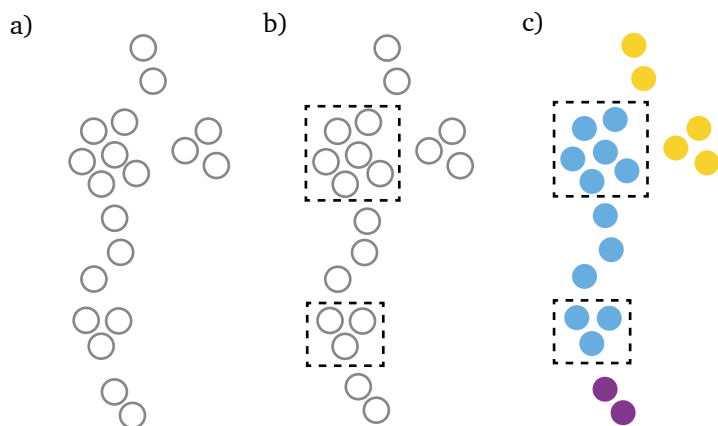


Figura 4. (a) Distribuição em manchas dos ambientes recifais em uma determinada área. (b) A criação de duas reservas (quadrados pontilhados) nessa área pode ser feita sem informações sobre a conectividade, de modo que tenham uma distância razoável uma da outra. (c) No entanto, quando se sabe quantas populações geneticamente diferentes existem (cores dos círculos), percebe-se que somente uma população foi protegida com essas reservas.

Apesar da necessidade de se levar em consideração outros fatores na criação de áreas marinhas protegidas, a importância do conhecimento acerca da conectividade populacional das espécies é bastante relevante e tem sido cada vez mais considerada. Atualmente, esses estudos são considerados essenciais para um plano de manejo eficiente e cientificamente confiável, pois possibilitam que o melhor tamanho e espaçamento das áreas protegidas sejam definidos corretamente. Em curto prazo, manter a conectividade entre as populações das espécies é necessário para que elas não sejam eliminadas do ambiente, visto os inúmeros

impactos sofridos pelos recifes de coral. A conectividade e a consequente manutenção da diversidade genética natural das espécies permitem isso, uma vez que essa diversidade é essencial para a recuperação e a sobrevivência de suas populações após algum impacto natural ou antrópico. Em longo prazo, a conectividade populacional é importante para assegurar a sobrevivência dessas espécies e do ecossistema recifal como um todo. Por isso, proteger todas as populações geneticamente distintas é indispensável para que os processos evolutivos das espécies, que dependem do fluxo gênico, sejam preservados.

Conectividade em recifes de coral no Brasil e no mundo

O número de trabalhos sobre a conectividade de organismos recifais vem aumentando ultimamente, principalmente por conta do avanço e da diminuição dos custos das análises moleculares. Isso permite uma visão mais ampla dos padrões de conectividade de várias espécies em diferentes recifes do mundo, principalmente no Caribe e no Indo-Pacífico, onde esses estudos estão bastante avançados. A grande maioria dessas pesquisas foca em espécies de corais e peixes, consideradas essenciais para a existência dos recifes de coral.

Conectividade e manejo na Grande Barreira de Corais, Austrália

Um dos maiores conjuntos de recifes do mundo, a Grande Barreira de Corais na Austrália, possui aproximadamente 21000km² de recifes, sendo considerado Patrimônio Mundial da Humanidade. O desenho da área protegida nesse local foi feito com um modelo conhecido como mosaico, considerado o mais eficiente para a conservação. No manejo desse parque, manter a conectividade entre recifes é uma das metas, e isso é levado em consideração no tamanho e no espaçamento das áreas protegidas. Diversos recifes de tamanhos distintos estão incluídos, havendo recifes próximos e distantes uns dos outros. Além disso, existem áreas com diferentes graus de proteção, incluindo

2. VAN OPPEN, M.; PELOW, L.; KININMONTH, S.; BERKELMANS, R. 2011. *Molecular Ecology*, 20:4899-4914.

3. BAUMS I.; MILLER, M.; HELLBERG, M. 2005. *Molecular Ecology*, 14:1377-1390.

as com acesso restrito a turistas e à pesca, assim como as totalmente restritas à visitação. As direções das principais correntes também foram utilizadas no desenho dessas áreas de proteção. Essas medidas garantem que migrantes possam ir de um recife para outro e demonstram como a conectividade pode ser incorporada no planejamento de áreas protegidas.

O tamanho da área preservada na Grande Barreira de Corais, bem como sua implementação e o desenho da rede de recifes protegidos, é considerado um exemplo para o mundo. Mesmo assim, ainda não existem muitos estudos sobre a conectividade dos corais construtores que permitam verificar se o desenho dessa área protegida é eficaz. Um estudo realizado por van Oppen e colaboradores em 2011², com a espécie de coral *Acropora millepora*, identificou que existem populações altamente conectadas por mais de 1000km, enquanto outras, separadas por poucas dezenas de quilômetros, são bastante diferenciadas. Segundo os autores, essa separação entre populações deveria ser incluída na revisão do zoneamento da reserva, ainda mais se esse padrão observado for recorrente entre outras espécies.

Barreiras geográficas no Caribe

O Caribe possui os recifes mais diversos do oceano Atlântico, sendo foco de inúmeros estudos acerca da conectividade de suas espécies. Identificar barreiras para essa região não é simples, existindo diversos estudos para tentar solucionar isso. Um exemplo é o estudo de conectividade com o coral *Acropora palmata*, um dos principais construtores dos recifes caribenhos, que se encontra criticamente ameaçado de extinção. Como a larva desse coral fica um longo período na coluna d'água, entre 5 e 14 dias, presumia-se que sua dispersão era alta ao longo de todo o Caribe. No entanto, o estudo de conectividade feito por Baums e colaboradores³ mostrou a existência de duas populações distintas, uma à leste e outra à oeste do Caribe. Essa separação populacional também é observada para outras espécies de organismos recifais caribenhos. No entanto, o que causa essa separação, ou seja, o que poderia estar atuando como barreira, não havia sido identificado.

Em um estudo posterior, Baums e colaboradores⁴ conseguiram identificar que o padrão de correntes durante a época do ano em que esse coral se reproduz funciona como uma barreira para a dispersão, impedindo a migração das larvas entre essas duas regiões do Caribe. Apesar de essa barreira ter sido identificada somente para esse coral, é possível que esse padrão de correntes também explique o padrão encontrado para outras espécies de organismos recifais.

Brasil: O que se conhece

Os únicos recifes coralíneos verdadeiros que existem no Sul do oceano Atlântico ocorrem no Brasil. Esses recifes são caracterizados por possuir um baixo número de espécies de corais comparado com o Caribe, mas várias dessas espécies só ocorrem nessa região, ou seja, são espécies endêmicas. Apesar disso, existem poucos estudos acerca da conectividade populacional de espécies recifais, sendo a maioria relacionada a espécies que ocorrem tanto no Brasil como no Caribe. Esses estudos mostraram que existe uma separação entre essas duas regiões, com o Rio Amazonas funcionando como uma barreira para a dispersão larval para várias espécies (Figura 4). Além do Rio Amazonas, outra barreira apontada é a barreira Meso-Atlântica (Figura 4), onde a grande extensão de oceano aberto entre os continentes das Américas e da África limita a dispersão larval entre esses dois lados do oceano Atlântico. Essas barreiras já foram observadas para várias espécies, como o coral-de-fogo *Millepora alcicornis*⁵ (Figura 5a) e os corais *Montastraea cavernosa*⁶ (Figura 5b), *Favia gravida*⁷ (Figura 5c) e *Siderastrea sp.*⁷ (Figura 5d), que ocorrem no Caribe (Atlântico Noroeste), no Brasil (Atlântico Sudoeste) e na costa Oeste da África (Atlântico Sudeste). No entanto, é importante lembrar que as barreiras variam entre as espécies. Por exemplo, para o coral *Porites astreoides*⁷ (Figura 5e) não existe diferenciação entre as populações do Caribe e do Brasil, o que indica que a barreira do Rio Amazonas não limita a distribuição de todas as espécies.

4. BAUMS I.; PARIS, C.; CHÉRUBIN, L. 2006. *Limnology and Oceanography*, 51(5): 1969-1981.

5. SOUZA, J.N. 2013. *Endemismo e conectividade de corais-de-fogo (Millepora spp.) no Oceano Atlântico*. 122p. Dissertação (Mestrado em Ecologia) - Departamento de Ecologia e Zoologia, Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, SC, Brasil.

6. NUNES, F.; NORRIS, R.; KNOWLTON, N. 2009. *Molecular Ecology*, 18:4283-4297.

7. NUNES F.; NORRIS, R.; KNOWLTON, N. 2011. *PLoS One*, 6(7):e22298.

8. PELUSO, L. 2015.
Conectividade genética do coral endêmico Mussismilia hispida (Scleractinia: Mussidae) ao longo da costa brasileira. 80p.
Dissertação (Mestrado em Biodiversidade e Biologia Evolutiva) - Instituto de Biologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

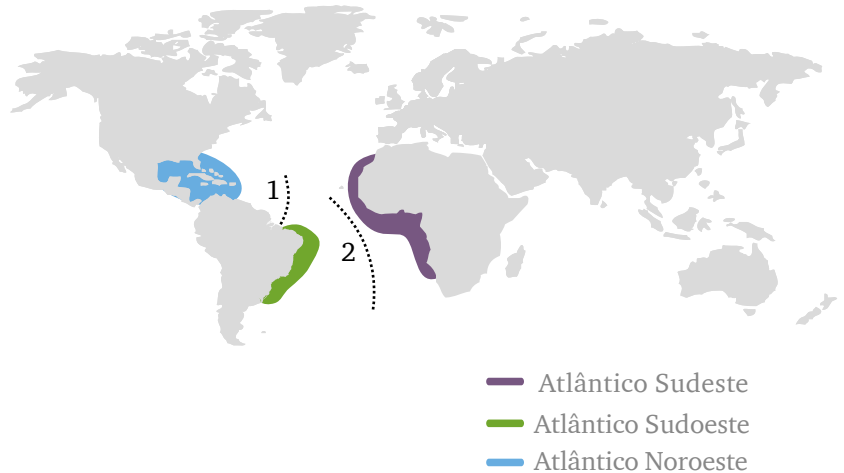


Figura 5. As principais barreiras para a dispersão no Oceano Atlântico são (1) a pluma de água doce do Rio Amazonas e (2) a grande extensão de oceano aberto conhecida como barreira Meso-Atlântica. Essas barreiras separam o Atlântico em três grandes regiões recifais: Atlântico Noroeste (inclui toda a região do Caribe), Atlântico Sudoeste (costa do Brasil abaixo do Rio Amazonas) e Atlântico Sudeste (costa Oeste da África).

Muitos estudos onde foram amostradas localidades na costa brasileira se limitam a poucas regiões, principalmente no Nordeste. Os estudos que possuem uma amostragem mais ampla do Brasil, restritos a corais e peixes recifais, mostraram pouca ou nenhuma diferenciação populacional ao longo da costa. No entanto, a maioria deles utilizou marcadores moleculares pouco variáveis, que não detectam diferenças populacionais recentes. Esses marcadores só conseguem avaliar a existência de diferenciação populacional muito mais antiga, como as observadas entre as grandes regiões do Oceano Atlântico (Caribe, Brasil e África).

Até o presente momento, somente um estudo⁸ avaliou a conectividade populacional ao longo da costa brasileira utilizando microssatélites, marcadores moleculares hipervariáveis. Esse estudo, realizado por intermédio da Rede de Pesquisas Coral Vivo, avaliou a conectividade entre as populações do coral-cérebro *Mussismilia hispida* (Figura 5f) ao longo da totalidade de sua distribuição. A espécie, além de ser endêmica do Brasil, é uma das principais construtoras de recifes, ocorrendo desde o Maranhão até São Paulo, incluindo as ilhas oceânicas de Atol das Rocas (RN, Brasil), Fernando de Noronha (PE, Brasil) e Ilha da Trindade (ES, Brasil). Com isso, informações acerca da

conectividade entre suas populações são de vital importância para a preservação dos ambientes coralíneos brasileiros. Esse estudo mostrou, por exemplo, que os indivíduos das ilhas oceânicas são geneticamente bem diferenciados das populações costeiras. Além disso, foi observado que a população mais ao sul do Brasil é bem isolada do resto da costa e possui a menor diversidade genética encontrada.

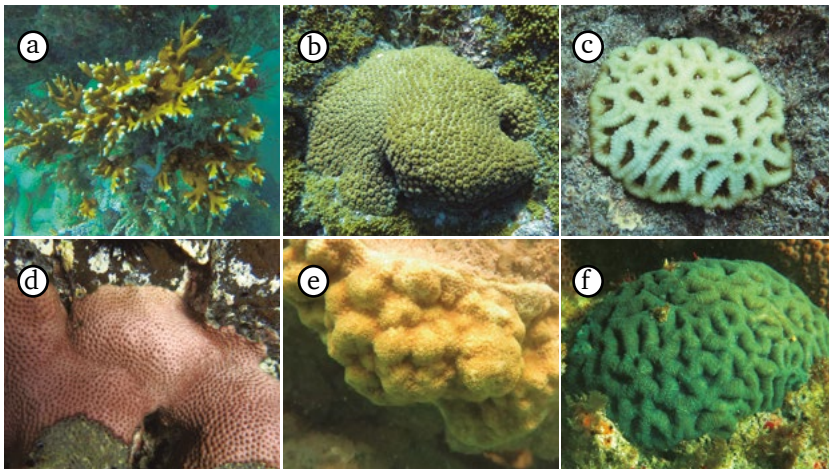


Figura 5. Foto dos corais (a) *Millepora alcicornis*, (b) *Montastraea cavernosa*, (c) *Favia gravida*, (d) *Siderastrea* sp., (e) *Porites astreoides* e (f) *Mussismilia hispida*. Créditos: Amana Garrido (a), Lívia Peluso (b, c, d e e) e Caetano Dable (f).

Considerações finais

Visto a importância dos estudos de conectividade para a proteção em longo prazo das espécies e do ecossistema recifal como um todo, fica clara a carência deles para vários organismos recifais no mundo, principalmente no Brasil. A falta de entendimento da dinâmica populacional dessas espécies pode ter consequências catastróficas para os recifes, que já são ambientes altamente ameaçados por impactos antrópicos. Conforme apontado ao longo do capítulo, estudos de conectividade permitem a identificação de barreiras para a dispersão que podem ser compartilhadas por vários organismos, além de proporcionar estimativas da diversidade genética e o entendimento da interdependência entre as populações de uma espécie. Essas informações são essenciais para um plano de conservação eficiente e são extremamente necessárias para que as áreas de preservação marinhas no Brasil possam garantir a existência dos ambientes recifais no futuro.

Literatura recomendada

- BOTSFORD, L.W.; WHITE, J.W.; COFFROTH, M.A.; PARIS, C.B.; PLANES, S.; SHEARER, T.L.; THORROLD, S.R.; JONES, G.P. 2009. Connectivity and resilience of coral reef metapopulations in marine protected areas: matching empirical efforts to predictive needs. *Coral Reefs*, 28(2):327-337.
- COWEN, R.K.; SPONAUGLE, S. 2009. Larval dispersal and marine population connectivity. *Annual Review of Marine Science*, 1:443-466.
- HAMILTON, M. 2009. *Population genetics*. New York: Blackwell-Wiley. 407p.
- HELLBERG, M.E. 2009. Gene flow and isolation among populations of marine animals. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40(1):291-310.
- WEERSING, K.; TOONEN, R. 2009. Population genetics, larval dispersal, and connectivity in marine systems. *Marine Ecology Progress Series*, 393:1-12.

Papel das algas nos recifes e as consequências das interferências antrópicas

Paulo Antunes Horta, Marina N. Sissini, Ellie Bergstrom, Vanessa Freire, Eduardo Bastos, Guilhardo Martins, Leidson Allan de Lucena, Cintia Martins, José Bonomi Barufi, Leonardo Rorig, Pablo Riul, Carlos Frederico Gurgel

Introdução

Os recifes estão entre as formações biológicas mais ricas do planeta. Nesses berçários da vida marinha, as algas representam fonte de alimento, refúgio e substrato para o crescimento e a reprodução de peixes, invertebrados e até mesmo de outras algas. Apesar de sua beleza cênica e relevante importância ecológica, os recifes servem de área para a pesca de subsistência e comercial, além de serem importantes locais para a prática do turismo e da recreação. Simplificando, por definição, recifes são estruturas submersas construídas por organismos marinhos que possuem esqueleto calcário, sejam eles de origem animal ou vegetal, resistentes à ação mecânica de ondas e correntes marinhas. Os recifes podem ser caracterizados conforme os organismos predominantes em sua formação, podendo incluir, assim, dois tipos principais: os recifes de coral e os bancos de rodólitos. No litoral brasileiro, os recifes coralíneos¹ estão distribuídos desde a região ao largo da foz do rio Amazonas, em áreas submersas como as do Parcel de Manuel Luís, localizado no estado do Maranhão, até a região de Nova Viçosa, na Bahia.

Todos esses produtos e serviços ecossistêmicos são prestados por comunidades de composição taxonômica e funcional complexa. Embora os recifes recebam a denominação “de coral”, eles são na verdade formações criadas pela ação conjunta de outros organismos, como outros invertebrados, representados pelos gastrópodes vermetídeos e foraminíferos, ou mesmo por plantas marinhas conhecidas como algas calcárias, que depositam carbonatos em sua parede celular. Para se ter uma ideia, na maior parte dos recifes brasileiros, as algas calcárias contribuem mais para

1. Recifes coralíneos são estruturas rígidas formadas pela ação de comunidade de organismos marinhos (animais e vegetais) que depositam calcário em seu esqueleto.



2. O nome científico *Porolithon pachydermum* é seguido de "(Foslie) Foslie", pois, segundo o Código Internacional de Nomenclatura Botânica, todo nome científico deve ser seguido do nome de seu autor. Quando uma espécie muda de gênero, o nome do autor do basônimo (primeiro nome dado à espécie) deve ser citado entre parênteses, seguido pelo nome do autor que fez a nova combinação. No caso, foi o próprio Foslie que fez a mudança de gênero, por isso seu nome aparece duas vezes.

3. Ver CASTRO et al. (2016), capítulo 25 deste volume.

a formação do recife do que os próprios corais! Dentre as formações recifais construídas predominantemente por algas calcárias, destaca-se o Atol das Rocas (RN, Brasil), único atol presente no Atlântico Sul. Ele é formado pelo acúmulo da macroalga incrustante *Porolithon pachydermum* (Foslie) Foslie². Essa espécie forma crostas que recobrem de 40% a mais de 80% da superfície do atol, crescendo de forma peculiar em torno de 0,01 mm a 0,05 mm ao dia. Dessa maneira, *P. pachydermum* é uma das principais espécies responsáveis pela manutenção dessa importante área de preservação ambiental marinha, única em sua categoria no sistema de unidades de conservação do litoral brasileiro (Figura 1).

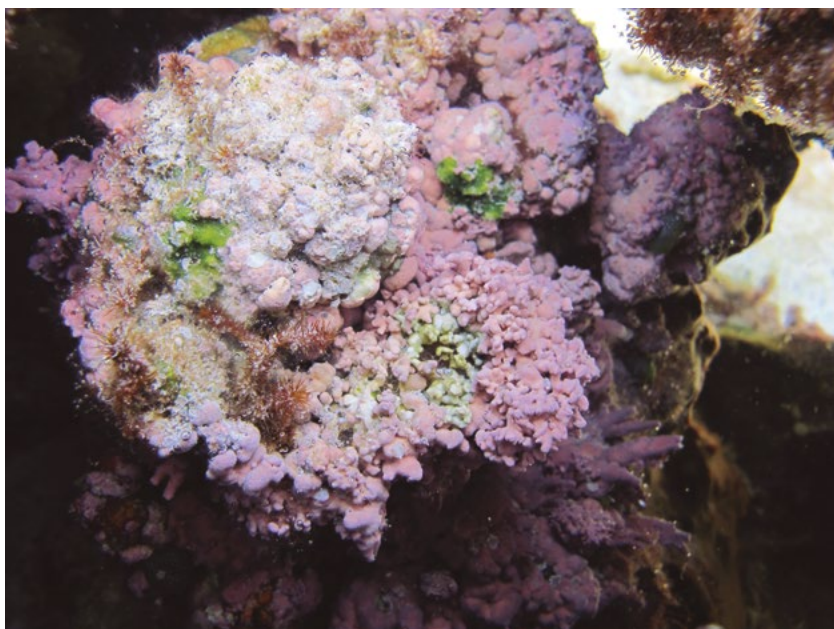


Figura 1. Algas calcárias incrustantes dominantes (crostas em diferentes tons de rosa) responsáveis pela construção do recife algal do Atol das Rocas. Créditos: Marina Sissini.

A unidade de proteção ambiental do Atol das Rocas é simbólica para a conservação dos ambientes recifais brasileiros, pois foi a primeira Reserva Biológica Marinha a ser criada no país, o que ocorreu em 1979. A Reserva do Atol das Rocas se encontra a 267km da costa do Rio Grande do Norte e é um exemplo de recife oceânico que fornece habitat para centenas de tartarugas e dezenas de milhares de aves³.

Quem são as macroalgas?

As algas macroscópicas (macroalgas) e as gramas marinhas são produtoras primárias, ou seja, organismos que representam o alimento e a base da cadeia alimentar no ambiente marinho bentônico. As macroalgas são os principais componentes das comunidades da zona entremarés (região que fica exposta ao ar durante a maré-baixa, e submersa, com a subida da maré) e do infralitoral (região permanentemente submersa). Além de contribuir para a produção primária marinha costeira, como citado anteriormente, são construtoras de muitos habitats bentônicos, desempenhando papel similar ao das florestas nos ambientes terrestres, abrigando inúmeros vertebrados, como cavalos-marinhos, entre outros peixes, e invertebrados, como esponjas, ascídias ou mesmo outros cnidários.

As algas macroscópicas podem ser divididas em três grandes grupos: marrons (Phaeophyceae), verdes (Chlorophyta) e vermelhas (Rhodophyta) (Figura 2). Dentre as algas vermelhas, estão as espécies que mais contribuem com a formação dos recifes costeiros do Brasil, pois depositam carbonato de cálcio em sua parede celular, conferindo rigidez ao talo. As algas vermelhas calcárias funcionam como o cimento que une os diferentes tipos de organismos que formam esqueletos rígidos no processo de construção do sistema recifal, como as espécies que formam o Atol das Rocas. Além dos recifes típicos, ou atóis, as algas calcárias podem também construir outro tipo de sistema biogênico, conhecido como banco de rodolitos (Figura 3). Esse sistema recifal é formado por nódulos calcários livres que, com a redução da movimentação da água concomitante com o aumento da profundidade, vão se fundindo e formando sistemas recifais submersos. Os bancos de rodolitos são importantes em áreas emblemáticas do litoral brasileiro, como aquelas representadas pelas cadeias de montanhas submersas que se estendem do litoral do Espírito Santo até a Ilha de Trindade (ES, Brasil) (1200km distante da costa). Os bancos de rodolitos ocupam grande parte do litoral brasileiro, tendo papel importante no ciclo de carbono inorgânico. Eles representam os maiores estoques de carbono do Atlântico Sul, similares aos dos demais megahabitats carbonáticos do planeta.

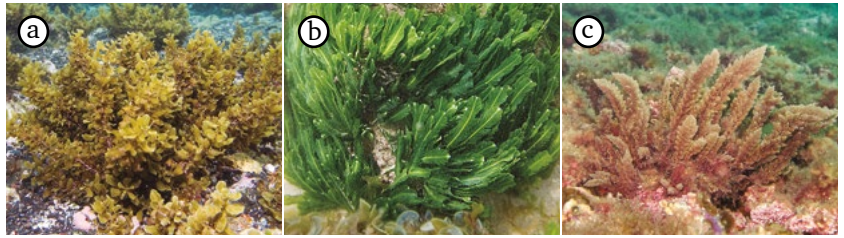


Figura 2. Representantes dos três grandes grupos de macroalgas: (a) marrons, *Sargassum* sp. (Phaeophyceae), (b) verdes, *Caulerpa sertularioides* (Chlorophyta), e (c) vermelhas, *Asparagopsis taxiformis* (Rhodophyta). Créditos: Eduardo Bastos.

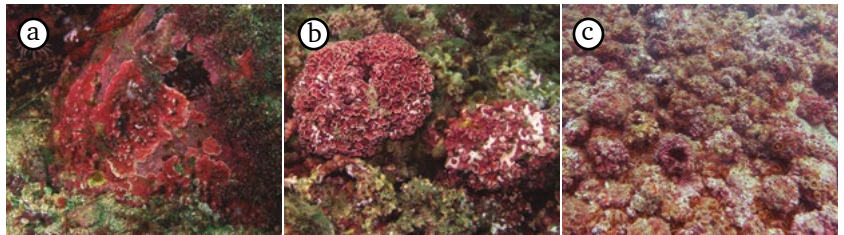


Figura 3. Algas vermelhas calcárias (a) incrustante, (b) rodolito, (c) banco de rodolitos, na Ilha Deserta (SC, Brasil), Rebio do Arvoredo. Créditos: Eduardo Bastos.

As macroalgas representam muito mais do que simplesmente fonte de energia para animais que as utilizam como alimento. Substâncias sintetizadas pelo metabolismo secundário das algas são também importantes complementos nutricionais, destacando-se aquelas que têm atividade antioxidante. Essas substâncias são imprescindíveis para a manutenção da saúde de animais marinhos, incluindo as tartarugas marinhas. As diversas e abundantes substâncias do metabolismo secundário das algas são resultado da seleção imposta por um ambiente que impõe relações bióticas/abióticas muito intensas e que perduram por milhões de anos de evolução desses ambientes e de sua biodiversidade. A disputa por espaço é grande, especialmente entre os organismos sésseis, como as algas e os corais. A maioria dos organismos sésseis desenvolve substâncias químicas que funcionam como armas no processo de competição por espaço, inibindo, ou mesmo matando, eventuais organismos competidores. Em outras palavras, são uma ferramenta que permite que organismos bentônicos lutem por “seu lugar ao sol”, literalmente. É muito comum observar porções brancas nos corais em regiões de contato com macroalgas, como resultado dessa “guerra química”. Um estudo realizado em

Belize, que avaliou essa interação alga-coral, mostrou que apesar das algas ganharem essa batalha, elas também saem prejudicadas, pois, ao canalizar sua energia para a disputa, elas se tornam mais palatáveis aos herbívoros (Figura 4).



Figura 4. Guerra por espaço. Colônia de coral (*Siderastrea*) apresentando branqueamento rodeado por macroalgas, em Fernando de Noronha (PE, Brasil). Créditos: Eduardo Bastos.

Como todos os organismos que fazem fotossíntese, as macroalgas precisam de gás carbônico, água e luz para produzirem a energia necessária para sua manutenção e desenvolvimento. As algas calcárias que constroem os ambientes recifais demandam condições ainda mais específicas para assegurar sua calcificação e, portanto, desempenhar eficazmente seu papel na construção e na manutenção desses ambientes. Organismos calcários demandam águas com pH mais elevado para realizar o processo de calcificação. Estudos recentes mostraram que o processo de calcificação foi beneficiado quando as algas calcárias se posicionaram próximas às outras algas não-calcárias. Isso ocorre porque durante a fotossíntese as algas não-calcárias retiram CO₂ do ambiente, elevando o pH da água, assim criando um microambiente favorável à calcificação.

4. A depleção de oxigênio é a queda no oxigênio dissolvido presente na água, sendo resultado da introdução de resíduos.

Impactos ambientais nas algas marinhas

O delicado equilíbrio entre calcificação, algas e corais muitas vezes é perturbado pelo impacto ambiental produzido pela descarga de efluentes domésticos no ambiente marinho. Tal situação é particularmente grave no Brasil, porque a maior parte do litoral brasileiro não conta com saneamento urbano adequado. A poluição por nutrientes acaba eliminando espécies sensíveis e viabilizando a ocupação desses locais por espécies oportunistas, que possuem elevada taxa de crescimento em ambientes perturbados. A poluição muitas vezes resulta na redução da complexidade do ambiente, o que, por sua vez, compromete uma de suas principais atribuições: a de servir como moradia e abrigo para uma elevada biodiversidade. Nesse processo de empobrecimento, as macroalgas pardas (sensíveis à poluição) são substituídas por macroalgas verdes (grupo taxonômico rico em espécies oportunistas), enfraquecendo a dieta de herbívoros diversos.

As alterações na qualidade da água das regiões costeiras estão de fato relacionadas ao aumento na disponibilidade de nutrientes e ao aumento da erosão com o carreamento de sedimentos e consequente elevação da turbidez da água. Quanto mais expostos a esses impactos, mais os organismos dos recifes de coral – como um sistema biológico – vão perdendo sua resiliência, ou seja, sua capacidade de voltar ao estado original depois de um distúrbio. Nesse caso, espécies de crescimento mais lento, como os corais e as algas calcárias, dão lugar a espécies de crescimento rápido, como algas filamentosas e algumas coriáceas. Cabe ressaltar que os corais e as algas calcárias, formadoras de nódulos ou rodolitos, são organismos estruturadores desses ambientes e crescem a uma taxa de milímetros a centímetros por ano. No caso das algas oportunistas, esses mesmos valores de crescimento são atingidos em dias ou semanas.

O crescimento rápido pode resultar na explosão populacional de espécies de algas verdes ou pardas, culminando em fenômenos conhecidos como florações de algas, marés verdes (“green tides”), marés vermelhas (“red tides”) ou marés douradas (“golden tides”). Tais fenômenos estão relacionados ao aumento das concentrações de nutrientes e ao aquecimento dos oceanos, além da introdução de espécies exóticas. Como consequência dessas florações algais, tem-se a depleção⁴

das concentrações de oxigênio dissolvido na coluna d'água, levando à mortandade de animais e plantas. Como decorrência adicional, a morte de quantidades excessivas de biomassa produz mau cheiro, o que compromete o turismo e outras atividades econômicas praticadas no mar e nas zonas costeiras.

Dentre os poluentes derivados de diferentes atividades humanas, os metais pesados se destacam por sua toxicidade em baixas concentrações, reduzindo a produção primária, comprometendo a produção de alimento, abrigo e produção de oxigênio, chegando a levar à morte as algas por eles contaminadas. Metais pesados são incorporados ao talo das algas, e, quando elas são consumidas pelos herbívoros, essas substâncias nocivas são transferidas pela cadeia trófica (Figura 5). Logo, a saúde das pessoas que consomem peixes de áreas poluídas pode ser afetada.

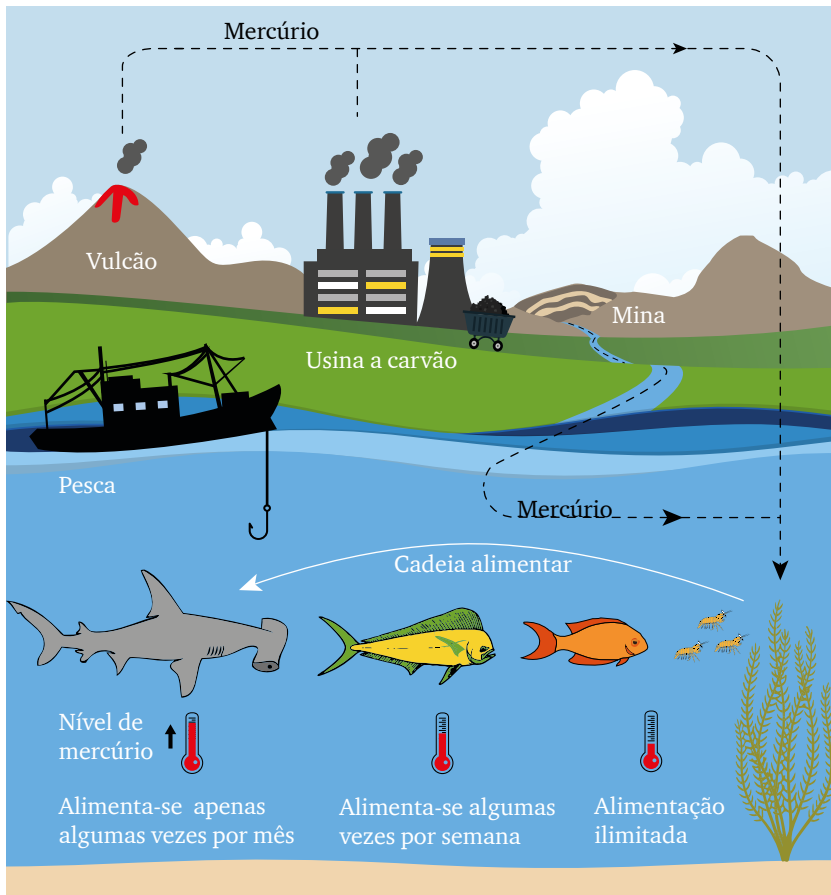


Figura 5: Relação esquemática da transferência dos poluentes na cadeia trófica: dos produtores primários aos predadores de topo da cadeia alimentar.

5. Pigmentos fotossintetizantes que absorvem radiação solar adicional à clorofila, que será usada na fotossíntese. Além disso, esses pigmentos protegem o sistema fotossintetizante, dissipando o excesso de energia que pode provir da radiação solar em determinadas horas do dia. Esses pigmentos podem proporcionar uma cor amarela, laranja ou vermelha aos organismos. Para aqueles organismos que consomem as algas, os carotenóides atuam como antioxidantes, protegendo as células da ação dos radicais livres produzidos em condições de estresse ou exposição a poluentes.

6. O metabolismo primário é o conjunto de processos metabólicos que desempenham função essencial à vida. Os compostos produzidos são os aminoácidos, os nucleotídeos, os carboidratos, os lipídeos e a clorofila. Já o metabolismo secundário caracteriza-se pela síntese de biomoléculas diversas, com papel adaptativo ao meio, como, por exemplo, moléculas que conferem defesa contra herbívoros.

7. Fitobentos é o conjunto de organismos autotróficos que vivem no substrato dos ecossistemas aquáticos, como algas e plantas aquáticas.

As macroalgas têm relativa capacidade de acumular metais, entre eles o chumbo (Pb), o mercúrio (Hg) e o cádmio (Cd), que se combinam com outras moléculas presentes nas células desses vegetais. Por exemplo, estudos mostram que a alga verde *Ulva* sp. tem um alto potencial de acumulação de metais pesados, como chumbo e cobre, sendo considerada uma boa fonte de material biológico para análises de poluição ambiental. A partir disso, tem-se uma situação preocupante do ponto de vista ecológico, levando-se em consideração que ela faz parte da dieta de peixes e de pequenos invertebrados, representando uma das poucas fontes de alimento para herbívoros em ambientes recifais poluídos.

O processo de perda de qualidade dos ambientes recifais leva à redução do número de espécies, comprometendo seu papel ecológico como fonte de alimento e habitat para diferentes grupos de organismos, inclusive para grandes herbívoros, como as tartarugas. Aliás, elas ficam mais susceptíveis a doenças diversas na ausência de espécies de macroalgas, ricas em substâncias antioxidantes, como alguns carotenóides⁵. Tartarugas apresentam, por exemplo, maior frequência de fibropapilomas, um tipo de tumor contagioso de pele que, em estágios avançados da doença, prejudica a visão, a defesa e a alimentação desses animais.

Assim, a redução da riqueza de espécies tem como consequência adicional a perda da diversidade química, propriedade intrínseca dos ambientes recifais. Uma gama de compostos químicos sintetizados pelas comunidades de macroalgas que habitam áreas costeiras expostas aos impactos antrópicos pode sofrer significativa redução quantitativa e qualitativa. Impactos derivados da poluição costeira, ou mesmo aqueles relacionados à exploração de petróleo e pesca, entre outros, influenciam o metabolismo⁶ dos organismos, comprometendo a síntese de muitos desses metabólitos. A menor riqueza e abundância de clorofilas e carotenóides em algas de locais impactados, por exemplo, está relacionada a altas concentrações de matéria orgânica e inorgânica nessas áreas. Com a dominância de um ou poucos gêneros, a riqueza e a abundância de organismos do fitobentos⁷ em áreas costeiras poluídas diminui drasticamente, reduzindo também a riqueza e a abundância dos compostos

químicos sintetizados por essas comunidades. Sendo assim, áreas marinhas preservadas e/ou protegidas aumentariam a diversidade de macroalgas e preservariam um amplo espectro de compostos químicos primários e secundários.

Efeitos das mudanças climáticas

Desde o início da Revolução Industrial, no século XVIII, a quantidade de gás carbônico (CO_2) produzido e liberado para a atmosfera tem aumentado. A elevação nos níveis de CO_2 atmosférico, devido, principalmente, à queima de combustíveis fósseis, é um dos responsáveis pelo aumento da temperatura do planeta – o chamado efeito estufa. Segundo as leis básicas da difusão de gases e da termodinâmica, o excesso de CO_2 de origem antropogênica e o calor resultante da elevação da temperatura da atmosfera têm sido absorvidos pelos oceanos. A lógica dessa reação é que o CO_2 , ao entrar em contato com a água, reage liberando uma grande quantidade de prótons (H^+) – elementos químicos que fazem com que a água fique menos básica do que o normal (processo chamado de acidificação ou redução do pH). Em conjunto com o aumento da temperatura, as condições químicas das águas oceânicas também estão sendo alteradas rapidamente. Esses estressores (aumento de CO_2 e temperatura), que são globais, interagem com os poluentes lançados localmente, aumentando a complexidade das interações abióticas, sendo capazes de alterar a fisionomia dos ambientes recifais, como são conhecidos.

Os organismos que utilizam carbonato de cálcio em sua estrutura são mais diretamente afetados pela combinação de estressores locais e globais. Quando o pH da água é reduzido e a temperatura é elevada, há uma maior dissolução dos íons carbonatos, dificultando, assim, seu crescimento. Quando são incluídos nessa equação os nutrientes derivados da poluição urbana, as algas calcárias são ainda mais prejudicadas. Por outro lado, macroalgas não-calcárias parecem ser menos sensíveis a esses efeitos, beneficiando-se da elevação da temperatura, assim como do aumento de CO_2 e de nutrientes. Estudos mostram a proliferação dessas algas em regiões naturalmente enriquecidas com CO_2 (como perto de vulcões), o que indica que em um futuro próximo as algas calcárias podem ser substituídas por algas não-calcificadas nos ambientes diversos, resultando na perda de espécies e também de habitats.

Nos últimos vinte anos, a quantidade de estudos científicos sobre os efeitos do aquecimento e da acidificação global dos oceanos nos organismos marinhos tem aumentado com o propósito de determinar como a biota marinha será afetada. O Projeto Coral Vivo tem grande interesse científico acerca dos efeitos do aumento de CO₂ e da temperatura nos organismos dos recifes brasileiros; assim, concebeu e disponibiliza uma estrutura que procura reproduzir em menor escala as condições presentes e futuras do ambiente marinho. Esse pequeno laboratório-oceano é chamado de mesocosmo marinho⁸. Através da manipulação da temperatura e da concentração de CO₂, e com a medição de aspectos fisiológicos das algas, tem sido possível testar diferenças entre o comportamento desses organismos submetidos às condições atuais e àquelas que simulam o ano 2100 – quando a concentração de CO₂ e a temperatura poderão ser bem maiores. Resultados desses experimentos já indicam efeitos negativos do aumento de CO₂ e da temperatura em algas calcárias vermelhas e verdes.

Turismo

Ao discutir os impactos, não se pode esquecer que mesmo a utilização aparentemente inofensiva dos ambientes recifais para atividades turísticas tem consequências relevantes. Além do pisoteio e da destruição direta das formações recifais, a presença do turista e o ruído das embarcações, entre outras coisas, alteram a estrutura das populações de diferentes níveis tróficos, especialmente a dos peixes (ictiofauna) e algas. Um estudo realizado em dois recifes – Picãozinho (ambiente frequentado por turistas) e Gonçalo (ambiente preservado) – localizados no litoral de João Pessoa (PB, Brasil), procurou avaliar as espécies de macroalgas recorrentes em ambas as áreas. Apesar de serem muito semelhantes do ponto de vista físico e de estarem geograficamente próximos, a área impactada pela presença frequente de turistas apresentou uma redução de cerca de 30% no número de espécies quando comparada à área controle. Observações nesses recifes revelaram também a presença diferenciada em Picãozinho de elevada abundância de peixes conhecidos popularmente por “sargentinho” (*Abudefduf saxatilis*). A alta densidade dessa espécie de peixe se deve à presença diária de grande número de mergulhadores que, além de pisotear os corais e ressuspender o sedimento,

alimentam os peixes com pão, atraindo essas espécies oportunistas. Entretanto, no período de baixa temporada no turismo, esses peixes acabam por dizimar espécies de algas, especialmente as não-calcárias. Esses impactos da pressão por parte de herbívoros ocorre também por conta da pesca predatória de carnívoros. Com menos carnívoros, existe uma reação em cadeia que favorece a proliferação de herbívoros, o que, por sua vez, compromete o crescimento, o assentamento e o desenvolvimento das macroalgas marinhas⁹.

9. Ver PAULA et al. (2016), capítulo 21 deste volume.

Conclusão

Considerando o papel das algas e dos sistemas recifais como fonte de renda e de emprego nas regiões costeiras, sua preservação integral, manejo sustentável e gestão adequada são emergenciais, pois cada vez mais se alastra pelo litoral brasileiro um processo de ocupação e de uso desordenado dos recursos naturais. Para que se tenha mais argumentos para a conservação dos ecossistemas marinhos, deve-se aprimorar não só o conhecimento sobre a diversidade desses organismos, como também de aspectos de sua biologia e ecologia. Deve-se investir fortemente em estudos relacionados às possíveis aplicações econômicas das macroalgas e de seu uso sustentável. Assim, quanto mais valiosos ou caros forem os sistemas recifais para a sociedade, mais fortes serão os argumentos para sua conservação, permitindo que gerações futuras se beneficiem não só de produtos e serviços desses ambientes, mas também da beleza apresentada por eles e, especialmente, por suas coloridas macroalgas.

Literatura recomendada

- FIGUEIREDO, M.; HORTA, P.A.; PEDRINI, A.; NUNES, M.; NUNES, J.M. 2008. Benthic marine algae on Brazilian coral reefs: a bibliographical revision. *Oecologia Brasiliensis*, 12:40-50.
- HORTA, P.A.; AMANCIO, E.; COIMBRA, C.S.; OLIVEIRA, E.C. 2001. Considerações sobre a distribuição e origem da flora de macroalgas marinhas brasileiras. *Hoehnea* (São Paulo), 28(3):243-265.
- HORTA, P.A.; SILVA, R.L.; RORIG, L.; VARELA, A.; BURGOS, D. 2010. Sistemas de classificação de macroalgas: bases para estudos taxonômicos. 1:29-51 in PEDRINI, A.G. (Org.) *Macroalgas: uma introdução à taxonomia*. Rio de Janeiro: Technical Books.
- SCHERNER, F.; HORTA, P.A.; DE OLIVEIRA, E.C.; SIMONASSI, J.C.; HALL-SPENCER, J.M.; CHOW, F.; NUNES, J.M.C.; PEREIRA, S.M.B. 2013. Coastal urbanization leads to remarkable seaweed species loss and community shifts along the SW Atlantic. *Marine Pollution Bulletin*, 76:106-115.

Poluição em recifes de coral por vinhoto da cana-de-açúcar

José Renato M. de B. Correia, Henrique F. dos Santos, Gustavo A. S. Duarte, Raquel S. Peixoto, Ricardo M. Chaloub, Clovis B. Castro

Ameaças aos recifes de coral e efeitos da poluição marinha

Os recifes de coral são um dos ecossistemas mais ameaçados do mundo, por diversos tipos de impacto, como aquecimento e acidificação da água do mar, turismo desordenado, pesca excessiva e poluição. Alguns deles serão abordados neste livro; neste capítulo o foco será a poluição química, mais especificamente a poluição orgânica através do resíduo do vinhoto da cana-de-açúcar.

Primeiramente, convém definir o termo “poluição”, que se refere à *“presença de substância química em concentração acima das encontradas naturalmente nos ambientes causando efeitos danosos aos organismos”*. Dessa mesma forma, o termo “contaminação” aplica-se às substâncias químicas que, mesmo presentes no ambiente, ainda não têm relatados danos causados aos organismos.

Entre as ciências que estudam esses efeitos está a ecotoxicologia. Ela pode ser definida como a ciência que *estuda os efeitos danosos causados por poluentes em ecossistemas*. Cientistas avaliam esses efeitos por meio de experimentos biológicos e medições de alterações bioquímicas, fisiológicas e comportamentais nos organismos expostos. Com o avanço das tecnologias moleculares e o desenvolvimento de equipamentos mais sensíveis a mudanças fisiológicas nos organismos, o conhecimento ecotoxicológico com corais está em crescimento.

Inicialmente, na década de 1970, os estudos de impactos de contaminação sobre os corais se detinham à descrição das comunidades coralíneas no ambiente antes e depois do impacto. Estudos que relacionavam a poluição aos danos nas estruturas reprodutivas nesses organismos também foram feitos, principalmente sobre os efeitos do petróleo¹. No fim da década de 1980, as pesquisas começaram a focar na influência

1. Ver SANTOS et al. (2016), capítulo 13 deste volume.



2. Ver MARQUES et al. (2016), capítulo 16 deste volume.

3. Demanda Química de Oxigênio (DQO) – Quantidade de oxigênio necessária para oxidação da matéria orgânica por meio de um agente químico; Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) – Quantidade de oxigênio necessária para degradação da matéria orgânica em processos biológicos.

das substâncias na fertilização dos gametas dos corais e na sobrevivência e metamorfose das larvas geradas. Então, a partir da década de 1990, começaram a surgir investigações sobre danos na fotossíntese realizada pelas microalgas que vivem em simbiose dentro do tecido dos corais, chamadas de zooxantelas, e como esses danos se estendem a seus hospedeiros.

Atualmente, os estudos vêm avaliando as respostas moleculares, celulares e fisiológicas resultantes da exposição dos corais a contaminantes, utilizando biomarcadores².

O vinhoto da cana-de-açúcar e o desaparecimento de corais na costa pernambucana

Historicamente, os recifes pernambucanos sofreram muito no começo da colonização do país. Os fortes e as igrejas do Estado possuem em suas paredes grande quantidade de esqueletos de corais, usados como blocos de construção ou na produção de cal. A introdução da cana-de-açúcar na época colonial e a manutenção de Pernambuco como um dos maiores produtores do país foi aos poucos contribuindo para o empobrecimento do solo, o desmatamento e o consequente aumento de sedimentação nos recifes.

O vinhoto, também chamado de vinhaça ou restilo, é um resíduo da produção de etanol, de forma que é possível ter não só vinhoto da cana-de-açúcar, como de qualquer outro vegetal utilizado na produção de etanol, como a beterraba, o milho e o sorgo. O vinhoto da cana-de-açúcar é caracterizado, entre outras coisas, pelo alto teor de nutrientes, baixo pH e alto consumo de oxigênio em meios aquáticos (Demandas Química e Bioquímica de Oxigênio³). No Brasil, são gerados aproximadamente 13 litros de vinhoto para cada litro de etanol produzido.

Em 1975, para estimular a produção de etanol no país, em resposta à elevação do preço do petróleo no mercado mundial gerada na primeira crise mundial do petróleo, foi criado o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), por meio do Decreto nº 76.593, de 14 de novembro de 1975. O programa financiou as usinas de cana-de-açúcar pelo país objetivando o crescimento da produção de etanol, ocorrendo, em consequência, o aumento da geração de vinhoto, despejado em grandes volumes nos rios durante

os primeiros anos de sua implementação. Após denúncias de danos causados pelo derrame de vinhoto nos rios do Nordeste, em 1978 foi aprovada a proibição de seu despejo, de acordo com as portarias nº 323, de 29 de novembro de 1978, e nº 158, de 03 de novembro de 1980. O resíduo deveria ser mantido em lagoas de tratamento.

O problema de acúmulo de vinhoto foi parcialmente resolvido com a adoção das lagoas de tratamento e com o uso do próprio resíduo, depois de tratado, para a irrigação das lavouras de cana-de-açúcar – prática conhecida por fertirrigação ou fertirrigação. Desde o começo do programa até a proibição do derrame, o Nordeste brasileiro produziu cerca de 820 milhões de litros de álcool, equivalente, aproximadamente, a 10,6 bilhões de litros de vinhoto despejado nos rios, indiscriminadamente, sem nenhum tratamento.

Entretanto, a demanda de etanol era tamanha, que as lagoas já não comportavam o volume gerado de resíduo, e vazamentos se tornaram constantes nos rios adjacentes às plantações. O lançamento indiscriminado de vinhoto nos rios foi responsável por um grande acidente no rio Capibaribe (PE, Brasil) em agosto de 1983, com o despejo de 1,4 bilhão de litros do resíduo em apenas 10 dias. Isso provocou uma mancha com extensão de 40 quilômetros por 500 metros de largura, que se espalhou pelo litoral e poluiu as praias de quatro municípios da região metropolitana do Recife, causando uma mortandade de peixes estimada em 50t e uma redução de 60% dos invertebrados⁴.

Na década de 1960, o pesquisador francês Jacques Laborel, à época professor do Instituto de Biologia Marinha e Oceanografia de Pernambuco (atual Departamento de Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco), descreveu os recifes brasileiros ao longo de quase toda a costa nordestina como bem desenvolvidos. Retornando ao Brasil, em 2002, o mesmo pesquisador deu depoimento aos professores e pesquisadores da Universidade Federal de Pernambuco, Beatrice Ferreira e Mauro Maida, considerando esses recifes extremamente empobrecidos, estimando uma redução de 80% no que outrora havia descrito.

4. BRAGA, R.A.P. 1985. *Ciência e Cultura*, 37(9):1415-1419.

Levantamentos realizados por Beatrice e Mauro confirmaram que as estimativas de Jacques Laborel estavam corretas, indicando que cerca de 75% dos recifes no litoral pernambucano estariam prejudicados. Esses autores apontam como possíveis causas o aumento da sedimentação, devido à intensa agricultura e consequente desmatamento, à extração direta de corais no passado, à pesca e ao turismo. Uma causa adicional da agricultura da cana-de-açúcar, entre as décadas de 1960 e 1990, pode estar relacionada à poluição química pelo aporte de vinhoto, despejado em grandes volumes nos rios nordestinos.



Figura 1. Esquema da poluição fluvial-marinha causada pelo vinhoto antes da proibição de seu derrame nos rios. (A) Da destilaria da usina, (B) o vinhoto gerado era diretamente despejado nos rios ou seguia para lagoas de tratamento onde ficava contido, sendo posteriormente (C) enviado aos rios. (D) Percorrendo os rios, o resíduo poderia chegar à região estuarina onde, em Pernambuco, encontra-se a maioria dos recifes e (E) sua mancha poderia afetar os corais nas fases de vida (1) adulta, (2) larval e (3) de recrutas.

Microrganismos associados aos corais e sua relação com a poluição orgânica

A relação mutualística entre corais e microrganismos é bastante conhecida, especialmente em relação à simbiose coral-zooxantela⁵. Porém, a importância dos demais microrganismos existentes no esqueleto, no tecido e no muco dos corais – entre eles, bactérias, fungos e vírus – tem sido bastante discutida pelos pesquisadores. Muitos desses microrganismos desempenham funções benéficas aos corais, ajudando na assimilação de elementos químicos, decomposição de carapaças de invertebrados e combate a outros microrganismos.

Apesar de todas as características positivas da relação de corais com diversos microrganismos, uma consequência danosa da quebra desse equilíbrio mutualístico e da ação infecciosa dos mesmos são as doenças e as síndromes em corais. Há hipóteses de que a atividade microbiana seja também um fator responsável pelo fenômeno de branqueamento de corais⁶. Porém, entre os fatores apontados como causadores das doenças de corais está a poluição orgânica. O acúmulo de matéria orgânica vinda de fontes de poluição marinha, além do escoamento e poluição dos rios, estimula o crescimento de microrganismos. Além disso, o aumento de nutrientes no mar também estimula o crescimento de algas marinhas. As algas liberam na água carbono orgânico dissolvido (C.O.D.), que é apontado como um dos principais alimentos de microrganismos que podem infectar os corais⁷.

Como mencionado, o vinhoto foi responsável por diversos eventos de deterioração ambiental. Dado seu alto conteúdo de nitrogênio, fósforo, potássio e carbono – nutrientes essenciais para o desenvolvimento dos microrganismos e o crescimento de algas marinhas – o vinhoto resultante da indústria alcooleira pode estar relacionado com o declínio de corais no Nordeste brasileiro. Possivelmente, isso contribui para um aumento de doenças (enfermidades com microrganismos patogênicos identificados) e síndromes (enfermidades sem microrganismos patogênicos identificados) nos corais.

