

6. OCEANO E ZONAS COSTEIRAS

Segen Farid Estefen²⁹, Moacyr Cunha de Araujo³⁰, Regina R Rodrigues³¹, Leticia Cotrim da Cunha³¹, Margareth S Copertino³², Beatrice Padovani Ferreira³³, Flavia Lucena Frédou³⁴, Ronaldo Oliveira Cavalli³², Carlos Alberto E. Garcia³², Carla de Freitas Campos³⁵, Alexander Turra³⁶, Jose Luiz Moutinho³⁷, Win Degrave³⁸, Paulo Gadelha³⁸, Leandra Regina Gonçalves³⁸, Ronaldo Christofoletti³⁸, Wania Duleba³⁶, Milena Maltese Zuffo³⁶, Andrei Polejack²⁹

INTRODUÇÃO

O oceano já absorveu 90% do excesso de calor gerado na atmosfera pelas emissões de dióxido de carbono (CO₂), o principal causador do efeito estufa, além de absorver diretamente em suas águas 30% do próprio CO₂, como veremos na Seção 1 deste capítulo. Apesar disso, sua importância para a regulação do clima e, por consequência, para a vida no planeta, bem como seu potencial de contribuição para a adaptação às

29 Instituto Nacional de Pesquisas Oceânicas, INPO, Rio de Janeiro, RJ.

30 Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Recife, PE.

31 Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, SC.

32 Universidade Federal do Rio Grande, FURG, Rio Grande, RS.

33 Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Recife, PE.

34 Universidade Federal Rural de Pernambuco, UFRPE, Recife, PE.

35 Fundação Oswaldo Cruz, FIOCRUZ, Rio de Janeiro, RJ.

36 Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, SP.

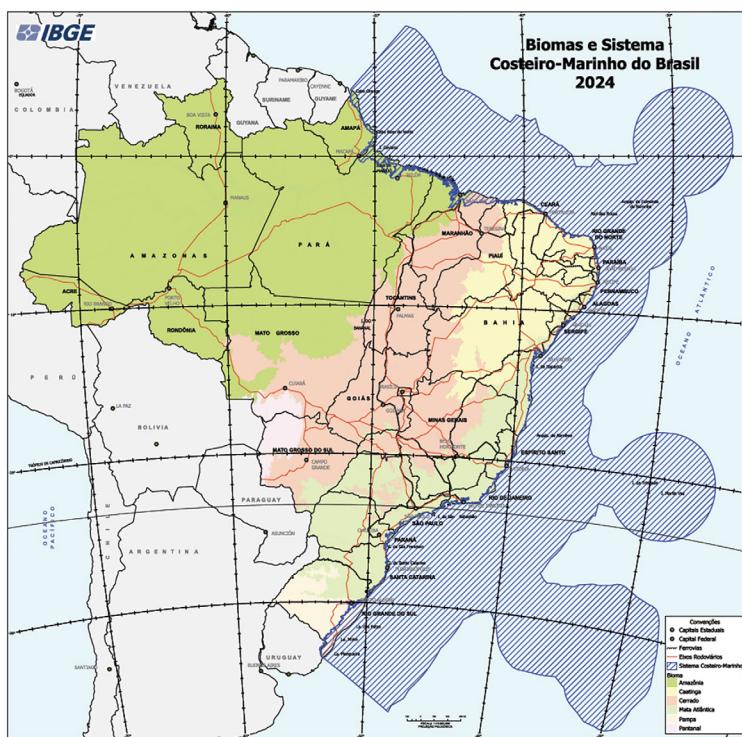
37 Ocean Quest Foundation, Thuwal, Arábia Saudita.

38 Universidade Federal de São Paulo, UNIFESP, Santos, SP.

Autores correspondentes: segen.estefen@inpo.org.br e moa.ufpe@gmail.com

mudanças climáticas têm permanecido pouco conhecidos pela sociedade em geral e suas lideranças políticas, econômicas e sociais.

Com mais de 8.500 quilômetros de linha de costa, o Brasil tem jurisdição sobre um total de 5,7 milhões de quilômetros quadrados de oceano, o que equivale a mais da metade do território nacional. É a chamada Amazônia Azul, que inclui a Zona Econômica Exclusiva (ZEE) de 4,5 milhões de quilômetros quadrados.



O território continental e a Amazônia Azul (IBGE, 2024)

Se toda essa grandeza oferece a oportunidade de aproveitamento dos recursos econômicos marinhos, também significa que o país está especialmente vulnerável aos impactos do aumento de temperatura do oceano, da elevação do nível do mar, da acidificação da água e da redução da concentração de oxigênio. A região costeira e oceânica brasileira