5. Ver MARANGONI et al. (2016), PICCIANI et al. (2016) e GARRIDO et al. (2016), capítulos 4, 5 e 6 deste volume, respectivamente.

6. Ver MARANGONI et al. (2016), capítulo 4 deste volume.

7. Ver MACHADO et al. (2016), capítulo 3 deste volume.

8. Corais juvenis, formados por um ou mais pólipos, porém com poucos meses de vida.

9. Ver PIRES et al. (2016), capítulo 8 deste volume.

10. Após se fixarem em uma superfície, as larvas se modificam, formam seu esqueleto e viram os primeiros indivíduos de uma futura nova colônia – ou pólipos primários.

11. Fração volumétrica (v/v ou seja volume/volume). Uma forma de mostrar a composição de uma mistura formada pelo soluto, no presente caso, o vinhoto; e o solvente, no presente caso, a água do mar.

A influência do vinhoto nas larvas e recrutas de corais

Para pesquisar se o vinhoto poderia prejudicar os corais em fases iniciais da vida, como larvas e recrutas⁸, o Projeto Coral Vivo realizou experimentos em sua base utilizando vinhoto obtido em uma usina do Estado de Minas Gerais, larvas do coral-cérebro-da-bahia (*Mussismilia braziliensis*) e recrutas do coral couve-flor (*Mussismilia harttii*).

Para conseguir as larvas do coral-cérebro-da-bahia, os corais foram coletados e mantidos em viveiros até a desova (em fevereiro de 2011)⁹. Os gametas foram reunidos em caixas plásticas com água do mar renovada a cada 24 horas, para que ocorresse a fertilização, e, após cerca de 8 horas, já existiam larvas.

O objetivo do estudo era verificar a influência do vinhoto sobre a sobrevivência e a metamorfose das larvas¹⁰. Para isso, foram utilizadas larvas com quatro dias de vida, colocadas em placas de laboratório estéreis contendo diferentes diluições do vinhoto em água do mar. Pequenos pedaços de cerâmica também foram adicionados, para que as larvas pudessem se fixar e metamorfosear, tendo sido contabilizado quantas morreram e metamorfosearam ao longo de 9 dias. Com esse experimento, foi possível verificar que o vinhoto matou todas as larvas nas duas diluições com mais vinhoto (1% e 5% v/v¹¹), porém, poucas larvas morreram nas diluições com menos vinhoto. Isso significa que quanto mais vinhoto é adicionado, maior é a taxa de mortalidade das larvas de corais. Não houve influência sobre a metamorfose das larvas que sobreviveram, ou seja, elas metamorfosearam mesmo nas diluições com menos vinhoto: 0,001%, 0,01% e 0,1% (v/v).

Como mencionado, o vinhoto reduz drasticamente a concentração de oxigênio na água. Dessa forma, acredita-se que um dos fatores que resultaram na morte de todas as larvas nas diluições de 1% e 5% (v/v) foram esses baixos níveis de oxigênio (50% mais baixo que o controle), atingindo níveis não suportáveis para a sobrevivência das larvas dos corais. Em comparação, outras pesquisas mostraram que larvas de ostras são mais resistentes a teores baixos de oxigênio, permanecendo vivas mesmo com metade dos níveis obtidos nos experimentos supracitados.

Outro fator, não menos importante, refere-se às concentrações de nutrientes, como nitrogênio, fósforo, potássio e carbono, presentes nessas diluições. Esses elementos são chamados de nutrientes porque são necessários para a constituição e o metabolismo de organismos vivos, inclusive os corais. Porém, em níveis exagerados, essas substâncias são prejudiciais a muitos organismos marinhos.

Outros cientistas verificaram que larvas de algumas espécies de corais não toleram altos níveis de amônia e fosfato (compostos de nitrogênio e fósforo bastante presentes em locais poluídos por esgoto) e acabam morrendo ou têm sua metamorfose inibida.

Além dos baixos níveis de oxigênio em decorrência da adição do vinhoto, esses resíduos contêm altos níveis de nitrogênio, fósforo e outras substâncias que podem também ter concorrido para a mortalidade das larvas. No presente experimento, não foram observadas mortes de larvas nem redução nas taxas de metamorfose durante a exposição a diluições com pouco vinhoto (0,1% v/v ou menor), o que demonstra que as larvas do coral-cérebro-da-bahia toleram níveis baixos do resíduo, quando expostas por um curto período de tempo.

Foi testada ainda a sobrevivência de recrutas de coral a diferentes concentrações de vinhoto. Recrutas do coral couve-flor foram criados a partir de larvas obtidas em desova ocorrida em outubro de 2010. As placas com recrutas foram mantidas em viveiros com água do mar circulante por oito meses, quando os recrutas já estavam bem formados. O experimento foi realizado com um número igual de recrutas, expostos às mesmas quantidades de vinhoto usadas com as larvas do coral-cérebro-da-bahia, com análise e contagem dos recrutas mortos após quatro dias de exposição. Não foram registradas diferenças nas taxas de mortalidade entre recrutas expostos por mais ou menos tempo ao vinhoto. Porém, no tratamento com a diluição de 1% (v/v) em água do mar (maior concentração testada), houve modificação da coloração do tecido, em alguns recrutas; e diminuição do tecido com conseqüente exposição do esqueleto, em outros.

Considerou-se que essas modificações de coloração, em que os recrutas que antes possuíam cor amarronzada passaram a apresentar coloração rósea e esbranquiçada, são decorrentes do estresse químico causado pelo vinhoto. Alguns estudos mostraram que corais costumam produzir uma proteína particular, chamada de pociloporina¹², que tem função reparadora de danos celulares, teciduais e proteção luminosa das zooxantelas. O nome dessa proteína está associado ao gênero da espécie de coral dos oceanos Índico e Pacífico, *Pocillopora damicornis*, onde ela foi descoberta. Portanto, os recrutas afetados do coral couve-flor em estresse podem ter produzido compostos desse tipo para sobreviver à contaminação por vinhoto a que estavam submetidos.

Efeitos do vinhoto em indivíduos adultos de corais

Até agora foi demonstrado o que o vinhoto pode causar em larvas e corais juvenis (recrutas) – organismos, em teoria, mais frágeis. Porém, é preciso saber quais danos esse resíduo causa aos indivíduos adultos. Para isso, foram realizados experimentos utilizando pólipos do coral couve-flor, com o objetivo de avaliar o efeito do vinhoto sobre a atividade fotossintética das microalgas associadas ao tecido do coral, as zooxantelas, mediante a utilização de um fluorímetro submersível, o *Diving-PAM* (Box 1). Paralelamente, avaliou-se o efeito sobre a comunidade de bactérias presente no coral por meio de técnicas avançadas de genética molecular. Cerca de 120 pólipos adultos foram divididos em cinco grupos de 24 indivíduos, expostos por cinco dias a diferentes diluições do vinhoto em água do mar.

Fotossíntese e saúde fotossintética das zooxantelas.

Fotossíntese é um processo que utiliza a luz como subsídio energético para incorporar nutrientes inorgânicos em constituintes orgânicos. A energia é absorvida por pigmentos fotossinteticamente ativos, sendo a *clorofila-a* o principal deles. A energia utilizada pode ter três destinos: ser utilizada fotoquimicamente para a realização da fotossíntese, ser dissipada como calor ou ser reemitida como fluorescência. Esses três processos de utilização da energia absorvida são competitivos, de modo que o aumento na eficiência de um dos processos irá acarretar a diminuição do rendimento dos outros dois. Dessa forma, a fluorescência da *clorofila-a* constitui uma valiosa “sonda” natural dos eventos biofísicos primários da fotossíntese, e vem sendo utilizada como importante ferramenta para a compreensão do processo fotossintético.

O fluorímetro subaquático *Diving-PAM*, da empresa alemã Walz, é capaz de medir a fluorescência emitida pela *clorofila-a* e calcular a fração da energia absorvida utilizada na fotoquímica e dissipada como calor. Por meio desses cálculos, podem ser obtidos alguns parâmetros que informam a respeito da saúde do aparato fotossintético da alga simbiote zooxantela ou de qualquer outro organismo fotossintetizante. Entre esses parâmetros, merecem destaque: o “Rendimento Quântico Máximo”, que indica a capacidade fotossintética máxima do organismo; a “Dissipação Não Fotoquímica”, que representa a energia dissipada na forma de calor, bem como a “Taxa de Transporte de Elétrons”, que expressa a taxa de transferência de elétrons através do Fotossistema II.

A partir de valores anteriormente estimados em zooxantelas saudáveis presentes nos tecidos dos corais, é possível indicar se esses endossimbiontes estão ou não sofrendo um estresse e, conseqüentemente, prever se o coral hospedeiro será afetado.

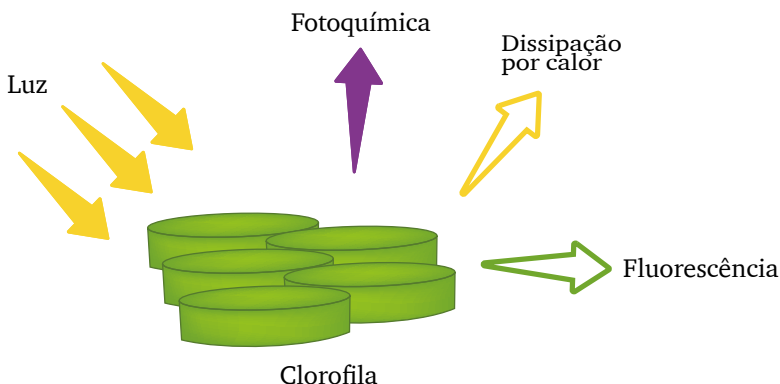


Figura 2. Destinos da energia luminosa absorvida pelos pigmentos fotossinteticamente ativos, neste no caso, a clorofila.

Verificou-se que após cinco dias de exposição a uma concentração maior de vinhoto na água do mar (1% v/v), as zooxantelas endossimbiontes dos corais apresentaram uma diminuição de 40% em sua capacidade fotoquímica máxima em relação aos indivíduos mantidos em condições normais (ditas de “controle”), indicando que o vinhoto estava afetando o aparato fotossintético do endossimbionte mediante dano ao Fotossistema II. Adicionalmente, foi observado que a “Taxa de Transferência de Elétrons” através do Fotossistema II encontrava-se reduzida em cerca de 32% nos endossimbiontes dos corais expostos à maior concentração de vinhoto (1% v/v), reforçando a evidência do dano ao aparato fotossintético.

Inesperadamente, notou-se que a “Dissipação Não Fotoquímica” se encontrava bastante aumentada nos corais submetidos à maior concentração, quando comparada com a apresentada pelos corais não expostos ou expostos a menores concentrações de vinhoto (isto é, 0%, 0,001%, 0,01% e 0,1% v/v). Isso, a princípio, surpreendeu os pesquisadores, pois esperava-se também uma redução nesse parâmetro. Estes resultados inesperados encontraram explicação quando verificou-se que estudos realizados em outras regiões do planeta com diferentes espécies de corais evidenciaram que infecções bacterianas resultavam em altos valores de “Dissipação Não Fotoquímica” nos tecidos adjacentes. Conseqüentemente, após a análise dos resultados da genética molecular sobre a comunidade de bactérias dos corais, foi observada uma comunidade de bactérias bastante distinta nos pólipos expostos às maiores quantidades de vinhoto em comparação com os demais corais do experimento.

Constatou-se, então, que os corais dos recipientes mais poluídos por vinhoto foram pouco a pouco sendo colonizadas por bactérias que afetaram a eficiência fotossintética das zooxantelas endossimbiontes e, como consequência, grande parte da energia absorvida foi devolvida sob a forma de calor, como uma última tentativa de preservar os constituintes de seus fotossistemas.

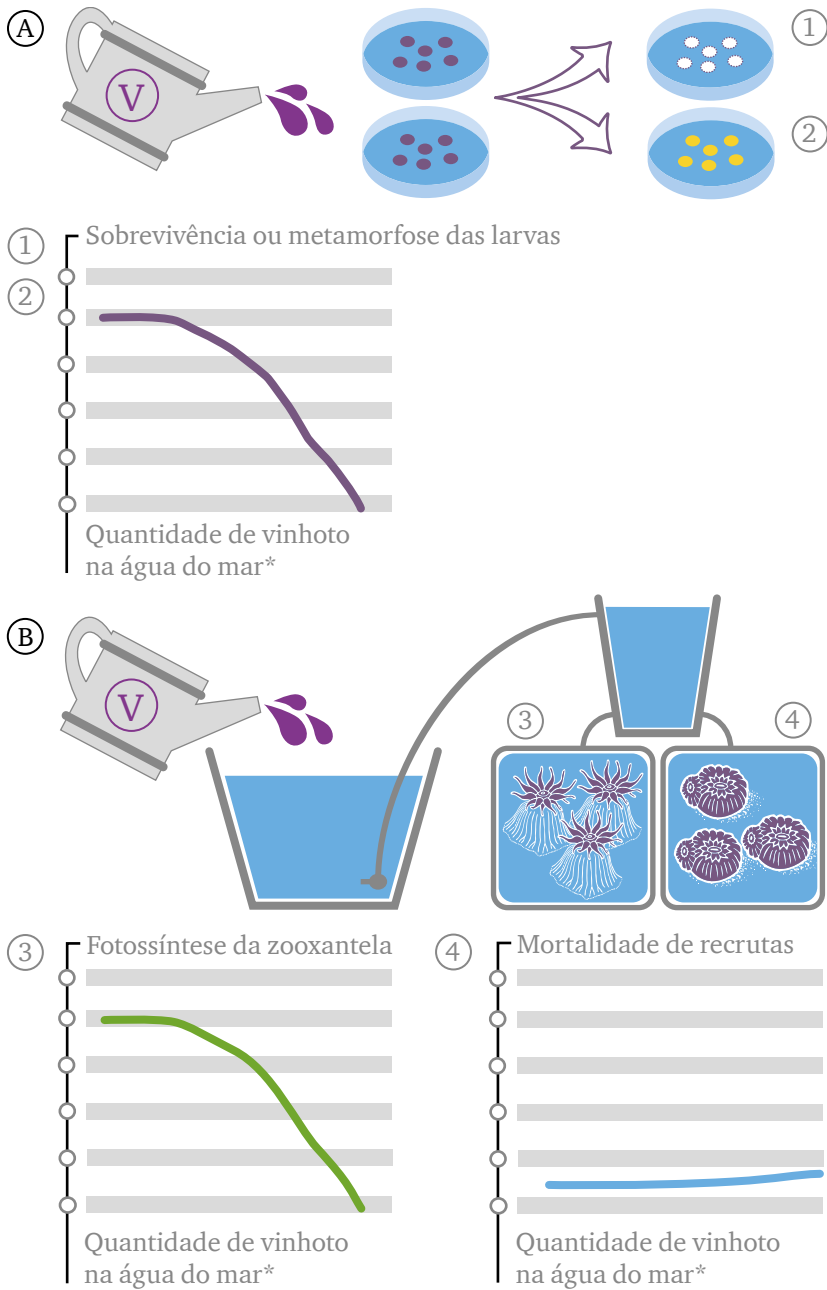


Figura 3. Experimentos realizados para avaliação da influência do vinhoto em corais brasileiros. (V) O vinhoto da cana-de-açúcar foi (A) misturado à água do mar em diferentes quantidades e testado em placas de laboratório estéreis com larvas do coral-cérebro-da-bahia para estudar sua influência na metamorfose ou na sobrevivência das larvas. (B) Também foi testado em um sistema de exposição em (1) pólipos adultos para verificação de danos à fotossíntese das zooxantelas simbióticas e em (2) recrutas do coral couve-flor para avaliação de mortalidade em recrutas. * Vinhoto diluído até 1%.

Outras considerações sobre os impactos em Pernambuco e comparação com os recifes do Sul da Bahia

Apesar da influência negativa do vinhoto nos organismos estudados, não se pode atribuir apenas a ele a situação atual das comunidades de corais de Pernambuco, descartando outros fatores também agravantes. Desde os primeiros estudos de Laborel, os recifes pernambucanos vêm sofrendo com um grande aumento populacional, implantação de empreendimentos industriais e portuários e crescimento descontrolado do turismo, que devido às más políticas de preservação, destroem esses ecossistemas com pisoteio de espécies, quebra proposital dos organismos para souvenirs, poluição por meio de protetores solares, produtos de beleza, garrafas, sacos plásticos, linhas e redes de pesca. Além disso, a alta demanda de pescado nessas regiões causa profundo impacto na fauna de peixes desses ambientes, muitos deles responsáveis pelo controle de algas e outros organismos nocivos aos corais.

A falta de fiscalização sobre as plantações de cana-de-açúcar também representa um fator agravante aos danos causados pelo descarte descontrolado do vinhoto nas décadas de 1970 e 1980. A destruição de grande parte das matas ciliares ao redor das plantações favorece a lixiviação do solo e, aliado ao uso indiscriminado de diversos agrotóxicos, permite que uma grande quantidade de sedimento terrestre e poluentes sejam levados aos recifes e contribuam para sua degradação.

Ao traçar um paralelo entre os recifes de Pernambuco e os do Sul da Bahia (região com maior abundância de corais no país), percebe-se que muitos dos impactos ocorrem em ambos. Mas por que há cobertura maior de corais no Sul da Bahia e menor em Pernambuco? Em primeiro lugar, a ocupação da orla e as atividades humanas nas duas áreas são muito distintas, com pequenas cidades separadas entre si por algumas dezenas de quilômetros no Sul da Bahia – a maior é Porto Seguro, com pouco mais de 100 mil habitantes. Por outro lado, a maioria dos recifes da Costa do Descobrimento tem localização afastada da orla, dificultando o acesso e minimizando os efeitos de eventual poluição de origem continental.

A consequência dessa situação de degradação é refletida nas taxas de recrutamento de corais em ambas as regiões. No Sul da Bahia, as taxas podem chegar a mais de 1000 recrutas por metro quadrado, enquanto em Pernambuco, esse número não passa de dezenas, apresentando, ainda, uma alta taxa de mortalidade devido ao soterramento pelos sedimentos. Portanto, além de estar com uma cobertura coralínea bastante reduzida, o que contribui para o pequeno abastecimento de larvas, os recifes pernambucanos não possibilitam o bom recrutamento, que preservaria e daria sobrevida às comunidades de corais da região.



Literatura recomendada

- AMABIS, J.M.; MARTHO, G.R. 1997. Revestimentos Celulares e Organização do Citoplasma in AMABIS, J.M.; MARTHO, G.R. (Eds) *Fundamentos da Biologia Moderna*. 2.ed. 7:111-131. São Paulo: Moderna.
- CORREIA, J.R.M.B. 2012. *Ecotoxicologia do vinhoto das plantações de cana-de-açúcar nas fases de vida iniciais e adulta de corais do gênero Mussismilia (Cnidaria, Scleractinia)*. 124p. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas - Zoologia) - Programa de Pós-graduação em Ciências Biológicas (Zoologia), Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- FERREIRA, B.P.; MAIDA, M. 2006. *Monitoramento dos recifes de coral do Brasil: Situação Atual e Perspectivas*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. 250p.
- ROHWER, F.; YOULE, M. 2010. *Coral Reefs in the Microbial Seas: The Influence of Fishing, Nutrients, Bacteria, Viruses and Climate Change on Nature's Most Wondrous Constructs*. United States of America: Plaid Press. 201p.
- ZAGATTO, P.A.; BERTOLETTI, E. 2014. *Ecotoxicologia Aquática: Princípios e Aplicações*. 2.ed. São Carlos: RiMa. 486p.

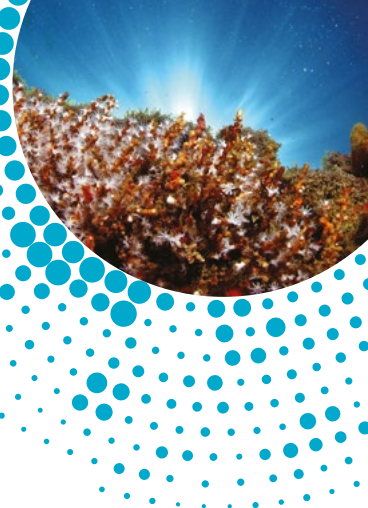
Contaminação de recifes de coral por petróleo e seus derivados

Henrique Fragoso dos Santos, Flávia Lima do Carmo,
Alexandre Soares Rosado e Raquel Silva Peixoto

Petróleo

O petróleo é uma mistura de diversos compostos, onde os mais abundantes são os hidrocarbonetos, formados por átomos de carbono e hidrogênio, além de pequenas quantidades de enxofre, nitrogênio e oxigênio, em proporções variáveis. Existem diversos tipos de hidrocarbonetos, que variam em relação à toxicidade, velocidade de biodegradação e solubilidade em água. Esse composto possui grande importância para a sociedade moderna, com infinitas aplicações. É a mais importante fonte de energia da atualidade, sendo amplamente utilizado na forma de combustível automotivo. São os derivados do petróleo, como a gasolina e o óleo diesel, que fazem mover os automóveis, os navios e os aviões. Além disso, ele é uma importante matéria-prima utilizada na fabricação de plásticos, tintas, borrachas sintéticas e diversos outros produtos.

Os hidrocarbonetos podem ser agrupados em quatro classes principais, com base na composição molecular: alcanos, alcenos, cicloalcanos e aromáticos. Os alcanos, também chamados de parafinas ou alifáticos saturados, são hidrocarbonetos de cadeias abertas, formados apenas por ligações simples entre seus carbonos. Compreendem a maior fração da maioria dos petróleos. Sua toxicidade é geralmente baixa, e são facilmente biodegradados. Os alcenos, também chamados de olefinas, são hidrocarbonetos também de cadeia aberta, porém possuem ligações duplas entre seus carbonos. Geralmente, estão em pequenas quantidades ou ausentes no petróleo, no entanto, estão em alta concentração em produtos de refino, como a gasolina. Os cicloalcanos, também chamados de naftas, são hidrocarbonetos de cadeias fechadas, ou seja, cíclicas, e possuem apenas ligações simples entre seus carbonos. Representam a segunda maior fração da maioria dos petróleos. Os aromáticos são hidrocarbonetos



de cadeia fechada e possuem um ou mais anéis aromáticos em sua molécula. Quando possuem mais de um anel, são denominados de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA). Os HPAs possuem grande importância ambiental, por sua alta toxicidade e biodegradação lenta.

Pode-se perceber que existe uma grande complexidade e diferença entre os compostos que constituem o petróleo, o que dificulta a limpeza de um ambiente contaminado. Infelizmente, acidentes envolvendo petróleo ou seus derivados são muito comuns, o que coloca em risco grande parte dos recifes de coral do planeta, pois a maioria dos acidentes ocorre em ambientes marinhos.

O aporte anual de hidrocarbonetos do petróleo para os oceanos é de aproximadamente $2,35 \times 10^6$ toneladas. A Figura 1 mostra as principais rotas de transporte de petróleo nos oceanos e as localizações dos recifes de coral. Pela figura, fica claro o tamanho do risco que os ambientes recifais estão correndo.

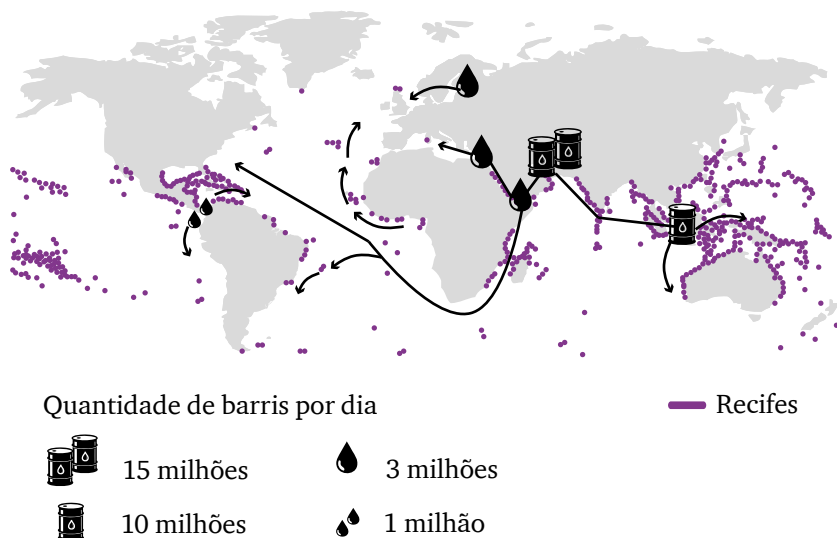


Figura 1. Localização dos recifes de coral no planeta e as rotas do petróleo nos oceanos. As setas representam as rotas comuns do petróleo e as gotas e barris representam o volume de trânsito de petróleo em locais específicos.

Para piorar a situação, existem também as contaminações que ocorrem do continente para o oceano, pois a maioria das refinarias de petróleo está localizada em regiões litorâneas, e acidentes em refinarias são bastante comuns. Nesses casos, ainda, não são raros os vazamentos que perduram por um longo período, agravando ainda mais o impacto na vida marinha. Além dos recifes serem muito suscetíveis a derramamento de petróleo, são também muito sensíveis, pois são berçários para diferentes espécies marinhas e abrigam organismos pouco resistentes à contaminação por petróleo, o que acentua o problema.

Existem três principais maneiras pelas quais os recifes de coral podem ser expostos a um derramamento de óleo. Em algumas regiões do planeta (especialmente o Indo-Pacífico), é comum o contato direto do óleo com os corais, impedindo as trocas gasosas adequadas, o que leva à asfixia desses animais, pois são recifes coralíneos mais superficiais. Outra forma de exposição é o vazamento do óleo subsuperficial encontrado nos reservatórios de petróleo, particularmente se o produto derramado é pesado, com densidade superior, ou próxima à da água do mar. Há, ainda, a exposição que ocorre devido à solubilidade de diversos compostos do petróleo, o que gera a formação de uma fração solúvel em água, possibilitando o contato com os corais que não são encontrados na superfície. Essa é a via de exposição mais comum na maioria dos casos.

O contato direto com o petróleo, ou apenas com sua fração solúvel, é extremamente danoso aos recifes, levando à morte de corais e, conseqüentemente, de diversos outros organismos marinhos. Com a morte dos corais, os recifes passariam de um ambiente extremamente diverso para um ambiente dominado basicamente por algas (Figura 2).

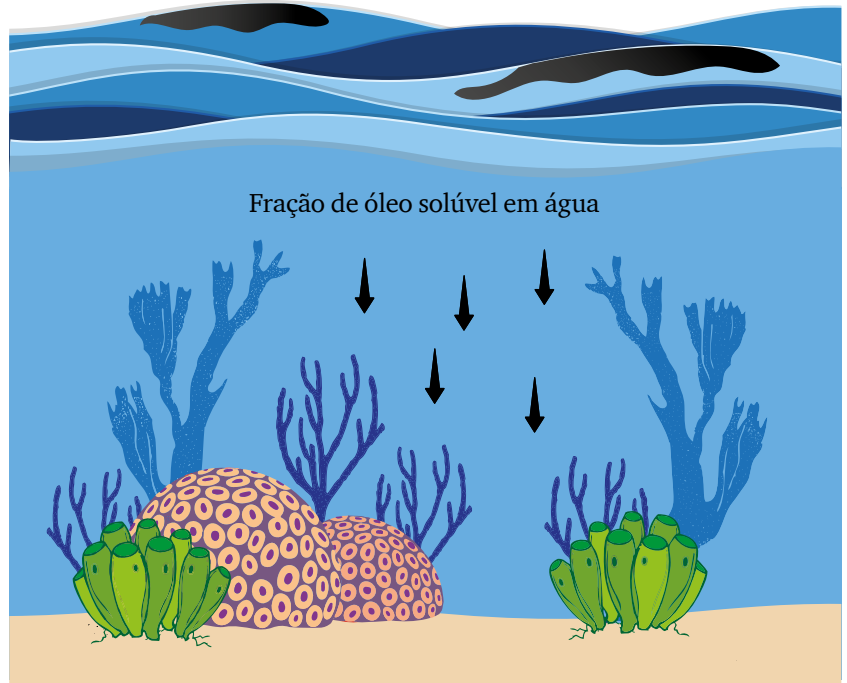


Figura 2. Representação do impacto da fração do óleo solúvel em água (FSA) em um ambiente recifal.

Efeito do petróleo nos corais

O estresse provocado pelo petróleo e seus derivados nos corais inclui: efeitos histológicos, como a morte do tecido; bioquímicos, como a mudança na produção primária das zooxantelas e o aumento da produção de muco; comportamentais, como os danos na alimentação e na retração do pólipos; reprodutivos, como a expulsão prematura e os prejuízos no assentamento larval, podendo ocasionar ainda a morte das larvas; de desenvolvimento, como a alteração da taxa de calcificação e atrofia muscular; e, por fim, danos na microbiota simbiótica ao coral.

As diferenças de tolerância ao óleo por diferentes espécies de corais é uma consideração importante, e a morfologia das espécies parece estar diretamente ligada à susceptibilidade. Por exemplo, estudos vêm demonstrando que corais ramificados parecem estar entre os mais suscetíveis, ao

passo que os corais maciços são mais tolerantes à exposição ao petróleo. Em estudo de campo durante derramamento ocorrido na Baía Las Minas (Panamá), foi observado que quase todos os corais ramificados foram mortos nas áreas do recife onde ocorreu a contaminação.

Outro aspecto importante é o tempo de duração da contaminação. Estudos demonstraram que uma contaminação crônica, mesmo em baixa concentração, pode ser mais danosa aos corais do que uma contaminação mais curta e com concentrações mais elevadas. Uma contaminação que perdura por um longo período pode prejudicar muitas funções biológicas normais, incluindo reprodução e recrutamento – o que irá reduzir de forma considerável a sobrevivência dos corais.

Uma característica comum aos corais frente a uma contaminação por petróleo é a capacidade de bioacumulação¹. Os hidrocarbonetos são bioacumulados de forma rápida nos tecidos (provavelmente pela elevada concentração de lipídeos), onde sofrem uma degradação lenta. Essa bioacumulação ainda pode expor as zooxantelas aos hidrocarbonetos. Já em áreas com uma contaminação crônica, os hidrocarbonetos ficam depositados por um longo período no exoesqueleto calcário dos corais. Cabe informar que os corais possuem a capacidade de adquirir os hidrocarbonetos a partir da coluna d'água. Já foi observado que, em alguns casos, os hidrocarbonetos podem estar ausentes no sedimento, mas presentes no esqueleto dos corais. Por outro lado, essa bioacumulação possibilita a utilização dos esqueletos dos corais como registros históricos de contaminação por hidrocarbonetos.

Além dos corais, o óleo pode também afetar inúmeros outros organismos que vivem nos recifes coralíneos, como peixes, plantas e diversos invertebrados. Outros habitantes sazonais dos recifes, como tartarugas e mamíferos marinhos, também podem sofrer com a exposição ao petróleo, uma vez que esses animais precisam vir à superfície para respirar regularmente.

1. Bioacumulação: é um processo que ocorre quando um composto químico ou um elemento químico se acumula em elevadas concentrações nos organismos, independentemente do nível trófico.

Exemplos de acidentes em ambientes recifais

Até os dias atuais são conhecidos diversos relatos de acidentes envolvendo petróleo e seus derivados em regiões de recifes de coral. No entanto, nem todos os casos são bem estudados. Nos acidentes onde a mortalidade dos corais foi avaliada, todos demonstraram uma perda considerável da cobertura de corais.

Em abril de 1986, na Baía de Las Minas (Panamá), estima-se ter ocorrido um vazamento de 10 a 16 milhões de litros de petróleo bruto, causando efeitos letais e subletais nos corais da região. Durante a Guerra do Golfo, em janeiro de 1991, um grande vazamento de 6,3 milhões de barris também causou danos irreversíveis em recifes de coral no Kuwait e na Arábia Saudita. No mar do Caribe, uma poluição contínua por petróleo, entre 1923 e 1985, provocada por uma refinaria em Aruba (Venezuela), também provocou graves danos aos corais. Atualmente, a cobertura de corais na região é muito baixa, e não são encontrados corais juvenis em torno de 9km nas proximidades da refinaria².

Mais recentemente, em abril de 2010, no maior desastre ambiental da história dos Estados Unidos, a explosão na plataforma *Deepwater Horizon*, da *British Petroleum*, localizada no Golfo do México, provocou a abertura do poço de petróleo, gerando um vazamento de cerca de 1 milhão de litros por dia. Um estudo realizado sobre o impacto de tal vazamento em corais de águas profundas concluiu que o petróleo vazado devastou corais que vivem a cerca de 7km a sudoeste do poço. O recife de coral atingido ocupa uma área equivalente a quase a metade de um campo de futebol, estando a aproximadamente 1,6km de profundidade. A maior parte do fundo do Golfo é barrenta, mas as colônias de corais que aparecem são oásis vitais para a vida marinha nas profundezas oceânicas frias. Há ainda uma grande ligação entre os animais que vivem na superfície e a vida no mar profundo, e problemas nesse ecossistema podem gerar danos a todo o ambiente marinho por muitos anos.

O maior e mais rico recife de coral do planeta, a Grande Barreira de Corais da Austrália, também vem sofrendo com o vazamento de petróleo e seus derivados. Na mesma época do desastre no Golfo do México, em abril de 2010, o navio

chinês Shen Neng 1 encalhou nas proximidades da barreira de corais. O acidente foi responsável por um vazamento de 3 a 4 toneladas de óleo, atingindo cerca de 3km de comprimento e 250m de largura, o maior já registrado na região. Algumas áreas danificadas tornaram-se completamente desprovidas de vida marinha. Estima-se que o desastre irá gerar danos consideráveis para o recife de coral em longo prazo, perdurando por aproximadamente 20 anos.

Os corais brasileiros não estão fora do risco de uma contaminação por petróleo. Pelo contrário, regiões específicas do Brasil estão sob risco crescente. Na região de Abrolhos (BA, Brasil), um dos mais importantes biomas de recife do planeta, a indústria petrolífera se aproxima perigosamente. As delimitações para a exploração de petróleo nas proximidades de reservas ecológicas ou parques marinhos exige um limite mínimo de 92.000km², o que não é respeitado no Brasil. Dentro desse limite, nas proximidades do Parque Nacional Marinho dos Abrolhos, existem 13 blocos de exploração de petróleo, o que coloca sob risco a maior área recifal do Atlântico Sul. Esses blocos são operados, em 2016, pelas empresas Petrobras, Vipetro, Perenco Petróleo e Gás do Brasil Ltda., Cowan Petróleo e Gás S.A. e Sonangol Starfish Oil & Gas S.A.

Na Baía da Ilha Grande (RJ, Brasil), a ameaça está por conta do Porto de Itaguaí, inicialmente denominado Porto de Sepetiba, e do terminal aquaviário de Angra dos Reis (Tebig), operado pela Petrobras Transporte S.A. (Transpetro). O terminal recebe navios-tanque que transportam petróleo e derivados. Em 2015 foram registrados dois acidentes nesse terminal, provocando o lançamento de milhares de litros de óleo na baía. Esses acontecimentos vêm colocando em risco uma das últimas regiões ao Sul do Brasil onde são encontrados corais.

A região de Búzios e Arraial do Cabo (RJ, Brasil), considerada um “oásis coralíneo” do Brasil, também está sob sério risco, devido ao início da exploração de petróleo no pré-sal e à exploração que já ocorre na Bacia de Campos. Em novembro de 2011, a empresa Chevron foi responsável por um vazamento de mais de 500 barris de petróleo no Campo de Frade. A mancha de óleo não chegou à região de Búzios somente devido às condições climáticas durante o vazamento, que favoreceram o afastamento do óleo (Figura 3).



Figura 3. Localização e dispersão do vazamento do petróleo no Campo de Frade em 2013, Bacia de Campos (RJ, Brasil). Adaptado de A Gazeta Online.

Para piorar ainda mais os danos aos corais, durante alguns dos desastres citados, as metodologias de “limpeza” do meio ambiente não foram as mais apropriadas. Em casos como o da Austrália, o do Golfo do México e o do Panamá foram utilizados dispersantes. Dispersantes são formulações químicas utilizadas com a finalidade de reduzir a tensão superficial entre óleo e água, auxiliando a dispersão do óleo em gotículas. No entanto, estudos demonstraram que os dispersantes podem ser mais tóxicos para o coral do que o próprio petróleo. Além disso, eles tornam frações do óleo, que não eram solúveis em água, solúveis, gerando danos ainda maiores para os recifes de coral e os ambientes coralíneos.

Biorremediação

Uma estratégia de limpeza eficiente, rápida e de baixo custo é a biorremediação. A biorremediação consiste na utilização de organismos vivos, ou suas enzimas, para reduzir ou remover – remediar – contaminações no ambiente. Os organismos utilizados podem ser plantas, algas e microrganismos, como bactérias e fungos.

A técnica de biorremediação pode ser conduzida de duas principais formas: (i) bioaugmentação e (ii) bioestímulo. A bioaugmentação é a estratégia na qual os microrganismos potencialmente degradadores de hidrocarbonetos de petróleo, previamente selecionados no laboratório, utilizando meios de cultura específicos, são introduzidos no ambiente. Podem ser utilizados microrganismos do próprio ambiente, assim como provenientes de outras áreas ou, ainda, estirpes modificadas geneticamente, de acordo com as leis vigentes de cada país. A utilização de microrganismos da biota natural seria, a princípio, mais indicada, pois não necessitaria de um monitoramento mais incisivo. Já o bioestímulo é uma estratégia de biorremediação que visa estimular a capacidade de microrganismos nativos do local contaminado para degradar poluentes. Essa estimulação pode ocorrer por meio da correção de pH, balanceamento de nutrientes em relação à carga de carbono do poluente orgânico, da aeração, da adição de aceptores de elétrons e da correção da umidade.

Frente à escassez de dados, a todos os problemas causados por derrames de petróleo em ambientes recifais e à busca por alternativas sustentáveis, o Laboratório de Ecologia Microbiana Molecular, do Instituto de Microbiologia Paulo de Góes, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, em parceria com a Rede de Pesquisas Coral Vivo, vem somando forças na tentativa de compreender o impacto do petróleo nos corais brasileiros e minimizar seus efeitos. Para tal, estão sendo desenvolvidos metodologias e produtos para a biorremediação de recifes de coral e ambientes coralíneos. As tecnologias são baseadas na técnica de bioaugmentação, e consistem na utilização de microrganismos do próprio coral com capacidade de degradar o óleo, bem como melhorar a saúde dos corais, funcionando como probióticos. A grande vantagem da utilização de microrganismos do próprio coral é que eles não causarão doenças, pois na seleção dos microrganismos são excluídos possíveis patógenos de coral, e também não são espécies de outro ambiente que serão introduzidas no ambiente a ser remediado. Ou seja, a possível solução para salvar os corais em uma contaminação por petróleo pode estar nos próprios corais.

Já foram realizados diferentes experimentos com corais da região de Búzios (RJ, Brasil) e Porto Seguro, na Bahia (Figura 4). Em todos os estudos ficou comprovada a eficiência tanto na degradação do petróleo, quanto na melhoria da saúde do coral. As tecnologias desenvolvidas nesses projetos podem representar o primeiro passo para uma eficiente remediação de áreas recifais em todo o mundo.



Figura 4. Experimento de biorremediação do óleo em corais realizado na base do Coral Vivo em Arraial d'Ajuda (BA, Brasil) e em Búzios (RJ, Brasil). Créditos: Renato Correia

É evidente a importância e a dependência da sociedade moderna ao petróleo. A não exploração pode levar a problemas econômicos e sociais, principalmente em regiões que dependem exclusivamente desse produto. No entanto, é de extrema importância que tanto a exploração como o armazenamento e o transporte sejam realizados de maneira consciente e sustentável, sem poupar investimentos para evitar desastres ecológicos, que podem ser irreversíveis. Somado a isso, é importante também uma legislação local com leis severas e que realmente sejam aplicadas, gerando multas condizentes aos danos ambientais provocados.

Ainda assim, mesmo que haja um controle eficiente, acidentes acontecem e continuarão ocorrendo. Por isso, maiores investimentos em tecnologias de remediação, como a citada, podem ser o diferencial para a sobrevivência dos corais.



Literatura recomendada

SANTOS, H.F.; DUARTE, G.; RACHID, C.T.; CHALOUB, R.; CALDERON, E.; MARANGONI, L.; BIANCHINI, A.; NUDI, A.H.; CARMO, F.L.; ELSAS, J.D.V.; ROSADO, A.S.; CASTRO, C.; PEIXOTO, R.S. 2015. Impact of oil spills on coral reefs can be reduced by bioremediation using probiotic microbiota. *Scientific Reports*. Disponível em: <doi:10.1038/srep18268>. Acesso em: fevereiro 2016.

SANTOS, H.F.; CARMO, F.L.; PAES, J.E.; ROSADO, A.S.; PEIXOTO, R.S. 2011 Bioremediation of Mangroves Impacted by Petroleum. *Water, Air and Soil Pollution*, 99:341.

MELO, I.S.; AZEVEDO, J.L. 2008. *Microbiologia Ambiental*. 2.ed. Jaguariúna, São Paulo: Embrapa Meio Ambiente. 647p.

Mudança de fase em recifes de coral

Douglas Pinto Abrantes, Emiliano Nicolas Calderon, Clovis Barreira e Castro

O ambiente marinho sofre constantemente por impactos, sejam eles naturais, como furacões, tornados e doenças, ou causados por atividades humanas, como a pesca excessiva (sobrepesca) e a poluição gerada por derramamento de petróleo, esgoto doméstico, metais pesados e etc¹. São pressões que atingem os frágeis recifes de coral – um dos ecossistemas mais ricos e produtivos do planeta. Sua riqueza está relacionada ao grande número de espécies que vivem e se reproduzem neles. A produtividade pode ser entendida como sendo a quantidade de vida (biomassa) produzida nesse ambiente, principalmente em virtude da fotossíntese, que irá suprir a base de toda a cadeia alimentar, desde os herbívoros, passando pelos consumidores primários e secundários (peixes de pequeno e de grande porte), até espécies de topo da cadeia (baleias e tubarões, por exemplo). Com essa concentração de vida, os recifes de coral são ambientes de grande importância para a atividade humana, promovendo diversos serviços ecossistêmicos e recursos, sendo os principais deles os recursos pesqueiros² e aqueles relacionados a atividades de turismo e lazer.

Com o aumento exponencial da população humana, os recursos biológicos estão sendo cada vez mais demandados e retirados desse ecossistema para suprir as necessidades humanas, sem o devido tempo para o ecossistema se recuperar. Nesse contexto, dois conceitos importantes na ecologia precisam ser destacados neste capítulo: resistência e resiliência. A resistência de um ecossistema consiste em sua capacidade de manter sua estrutura (número e abundância de espécies) e funcionamento frente a um impacto, seja ele natural ou não. Diante de um ecossistema que sofreu um impacto muito forte e não conseguiu manter sua estrutura e funcionalidade, tem-se o conceito de resiliência, que está relacionado à capacidade do ecossistema de se recuperar e voltar a manter um estado de equilíbrio.

1. Ver CORREIA et al. (2016) e SANTOS et al. (2016), capítulos 12 e 13 deste volume, respectivamente.
2. Ver BENDER et al. (2016), capítulo 15 deste volume.



Em todo o mundo, têm sido documentados vários casos de impactos antrópicos e naturais alterando consideravelmente a estrutura e a funcionalidade dos recifes de coral, sendo o alvo de estudo de diversos pesquisadores. Tais alterações são conhecidas pelos termos em inglês “phase shifts” ou “alternative stable states” que, neste capítulo, serão chamadas de “mudanças de fase”.

Um importante grupo nos casos de mudança de fase são os peixes herbívoros, principalmente as famílias Acanthuridae (peixe-cirurgião) e Scaridae (budião), que geralmente são abundantes e ecologicamente importantes na comunidade recifal. Eles representam um importante grupo funcional crítico em praticamente todos os recifes de coral, sendo consumidores de macroalgas que, por sua vez, são as principais competidoras por espaço com os corais. O grupo funcional crítico é um conjunto de espécies que, independentemente da relação evolutiva (diferentes espécies), desempenham papéis ecológicos chave na resistência e resiliência do sistema ecológico.

Essa remoção natural de macroalgas ocasiona um efeito indireto e positivo para os corais, porque aumenta a liberação de espaço para o assentamento de novas colônias, facilitando o crescimento e a reprodução dos corais. A dominância de macroalgas não só impede que novos corais entrem nessa população, mas também pode sufocar os corais adultos, causando sua morte e diminuindo, assim, a construção tridimensional desse ambiente.



Ainda que haja outros organismos que se alimentam de matéria vegetal, são esses peixes e alguns invertebrados, como os ouriços-do-mar, que consomem a maior parte da produção primária recifal. Na ausência deles (em função de sobrepesca, por exemplo), as macroalgas podem proliferar rapidamente, chegando a dominar o ambiente. Tal mudança de dominância caracteriza uma mudança de fase, que pode ter consequências catastróficas para muitos organismos de todo o ecossistema, além de causar prejuízos incalculáveis relacionados aos bens e serviços prestados pelos recifes ao homem. Esse processo foi globalmente documentado por meio da constatação do decréscimo da abundância e da diversidade de espécies de corais e, do crescimento exacerbado de certos grupos de organismos sendo as macroalgas o caso mais comum.

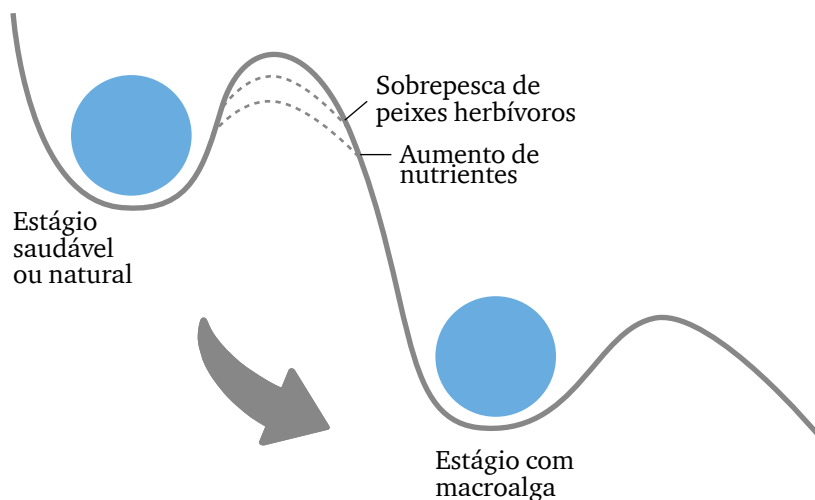


Figura 1. Esquema teórico exemplificando impactos no ecossistema. A bola azul representa um ecossistema hipotético, e os vales onde elas se encontram representam a resistência que o ecossistema pode suportar diante de impactos (naturais e/ou antrópicos). Caso esse impacto seja muito forte, a bola azul irá sair do vale e cair para o vale abaixo, simbolizando a mudança de fase, um ecossistema com predomínio de espécies diferentes das do vale anterior. A possibilidade da bola azul voltar para o vale acima (linhas tracejadas) representa o processo de resiliência, com a recuperação do ecossistema ao estado original ou próximo disso. Adaptado de BELWOOD (2004).

3. HUGHES, T.P. 1994.
Science, 265:1547-1551.

4. VER BENDER et al. (2016),
capítulo 15 deste volume.

A mudança de fase, portanto, é caracterizada pela alteração de comunidades dominadas por organismos construtores e de crescimento lento (corais), para um estado de dominância por organismos não-construtores e de crescimento rápido (Figura 1). A mudança de fase nos recifes de coral mais comumente registrada se caracteriza pela substituição dos corais pelas macroalgas. Esse tipo de mudança de fase já foi observado em diversos recifes do mundo, com casos reportados para a região do Caribe, Leste da África, Oceano Índico, Austrália e Leste do Oceano Pacífico. No Brasil, há casos reportados para a Baía de Todos os Santos (BA), e para a costa de Pernambuco. Além das macroalgas, a mudança de fase também pode ocorrer pela dominância de outros grupos de organismos de crescimento rápido, como as esponjas, os corais moles, os ouriços-do-mar e as anêmonas.

O caso dos recifes de coral da Jamaica nas décadas de 70 e 80

Um estudo realizado pelo pesquisador Terence Hughes, publicado em 1994, na revista científica *Science*³, pode ser considerado um importante marco para a comunidade científica. O estudo durou 17 anos e observou nove pontos ao longo de 300km de linha de costa na Jamaica. Hughes observou que, devido à sobrepesca, houve uma grande redução na quantidade de peixes herbívoros, além de uma mudança nas espécies que habitavam esses recifes⁴. Entretanto, apesar da baixa quantidade de peixes herbívoros, as macroalgas não proliferaram. Isso porque, com a ausência dos peixes, as algas que deixaram de ser consumidas por eles começaram a ser consumidas pelo ouriço-do-mar *Diadema antillarum*. A maior oferta de alimento levou a um grande crescimento das populações desse ouriço, mantendo baixo o percentual de cobertura de macroalgas.

No início de 1980, o furacão Allen atingiu a Jamaica, causando grandes estragos nos recifes de coral mais rasos (até 5m de profundidade). Sua força e velocidade foram tão fortes que quebraram e danificaram os corais. Além do efeito da destruição imediata, a passagem desse furacão levantou grande quantidade de sedimento do fundo. O sedimento é particularmente um fator prejudicial para muitos corais, porque cobre sua superfície, impedindo que suas microalgas simbiotas (zooxantelas)⁵ realizem a fotossíntese eficientemente, além de soterrar os corais menores – os chamados recrutas (cerca de 1cm de diâmetro).

Além do impacto do furacão, entre 1982 e 1984, as populações de *D. antillarum* do Caribe (incluindo a Jamaica) foram afetadas por um patógeno (doença), deixando-as reduzidas a 1% do que eram antes da epidemia. Com a redução da quantidade de peixes devido à sobrepesca contínua, somada à redução dessa população de ouriços-do-mar, houve um crescimento muito rápido de algas nos recifes jamaicanos. No início, eram algas filamentosas de pequeno porte, com até 2cm de altura, e com baixa longevidade, menor que um ano. Posteriormente, algas maiores, com talos de 10 a 15cm de altura e com ciclo de vida mais longo (macroalgas), entre dois e três anos, começaram a ocupar seu lugar nesses recifes (Figuras 2 e 3). Desse modo, foi observado que o recrutamento⁶ das larvas de corais falhou na década de 80 e, pouco a pouco, os corais adultos foram perdendo espaço e sendo sufocados pelas macroalgas.

5. Ver MARANGONI et al. (2016), capítulo 4 deste volume.

6. Ver PIRES et al. (2016) e PEREIRA et al. (2016), capítulos 8 e 9 deste volume, respectivamente.



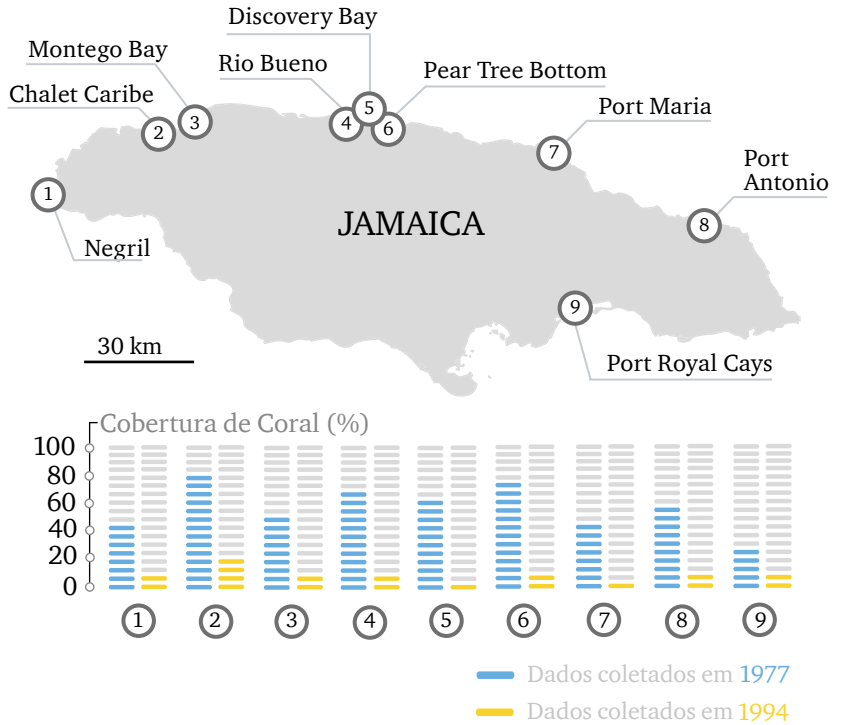


Figura 2. Mapa da Jamaica mostrando os pontos de estudo em que foram quantificados o percentual de cobertura dos corais. As barras azuis correspondem aos dados de 1977, e as amarelas, aos de 1990. Adaptado de HUGHES (1994).

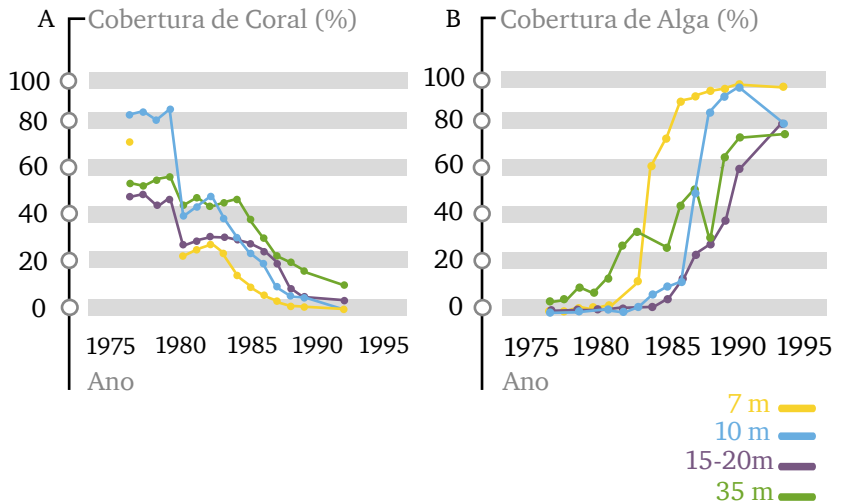


Figura 3. Degradação nos recifes de coral próximo a Discovery Bay, na Jamaica. (A) percentual de cobertura de corais; (B), de macroalgas em profundidades diferentes. Adaptado de HUGHES (1994).

Essa catastrófica sequência de eventos demonstraram como um ecossistema de recifes de coral, antes perfeitamente saudável, pode ser criticamente degradado em duas décadas devido a uma mistura de impactos antrópicos e naturais.

Mudança de fase no Brasil

Um cientista importante para o conhecimento dos recifes de coral no Brasil foi Jacques Laborel. O pesquisador francês morou alguns anos no Brasil e publicou em sua tese de doutorado, em 1970, a mais detalhada descrição dos recifes brasileiros até então⁷. Nesse trabalho, o autor descreveu uma cobertura de corais abaixo de 50% nos recifes rasos do Nordeste na década de 60. O restante da cobertura do recife era de algas calcárias incrustantes, esponjas, gorgônias e densos bancos de algas verdes do gênero *Halimeda*. Em 2002, o autor mergulhou novamente nos recifes rasos da costa de Pernambuco e estimou uma redução de cerca de 80% na cobertura de corais após cerca de quatro décadas⁸. Essa redução está relacionada principalmente ao processo de mineração dos corais, à sobrepesca e à atividade irregular de turismo.

Para a Baía de Todos os Santos (BA, Brasil), foi observado pelo trabalho de Igor Cruz e colaboradores, de 2014⁹, uma redução na cobertura de corais em dois dos oito recifes estudados. A mudança de fase observada foi de corais para a dominância pelo zoantídeo *Epizoanthus gabrieli*, entre 2003 e 2007. Nesse estudo, a cobertura de corais em 2003 era, em média, de 8%, baixando para 1% em 2007. Os autores sugerem que, em 2003, o recife estava no meio do processo de mudança de fase, sendo que, passados quatro anos, com a redução da cobertura dos corais, pôde-se concluir que houve a mudança de dominância.

A Baía de Todos os Santos é uma região que sofre diversos impactos humanos, principalmente na qualidade da água. No entorno dessa baía, há diversas indústrias metalúrgicas, refinaria de óleo e três portos, além do esgoto doméstico da cidade de Salvador, que é liberado nela. Um ou mais desses fatores podem estar causando a redução da cobertura de corais na baía e/ou facilitando o crescimento do zoantídeo na região.

7. LABOREL, J. 1970. Les peuplements de madréporaires des cotes tropicales du Brésil. *Ann. Univ. Abidjan. (Série E)*, 2(3):1-260.

8. FERREIRA, B.P.; MAIDA, M. 2006. *Monitoramento dos recifes de coral do Brasil: situação atual e perspectivas. Série biodiversidade*, 18. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Biodiversidade e Florestas. 250p.

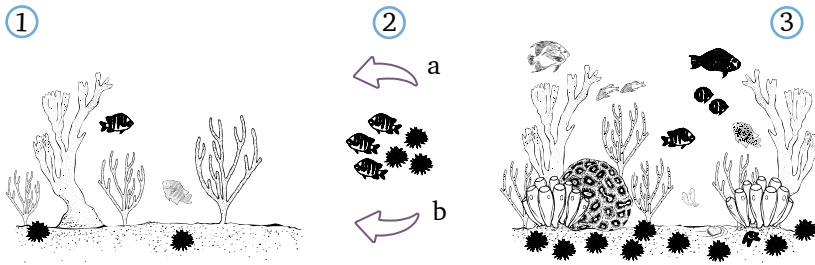
9. CRUZ, I.; KIKUCHI, R.K.; LONGO, L.L.; CREED, J.C. 2014. *Marine Ecology*, 36(3):318-325.

A mudança de fase pode ser revertida?

O conceito de resiliência é fundamental para a compreensão da capacidade de recuperação de um ecossistema. Estudos observaram que a mudança de fase pode ser reversível, desde que os fatores que a causaram sejam interrompidos. Regiões mais profundas – abaixo de 20m de profundidade – são menos susceptíveis a efeitos antrópicos e podem servir como banco genético. Isso significa que espécies que vivem em regiões mais profundas podem recolonizar as regiões mais rasas (Figura 4). A colonização das áreas mais rasas pode também ser feita pela dispersão de larvas, pois os corais possuem uma fase de móvel em seu ciclo de vida⁶, podendo, assim, colonizar outras áreas. Outro modo de dispersão acontece por espécies que são móveis, como quando os peixes e os ouriços migram e encontram um local ideal para seu nicho. Outros recifes adjacentes rasos também podem servir como áreas de banco genético para a resiliência de um ecossistema que sofreu a mudança de fase.

Estudos na Jamaica demonstraram que foi possível a reversão da mudança de fase¹⁰ em virtude do retorno da população de ouriços, porém foi um processo lento de recuperação, demorando cerca de 20 anos. Conseqüentemente, com a implementação de medidas efetivas, como a criação de áreas protegidas e a proibição de pesca, também é possível o retorno dos peixes herbívoros que, colaborando para o consumo das macroalgas, favorecem o processo de resiliência do ecossistema.

Por fim, é importante conhecer e estudar melhor os eventos que desencadearam a catástrofe na Jamaica, no caso, as relações biológicas mais específicas, como as interações entre os corais, as algas e os peixes herbívoros. Desse modo, podem ser obtidas informações cruciais para a criação de medidas para o manejo, o uso sustentável e a criação de áreas protegidas, evitando, assim, a degradação dos recifes de coral.



1 Recife de coral impactado

Remanescentes biológicos:

- corais vivos
- construtores de recife
- ouriços-do-mar
- peixes

Remanescentes estruturais:

- esqueletos de corais mortos e cascalho

2 a. Conexão entre as áreas por animais levados pelas correntes marinhas
- larvas

- b. Conexões entre as áreas pela movimentação dos animais
- ouriços-do-mar
 - peixes herbívoros e predadores

3 Áreas saudáveis ou naturais

Alta diversidade de grupos funcionais:

- construtores de recife (corais, algas calcárias)
- herbívoros (peixes e ouriços)
- predadores

Figura 4. Esquema representando recifes com mudança de fase e recifes saudáveis. A dispersão entre eles pode ocorrer por larvas ou pelos animais se movimentando. Adaptado de NYSTROM; FOLKE (2001).

Literatura recomendada

BELLWOOD, D.R.; HUGHES, T.P.; FOLKE, C.; NYSTROM, M. 2004. Confronting the Coral Reef crisis. *Nature*, 429(6994):827-833.

NORSTRÖM, A.V.; NYSTRÖM, M.; LOKRANTZ, J.; FOLKE, C. 2009. Alternative states on coral reefs: beyond coral-macroalgal phase shifts. *Marine ecology progress series*, 376:295-306.

NYSTROM, M.; FOLKE, C. 2001. Spatial Resilience of Coral Reefs. *Ecosystems*, 4:406-417.

Como eram os recifes brasileiros? Mudanças na percepção individual do ambiente e da diversidade marinha

Mariana G. Bender, Carlos E. L. Ferreira,
Natalia Hanazaki, Cleverson Zapelini, Vinicius J. Giglio

Os ambientes recifais são verdadeiras “florestas tropicais dos oceanos”, sendo os mais diversificados entre os ecossistemas marinhos e também um dos mais ameaçados. Nos recifes, animais encontram alimento e abrigo, e se reproduzem. Esses ambientes são também fundamentais para a sociedade humana, sustentando várias espécies de importância para a pesca, além de prover proteção costeira e gerar renda por meio do turismo. Grande parte dos ambientes costeiros de regiões tropicais encontra-se severamente degradada por impactos que alteraram profundamente os recifes locais, que já não são encontrados em sua condição original, como eram antes da presença e da exploração humana. Apesar do número crescente de estudos e de avaliações sobre o estado de conservação dos ambientes recifais nos oceanos ao redor do mundo, a maioria das pesquisas foi desenvolvida em locais já alterados pela ação do ser humano. Dessa forma, não há um entendimento claro a respeito do funcionamento dos recifes na situação anterior aos impactos humanos. Os recifes brasileiros são os mais diversos do Atlântico Sul, abrigando muitos organismos encontrados exclusivamente nessa região. Essas espécies são chamadas de espécies endêmicas e incluem, entre outros organismos marinhos, corais, algas e peixes recifais. Aqui, também, os estudos ecológicos foram desenvolvidos em ambientes já alterados, cuja estrutura e funcionamento são possivelmente muito diferentes daqueles de séculos atrás. O caso dos recifes exemplifica o problema da mudança de referencial, no qual não há uma referência mais adequada – aquela mais antiga – para conhecer os principais fatores que atuam sobre sua estruturação e funcionamento e para identificar corretamente as mudanças no ecossistema recifal. Afinal, como eram os recifes brasileiros antes da intensificação dos impactos humanos? Neste capítulo será esclarecido o que é a síndrome de mudança de referencial, e será dada uma pequena volta no tempo, mergulhando no passado dos recifes da costa brasileira.



Diariamente, fatos e atividades rotineiros acontecem normalmente, sem que se pense sobre as possíveis mudanças nessas atividades ao longo do tempo. Por exemplo, compra-se um cafezinho e um pão francês para o café da manhã numa padaria antes da jornada de trabalho. Paga-se R\$ 3,50 pelo café e R\$ 0,50 pelo pãozinho, preços aparentemente normais, esquecendo ou ignorando que na década de 1960 esse mesmo cafezinho sairia por R\$ 0,90 (na moeda da época, 1,50 cruzeiros), enquanto que a unidade do pão custaria R\$ 3,36 (5,60 cruzeiros). Muitos não viveram naquela época, por isso não percebem essas mudanças nos valores dos produtos. Outros acompanharam, mas esquecem de comparar situações que vivem no presente com sua referência do passado – a década de 1960, por exemplo. Este capítulo não trata de mudanças no cenário econômico do país, mas da inabilidade individual de perceber essas alterações e ajustar um conjunto de referências sobre fatos e acontecimentos, sejam eles cotidianos ou históricos.

Essa tendência a não comparar os acontecimentos ou os fatos com referências antigas também pode ser aplicada para o meio em que se está inserido. Um segundo exemplo: depois de tomar o cafezinho, pega-se o ônibus em direção ao trabalho. No percurso, avista-se na paisagem uma grande quantidade de prédios e novas construções de muitos andares tomando o céu dos bairros. Há algumas décadas, aquela região abrigava algumas casas de veraneio em meio a uma área verde de restinga e Mata Atlântica que se estendia por quilômetros à beira-mar. Provavelmente, no início do século passado, aquela região continha florestas que deveriam ser muito menos alteradas. Áreas de floresta estão sendo reduzidas em ritmo constante, mas há uma falha ao apenas se perceber as alterações recentes sem analisá-las de acordo com o que seria a melhor referência possível: a época mais antiga. A referência mais antiga na memória individual de cada pessoa está relacionada a seu tempo de vida, mas não a uma memória coletiva acumulada por várias gerações. Assim, essa mudança no referencial está associada às diferenças na experiência e na idade das gerações de seres humanos, sendo denominada “síndrome de mudança de referencial” – do inglês, *shifting baseline syndrome* (SBS). O conceito surgiu dentro do escopo do paisagismo, através do arquiteto escocês Ian McHarg, que

comparou a paisagem como é conhecida hoje com aquela na qual o homem antigo viveu, e está no livro “Design With Nature”, de 1969. Na obra, McHarg salientou a importância da abordagem ambientalmente consciente por planejadores urbanos para o uso da terra e da paisagem. Esse livro é também considerado um marco no movimento ambientalista.

Outros autores que discutiram a mudança de referencial foram Peter Kahn e Batya Friedman¹ (1995), que avaliaram as percepções e valores de crianças de uma comunidade associados ao meio ambiente. Entretanto, o conceito foi intitulado “*shifting baseline syndrome*” e popularizado no meio científico a partir de uma publicação do pesquisador francês Daniel Pauly², naquele mesmo ano, 1995. Para compreender esse conceito é preciso definir estoque pesqueiro, que corresponde a um grupo de peixes da mesma espécie, com tamanho e idade semelhantes, que habitam a mesma área e são alvos da pesca naquele local.

Estoque pesqueiro

Considere uma população da espécie “X”, que é uma unidade biológica formada por um conjunto de indivíduos da mesma espécie vivendo na mesma área. Por outro lado, um estoque da espécie “X” é uma unidade de gestão agrupada por relações genéticas, distribuição geográfica ou padrão de movimento. Algumas espécies possuem apenas um estoque, enquanto outras possuem vários. Diferenças entre estoques podem ser estabelecidas por características taxonômicas, fisiológicas e bioquímicas. Se os indivíduos de diferentes populações da espécie “X” não se misturam, ou seja, se eles não se reproduzem, então, do ponto de vista da gestão pesqueira, essas populações podem ser consideradas como diferentes estoques da espécie “X”. Assim, um estoque possui definidas as características particulares e que são de interesse para os gestores da pesca.

1. KAHN, P.H.; FRIEDMAN, B. 1995. *Child Development*, 66:1403-1417.

2. PAULY, D. 1995. *Trends in Ecology & Evolution*, 10:430.

Pauly é um renomado cientista trabalha com estoques pesqueiros. Em seu conhecido artigo “Anecdotes and the Shifting Baseline Syndrome of Fisheries”, na revista “Trends in Ecology & Evolution”, ele explica que essa síndrome surgiu porque cada geração de cientistas adotou como referência o tamanho dos estoques pesqueiros e a composição dos mesmos em relação ao conjunto de espécies que compunham os estoques no início de suas carreiras. A próxima geração de cientistas adotará como referência o tamanho dos estoques de sua época, resultando numa mudança gradual nas referências através de gerações. Resumindo, cientistas pesqueiros falham em identificar a referência (*baseline*) correta de tamanho populacional – a abundância de uma espécie de peixe antes da exploração por seres humanos – e, então, trabalham com uma referência alterada (*shifted baseline*) durante suas carreiras. Pauly apontou que devido à síndrome, as referências para que se possa avaliar as perdas econômicas que resultam da sobrepesca, bem como para estabelecer medidas de manejo para a recuperação dos estoques, tornam-se inapropriadas. O mais alarmante é que a mudança nas referências também resulta numa acomodação gradual em relação à perda de recursos ambientais. Em seu breve artigo, Pauly exemplificou o conceito de síndrome de mudança de referencial através de relatos do avô do colega Villy Christensen. Neles, era informado que, no passado, ele ficava incomodado pelos atuns azuis (*Thunnus thynnus*) que se emaranhavam nas redes que ele utilizava para pescar (anos 1920) em Kettegat, um estreito que conecta o Mar Báltico e o Mar do Norte. Nessa época, não havia mercado consumidor para a espécie, mas, em 1995, ela já não ocorria no Mar do Norte; hoje, ela é altamente valorizada e globalmente ameaçada de extinção.

Essas mudanças nas referências ambientais não estão restritas aos recursos (ou tamanho dos estoques) pesqueiros. A mudança de referencial pode estar relacionada à diversidade de espécies marinhas de determinada região, ou à área ocupada por recifes em determinado local, ou ao tamanho de peixes capturados ao longo de décadas, ou à área de distribuição de uma espécie, entre outras possibilidades. Segundo Sarah Papworth³, a síndrome pode assumir duas formas: (1) a amnésia geracional, quando o conhecimento se perde porque as gerações mais antigas falham em relatar

suas experiências às gerações mais jovens que, então, não reconhecem as condições ambientais do passado; e (2) a amnésia pessoal, na qual indivíduos esquecem suas experiências pessoais.

Mas o que fazer para que a síndrome não interfira nas percepções dos humanos sobre a natureza, seus recursos e sua diversidade? Devemos ajustar as referências! Existem importantes fontes de informação através das quais é possível construir percepções que sejam as mais adequadas possíveis e permitam identificar as alterações ambientais. São elas: fotos antigas, literatura cinzenta⁴, registros em diários de bordo, livros e registros históricos e conhecimento oriundo de comunidades tradicionais, como as comunidades de pescadores artesanais, que interagem com a natureza e seus recursos diariamente.

Para avaliar a condição dos estoques de uma importante espécie de garoupa (*Mycteroperca jordani*) no Golfo da Califórnia, costa oeste do México, um grupo de pesquisadores buscou informações em antigos guias de pesca, em relatos de expedições de história natural, além de relatórios oficiais de pesca. A busca foi conduzida em bibliotecas e arquivos nacionais e locais do México e dos Estados Unidos. Além disso, os pesquisadores conversaram com pescadores de diversas comunidades, indagando-os sobre os tempos em que a garoupa era abundante na região. O estudo⁵ revelou que as pescarias de grandes quantidades dessa espécie de garoupa ocorreram nas décadas de 1940 e 1950. Entre 1960 e 1970, as capturas haviam sido drasticamente reduzidas a apenas uma pequena fração das anteriores (de 45% para 6% das capturas no estado de Baja California). Pescadores mais experientes, e de idade mais avançada, pescaram 25 vezes mais garoupas do que pescadores mais jovens, além de identificarem quatro vezes mais espécies de organismos marinhos – entre tubarões, garoupas, lagostas e ostras – antes abundantes na região e agora sobre-explotados. Esse estudo foi pioneiro ao identificar a síndrome de mudança de referencial entre gerações de pescadores do Golfo da Califórnia.

4. “O que é produzido em todos os níveis do governo, institutos, academias, empresas e indústria, em formato impresso e eletrônico, mas que não é controlado por editores científicos ou comerciais”, definição da Quarta Conferência Internacional sobre Literatura Cinzenta, realizada em Washington, em outubro de 1999.

5. SÁENZ-ARROYO, A.; ROBERTS, C.M.; TORRE, J.; CARIÑO-OLVERA, M. 2005. *Fish & Fisheries*, 6:121-133.

Um estudo⁶ utilizando somente fotografias de peixes capturados em Key West, na Flórida (Estados Unidos), entre 1957 e 2007, mostrou que o peso médio dos peixes diminuiu de 19,9kg para 2,3kg ao longo dos anos. Além de pescar peixes maiores no passado, as espécies capturadas eram garoupas de grande porte e outros predadores de topo, como tubarões (com menos de 2m de comprimento). Já em 2007, as espécies eram predominantemente pequenos lutjanídeos, conhecidos no Brasil como “vermelhos” (*Lutjanus* spp.). A busca por dados históricos associados às evidências encontradas em fontes de informação alternativas, como fotos antigas, diários de bordo e literatura cinzenta, têm mostrado que muitas espécies marinhas possivelmente tiveram populações muito mais numerosas no período que antecede a exploração dos mares pelo homem. Além disso, esses estudos têm revelado que os ecossistemas marinhos passaram por mudanças muito mais profundas do que havia sido imaginado. No Golfo da Califórnia, por exemplo, ostras perlíferas (*Pinctata mazatlantica*) eram extremamente abundantes ao longo da costa, como relatado por um explorador espanhol em 1632, e o mero (*Epinephelus itajara*) era um peixe comum no cardápio de piratas que frequentavam a região nos anos 1690. A exploração de ostras perlíferas no Golfo colapsou na década de 1940, e o mero é hoje uma espécie globalmente ameaçada de extinção.

Se antes o que assombrava os mares era o temor aos piratas, hoje são os fantasmas de organismos – uma vez abundantes – que pairam sobre os oceanos, praias, baías, enseadas e ilhas que levam seus nomes. Assim como o mero, peixe que atinge até 2,5m e mais de 300kg, grande parte da megafauna marinha – baleias, tubarões, tartarugas, grandes peixes pelágicos e recifais, focas, leões marinhos, aves costeiras – foi explorada ao ponto de algumas de suas populações serem completamente ou funcionalmente extintas⁷. As referências paleontológicas (datadas de mais de 1000 anos atrás), arqueológicas (100-1000 anos atrás) e históricas (de mais de 100 anos atrás) de um estudo⁸ que reuniu informações de outras 95 pesquisas indicam que esses organismos sofreram em média uma redução de 89% em relação à condição original, antes dos impactos humanos. Indiscutivelmente, esse declínio foi causado pela pesca excessiva e pelo uso indiscriminado dos recursos marinhos pelo ser humano, levando a mudanças na estrutura e no funcionamento desses ecossistemas. No Atlântico Ocidental, por exemplo, a pesca alterou a abundância e a composição de espécies dos ecossistemas recifais, culminando numa profunda mudança, onde recifes formados por belíssimos corais estruturadores (gênero *Acropora*) durante centenas de milhares de anos (desde o Pleistoceno superior ~ 100 mil anos atrás) deram lugar a recifes dominados por macroalgas.

7. JACKSON, J.B.C.; KIRBY, M.X.; BERGER, W.H.; BJORNAL, 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, H.S.; PANDOLDI, J.M.; PETERSON, C.H.; STENECK, C.S.; TEGNER, M.J.; WARNER, R.R. 2001. *Science*, 293:629-638.

8. LOTZE, H.K.; WORM, B. 2009. *Trends in Ecology & Evolution*, 24:54-262.

9. LINDLEY, T. 1805.
*Narrative of a Voyage to
Brazil*. London: J. Johnson,
St. Paul's Church-Yard.
338p.

10. BENDER, M.G.; FLOETER,
S.R.; HANAZAKI, N. 2013.
*Fisheries Management &
Ecology*, 20:58-67.

Como eram os recifes brasileiros?

A vida marinha já foi muito mais abundante nos recifes brasileiros. Registros históricos, como os relatos de uma viagem ao Brasil por Thomas Lindley⁹, em 1805, documentam que na região de Porto Seguro e no Arquipélago dos Abrolhos (BA) meros e garoupas eram pescados em “prodigiosa quantidade”, as embarcações permaneciam até seis semanas no mar e retornavam cheias à terra. De Norte a Sul da costa brasileira, existem relatos e estudos que documentam as mudanças ocorridas.

No Recife de Fora, em Porto Seguro, que hoje abriga o Parque Municipal Marinho do Recife de Fora, pescadores mais experientes relatam grandes pescarias e lembram o tempo em que pescavam nos recifes do Parque e enchiam suas canoas com peixes. O relato de um pescador de 50 anos entrevistado mostra a redução dos estoques na região: “*antigamente, em 2 dias pescava 200kg de peixes, hoje preciso de 8 dias para pescar a mesma quantidade*”. Outro relato comum entre os pescadores da região diz respeito à mudança nos principais peixes que compõem as pescarias: grandes quantidades de garoupas, badejos e cações deram lugar a peixes como peroás (*Balistes spp.*), cioba (*Lutjanus analis*) e guaiúba (*Ocyurus chrysurus*), e eles têm ocorrido em menor quantidade nas últimas décadas.

Além da mudança na composição das pescarias, o tamanho dos peixes mostra o efeito da sobrepesca. Por exemplo, pescadores com mais de 50 anos pescaram badejos-quadrados (*Mycteroperca bonaci*) de, em média, 49kg, enquanto pescadores de 41-50anos pescaram badejos de 44,2kg, em média; para pescadores da geração mais jovem, a média foi de 18kg. Esses grandes badejos foram capturados décadas atrás! Um dos pescadores, de 71 anos, disse: “*Dava muito peixe antigamente.... tudo diminuiu. Pescava de barco à vela e canoa.... tinha menos pescadores*”. Outro, de 65 anos, complementou: “*A piragira (Mycteroperca venenosa) era mais comum e trazia em toneladas, a garoupa acabou!*”. Nesse estudo¹⁰, que seguiu os moldes daquele realizado no Golfo do México, os pesquisadores estavam interessados em investigar a mudança de referencial entre gerações de pescadores da região, além de descobrir se os pescadores

conseguiam reconhecer o declínio nos estoques de alguns peixes que habitam a região. Entre nove espécies estudadas, sete estão em declínio, segundo os pescadores. Entretanto, os pescadores jovens identificaram um número menor de peixes em declínio, quando comparados aos pescadores mais idosos. Mais de um terço desses pescadores considera que foram as próprias atividades pesqueiras que levaram a essas mudanças preocupantes nos recursos marinhos na região.

Conhecido por abrigar a maior biodiversidade marinha do Atlântico Sul, o Banco dos Abrolhos consiste em um alargamento da plataforma continental do Brasil e abrange desde o Norte do Espírito Santo ao Extremo Sul da Bahia, uma área de 42.000km². É um complexo recifal composto por diversos ecossistemas costeiros e marinhos, como mangues e estuários, bancos de algas, rodólitos e recifes coralíneos. O Banco dos Abrolhos é considerado uma das áreas de maior produção pesqueira do Brasil; conseqüentemente, a pesca possui importância social e econômica. Cerca de 20 mil pescadores artesanais sobrevivem diretamente dos recursos pesqueiros provenientes da região. Entretanto, a biodiversidade do Banco dos Abrolhos vem sofrendo cada vez mais com impactos da pesca, da poluição, da exploração de petróleo e gás e da ocupação costeira desordenada.

O conhecimento local dos pescadores do Banco dos Abrolhos é uma fonte importante de informações para a gestão dos recursos naturais. Para verificar mudanças nas capturas ao longo do tempo e suas causas, pesquisadores investigaram o conhecimento ecológico local de três gerações de pescadores artesanais, entre 15 e 85 anos, que atuam no Banco dos Abrolhos, especialmente na Reserva Extrativista de Cassurubá, localizada no município de Caravelas (BA, Brasil).

Os pescadores reconhecem que a pesca artesanal tem alterado a abundância de espécies de peixes comercialmente importantes, especialmente a megafauna (peixes com mais de 50cm). Nos últimos 50 anos, verificou-se um preocupante declínio para espécies como o mero, o peixe-serra (*Pristis pristis*), o tubarão-martelo (*Sphyrna tiburo* e *S. tudes*) e o bagre-amarelo (*Aspistor luniscutis*). Em comparação com os mais novos, os pescadores mais velhos e experientes reconheceram um maior número de espécies que desapareceram da região, em especial peixes que



atingem grandes proporções, como os gigantes costeiros mero e peixe-serra, que podem ultrapassar os 450kg. O peixe-serra é uma espécie aparentada com as raias e os tubarões, possuindo hábitos costeiros e vivendo associado a mangues e estuários. Possui uma serra na cabeça, que é usada para atordoar suas presas – pequenos peixes. Entretanto, a serra é seu “calcanhar de Aquiles”, pois ela fica facilmente enroscada em qualquer tipo de rede, ocasionando sua morte. O mero é outro peixe costeiro e possui comportamento dócil, conhecido por não temer e nem fugir de mergulhadores. Essa característica o torna alvo fácil para a pesca subaquática. Ambas as espécies possuem crescimento lento, maturação sexual tardia e são altamente susceptíveis à pesca excessiva. Isso os levou a serem classificados como espécies criticamente ameaçadas de extinção em nível nacional e global. No Banco dos Abrolhos, de acordo com as respostas dos pescadores nas entrevistas da pesquisa, ambas as espécies têm sido encontradas com menor frequência e com tamanhos cada vez menores desde a década de 1960. O peixe-serra, por exemplo, não é avistado há mais de dez anos, sendo considerado uma espécie colapsada na região. Infelizmente, há uma grande possibilidade de o peixe-serra ser considerado extinto na costa brasileira dentro de alguns anos.

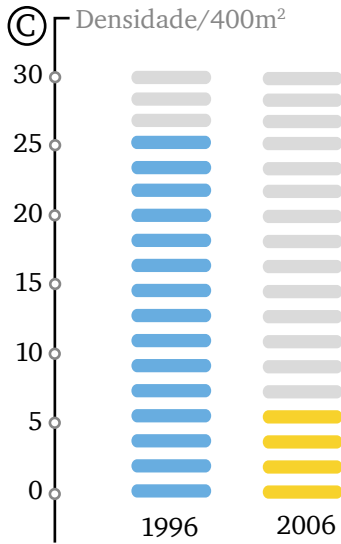


Figura 1. (A) Um cardume de budião-azul (*Scarus trispinosus*) fotografado no Banco dos Abrolhos (BA) em 1983, (B) um cardume fotografado em 2006. O gráfico em C mostra a redução na quantidade de peixes da espécie a cada 400m² amostrados no Banco dos Abrolhos em 1996 e 2006. Créditos: Carlos Secchin e Carlos Eduardo L. Ferreira.

11. GIGLIO, V.J.; LUIZ, O.J.; GERHARDINGER, L.C. 2015. *Animal Conservation*, 18:348-358.

12. LUIZ, O.J.; EDWARDS, A.J. 2011. *Biological Conservation*, 144:2873-2881.

Esses resultados¹¹ indicam a ocorrência da síndrome de mudança de referencial entre os pescadores artesanais do Banco dos Abrolhos. Assim como os pescadores de Porto Seguro, os pescadores de Abrolhos atribuem o declínio da abundância de peixes à pesca excessiva. Além do relato de pescadores, fotografias subaquáticas mostram reduções no tamanho dos cardumes de outra espécie de peixe no Banco dos Abrolhos: o budião-azul, espécie endêmica da costa brasileira (Figura 1). Nesse preocupante contexto, são necessárias medidas de gestão urgentes para o uso sustentável dos recursos naturais, como a criação e a efetivação de áreas de exclusão de pesca. Apenas 9% do Banco dos Abrolhos é protegido por Unidades de Conservação e, desses, somente 1,6% se referem a áreas de exclusão de pesca. Essas áreas são importantes para o manejo da pesca e, geralmente, são criadas para abrigar uma população reprodutiva, área de berçário ou algum habitat importante no ciclo de vida das espécies.

Localizado no Atlântico Equatorial, a 960km do Cabo de São Roque (RN), o remoto conjunto de ilhas que forma o Arquipélago de São Pedro e São Paulo abriga uma abundante fauna marinha, com alto grau de endemismo. A notável abundância de tubarões e de outros organismos dessa região foi descrita em relatos de navegadores e naturalistas que passaram pelas ilhas ao longo dos séculos, como Charles Darwin, a bordo do *HMS Beagle*, em fevereiro de 1832: “...os tubarões e os marinheiros nos botes mantinham um combate constante para decidir quem levaria vantagem sobre a posse dos peixes apanhados no anzol; ... tão logo os peixes fossem capturados, tubarões vorazes atacavam os mesmos... levando mais da metade dos peixes fígados”. Um relato de 1902, de Michael Nicoll, a bordo do *RYS Valhalla*, diz: “...pescar aqui (arquipélago) apresentou uma dificuldade incomum, uma vez que tubarões enxameavam em grandes quantidades, sendo difícil evitar sua captura”. Em 1993, o relato da expedição “Segredos Submersos” diz: “*todos os mergulhos foram magníficos, mas a ausência de tubarões foi notável*”. Os pesquisadores Osmar Luiz e Alasdair Edwards¹² reuniram esses registros históricos e dados recentes para investigar o declínio de tubarões (gênero *Carcharhinus*) no Arquipélago. Constataram que os tubarões foram extintos devido à pressão pesqueira na região, intensificada a partir

de 1950. O último registro de exemplares de tubarões *Carcharhinus* nesse arquipélago é de 1993. Apesar da extinção, barcos continuam pescando diariamente nos arredores desse importante sistema insular.

Mais ao Sul do litoral brasileiro, em Arraial do Cabo (RJ), é encontrado um dos mais tradicionais vilarejos de pescadores do Sudeste do país. Atualmente, a área marinha é gerida por meio de uma Unidade de Conservação de Uso Sustentável, a Reserva Extrativista Marinha de Arraial do Cabo. Ali, sob a influência dos ventos e das correntes marítimas, estabeleceu-se um dos primeiros povoamentos no Brasil, onde atividades pesqueiras são desenvolvidas há séculos. Hoje, a cidade conta com mais de 1300 pescadores artesanais que utilizam das mais variadas artes de pesca. O fenômeno de ressurgência – subida de águas profundas e ricas em nutrientes para menores profundidades nos oceanos – promove a existência de uma abundante fauna marinha na região. Essa abundância e diversidade de organismos marinhos associadas aos costões rochosos, praias de areias brancas e água cristalina fizeram de Arraial um dos principais pontos para mergulho no país. Muitas das pescarias mais importantes de Arraial estão em declínio, como é o caso da anchova (*Pomatomus saltatrix*), dos badejos, das garoupas (*Mycteroperca bonaci*, *M. acutirostris*, *M. microlepis*, *Epinephelus marginatus*) e do budião-azul (*Scarus trispinosus*). No estudo que revelou o declínio dessas espécies¹³, pesquisadores entrevistaram pescadores de cerco, pescadores de linha e, também, pescadores subaquáticos – que pescam mergulhando e utilizam arpão. Além de conversar com pescadores, eles reuniram dados de desembarque (quantidade de peixe desembarcado na região) e de contagens de peixes realizadas em mergulhos – censo visual realizado por pesquisadores nas águas de Arraial do Cabo desde a década de 1990. O surpreendente foi que as diferentes fontes de informação – as experiências vividas pelos pescadores, os dados de desembarque e os censos visuais – mostram o declínio dessas espécies. Relatos de pescadores indicam que os estoques de anchova sofreram uma redução de aproximadamente 70% em relação à década de 1960. Nela, um dia com boas capturas de anchova no cerco atingia em média 18 toneladas. Já na década de 1980, esse número caiu para 13 toneladas; atualmente, capturas maiores que 3,7 toneladas de anchovas são raras.

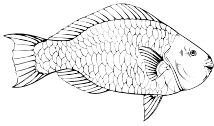
13. BENDER, M.G.; MACHADO, G.R.; DE AZEVEDO-SILVA, P.J.; FLOETER, S.R.; MONTEIRO NETTO, C.; LUIZ, O.J.; FERREIRA, C.E. 2014. *PLoS ONE*, 9(10):e110332.

14. Ver ABRANTES et al. (2016), capítulo 14 deste volume.

15. GASPARINI, J.L.; FLOETER, S.R.; FERREIRA, C.E.L.; SAZIMA, I. 2005. *Biodiversity Conservation*, 14:2883-2899.

O “mar não está para peixe” para pesquisadores e pescadores que, desde 1992, avistam cada vez menos garoupas, badejos e budiões nas águas da região. Para se ter uma ideia, pescadores subaquáticos de Arraial do Cabo capturavam uma quantidade maior de peixes e com maior tamanho 40 anos atrás. O budião-azul teve uma redução de 60% em suas capturas (Figura 2). Esse peixe é considerado funcionalmente extinto em Arraial do Cabo, ou seja, sua abundância nos recifes é tão pequena, que ele já não cumpre seu papel na natureza – de manter as algas “aparadas” nos recifes¹⁴. Esse cenário torna-se ainda mais preocupante porque o papel do budião-azul é considerado fundamental para o ambiente recifal. Com o declínio dessas espécies, os pescadores mais jovens e menos experientes tiveram dificuldades em reconhecê-las como abundantes e importantes recursos pesqueiros no passado. Os pescadores jovens citaram um número menor de espécies e de locais considerados muito explorados pela pesca na região. As diferenças na percepção dos recursos ambientais entre as gerações de pescadores de Arraial do Cabo caracterizam a síndrome de mudança de referencial.

Possivelmente, muitos dos pescadores jovens de Arraial desconhecem a anêmona-gigante, *Condylactis gigantea*, que habitava os recifes da região até pouco tempo atrás¹⁵. Esses invertebrados atingem 40cm de diâmetro, e cada indivíduo abrigava até uma dezena de pequenos camarões limpadores – que retiram parasitas limpando a pele de peixes. Durante mais de duas décadas, a pesca ornamental foi intensa na região, retirando peixes e invertebrados (corais, crustáceos, anêmonas, moluscos) para o comércio que abastecia aquários no país e no exterior. No início da década de 1990, em torno de 100 indivíduos de *C. gigantea* eram retirados todos os dias dos recifes de Arraial do Cabo. A exploração intensa e insustentável desse recurso levou à extinção dessa espécie de anêmona no estado do Rio de Janeiro. Hoje, *C. gigantea* consta na Lista Nacional das Espécies da Fauna Brasileira Ameaçadas de Extinção, e estima-se que restem apenas 2.500 indivíduos, concentrados principalmente no Banco dos Abrolhos.



Scarus trispinosus

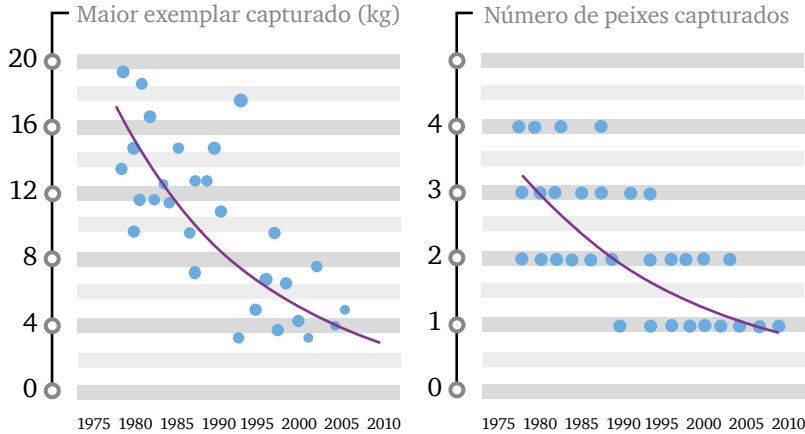


Figura 2. O gráfico à esquerda mostra a redução no tamanho dos indivíduos de budião-azul (*Scarus trispinosus*) capturados por pescadores subaquáticos em Arraial do Cabo (RJ, Brasil); à direita, o declínio nas capturas em termos de quantidade de budiões capturados no melhor dia de pescaria. Adaptado de BENDER et al. (2014).

Todas essas mudanças no referencial dos pescadores mais jovens são um alerta para que se busque resgatar os dados históricos sobre o ambiente e suas transformações na tentativa de preservar o que ainda resta. Resgatar as referências sobre a abundância de espécies marinhas do passado que estão sendo gradualmente perdidas é primordial para formar a consciência sobre como a exploração desordenada alterou tão rápido os recursos pesqueiros e os ecossistemas marinhos, além de ressaltar a importância de se valorizar os serviços prestados pela natureza.

Literatura recomendada

- BENDER, M.G.; MACHADO, G.R.; SILVA, P.J.A.; FLOETER, S.R.; MONTEIRO NETTO, C.; LUIZ, O.J.; FERREIRA, C.E.L. 2014. Local Ecological Knowledge and Scientific Data Reveal Overexploitation by Multigear Artisanal Fisheries in the Southwestern Atlantic. *PLoS ONE*, 9(10):e110332.
- FLOETER, S.R.; FERREIRA, C.E.L.; GASPARINI, J.L. 2007. Os efeitos da pesca e da proteção através de UC's marinhas: três estudos de caso e implicações para os grupos funcionais de peixes recifais no Brasil. p.183-199 in *Série Áreas Protegidas do Brasil, 4: Áreas Aquáticas Protegidas como Instrumento de Gestão Pesqueira*. Brasília: MMA.
- GIGLIO, V.J.; LUIZ, O.J.; GERHARDINGER, L.C. 2015. Depletion of marine megafauna and shifting baselines among artisanal fishers in eastern Brazil. *Animal Conserv*, 18(4):348-358.
- PAPWORTH, S.K.; RIST, J.; MILNER-GULLAND, E.J. 2009. Evidence for shifting baseline syndrome in conservation. *Conserv. Letters*, 2:93-100.
- PAULY, D. 1995. Anecdotes and the shifting baseline syndrome of fisheries. *Trends Ecol. Evol.*, 10:430.
- SÁENZ-ARROYO, A.; ROBERTS, C.M.; TORRE, J.; CARIÑO-OLVERA, M. 2005. Using fishers' anecdotes, naturalists' observations and grey literature to reassess marine species at risk: the case of the Gulf grouper in the Gulf of California, Mexico. *Fish Fish*, 6:121-133.

Bioindicadores e biomarcadores para avaliação de impactos em recifes de coral

Joseane A. Marques, Laura F. B. Marangoni, Adalto Bianchini

Para *preservar* os recifes de coral é preciso conhecê-los. Também é essencial identificar os principais estressores que ameaçam o equilíbrio ambiental desse ecossistema e encontrar formas de monitorar sua saúde. O presente capítulo abordará algumas ferramentas para avaliar e monitorar impactos, principalmente aqueles relacionados a mudanças climáticas e à poluição marinha, em organismos de ambientes recifais. Essas ferramentas podem auxiliar de forma significativa no estabelecimento de estratégias de preservação.

Recifes em declínio

Apesar de sua grande importância, 70% dos recifes de coral do mundo estão em processo de degradação. No Brasil, estima-se que 50% deles estejam ameaçados por atividades humanas. Considerando a gravidade do declínio da qualidade desses ecossistemas e sua importância ecológica, é necessário monitorar seu **estado de saúde**. Muitos países reconhecem essa necessidade e possuem programas nacionais de monitoramento da qualidade de ambientes recifais. Por exemplo, o Instituto Australiano de Ciências Marinhas (AIMS) monitora os recifes da Grande Barreira de Corais da Austrália há 20 anos. A Agência Americana dos Oceanos e do Clima (NOAA) conta com um departamento voltado para a avaliação e o monitoramento de recifes de coral, o Programa de Conservação de Recifes de Coral (NOAA-CRCP), atuante desde 2000. No Brasil, a primeira ação de larga escala para o monitoramento de recifes ocorreu apenas em 2002, com o projeto “Monitoramento dos Recifes de Coral do Brasil”, financiado pelo Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira – Ministério do Meio Ambiente (PROBIO-MMA). Esses programas são úteis para compreender a dinâmica e a variabilidade natural dos



1. IPCC. 2014. *The Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge, UK. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar5/>>. Acesso em: janeiro 2016.

recifes, conhecer melhor sua ecologia e detectar respostas a impactos antrópicos. As informações obtidas são essenciais para identificar locais ameaçados pela degradação, bem como para planejar ações políticas voltadas ao manejo e à conservação desse ecossistema.

Principais causas do declínio dos recifes

As potenciais causas do declínio da qualidade ambiental observado nos recifes de coral devem ser identificadas e monitoradas. Estudos recentes mostram que os recifes estão sendo afetados por impactos de escala global e local.

Impactos globais

O aquecimento da superfície e a acidificação dos oceanos são os impactos globais com maior potencial para afetar os recifes de coral. Esses fenômenos são causados, principalmente, pelo aumento global da emissão atmosférica de gás carbônico (CO₂), como exposto pelo recente relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC)¹.

Impactos locais

Dentre os impactos que podem ocorrer de forma localizada, neste capítulo é ressaltada a poluição marinha associada a compostos químicos. Os poluentes químicos que chegam aos recifes de coral podem ter fontes pontuais ou difusas, e podem ser transportados por longas distâncias – sendo a drenagem continental a principal rota de transporte de poluentes que chegam aos recifes. Atividades humanas, como agricultura, pecuária e navegação, assim como o despejo direto ou indireto de esgoto doméstico e industrial, são as principais fontes de poluentes químicos para a zona costeira. Metais, pesticidas, hidrocarbonetos e excesso de nutrientes são os poluentes mais comumente encontrados em recifes de coral.

Ferramentas de avaliação e monitoramento

A necessidade de se avaliar a condição de saúde dos ambientes naturais para a tomada de decisões com relação ao uso e conservação de ecossistemas estimula a busca por **ferramentas** de avaliação que sejam práticas, adequadas e de baixo custo.

Parâmetros abióticos e bióticos

Alterações na qualidade da água podem ser identificadas e monitoradas de forma direta através da análise de parâmetros abióticos. Nesse caso, parâmetros **abióticos** são medidas ou características relacionadas às propriedades físico-químicas da água, como temperatura, pH, salinidade e concentração de nutrientes inorgânicos. Cabe ressaltar que cada ambiente ou local em particular possui um nível de qualidade da água necessário para a manutenção de suas funções ecológicas, o que implica em características abióticas específicas. Variações nessas características, mais intensas ou de maior duração que as variações naturais de um determinado local, indicam uma condição ambiental alterada. Com relação à presença de contaminantes químicos, esses podem ser diretamente medidos na água ou no sedimento. A legislação brasileira prevê os limites máximos para muitos contaminantes na água e sedimento marinho, por meio das Resoluções CONAMA 357², de 2005, e CONAMA 344³, de 2004, respectivamente. Os valores estabelecidos nessa legislação representam os limites para a “manutenção da qualidade ambiental necessária para sustentação do ecossistema” e são extremamente importantes para orientar as políticas ambientais.

Como visto anteriormente, conhecer as características físico-químicas e os níveis dos contaminantes químicos em determinado ambiente é de extrema importância. Porém, essa informação por si só não caracteriza um impacto na biota residente. Logo, para avaliar e quantificar, por exemplo, o impacto do aquecimento e da redução do pH da água, ou até mesmo a presença de determinado poluente⁴, é necessário detectar e quantificar os **efeitos** desses agentes estressores **sobre a biota**.

2. D.O.U. 2005. Resolução CONAMA nº 357. *Diário Oficial da União*, n.053, de 18 de março de 2005, p.58-63. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acesso em: janeiro 2016.

3. D.O.U. 2004. Resolução CONAMA nº 344. *Diário Oficial da União*, n.087, de 7 de maio de 2004, p.56-57. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=445>>. Acesso em: janeiro 2016.

4. Para entender melhor a diferença entre poluente e contaminante, ver CORREIA et al. (2016), capítulo 12 deste volume.

Efeitos na biota: níveis de organização biológica

Os seres vivos podem ser estruturados em níveis de organização biológica, seguindo uma ordem crescente de complexidade, desde o nível molecular, celular, tecidual, sistêmico e organizmístico, até o nível populacional, comunitário e ecossistêmico.

Uma condição ambiental alterada, seja pelo aumento de temperatura atípico ou pela presença de um agente tóxico, pode causar efeito em todos os níveis de organização biológica mencionados. No entanto, existe uma hierarquia de respostas (Figura 1), de forma que, inicialmente, o estressor provoca alterações nos níveis bioquímicos e celulares. Se o estressor em questão possuir alta intensidade ou agir por um longo período de tempo, e os organismos não forem capazes de manter sua homeostase através de alterações moleculares/bioquímicas/celulares, ocorrerão alterações em processos fisiológicos, afetando funções vitais, como o crescimento e a reprodução. Se essa “cascata de reações” continuar, devido à frequência e/ou intensidade do agente estressor ou à “baixa capacidade” do organismo em lidar com o impacto, os indivíduos podem desenvolver doenças ou até mesmo chegar à morte. Caso o estressor continue a atuar, o nível seguinte a sofrer alterações é o populacional. Por sua vez, alterações populacionais podem induzir a um desequilíbrio da comunidade da qual a espécie afetada participa. Alterações em comunidades podem, dependendo da magnitude do impacto, levar a alterações em todo o ecossistema envolvido.

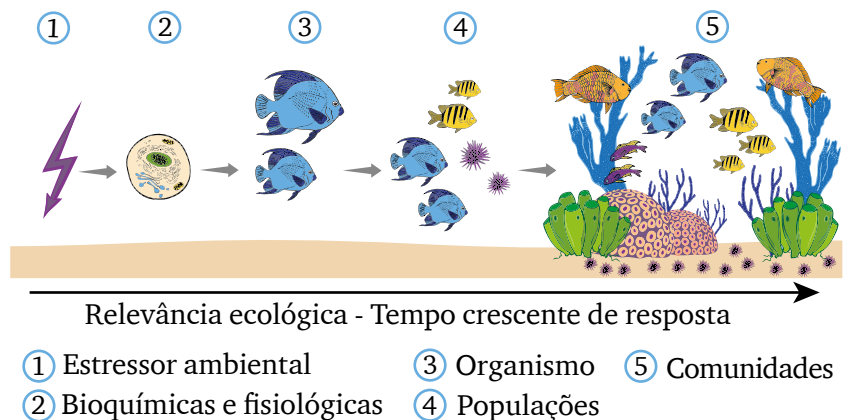


Figura 1. Representação esquemática da ordem de respostas a estressores ambientais ao longo dos níveis de organização biológica. Adaptado de MOORE et al. (2004)⁵.

As alterações nos níveis mais altos de organização biológica, ou seja, em comunidades ou ecossistemas, têm relevância ecológica muito maior do que “simples” alterações celulares, as quais podem ou não gerar efeitos nos níveis mais altos de organização biológica. Por isso, a maioria dos programas de monitoramento tem como alvo esse tipo de resposta, monitorando, por exemplo, a densidade de peixes, a cobertura ou número de espécies de coral, ou ainda a quantidade de colônias de coral branqueadas.

Bioindicadores

Os bioindicadores constituem uma abordagem muito utilizada para avaliar e monitorar impactos em ambientes aquáticos. De forma geral, bioindicadores são espécies, grupos de espécies ou comunidades biológicas cuja presença, abundância e condições são indicativos biológicos de uma determinada condição ambiental.

Espécies indicadoras em ecossistemas recifais

Cada bioindicador tem um tempo de resposta e algum grau de especificidade com relação às alterações na qualidade da água. A escolha final do bioindicador a ser empregado depende do objetivo específico e do prazo, ou período de tempo, disponível para realizar o monitoramento em questão. Por exemplo, para monitorar os níveis dos contaminantes acumulados nos organismos, é mais interessante escolher uma espécie que tenha biologia bem conhecida e seja capaz de *bioacumular*⁶ os compostos em análise. Bivalves e macroalgas são frequentemente utilizados nesses casos, pois estão em contato com as fases particulada e dissolvida dos poluentes na água, respectivamente. Essas espécies, capazes de refletir com segurança os níveis ambientais de contaminantes em seus próprios tecidos, são também conhecidas como *biomonitoras*.

De forma geral, para avaliar os efeitos biológicos de impactos em recifes, os próprios corais construtores desse ecossistema, algumas espécies de macroalgas e muitas esponjas são utilizadas como bioindicadores. Sua presença, ausência, proporção ou alterações populacionais são

utilizadas para avaliar e monitorar a existência de impactos antrópicos em comunidades recifais. O tipo de impacto (agudo ou crônico) e o tempo de monitoramento (semanas a anos) devem ser considerados na escolha do bioindicador adequado. Geralmente, espécies sésseis se mostram como bioindicadores mais apropriados para detectar impactos, uma vez que, devido a seu hábito de vida, elas não poderão evitar as condições ambientais desfavoráveis por meio de fuga, assim refletindo com maior fidelidade o estado de seu local de ocorrência.

Foraminíferos como bioindicadores da qualidade ambiental de recifes de coral

Considerando que as espécies chave de ambientes recifais têm, de forma geral, um ciclo de vida relativamente longo (corais, hidrocorais, peixes e algumas algas calcárias), a velocidade de resposta de suas populações a impactos ambientais pode ser lenta. Uma vez que essas espécies geralmente são cruciais na conservação do ecossistema, seria interessante detectar os impactos antes que eles causem alterações sérias nessas populações.

Os foraminíferos são organismos unicelulares com uma pequena concha de carbonato de cálcio, sendo comumente utilizados como bioindicadores de qualidade ambiental. Muitas das espécies que vivem em ambiente recifal compartilham algumas características fisiológicas com os corais. Esses foraminíferos, além de produzirem um esqueleto (chamado testa) de carbonato de cálcio, também fazem simbiose com microalgas. Por isso, esses pequenos organismos possuem importantes características fisiológicas em comum com corais zooxantelados e, conseqüentemente, muitos requerimentos fisiológicos semelhantes. Eles também podem branquear em resposta a situações estressantes e até mesmo ter seu crescimento/calcificação prejudicado pelos mesmos estressores que afetam os corais. No caso dos foraminíferos, a vantagem é que esses organismos têm um ciclo de vida bem mais curto e respondem mais rapidamente aos impactos ambientais, constituindo assim uma ferramenta eficiente para antecipar efeitos deletérios no ecossistema como um todo.

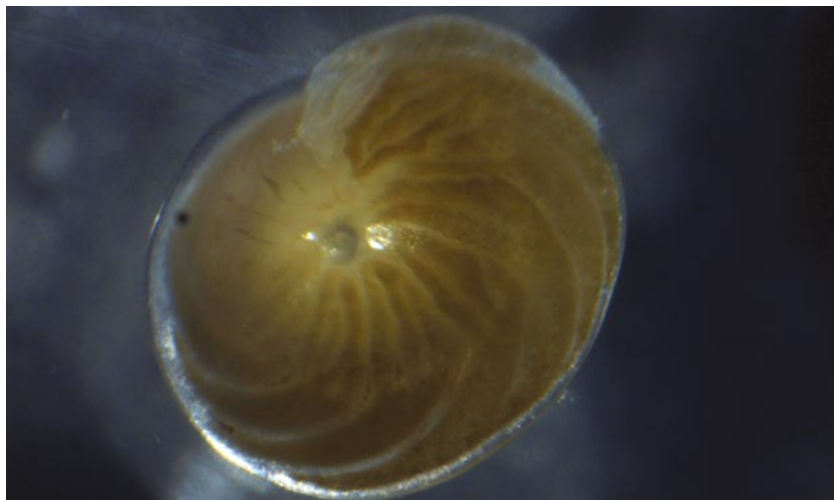


Figura 2. Foraminífero do gênero *Amphistegina*, organismo comumente usado como bioindicador da qualidade ambiental em recifes de coral. Crédito: Martina Prazeres.

Biomarcadores: uma abordagem inovadora

De forma geral, respostas em nível de população e comunidade possuem alta relevância ecológica. No entanto, são mais difíceis de serem interpretadas, uma vez que tornam mais complexa a distinção das alterações associadas à variabilidade natural (estações do ano, fenômeno El Niño, período reprodutivo, etc.) dos efeitos diretos causados pelo estressor ambiental. Além do mais, essas respostas só são detectáveis e mensuráveis após um tempo considerável de exposição, quando a intensidade do estressor é baixa, ou após a exposição aguda a uma alta intensidade do agente estressor. Assim, quando uma alteração significativa é evidenciada, o ecossistema já poderá se encontrar severamente comprometido. Neste contexto, o uso de **biomarcadores** como ferramentas de avaliação e monitoramento da qualidade ambiental e do ecossistema apresenta inúmeras vantagens.

Biomarcadores são alterações biológicas em **nível molecular, celular, fisiológico e/ou comportamental** que expressam a exposição e os efeitos subletais induzidos por contaminantes ou condições ambientais alteradas. Como as respostas nesses níveis de organização biológica

7. Processo que busca eliminar ou reduzir a atividade de substâncias químicas “indesejadas”, assim como aumentar ou possibilitar sua excreção.

ocorrem em uma escala de tempo significativamente menor que aquelas observadas nos níveis mais altos, os biomarcadores servem como **sinais de aviso prévio** da degradação em comunidades e ecossistemas.

Considerando, como exemplo, que o dano na comunidade biológica seja a morte de um indivíduo diabético, é possível monitorar se a pessoa em avaliação está “sofrendo impacto” do diabetes observando os sintomas diretos da doença (cegueira ou dificuldade de cicatrização). Porém, quando esses sintomas são detectáveis, a pessoa já está severamente “impactada”. Por outro lado, ao monitorar os níveis sanguíneos da glicose, pode-se antecipar o desenvolvimento ou o agravamento da doença. Portanto, o uso de biomarcadores para monitorar níveis “mais baixos” da organização biológica funciona como uma **ferramenta preditiva** da degradação ambiental. Exemplos de biomarcadores incluem a expressão de genes e a atividade de enzimas relacionadas ao metabolismo, crescimento, detoxificação⁷, estresse oxidativo e proteínas de estresse, entre outros.

Apesar da vantagem de funcionar como ferramenta tanto de avaliação e monitoramento como de previsão, essa abordagem apresenta algumas limitações. Primeiramente, o custo das análises geralmente é elevado, comparado ao monitoramento de comunidades. Dependendo da espécie que se escolhe monitorar, a amostragem pode ou não ser destrutiva (causar a morte do organismo). Fatores endógenos (período reprodutivo, idade, etc.) e exógenos (salinidade, temperatura, etc.) também podem alterar a resposta dos biomarcadores. De forma geral, assim como no monitoramento de espécies bioindicadoras, é importante conhecer a variabilidade natural dessas respostas para que se possa efetivamente identificar as alterações relacionadas aos impactos ambientais. Essa abordagem costuma ser criticada pela dificuldade de se relacionar as alterações em níveis mais baixos de organização biológica àquelas que ocorreriam em populações e comunidades. Contudo, trabalhos recentes, principalmente com organismos recifais, têm mostrado claramente que respostas de biomarcadores estão fortemente relacionadas a efeitos fisiológicos, doenças e alterações em populações. A condição de estresse

oxidativo, por exemplo, está diretamente relacionada ao branqueamento de corais⁸. Parâmetros relacionados a essa condição são utilizados como biomarcadores celulares de impactos diversos. No caso de corais e foraminíferos com endossimbiontes, essa alteração em nível celular induz alterações em nível fisiológico e populacional, uma vez que eventos de branqueamento em grande escala muitas vezes estão associados à mortalidade em massa. Com relação ao processo de calcificação – outro importante indicador de saúde dos recifes de coral –, qualquer impacto que o perturbe pode ser antecipado pela análise de parâmetros moleculares e bioquímicos, como, por exemplo, a atividade da enzima Ca^{2+} -ATPase⁵.

8. Para mais detalhes sobre estresse oxidativo, branqueamento e calcificação em corais, ver MARANGONI et al. (2016), capítulo 4 deste volume.

Biomarcadores e os efeitos de poluentes

Nas últimas décadas, o número de estudos que utilizam biomarcadores para avaliar o efeito de poluentes é crescente. Parâmetros associados ao estresse oxidativo (defesas antioxidantes ou medidas de dano oxidativo em biomoléculas) são alguns dos biomarcadores mais utilizados, em combinação com a avaliação de proteínas de detoxificação (p.ex.: monooxygenases e metalotioneínas).

A contaminação química por metais e por compostos orgânicos, como herbicidas e hidrocarbonetos, é um problema significativo para os recifes de coral. A exposição a esses contaminantes é capaz de alterar o desempenho fisiológico de cnidários, como os corais e as anêmonas, alterando, por exemplo, a capacidade antioxidante do organismo e aumentando o nível de oxidação em biomoléculas. Isso se dá, basicamente, pela “geração” de maior quantidade de espécies ativas do oxigênio (EAO) na presença de metais ou durante processos de eliminação ou biotransformação dos contaminantes. Para eliminar o excesso de EAO, o organismo aciona suas defesas antioxidantes. Caso não seja suficiente, as EAO podem causar dano oxidativo em lipídios, proteínas e DNA. Por exemplo, a bióloga Martina Prazeres, juntamente com o professor Adalto Bianchini e seus colaboradores, identificou uma forte relação entre a ocorrência de dano oxidativo, a ativação de defesas antioxidantes e o branqueamento de foraminíferos com

9. PRAZERES, M.D.F.; MARTINS, S.E.; BIANCHINI, A. 2012. *Journal of Foraminiferal Research*, 42:56-65.

10. MARANGONI, L.F.B. 2014. *Biomarcadores para avaliação dos efeitos do cobre no coral *Mussismilia harttii* (Cnidaria, Scleractinia, Mussidae)*. 86p. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Biológica) - Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande, RS, Brasil.

endossimbionte em recifes contaminados por metais em Fernando de Noronha (PE, Brasil)⁹. Além disso, esses mesmos recifes mostraram baixa densidade populacional de foraminíferos com endossimbionte, confirmando a relação direta entre as respostas bioquímicas observadas e os danos diretos na comunidade de foraminíferos.

Com o apoio da Rede de Pesquisas Coral Vivo, através de experimentos ecotoxicológicos realizados no Mesocosmo Marinho em Arraial d'Ajuda (Porto Seguro, BA, Brasil), observou-se uma capacidade antioxidante reduzida e danos oxidativos no DNA do coral brasileiro *Mussismilia harttii* após exposição ao cobre, contaminante muito comum no ambiente marinho¹⁰. Tal estudo também identificou que a enzima anidrase carbônica é um biomarcador bioquímico de alta relevância ecológica, devido a seu papel na fotossíntese das zooxantelas e na calcificação do coral, podendo ser usado para detectar o impacto da exposição aguda a metais. No caso de uma exposição mais longa a metais, pode-se detectar alterações na atividade da Ca²⁺-ATPase (enzima relevante no processo de calcificação) em *M. harttii*. É importante salientar que alterações nesses biomarcadores foram detectadas sem que esses corais apresentassem qualquer sinal visual de branqueamento ou debilidade, o que reforça sua aplicação como ferramenta preditiva.

Biomarcadores e os efeitos de mudanças climáticas globais

A abordagem dos biomarcadores celulares tem sido usada classicamente para avaliar efeitos da poluição marinha. Considerando a crescente preocupação no que se refere às mudanças climáticas, tem se intensificado a busca por biomarcadores apropriados para se monitorar também os impactos globais.

Muitos autores têm estudado principalmente a atividade de enzimas e a expressão de genes envolvidos na calcificação, fotossíntese e metabolismo de holobiontes. Pesquisadores em diversas partes do mundo vêm identificando algumas proteínas como potenciais biomarcadores de aquecimento global e acidificação marinha, como a RuBisCO (enzima essencial para a fotossíntese), e outras relacionadas ao metabolismo energético e à calcificação em corais e foraminíferos.

No Brasil, pesquisas sobre a resposta de biomarcadores a impactos globais (acidificação dos oceanos e aumento de temperatura) em ambiente recifal estão sendo desenvolvidas pelo grupo de pesquisa do professor Adalto Bianchini com o apoio da Rede de Pesquisas Coral Vivo. Estudos recentes indicam o potencial de enzimas relacionadas à calcificação (Ca^{2+} -ATPase e Mg^{2+} -ATPase) para a avaliação e o monitoramento de efeitos da acidificação marinha em foraminíferos com endossimbionte¹¹, assim como sua interação com a contaminação por cobre. Biomarcadores relacionados aos processos de calcificação e fotossíntese, associados ao monitoramento do branqueamento, têm, portanto, um elevado potencial de aplicação na avaliação e monitoramento da saúde de organismos recifais frente a um oceano em transformação, bem como de prevenção/antecipação de efeitos nocivos em comunidades e ecossistemas recifais.

Perspectivas

Os estudos em desenvolvimento no âmbito da Rede de Pesquisas Coral Vivo pretendem, portanto, contribuir para elucidar os efeitos de impactos globais, como a acidificação marinha e o aumento da temperatura superficial da água, em parâmetros do estresse oxidativo e do metabolismo energético, assim como em parâmetros bioquímicos relacionados à calcificação em espécies recifais brasileiras. Além disso, um dos grandes objetivos é conhecer os efeitos de múltiplos estressores, locais e globais, como a contaminação por metais e sua interação com a temperatura e o pH da água do mar na fisiologia de corais, hidrocorais e foraminíferos com endossimbionte. A partir dos resultados obtidos, será possível entender como a interação entre esses agentes estressores afetam a fisiologia de espécies chave, e como isso pode afetar as comunidades recifais como um todo. Ao identificar os biomarcadores mais adequados para **detectar** e **monitorar** possíveis efeitos prejudiciais em comunidades, será possível fornecer subsídios para políticas de conservação e programas de avaliação e monitoramento da qualidade ambiental em recifes de coral brasileiros.

11. MARQUES, J.A. 2014. *Resposta de biomarcadores em Amphistegina spp. (Amphisteginidae, Foraminifera) expostos ao cobre e acidificação marinha*. 80p. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Biológica) - Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande, RS, Brasil.

Literatura recomendada

DOWNS, C.A.; FAUTH, J.E.; ROBINSON, C.E.; CURRY, R.; LANZENDORF, B.; HALAS, J.C.; HALAS, J.; WOODLEY, C.M. 2005. Cellular diagnostics and coral health: Declining coral health in the Florida Keys. *Marine Pollution Bulletin*, 51:558-569.

HALLOCK, P.; LIDZ, B.H.; COCKEY-BURKHARD, E.M.; DONNELLY, K.B. 2003. Foraminifera as bioindicators in coral reef assessment and monitoring: the FORAM Index. *Environmental Monitoring and Assessment*, 81:221-238.

VAN DAM, J.W.; NEGRI, A.P.; UTHICKE, S.; MUELLER, J.F. 2011. Chemical Pollution on Coral Reefs: Exposure and Ecological Effects. p.187-211 in SANCHEZ-BAYO, F.; VAN DEN BRINK, P.J.; MANN, R.M. (Eds) *Ecological Impacts of Toxic Chemicals*. Amsterdam: Bentham Science Publishers.

Avaliando impactos de estresses ambientais em recifes de coral – o uso de mesocosmos

Gustavo Duarte, Emiliano N. Calderon, Cristiano M. Pereira, Laura F. B. Marangoni, Henrique F. Santos, Raquel S. Peixoto Adalto Bianchini, Clovis B. Castro

A importância da antecipação dos impactos ambientais

Para a ciência, é fundamental ser possível testar o impacto dos estresses em organismos, sejam eles naturais ou antropogênicos. Testes e experiências podem ajudar a antecipar o efeito desses impactos e, conseqüentemente, auxiliar na definição de estratégias para minimizá-los. Entretanto, o objetivo de estressar um organismo também pode ser o de obter compostos produzidos nessas condições. Em alguns casos, em cultivos de microalgas, por exemplo, a aplicação de estresses pode desencadear a formação de lipídios, que são usados na produção de biodiesel. Neste capítulo, serão abordadas a ecologia experimental em ambientes marinhos, onde alguns conceitos podem ser utilizados para experimentos em outros ambientes, e a experiência do mesocosmo do Coral Vivo.

Ecologia experimental

O ramo da ciência que emprega experimentos para manipular variáveis ambientais a fim de testar o funcionamento dos ecossistemas ou da ecofisiologia de organismos, seja em condição de estresse ou não, é chamado de **ecologia experimental**¹. Com ela se desenvolve experimentos para responder a perguntas sobre como os ecossistemas funcionam ou como certos estresses poderão influenciar os ecossistemas, os microbiomas, os organismos ou a **homeostase**² entre populações, organismos, etc. São técnicas que também podem ser empregadas para estudar os efeitos tóxicos de certos compostos nos organismos ou para avaliar como as mudanças ambientais podem impactar a homeostase e até a sobrevivência dos organismos diante dos impactos causados pelos estresses testados.

1. UNDERWOOD, A.J. 1996. *Experiments in ecology: their logical design and interpretation using analysis of variance*. Cambridge: Cambridge University Press. 504p.

2. Homeostase se refere ao conjunto de processos de regulação presentes em seres vivos, populações, ecossistemas, ou até mesmo todo o planeta, que lhes permite resistir a mudanças ambientais, mantendo as condições internas necessárias à vida e permanecendo em equilíbrio ou estabilidade.



Planejamento experimental e desenho experimental

Em ecologia experimental, há uma fase de planejamento muito importante para o sucesso e a qualidade dos resultados que se pretende alcançar. Através do método científico, só se pode admitir que um resultado tem grande probabilidade de ser verdadeiro quando se atinge 95% de confiança de que o efeito observado não ocorreu ao acaso. Planejar experimentos em que os resultados tenham esse nível de probabilidade de acerto não é tarefa banal. O **planejamento experimental** resulta no que é chamado de **desenho experimental** ou **protocolo experimental**. Trata-se das condições técnicas e de logística do experimento necessárias para atingir o objetivo do estudo, como a definição de que espécie será estudada, qual será a variável manipulada e como será alterada, qual a melhor logística de coleta, número de réplicas, velocidade de trocas de água, tipo e qualidade da luz, quais serão os equipamentos, entre outros. Todas essas etapas devem ser planejadas antes de se desenvolver um experimento.

Réplicas

A partir da elaboração de uma pergunta-chave, um bom planejamento do experimento deve ser realizado para que seja possível obter as respostas certas para ela e, além disso, com 95% de probabilidade de que tais respostas não tenham ocorrido ao acaso. Como obter esse intervalo de confiança nos resultados? As **réplicas** experimentais talvez sejam a principal característica de um bom desenho experimental com objetivo de ampliar a confiabilidade do resultado obtido. Conceitualmente, uma réplica experimental é a repetição independente do mesmo experimento nas mesmas condições experimentais. As réplicas podem ser repetições do mesmo experimento em sequência no tempo ou a execução de experimentos idênticos ao mesmo tempo. Com a **repetibilidade** do mesmo experimento, reduz-se a probabilidade de erro em que o efeito observado esteja ocorrendo ao acaso, principalmente quando os resultados se distribuem sempre próximo da média dos resultados.

No entanto, não é banal replicar um experimento de forma idêntica e independente. É muito importante estar atento a réplicas falsas (**pseudoréplicas**), ou seja, repetições experimentais que parecem ser idênticas, mas não são. É possível admitir um certo grau de pseudoreplicagem, mas de forma extremamente controlada e quando identificadas as variações intraréplicas no experimento. Outro mecanismo empregado para aumentar a confiabilidade dos resultados é a **randomização** das réplicas. A agregação de unidades experimentais pode favorecer erros por interferências localizadas. Para evitar esse efeito, a randomização funciona como um sorteio da posição das réplicas experimentais, diminuindo o efeito da posição dos experimentos que são réplicas nos resultados.

Repetibilidade ou realismo?

Algumas questões importantes devem ser consideradas para o planejamento experimental: o objetivo do experimento é simular as condições naturais ou o mais importante é que todas as condições ambientais sejam manipuladas e controladas, para isolar somente a resposta ao estresse ou estímulo? É possível repetir o experimento e encontrar os mesmos resultados?

Experimentos de pequena escala em laboratório são úteis para que se possa isolar um determinado efeito fisiológico ou simular uma condição muito específica a ser testada. Experimentos de laboratório, com todas as variáveis controladas, são mais fáceis de serem repetidos. Basta ligar os mesmos equipamentos, nas mesmas condições, usando um organismo ou grupo de organismos idênticos e ter-se-á uma replicagem de todo o experimento.

Mas caso a pergunta tenha alguma conexão com o que ocorre no ambiente natural – como a resposta do estresse causado pela poluição do esgoto em um determinado organismo ou ecossistema – os experimentos mais realistas são os mais indicados. No entanto, experimentos em áreas abertas e suscetíveis às alterações naturais são mais difíceis de serem repetidos no tempo. Por exemplo, ao se fazer um experimento que use a luz do dia no mês de março, repeti-lo em abril ou maio não faz dele um experimento idêntico, pois a intensidade da luz do dia ou a nebulosidade podem ser alteradas entre os meses do ano ou entre as estações seca e chuvosa.

Nos últimos anos, principalmente diante dos cenários de mudanças climáticas e da grande pressão dos estresses de origem antropogênica, cada vez mais a ciência vem buscando experimentos mais realistas, que simulem ao máximo as condições naturais. Dessa forma, os resultados alcançados produzirão melhor o que poderá acontecer no ambiente natural. Dentre os experimentos realistas, pode-se destacar os de campo e os de micro e mesocosmo, que serão abordados a seguir.

Experimentos de campo

O tipo de experimento mais realista possível sempre será aquele executado diretamente na natureza (campo), onde o organismo permanece inserido nas variações naturais em que homeostaticamente estava aclimatizado, com alteração apenas do fator que se pretende manipular. No entanto, os experimentos de campo em ambiente marinho geralmente são muito caros de executar e, frequentemente, carecem de boa replicagem experimental em função das limitações de custo e logística. Há também implicações éticas, caso o objetivo seja testar o efeito do estresse por poluentes, que não podem contaminar o ambiente natural. Nesse aspecto, os micro e mesocosmos levam vantagem, pois é possível testar o efeito de um poluente de forma bastante realista e sem o risco de contaminar o ambiente natural. A decisão de se fazer ou não um experimento de campo envolve considerar todas as implicações durante a fase do planejamento experimental.

Mesocosmo e microcosmo

Os microcosmos e mesocosmos são ferramentas experimentais que diferem entre si principalmente por sua escala e realismo experimental. Enquanto os microcosmos são menores, com experimentos de curta duração e mais dedicados a estudos específicos, os mesocosmos são experimentos de escala intermediária, tanto no volume quanto na duração. O radical “meso” significa mediano ou intermediário, e “cosmo”, o ambiente em que se quer replicar. Ambos os tipos podem ser mais ou menos realistas, apresentando maior ou menor fidelidade ao que é observado

na natureza. Podem usar luz natural ou artificial, podem ser abertos – conectados ao ambiente natural – ou fechados, ou com um volume restrito de água para a experimentação.

Mesocosmos e microcosmos, quando suscetíveis às variações naturais, podem apresentar limitações de repetibilidade. O período do ano em que se realiza o experimento irá impactar no resultado, sendo praticamente impossível repeti-lo de forma idêntica.

O Projeto Coral Vivo realizou quatro experimentos de microcosmos desde 2008³. O sistema empregado para os experimentos citados nos capítulos 12 e 13 foi basicamente o mesmo, diferindo em números de tratamentos, e está ilustrado na Figura 1.

3. FRAGOSO-DOS-SANTOS, H.; DUARTE, G.A.S.; RACHID, C.T.D.C.; CHALOUB, R.M.; CALDERON, E.N.; MARANGONI, L.F.D.B.; BIANCHINI, A.; NUDI, A.H.; DO CARMO, F.L.; VAN ELSAS, J.D.; ROSADO, A.S.; CASTRO, C.B.E.; PEIKOTO, R.S. 2015. Impact of oil spills on coral reefs can be reduced by bioremediation using probiotic microbiota. *Scientific Reports*, 5:18268.

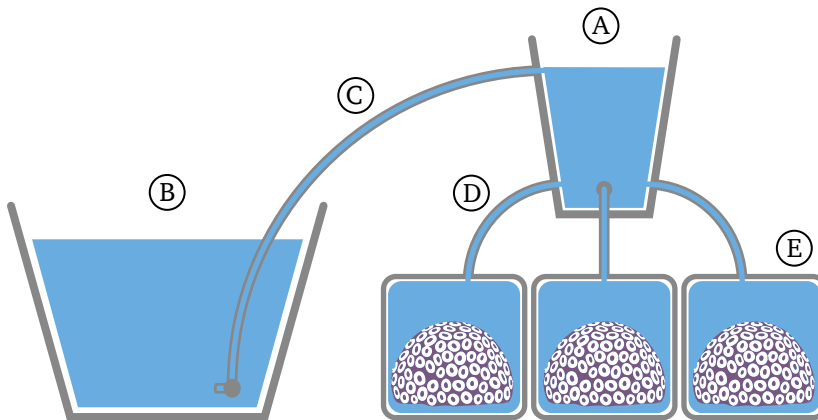


Figura 1. Microcosmo empregado no experimento de vinhoto (capítulo 12 deste volume) e de óleo (capítulo 13 deste volume). Os tanques (A) na prateleira superior recebiam os tratamentos vindo de caixas estoque (B) de 1000 litros cada, através de bombas, por mangueiras (C). Por gravidade cada tanque (A) alimentava através de mangueiras (D) os três tanques réplica (E), onde estavam os corais.

O mesocosmo marinho do Coral Vivo

O mesocosmo do Projeto Coral Vivo é um sistema experimental com tanques e aquários alimentados constantemente pela água do mar e simula os impactos futuros das mudanças climáticas e da poluição no ambiente recifal (Figura 2). O desafio foi construir um sistema experimental robusto e seguro para testar as mudanças previstas para as próximas décadas conforme o relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), da ONU. Um sistema que estivesse apto para estudos de curta e de longa duração, que empregasse acidificação, aumento da temperatura, alteração da turbidez, contaminação por metais e compostos orgânicos e pela interação entre os mais diferentes organismos do bentos, nécton e mesoplâncton.

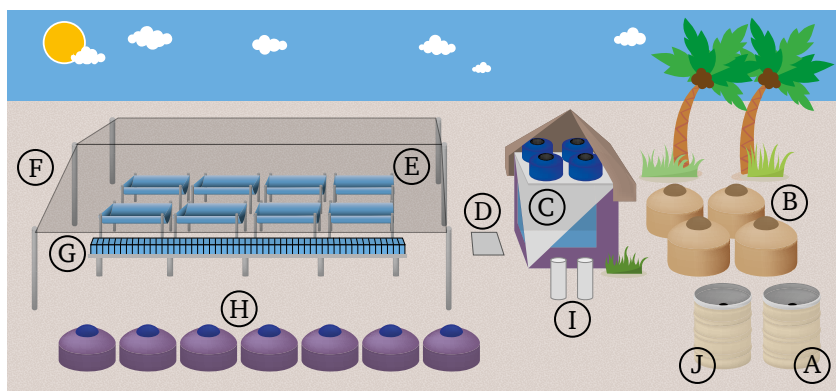


Figura 2. Vista esquemática do mesocosmo do Coral Vivo. (A) Poço de entrada de água e bomba de captação, (B) cisternas subterrâneas de tratamento de água, (C) seção da sala de controle mostrando os tanques de 310 litros no sótão, (D) mangueiras de randomização, (E) tanques raceway, (F) tela para filtragem da luz, (G) aquários de ecotoxicologia, (H) reservatórios de contaminantes para ecotoxicologia, (I) filtros de carvão ativado, (J) poço de retorno de água.

Construído em 2011, o sistema conta com dois módulos: o principal e o de ecotoxicologia (ecotox). O módulo principal possui 16 tanques de polietileno, com 130 litros cada, em que se pode realizar experimentos de maior escala e de simulação dos estresses climáticos futuros, como o aumento de temperatura ou a acidificação do mar. O módulo ecotox, que pode ser utilizado paralelamente ao módulo principal, possui sistema de 48 aquários de 10L, nos quais são reunidos os mesmos estresses do sistema principal em combinação com contaminantes químicos, como o cobre e o zinco, ou nutrientes.

Como funciona

Tanto o módulo de tanque principal quanto o de ecotox têm sua água tratada da mesma forma inicial, e o funcionamento do mesocosmo pode ser dividido em duas seções: a de tratamento de água e a de experimentação. A seção de tratamento de água é composta por quatro cisternas subterrâneas de 5 mil litros cada, para onde é bombeada a água do mar coletada no recife de coral costeiro à distância de 500m mar adentro. A vazão de bombeamento é de aproximadamente 20 mil litros por hora, dividida igualmente entre as quatro cisternas. Após a chegada nas cisternas a água não será misturada novamente; são os estoques de água para cada tratamento⁴ a ser testado. Nessas cisternas estão instalados os equipamentos necessários à manipulação das condições experimentais, denominadas “tratamentos”, como os aquecedores ou os reatores de dissolução de CO₂. Os fatores estudados não são modificados em uma das cisternas, que funciona como **controle experimental**⁵. A comparação dos efeitos medidos nos organismos testados na condição controle com os resultados dos efeitos nos demais tratamentos (com fatores modificados) permite avaliar no presente caso o efeito “mesocosmo”. As cisternas possuem uma bomba cada, que eleva a água do mar, já tratada, para caixas de água de 310L, a 2,5m acima do solo, onde ficam os equipamentos de medição de suas condições físico-químicas. A água fica circulando entre as caixas elevadas e as cisternas subterrâneas para se homogeneizar e manter as condições nas caixas elevadas de “leitura” sempre o mais

4. Em um estudo experimental, um ou mais fatores (chamados “variáveis”) são modificados para testar sua influência no objeto de estudo. Nesse sentido, um determinado tratamento representa combinações específicas da qualidade ou intensidade de diferentes fatores.

5. Controle experimental é um tipo especial de tratamento onde nenhum fator é modificado (p.ex., a água do mar tal como entra no sistema). Tendo em vista que o próprio sistema experimental pode influenciar os objetos testados, o controle permite avaliar se as mudanças observadas nos demais tratamentos podem ou não ser devidas a essa influência.

6. Tanques em formato “raceway”, que recebem esse nome por terem formato alongado, com entrada de água por uma extremidade e saída pela oposta, propiciando uma melhor substituição da água.

parecidas com as encontradas nas cisternas subterrâneas. Das caixas elevadas de 310L partem tubulações individuais para cada um dos tanques experimentais propriamente ditos, com quatro saídas para cada uma das caixas elevadas.

O módulo principal, composto por 16 tanques de 130L no formato “raceway”⁶, e o módulo para estudos de ecotoxicologia (ecotox), que tem 48 aquários de 10L, recebem água das caixas elevadas, que integram a seção de tratamento de água. A vazão da água do mar para cada tanque é regulada a cada dois dias, por meio de válvulas de precisão.

Os tanques “raceway” do módulo principal são usados para experimentos com os mais diversos organismos. Organizados em quatro réplicas para cada tratamento, que recebem sempre a água do mar tratada proveniente da mesma caixa de 310L, possuem também um sistema para simular o “vai e vem” das correntes marinhas, propiciando uma melhor mistura da água e evitando o acúmulo de muco e de partículas sobre os organismos testados. Os aquários do módulo ecotox recebem água dos mesmos tratamentos (mesma origem) do sistema principal, mas de forma independente e em combinação com soluções de contaminantes químicos, definidos pelo desenho experimental, para testar como a combinação dos primeiros parâmetros em interação com contaminantes químicos afetarão os organismos. O mesocosmo já passou por rodadas experimentais com emprego de cobre (Cu) como contaminante, como mencionado no capítulo 16 deste livro.

Depois de passar pelos tanques de 130L ou pelos aquários de ecotoxicologia, a água segue para um sistema de coleta e não é mais utilizada no experimento. A água com compostos químicos é tratada por um filtro de carvão ativado que remove totalmente os contaminantes. Em casos de experimento de acidificação ou de aumento de temperatura, por exemplo, a água dos experimentos passa por um poço de tratamento repleto de material calcário para neutralizar seu pH e reduzir sua temperatura, e, assim, é devolvida em boas condições ao ambiente natural.

As principais inovações

Algumas medidas auxiliaram o realismo experimental para que as condições naturais fossem mantidas no mesocosmo. Um dos fatores mais importantes foi a taxa de renovação de água do mesocosmo construído pelo Coral Vivo. A taxa de renovação de água do mar pode alcançar até seis vezes o volume do tanque experimental por hora. Com isso, as condições físico-químicas da água do mar, como os níveis de nutrientes, a temperatura e até mesmo o plâncton, podem corresponder proximamente ao que é encontrado na região recifal onde a água foi coletada. Os aquários de 10L estão aptos para receber taxas de renovação de até quatro vezes por hora. Essa baixa “taxa de residência” da água nos tanques do mesocosmo é fundamental para simular o ambiente natural, o que é, em última análise, importante para a manutenção dos organismos e para a obtenção de resultados experimentais robustos e preditivos. Menores taxas de renovação de água poderiam permitir acúmulo de metabólitos dos organismos testados, alterando as características da água. Geralmente, uma taxa de renovação de três vezes o volume do tanque já é aceita para trabalhos de ecologia experimental, no entanto, aqui se busca ainda mais realismo, com taxas de renovação de até seis vezes.

Uma segunda medida muito importante foi a utilização de luz natural no mesocosmo. Muitos trabalhos utilizam luz artificial, lançando mão de sistemas computadorizados para controlar o fotoperíodo e a intensidade da luz. No mesocosmo do Coral Vivo, utilizou-se a luz do sol e, para simular a perda de intensidade da luz à medida que penetra na água do mar, foi utilizada uma tela usada para horticultura. Essa luz que incide nos tanques equivale à luz encontrada na faixa de 1,5 a 3m no ambiente natural. Assim, o mesocosmo recebe luz natural com características similares às do ambiente recifal, tanto na intensidade quanto na qualidade da luz incidida.

O emprego de grandes caixas de 5 mil litros instaladas sob o solo também contribuiu para que as condições naturais fossem mantidas no experimento. A instalação subterrânea se aproveita da maior inércia térmica do solo, o que evita a insolação e as trocas térmicas com a atmosfera,

tendo como resultado temperaturas mais estáveis da água em seu percurso até os tanques. Todas essas medidas diminuem o estresse experimental nos organismos testados, aproximando os resultados encontrados do que seria esperado, caso o estresse ocorresse no ambiente natural.

Os tratamentos do mesocosmo usaram também uma inovação desenvolvida pelo Coral Vivo em parceria com um fabricante de controladores computadorizados para aquários. Usando um sistema Arduino de código fonte aberto (Creative Commons), foi desenvolvido um sistema inovador de controle da temperatura da água e da injeção de CO₂. Esse sistema definiu a curva de aquecimento da água do mar sempre acompanhando a curva de variação de temperatura ou pH no ambiente natural, com alta precisão. Dessa forma, os cenários futuros testados foram mais realistas, já que o tratamento oscilava conforme a oscilação natural do ambiente recifal (Figura 3), o que é esperado como efeito das mudanças climáticas.

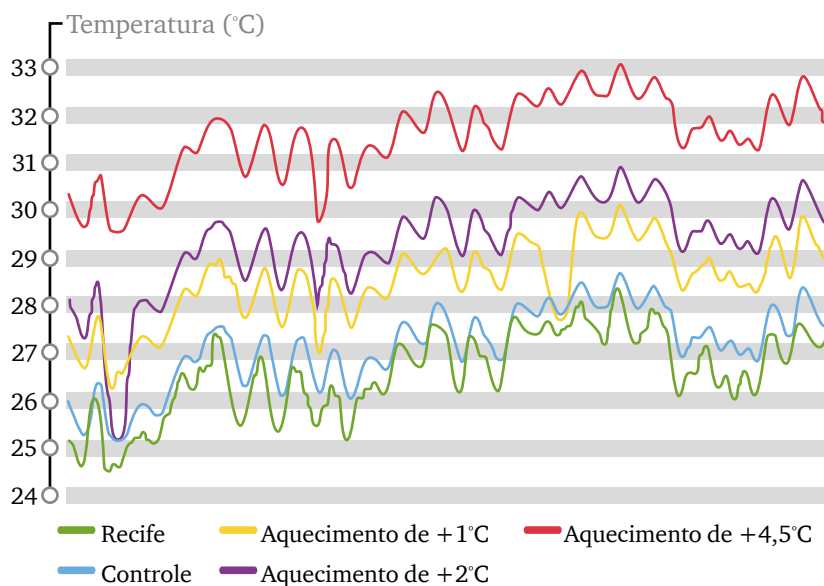


Figura 3. Gráfico da variação da temperatura do mesocosmo, plotado como média móvel a cada 30 resultados. (Verde) temperatura do recife, (azul) temperatura do controle, (amarelo) temperatura do aquecimento de +1°C, (roxo) temperatura do +2°C, (vermelho) temperatura do +4,5°C, como simulado em experimento de março-abril de 2012.

Resultados

Os primeiros resultados do mesocosmo foram muito promissores. O próprio trabalho descrevendo o mesocosmo foi publicado na revista “Ecology and Evolution”, da Editora Wiley, em 2015, com destaque de capa. Também em 2015, um artigo sobre o impacto da acidificação na meiofauna do Recife de Fora (BA, Brasil) foi veiculado na revista científica “Coral Reefs”, da Editora Springer. Em 2014, foi publicado na revista “The ISME Journal”, do grupo Nature, outro estudo que analisou o impacto do aumento da temperatura no microbioma de corais, com destaque para as bactérias fixadoras de nitrogênio. Além disso, dissertações de mestrado e teses de doutorado de diversas universidades foram e estão sendo desenvolvidas empregando a ferramenta.

Aprimoramentos

Algumas melhorias podem ser implementadas no mesocosmo para aumentar o realismo experimental e a facilidade de se conduzir os experimentos. A principal medida seria a substituição dos eletrodos de pH por medidores diretos de pCO₂ para os tratamentos de acidificação. Também seria possível instalar um controlador de fluxo de massa, em substituição à regulagem manual de injeção de CO₂, o que aumentaria a precisão da mistura. Pode-se também empregar filtros UV, para compensar a penetração desse espectro na água dos tanques, ou de outros filtros que possam simular diferentes profundidades dos oceanos no mesocosmo. Ele já foi preparado para que se possa instalar filtros de areia, ou skimmers, a fim de simular condições de água com menor ou maior turbidez em relação à água do mar coletada, bem como retirar matéria orgânica ou outro nutriente, propiciando estudos de mudança de fase, etc.

O mesocosmo do Coral Vivo tem sido testado e tem se mostrado uma ferramenta robusta para gerar dados experimentais confiáveis. A capacidade de gerar dados confiáveis em uma mesma rodada experimental simultaneamente para vários grupos de pesquisa tem sido chave para ampliar o conhecimento multidisciplinar da ecologia e da ecofisiologia recifal.

Literatura recomendada

- DUARTE, G.; CALDERON, E.N.; PEREIRA, C.M.; MARANGONI, L.F.B.; SANTOS, H.F.; PEIXOTO, R.S.; BIANCHINI, A.; CASTRO, C.B. 2015. A novel marine mesocosm facility to study global warming, water quality, and ocean acidification. *Ecology and Evolution*, 5:4555-4566.
- SANTOS, H.F.; CARMO, F.L.; DUARTE, G.; DINI-ANDREOTE, F.; CASTRO, C.B.; ROSADO, A.S.; VAN ELSAS, J.D.; PEIXOTO, R. 2014. Climate change effects key nitrogen-fixing bacterial populations on coral reefs. *The ISME Journal*, 8:1-8.
- SARMENTO, V.C.; SOUZA, T.P.; ESTEVES, A.M.; SANTOS, P.J.P. 2015. Effects of sea water acidification on a coral reef meiofauna community. *Coral Reefs*, 34(3):955-966.

Mapeamento físico de recifes de coral

Jhone Caetano de Araújo, Jose Carlos Sícoli Seoane

O que é mapeamento físico?

O mapeamento físico consiste no reconhecimento da geomorfologia, ou seja, do relevo. Como esses estudos foram iniciados? Quais foram os avanços na área? Qual sua importância? Neste capítulo, serão relatados resumidamente as primeiras iniciativas até chegar à tecnologia adotada atualmente e os resultados conquistados pela Rede de Pesquisas Coral Vivo, na Costa do Descobrimento (BA, Brasil).

Em 1521, Fernando de Magalhães lançou 730m de cabo no Oceano Pacífico, não chegou ao fundo e, por isso, acreditou ter achado o ponto mais fundo dos oceanos. Era dessa forma que se elaboravam os mapas do fundo marinho (ou seja batimétricos) até a criação do ecobatímetro, por Harvey Hayes, na década de 1920.

As medições por cabo e lastro possuíam uma série de desafios, pois não era fácil reconhecer quando o fundo era realmente alcançado, sendo comum que a posição do barco estivesse desalinhada com a posição do lastro, devido às correntes marinhas, sem contar a magnitude do esforço em mapear grandes áreas. Em 1855, com 200 sondagens, Matthew Maury confeccionou o primeiro mapa batimétrico do Oceano Atlântico; na década seguinte, lançou uma atualização, incluindo dados obtidos desde a instalação de cabos telegráficos submarinos ligando os Estados Unidos à Europa. Entre 1872 e 1876, a embarcação *H.M.S. Challenger*, em sua viagem de circum-navegação, às ordens da coroa britânica, efetuou 492 sondagens de profundidade, além de coletar material do fundo e da água objetivando conhecer as características físicas, químicas e biológicas dos oceanos. O sucesso dessa expedição inglesa fomentou outras nações a criarem suas próprias expedições oceanográficas, como o navio alemão *Gazelle*, o navio a vapor russo *Vitiaz* e o austríaco *Pola*. Cabe destacar o norte-americano *Blake* – o primeiro navio com capacidade de fundear em mar profundo e também de usar cabos de aço em atividades náuticas, possuir automatização de sondagens e, especialmente, utilizar ondas sonoras para aferição de profundidades.



Foi apenas após a Primeira Guerra Mundial que as medições em profundidades oceânicas começaram a ser efetuadas com menor dificuldade e maior rapidez, com a introdução de equipamento eletrônico-acústico, ou ecobatímetro, que permite medir o tempo entre a emissão de um sinal sonoro e a recepção de sua reflexão no fundo (eco). Essa técnica é denominada **ecobatimetria** e foi utilizada pela primeira vez pelos submarinos militares em guerra e, posteriormente, a título de pesquisa científica, de forma sistemática, pelo navio *U.S.S. Stewart*, a partir de 1922. Ela também foi adotada pelo cruzeiro científico oceanográfico *Meteor*, em expedição ao Atlântico Sul entre 1925 e 1927, contabilizando mais de 70 mil medidas e apresentando pela primeira vez o relevo submarino da região.

Na década de 1950, após a Segunda Guerra Mundial, existia uma grande quantidade de dados do relevo dos oceanos confidencializados às forças militares; aos poucos, eles foram sendo cedidos para a pesquisa científica. São reconhecidos os esforços de Marie Tharp e Bruce Heezen, cujo trabalho de organização e interpretação das informações são a base dos estudos em oceanografia física até os dias atuais (Figura 1). Eles apontaram pela primeira vez a presença de cadeias de montanhas meso-oceânicas, as margens continentais, e identificaram uma grande depressão, que denominaram de bacia oceânica. Os trabalhos desses estudiosos ajudaram a provar a teoria da deriva continental e, conseqüentemente, a teoria das placas tectônicas, que antes era considerada uma heresia científica.



Figura 1. Marie Tharp trabalhando no Mapa do Assoalho Oceânico Mundial, ou *World Ocean Floor Map*, pintado por Heinrich Berann e publicado em 1977, a partir de estudos^{1,2,3} iniciados na década de 50.

O constante desenvolvimento de novas técnicas de aquisição diversificou a forma de se adquirir dados de batimetria. Inicialmente, os ecobatímetros realizavam apenas uma leitura por vez, enquanto hoje é possível ler diversas medidas por meio da utilização de uma malha de receptores sonoros, chamados multifeixe. Outra técnica bem difundida é o sonar de varredura lateral, onde uma imagem é gerada a partir da intensidade de retorno do eco, formando objetos em texturas possíveis de serem classificadas. Em águas rasas (até 200m), é possível obter dados batimétricos por aquisição orbital ou aérea. Em nível orbital, os satélites são aparelhados por sensores que captam a energia do espectro eletromagnético em faixas, denominadas **bandas**, algumas das quais penetram nos oceanos. Já em nível aéreo, destaca-se o uso de LiDAR, cujo laser em comprimento de onda verde penetra na coluna d'água e apresenta ótima resolução espacial, porém de alto custo.

1. HEEZEN, B.C.; THARP, M.; EWING, M. 1959. *Geological Society of America Special Papers*, 65:1-126.

2. HEEZEN, B.C.; THARP, M. 1961. Physiographic Diagram of the North Atlantic. *Geological Society of America*. New York.

3. HEEZEN, B.C.; THARP, M. 1966. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 259:137-149.

Importância do mapeamento batimétrico

O mapeamento batimétrico tem implicações em diversas áreas do conhecimento científico e é usado para compreender a geomorfologia marinha e sua influência nas correntes marinhas. Um exemplo prático de seu uso na área política é subsidiar a implantação de zonas de administração nacional e águas internacionais.

O conhecimento sobre o relevo submarino é importante primeiramente pelo próprio conhecimento. O Brasil possui mais de 7 mil km de extensão litorânea e para administrar a chamada “Amazônia Azul”, é preciso conhecê-la a fundo. Em tempos de mudanças climáticas em efeito de aquecimento global, uma série de preocupações atingem as áreas costeiras, pois a maior parte da humanidade vive em cidades litorâneas, susceptíveis à elevação do nível do mar pelo aumento da capacidade destrutiva da ação de ventos e ondas, causando erosão de praias, falésias e outras áreas terrestres. As áreas passíveis de serem ocupadas por recifes, situadas entre 0m e 70m de profundidade, resumem-se a uma pequena superfície do planeta, e os recifes de corais hermatípicos ocupam apenas 1% da área de todos os oceanos. Isso evidencia ainda mais a fantástica concentração de biodiversidade encontrada nesses ambientes. Até 2008, cerca de 20% dessa área original já havia sido degradada devido à falta de medidas práticas para sua proteção e conservação. Segundo relatório de 2011 da *Global Coral Reef Monitoring Network*, cerca de 75% dos recifes estão ameaçados por pressões locais combinadas com o estresse térmico, observado no constante aumento da temperatura dos oceanos, ocasionando o enfraquecimento e o branqueamento dos corais e podendo ter consequências fatais para as colônias.

O planejamento e a gestão costeira tornam-se elementos fundamentais, e o mapeamento batimétrico, um excelente ponto de partida. A praia de Copacabana (RJ, Brasil), por exemplo, foi engordada, na década de 1970, com material proveniente da boca da Baía de Guanabara, sua jazida foi reconhecida e calculada a partir de mapeamento batimétrico, objetivando afastar as ressacas que invadiam as pistas e os edifícios à beira-mar.

Os desdobramentos científicos são diversos e ajudam a entender o comportamento dos fenômenos naturais, as mudanças no decorrer dos anos e a história do passado da Terra. O mapeamento de recifes de coral ajuda a compreender a organização morfológica das colônias, o zoneamento de áreas de acúmulo e retirada de sedimento, o reconhecimento de piscinas, zonas de topo normalmente planas e caminhos preferenciais da correnteza. Muitos naufrágios também são encontrados, pois são áreas que necessitam de grande precisão para serem navegadas. É a partir da base batimétrica que se avança para o mapeamento das comunidades biológicas e a compreensão ecossistêmica, tomando como ponto de partida os diferentes tipos de animais e plantas que ocupam áreas geomorfológicamente distintas, associadas a seu nicho ecológico.

Na área da política, os limites marítimos de soberania e jurisdição são referenciados a aspectos geomorfológicos marinhos. Em águas interiores, no mar territorial ou na zona contígua, prevalece a soberania nacional para fins de fiscalização no que tange à alfândega, saúde, imigração, portos e trânsito por águas territoriais. Está estabelecido que a jurisdição se estende a até 200 milhas náuticas e tem efeitos sobre a implantação de ilhas artificiais, instalações e estruturas, investigação científica e proteção e preservação do meio marinho, como são os recifes de coral. A soberania sobre os recursos minerais para efeitos de exploração e aproveitamento se estende até a margem da elevação continental, por volta de 300 milhas náuticas. A partir desses limites, passam a ser consideradas águas internacionais, patrimônio da humanidade.

Levantamento e processamento de dados

O Projeto Coral Vivo acumula duas experiências em mapeamento batimétrico: no Recife de Fora, em Porto Seguro (BA, Brasil), e nos recifes do Araripe, Coroa Alta e Coração, em Santa Cruz Cabralia (BA, Brasil), conhecida como Costa do Descobrimento. Para realizar o levantamento batimétrico foi utilizado um barco equipado com ecobatímetro de registro único acoplado a um GPS. Dessa forma, cada profundidade medida possui um par de coordenadas associado.

São geradas linhas equidistantes, de forma a criar uma malha regular de navegação percorrendo as maiores diferenças no relevo. Durante o levantamento, é preciso que o navegador se mantenha no trajeto planejado e não atinja velocidade acima da especificada pelo fabricante do ecobatímetro. As campanhas de levantamento são iniciadas duas horas antes do pico da maré cheia e terminadas duas horas após. Esse trabalho nunca deve ser realizado em condições meteorológicas ou oceanográficas adversas, para evitar riscos à navegação.

Uma tabela com as profundidades e as coordenadas é gerada pelo ecobatímetro e transferida para um software de mapeamento, onde são criadas linhas de igual profundidade, ou isóbatas, apresentadas em mapa batimétrico. A distribuição e os estilos de construção coralínea podem ser definidos a partir da interpretação da geomorfologia. Regiões de mais alta energia, como o lado exposto à ação de ondas, tendem a apresentar colônias dominadas por bancos de algas e corais mais resistentes, enquanto o lado interno, com mais baixa energia, apresenta maior concentração de corais saudáveis e com alta taxa de crescimento.

Modelo Digital de Elevação (MDE)

O Modelo Digital de Elevação (MDE) constitui uma representação em três dimensões (x , y , z) contínuas da superfície do planeta. Ele é construído em ambiente computacional e de matemática elaborada por dados de levantamento batimétrico. O MDE infere os valores batimétricos nas áreas entre os perfis de aquisição por meio de algoritmos conhecidos por interpoladores, assim gerando uma matriz contínua por toda a área, o que torna possível saber o comportamento do relevo em zonas não visitadas.

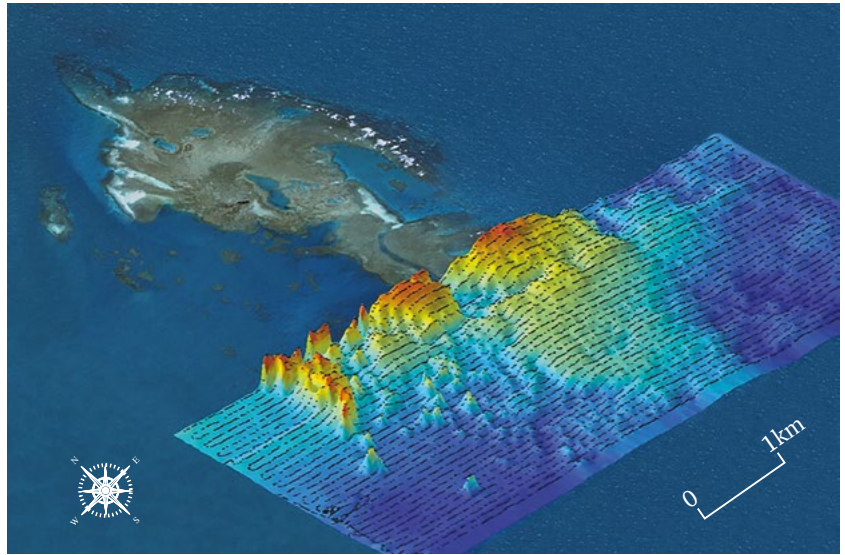
Diferentemente do mapa batimétrico, o MDE possibilita uma série de desdobramentos, como permitir o cálculo de áreas, volumes e desenho de perfis transversais, geração de imagens em escala de cinza, com a aparência do relevo sombreado, e de mapas de declividade, direção de encosta e concavidade/convexidade. O fatiamento em intervalos de interesse e a visualização de perspectivas tridimensionais são outros processamentos possíveis em relação à simbologia batimétrica.

Recife de Fora, Porto Seguro (BA, Brasil)

O Parque Natural Municipal do Recife de Fora se localiza no município de Porto Seguro, a 5 milhas náuticas, precisamente, entre as latitudes 16°23'S e 16°26'S e as longitudes 039°00'W e 038°58'W. Ele foi criado pela Lei nº 260/97, com área de 17,5km² e dimensões de 5,56km, Norte-Sul, e 3,1km, Leste-Oeste.

Em pesquisa realizada pelos cientistas membros da Rede de Pesquisas Coral Vivo, José Carlos Sícoli Seoane (Geologia/UFRJ), Clovis Castro (Museu Nacional/UFRJ), Débora Pires (Museu Nacional/UFRJ), Cátia Barbosa (Geoquímica/UFF) e Renata Arantes (Doutorado/UFRJ), em sua tese, foram gerados o mapa batimétrico e o MDE do Recife de Fora.

Para a realização desse mapeamento, foi adquirida uma imagem de satélite Quickbird com alta resolução; nela foram gerados trajetos Leste-Oeste distantes 50m entre si, totalizando 109 linhas em um percurso de 440km em uma área de 25km². O levantamento batimétrico foi realizado com um sistema integrado entre GPS e ecobatímetro montados em uma pequena embarcação. Os dados de levantamento foram processados por algoritmos interpoladores, sendo gerado o MDE (Figura 2).



Profundidade (m)

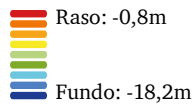


Figura 2. Modelo Digital de Elevação do levantamento batimétrico do Recife de Fora. Imagem de satélite de alta resolução (Quickbird) sobreposta pelas linhas de levantamento leste-oeste espaçadas a cada 50m (pontos em cor preta, a cada 10m). O trajeto foi navegado usando um sistema integrado de GPS e ecobatímetro montado em uma pequena embarcação. Os dados processados por algoritmos interpoladores são usados para gerar o MDE (superfície em relevo representada por cores que indicam a profundidade de cada área).

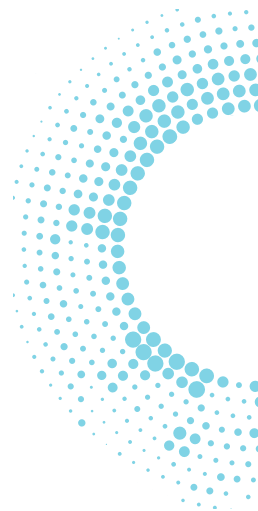
O Recife de Fora está sob a influência direta da descarga de água doce e de sedimentos do Rio Buranhém, e as correntes marinhas de deriva litorânea possuem sentido Norte-Sul. Apesar de limitado à visitação diária de 400 pessoas, esse recife vem sofrendo constantemente com os abusos relacionados ao turismo. O levantamento e o monitoramento da geomorfologia tornam-se essenciais para a preservação deste patrimônio. Aqui não se destacam apenas os aspectos da construção carbonática, mas também os arredores dos bancos de areia e dos canais, principalmente.

Recifes de Santa Cruz Cabrália (BA, Brasil)

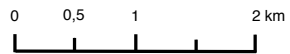
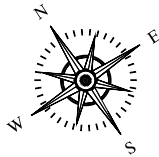
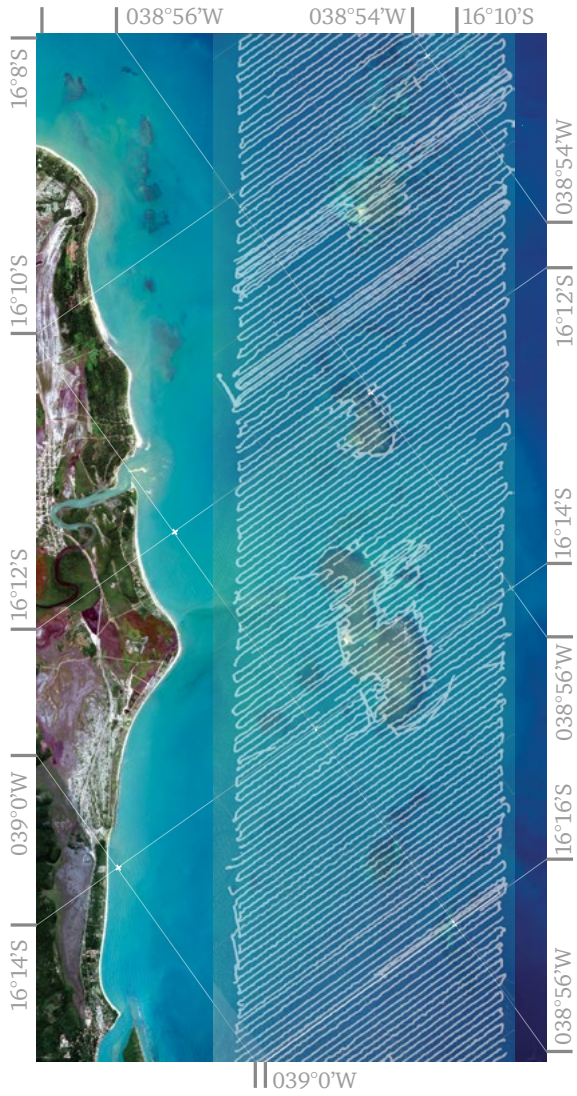
Os Recifes de Santa Cruz Cabrália localizam-se à Nordeste do distrito de Santo André, no município de Santa Cruz Cabrália, no Sul da Bahia. O Parque Municipal Marinho da Coroa Alta (PMMCA) data de 1998, possui área de 61,5km², dimensões de 15,7km por 3,9km, sendo a maior paralela à costa e entre as latitudes 16°08'45"S e 16°17'15S.

Em pesquisa realizada pelos cientistas José Carlos Sícoli Seoane, Jhone Araújo, Beatriz Pereira, Fernando Duarte e Ian Fortes (Geologia/UFRJ), foram gerados mapa batimétrico e Modelo Digital de Elevação, e selecionadas cenas do sonar de varredura lateral. O trabalho faz parte da Rede de Pesquisas Coral Vivo.

Visando o planejamento e execução do mapeamento, foi comprada pelo Projeto Coral Vivo uma imagem WorldView-2, cuja banda do azul costeiro penetra a coluna d'água e dá maior quantidade de informações sobre a morfologia e o fundo marinho. No total, foram planejadas 154 linhas orientadas em Leste-Oeste, espaçadas em 100m, num total de aproximadamente 800km de percurso (Figura 3A). Foram necessárias 33 saídas de campo e quase 100 horas de navegação para o levantamento de um total de 3.020.638 medidas de profundidade, representadas nos pontos com cores que indicam a profundidade (no mapa de detalhe da Figura 3B) e no MDE processado (Figura 3B).



(A)



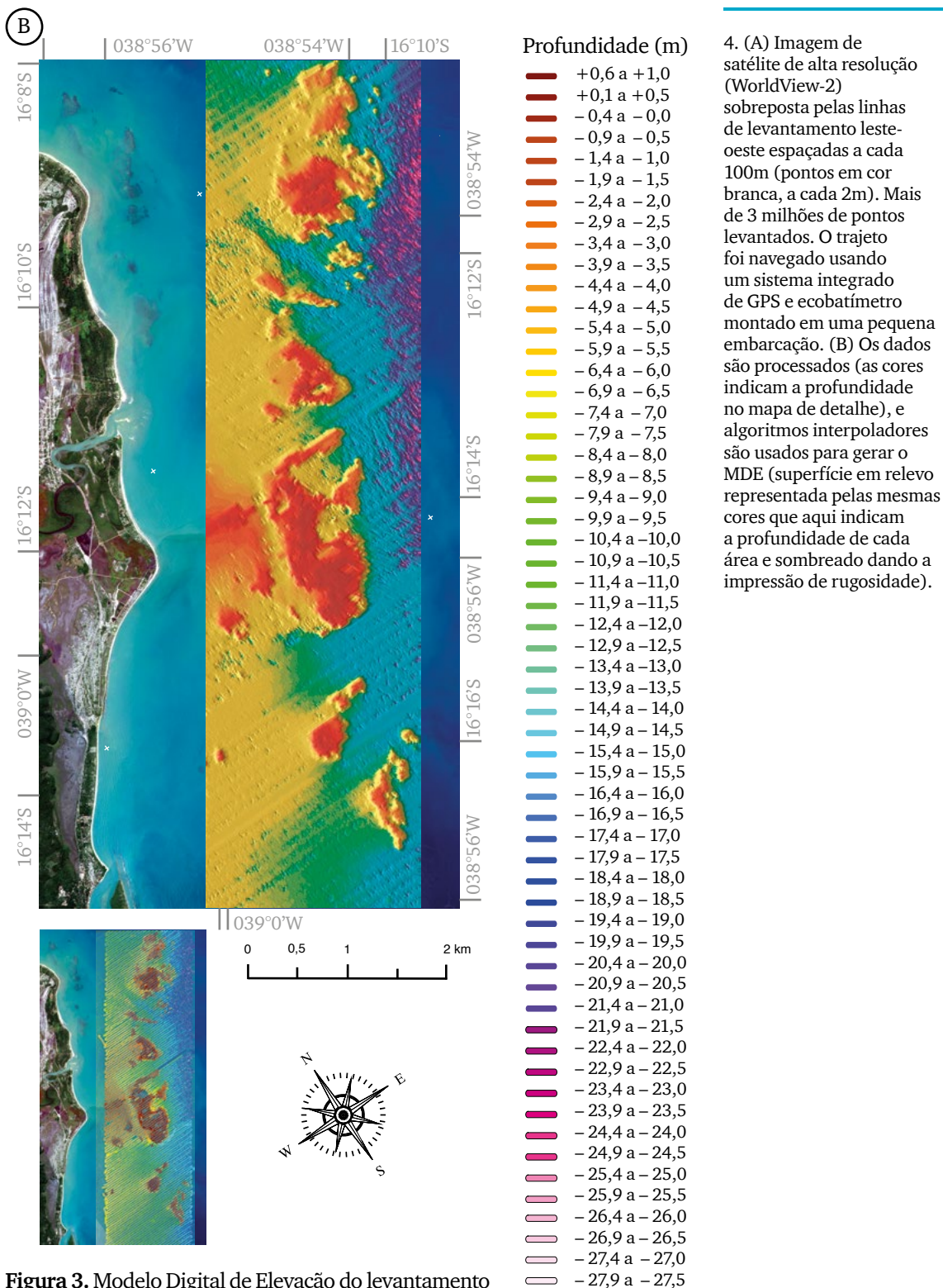


Figura 3. Modelo Digital de Elevação do levantamento batimétrico dos recifes de Santa Cruz Cabrália⁴.

O mapeamento dos Recifes de Santa Cruz Cabrália trouxe uma enorme surpresa para os pesquisadores do projeto: a presença de uma formação recifal se assemelhando a um coração (Figura 4). Outra novidade foi a utilização de um sonar de varredura lateral junto ao ecobatímetro acoplado ao GPS e montado, dessa vez, na lancha de 22 pés *Iamany*, que significa, na língua pataxó, “senhora das águas”. O sonar de varredura lateral capacita a observação de diversas texturas passíveis de medições, enriquecendo a compreensão do ecossistema recifal. Pode se observar, por exemplo, os bancos de areia, as paredes dos recifes, as piscinas, algumas espécies de coral, inclusive, peixes e outros animais, entre muitas feições. A Figura 4 apresenta um exemplo extraído da área do Coração de Santa Cruz, assim nomeado em parceria com uma atividade da Rede de Educação Coral Vivo. Os alunos do Ensino Médio do Colégio Estadual Professora Terezinha Scaramussa entrevistaram os pescadores mais antigos para saber os nomes de diferentes áreas dos recifes de coral da costa de Santa Cruz Cabrália. Aquelas ainda não nomeadas foram batizadas. A iniciativa valorizou a cultura local, empoderando as pessoas da comunidade.

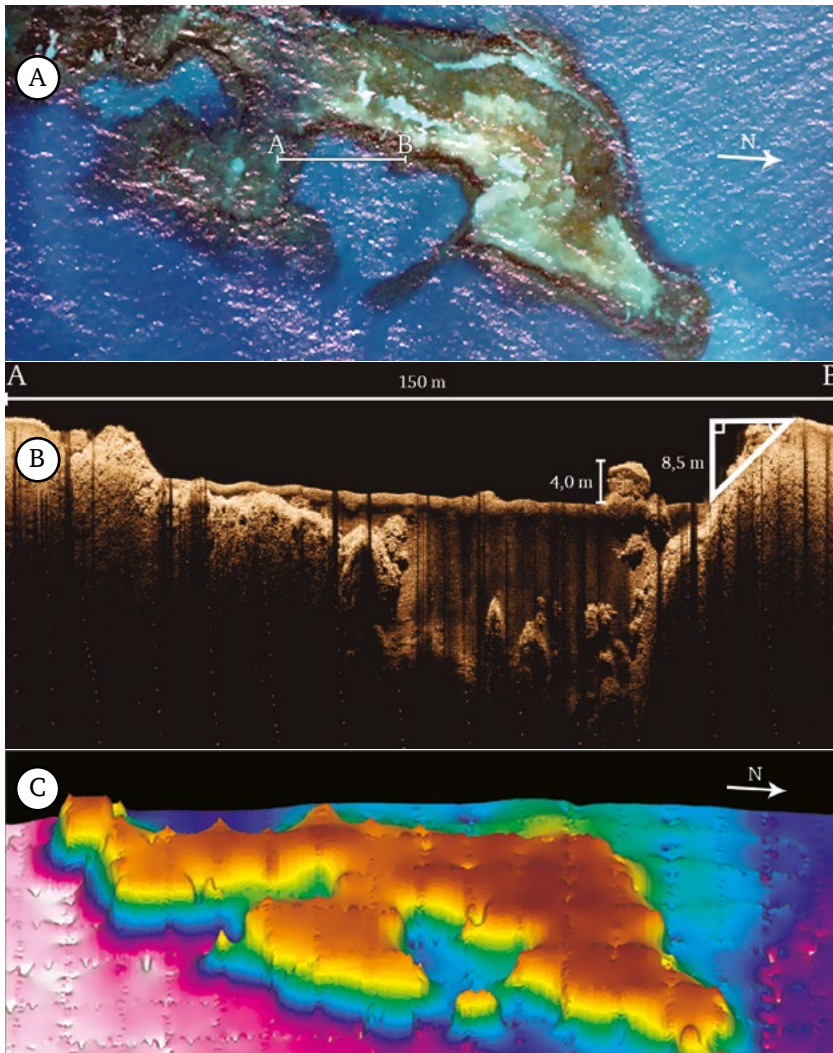


Figura 4. Coração de Santa Cruz. (A) Imagem do satélite WorldView-2 indicando a localização da seção A-B, que mede cerca de 150m. (B) Vista da seção A-B no sonar de varredura lateral, com exemplo das medições das feições recifais através de software especializado. O cabeço isolado tem 4m de altura, enquanto que a parede lateral do recife principal tem 8,5m de altura. Notar as diferentes inclinações das paredes, as várias formações de corais existentes e o fundo arenoso. (C) MDE da área visualizado em perspectiva, aproximadamente sob o mesmo ponto de vista que A.

Os Recifes de Santa Cruz Cabrália sofrem influência terrestre por conta da descarga dos rios João de Tiba e Santo Antônio, e oceanográfica pelas ondas de tempestade, predominantemente de Sudeste, e deriva litorânea de Norte para Sul. Destacam-se áreas arenosas emersas e de posição em constante mudança, nos recifes da Coroa Alta e do Araripe, exploradas pelo turismo.

Literatura recomendada

ARANTES, R.C.M. 2012. *Geoprocessamento Aplicado à Modelagem Ambiental em Recifes de Coral*. 196p. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências/Programa de Pós Graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

GAO, J. 2009. Bathymetric Mapping by Means of Remote Sensing: Methods, Accuracy and Limitations. *Progress. Physical Geography*, 33(1):103-116.

PEREIRA, J.P.G. 2008. *Ecobatimetria - Teoria e Prática*. Campina Grande: Gráfica Agenda. 84p.

SEOANE, J.C.S.; ARANTES, R.C.M.; CASTRO, C.B; TEDESCO, E.C.; LOPES, L.S. 2008. *Atlas do Mapeamento Físico do Parque Municipal Marinho do Recife de Fora, Porto Seguro, BA*. Rio de Janeiro: Atlas.

Sensoriamento remoto e recifes de coral

Thais Andrade Galvão, José Carlos Sícoli Seoane

Sensoriamento remoto

Os recifes de coral têm sofrido diversos impactos nos últimos tempos, sendo necessária a realização de medidas de proteção e preservação, como o monitoramento. Entretanto, em alguns casos, realizá-lo envolve altos custos e grande esforço. Com isso, novas propostas emergem, a fim de minimizar os gastos. É nessa perspectiva que o sensoriamento remoto aparece como alternativa. A realização de estudos que utilizem dados de sensores descrevendo a composição e a saúde de ecossistemas, sem a necessidade de se estar fisicamente próximo a cada trecho do recife, diminuirá os custos envolvidos na realização, e os resultados serão obtidos em menor escala de tempo, com uma visão mais ampliada.

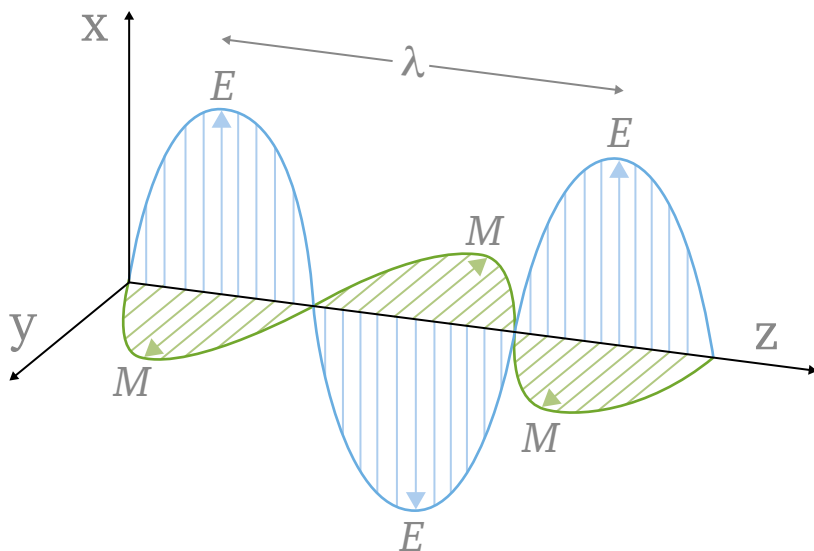
A utilização do sensoriamento remoto como fonte de informação para a construção de mapas resulta em boa temporalidade da informação e em boa relação custo-benefício, com potencial de os dados dos sensores detectarem mudanças ocorridas no ambiente.

O sensoriamento remoto é definido como uma técnica de obtenção de imagens da superfície da Terra sem que ocorra contato entre o sensor e o objeto. Para isso, ele mede de forma quantitativa as respostas das interações entre a radiação eletromagnética e os materiais terrestres.



Radiação eletromagnética e espectro eletromagnético

Mas o que seria a radiação eletromagnética (REM)? Ela é uma energia que se move na forma de ondas eletromagnéticas à velocidade da luz (300.000km/s). Apresenta-se na forma de dois modelos: corpuscular ou ondulatório; no primeiro, ela é uma forma dinâmica de energia, que se manifesta somente por suas interações com a matéria, enquanto no segundo, ela é definida como uma propagação de ondas formadas pela oscilação dos campos elétricos e magnéticos (Figura 1), e apresenta diferentes comprimentos de ondas. O agrupamento desses comprimentos de ondas é chamado de espectro eletromagnético, e ele apresenta subdivisões segundo as características de determinadas regiões (Figura 2).



E: campo elétrico
M: campo magnético
XZ: plano de excitação do campo elétrico
YZ: plano de excitação do campo magnético
Z: direção de propagação da onda eletromagnética

Figura 1. Ondas eletromagnéticas. (E) Campo elétrico; (M) campo magnético; (XZ) plano de excitação do campo elétrico; (YZ) plano de excitação do campo magnético; (Z) direção de propagação da onda eletromagnética.

Dentre todas as subdivisões, a denominada faixa visível, que compreende os comprimentos de ondas azul, verde e vermelho, é aquela que o olho humano consegue detectar.

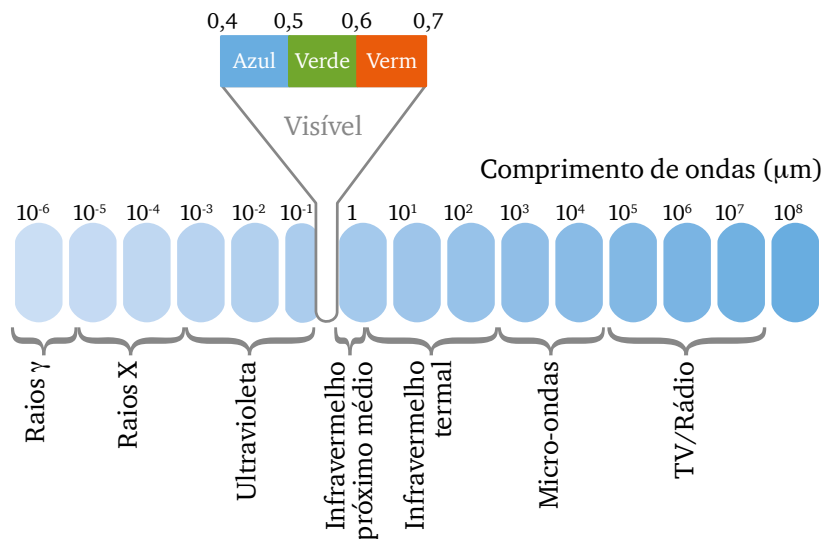


Figura 2. O espectro eletromagnético.

Tem-se como fontes da REM quaisquer partículas que se colidam e possuam temperatura superior ao zero absoluto ($-273,15^\circ\text{C}$). Apesar de a Terra também ser uma fonte de REM, ela não é tão intensa e significativa quanto o sol, visto que o planeta, por conta de suas baixas temperaturas, só emite comprimentos de ondas na faixa do termal.

Comportamento espectral de alvos, formação de imagens e suas propriedades

A interação da REM emitida pelo sol com a superfície terrestre ocorre de diferentes maneiras em cada alvo, e essas diferenças são um reflexo da composição físico-química dos objetos ou das feições terrestres.

Os alvos absorvem ou refletem de modo diferente em cada uma das faixas do espectro eletromagnético, formando sua assinatura espectral. Com esses dados, é possível construir gráficos nos quais serão visualizados os comprimentos de onda em que a radiação incidente foi mais absorvida ou refletida. A energia refletida poderá ser captada por um

sistema sensor, presente nos satélites e sensível às diferenças espectrais, o que possibilitará a formação de imagens do alvo ou da superfície em que ocorreu a interação.

Para que uma imagem de satélite seja formada, a REM percorrerá um caminho como o ilustrado na figura 3. Inicialmente, a energia deixa o sol em direção à superfície terrestre e interage com os alvos. Uma parte é absorvida por eles, a outra é refletida em direção ao sensor, sendo captada, registrada e transmitida para estações de recepção na Terra, onde serão transformadas em dados sob a forma de gráficos, tabelas ou imagens.

Essas imagens apresentam propriedades que devem ser observadas na hora de escolher qual é a ideal para o objetivo do trabalho/pesquisa. São as chamadas resoluções, e referem-se à capacidade de um sensor de “enxergar” ou distinguir objetos da superfície terrestre, o que formará imagens com maior precisão ou detalhamento.

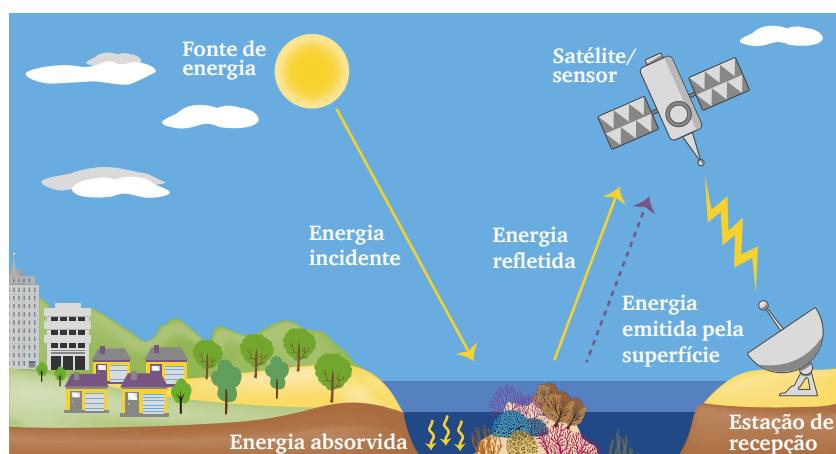


Figura 3. Caminho percorrido pela radiação eletromagnética desde a fonte até os sensores e as estações de recepção de dados.

A primeira é a resolução espectral, e se refere ao poder de resolução que o sensor tem para discriminar certo alvo. Está relacionada à quantidade de faixas espectrais em que ele opera – quanto mais faixas e mais finas elas forem, melhor será a resolução espectral da imagem formada. A segunda é chamada de resolução espacial, e se refere à capacidade de distinção dos alvos. Ela determina o tamanho do menor objeto possível de ser identificado por um sensor na imagem. Por exemplo, o sensor Landsat produz imagens com resolução espacial de 30m, enquanto o sensor WorldView, de 2m. Isso significa que,

em geral, não são discriminados pelo sistema os objetos que possuam tamanhos maiores que suas resoluções. Então, quanto menor for o valor da resolução do sensor, mais nítida ficará a imagem, e será dito que esse sensor possui uma maior resolução espacial, já que consegue identificar mais elementos (Figura 4).

Em julho de 2015, por meio do uso de imagens de satélite de alta resolução espacial do sensor WorldView, foi possível identificar um recife em formato de coração. Essa descoberta foi feita pela Rede de Pesquisas Coral Vivo durante os estudos preliminares do mapeamento realizado no Parque Municipal Marinho da Coroa Alta, em Santa Cruz Cabralia (BA, Brasil). Essa estrutura apresenta 400m de largura e 10m de profundidade, e se encontra a 5km do litoral; até então, passava despercebida nas imagens de satélites de baixa resolução, embarcações ou sobrevoos. Graças à alta tecnologia recente, essa descoberta foi possível.



Figura 4. Diferenças nas resoluções espaciais das imagens dos satélites WorldView 2 e Landsat 5. Imagens da esquerda com escala de 1:100.000 e da direita com escala de 1:15.000. (A) Imagem Landsat - Resolução espacial 30m. (B) Imagem WorldView 2 - Resolução espacial 02m.

A terceira é denominada resolução temporal, sendo o intervalo de tempo que o satélite leva para voltar a recobrir a área de interesse. Essa resolução é bastante importante para estudos de monitoramento. Já a última é conhecida como resolução radiométrica, e representa a capacidade do sensor de discriminar, em determinada área, alvos com pequenas diferenças de radiação refletida e/ou emitida.

Existem diversos sistemas sensores operando atualmente, alguns dos mais utilizados são os da família Landsat. Foi após o lançamento de um desses, o Landsat MSS, que os estudos sobre os recifes de coral com imagens de satélite iniciaram.

Utilização do sensoriamento remoto nos estudos em ambientes recifais

Histórico

Um dos primeiros registros de trabalho envolvendo uso de imagens de satélites e recifes de coral foi realizado em 1975, na Grande Barreira de Corais (Austrália), utilizando uma imagem Landsat na construção de mapas temáticos.

Nos anos 80, ocorreram diversos trabalhos envolvendo mapeamento temático, monitoramento, estudos metodológicos e de mapeamento ecológico/biológico. Nessa década, foi lançado o satélite Spot, que fornecia novas imagens com outras resoluções; não demorou muito para que os pesquisadores se apropriassem dessa nova ferramenta para os estudos recifais. A Unesco – observando o desenvolvimento dessa nova linha de pesquisa e sua importância – organizou o primeiro workshop sobre as aplicações de técnicas digitais de sensoriamento remoto para estudos oceanográficos e estuarinos, mais especificadamente, para o estudo dos recifes de coral.

Entre o final dos anos 80 e o início dos anos 90, o pesquisador do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Alan Strong, por meio de uma parceria com a Academia Naval dos Estados Unidos, foi pioneiro no interesse em estudar o branqueamento de corais – que era um fenômeno relativamente novo – por meio do sensoriamento remoto. Atualmente, o NOAA tem disponível imagens que revelam locais com possíveis

chances de ocorrência de branqueamento, chamados de HotSpots. Esses dados são gerados por meio de estudos envolvendo imagens de satélite que conseguem revelar a temperatura superficial da água do mar e os possíveis estresses térmicos.

Os anos 90 se caracterizaram pela busca por aprimoramento e desenvolvimento de novas técnicas de sensoriamento remoto para o mapeamento de recifes de coral. No início dessa década, foram desenvolvidos e testados métodos para minimizar o efeito da coluna d'água na formação das imagens em estudos realizados no Caribe, no Golfo Pérsico e na Polinésia Francesa.

Pesquisadores do Reino Unido se detiveram a estudar o tema mapeamento de recifes de coral desenvolvendo estudos que buscavam avaliar e discutir técnicas e sensores utilizados no mapeamento de ambientes recifais.

Nos anos 2000, a Unesco publicou um livro, intitulado “Sensoriamento Remoto para o Manejo Costeiro Tropical”, no qual foram reunidas informações importantes para o mapeamento de habitats submersos, de profundidade e qualidade de água, além de descrição e análise de técnicas de sensoriamento remoto e avaliações dos sensores disponíveis. Após o Workshop Internacional sobre o Uso do Sensoriamento Remoto para o Mapeamento e Monitoramento de Recifes de Coral, pesquisadores do mundo todo sugeriram como ações prioritárias o desenvolvimento de estudos que se baseassem em propor ferramentas e aplicações em sensoriamento remoto e geoprocessamento.

Os anos 2000 foram marcados por um avanço nessas pesquisas, ocasionado pelo desenvolvimento de novas tecnologias e pelo aprimoramento de técnicas de sensoriamento remoto. A busca por descobrir as assinaturas espectrais dos corais e dos outros elementos constituintes dos recifes aumentou, proporcionando a realização de mapeamentos cruzando esses dados com imagens de diferentes resoluções espacial e espectral.

1. MOREIRA, P.P. 2008. *Mapeamento de habitats do Recife de Coral Pedra de Leste, Abrolhos, utilizando imagens orbitais Quickbird e LANDSAT7 ETM+*. 104p. Dissertação (Mestrado em Sistemas Aquáticos Tropicais)-Universidade Estadual de Santa Cruz. Ilhéus, Bahia, Brasil.

Estudos no Brasil

Recentemente, o Brasil começou a utilizar o sensoriamento remoto para mapeamento de ambientes recifais. Em 2000, Fabiano Morelli (INPE) realizou mapeamento utilizando as imagens Landsat TM5 e Spot nos recifes de Paripueira (AL, Brasil). Um ano depois, pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) avaliaram a utilização dos dados das imagens Landsat e Spot para mapeamento dos recifes da APA Costa dos Corais (PE, Brasil), como instrumento de apoio ao manejo de unidades de conservação.

Nos anos 2002 e 2003, foram realizados trabalhos de mapeamentos de recifes no Rio Grande do Norte, utilizando fotografias, e em Pernambuco, através de imagens Landsat e da fusão de imagens de satélite com fotografias aéreas. Nesse período, foi lançado pelo Ministério do Meio Ambiente o “Atlas dos Recifes de Coral nas Unidades de Conservação Brasileiras”. Ele contém diversos mapas temáticos dos ambientes recifais com imagens dos satélites Landsat e Spot. Sendo fruto da tese de doutorado de Ana Paula Prates (MMA), ele avaliou a representatividade dos recifes de coral nas unidades de conservação marinhas do Brasil.

Até então, os trabalhos de mapeamento se restringiam aos estados de Alagoas, Pernambuco e Rio Grande do Norte. Em 2008¹, foi realizado em Abrolhos (BA, Brasil) um mapeamento do Recife de Coral Pedra de Leste, com imagens Landsat ETM+ e Quickbird, iniciando a utilização de imagens de alta resolução espacial. Quatro anos depois, Renata Arantes (Doutora em Geologia/UFRJ) por meio de parceria criada com o Projeto Coral Vivo, realizou o mapeamento do Parque Natural Municipal do Recife de Fora (BA, Brasil) utilizando imagens de alta resolução espacial. Entre os anos 2013 e 2015, foram desenvolvidos estudos, em parceria com o Projeto Coral Vivo, buscando preencher lacunas metodológicas com os trabalhos de Thais Galvão (Mestre em Ciências Ambientais/UEFS) e Talita Santos (Mestre em Geologia/UFRJ). O primeiro buscou caracterizar assinaturas espectrais de corais, enquanto o segundo testou formas de classificação de imagens de satélites em ambientes recifais.

O Brasil – além da realização dos mapeamentos geomorfológicos, físicos e de habitats – tem buscado aprimorar tecnologias nos estudos desses ambientes. Trabalhos envolvendo correção das interferências, busca da construção de assinaturas espectrais de corais e de novas formas de processar as imagens têm sido realizados na tentativa de melhorar os mapas desse ambiente tão rico e diverso.

Usos do sensoriamento remoto em recifes de coral

Existe uma diversidade de usos que o sensoriamento remoto tem dentro do ecossistema recifal. Os principais são relacionados aos mapeamentos dos recifes e ao estudo do comportamento espectral de seus componentes. Por meio do estudo espectral, já é possível diferenciar corais branqueados, saudáveis e mortos, e, dentro desses temas, há a possibilidade de trabalhar com os diversos tipos de sensores com diferentes resoluções. Sem falar na busca por novas metodologias e desenvolvimento de ferramentas para correção e classificação das imagens.

Um dos mapeamentos realizados são os geomorfológicos², ou seja, mapeamento das formas do relevo. Normalmente, eles necessitam – além dos dados de sensores remotos – de um estudo batimétrico da área, criando um modelo digital de elevação, sendo possível fundir esses dados e formar um mapa geomorfológico. Um exemplo foi o construído com o apoio do Projeto Coral Vivo no Parque Natural Municipal do Recife de Fora. Nele, pode-se distinguir diversas formas de recife, como os platôs recifais, os bancos de coral e a face exposta, entre outros detalhes.

Os mapas de habitats tendem a identificar e delimitar ecossistemas e seus organismos representativos. Através dele é possível identificar e quantificar os recursos naturais importantes. O mapa apresentado na figura 5, além de ser geomorfológico, é um mapa de habitats. Primeiramente, apresenta os aspectos geomorfológicos; posteriormente, os dados de habitats. Nesse caso, estão representados os corais, os zoantídeos, as algas (divididas em macroalgas e algas calcárias) e as gramas marinhas. Atualmente, têm sido realizados estudos que visam mapear a saúde dos recifes. Para a construção desses mapas, é necessário o conhecimento do comportamento espectral dos corais.

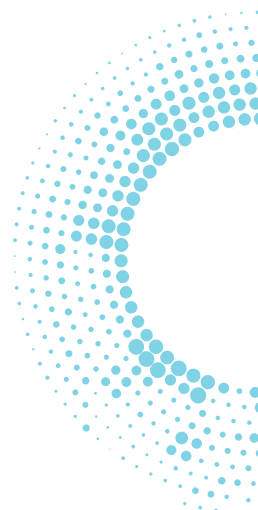
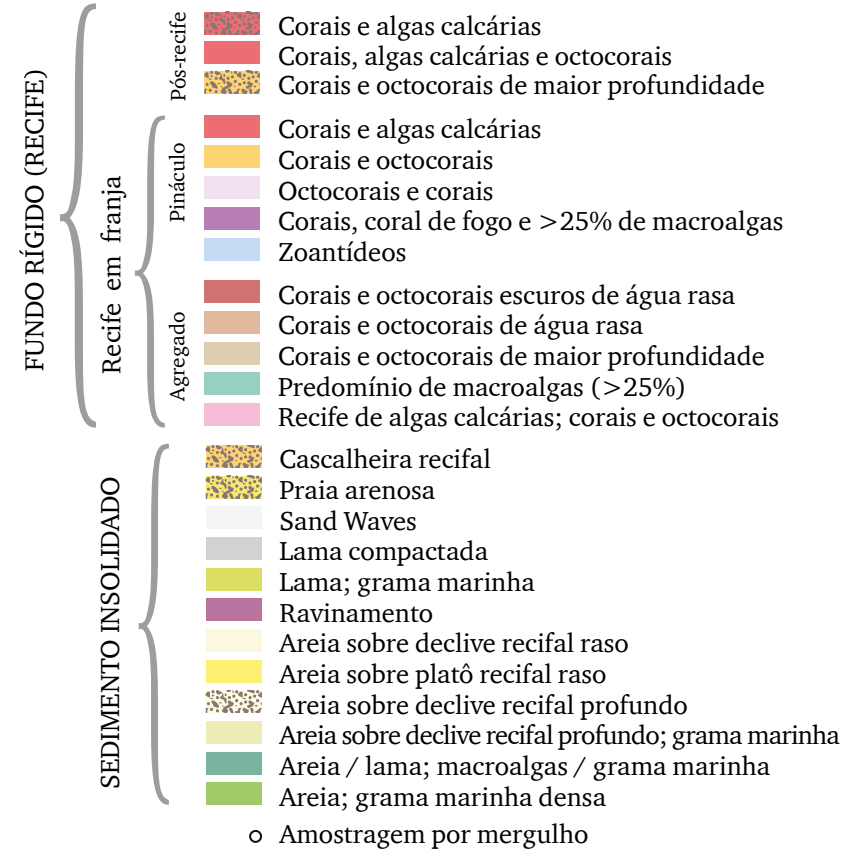
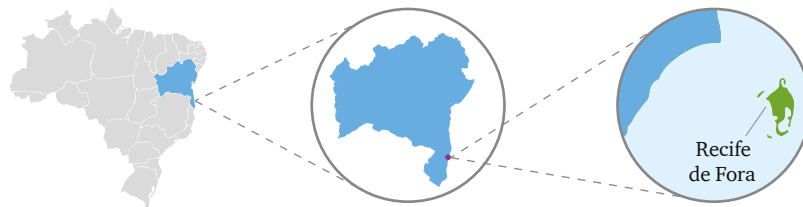
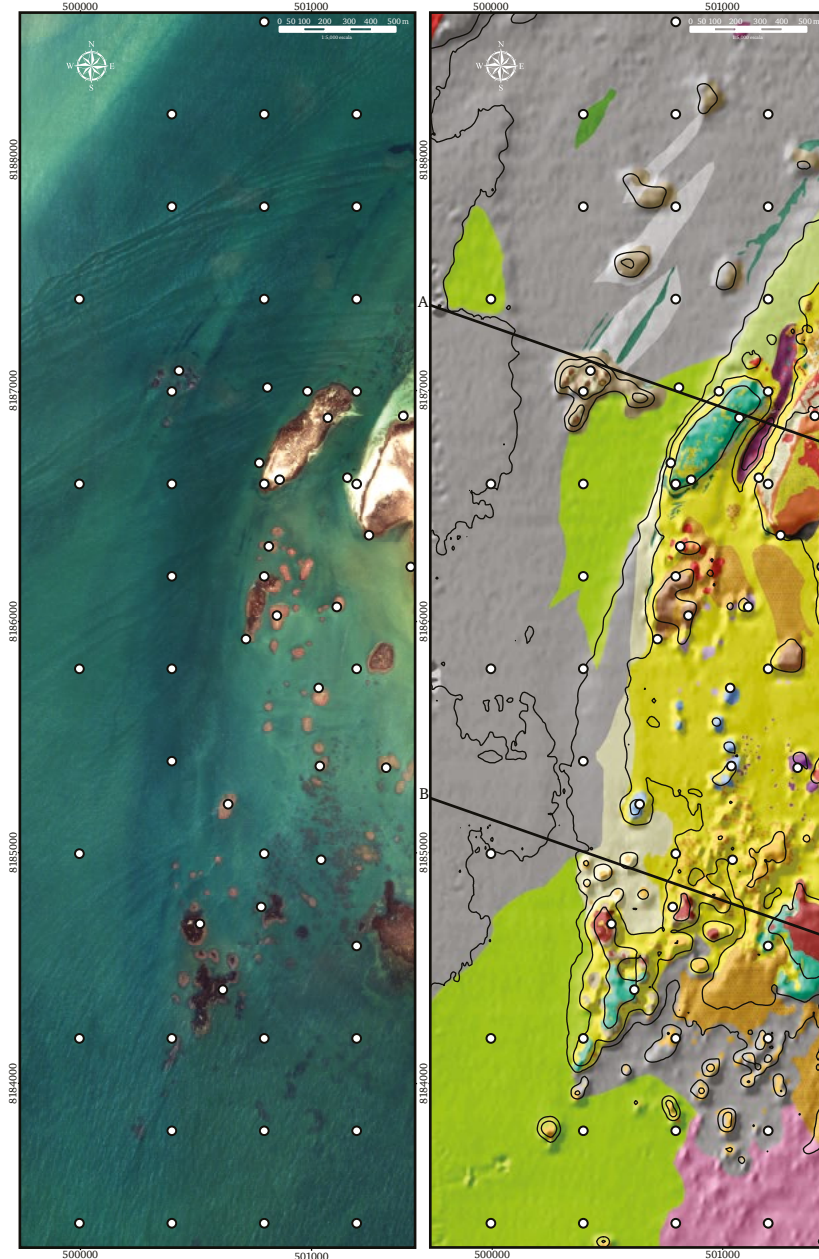
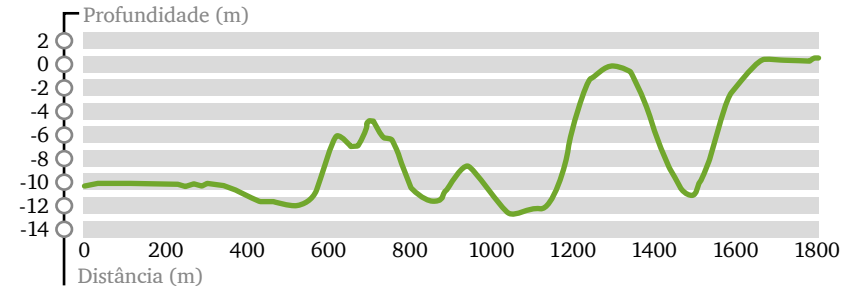


Imagem do satélite World View 2 Mapa dos habitats bentônicos



A - A' - Norte do Recife de Fora



B - B' - 'Sul do Recife de Fora

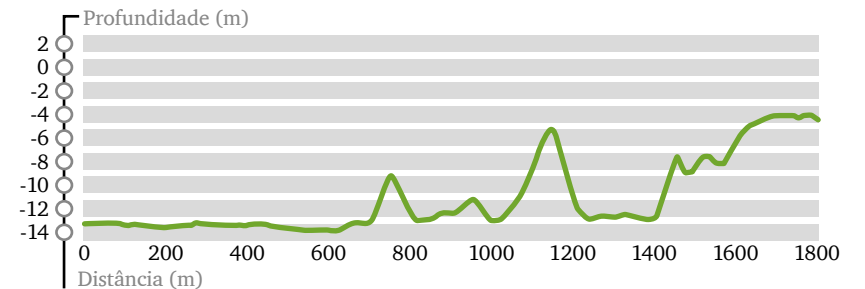


Figura 5. Mapa de habitats da porção oeste do Parque Municipal Marinho do Recife de Fora (BA, Brasil)³. À esquerda, imagem do satélite de alta resolução WorldView-2. Mapa fotointerpretado para habitats ao centro. Pontos de mergulho para verdade de campo marcados em branco. Legenda do mapa de habitats à direita. A geomorfologia pode ser visualizada nas seções A-A' e B-B', marcadas no mapa de habitats. De leste para oeste, observa-se o fundo arenoso, os aglomerados (na seção A-A'), os pináculos (em B-B') e o recife principal a leste, com seu topo plano, em ambas as seções.

3. ARANTES, R.C.M. 2012. *Geoprocessamento aplicado à modelagem em recifes de coral*. 196p. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

As assinaturas espectrais dos corais são marcadas fundamentalmente por sua pigmentação. São distinguidos três tipos de pigmentos: os encontrados no tecido do coral, os existentes no esqueleto fixo, quando presentes, e os oriundos das zooxantelas. Este último é o responsável pelas diferenças nas assinaturas espectrais dos corais saudáveis e branqueados. Estudos recentes classificam os corais em três grandes grupos: marrons que apresentam um triplo pico perto dos comprimentos de ondas 570nm, 600nm e 650nm, os azuis que não apresentam o pico em 570nm e verdes que possuem um pico próximo ao 518nm. Essa classificação é baseada na reflexão e absorção da radiação eletromagnética representada em suas assinaturas espectrais.

Pesquisa com assinaturas espectrais nos corais brasileiros realizada por Thais Galvão, em parceria com a Rede de Pesquisas Coral Vivo, pôde identificar alguns dos corais brasileiros como pertencentes ao grupo de cor marrom (Figura 6). Identificou também que, quando um coral sofre o branqueamento, podem ser observadas mudanças em suas assinaturas representadas por um deslocamento de sua curva espectral. As marcações antes encontradas vão se desfazendo até ir de encontro a uma curva de reflexão branca, ou seja, de reflexão quase total, que pode ser marcada pelo esqueleto (branco) dos corais (Figura 7). Acredita-se que utilizando esses dados, associados a imagens de satélite, seja possível diagnosticar se um coral está saudável ou não e, com isso, realizar um monitoramento à distância.

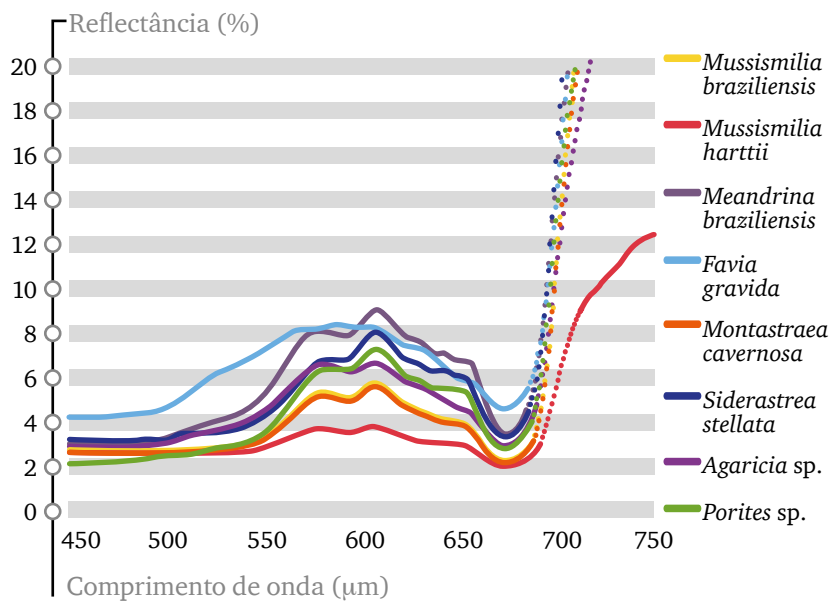


Figura 6. Assinaturas espectrais de corais saudáveis.

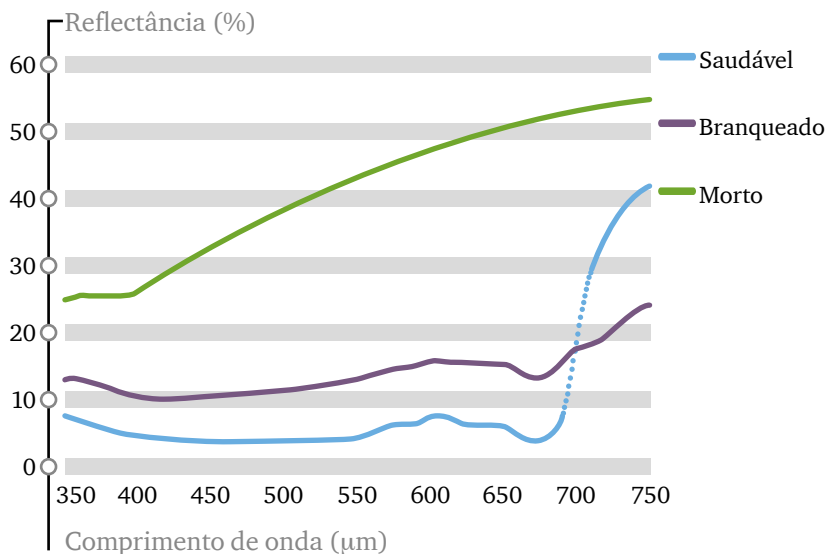


Figura 7. Assinaturas espectrais do coral *Siderastrea stellata* saudável, branqueado e morto, coletados no Parque Natural Municipal do Recife de Fora (BA, Brasil).

Perspectivas e avanços do sensoriamento remoto em ambientes recifais

Logo, uma das perspectivas e progressos do sensoriamento remoto em ambientes recifais seria a possibilidade de realização de monitoramento da saúde dos corais. Atualmente, pode-se prever branqueamento com base na temperatura superficial do mar, entretanto, ainda não se consegue monitorar diretamente a saúde do coral através de imagens. Para isso, conhecer as assinaturas espectrais dos corais é importante, além de buscar metodologias mais precisas de correção de interferências e de formar novas imagens, que possam interagir cada vez mais e melhor com os objetos submersos.

Pesquisadores da Universidade Federal do Rio de Janeiro, em parceria com a Rede de Pesquisas Coral Vivo, têm buscado ampliar as informações sobre as assinaturas espectrais dos corais brasileiros e, com isso, criar novos mapas, para que seja possível identificar a saúde dos corais por meio desses dados, associados a imagens de satélite em altas resoluções.

Conclusão

Neste capítulo, pôde-se conhecer um pouco sobre o sensoriamento remoto e como ele tem sido usado para estudos envolvendo os recifes de coral. Com o avanço de novas tecnologias e metodologias, será possível construir melhores mapas, com maior detalhamento e precisão, expandindo o conhecimento, de forma orbital, desse ecossistema.

Literatura recomendada

FIGUEIREDO, D. 2005. *Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto*. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). 30p.

HOCHBERG, E.J.; ATKINSON, M.J. 2000. Spectral discrimination of coral reef benthic communities. *Coral Reefs*, 19:164-171.

SANTOS, C.L.A. VITAL, H.; AMARO, V.E.; KIKUCHI, R.P.K. 2007. Mapeamento de recifes submersos da costa do Rio Grande do Norte, NE do Brasil: Macau a Maracajaú. *Revista Brasileira de Geofísica*, 25(zz1):27-36.

Pesca do polvo: estudo sobre a situação atual no Sul da Bahia

Manuella Dultra, Alexandre Schiavetti

Os polvos capturados nos recifes costeiros de Porto Seguro e de Santa Cruz Cabralia (BA, Brasil) estão sendo pescados em tamanho inferior a seu estágio reprodutivo. Essa situação pode tanto conduzir a um resultado social negativo, como repercutir no “sobreuso” do recurso. Nesse sentido, ressalta-se que a ausência do equilíbrio constitui um cenário preocupante no que diz respeito à manutenção e sobrevivência da espécie e da atividade na região, fazendo-se necessário a busca por um protocolo de pesca sustentável, vinculado à cogestão das áreas de pesca do polvo nos sistemas recifais estudados.

Classificação biológica do polvo

Os polvos – assim como as lulas, sépias (ou sibas) e argonautas – estão compreendidos na classe dos cefalópodes (Cephalopoda), pertencente ao Filo Mollusca. Distribuem-se em cerca de 812 espécies no mundo, das quais 86 são registradas para o Brasil. Na ordem Octopodida, destaca-se o gênero *Octopus* (Família Octopodidae), que possui 112 espécies descritas atualmente e distribuídas principalmente em águas rasas tropicais, sendo o gênero mais estudado dessa ordem.

Os polvos do gênero *Octopus* desempenham o papel de predadores oportunistas, com uma alimentação bem diversificada: peixes, crustáceos, outros moluscos e aves marinhas. Eles têm também o papel de presa de algumas espécies de peixes (principalmente moréias), aves e mamíferos marinhos, e, ainda, de outros cefalópodes. Além de sua importância ecológica, servem como fonte de renda para as pescarias comerciais em várias regiões do mundo. Devido à posição desses animais na cadeia trófica, sua diminuição pode vir a ocasionar desequilíbrio nas comunidades bentônicas de ambientes recifais.



A principal espécie do Sul da Bahia é o *Octopus insularis*, um polvo de tamanho médio e que vive em águas rasas ao redor das ilhas oceânicas tropicais e ao longo da costa Nordeste do Brasil. Possui um manto globoso, com textura rugosa, mancha no formato de “v” na região logo abaixo dos olhos e braços curtos e grossos. Em geral, apresenta ciclo de vida curto, não ultrapassando dois anos. O crescimento de polvos geralmente é rápido, sendo que os machos amadurecem sexualmente com peso inferior ao das fêmeas, e a reprodução única ao longo do ciclo de vida é uma característica do grupo.

Após a cópula, as fêmeas dos polvos migram para áreas mais profundas com o intuito de depositarem seus ovos, e lá permanecem, cuidando dos mesmos. Durante esse cuidado com a postura dos ovos, a fêmea deixa de se alimentar e, geralmente, não apresenta mais condições de se reestabelecer depois do grande esforço, então morre.

Distribuição das espécies de polvo pelo mundo

Os cefalópodes são cosmopolitas, habitando todos os ambientes marinhos, desde os costeiros rasos até as zonas abissais; porém, o gênero *Octopus* não é encontrado nas regiões polares. Embora a exploração de espécies de cefalópodes venha aumentando em algumas regiões do mundo, ainda existem alguns desses recursos praticamente inexplorados. No entanto, sabe-se que informações sobre as variações na distribuição e na abundância relativa, no tempo e no espaço, são fundamentais para a compreensão da ecologia de uma espécie e para a gestão da pesca.



Espécies de polvo presentes na costa do Brasil

As espécies descritas para a costa brasileira pertencem aos gêneros *Vosseledone*, *Pareledone*, *Eledone* e *Octopus*. No Sul da Bahia, além de *O. insularis*, foi registrada a ocorrência de outra espécie de polvo, o *Callistoctopus* cf. *macropus*. Anteriormente, foi descrito como *O. macropus*, conhecido popularmente como polvo-de-leste (Figura 1); para alguns pescadores de polvo, ele seria o macho do polvo que ocorre na região: *O. insularis*. Cabe informar que o *O. insularis* e o *O. vulgaris* são as espécies de polvos comercializadas para consumo nessa região, e o *Callistoctopus* cf. *macropus*, quando pescado, é utilizado como isca.



Figura 1. *Callistoctopus* cf. *macropus* (polvo-de-leste). Exemplar encontrado em recife costeiro de Porto Seguro (BA, Brasil). Primeiro registro de sua ocorrência na região. Créditos: Edimilson Conceição.

1. Pesca de espinhéis de potes: Consiste em um grande cabo principal (linha mestra) ao qual se prendem os potes (cujo número varia de 500 a mais de 5 mil, conforme a região) em intervalos regulares, por meio de cabos secundários mais finos. O conjunto permanece imerso por cerca de três dias. Essa arte de pesca parte do princípio de que os polvos, que buscam e obtêm alimento à noite, de dia procuram refúgio para se protegerem. Os potes são, então, normalmente lançados sobre fundos de cascalho, não muito distantes de áreas com substrato rochoso onde os polvos buscam abrigo, tornando-se uma “falsa” opção adicional de refúgio.

Modalidade de pesca do polvo no mundo e no Brasil

Vários cefalópodes fazem parte de pescarias importantes no Atlântico Norte, Mediterrâneo, Pacífico, Atlântico Central e costa Africana, sendo capturados por vários métodos, mas principalmente com rede de arrasto, como resultado de fauna acompanhante da pesca de camarão. A região do Mediterrâneo se destaca em termos de desembarque comercial desse tipo de pescado. Frotas comerciais de relevância para o setor pesqueiro desse tipo de pescado também atuam em outras partes do mundo, como na costa peruana, no mar interior do Japão, na África Ocidental, no Atlântico Nordeste; em países como França, Espanha, Portugal e Inglaterra, além da costa Atlântica Americana, principalmente Brasil, México e Argentina.

Em regiões do México, a pesca é artesanal e realizada por meio de mergulho livre, com compressor de ar, usando o “gancho” ou fisga como arte de pesca. O método mais comum de captura é o chamado “gareteo”, para o qual são usados barcos pequenos (3m), chamados “caches”, equipados com hastes de bambu conhecidas localmente como “jimbas”. O uso de cloro para a captura do polvo, retirando-o de sua toca, é uma prática realizada por alguns pescadores de polvo dessa região; além de causar danos ambientais, por degradar o recife, ela contamina a água e mata os organismos ao redor daquela região, comprometendo a sustentabilidade dessa pescaria.

A pesca de polvos no Brasil teve início na região Sudeste, onde o desembarque comercial desse recurso é realizado atualmente através da pesca com espinhel de potes¹. O mesmo acontece para a região Sul.

Para a região Nordeste do Brasil, três modalidades de pesca são identificadas. A primeira ocorre com a coleta sobre recifes rasos e o mergulho próximo a eles, são para consumo próprio ou complementação de renda, sem o uso de embarcações. A segunda modalidade é a pesca de mergulho de pequena escala, realizada com pequenas embarcações a vela ou motorizadas, em geral de propriedade dos próprios pescadores de polvo; frequentemente são complementares à pesca de lagosta. Já a terceira é a pesca de espinhéis de potes, com embarcações de porte médio, de propriedade de armadores, que acontece, principalmente, na região de Itarema (CE).

O Rio Grande do Norte é o maior estado produtor de polvo do Nordeste. A produção registrada pelo Ibama atingiu o máximo de 460,7 toneladas, em 2006; 75% oriundas do mergulho autônomo e 25%, do livre.

No extremo Sul da Bahia, as atividades pesqueiras ainda são essenciais para a sobrevivência de grande parte da população, estando a captura de polvos – juntamente com a pesca de camarão, lagosta e peixe – entre as atividades pesqueiras de maior destaque.

Pesca do polvo no Sul da Bahia

No extremo Sul da Bahia, o polvo é capturado por duas técnicas principais. O “polvejamento”² por cima do recife, com a utilização do bicheiro (Figura 2), gancho feito com um pedaço de ferro com uma volta na extremidade utilizado para fisgar e remover o animal da toca (Figura 3). Já no mergulho livre (apneia), o “polvejador” geralmente está equipado com máscara de mergulho e nadadeiras, e a captura é realizada em profundidades de até cinco metros. A pesca de mergulho é considerada arriscada, pois, na tentativa de se defender, o polvo capturado pode inserir seus braços nos ouvidos e nariz do pescador. Sob outra perspectiva, os pescadores de polvo argumentam que os animais capturados por meio da pesca subaquática possuem tamanhos e peso superiores quando comparados àqueles capturados sobre o recife, o que torna essa técnica mais rentável.

2. Polvejamento: termo utilizado para identificar a atividade da pesca do polvo. “Polvejador” é o pescador que captura o polvo.



Figura 2. Bicheiro: petrecho de pesca utilizado na captura do polvo. Créditos: Manuella Dultra.



Figura 3. Remoção do polvo com a utilização do bicheiro. Créditos: Manuella Dultra.

Além do mergulho livre e da utilização do bicheiro, são relatadas outras técnicas, como a utilização de alavancas, destruindo a toca do polvo que poderia ser ocupada por outro polvo na maré seguinte, e o uso de produtos químicos, como o cloro. Embora sejam destrutivas, essas capturas não sofrem qualquer tipo de fiscalização.

A área de amostragem, para este capítulo, correspondeu aos ambientes recifais situados entre os municípios de Porto Seguro e de Santa Cruz Cabrália, no Sul do Estado da Bahia, Brasil. Os recifes costeiros localizados nas proximidades de Santa Cruz Cabrália – recifes de Coroa Vermelha e Ponta do Mutá – são os principais sítios de captura por pescadores de polvo cadastrados na Associação Indígena de Coroa Vermelha ou por aqueles pescadores de polvo que moram nas localidades pertencentes ao município de Santa Cruz Cabrália. Em contrapartida, os cadastrados na Colônia de Pescadores Z22, situada em Porto Seguro, e que moram nas proximidades do município, frequentam outros dois importantes sítios de pesca: o recife de Ponta Grande e o Parque Natural Municipal do Recife de Fora, este último situado a cerca de cinco milhas náuticas do município de Porto Seguro (Figura 4).

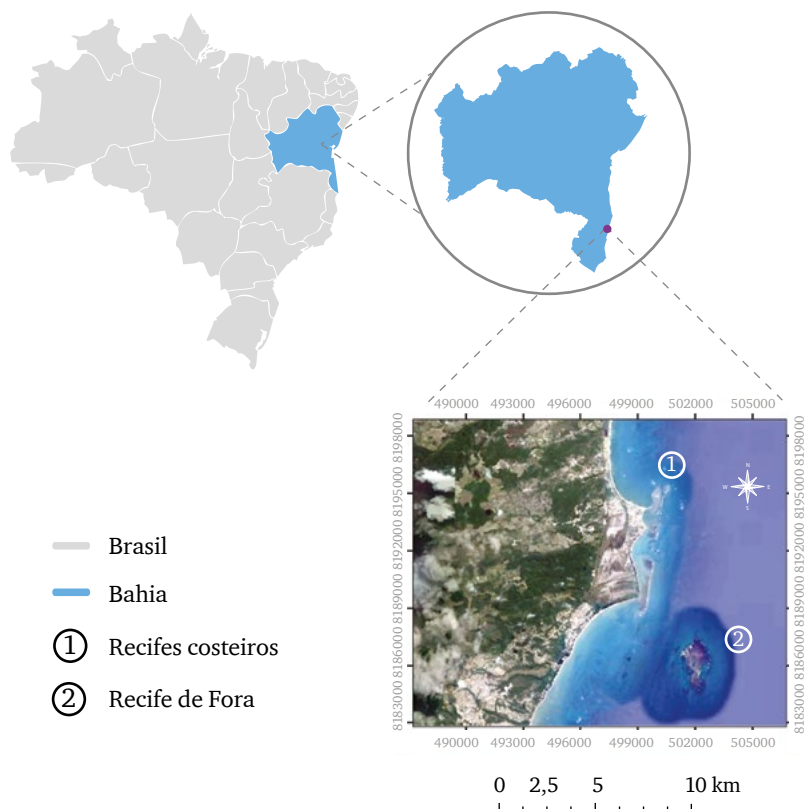


Figura 4. Mapa da região de estudo evidenciando os recifes de coral frequentados pelos pescadores de polvo de Porto Seguro e de Santa Cruz Cabrália, no Sul da Bahia. Fonte: Laboratório de Etnoconservação e Áreas Protegidas – Universidade Estadual de Santa Cruz (BA, Brasil).

Nesses ambientes recifais, os indivíduos são capturados com grande variação de peso e comprimento do manto, como mostra a Figura 5. Os maiores exemplares foram sempre capturados no ambiente recifal mais distante da costa (ponto roxo da Figura 5), e todos os exemplares com tamanho inferior a seu estágio reprodutivo (<8cm de comprimento do manto) foram capturados nos ambientes recifais mais próximos à costa (pontos azuis da Figura 5).

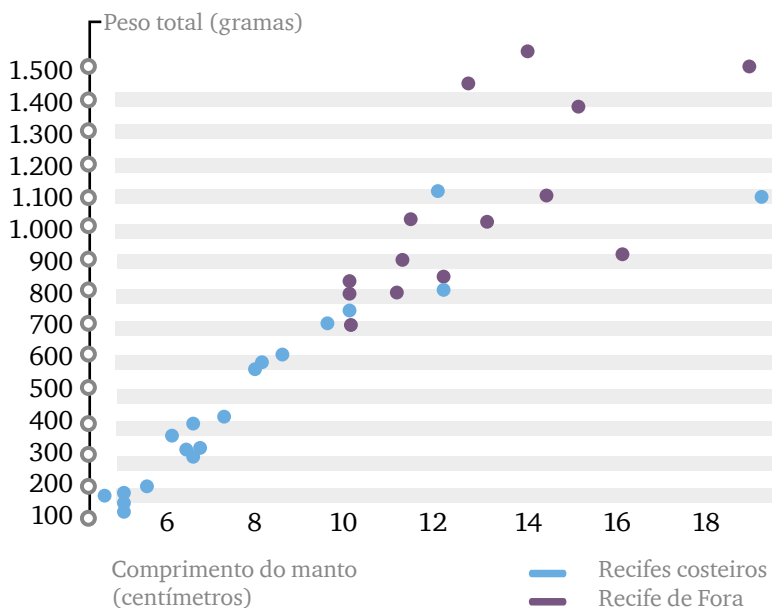


Figura 5. Relação peso-comprimento do manto para indivíduos de polvo capturados em ambientes recifais em Porto Seguro e arredores (BA, Brasil).

Perfil do pescador de polvo no Sul da Bahia

A pesca do polvo na região de Porto Seguro e de Santa Cruz Cabrália só não é a principal fonte de renda dos pescadores de polvo locais devido à redução da quantidade desse tipo de pescado. Para complementarem a renda, eles atuam em outros setores, como o comércio e o turismo. Nesse sentido, a captura do polvo como atividade econômica, para a maioria dos pescadores de polvo da região, está sujeita a variáveis como a rentabilidade da venda/comercialização do mesmo. Entre os conflitos e dificuldades vividos pelos pescadores de polvo estão: a ausência de fiscalização na pesca do polvo, que acaba favorecendo práticas prejudiciais para a manutenção dos estoques naturais, e a comercialização do polvo, que se torna pouco lucrativa progressivamente por conta da diminuição da ocorrência das espécies nas proximidades. O tema será aprofundado a seguir.

3. Coorte: esse termo é utilizado para designar um grupo de indivíduos que têm em comum um conjunto de características, que podem ser observadas durante um período de tempo com o intuito de analisar sua evolução.

Situação dos estoques de polvo nos municípios de Porto Seguro e de Santa Cruz Cabrália – Bahia

Como analisado neste estudo e de acordo com a literatura disponível, os recifes costeiros apresentam um cenário em elevado potencial para que a “tragédia dos comuns” aconteça. Isso porque, quando ocorre uma alta taxa de exploração, os indivíduos de uma população começam a ser capturados quando ainda se encontram na fase de juvenis, o que reduz a sobrevivência da coorte³ para os grupos remanescentes. Quando essa situação persiste por vários anos, atingindo várias classes etárias, o número de indivíduos que vai chegar à classe adulta vai progressivamente diminuindo, de modo que se reduz o número de reprodutores e sua descendência num processo que se autoalimenta até atingir o colapso. Como resultado, no conjunto, todos os pescadores de polvo que usufruem do recurso acabam por conduzir a um resultado social negativo, que pode repercutir de duas formas: a primeira seria o “sobreuso” do recurso, do qual deriva sua exaustão ou degradação; o segundo seria que sua margem de produtividade tenderia para zero.

A ausência de regras de uso, o afluxo de visitantes na região e a facilidade de acesso aos ambientes recifais costeiros fazem com que eles estejam sob constante pressão, o que poderá acarretar em perda da possibilidade de uso do recurso provindo desses ambientes.

Embora o Parque Natural Municipal do Recife de Fora (PNMRF) e os recifes costeiros estejam expostos a vulnerabilidades e potencialidades similares, a localização do PNMRF torna-o menos vulnerável à ação de fatores externos (p.ex.: mudanças no uso do solo na área continental contígua). As ameaças encontradas nele – como pisoteio e aumento da demanda turística – devem ser mais facilmente controladas e minimizadas porque ele tem a obrigação de possuir um plano de manejo, por ser uma unidade de conservação e, assim, apresentar estratégias de uso desse recurso estabelecidas por diferentes atores institucionais.

Sugestões de manejo para áreas de pesca de polvo próximas à costa no Sul da Bahia

A pesca artesanal de *O. insularis* realizada nos ambientes recifais de Porto Seguro e de Santa Cruz Cabrália é feita de forma irrestrita. Nesse sentido, ressalta-se que qualquer atividade exploratória deve respeitar o que se chama de máximo rendimento sustentável. Trata-se da quantidade máxima de pescado, em biomassa, que pode ser explorada em anos sucessivos sem comprometer o estoque da população e, portanto, sem produzir qualquer variação na intensidade da pesca. Essa situação de equilíbrio não foi encontrada na área de estudo, o que constitui um cenário preocupante no que diz respeito à manutenção e sobrevivência da espécie. Dessa forma, percebe-se que a comercialização desses animais pescados na região está reduzindo e, portanto, prejudicando os pequenos estabelecimentos e, principalmente, o consumo de subsistência.

Diante desse quadro, faz-se necessária a busca por um protocolo de pesca sustentável vinculado à cogestão das áreas de pesca do polvo. O sucesso dele dependerá estritamente das atitudes e do envolvimento dos pescadores de polvo, pois está relacionado à forma como as relações humanas desenvolvem-se entre eles, que atuam na mesma área, e também entre cada pescador de polvo e a gestão das áreas marinhas a serem manejadas e/ou protegidas.

Literatura recomendada

HAIMOVICI, M.; LEITE, T.S.; MARINHO, R.A.; BATISTA, B.; MADRID, R.M.; OLIVEIRA, J.E.L.; LIMA, F.D.; CANDICE, L. 2014. As pescarias de polvos do Nordeste do Brasil. p.147-159 in HAIMOVICI, M.; ANDRIGUETTO FILHO, J.M.; SUNYE, P.S. (Orgs) *A pesca marinha e estuarina no Brasil: estudos de caso multidisciplinares*. Editora da FURG. Disponível em: <http://www.observasc.net.br/pesca/A_pesca_marinha_e_estuarina_no_Brasil.pdf>. Acesso em: fevereiro 2016.

JESUS, M.D. 2014. *Pesca Artesanal e Cadeia Produtiva de Octopus insularis em Ambientes Recifais do Extremo Sul da Bahia*. 53p. Dissertação (Mestrado em Sistemas Aquáticos Tropicais/Área da Biodiversidade) – Pós-Graduação em Sistemas Aquáticos Tropicais, Universidade Estadual de Santa Cruz. Ilhéus, BA, Brasil.

HARDIN, G. 1968. The tragedy of the commons. *Science*, 162(3859):1243-1248. Disponível em: <[doi:10.1126/science.162.3859.1243](https://doi.org/10.1126/science.162.3859.1243)>. Acesso em: fevereiro 2016.

LEITE, T.S.; HAIMOVICI, M.; MATHER, J.; OLIVEIRA, J.E.L. 2009. Habitat, distribution, and abundance of the commercial octopus (*Octopus insularis*) in a tropical oceanic island, Brazil: Information for management of an artisanal fishery inside a marine protected area. *Fisheries Research*, 98(1-3):85-91. Disponível em: <[doi:10.1016/j.fishres.2009.04.001](https://doi.org/10.1016/j.fishres.2009.04.001)>. Acesso em: fevereiro 2016.

MARTINS, V.S.; SOUTO, F.J.B.; SCHIAVETTI, A. 2011. Conexões entre pescadores e polvos na comunidade de Coroa Vermelha, Santa Cruz Cabrália, Bahia. *SITIIENTIBUS, Série Ciências Biológicas*, 11(2):121-131. Disponível em: <[doi:10.13102/scb69](https://doi.org/10.13102/scb69)>. Acesso em: fevereiro 2016.

VASKE JÚNIOR, T. 2011. Lulas e polvos da costa brasileira. *Coleção Habitat*, v.5. Fortaleza: UFC / LABOMAR / NAVE. 184p.

Os peixes recifais e o turismo

Yuri Cruz de Paula, Emiliano Nicolas Calderon, Alexandre Schiavetti

Os ambientes recifais ocupam um lugar de destaque entre os ecossistemas de maior riqueza e abundância de espécies marinhas. Dentre os organismos que habitam os recifes de coral, os peixes estão entre os mais abundantes e característicos desses ambientes, representando grande parte da diversidade e biomassa nos recifes mais bem conservados. As espécies existentes neles apresentam uma grande diversidade de comportamentos, formas e cores que integram a beleza cênica desses ecossistemas.

É de conhecimento geral que os peixes, em sua maioria, possuem o corpo coberto por escamas, apresentam nadadeiras e formato corporal fusiforme, que facilitam sua locomoção na água, e respiram o gás oxigênio dissolvido na água através de brânquias. Esses organismos podem ser divididos em dois grupos: os peixes ósseos (Figura 1), que correspondem a mais de 22 mil espécies; e os peixes cartilagosos (Figura 2), com cerca de mil espécies. Essa classificação é baseada na estrutura esquelética desses organismos. Espécies como os badejos (Família Epinephelidae) e os vermelhos (Família Lutjanidae) – comuns nos pratos oferecidos em restaurantes do litoral brasileiro – apresentam esqueleto ósseo calcário, aquilo que chamamos popularmente de “espinhas”, por isso, são denominados peixes ósseos. Já os tubarões e raias apresentam um esqueleto mais leve e flexível constituído de cartilagem, semelhante a que forma orelhas e nariz humanos, por isso, são chamados de peixes cartilagosos.



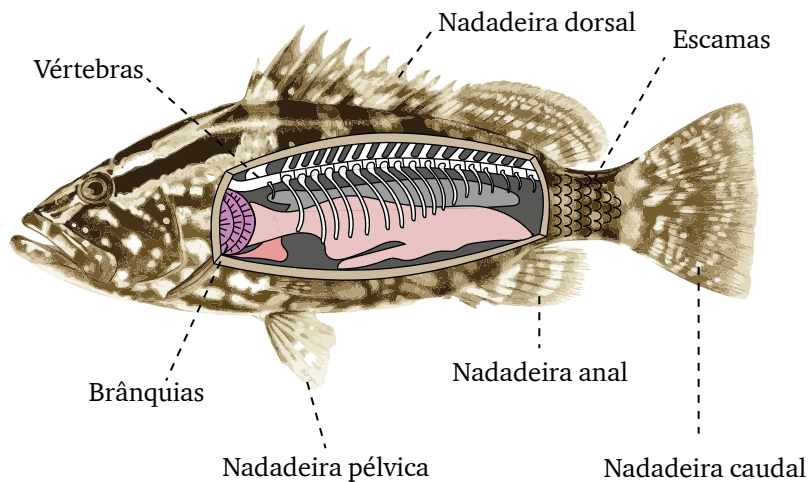


Figura 1. Esquema da morfologia de um peixe ósseo.

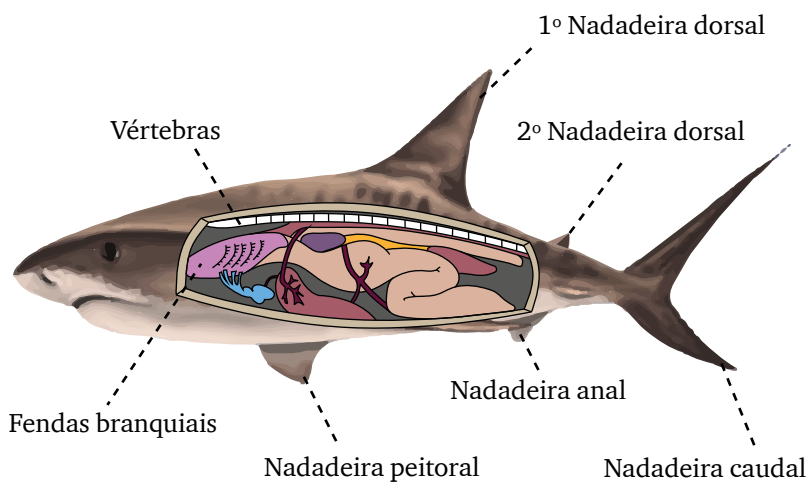


Figura 2. Esquema da morfologia de um peixe cartilaginoso.

No Brasil, os peixes recifais correspondem a cerca de 400 espécies, o que equivale a um quarto do total de espécies de peixes marinhos identificados até o momento. Esses animais são elementos-chave para o equilíbrio dos ecossistemas recifais. Nos recifes, os peixes exercem diversas funções ecológicas, compondo diferentes níveis tróficos¹ dentro da cadeia alimentar recifal. Algumas espécies se alimentam do plâncton, composto por microalgas e animais microscópicos que constituem a base da cadeia alimentar no ambiente aquático. Outras espécies, como os budiões (Família Labridae) e os peixes-cirurgiões (Família Acanthuridae) se alimentam de macroalgas, tendo um papel fundamental na manutenção do equilíbrio das relações entre algas e corais². Também encontramos nos ambientes coralíneos peixes carnívoros, como os meros (Família Epinephelidae), as barracudas (Família Sphyraenidae) e os tubarões, que ocupam o topo dessa cadeia alimentar.

Os peixes recifais podem ser encontrados em diversas partes do mundo, principalmente nas águas quentes e rasas das regiões tropicais. A Grande Barreira de Corais da Austrália, que é a maior formação recifal do mundo, assim como os recifes do Caribe e da Indonésia, abriga uma grande diversidade de espécies desses peixes. Comparado a esses locais, o Brasil apresenta uma diversidade menor de peixes recifais. Nas águas brasileiras, podemos encontrar peixes em recifes costeiros, que se distribuem do Maranhão até Santa Catarina, e também em ilhas oceânicas, como Fernando de Noronha (PE), Atol das Rocas (RN) e Abrolhos (BA).

Uma característica marcante dos peixes recifais é o elevado número de espécies endêmicas, ou seja, espécies que são encontradas exclusivamente em determinadas regiões. No Brasil, até o momento, foram identificadas 50 espécies endêmicas, entre as quais está o *Gramma brasiliensis* (Figura 3). Esse pequeno peixe se alimenta do plâncton e apresenta um comportamento interessante: é encontrado de cabeça para baixo no teto de buracos que ele usa como abrigo nos recifes, assim como ficam os morcegos nas cavernas. Outra espécie endêmica é o budião-azul (*Scarus trispinosus*), um dos maiores e mais belos herbívoros dos recifes brasileiros, que, pelo apreciado sabor de sua carne, é alvo constante da pesca³.

1. Níveis tróficos: são os níveis de organização hierárquica das teias tróficas em categorias de acordo com os hábitos alimentares e sua organização na cadeia alimentar.

2. Ver ABRANTES et al. (2016), capítulo 14 deste volume.

3. Ver BENDER et al. (2016), capítulo 15 deste volume.

4. Especiação: é o processo evolutivo que envolve o surgimento de novas espécies.



Figura 3. *Gramma brasiliensis* registrado no Parque Municipal Marinho do Recife de Fora, Porto Seguro (BA). Créditos: Clovis Castro.

Mas como surge o endemismo em peixes recifais se esses ecossistemas estão conectados pela água do mar? O primeiro fator a ser levado em conta é a capacidade de dispersão das espécies. Existem peixes, como os tubarões, que nadam livremente pelo oceano aberto e, por isso, podem apresentar uma ampla distribuição geográfica. Já outras espécies, como os peixes-donzela (gênero *Stegastes*), que dependem dos recifes para obter alimento e abrigo, deslocam-se pouco e acabam apresentando uma distribuição restrita. Outro fator importante para o surgimento de endemismos em ambientes recifais é a história dos eventos tectônicos, climáticos e oceanográficos, que ao longo das eras geológicas podem ter promovido especiações⁴ nesses locais.

Apesar do nome, os peixes recifais não habitam apenas os recifes. Algumas espécies, como o dentão (*Lutjanus jocu*), em seus primeiros estágios de vida são encontradas em verdadeiros berçários da vida marinha: os manguezais. Localizados em estuários, os manguezais estão nas proximidades do encontro entre os rios e o mar e abrigam entre as raízes e os rizomas submersos de suas árvores uma grande quantidade de peixes juvenis. Esses jovens

organismos, quando atingem um tamanho maior, migram para os recifes, onde continuam seu ciclo de vida. Os bancos de gramas marinhas podem estabelecer a conectividade entre os manguezais e os recifes⁵, formando um mosaico ecossistêmico fundamental para a sobrevivência dessas espécies.

Ameaças aos peixes recifais

Os peixes recifais têm sofrido uma série de ameaças, tanto de ordem natural, como antrópica. Fenômenos naturais, como furacões e maremotos, podem causar desequilíbrios ambientais nos recifes de coral pela destruição da estrutura física dos recifes e pela morte dos organismos associados⁶. Entretanto, são as atividades humanas que mais causam impactos negativos e podem afetar a vida dos peixes recifais. A partir da Revolução Industrial, a queima de carvão e, mais recentemente, de combustíveis fósseis, provocou o aumento da emissão de gases intensificadores do efeito estufa, como o gás carbônico e o monóxido de carbono. Esse aumento pode provocar mudanças nas temperaturas atmosféricas e, conseqüentemente, o aumento da temperatura nas águas superficiais dos mares. Essa alteração impacta nos recifes rasos e provoca eventos de branqueamento dos corais⁷. O branqueamento pode levar os corais à morte, comprometendo a estrutura física dos recifes e reduzindo a disponibilidade de abrigo e alimento para os peixes e demais organismos recifais.

O aumento das emissões de gás carbônico também provoca outro sério problema conhecido como acidificação dos oceanos. O excesso de gás carbônico atmosférico, quando entra em contato com a água do mar, é transformado em ácido carbônico. O ambiente mais ácido pode provocar alterações na visão, no olfato e na audição dos peixes, dificultando o reconhecimento entre indivíduos da mesma espécie, a detecção de um possível predador e a orientação espacial deles.

5. Ver PELUSO, ZILBERBERG (2016), capítulo 10 deste volume.

6. Ver ABRANTES et al. (2016) e BENDER et al. (2016), capítulos 14 e 15 deste volume, respectivamente.

7. Ver MARANGONI et al. (2016), capítulo 4 deste volume.

8. CRAIG, M.T. 2011. *Epinephelus itajara*. *The IUCN Red List of Threatened Species* 2011.

9. FLOETER, S.R.; HALPERN, B.S.; FERREIRA, C.E.L. 2006. *Biological Conservation*, 128(3):391-402.

A pesca é outra forte ameaça aos peixes recifais³. Em diversas regiões do mundo, a pesca predatória em ambientes recifais tem reduzido populações de diferentes espécies de peixes. No Brasil, por exemplo, a pesca predatória reduziu drasticamente as populações do mero-canapu (*Epinephelus itajara*), um dos maiores e mais dóceis peixes que vivem nos ambientes recifais. Ele faz parte da Lista Nacional das Espécies da Fauna Brasileira Ameaçadas de Extinção e, atualmente, está classificado como espécie em perigo crítico⁸. Em casos mais extremos, a pesca pode provocar a extinção de espécies. Foi o que aconteceu na região de Arraial do Cabo (RJ), onde o budião-azul foi extinto localmente⁹ devido à pesca predatória realizada com arpão. Além disso, a pesca seletiva dos peixes maiores tem provocado, ao longo do tempo, uma redução no tamanho corporal dos peixes. Muitas vezes, apenas os peixes menores escapam dos pescadores e, por isso, conseguem se reproduzir e passar suas características genéticas adiante. Com isso, a pesca está alterando a estrutura genética das populações de diferentes espécies de peixes.

Outro importante fator de impacto sobre os peixes recifais é o despejo inadequado de esgoto doméstico e industrial através de emissários nas zonas costeiras, que levam aos recifes uma série de poluentes, como os metais pesados. Em altas concentrações, os metais pesados, como o chumbo e o mercúrio, são nocivos à saúde. Tais elementos podem ser absorvidos pelos organismos que estão na base da cadeia alimentar e consumidos pelos peixes nos demais níveis tróficos. Esse evento é conhecido como magnificação trófica e é caracterizado pelo aumento da concentração desses metais nos tecidos desses organismos ao longo da cadeia alimentar. O esgoto doméstico também leva aos recifes bactérias que vivem no intestino humano e são eliminadas com as fezes, podendo causar doenças em componentes da fauna recifal.

Implicações do turismo para a conservação dos peixes recifais

10. GIGLIO, V.J.; LUIZ, O.J.; SCHIAVETTI, A. 2015. *Tourism Management*, 51:49-57.

Nas últimas décadas, foi registrado um aumento das atividades turísticas realizadas em ambientes recifais em todo o mundo. Os turistas buscam nesses locais um contato mais próximo com a exuberante vida marinha. Os peixes estão entre os organismos mais procurados¹⁰, seja pelo excitante encontro com os tubarões, seja pela contemplação das cores vivas dos pequenos peixes. No extenso cardápio de atividades, o turista pode optar por fazer um passeio sobre os recifes a bordo de barcos com fundo de acrílico, que permite uma visão panorâmica da paisagem subaquática. O turista pode escolher também alugar nadadeiras, máscara e snorkel e flutuar nas águas tranquilas e cristalinas das piscinas naturais formadas nos recifes. A alimentação recreativa de peixes é outro forte atrativo. O fornecimento de alimento pelo turista atrai um maior número de peixes, que se aproximam, podendo ser vistos de mais perto e, até mesmo, acariciados. Caso o turista queira conhecer os recifes mais a fundo, pode também fazer um mergulho autônomo e percorrer trilhas subaquáticas, acompanhado por instrutores de mergulho.

O turismo em recifes é uma importante atividade econômica, promove o desenvolvimento das regiões onde ocorre. Antes de chegar ao recife, o turista pode ter comprado passagens aéreas, pacotes de estada em hotéis, passeios em operadoras de turismo e pode ter almoçado em restaurantes na beira da praia, movimentando a economia local. Além disso, quando o turismo é realizado legalmente dentro de áreas marinhas protegidas, o valor pago pelos turistas nos ingressos para a entrada nas áreas de visitaç o pode ser revertido para atividades que garantam a conserva o dos recifes e a sustentabilidade dessas unidades de conserva o.

Embora os aspectos positivos do turismo em ambientes recifais sejam visíveis, essa atividade pode gerar uma série de impactos negativos nesses ecossistemas. Os impactos das atividades turísticas podem atingir diretamente os peixes, causando alterações no comportamento, na saúde, na fisiologia e na estrutura das comunidades. Porém, os impactos também podem ocorrer de forma indireta, como os distúrbios que atingem a estrutura física dos recifes, reduzindo a disponibilidade de abrigo e alimento para os peixes recifais.

Atualmente, uma das principais fontes de distúrbio do turismo é a alimentação recreativa dos peixes (Figura 4). Essa atividade é estimulada pelas operadoras de turismo com o objetivo de atrair o público com a possibilidade de um contato maior com diferentes espécies. O turista pode alimentar desde os pequenos peixes até os grandes tubarões. Durante a alimentação, podem ser oferecidos camarões, peixes, pão, biscoito, rações para cães e peixes e, em alguns casos, até restos de comida.



Figura 4. Alimentação recreativa e uma aglomeração de sargentinhos.
Créditos: Banco de imagens Projeto Coral Vivo.

11. PEREIRA, P.H.C.; MORAES, R.L.; DOS SANTOS, M.V.B.; LIPPI, D.L.; FEITOSA, J.L.L.; PEDROSA, M. 2014. *Ichthyological Research*, 61(4):375-384.
12. ILARRI, M.I.; SOUZA, A.T.; MEDEIROS, P.R.; GREMPEL, R.G.; ROSA, I.L. 2008. *Neotropical Ichthyology*, 6(4):651-656.
13. HAMMERSCHLAG, N.; GALLAGHER, A.J.; WESTER, J.; LUO, J.; AULT, J.S. 2012. *Functional Ecology*, 26(3):567-576.
14. BRUNNSCHWEILER, J.M.; ABRANTES, K.G.; BARNETT, A. 2014. *PLoS ONE*, 9(1).
15. CORCORAN, M.J.; WETHERBEE, B.M.; SHIVJI, M.S.; POTENSKI, M.D.; CHAPMAN, D.D.; HARVEY GM 2013. *PLoS ONE*, 8(3): e59235.

A alimentação recreativa dos peixes pode provocar alterações no comportamento das espécies que consomem o alimento oferecido e, indiretamente, afetar outras espécies. Uma das principais alterações comportamentais é o condicionamento dos peixes à oferta de comida por humanos¹¹. Nesse caso, os peixes podem deixar de consumir seus alimentos naturais, ficando dependentes dos alimentos artificiais. Caso a alimentação recreativa seja interrompida, muitos peixes podem morrer, até que a população estabeleça seu equilíbrio. Outra consequência desse condicionamento é que os peixes ficam habituados à presença humana¹² e se aproximam muito das pessoas, o que aumenta o risco de captura desses organismos. Nos recifes do Nordeste do Brasil, peixes acostumados com a alimentação recreativa associam a presença humana à oferta de alimento e seguem os turistas mesmo que eles não lhes ofereçam comida.

Grandes aglomerações de peixes recifais podem ser formadas durante a alimentação recreativa, o que promove uma competição intensa pelo alimento entre indivíduos da mesma espécie e de espécies diferentes. Isso promove o aumento da agressividade nos peixes¹³, que resulta em ferimentos provocados por mordidas, exclusão das espécies menos agressivas das áreas de alimentação e aumento de ataques aos humanos. Existem muitos registros de turistas sendo mordidos por peixes enquanto os alimentam com as próprias mãos.

A alimentação recreativa em áreas específicas dos recifes pode alterar os padrões de distribuição dos peixes, devido às migrações de algumas espécies para as áreas de alimentação. Além disso, peixes como os tubarões-de-cabeça-chata (*Carcharhinus leucas*) dos recifes de Fiji¹⁴, no Oceano Pacífico, costumam explorar grandes áreas em busca de alimento e passaram a ter uma distribuição mais restrita. Outras espécies podem até inverter seus padrões de comportamento noturno, como ocorreu com a raia-prego (*Dasyatis americana*) das Ilhas Cayman¹⁵, nos recifes do Caribe, visto que as atividades turísticas acontecem durante o dia.

Alguns impactos indiretos da alimentação recreativa podem atingir outras espécies de peixes recifais. No Brasil, é comum encontrar grandes aglomerações de sargentinhos (*Abudefduf saxatilis*) nas áreas de alimentação de recifes costeiros. No Parque Natural Municipal do Recife de Fora, em Porto Seguro (BA), o comportamento agressivo do sargentinho parece afetar a distribuição de outras espécies, como as cocorocas (*Haemulon aurolineatum*), que não se aproximam durante o fornecimento de alimento, pelo menos até que a aglomeração de sargentinhos seja desfeita. Nessa mesma área, alguns sargentinhos, durante a alimentação recreativa, aproveitam para “furar” as fazendas de algas cultivadas por donzelinhas (*Stegastes fuscus*). As donzelinhas, na tentativa de expulsar o grande número de peixes que entram em seus territórios atraídos pelo alimento artificial, deixam suas fazendas expostas, o que facilita a ação dos sargentinhos. Aparentemente, as aglomerações de peixes promovidas pela alimentação recreativa induzem a um aumento do comportamento de defesa do território e a uma diminuição da taxa de alimentação das donzelinhas.

A alimentação recreativa também gera impactos negativos na estrutura das comunidades de peixes. O fornecimento de alimentos suplementares favorece o aumento das populações que os consomem. Sabe-se que a alimentação suplementar aumenta a taxa de sobrevivência e de reprodução desses organismos. No Brasil, a alimentação recreativa favoreceu o aumento das populações de sargentinhos nos recifes de Picãozinho¹⁶ (PB), Maragogi¹⁷ (AL) e Recife de Fora (BA). Nesses locais, os sargentinhos dominam a comunidade de peixes – o que não é a condição natural dessas comunidades. Essa alteração, em longo prazo, pode provocar mudanças nas relações ecológicas e na cadeia alimentar desses ecossistemas. O colapso desses ambientes recifais pode gerar prejuízos econômicos e sociais às populações humanas que dependem dos recursos fornecidos pelos recifes.

16. MEDEIROS, P.R.; GREMPEL, R.G.; SOUZA, A.T.; ILARRI, M.I.; SAMPAIO, C.L.S. 2007. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 2(3):288-300.

17. FEITOSA, C.V.; CHAVES, L.D.C.T.; FERREIRA, B.P.; DE ARAUJO, M.E. 2012. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 92(07):1525-1533.

18. Pesca-fantasma: capturas de organismos marinhos provocadas por aparelhos ou artes de pesca perdidos ou abandonados no mar. Por exemplo, os animais podem se prender acidentalmente em redes, não conseguindo se livrar e acabar morrendo de fome ou asfixiamento.

19. KININMONTH, S.; LEMM, S.; MALONE, C.; HATLEY, T. 2014. *Ocean & Coastal Management*, 100:20-31.

20. SANTOS, G.S.; BURGOS, D.C.; LIRA, S.M.; SCHWAMBORN, R. 2015. *Environmental Management*, 56:847-858.

21. HEIN, M.Y.; LAMB, J.B.; SCOTT, C.; WILLIS, B.L. 2015. *Marine Environmental Research*, 103:56-65.

Existem outras fontes de impacto do turismo que podem atingir os peixes recifais. Nos recifes, a presença de um grande número de turistas se movimentando na água pode revolver o sedimento do fundo, aumentando a turbidez da água. Esse sedimento em suspensão na água pode dificultar a orientação espacial de peixes jovens, o que os torna mais susceptíveis à ação de predadores, visto que os peixes possuem uma orientação visual.

Outro fator preocupante é o lixo plástico lançado no mar por turistas, e que pode prejudicar os peixes recifais, além de tartarugas, golfinhos e aves marinhas. Os plásticos podem matar os animais marinhos pela ingestão e pelo aprisionamento. As sacolas plásticas, devido ao aspecto mole e transparente, são facilmente confundidas com águas-vivas, e podem matar os peixes asfixiados ao tentarem se alimentar. Outros materiais plásticos podem aprisionar os peixes, o que caracteriza um tipo de pesca fantasma¹⁸. Os peixes aprisionados não conseguem obter alimento e morrem de fome.

Além disso, impactos gerados pela atividade turística que afetam os corais e a estrutura recifal também atingem indiretamente os peixes recifais. Entre eles estão os danos causados pela ancoragem dos barcos¹⁹ que levam os turistas, o pisoteio dos corais²⁰ ao caminharem sobre os recifes e as atividades de mergulho livre e autônomo²¹, que podem quebrar os corais acidentalmente. O lançamento de âncoras sobre os recifes, a caminhada e o contato das nadadeiras dos mergulhadores podem quebrar colônias que servem de abrigo e alimento para os peixes.

O que fazer para conservar?

A conservação dos peixes recifais, assim como dos demais componentes do ambiente recifal, está associada às políticas de manejo e de conservação desses ambientes, de forma a controlar e/ou limitar a interferência humana, mantendo graus mínimos de interferência, que permitam a manutenção das populações e a estrutura das comunidades. Isso inclui medidas de controle sobre a pesca, sobre a interferência humana em atividades como o turismo e sobre a manutenção dos habitats desses organismos. Sobre a atividade turística, pode-se definir, de forma geral, condutas a serem estimuladas e condutas a serem desencorajadas para a manutenção do equilíbrio das comunidades de peixes recifais.

Para conservar os peixes e o ambiente recifal, o turista não deve: caminhar sobre o recife nem tocar nos corais, evitando possíveis danos a eles e acidentes com as substâncias urticantes que eles liberam; usar nadadeiras que podem quebrar corais e suspender sedimentos; alimentar os peixes, para não prejudicar o comportamento e a saúde desses organismos; coletar fragmentos de conchas, corais e outras carapaças que servem de abrigo para peixes; jogar lixo na água do mar.

Quando decidir visitar algum recife, o turista deve: procurar se informar sobre as normas que regulamentam a atividade turística na área e sobre a biodiversidade daquele local e se sensibilizar sobre a importância ecológica desses ecossistemas; procurar observar os comportamentos naturais dos peixes; ao mergulhar, evitar movimentos bruscos, para não afugentar os animais; fundear a embarcação na areia; levar todo o lixo que produziu de volta ao continente e levar de recordação somente registros de fotos e vídeos dessa experiência única.

Literatura recomendada

BELLWOOD, D.R.; HUGHES, T.P.; FOLKE, C.; NYSTRÖM, M. 2004. Confronting the coral reef crisis. *Nature*, 429(6994):827-833.

GIGLIO, V.J.; LUIZ, O.J.; SCHIAVETTI, A. 2015. Recreational diver behavior and contacts with benthic Organisms in the Abrolhos National Marine Park, Brazil. *Environmental Management*, 57:637-648.

GUIMARÃES, R.Z.P.; GASPARINI, J.L.; ROCHA, L.A.; FERREIRA, C.E.L.; FLOETER, S.R.; RANGEL, C.A.; NUNAN, G.W. 2001. Peixes recifais brasileiros: riqueza desconhecida e ameaçada. *Ciência Hoje*, 28(168):16-23.

ORAMS, M.B. 2002. Feeding wildlife as a tourism attraction: a review of issues and impacts. *Tourism Management*, 23(3):281-293.

SAMPAIO, C.L.S.; NOTTINGHAM, M.C. 2008. *Guia para Identificação de Peixes Ornamentais*. v.I: espécies marinhas. Brasília: Ibama. 205p.

Produtos naturais provenientes de recifes de coral

Simoni Campos Dias, Loiane Alves de Lima.

Bioprospeção: a busca por novas moléculas e os oceanos como uma fonte inesgotável

A biodiversidade brasileira tem sido mundialmente conhecida por sua amplitude e variabilidade. Estudos estimam que existam dois milhões de espécies, incluindo plantas, animais e microrganismos, distribuídas por uma grande variedade de biomas. Dentre essas espécies, aproximadamente 60.000 são representadas pelas plantas, o que corresponde a 20% de toda a biodiversidade do planeta. Mares e oceanos ocupam mais de 2/3 da superfície da Terra, e nesses ecossistemas estão quase todos os grupos de organismos vivos, incluindo representantes de 34 dentre os 36 filos descritos. O ecossistema marinho abriga ampla biodiversidade, sendo uma das bases das atividades econômicas da sociedade, servindo como incomensurável potencial para a variabilidade biológica e química.

Os recifes de coral, por exemplo, são essenciais para a saúde dos oceanos e a economia de muitos países. Eles abrigam uma fauna associada riquíssima, que inclui desde bactérias até peixes, sendo esses organismos fontes de novas drogas para a indústria farmacêutica. Vários desses organismos relacionados aos corais dependem fundamentalmente da saúde deles para a sobrevivência. Nos últimos 10 anos, o número crescente de estudos sobre a variabilidade dos microrganismos em corais mostrou que eles desempenham um papel-chave na construção dos recifes, e diversas interações entre os seres que habitam esse ambiente têm sido amplamente difundidas nesse ecossistema.

Por décadas, o ambiente terrestre foi o centro de estudos e pesquisas da indústria farmacêutica, e os habitats marinhos se mantiveram conservados sem a exploração para a produção de produtos farmacológicos. Entretanto, nas últimas décadas, o estudo e a pesquisa foram estendidos



do ambiente terrestre para o ambiente oceânico, a fim de se descobrir novas moléculas candidatas à produção de fármacos. Além disso, quando são analisados os produtos descritos no Dicionário de Produtos Naturais Marinhos, 71% são originários dos próprios animais. Outra vantagem é que os produtos originados dos organismos marinhos mostram maior bioatividade em comparação com os produtos isolados de organismos terrestres. Por exemplo, dos materiais com atividade para combater vários tipos de câncer depositados no Instituto Nacional do Câncer, 1% das amostras testadas foi efetiva, sendo que dos produtos isolados de animais terrestre, somente 0,1% mostrou atividade contra células cancerosas.

Durante a evolução, macro e microrganismos marinhos adquiriram a capacidade de produzir moléculas com atividade biológica única. Esses compostos têm encontrado uma ampla gama de aplicações, como antibacteriana, antifúngica, antimalárica, antiprotozoários e antiviral, bem como ativos em doenças relacionadas com problemas cardiovasculares e imunitários. Também já foram descritas enzimas e moléculas citotóxicas contra células cancerosas.

Uma das explicações para justificar porque esses microrganismos podem produzir tais moléculas pode estar associada ao fato de que no ambiente marinho eles são expostos a condições ambientais extremas, como baixa temperatura, alta salinidade, e altas pressões, tendo, por isso, desenvolvido moléculas para sobreviver e proliferar durante a evolução. Assim, por exemplo, essas condições podem refletir na produção de enzimas que potencialmente podem conferir propriedades únicas. Essas enzimas já estão sendo usadas em muitas aplicações biotecnológicas, oferecendo benefícios econômicos e energéticos. Algumas delas possuem propriedades de minimizar reações químicas que podem ocorrer a temperaturas mais elevadas. Essas propriedades são de particular relevância para a indústria alimentar, por exemplo, para evitar a deterioração e a alteração do valor nutricional e do sabor dos substratos e produtos originais sensíveis ao calor.

Em 1951, um dos primeiros relatos na literatura com produtos naturais químicos marinhos foi feito a partir do isolamento de duas moléculas: esponouridina e espongotimidina, tendo

como base a esponja *Cryptotethya crypta*. Até meados de 2008, a maioria dos novos compostos isolados a partir de organismos marinhos foi proveniente de invertebrados, sendo que 75% dos compostos foram isolados a partir de animais pertencentes aos filos Porifera (principalmente esponja) e Cnidaria (a maior parte de corais).

Por que buscar produtos naturais em corais?

Dentre tantos ambientes, ecossistemas e biomas em que se pode encontrar diferentes produtos naturais, eis que surge uma pergunta: “Por que buscar produtos naturais em corais?” Para respondê-la, há que se ter em mente que o ambiente marinho, com seus mares e oceanos, é o lar de uma ampla biodiversidade, que inclui desde organismos microscópicos até grandes mamíferos. É nesse rico ambiente que se destacam os recifes de coral. Mas o que são os recifes de coral?

Os corais são invertebrados marinhos que se encontram espalhados pelos oceanos de todo o mundo, podendo ser solitários ou coloniais. Os corais coloniais são os principais responsáveis pela formação de recifes. Esses recifes foram formados ao longo de milhões de anos, a partir da deposição do carbonato de cálcio proveniente dos esqueletos dos corais¹. A Grande Barreira de Corais, na Austrália, Oceano Pacífico, é a maior estrutura composta unicamente por organismos vivos. Os recifes abrigam, protegem e oferecem uma extensa fonte de alimentação para pequenos e grandes animais. A microbiota, ou seja, microrganismos invisíveis a olho nu, que vive em recifes de coral, também ajuda na construção dos recifes, formando a fauna bentônica, e possui um papel essencial para a saúde e o bem-estar dos oceanos.²

1. Ver SEOANE, BARBOSA (2016), capítulo 2 deste volume.

2. Para entender melhor o funcionamento do ecossistema recifal e a fisiologia dos corais, ver MACHADO et al. (2016) e MARANGONI et al. (2016), capítulos 3 e 4 deste volume, respectivamente.



3. NGUYEN, L.T.; HANEY, E.F.; VOGEL, H.J. 2011. *Trends Biotechnol*, 29:464-72.

4. BROGDEN, N.K.; BROGDEN, K.A. 2011. *International Journal Antimicrobial Agents*, 38:217-25

Os peptídeos antimicrobianos: quem são e o que fazem?

De todas as moléculas produzidas por animais marinhos, uma chama a atenção pelas características especiais que possui: são os chamados peptídeos antimicrobianos (PAMs). Essa classe de pequenas moléculas protéicas é produzida em resposta rápida e imediata aos microrganismos invasores. Pertence a um grupo diverso e abundante de moléculas produzidas por diversas células, tanto em plantas quanto em animais e microrganismos, podendo ter várias formas e modos de ação, dependendo de sua composição química.

Essas moléculas interagem com as membranas que envolvem os microrganismos e podem penetrar neles liberando as estruturas da célula e causando a morte do patógeno. Também é sabido que alguns peptídeos em especial podem interagir com o DNA ou impedir a produção de proteínas ou as atividades das enzimas do microrganismo, até impedindo a formação de componentes celulares³.

Por terem características especiais, como a produção por todos os seres vivos, e por terem atividade antimicrobiana em diversos microrganismos, os PAMs se destacaram como prováveis substitutos para os antibióticos utilizados na atualidade. Esses peptídeos podem ser extraídos de esponjas marinhas, anelídeos, moluscos, quelicerados, crustáceos e tunicados, e atuam contra diferentes microrganismos, além de desempenharem papel antitumoral, anticoagulante e inseticida, entre outros⁴.

A busca de peptídeos no ambiente marinho

Nos últimos anos, buscando novas alternativas para a redução do número de microrganismos patogênicos aos seres humanos e também aos animais e plantas, uma variedade de PAMs provenientes de invertebrados terrestres e marinhos foi e ainda está sendo descrita e caracterizada (Tabela 1)⁵.

Os primeiros PAMs isolados de animais marinhos foram as Strongylocinas. Elas foram isoladas de células do ouriço verde (*Strongylocentrotus droebachiensis*), que habita as águas geladas do Hemisfério Norte. No filo Arthropoda, peptídeos conhecidos como Taquilepsinas I foram isolados do caranguejo-ferradura japonês, *Tachypleus tridentatus*, e mostraram inibição do crescimento de bactérias causadoras de infecções do trato intestinal, como *Salmonella*, *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*, também causadoras de infecções hospitalares. Esses peptídeos também demonstraram ação na inibição do crescimento de fungos, como *Candida* e *Cryptococcus neoformans*, que afetam pessoas debilitadas.

Um peptídeo bastante estudado, chamado Clavanina, foi isolado de células do tunicado *Styela clava*. No caso desse peptídeo, já se sabe que ele atua nas membranas que envolvem várias espécies de bactérias, produzindo poros e matando as células bacterianas. Na hidra, espécie de cnidário, também foram isolados diversos PAMs, sendo o mais conhecido o Hidramacina I. A presença de PAMs nesse animal era esperada nas camadas de células que envolvem seu corpo, protegendo-o e impedindo a entrada de agentes infecciosos no organismo no ambiente hostil onde vivem. Outro PAM isolado da hidra verde, *Chlorohydra viridissima*, denominado Hidralisin, demonstrou atividade contra um grande número de patógenos humanos, incluindo *E. coli*, *Klebsiella oxytoca* e *K. pneumoniae*, que são resistentes a antibióticos convencionais. Também na mesogléia do cnidário *Aurelia aurita*, comumente chamado de medusa-da-lua, ou simplesmente água-viva, foi encontrado um PAM denominado Aurelina. Esse peptídeo exibiu atividade contra a bactéria Gram-negativa, *E. coli*, e contra a bactéria Gram-positiva, *Listeria monocytogenes*.

5. LIMA, A.L. 2012. *Prospecção e purificação de peptídeos com atividade antimicrobiana a partir de corais da costa brasileira*. 127p. Dissertação (Mestrado em Ciências Genômicas e Biotecnologia) - Pós-Graduação em Ciências Genômicas e Biotecnologia, Universidade Católica de Brasília. Brasília, DF, Brasil.

Tabela 1. Alguns peptídeos antimicrobianos isolados de invertebrados marinhos e suas respectivas atividades.

Peptídeos antimicrobianos	Invertebrado isolado	Atividades
Aurelina	Mesogléia da água-viva (<i>Aurelia aurita</i>)	<i>E. coli</i> e <i>L.monocytogenes</i>
Defensinas	Molusco (<i>Mytilus edulis</i> e <i>Mytilus galloprovincialis</i>) e escorpiões (<i>Leiurus quiquestriatus</i> e <i>Androctonus australis</i>)	Gram-positiva, Gram-negativa e vírus
Cg-Def	Molusco <i>Crassostrea gigas</i>	Antibacteriana: Gram-positiva e negativa, antifúngica
Hidramacina 1	Hidra	<i>E. coli</i> , <i>K. oxytoca</i> e <i>K. pneumoniae</i>
Strongylocinas 1 e 2	Colemócitos de ouriços (<i>Strongylocentrotus droebachiensis</i>)	<i>C. glutamicum</i> , <i>S. aureus</i> , <i>Listonella (Vibrio) anguillarum</i> e <i>E. coli</i>
Clavaninas	Hemócitos do tunicado (<i>Styela clava</i>)	Clavanina A: <i>S. aureus</i> , bactérias Gram-negativas e fungos
Mitilina A	Mexilhão (<i>Mytilus edulis</i>)	Espécies de <i>Vibrio</i> , leveduras e fungos
Bactenecina	Hemócitos do caranguejo (<i>Carcinus maenas</i>)	<i>Micrococcus luteus</i> e <i>Psychrobacter immobilis</i>
Taquilepsina I	Hemócitos do caranguejo ferradura (<i>Tachypleus tridentatus</i>)	<i>Salmonella</i> , <i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> , <i>C.albicans</i> e <i>C. neoformans</i>
Peneidina 1, 2, 3 e 4	Plasma e hemócitos do camarão (<i>Litopenaeus vannamei</i> e <i>L. setiferus</i>)	Antibacteriana
FCTH	Plasma e hemolinfa do camarão (<i>Litopenaeus vannamei</i>)	Antifúngica

Peptídeos antimicrobianos	Invertebrado isolado	Atividades
Teonelamida F	Esponja marinha <i>Theonella</i> sp.	Antifúngica
Orbiculamida A	<i>Theonella</i> sp.	Anticoagulantes do sangue que atuam como inibidores da enzima trombina
Halicylindramides A–C	Esponja marinha <i>Halichondria cylindrata</i>	Antifúngica contra <i>Mortierella ramanniana</i> e citotóxica contra células leucêmicas P388
Halicylindramides D e E	<i>Halichondria cylindrata</i>	<i>M. ramanniana</i>
Jaspamida/geodiamolida e hemiasterlina/criamida	Esponjas marinhas <i>Cymbastela</i> sp., <i>Auletta</i> c.f. <i>constricta</i> e <i>Hemiasterella minor</i>	Jaspamide: antifúngicos e atividades antiproliferativas além de citotóxicas, antimicrobianas e inseticidas
Aciculitinas A–C	Esponja <i>Aciculites orientalis</i>	Antifúngica
BDS I e II	Anêmona (<i>Anemonia sulcata</i>)	Antihipertensiva e antiviral; bloqueador de canal de potássio Kv3
Didemninas	Ascídias (<i>Trididemnum solidum</i>)	Antitumoral e antiviral
Tamandarinas A e B	Ascídia da família Didemnidae	Antiviral, imunossupressora, antitumoral
Lissoclinamidas	Ascídia (<i>Lissoclinum patela</i>)	Propriedades farmacológicas contra fibroblastos humanos
Styelina D	Hemócitos da ascídia (<i>Styela clava</i>)	<i>E. coli</i> e <i>S. aureus</i>

A história do PDamp1: uma molécula muito potente contra microrganismos patogênicos

Entre os diferentes corais que podem ser encontrados na costa brasileira, um se destaca quanto à potencialidade. Ele é conhecido popularmente como orelha-de-elefante, ou simplesmente gorgônia. Trata-se da *Phyllogorgia dilatata*, que possui formato semelhante a uma orelha de elefante. A forma do corpo desse coral varia de acordo com características ambientais, como intensidade, direção e uniformidade das correntes. A espécie é caracterizada por sua estrutura colonial – eixos que se anastomosam (ou seja, rede de canais que se bifurcam e recombina em vários pontos). Por conta de sua exuberância, muitas vezes seu eixo principal é usado para ornamentação de aquários ou outros arranjos decorativos – o que é prejudicial para o ambiente marinho.

Phyllogorgia dilatata (Figura 1) é endêmica no litoral e nas ilhas oceânicas brasileiras, podendo ser encontrada desde o Maranhão, passando por Ceará, Rio Grande do Norte, Pernambuco (incluindo Fernando de Noronha), Bahia, Espírito Santo, até o Rio de Janeiro. Frequentemente, é encontrada em ambientes e recifes coralíneos de águas rasas, podendo estar presente em águas de até 28m, como, por exemplo, ao largo do Atol das Rocas. Colônias dessa espécie podem atingir mais de 50cm de altura.



Figura 1. Colônia de *Phyllogorgia dilatata* de onde foi isolado o peptídeo PDamp1 (Parque Natural Municipal do Recife de Fora, Arraial d`Ajuda, BA, Brasil). Foto: Áthila Bertoncini.

Em um trabalho desenvolvido por pesquisadores e estudantes da Universidade Católica de Brasília, juntamente com pesquisadores da Rede de Pesquisas Coral Vivo, a orelha-de-elefante, outras espécies de corais, e também esponjas sésseis (ou seja, que não se locomovem), foram escolhidas para a pesquisa devido à carência de trabalhos relacionados aos compostos com atividades contra microrganismos que oferecem risco à saúde humana. A escolha se deu também pelo fato de serem, em sua maioria, espécies endêmicas do Brasil. A única informação sobre potenciais estudos com esses corais e esponjas diz respeito à produção de metabólicos secundários⁴.

Mas o que se buscava eram peptídeos antimicrobianos (PAMs), e o início do trabalho se deu com a coleta das espécies na área do Parque Natural Municipal do Recife de Fora, situado a cinco milhas náuticas a Nordeste da cidade de Porto Seguro (BA, Brasil). O estudo teve como foco descobrir se esse coral apresentava alguma molécula protéica que fosse capaz de inibir o crescimento de microrganismos causadores de infecções hospitalares. A molécula descoberta foi chamada de PDamp1, pois deriva de *Phyllogorgia dilatata*, e foi capaz de reduzir ou inibir o crescimento de diversos microrganismos, de bactérias a fungos. As bactérias inibidas foram *Klebsiella pneumoniae*, que pode causar pneumonia; *Staphylococcus aureus*, que pode causar infecções simples, como espinhas, furúnculos e celulites, até infecções graves, como pneumonia, meningite, endocardite; e *Shigella flexneri*, que causa shigellose, uma infecção intestinal que causa febre, cólicas e diarreia com sangue e muco (disenteria bacteriana). Além delas, foram inibidos fungos, como *Candida albicans*, responsável por causar infecção oral e vaginal (candidíase, em seu estágio mais grave); *Candida parapsilosis*, também associado à candidíase; *Cryptococcus neoformans*, que causa micose (criptococose) e meningite; *Trichophyton mentagrophytes*, também responsável por micoses; e *T. rubrum*, causador de foliculite e micoses. Dessa forma, a orelha-de-elefante se apresentou como uma espécie com potenciais para estudos voltados para o tratamento de diversas doenças⁶.

6. LIMA, L.A.; MIGLIOLO, L.; CASTRO, C.B.; PIRES, D.O.; LÓPEZ-ABARRATEGUI, C.; GONÇALVES, E.; VASCONCELOS, I.M.; OLIVEIRA, J.T.A.; OTERO-GONZALEZ, A. J.; FRANCO, O. L.; DIAS, S.C. 2013. *Protein & Peptide Letters*, 20:1153-1158

7. ANEIRO, A.; GARATEIX, A. 2004. *J Chromatogr B Analyt Technol Biomed Life Sci.*, 803(1):41-53

8. COSTA-LOTUFO, L.V. 2009. *Química Nova*, 32:703-716.

9. BLUNT, J.W.; COPP, B.R.; HU, W.P.; MUNRO, M.H.; NORTHCOTE, P.T.; PRINSEP, M.R. 2010. *Natural Products Reporter*, 27:165-237.

Muitas moléculas ainda devem ser descobertas: Perspectivas

Como já descrito anteriormente, o ambiente marinho dispõe de enormes recursos para novos e diferentes compostos, sendo considerado o maior reservatório de animais e microrganismos produtores de moléculas naturais a serem avaliados como fármacos⁷.

Uma das companhias farmacêuticas mais conhecidas que desenvolvem fármacos com protótipos de origem marinha é a PharmaMar. Nos últimos 20 anos, ela investiu mais de 1,2 bilhões de reais na pesquisa de fármacos, com potencial para tratamento do câncer. A companhia é responsável por uma coleção de mais de 65.000 organismos marinhos, em que foram isoladas 700 novas substâncias químicas e descritas 30 novas famílias. A Nereus Pharmaceuticals é outra companhia que, fundada em 1998, tem por finalidade fazer a prospecção de fármacos a partir de microrganismos marinhos. Tem dois protótipos em fase 1 de testes clínicos para o tratamento de câncer, incluindo a salinosporamida A.

Atualmente, já existem quatro fármacos relacionados a substâncias de origem marinha em uso clínico como anticâncer: a ara-C (Citarabina®), extraída da esponja *Cryptotheca crypta*, coletada no mar do Caribe, a trabectedina (Yondelis®), antiviral como a ara-A (Vidarabina®), também encontrada na ascídia caribenha, *Ecteinascidia turbinata*, além do analgésico neuropático conhecido como ziconotídeo (Prialt®)⁸.

Na pesquisa por novos agentes antivirais, especificamente para o combate ao herpes, no laboratório Wellcome a zidovudina, ou azidotimidina (AZT), foi isolada de algas marinhas. Inicialmente, o AZT foi isolado e passou por ensaios, não demonstrando atividade contra o Herpes. Com o aparecimento do HIV, responsável pela AIDS, o AZT foi reavaliado e caracterizado como um inibidor da enzima transcriptase-reversa (TR) viral, sendo um dos poucos tratamentos quimioterápicos contra esse tipo de retrovírus⁹.

No entanto, a maior parte da biodiversidade marinha é ainda inexplorada, por causa das dificuldades em reproduzir o microambiente de um laboratório marinho. De fato, estima-se que menos de 0,1% de todos os microrganismos presentes nos oceanos hoje tenha sido descoberto até agora; portanto, é claro que apenas uma parte mínima do vasto potencial do oceano foi explorada em termos de descoberta de produtos naturais. Por essas razões, a maior parte do bioma marinho permanece inculta, assim, o tesouro marinho ainda permanece nos abismos.

Com o progresso de novas técnicas e o rápido desenvolvimento de métodos e ferramentas, especialmente no sequenciamento e na análise bioinformática, a metagenômica, com seu princípio independente de cultura, surgem novas oportunidades para o estudo da biodiversidade marinha e sua aplicação biotecnológica. De posse dessas ferramentas, atualmente novos projetos interdisciplinares – visando acesso ao ecossistema marinho do ponto de vista da biotecnologia – têm sido financiados em todo o mundo. Muitos desses projetos estão focados na identificação de novas cepas microbianas marinhas presentes em ambientes extremos para o isolamento de novas moléculas de interesse nos setores da saúde, cuidados pessoais e nutrição. Até agora, o interesse na exploração do ambiente marinho ainda está crescendo, e genômica e biotecnologia são exemplos de abordagens modernas para expandir o conhecimento dos processos que influenciam a diversidade da vida nos oceanos.

Literatura Recomendada

- ABAD, M.J.; BEDOYA, L.M.; BERMEJO, P. 2011. Marine compounds and their antimicrobial activities in MÉNDEZ-VILAS, A. (Ed.) *Science against microbial pathogens: communicating current research and technological advances*. Spain: Formatex-Microbiology Series, v.2, cap. Natural products and biocontrol. 1348p.
- SILVA, O.N.; MULDER, K.C.L.; BARBOSA, A.E.A.D.; OTERO-GONZALEZ, A.J.; LOPEZ-ABARRATEGUI, C.; REZENDE, T.M.B.; DIAS, S.C.; FRANCO, O.L. 2011. promiscuous host-defense peptides: from natural screenings to biotechnological applications. *Frontiers in Microbiology*, 2:232-2011.
- Tincu, J.A.; Taylor, S.W. 2004. Antimicrobial peptides from marine invertebrates. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 48:3645-3654.

Pescadores do Sul da Bahia: preservando saberes e fazeres tradicionais

Carolina Rde, Marcelo Vianna

*Levantando bem cedinho, sentados à beira da praia
Ainda sentindo a brisa da madrugada
O sol apontando no horizonte representando a hóstia consagrada
L vo os bravos canoeiros
Velejando para mais uma jornada (...)*

“Bravos Pescadores” Honorato, pescador e poeta de Corumbau

A pesca é uma forma de trabalho, um modo de vida e uma atividade econômica das mais antigas na história do homem. No Brasil, antes mesmo dos portugueses chegarem, já havia diferentes grupos de índios que praticavam a pesca de subsistência, em que crustáceos, peixes e moluscos eram parte importante de sua alimentação. Assim, ao longo da imensa costa brasileira, surgiram comunidades cujos membros viviam, e vivem até hoje, sobretudo da pesca, sendo ela, em muitos lugares, a única forma de sustento e subsistência. Pode-se chamar esses grupos que vivem em estreita relação com a natureza, fazendo do lugar em que vivem sua própria identidade, de comunidades tradicionais, como as populações caiçaras, quilombolas, ribeirinhas, pescadores artesanais e indígenas. À medida que essas comunidades se adaptaram a determinadas regiões, foram consolidados conhecimentos sobre o meio do qual dependiam, resultando em diferentes formas de manejar a natureza e modos de vida diversificados. Assim, conforme esses grupos exploravam o meio ambiente para sua sobrevivência, criaram ou adaptaram artesanalmente suas ferramentas de trabalho. Do quintal de casa retiravam recursos naturais para a construção de canoas, casas, equipamentos de pesca, instrumentos de trabalho e medicamentos, entre outros.



Esses saberes a respeito do meio onde vivem e esses modos de sobrevivência foram e são transmitidos oralmente de geração para geração, apresentando-se como uma importante ferramenta no processo de construção da memória coletiva e fortalecendo o reconhecimento de uma identidade cultural dentro da comunidade. Dessa forma, através da estreita relação com o meio natural que explora, no decorrer da estruturação dessas comunidades, nasce uma noção própria de trabalho e uma cultura específica.

Quem são os pescadores artesanais?

Pode-se separar a pesca brasileira em: amadora/desportiva, de subsistência, artesanal (ou de pequena escala), empresarial/industrial e científica. Embora muitas vezes a separação entre essas categorias não seja precisa, pois o que se observa é que a atividade apresenta um dinamismo próprio, dificultando a classificação tanto da atividade quanto dos trabalhadores nela envolvidos.

A pesca artesanal é realizada por pequenos grupos, geralmente compostos por famílias, amigos ou vizinhos. Essa prática consiste no uso de pequenas embarcações, como canoas e jangadas, que não possuem estrutura para fazer longos percursos, atuando perto da costa, rios e em águas abrigadas. Tanto os equipamentos de pesca, como os barcos, na maioria das vezes, pertencem a membros da comunidade, sendo construídos artesanalmente pelos mesmos. O conhecimento a respeito da pesca artesanal é passado de geração para geração por meio de histórias contadas e vivências adquiridas com os mais experientes. Vale ressaltar que as artes de pesca empregadas por esses pescadores apresentam uma capacidade de captura limitada, muitas vezes tornando essas pescarias mais sustentáveis que a industrial.

A definição jurídica de pesca artesanal, segundo a Lei nº 11.959, é: “atividade praticada diretamente por pescador profissional, de forma autônoma ou em regime de economia familiar, com meios de produção próprios ou mediante contrato de parceria, podendo utilizar embarcações de pequeno porte”.

A pesca industrial, por sua vez, consiste em uma prática mais estruturada, com equipamentos eletrônicos para detectar cardumes e ajudar na navegação. As embarcações são motorizadas, com maior autonomia, permitindo viagens mais longas e uma maior capacidade de captura. Tudo isso resulta em uma necessidade de treinamento que capacite os participantes da equipe de trabalho, diferentemente do que ocorre com a mão de obra empregada na pesca artesanal. Outro aspecto que diferencia essas práticas é o fato das embarcações serem propriedades de empresas ou armadores, e toda a produção pesqueira ser revertida em mercadoria. Essas características fazem com que alguns pescadores artesanais considerem que a pesca industrial desqualifica seu trabalho e sua profissão, visto que seu conhecimento empírico e tradicional é substituído por equipamentos eletrônicos.

Na prática, não há uma definição padrão para cada pescaria, devido às particularidades regionais da pesca, que é influenciada por fatores socioeconômicos, geográficos, ecológicos e culturais. Tais peculiaridades são ainda mais evidentes na pesca artesanal, o que dificulta seu monitoramento e caracterização. Além disso, esses pescadores estão dispersos por toda a costa, muitas vezes em locais de difícil acesso. Eles utilizam diversos métodos de pesca, capturando diferentes tipos de pescados. Esses fatores, somados ao desembarque e à comercialização, muitas vezes feitos informalmente, em locais variados, tornam ainda mais difícil o controle da atividade.

Outro grande problema que dificulta a obtenção de dados a respeito da pesca artesanal é ela ter sido negligenciada por órgãos governamentais e pesquisadores, que focaram em estudar apenas os impactos da pesca industrial no meio ambiente, gerando, assim, uma carência de informações. Apesar disso, no Brasil, a pesca artesanal envolve um contingente de milhões de pessoas, constituindo uma significativa fonte de emprego. Tem uma importância fundamental na segurança alimentar, já que o setor é responsável por mais da metade da produção pesqueira do país. Desse modo, a pesca artesanal desempenha um papel muito considerável na economia das regiões costeiras tropicais, tendo uma atuação ainda mais relevante no contexto de segurança alimentar e redução da pobreza, visto que a maior parte do que é pescado pelo setor é para o consumo humano.

Historicamente, a pesca artesanal sofreu grandes mudanças após a Segunda Guerra Mundial, com a introdução, no Brasil, de novas tecnologias, como o uso de fios de material sintético, como o nylon; a conservação do pescado por gelo; a navegação com motores pequenos, como os de popa, e outros insumos, fazendo com que ela perdesse em parte sua face artesanal, tornando os métodos mais eficientes e, logo, mais predatórios. Além disso, nas últimas décadas foi observada uma crescente redução dos recursos pesqueiros em decorrência, principalmente, da pesca predatória e da poluição urbano-industrial. Cabe ressaltar também que nessas áreas costeiras existe uma grande divergência de interesses entre os pescadores, os órgãos governamentais, os moradores e os demais atuantes. Soma-se a isso, ainda, a especulação imobiliária e a remoção frequente dos pescadores de suas terras – fatos que geram disputas em relação aos territórios de pesca, assim como diversos outros conflitos. Essa complexidade mostra como são necessários estudos e práticas para tentar resolver essas questões.

A criação de uma gestão eficiente dos recursos pesqueiros se torna necessária para assegurá-los para as próximas gerações. É fundamental que fatores sociais, geográficos, ambientais e econômicos sejam agregados na elaboração de suas propostas, considerando as diversas realidades locais existentes. Além disso, é importante garantir a participação ativa dos pescadores artesanais nas tomadas de decisões, reconhecendo a relevância da atividade por eles desempenhada. Afinal, o êxito na adesão das medidas de manejo por essas comunidades pesqueiras depende da colaboração de todos nas etapas de elaboração das diretrizes. Contudo, o processo histórico de marginalização dos pescadores tradicionais, associado à queda na autoestima dessas comunidades, tem dificultado agregar efetivamente esses atores ao processo de gestão.

As rápidas mudanças econômicas e socioculturais têm afetado significativamente o conhecimento tradicional sobre o uso dos recursos naturais, onde muitas vezes as práticas ancestrais são substituídas por outras, centradas na tecnologia, fazendo com que esse saber se perca entre as gerações. Os conhecimentos acumulados com a estreita relação com a

natureza podem fornecer contribuições relevantes para a conservação da diversidade biológica, sendo, assim, de suma importância tanto a preservação histórica quanto o resgate cultural desses povos. Ciente de que o saber tradicional é mantido por intermédio de práticas e trocas de informação, e sendo o objetivo preservar esse conjunto de experiências, deve-se trabalhar, sobretudo, para conservar os modos de vida em que elas se originam e desenvolvem.

Algumas formas de trazer essas populações tradicionais para a participação colaborativa nas iniciativas de conservação são a valorização cultural e o resgate do orgulho enquanto comunidade pesqueira. A manutenção e a preservação desses conhecimentos tradicionais estão entre os principais fatores para o fortalecimento da identidade cultural de uma comunidade. Esses saberes têm se perdido em consequência da cultura oral, da desvalorização e também pelo fato de seus detentores serem idosos. A maioria dos jovens não tem interesse em adquirir tais conhecimentos.

Assim, o presente trabalho tem por objetivo resgatar, documentar e valorizar os conhecimentos tradicionais sobre a pesca e a culinária baseada em frutos do mar de comunidades pesqueiras no litoral Sul da Bahia. A região abrange a chamada Costa do Descobrimento, considerada patrimônio da humanidade pela UNESCO, sendo um importante roteiro turístico e possuindo muitas comunidades que se sustentam basicamente da pesca. Nela encontram-se diversas reservas indígenas, além de unidades de conservação como o Parque Natural Municipal do Recife de Fora, o Parque Municipal Marinho da Coroa Alta e a Reserva Extrativista Marinha de Corumbau, entre outras. Elas formam uma das maiores áreas de biodiversidade recifal do Brasil.

Além de sua importância ecológica, os recifes possuem um papel socioeconômico significativo, pois representam fonte de alimento e renda para comunidades pesqueiras. Os peixes recifais são alvos importantes da pesca artesanal, especialmente ao longo do Nordeste brasileiro, onde são capturados por artes de pesca simples – com linha e anzol – e podem alcançar um bom preço de mercado, levando os pescadores a empregarem um grande esforço para pegá-los. Um problema é que essas pescarias geralmente visam espécies de grande porte, muito valorizadas, como

garoupas (Serranidae) e caranhas (Lutjanidae), que são vulneráveis à sobrepesca devido a seu crescimento lento e maturidade reprodutiva tardia.

Apesar de sua relevância, os ambientes recifais vêm sofrendo um intenso processo de degradação pelas atividades humanas. A sobrepesca, o desenvolvimento costeiro insustentável, a poluição, as pescas destrutivas (com explosivos e veneno) e o turismo predatório são exemplos de impactos que vêm agravando a deterioração desses ecossistemas. Porém, estima-se que a sobrepesca e a pesca destrutiva sejam as ameaças mais críticas, afetando mais de 55% dos recifes do planeta.

Navegando pelos conhecimentos tradicionais dos pescadores do litoral Sul da Bahia

Diante desse cenário, observa-se a importância do resgate histórico e da valorização cultural dos saberes e fazeres da pesca artesanal, uma vez que eles estão se perdendo frente a chegada de novas tecnologias e ao desinteresse dos mais jovens em seguir a tradição. Sabe-se que quando a comunidade se sente valorizada, torna-se mais fácil integrá-la aos processos de gestão e conservação.

Assim, o trabalho consiste na descrição do modo de vida desses povos tradicionais por meio de observações diretas, entrevistas semiestruturadas e conversas informais, com registros em vídeo, som e fotografia. Os petrechos de pesca tradicionais foram descritos e registrados, assim como os pratos típicos da culinária pesqueira. O método de abordagem adotado nas entrevistas foi buscar as pessoas mais velhas e as lideranças da comunidade, consideradas “especialistas nativas”, tendo em vista serem as detentoras de maior conhecimento. Algumas das perguntas feitas foram: “Com quem aprendeu a pescar? Como pescava antigamente e com quais equipamentos? Os equipamentos eram feitos de qual material? Quais foram as mudanças? A pescaria está melhor ou pior atualmente?”, etc.

As entrevistas foram realizadas em Arraial d’Ajuda, Porto Seguro, Santo André, Santo Antônio/Guaiú, Corumbau e Cumuruxatiba (BA, Brasil). Nas comunidades visitadas, observou-se que muitas tradições eram indígenas, tendo sido herdadas por meio das artes de pesca e culinária. Notou-se também indícios de perda da tradição por conta da chegada de novas tecnologias, especialmente associadas à abertura de rodovias. Nas comunidades de mais difícil acesso, esses saberes estão mais preservados. Como se pode ler no poema de Seu Honorato, cujo pai era índio pataxó. Muitos pescadores dessa região herdaram as tradições indígenas na pesca, como o uso da fibra do tucum (Figura 1) para a confecção das redes, as cordas de embira, o modelo das canoas; essas histórias permanecem vivas até hoje na memória de alguns pescadores mais antigos.

O Começo do Corumbau

*“(...) Em 1822 começou na beira do seu rio
Com uma população tradicional
Alguns índios pataxós fazendo suas casas
Na beira do rio, encostado ao manguezal*

*Estes eram seus desejos
Porque facilitavam a sua alimentação
Pegando peixes, siris, conchas e caranguejos*

*Engraçado
Os ranchos todos parecidos com um
São cobertos com palha marimbú
As paredes com palha de xandó
Não existia depredação
Os índios não tinham nem anzol*

*Olha só agora como o peixe sumiu
Antigamente era tão fácil
Que os índios matavam de flecha na beira do rio (...)*

*Mas os índios nas suas canoas já navegavam
Mesmo sem ter ferramentas, com o fogo eles cavavam
Suas redes de tucum era o que eles usavam”*

Honorato, 58 anos, pescador e poeta

“A rede era feita de um mato por nome de tucum... Tirava as palhas lá do mato... Trazia aqui, rapava ela, e puxava... Era eu e a mulé, fazia rede, caçoeiro que chamava... Eu fazia tarrafa, fazia redinha, fazia caçoeiro, e fazia raieira... Eu pesquei assim... A vida toda... Com canoa. A remo... quando eu tinha um pano, botava e saía pra fora com o pano.”

Cesário, 82 anos, de Veleiro.

“As cordas pra puxar era corda de imbira da mata, mandava fazer. Num tinha nada nesse tempo, né, puxava com corda de imbira. É uma árvore da mata. É uma árvore que tira, a imbira, e faz a corda.”

Vando, 68 anos, de Arraial d'Ajuda.

“(...) E as bóias, arrancava a raiz do corticeiro. Cortiça, que é a bóia. A raiz, e fazia na faca, redonda. Furava com ferro quente, no meio. E quando acabava, enfiava a corda pra botar na bóia da rede, era corticeiro. Tirava da lagoa.”

Vadinho, 91 anos, de Porto Seguro.

Na região trabalhada, antigamente toda a matéria-prima para construir os equipamentos de pesca era retirada diretamente da natureza, sem que quase nenhum resíduo fosse gerado, já que todo o material era biodegradável. Devido à maior visibilidade e à menor durabilidade das fibras naturais, quando comparadas com o nylon, os métodos de pesca se tornavam menos predatórios, já que não se corria o risco do que hoje se chama “pesca fantasma”. Entretanto, a maior parte dos pescadores aderiu rapidamente ao fio de nylon quando ele chegou, já que dava menos trabalho: *“Porque o nylon nós chegava, acabou a pescaria, enrolou, bota na vasilha, na caixa, e não embola. E o nylon... O fio de tucum tem que botar no sol pra enxugar..., senão, apodrece. Sim, dá menos trabalho, o nylon.”* (Ananias, 67 anos, pescador de Porto Seguro). Porém, outros acreditam que a rede feita de tucum é melhor, como Fulô, de 74 anos, pescador de Bugigão: *“Nunca desprezei o tucum... Agora é que abandonei, os outros me deram uns pedaços de rede aí, né? A rede de tucum é melhor porque se botar lá fora, ela não apodrece o peixe assim fácil não, e a rede de nylon costuma morrer o peixe. É porque o peixe bate nela, não vê nada e aí ele briga muito na rede, né?”*.

*“Com corda de embira e pedras
Suas canoas eles ancoravam
Remos eram as varas que eles navegavam*

*As pedras eram tiradas em frente
A aldeia pataxó, onde os índios moravam
Eles negociavam, trocavam peixes e caranguejos
Por remos, farinha e corda
E outros objetos que eles precisavam*

*Assim se passava o tempo sem ninguém perceber
Mas não sabiam no futuro o que podia acontecer
Como em toda aldeia acontece
Com gente que chega por lá
Com o decorrer do tempo começa a se misturar*

*Como todos sabem desmatar é uma grande depredação
Não existia a lei do meio ambiente
Ninguém se importava com este pedaço de chão.”*

Honorato, 58 anos, pescador e poeta.



Figura 1. Fibras de folha de tucum usadas nas redes de pesca. Créditos: Carolina Rúde.

Para os entrevistados, a primeira grande mudança que ocorreu na pesca foi a chegada do fio de nylon; depois, o surgimento do motor e, por último, o gelo para a conservação dos pescados, sendo diferentes os períodos em que essas novidades chegaram a cada lugar. Nos locais mais afastados dos centros urbanos e de difícil acesso, essas tecnologias chegaram anos depois, como em Veleiro. A chegada do motor náutico e do gelo causou uma mudança drástica na pesca. Antigamente, a falta de compradores e de um lugar para conservar o pescado freava a pescaria, já que os pescadores reduziam seu esforço de pesca para o peixe não estragar. Uma vez que o excedente da produção era salgado para conservar, isso implicava em aumento do custo e alteração do paladar. Com a possibilidade de armazenamento com o uso do gelo, tornou-se viável aumentar a captura acima de limites tradicionais.

“Com o nylon já tem um mucado de ano... Olha, eu comecei a pescar com o nylon já faz uns 20 anos, há vinte tantos anos...”

Cesário, 82 anos de Veleiro.

“O nylon chegou aqui pra... trinta e tantos anos. Por aí... Uns quarenta anos. Chegou antes do motor... Eu remava a mão. Nunca pesquei de motor. De motor não. Minha pescaria até quando eu larguei eu pesquei a remo.”

Faninho, 74 anos, de Guaiú/Santo Antônio.

“O nylon, né? Rapaz, não tenho certeza. Eu casei em 1970... Não sei se eu já era casado. Não, não era casado ainda, não. 1965, por aí...”

Vando, 68 anos, de Arraial d'Ajuda.

“Mas o que eu sei aqui na prática sobre a natureza eu não tenho medo de gente que estudou e se formou... A prática que eu tenho da natureza, né... Olha o que sei aqui dessa natureza, o que ela faz, esses que estudam perdem pra mim. Porque tenho muita prática, de arreparar aí e botar na cabeça tudo.”

Vadinho, 91 anos, de Porto Seguro.



Figura 2. Puçá cônico de arrasto com fio de algodão, para a pesca do camarão. É puxado por um pescador que caminha segurando os calões de madeira. Créditos: Carolina Rüde.

“Salgava... uma ocasião aqui mesmo eu salguei cação, bagre, pescada, desses tipos de peixe que fica em rede,... tudo salgado, chega tava amarelinho assim... Eu digo: eu num vou mais pescar porque num tava vendendo peixe... Eu pescar pra pegar o peixe pra jogar fora, apodrecer... Aí não, não vou... Como eu salgava? Fincava ele pela cabeça assim ó, vinha até a ponta do rabo, abria ele, agora ó... Quando acabava lavava bem lavadinho, passava o sal, quando era o outro dia o sol tava quente, botava do lado no varal...”

Cesário, 82 anos, de Veleiro.

“Quando tinha comprador, a gente vendia; quando não tinha, salgava. Hoje já fica difícil a pessoa salgar um peixe, porque todo mundo tem geladeira, freezer. E tem os compradores também. Hoje diminuiu a quantidade de peixe e aumentou a quantidade de gente pra comer o peixe, então quase não sobra pra salgar... (...) Eu gosto mais de peixe salgado do que de peixe frito... Sempre gostei.”

Antônio da Romana, 88 anos, de Guaiú.

Quanto à impressão dos pescadores sobre a pesca hoje estar melhor ou pior do que antigamente, a maioria respondeu que por um lado está melhor, devido ao avanço tecnológico e à valorização do preço do pescado, mas por outro, está pior, pois a quantidade e a qualidade de peixes diminuíram. Em relação aos motivos para a diminuição do pescado, a maior parte culpa os barcos de arrasto e os muitos pescadores.

“Mudou pra melhor porque... Naquele tempo os mestres, chamávamos de mestre, né, os mestres de antigamente eram capacitados. Os mestres de hoje eles têm 80% de máquina, GPS, essas coisas mais novas na pescaria que ajuda muito, né? Eu pesquei em barco à vela. Peixe salgado. Levava quinze, vinte dias no mar. Não ancorava o barco, pra ficar à deriva.”

Vando, 68 anos, de Arraial d'Ajuda.

“Porque aumentou o número de pescadores e pra mim o que mais acabou o peixe foram esses barcos que arrastam lá fora, lá no meio do mar, né? Eles arrastam, pegam o peixe grande, pega o pequeno. Aquele pequeno eles jogam fora. Que aquele pequeno é a comida do grande. E o grande não tem mais o que comer, pronto, some... Lá pro fundo, lá que ninguém vai. Pois é. Ia crescer, mas eles pega, mata, morre e pronto.”

Mundoca, 80 anos, de Santo Antônio.

“A pesca, hoje ela tá muito mais difícil... A população aumentou, né? Quando eu conheci Guaiú, aqui tinha no mínimo dez casas, há trinta anos atrás tinham umas dez casas aí. Você pegava o peixe e ia vender a quem? Não tinha estrada, o peixe era seco aqui, consumido aí mesmo, daqui prali, daqui prali e acabou. Então hoje tá difícil o peixe. O peixe afugentou por causa de muita zoada na beira da praia, né?”

Wilson, 67 anos, de Guaiú.

A corda feita com a fibra de embira também era utilizada no processo de calafetagem da construção naval (Figura 3). Trata-se de uma operação cuidadosa, pois veda os espaços entre as tábuas de madeira com que são feitos os barcos para impedir que a água infiltre, deixando as embarcações estanques. Antigamente, a vedação era feita com estopa (fibra vegetal), tradicionalmente preparada com a fibra de embira, introduzida entre as madeiras, utilizando-se de um martelo. Atualmente o uso dessas fibras naturais foi substituído pelo do nylon. Seu Raimundo, de 74 anos, calafate de Porto Seguro, conta como o uso da fibra de embira é tradicional na vedação: *“É a entrecasca da embira...*

Isso aqui se usa ela há mais de 60 anos, 70 anos atrás... É a mesma fibra que se usa há 70 anos, usa hoje... pra vedação, é... a vedação da costura. Comecei a trabalhar com essa fibra, há muito tempo eu usava essa fibra, só que hoje temos que procurar suprir por outro porque ela tá sendo proibida de tirar, porque o meio ambiente tá proibindo, proibiu. Porque estão tirando a estopa, em vez de tirar uma parte da madeira, eles tiram a madeira toda, e a madeira, o pau morre; então, se tirar metade, ela num morre... Que a casca com um ano ela retorna... Então nós temos que substituir [por] outra coisa, por enquanto nós temos essa, bem, quando acabar, acabou, então tem que fazer com nylon, porque, praticamente pra frente não vai ter mais isso aqui, entendeu...”



Figura 3. Detalhes da corda da fibra de embira e o processo de vedação feito por Raimundo Alves, calafate. Créditos: Carolina Rüde.

Todas as mudanças relatadas reforçam a importância de se resgatar a história desses pescadores de antigamente, que construíam na experiência do dia a dia, com um profundo conhecimento sobre o meio do qual dependiam... e que está se perdendo. A maior parte da nova geração não está interessada em aprender esses saberes passados de pai para filho, como dito por Seu Vando: “[com quem o senhor aprendeu a pescar?] Meu pai... Meu pai era pescador. [Seu avô também era pescador?] Também. É, a família toda... A família toda assim. Do tempo do meu pai e dos filhos deles, que somos nós. Os nossos filhos não quiseram pescar, não, nenhum deles. Cheguei a levar meus filhos pra pescar, mas nenhum deles quis, não. [Você queria que eles

pescassem?] Queria, porque foi o que meu pai me ensinou. Antigamente, não tinha emprego. Era difícil, até trabalhar era difícil. Então quem tinha seus filhos tinha que ensinar a pescar. Não tinha os estudos que tem hoje.”

Como parte do processo, a culinária tradicional da região também foi registrada neste estudo, para resgatar pratos típicos baseados nos pescados locais. Grande parte das cozinheiras citou o peixe assado na folha de bananeira, tal qual a receita feita pela Pajé Jassanã, da tribo pataxó da Aldeia de Barra Velha (Figura 4).

“Eu tratei o peixe, quando acabei... Tirei a tripa todinha, lavo bem lavado o peixe primeiro, depois que tiro as escamas, barbatana, tudo, aí eu parto ele, tiro as tripa toda, limpo ele todo, lavo bem lavado ele, pra poder passar um pouco de sal e enrolar na folha, pra poder assar no fogo, na brasa, né? No calor do fogo. Eu amarro com a própria... com a própria fibra da bananeira. Ah, eu gosto mais dele sem tempero. Assado na folha. Agora na panela a gente coloca tempero. E na folha não, não carece colocar tempero, porque a folha é o tempero do peixe.”

Pajé Jassanã, 73 anos.



Figura 4. Peixe na folha de bananeira no fogão de barro, cesto de palha para prensar a farinha e o caju, armadilha de palha grande para pescar peixe no rio e a Pajé Jassanã. Créditos: Carolina Rúde.

Além do coco, pimentas e dendê, outro ingrediente tradicional utilizado em muitas receitas da região é o biri-biri (*Averrhoa bilimbi L.*), espécie frutífera da família Oxalidaceae, popularmente conhecida como biri-biri, bilimbi, limão-japonês e caramboleira-amarela (Figura 5). Sua origem é incerta, mas não é uma planta nativa do Brasil, podendo ter se originado na Índia ou Malásia e se dispersado daí para outros países, como o Brasil. O fruto é muito empregado na preparação de compotas, licores e moquecas, como nos conta Dona Maria, 85 anos, cozinheira tradicional de Arraial d’Ajuda.



Figura 5. Cacho do fruto do biri-biri na árvore, em Arraial d’ Ajuda. Créditos: Carolina Rüde.

“No licor você apanha o biri-biri, 5 biri-biris. Digamos, né? Eles grandes já, não o fruto deles, eles já quase maduros. Você bota pra ferver já com o cravo e o açúcar e a canela. Deixa ele ferver, que vai fervendo, vai fervendo, vai fervendo. Fica da cor de vinho. A calda, deixa esfriar, você mistura com a cachaça e está pronto! O biri-biri fica azedinho. Você bota numa panela, deixa escorrer, bota na geladeira, depois do almoço tira um, fica azedinho... Gostoso!”

Maria, 85 anos, cozinheira tradicional, de Arraial d’Ajuda.

Fritada de ouriço da Dona Maria:

“Você parte o ouriço... Traz aquela gordura do ouriço, faz aquele tempero, todos os temperos que leva uma moqueca de peixe: tomate, cebola, pimenta, limão, dendê... Dendê quase não precisa porque você vai botar no toucinho. Aí você bota o toucinho joga aquele tempero, faz aquele recheadozinho, joga o ouriço dentro. Quando ele solta, você deixa lá. Você bate ovos, é bom botar sempre em uma colherzinha de farinha de trigo nos ovos para ele poder ficar durinho. Aí bota uma camada de ovos embaixo batido. E bota sempre uma pitadinha de sal que é pro ovo ficar gostosinho, né? Porque nada sem sal presta. Aí você bota a camada do ouriço, já preparado ali, com todos os temperos, agora você vem com os ovos batidos, despeja assim por cima, e ó... Sacode e bota no forno para assar. É uma delícia! (...) Nós já leva a faca, leva o bicheiro, tira e parte eles todos, uma vai partindo, enquanto a outra vai limpando, outra vai emborcando. Lavando mesmo na água, naquelas poças de água nas pedras, a gente já lava ali e vai emborcando. Depois com uma colherzinha, a gente leva uma colherzinha de chá e vai tirando toda a gordurinha, e botando... Nós não chamamos ova aqui, chamamos a gordura do ouriço.”

“Moqueca de peixe com biri-biri. Você prepara os temperos para fazer a moqueca... Vai cortando as rodela de biri-biri e botando em cima do peixe e prepara a moqueca normal. Só tem que leva o biri-biri. (...) Em carne eu boto o biri-biri, só não boto em feijão por causa do azedo. Mas... Eu boto em carne, em peixe. O suco dele não tem pra diabete, pra afinar o sangue, pro coração, tudo ele é bom...”

Maria, 85 anos, cozinheira tradicional, de Arraial d'Ajuda.

As comunidades pesqueiras tradicionais possuem um modo de vida imposto pelas condições do meio onde habitam. A impossibilidade de sobrepor a natureza faz com que os pescadores se adaptem e se adéquem a essa força maior. As redes de emalhe para captura de peixes, os cestos para pesca de camarão e os anzóis de espinha, com linhas de fibras de tucum, já eram utilizados pelos índios brasileiros desde o século XVI. Essa persistência tecnológica reflete as condições físicas, oceanográficas e biológicas estabelecidas pelo meio nos fazeres dos pescadores, que têm que procurar o equilíbrio em sua forma de trabalhar em cada trecho do litoral. Como esse conhecimento é acumulativo e transmitido oralmente de geração para geração, observa-se a importância de trabalhos como este, que visam resgatar e registrar tais saberes, fundamentais no fortalecimento da identidade cultural desses pescadores artesanais e que, além disso, remetem às condições ambientais pristinas.

Considerações finais

Pode-se perceber que, se por um lado as inovações tecnológicas, como o fio de nylon, facilitaram o trabalho dos pescadores, por outro, elas têm contribuído para o fim de técnicas seculares e ancestrais. Porém, quando uma técnica antiga desaparece, junto com ela perde-se todo um conjunto de saberes, tradições e formas de organização do trabalho. Por isso, deve-se resgatar e valorizar esses saberes e fazeres, para que essa cultura tradicional e esses modos de vida tão singulares não se percam.

Literatura recomendada

DIEGUES, A.C.A. 1999. Sócio-antropologia das comunidades de pescadores marítimos no Brasil. *Etnográfica*, 3(2):361-375.

DIEGUES, A.C. 1999. *Biodiversidade e Comunidades Tradicionais no Brasil: os saberes tradicionais e a biodiversidade no Brasil*. São Paulo: NUPAUB USP, 189p.

DIEGUES, A.C. 2000. A etnoconservação da natureza. p.1-46 in DIEGUES, A.C. (Org.) *Etnoconservação: novos rumos para a proteção da natureza nos trópicos*. 2.ed. São Paulo: Hucitec e NUPAUB.

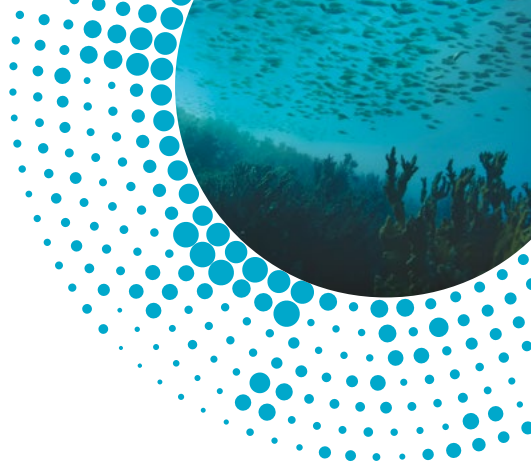
SILVA, L.G.S. 1993. *Caiçaras e Jangadeiros: Cultura Marítima e Modernização no Brasil*. CEMAR: Centro de Culturas Marítimas. São Paulo: USP. 145p.

Unidades de conservação marinhas no Brasil e conservação de recifes de coral

Daniele A. Vila-Nova, Carlos Eduardo L. Ferreira

Introdução

As unidades de conservação (UCs) são áreas com limites definidos e têm o objetivo de promover a conservação da natureza. Unidade de conservação é um termo utilizado no Brasil, sendo equivalente ao termo área protegida, amplamente utilizado em outros países. Inicialmente, a ideia de delimitar uma área para esse fim foi resultado da percepção de que protegendo uma dada porção de terra ou mar, excluindo a interferência humana, o sistema (que naturalmente possui processos capazes de se autorregular) poderia se manter no estado de equilíbrio, protegendo a riqueza de espécies e mantendo a resiliência contra impactos tanto antropogênicos quanto naturais (Figura 1). Embora essa estratégia seja utilizada há centenas de anos por comunidades tradicionais (p.ex.: lugares sagrados de índios, áreas de caça), o primeiro exemplo no mundo ocidental foi o Parque Nacional de Yellowstone, criado em 1872, nos Estados Unidos. As primeiras áreas marinhas protegidas começaram a ser criadas no início do século 20.



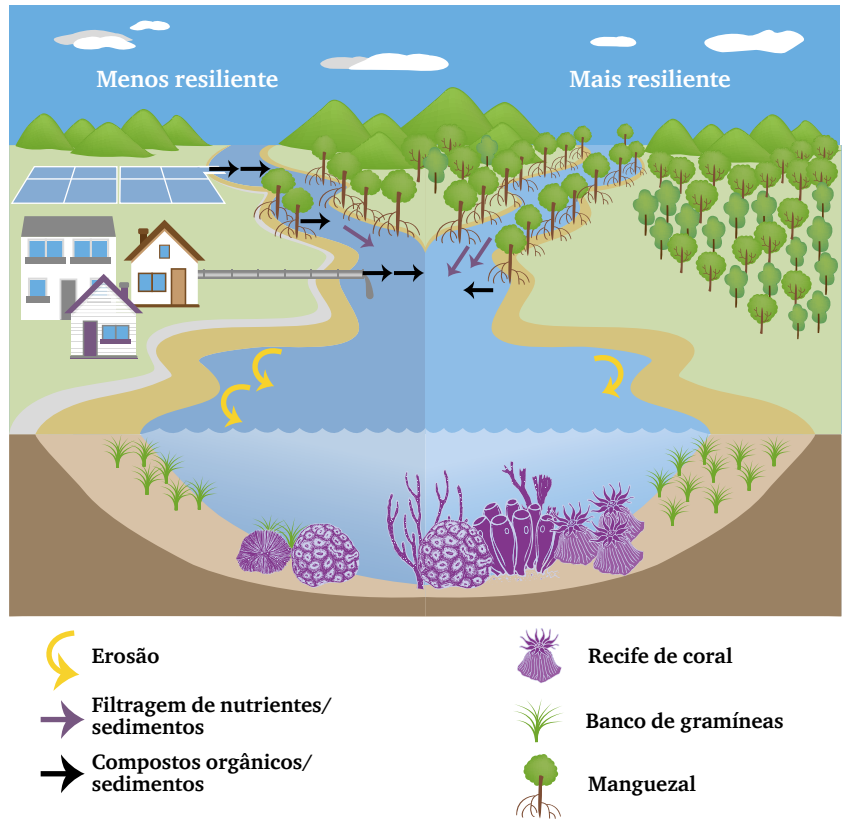


Figura 1. Resiliência é a capacidade de recuperação natural após distúrbio. Quando um recife de coral é saudável, ele é capaz de retornar a seu estado original após eventos que alteram o equilíbrio do ambiente. A resiliência é mais evidente em ambientes pouco alterados, com baixos impactos.

As unidades de conservação do Brasil

No Brasil, a primeira unidade de conservação marinha foi criada em 1979: a Reserva Biológica do Atol das Rocas, que é o único atol existente no Atlântico Sul. Desde então, outras UCs marinhas foram criadas para proteger biomas, áreas com espécies ameaçadas ou áreas de reprodução, mas também para ordenar o desenvolvimento costeiro e o turismo, além de garantir as atividades de comunidades tradicionais. No Brasil, as UCs são divididas em duas categorias principais: proteção integral e uso sustentável. As UCs de proteção integral permitem apenas o uso indireto dos recursos naturais encontrados dentro de seus limites, enquanto as UCs de uso sustentável permitem a utilização de parte de seus recursos, de maneira sustentável. A tabela abaixo mostra os tipos de UCs encontradas em cada categoria, além de apresentar exemplos para o ambiente marinho.

*O ICMBio ainda não criou nenhuma UC na categoria de Reserva de Fauna.

**Não existem UCs nessas categorias para o ambiente marinho.

Proteção Integral	Exemplo no Ambiente Marinho
Reserva Biológica	Rebio Marinha do Arvoredo - SC
Parque Nacional	Parna Marinho de Fernando de Noronha - PE
Estação Ecológica	Esec de Tamoios - RJ
Monumento Natural	Mona das Ilhas Cagarras - RJ
Refúgio da Vida Silvestre	Revis de Santa Cruz - ES
Uso Sustentável	Exemplo no Ambiente Marinho
Área de Proteção Ambiental	APA Costa dos Corais - PE
Área de Relevante Interesse Ecológico	Arie Ilhas da Queimada Pequena e Queimada Grande - SP
Reserva Extrativista	Resex Marinha Arraial do Cabo - RJ
Reserva de Fauna*	Inexistente
Reserva de Desenvolvimento Sustentável**	Inexistente
Floresta Nacional/ Distrital**	Inexistente
Reserva Particular do Patrimônio Natural**	Inexistente

1. UCN. 2003. *Recommendations of the VIUCN World Parks Congress, Durban, South Africa, em IUCN Global Programme on Protected Areas, Switzerland.*

LUBCHENCO, J.; PALUMBI, S.R.; GAINES, S.D.; ANDELMAN, S. 2003. *Ecological Applications*, 13:3-7.

Resolução CONABIO nº 03, de 21 de dezembro de 2006. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/conabio/_arquivos/resolucaoconabio03_15.pdf>. Acesso em: fevereiro 2016.

O Eco. 2014. O que são as metas de Aichi. Disponível em: <<http://www.oeco.org.br/dicionario-ambiental/28727-o-que-sao-as-metas-de-aichi/>>. Acesso em: fevereiro 2016.

ICMBio. 2015. ICMBio planeja ações para o Projeto GEF-Mar. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/portal/comunicacao/noticias/20-geral/6873-icmbio-planeja-acoes-para-projeto-gef-mar.html>>. Acesso em: fevereiro 2016.

Mas quantas UCs marinhas existem no Brasil? E no mundo? Esse número é suficiente para a conservação? A figura 2 apresenta a realidade das UCs marinhas no país e no cenário global. De forma geral, temos uma quantidade baixa de UCs marinhas, apesar das metas estabelecidas e de sugestões apresentadas por especialistas no assunto. O baixo número de UCs marinhas muitas vezes faz com que os vários benefícios atribuídos às mesmas não ocorram, além de não serem percebidos pela população em geral, usuários da região e tomadores de decisão.

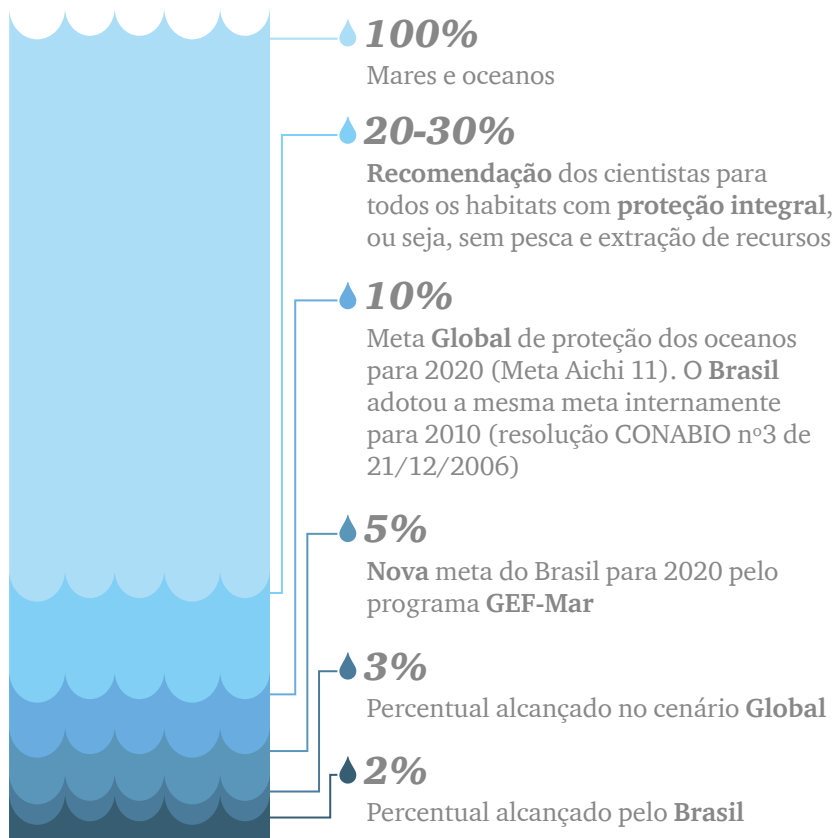


Figura 2. Metas para a criação de Unidades de Conservação marinhas no Brasil e no mundo¹.

O processo de criação de unidades de conservação

No Brasil, as UCs são criadas por meio de decretos federais, estaduais ou municipais. Normalmente, elas passam por um processo prévio à criação, e ele envolve diversos atores para tratar dos objetivos, delimitações e definição da categoria da UC. Depois de criadas, as UCs contam com o apoio de um conselho gestor formado por participantes de diversas atividades que influenciam ou são beneficiários diretos ou indiretos dos recursos naturais encontrados nelas. O conselho gestor pode ser de dois tipos: consultivo e deliberativo. O conselho consultivo, como o nome sugere, é formado por um conjunto de indivíduos que aconselham os gestores da UC em seu funcionamento e atividades. Eles não tomam a decisão final nas questões da UC, apenas aconselham o chefe. O conselho deliberativo, por sua vez, é formado por representantes de membros que têm o poder de tomar decisões para a UC, num processo participativo. Apenas as Reservas Extrativistas (Resex) e as Reservas de Desenvolvimento Sustentável (RDS) possuem conselhos deliberativos. Além do conselho gestor, as UCs possuem planos de manejo que fornecem um retrato detalhado das características geográficas, biológicas e socioeconômicas delas e do entorno. O plano de manejo ainda direciona as ações e as necessidades específicas da UC e sua zona de amortecimento. Diversas UCs marinhas no Brasil ainda não possuem planos de manejo e são regidas por um plano de utilização, que seria uma medida emergencial até a construção do plano de manejo.

A seguir, são exemplificados o processo de criação, o funcionamento de UCs e suas diferenças com relação às categorias de uso, com dois exemplos de UCs marinhas do Brasil: o Parna Marinho dos Abrolhos (BA, Brasil), de proteção integral; e a APA Costa dos Corais (PE e AL, Brasil), de uso sustentável.

Parna Marinho dos Abrolhos

Foi criado em 1983, após reivindicações de um grupo formado principalmente por mergulhadores e pesquisadores. A região, no Sul da Bahia, historicamente abriga diversas atividades de pesca e já presenciou diversos naufrágios devido à difícil navegação entre os chapeirões, formação recifal exclusiva da área. O conselho consultivo só foi formalmente reconhecido em 2002 (Portaria Ibama nº 150, de 21.11.2002), e a configuração atual foi aprovada em 2013 (Portaria ICMBio nº 158, de 26.02.2013). O plano de manejo, por sua vez, foi publicado em 1991. Hoje, o turismo é a atividade mais importante na renda da cidade de Caravelas, onde a sede do Parque está localizada. Até hoje, a UC sofre com a pesca ilegal, devido a dificuldades de fiscalização, além de impactos provenientes do desenvolvimento costeiro, de portos, de atividades de bioprospecção e de óleo e gás.

APA Costa dos Corais

Foi criada em 1997, sendo uma das maiores UCs marinhas do Brasil, abrangendo vários municípios entre Pernambuco e Alagoas. Somente em 2013 seu plano de manejo foi aprovado, e essa demora resultou em impactos severos na região, seja pela especulação imobiliária, seja pela pesca sem controle. Antes do plano de manejo, ocorreram esforços organizados principalmente por universidades e ONGs, que executaram projetos de pesquisas que serviriam de base para esse plano. A partir de 2010, foram realizadas várias audiências públicas com os atores da unidade, além de reuniões técnicas para caracterizar o processo participativo de criação do plano de manejo da APA. O conselho consultivo foi finalmente criado em 2011.

Benefícios das unidades de conservação no mar

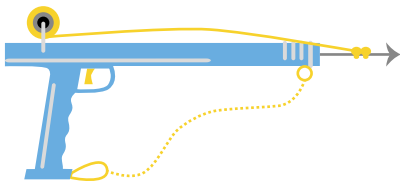
Já se falou um pouco aqui sobre o objetivo mais geral de proteger uma determinada área tendo em vista a conservação. Mas o que exatamente pode acontecer dentro de uma UC marinha? Quais são os benefícios que podem ser observados?

O possível benefício à pesca

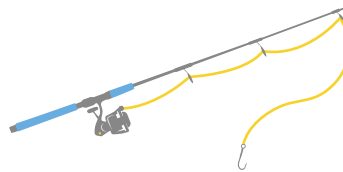
Um efeito que geralmente vem à mente quando se pensa em unidades de conservação marinhas é na pesca. Quando se fecha uma área para a pesca (p.ex.: em UCs de proteção integral, como os parques nacionais, as reservas biológicas, as estações ecológicas) ou quando essa área tem regras mais

restritivas quanto ao tipo de petrecho de pesca utilizado (ver Figura 3) e, principalmente, quando essas regras são respeitadas e obedecidas por todos, pode-se observar um aumento tanto no número quanto no tamanho dos peixes. Isso porque, quando a pesca não ocorre, as populações de peixes podem se reproduzir e aumentar de número. Com o passar do tempo, essas populações podem aumentar de tal forma que indivíduos conseguem migrar para fora das áreas fechadas, para áreas abertas à pesca. Os peixes que “atravessam” os limites da área fechada para a pesca podem ser eventualmente pescados, contribuindo para a manutenção dessa atividade. Esse efeito é chamado de transbordamento (Figura 4).

(a) Arpão



(b) Linha e anzol



(c) Rede de arrasto



(d) Tarrafa

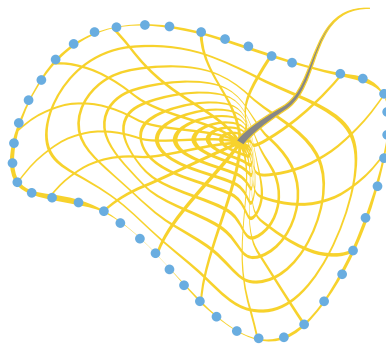


Figura 3. Petrecho de pesca é um tipo de instrumento, ou ferramenta, utilizado para auxiliar a atividade de pesca. Em algumas regiões do Brasil, é também chamado de apetrecho de pesca. Seu uso pode ser regulamentado nas Unidades de Conservação, incluindo a proibição, em alguns casos. O respeito a essas regras é essencial para que os objetivos de conservação sejam observados dentro das UCs. Alguns exemplos de petrechos: (a) arpão, (b) linha e anzol, (c) rede de arrasto, (d) tarrafa.

Como visualizado na figura 4, uma das contribuições do efeito de transbordamento é que as larvas produzidas pelos peixes dentro das áreas sem pesca podem ser levadas pelas correntes para regiões onde a pesca é permitida, ali se desenvolvendo e contribuindo para a manutenção do estoque para a pesca. De forma geral, peixes maiores produzem mais descendentes quando comparados com indivíduos de tamanhos menores. Fêmeas maiores produzem maior quantidade de ovos e ovos com maior tamanho, o que possibilita uma maior capacidade de sobrevivência da população. Esse aumento da produtividade com relação ao tamanho do peixe acontece de forma exponencial (Figura 5). Assim, os peixes grandes, quando protegidos, contribuem muito mais para o efeito do transbordamento do que os peixes menores da mesma espécie.

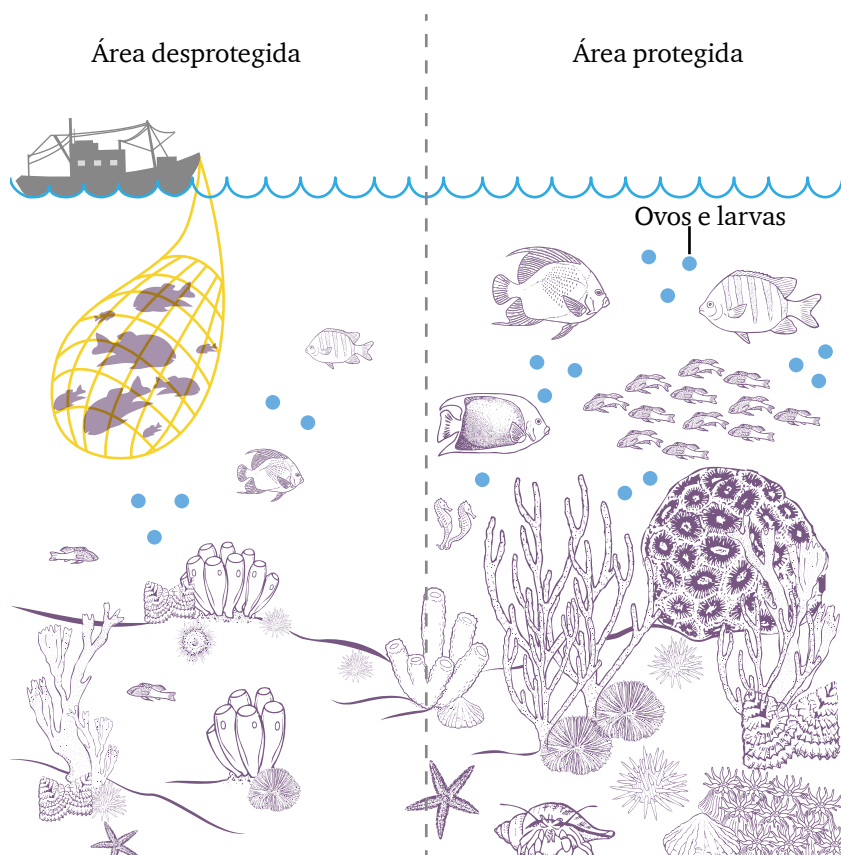


Figura 4. Representação do efeito de transbordamento que pode acontecer a partir da criação de áreas sem pesca dentro de UCs. Com o passar do tempo, ovos, larvas e indivíduos maiores podem migrar para além dos limites da UC, atingindo áreas onde a pesca é permitida, assim contribuindo para os estoques pescados.

Efeitos das unidades de conservação no ecossistema

Mas não são apenas as espécies importantes para a pesca que se beneficiam das UCs marinhas. De forma geral, todo o ecossistema é beneficiado. O controle que grandes predadores – como tubarões e garoupas – exercem sobre as populações de suas presas se torna insignificante quando a pressão da pesca reduz a quantidade desses predadores, ao ponto que as populações de peixes e outros organismos marinhos que pertencem a níveis tróficos intermediários – como pequenos carnívoros e peixes herbívoros – aumentam em quantidade e tamanho, e as populações de seus predadores não conseguem mais controlá-los. A criação de UCs marinhas pode contribuir para a manutenção desse equilíbrio; porém, para espécies de grande porte e migratórias (como os tubarões), essas UCs precisam ser grandes e antigas o suficiente para que esses efeitos positivos sejam percebidos.

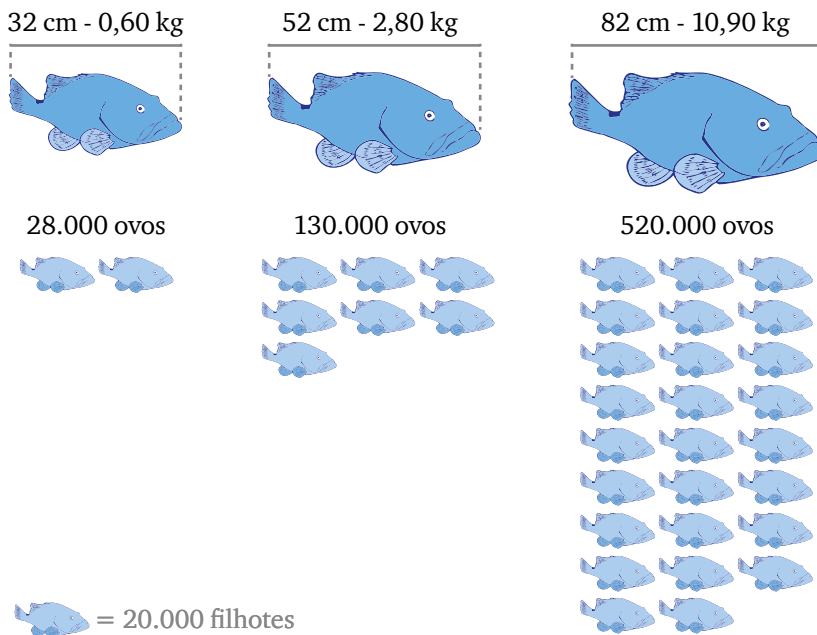


Figura 5. O efeito do transbordamento pode ser incrementado quando indivíduos maiores, comumente chamados de ‘matrizes’, são protegidos dentro de áreas sem pesca em UCs. A quantidade de ovos produzida por um único peixe aumenta exponencialmente com o tamanho e a idade do peixe.

Os recifes de coral também são favorecidos com a criação de UCs marinhas. Com o controle de acesso e de atividades no interior da UC, os corais conseguem crescer de forma mais saudável em comparação com outras áreas que sofrem com a baixa qualidade da água causada pela poluição, a destruição de habitats e a presença intensiva de pessoas. O crescimento dos corais também é beneficiado com a fauna de peixes e invertebrados herbívoros – como os ouriços – que, ao se alimentarem das algas, “limpam” o espaço no recife para que os corais e outros organismos de crescimento lento não sejam prejudicados ao competirem com macroalgas, que têm crescimento rápido. Essa relação com peixes e outros organismos herbívoros é facilmente percebida ao visitar recifes próximos à costa brasileira, sem proteção adequada e já em níveis críticos de sobrepesca, que se transformam em recifes dominados por algas. Nesses locais, a presença de corais é bastante reduzida e composta por espécies mais resistentes a esses impactos. A presença de UCs com um sistema de gestão implementado e efetivo pode contribuir significativamente para reverter essa condição.

As unidades de conservação marinhas e o turismo

Dentro das UCs, as atividades de turismo são organizadas e monitoradas, evitando que haja impacto intensivo no ambiente marinho. Mergulhos, passeios de barco e esportes aquáticos devem ser controlados dentro das UCs marinhas que permitem essas atividades. Formas de controle incluem: limites no número de pessoas e de barcos por dia/época do ano, delimitação de áreas específicas para as atividades e cadastro e treinamento das empresas que realizam as atividades, entre outros.

O planejamento de unidades de conservação

Então, como se deve planejar uma UC marinha? Qual deve ser seu tamanho? O que exatamente precisa ser incluído em seus limites?

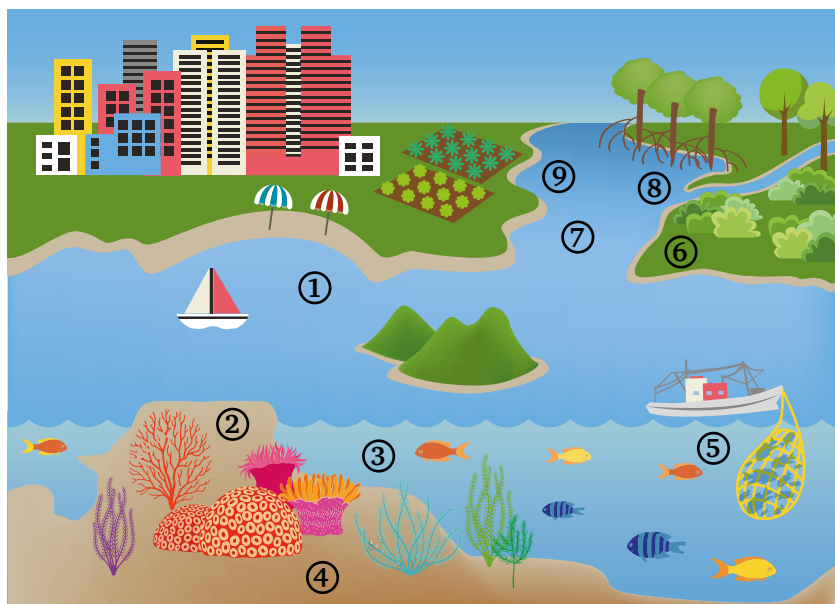
Existem vários critérios que são recomendados pela comunidade científica para que uma UC marinha seja resiliente do ponto de vista ecológico. Uma delas seria incluir a maior porção possível da diversidade de habitats disponíveis, o que conseqüentemente incluiria também a maior riqueza de espécies sendo protegidas. Muitas espécies têm papel chave nos sistemas recifais, como os herbívoros, comentados na seção anterior. Dessa maneira, preservar o papel funcional deles, protegendo os habitats que tais populações utilizam, é importante como critério de proteção. Essas medidas garantem que a área seja capaz de recuperar-se frente a impactos que podem ser causados por eventos naturais ou antrópicos. Além disso, inserir áreas ecologicamente significativas (p. ex.: áreas de berçários, de agregações reprodutivas e de alimentação) no interior das UCs marinhas permite que as espécies completem seu ciclo de vida dentro de uma área protegida (Figura 6). Por fim, a manutenção da proteção em longo prazo (p. ex.: UCs marinhas antigas, com monitoramento contínuo e efetivo das áreas mais sensíveis, ou ainda com áreas fechadas para a pesca) possibilita que os efeitos positivos da criação da UC sejam de fato evidentes e avaliados.



Figura 6. Conhecer as características biológicas das espécies que se pretende proteger é essencial para planejar uma UC. Espécies que precisam de diferentes ambientes para completar seu ciclo de vida são particularmente sensíveis à inclusão desses habitats nas UCs.

Já houve diversos debates sobre o melhor formato de criação de UCs marinhas, se deveria ser uma única UC grande ou várias pequenas e complementares. Existem inúmeros estudos sobre as duas situações mostrando seus benefícios e dificuldades. Recentemente, cientistas retomaram a discussão, sugerindo que uma UC marinha ideal deveria ser totalmente fechada para a pesca, bem monitorada, antiga, grande e isolada de outras regiões. Enquanto essa proposta parece ser ótima para manter e recuperar ambientes prístinos, sabe-se que essa não é uma possibilidade realista quando pensamos em UCs marinhas próximas ao litoral, onde a maior parte da população se encontra, juntamente com grandes cidades, indústrias, agricultura, portos e outras atividades. Como proceder então?

Nos últimos anos, o planejamento de UCs marinhas em várias regiões do mundo vem se integrando às necessidades/desafios de manejo e ao uso da paisagem como um todo. A característica geral de ambientes marinhos como sistemas abertos permite um constante fluxo de águas, o que facilita a troca de matéria orgânica, a dispersão de larvas e ovos e o desenvolvimento de espécies que migram para completar seu ciclo de vida. Ainda seguindo essa lógica, muitas vezes os impactos locais em uma área podem ser refletidos em outras regiões. O conceito de manejo com base em ecossistemas estabelece práticas de manejo de forma integrada e considera esses aspectos da conectividade², além de incluir a ocupação humana e suas atividades como componente do processo. O planejamento dentro desse regime considera habitats e ecossistemas como “espaços” ou “lugares” e incorpora não somente componentes biofísicos do local, mas também atributos sociais, econômicos, culturais e políticos (Figura 7). Ao inserir o processo de criação e delineamento das UCs marinhas no contexto de manejo baseado em ecossistemas, além de se evitar a visão compartimentalizada, bastante comum aos instrumentos de gestão, é possível facilitar a comunicação e a participação de diferentes usuários da região, que muitas vezes realizam atividades conflitantes na mesma área.



- ① A linha de costa, recifes costeiros e ilhas oferecem variadas opções para o lazer, incluindo diversos esportes aquáticos.
- ② Os recifes de coral e manguezais protegem a costa de tempestades e outros eventos naturais.
- ③ Recifes de coral saudáveis são uma importante fonte de biodiversidade e de diversos recursos.
- ④ Ecossistemas marinhos, de forma geral, são grandes aliados na diminuição dos gases de efeito estufa.
- ⑤ Pesca sustentável, além de prover alimento, suporta o comércio local.
- ⑥ Vegetação próxima a áreas alagáveis e rios reduz a erosão e ajuda a evitar enchentes.
- ⑦ Estuários e manguezais são conhecidos berçários para espécies comerciais de peixes e crustáceos.
- ⑧ Manguezais funcionam como filtros naturais, capturando sedimentos contaminantes e nutrientes em excesso.
- ⑨ Rios despoluídos fornecem água potável para consumo humano e agricultura.

Figura 7. O manejo com base em ecossistemas integra diversas atividades no mesmo espaço. As unidades de conservação se beneficiam desse processo, principalmente na mediação de potenciais conflitos com outras atividades.

Conclusão

Como visto, as unidades de conservação marinhas são uma ferramenta muito importante para preservar os recifes de coral e outros ambientes marinhos. Muito além de ser criada no papel, uma UC marinha precisa ser bem estruturada e manejada, para que seus objetivos sejam alcançados. Foi observado também que elas ajudam na conservação dos recursos pesqueiros e das atividades de pesca nas áreas adjacentes, o turismo e outras atividades humanas. Infelizmente, as UCs marinhas no Brasil e no mundo ainda são poucas. Para o futuro, é preciso entender a importância de integrar a criação e a gestão das UCs com outras atividades que utilizam o espaço marinho, de forma a priorizar a manutenção das funções do ecossistema como um todo.

Conservando os recifes de coral

Nesta seção serão apresentados alguns exemplos de sucesso e medidas necessárias para a manutenção dos recifes de coral em curto e longo prazos:

Riqueza e diversidade

Saber quais espécies ocorrem em recifes de coral é importante para compreender sua distribuição (em nível local, regional e global – assim se conhece quais espécies são consideradas endêmicas ou raras, grupos funcionais), além de possibilitar a identificação de quais áreas são mais ricas (têm um maior número de espécies). Ao longo do tempo, pesquisas desse tipo também podem indicar se houve um declínio na diversidade local, se as espécies mudaram com o tempo (p. ex.: se as espécies mais comuns continuam as mesmas, se existe a presença de alguma espécie exótica/invasora, se os grupos funcionais permanecem com populações ecologicamente representativas). Esses dados podem ser avaliados juntamente com outras informações da região, como qualidade da água, temperatura, salinidade, e podem, também, ser correlacionados com alguma alteração da região (desenvolvimento costeiro, destruição de habitats, poluição, sobrepesca). Esse tipo de pesquisa pode ter os dados coletados de várias formas: mergulhos, fotoquadrados, coletas de material biológico, transectos. Ainda, quando pesquisas são realizadas dentro de UCs marinhas, elas requerem autorização prévia do órgão competente.

Turismo

Apesar de ser uma importante ferramenta de integração e conhecimento para os recifes de coral, quando não realizado de forma controlada, o turismo pode gerar impactos irreparáveis aos recifes de coral. Para evitar, por exemplo, a quebra dos corais e o dano a outros invertebrados frágeis do recife por âncoras, nadadeiras de mergulhadores e toque ou caminhadas sobre os recifes, os guias de turismo e de mergulho devem ser treinados para esclarecer e alertar os visitantes sobre os problemas causados por tais impactos. Um guia de orientação sobre o turismo sustentável em ambientes recifais foi produzido pelo Coral Vivo e pode ser visualizado na seção Publicações do site <<http://coralvivo.org.br/wp-content/uploads/revista/958/Default.html>>.

Mudanças climáticas

As mudanças climáticas, causadas principalmente pelo aumento de atividades que liberam gases poluentes e causadores do efeito estufa, também podem causar danos irreparáveis aos recifes de coral. O aumento da temperatura dos oceanos pode causar branqueamento nos corais, que perdem suas algas simbiotas, além de aumentar a acidez nos oceanos, o que prejudica o processo de calcificação realizado por corais e outros invertebrados marinhos³. Entretanto, os efeitos das mudanças climáticas nos recifes de coral no Brasil ainda são pouco conhecidos. Com o intuito de ampliar esse conhecimento, o Projeto Coral Vivo desenvolveu um mesocosmo marinho. Nele, são realizados experimentos simulando previsões climáticas para diferentes cenários e projeções de tempo, até centenas de anos⁴. Os experimentos ainda contam com a participação de diferentes universidades e institutos de pesquisa públicos na base de pesquisas do Projeto Coral Vivo, localizada no Arraial d'Ajuda Eco Parque, em Porto Seguro (BA, Brasil). A região tem uma das maiores biodiversidades marinhas do Atlântico Sul. Esse tipo de estudo é fundamental para um planejamento a longo prazo para a conservação⁵.

3. Para detalhes, ver MARANGONI et al. (2016), capítulo 4 deste volume.

4. Para detalhes, ver DUARTE et al. (2016), capítulo 17 deste volume.

5. Para saber mais, ler Projeto Coral Vivo alerta para risco de branqueamento de corais no Brasil. Disponível em <<http://coralvivo.org.br/noticias/projeto-coral-vivo-alerta-para-risco-de-branqueamento-de-corais-no-brasil/#sthash.KAOcLgaD.dpuf>>, no site do Coral Vivo, seção Notícias.

Literatura recomendada

“MMA. 2010. *Panorama da Conservação dos Ecossistemas Costeiros e Marinhos no Brasil*. Brasília: MMA/SBF/GBA. 148p.

Plano de Ação Nacional para a Conservação dos Ambientes Coralíneos (PAN Corais)

Clovis Barreira e Castro, Roberta Aguiar dos Santos,
Walter Steenbock, Débora de Oliveira Pires

Os ambientes naturais da Terra são indispensáveis para a manutenção dos nichos ecológicos de todas as espécies, bem como para a sobrevivência da espécie humana. Eles provêm alimento, combustíveis, matéria-prima para vestuário e outros produtos, além de material para proteção e abrigo; purificam o ar e a água, reciclam nutrientes e fertilizam os solos, entre outros serviços. Entretanto, ao longo da história da humanidade, muitos desses ambientes, e as espécies que neles vivem, têm sido impactados negativamente, ou até mesmo inteiramente destruídos, pela presença e/ou pelas ações humanas. Em especial, a população humana quadruplicou no século XX, atingindo mais de 6 bilhões de habitantes, e a atividade econômica cresceu 18 vezes no mesmo período, com a proliferação de atividades agressivas ao meio ambiente – incluindo fábricas, agropecuária, pesca e ocupação do solo de forma desordenada ou nociva à manutenção dos serviços ambientais. Essa situação de crescimento acelerado levou ainda a situações de extrema desigualdade nas condições de vida humanas.

O Plano de Ação Nacional para a Conservação dos Ambientes Coralíneos (PAN Corais) é um documento de pactuação e buscará diminuir essas pressões na vida marinha da costa brasileira até 2021. Ele foi instituído pela Portaria ICMBio nº 19, com publicação no Diário Oficial da União do dia 9 de março de 2016. Com a coordenação geral do Cepsul/ICMBio¹ e a coordenação executiva do Instituto Coral Vivo, ele conta com uma série de articuladores, como pesquisadores, técnicos, lideranças comunitárias, pescadores e empresários, por exemplo.

1. Centro Nacional de Pesquisa e Conservação da Biodiversidade Marinha do Sudeste e Sul (Cepsul), que é um centro especializado do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), vinculado ao Ministério do Meio Ambiente (MMA).



Contexto histórico

Em 1992, no Rio de Janeiro, líderes mundiais se comprometeram a reduzir a taxa de perda de biodiversidade elaborando a Convenção da Diversidade Biológica (CDB), da qual já fazem parte quase 200 países (em geral denominados “Partes”). Posteriormente, na chamada 10ª Conferência das Partes (COP10, na sigla em inglês), realizada em 2010, em Nagoya (Prefeitura de Aichi), Japão, foram estabelecidos cinco objetivos estratégicos e 20 metas distribuídas entre eles (Tabela 1), conhecidas como “Metas de Aichi”. O Brasil é signatário da CDB e, portanto, comprometeu-se a alcançá-las.



Figura 1. Budião-papagaio-banana (*Scarus zelindae*) uma das espécies ameaçadas de peixes ósseos, categorizada como Vulnerável (VU). Créditos: Áthila Bertoncini

Tabela 1. Principais objetivos e metas de Aichi (CDB, 2012) relevantes para a elaboração do PAN Corais.

Objetivo Estratégico	Meta
A) Tratar das causas fundamentais de perda de biodiversidade fazendo com que preocupações com biodiversidade permeiem governo e sociedade	<p>1) Até 2020, no mais tardar, as pessoas terão conhecimento dos valores da biodiversidade e das medidas que poderão tomar para conservá-la e utilizá-la de forma sustentável</p> <p>4) Até 2020, no mais tardar, governos, setor privado e grupos de interesse em todos os níveis terão adotado medidas ou implementado planos de produção e consumo sustentáveis e terão conseguido restringir os impactos da utilização de recursos naturais dentro de limites ecológicos seguros</p>
B) Reduzir as pressões diretas sobre a biodiversidade e promover o uso sustentável	<p>6) Até 2020, o manejo e a captura de quaisquer estoques de peixes, invertebrados e plantas aquáticas serão sustentáveis, legais e feitos com aplicação de abordagens ecossistêmicas, de modo a evitar a sobre-exploração...</p> <p>8) Até 2020, a poluição, inclusive resultante de excesso de nutrientes, terá sido reduzida a níveis não prejudiciais ao funcionamento de ecossistemas e da biodiversidade</p> <p>9) Até 2020, espécies exóticas invasoras e seus vetores terão sido identificados, espécies prioritárias terão sido controladas ou erradicadas, e medidas de controle de vetores terão sido tomadas para impedir sua introdução e estabelecimento</p> <p>10) Até 2015, as múltiplas pressões antropogênicas sobre recifes de coral e demais ecossistemas impactados por mudanças de clima ou acidificação oceânica terão sido minimizadas para que sua integridade e funcionamento sejam mantidos</p>
C) Melhorar a situação da biodiversidade protegendo ecossistemas, espécies e diversidade genética	<p>11) Até 2020, pelo menos 17% de áreas terrestres e de águas continentais e 10% de áreas marinhas e costeiras, especialmente áreas de especial importância para biodiversidade e serviços ecossistêmicos, terão sido conservados por meio de sistemas de áreas protegidas, geridas de maneira efetiva e equitativa ...</p> <p>12) Até 2020, a extinção de espécies ameaçadas terá sido evitada e sua situação de conservação, em especial daquelas sofrendo maior declínio, terá sido melhorada</p>
D) Aumentar os benefícios da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos para todos	<p>14) Até 2020, ecossistemas provedores de serviços essenciais, inclusive serviços relativos à água e que contribuem à saúde, meios de vida e bem-estar, terão sido restaurados e preservados, levando em conta as necessidades de mulheres, comunidades indígenas e locais, e de pobres e vulneráveis</p>
E) Aumentar a implementação por meio de planejamento participativo, gestão de conhecimento e capacitação	<p>17) Até 2015, cada Parte terá elaborado, adotado como instrumento de política e começado a implementar uma estratégia nacional de biodiversidade e um plano de ação efetivos, participativos e atualizados</p> <p>18) Até 2020, os conhecimentos tradicionais, inovações e práticas de comunidades indígenas e locais relevantes à conservação e uso sustentável da biodiversidade e a utilização de recursos biológicos de acordo com costumes do povo terão sido respeitados, de acordo com a legislação nacional e os compromissos internacionais relevantes, e plenamente integrados e refletidos na implementação da CDB, com a participação plena e efetiva de comunidades indígenas e locais em todos os níveis relevantes</p> <p>19) Até 2020, o conhecimento, a base científica e tecnologias ligadas à biodiversidade, seus valores, funcionamento, situação e tendências, e as conseqüências de sua perda terão sido melhorados, amplamente compartilhados, transferidos e aplicados.</p>

Dois instrumentos são importantes e foram incorporados nos documentos oficiais brasileiros para atendimento da Meta de Aichi número 12, relacionada à questão das espécies ameaçadas de extinção: a elaboração de Listas Nacionais Oficiais de Espécies Ameaçadas de Extinção e a elaboração e implementação de Planos de Ação Nacionais para a Conservação de Espécies Ameaçadas de Extinção (PAN).

No Brasil, avaliações de risco de extinção de espécies utilizam definições e critérios da União Internacional para Conservação da Natureza (IUCN, na sigla em inglês). Após ampla troca e sistematização de informações por centenas de pesquisadores e técnicos especializados nos grupos, as espécies são classificadas nas categorias indicadas na tabela 2.

Tabela 2. Categorias de ameaças às espécies reconhecidas pela Portaria MMA n. 43, de 31 de janeiro de 2014.

Categoria	Sigla a partir do inglês	Observações
Extinta	EX – “Extinct”	Quando não restam quaisquer dúvidas de que o último indivíduo da espécie tenha desaparecido
Extinta na Natureza	EW – “Extinct in the Wild”	Quando a sobrevivência da espécie é conhecida apenas em cultivo, cativeiro ou como populações naturalizadas fora da sua área de distribuição natural
Criticamente em Perigo	CR – “Critically Endangered”	Quando as melhores evidências disponíveis indicam que se atingiu qualquer um dos critérios quantitativos para Criticamente em Perigo, e, por isso, considera-se que a espécie esteja enfrentando risco extremamente alto de extinção na natureza
Em Perigo	EN – “Endangered”	Quando as melhores evidências disponíveis indicam que se atingiu qualquer um dos critérios quantitativos para Em Perigo, e, por isso, considera-se que a espécie esteja enfrentando risco muito alto de extinção na natureza
Vulnerável	VU – “Vulnerable”	Quando as melhores evidências disponíveis indicam que se atingiu qualquer um dos critérios quantitativos para Vulnerável, e, por isso, considera-se que a espécie esteja enfrentando risco alto de extinção na natureza
Quase Ameaçada de Extinção	NT – “Near Threatened”	Quando, ao ser avaliada pelos critérios, a espécie não se qualifica atualmente como Criticamente em Perigo, Em Perigo ou Vulnerável, mas se aproxima dos limiares quantitativos dos critérios da IUCN, sendo provável que venha a enquadrar-se em uma categoria de ameaça em futuro próximo
Menos Preocupante	LC – “Least Concern”	Quando a espécie não se qualifica como CR, EN, VU ou NT
Dados Insuficientes	DD – “Data Deficient”	Quando não há informação adequada sobre a espécie para fazer uma avaliação direta ou indireta de seu risco de extinção, com base em sua distribuição e/ou estado populacional
Não Aplicável	NA – “Not Applicable”	Espécie que, embora registrada no Brasil, ocorre em proporção extremamente baixa no território nacional (normalmente <1% de sua população global), ou não é uma população selvagem ou é apenas uma visitante ocasional
Não Avaliada	NE – “Not Evaluated”	Espécie não avaliada pelos critérios de avaliação de risco definidos

Existem critérios bem definidos para a inserção de uma espécie nas categorias acima, mas esse detalhamento não é tratado aqui (ver <http://www.iucnredlist.org/technical-documents/categories-and-criteria>). As listas de espécies ameaçadas são revistas periodicamente, a partir de novas avaliações do estado de conservação da flora e fauna brasileiras. Os *taxa*² considerados “Críticamente em Perigo”, “Em Perigo” ou “Vulnerável” são aqueles que necessitam de ações de conservação imediatas e para os quais devem ser elaborados Planos de Ação Nacional (PAN). Estes são constituídos de políticas públicas elaboradas de forma participativa e articulada com a sociedade, a fim de identificar e orientar ações prioritárias, a serem desenvolvidas de forma multi-institucional, que venham a excluir ou minimizar as pressões e ameaças que põem em risco populações de espécies ameaçadas de extinção e os ambientes naturais em que ocorrem. No Brasil, segundo a Portaria MMA nº 43 de 2014, que institui o Programa Nacional de Conservação das Espécies Ameaçadas de Extinção (Pró-Espécies), a elaboração das listas de espécies ameaçadas da fauna e seus PANs está sob a responsabilidade do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), vinculado ao Ministério do Meio Ambiente (MMA).

Recentemente, o ICMBio tem buscado estruturar os PANs a partir de uma organização territorial e ecossistêmica, o que tende a aumentar a efetividade da articulação dos atores envolvidos e otimizar os resultados das ações propostas. O Plano de Ação Nacional para a Conservação dos Ambientes Coralíneos (PAN Corais) foi elaborado considerando essa estratégia. São agregados no conceito de “corais” desse nome, entretanto, os diferentes ambientes coralíneos e as espécies associadas de qualquer grupo animal.

Assim, envolvendo mais de uma centena de pesquisadores, técnicos, lideranças comunitárias, pescadores e empresários, foram propostos, discutidos e sistematizados objetivos e ações que visam à conservação das espécies ameaçadas de extinção que ocorrem nesses ambientes, de forma integrada à conservação dos próprios ambientes coralíneos. Este capítulo indica, resumidamente, como o PAN Corais foi elaborado e a definição de seus principais elementos de planejamento.

2. Plural de “*táxon*”:
Unidade taxonômica associada ao sistema de classificação científica, podendo ser qualquer nível de classificação: espécie, gênero, família, ordem, etc.

Os ambientes coralíneos

Os ambientes coralíneos constituem formações de recifes biogênicos (consolidados de algas e/ou corais), recifes de arenito e costões rochosos, com presença de corais, sendo encontrados desde áreas costeiras rasas até grandes profundidades. São ecossistemas frágeis e complexos, compostos por uma grande diversidade de organismos, desde espécies endêmicas até espécies mais amplamente distribuídas, que possuem diferentes graus de associação entre si, mas que dependem do equilíbrio ecológico desses ambientes. Em muitos casos, os corais atuam como “organismos engenheiros” nesses locais, pois modificam o ecossistema, aumentando sua complexidade tridimensional e permitindo um aumento na diversidade biológica presente na área.

No Brasil, recifes distribuem-se desde o Maranhão até o Sul da Bahia, sendo os únicos ecossistemas recifais coralíneos do Atlântico Sul Ocidental. Além dos recifes de algas e/ou corais e de arenito, existem diversas formações rochosas com presença de corais, que também são abordadas neste PAN, estendendo-se para o Sul, chegando até Santa Catarina. Também foram incluídos no PAN Corais os ambientes coralíneos de águas profundas, ainda muito pouco estudados no Brasil, mas que são altamente sensíveis, megadiversos, com mais de 40 espécies de corais pétreos identificadas, e que abrigam uma infinidade de espécies de peixes e invertebrados altamente dependentes da integridade dessas áreas.

Nas várias áreas ao longo do litoral brasileiro que possuem esse tipo de ambiente, podem ser observadas espécies de elevada importância ecológica, econômica e social que vêm sofrendo fortes ameaças. As principais ameaças aos ambientes coralíneos no Brasil são:

(a) Apesca desordenada, ilegal, excessiva e/ou destrutiva, que torna insustentável a manutenção das populações das espécies de interesse e das comunidades.

(b) A navegação, a atividade portuária, a mineração, a exploração de petróleo e gás e demais empreendimentos que levam ou podem levar à degradação do habitat e à perda de espécies.

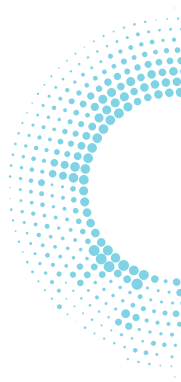
(c) A poluição química-física-biológica, a degradação de bacias hidrográficas e zonas costeiras e o aumento de sedimentação nas zonas costeiras.

(d) As espécies exóticas e invasoras.

(e) O turismo desordenado.

(f) As mudanças climáticas, que alteram as condições ambientais antes que as espécies consigam se adaptar às novas circunstâncias, ocasionando a extinção de diversas delas.

(g) Algumas políticas públicas que pressionam os ambientes coralíneos e não se dialogam, permitindo diversos impactos decorrentes das ações antrópicas.



3. Esta última lista foi oficializada através da Portaria n. 445 do Ministério do Meio Ambiente, de 17 de dezembro de 2014, publicada no Diário Oficial da União em 18 de dezembro de 2014.

A construção do PAN Corais

O processo de elaboração do PAN Corais foi constituído de três fases desenvolvidas ao longo de 2014: a fase preparatória, a de elaboração e a de consolidação.

Na fase preparatória, com 15 participantes, de diversas instituições, foram identificadas as espécies relacionadas aos ambientes coralíneos que deveriam ser tratadas no PAN, a partir da Lista Oficial das Espécies da Fauna Brasileira Ameaçadas de Extinção e da lista das espécies avaliadas no processo de Avaliação do Estado de Conservação da Fauna Brasileira³, conduzido pelo ICMBio. Foram também caracterizadas preliminarmente as áreas-foco do Plano, a partir do mapeamento e do estabelecimento de indicadores de inclusão de áreas prioritárias a serem consideradas. Tendo os produtos da fase preparatória como base, a fase de elaboração do Plano de Ação Nacional foi efetivada em uma ampla oficina, com aproximadamente 100 participantes de diferentes regiões do país, e realizada em conjunto pelo ICMBio e pelo Projeto Coral Vivo. Nela, de forma participativa, foram identificadas as principais ameaças aos ambientes coralíneos e definidos a visão de futuro, o objetivo geral e os objetivos específicos do PAN Corais. Para cada objetivo específico, foram propostas várias ações, detalhando seus articuladores, colaboradores e prazos de execução. Ao final da Oficina de Elaboração, foi criado o Grupo de Assessoramento Técnico (GAT) do PAN Corais, com a missão de desenvolver a terceira e última fase: a de consolidação do Plano, incluindo como será realizado tanto o monitoramento quanto a avaliação de sua execução. A fase de consolidação envolveu o contato e agregação de articuladores propostos na Oficina de Elaboração, bem como a análise e o detalhamento da matriz de ações propostas e também a proposição de uma matriz de metas e indicadores da execução do PAN. Essa fase foi efetivada em uma oficina, envolvendo os membros do GAT e representantes de centros de pesquisa do ICMBio, chamada de Oficina de Consolidação e contou com 23 participantes. No detalhamento da matriz de ações, procurou-se identificar eventuais sobreposições e possibilidades de articulação entre as ações propostas na fase de elaboração, com o cuidado de manter o escopo e a forma de articulação de cada ação proposta, assegurando preservar, assim, a legitimidade do processo de elaboração do PAN.

O PAN Corais foi elaborado sob a coordenação geral do Cepsul/ICMBio e a coordenação executiva do Projeto Coral Vivo, desenvolvido em parceria pela Associação Amigos do Museu Nacional, Instituto Coral Vivo e Museu Nacional/ Universidade Federal do Rio de Janeiro, além de outros institutos de pesquisa e universidades. Ele será executado com a coordenação geral do Cepsul/ICMBio e a coordenação executiva do Instituto Coral Vivo.

Visão de Futuro do PAN Corais

Comunidades e ecossistemas coralíneos conservados, recuperados e conhecidos em termos de distribuição e funcionamento, por meio da construção e implementação participativa de diretrizes para sua preservação e uso sustentável pelos atores das esferas governamentais e da sociedade civil, em especial dos usuários e beneficiários dos serviços ambientais correspondentes.

Esse Plano de Ação teve como normativa de publicação a Portaria ICMBio nº 19 de março de 2016, assim como teve instituído seu Grupo de Assessoramento Técnico por meio da Portaria ICMBio nº 106 de março de 2016.

Espécies relacionadas no PAN Corais

Inicialmente, foram identificadas 20 espécies que ocorrem nesses ambientes e que constam de forma mais dependente nas listas nacionais oficiais de espécies ameaçadas de extinção do Brasil, que estavam em vigor durante o processo de elaboração do PAN Corais (IN MMA nº5 de 2004 e IN MMA nº 52 de 2005). Por outro lado, o ICMBio já vinha conduzindo processos de Avaliação do Estado de Conservação da Fauna Brasileira – com a participação de centenas de especialistas – que resultaram na indicação de inclusão de algumas espécies e de retirada de outras. Embora essa alteração nas listas ainda não estivesse oficializada à época das oficinas do PAN Corais, que ocorreram no início de 2014, as discussões foram embasadas nesses dados atualizados sobre as espécies com indicação de ameaça. Com a publicação da Portaria MMA nº 445, em 17 de dezembro de 2014, que definiu a Lista Nacional Oficial de Espécies da Fauna Ameaçadas de Extinção – Peixes e Invertebrados Aquáticos, o PAN Corais estabeleceu estratégias prioritárias de conservação para 52 espécies de diversos grupos animais (Tabela 3). Por outro lado, 11 espécies constantes nas listas anteriores de espécies ameaçadas (2004/2005), que pelo processo de Avaliação acima referido foram retiradas de categorias de ameaça, foram consideradas como espécies “beneficiadas”, caso do peixe recifal *Gramma brasiliensis* e do ouriço-do-mar *Eucidaris tribuloides*. Cabe ressaltar que o Plano apresenta uma abordagem ecossistêmica e, portanto, alterações na lista das espécies prioritárias tendem a não alterar seu conteúdo.

Tabela 3. Grupos animais com estratégias prioritárias de conservação no PAN Corais. (N) número de espécies.

Grupo animal	N	Exemplos
Peixes ósseos	30	Cavalo-marinho (<i>Hippocampus reidi</i>), mero (<i>Epinephelus itajara</i>), budião-papagaio-banana (<i>Scarus zelindae</i> - Figura 1)
Peixes cartilaginosos	7	Tubarão-limão (<i>Negaprion brevirostris</i>), tubarão-lixo (<i>Ginglymostoma cirratum</i>), raia-manta (<i>Manta birostris</i>)
Espônjas	3	Esponja (<i>Halichondria (Halichondria) cebimarensis</i>)
Cnidários	4	Anêmona-gigante (<i>Condylactis gigantea</i>), coral-cérebro-da-bahia (<i>Mussismilia brasiliensis</i>)
Moluscos	3	Búzio-de-chapéu (<i>Eustrombus goliath</i>)
Equinodermos	5	Estrela-do-mar (<i>Oreaster reticulatus</i>)
Total	52	

Note-se que as portarias de espécies ameaçadas incluem os *táxons* (nomes científicos) e os nomes comuns (ou populares) das espécies avaliadas, o que pode criar alguma confusão entre aqueles que não estão familiarizados com esses termos. Isso ocorre porque um nome científico pode ter vários nomes populares (dependendo do costume do local ou do grupo social), e um mesmo nome popular pode ser usado para várias espécies diferentes. Tal informação pode gerar equívocos, em especial na interpretação de normas e regulamentos de uso dos recursos, tanto que consta em banco de dados internacional com informações sobre peixes (www.fishbase.org). Nele podemos observar os seguintes exemplos:

- O “mero” que está na lista é a espécie *Epinephelus itajara*. O FishBase indica 93 nomes comuns diferentes dados a essa espécie em todo o mundo, sendo 17 em português. Um desses nomes é “garoupa” (usado em parte de Portugal).
- Existem 67 espécies diferentes comumente chamadas de “mero”, quatro delas no Brasil.
- Existem 36 espécies diferentes comumente chamadas de “garoupa” em todo o mundo. Dessas, dez espécies diferentes são chamadas assim no Brasil, das quais apenas duas estão na lista de espécies ameaçadas.
- O mesmo ocorre com outros nomes, como “piaba” (41 espécies diferentes, das quais 37 no Brasil), “candiru” (16 espécies, das quais dez no Brasil), “bagre” (158 espécies, das quais 38 no Brasil). Desse universo são incluídas na Lista apenas quatro espécies denominadas “piaba”, cinco “candiru” e cinco “bagre”.

Áreas-foco

Os principais ambientes coralíneos brasileiros – incluindo desde recifes de coral a recifes de arenito e costões rochosos – foram considerados prioritários para a atuação do PAN Corais, sendo classificados “áreas-foco” (Tabela 4). Tais áreas incluem as unidades de conservação federais, estaduais e municipais onde foram relatados ambientes coralíneos bem desenvolvidos, distribuindo-se do Maranhão a Santa Catarina e incluindo ilhas oceânicas e, no caso dos recifes de águas frias, o talude continental.

Tabela 4. Áreas-foco do PAN Corais.

Áreas-foco	
1	Parcel de Manuel Luís, Álvaro e Tarol, ao largo do Maranhão
2	Urcas, riscas e Banco João da Cunha, ao largo do Ceará e do Rio Grande do Norte
3	Área de Proteção Ambiental (APA) de Fernando de Noronha, Atol das Rocas, Arquipélago de São Pedro e São Paulo e Banco Canopus, representando áreas oceânicas ao largo do Ceará e do Rio Grande do Norte, fora da plataforma continental
4	Recifes Maracajaú, Cioba, Rio do Fogo, até a Ponta de Pirangi no litoral Sul do Rio Grande do Norte
5	Área de Proteção Ambiental (APA) da Costa dos Corais, em Pernambuco e Alagoas
6	Do Norte da Reserva Biológica (Rebio) Santa Isabel até o Sul da Área de Proteção Ambiental (APA) Piaçabuçu, em Alagoas e Sergipe
7	Baía de Todos os Santos até o Norte da Península de Maraú, incluindo Boipeba, na Bahia
8	Da Reserva Extrativista (Resex) de Canavieiras ao Sul da Reserva Extrativista (Resex) do Corumbau, incluindo o Banco Royal Charlotte, na Bahia
9	Banco dos Abrolhos, na Bahia e no Espírito Santo
10	Cadeia Vitória-Trindade e bancos oceânicos ao largo do Royal Charlotte e de Abrolhos, ao largo da Bahia e do Espírito Santo
11	Ilhas de Guarapari e Piúma, no Espírito Santo
12	Oásis Coralíneos de Armação dos Búzios, Cabo Frio e Arraial do Cabo, no Rio de Janeiro
13	Ilhas Maricás e Cagarras, no Rio de Janeiro
14	Baía da Ilha Grande, incluindo Paraty e o Saco do Mamanguá, no Rio de Janeiro
15	Ilhas e costões rochosos entre Ubatuba e Peruíbe, em São Paulo
16	Ilhas e costões rochosos em São Francisco do Sul, Tamboretas e Florianópolis, em Santa Catarina
17	Talude continental superior (200-1500m de profundidade), ao largo do Rio de Janeiro até o Rio Grande do Sul
18	Transição entre a plataforma e o talude continental (50-200 m de profundidade) ao largo das áreas 2 e 4-9

Objetivos do PAN

O PAN Corais tem como objetivo geral “melhorar o estado de conservação dos ambientes coralíneos por meio da redução dos impactos antrópicos, ampliação da proteção e do conhecimento, com a promoção do uso sustentável e da justiça socioambiental”. Foram definidos dez objetivos específicos (Tabela 5), envolvendo 146 ações e mais de uma centena de articuladores e colaboradores, de várias instituições.

Tabela 5. Objetivos específicos e número de ações propostas no PAN Corais.

Objetivos específicos	Ações
1) Promover a integridade e manutenção dos habitats, dos serviços ecossistêmicos e de populações das espécies foco e beneficiadas	31
2) Controlar e monitorar a atividade pesqueira nos ambientes coralíneos	23
3) Promover a exploração sustentável dos estoques, adotando abordagem ecossistêmica	10
4) Aumentar o conhecimento sobre ambientes coralíneos ainda pouco investigados	10
5) Minimizar os conflitos de uso e impactos negativos no espaço marinho-costeiro provocados por atividades e empreendimentos que afetem direta ou indiretamente ambientes coralíneos	6
6) Ordenar a atividade turística nos ambientes coralíneos de maneira a minimizar seu impacto, considerando a socioeconomia local	16
7) Prevenir a introdução e a disseminação de espécies exóticas e invasoras nos ambientes coralíneos e avaliar e mitigar os impactos nos ambientes já afetados	11
8) Avaliar e minimizar poluição química, física, orgânica e biológica nos ambientes coralíneos	18
9) Promover a revisão, integração, inovação e efetividade de políticas públicas considerando a perspectiva da sustentabilidade dos ambientes coralíneos, nos contextos social, ambiental e econômico, ampliando e fortalecendo os mecanismos de participação e controle social na gestão de territórios	16
10) Avaliar e destacar o papel dos serviços ambientais dos ambientes coralíneos para questões relacionadas às mudanças do clima e seus impactos, bem como elaborar estratégias para mitigação e adaptação desses ambientes com base na construção de cenários específicos	5

Avaliações e planejamentos são fundamentais para organizar e priorizar ações em prol da conservação da biodiversidade, como os dois instrumentos apresentados aqui: Avaliação do Estado de Conservação e Planos de Ação Nacionais. Entretanto, a ação integrada e cooperativa dos governos, de todos os setores produtivos, da sociedade civil organizada e de cada cidadão individualmente são indispensáveis para que se tenha sucesso na empreitada de manter a qualidade de vida neste planeta.

Literatura recomendada

CASTRO, C.B.; PIRES, D.O. 2001. Brazilian coral reefs: what we already know and what is still missing. *Bulletin of Marine Science*, 69(2): 357-371.

IUCN STANDARDS AND PETITIONS SUBCOMMITTEE. 2014. *Guidelines for Using the IUCN Red List Categories and Criteria*. Version 11. Prepared by the Standards and Petitions Subcommittee. Disponível em: <<http://www.iucnredlist.org/documents/RedListGuidelines.pdf>>. Acesso em: fevereiro 2016.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, SECRETARIA DE BIODIVERSIDADE E FLORESTAS. 2006. Diretrizes e Prioridades do Plano de Ação para Implementação da Política Nacional da Biodiversidade. *Série Biodiversidade*, 22. Brasília: MMA. 80p.

Impressão e acabamento:
GRÁFICA STAMPPA LTDA.
Rua João Santana, 44 - Ramos - RJ

Realização



Copatrocinio



Patrocínio oficial

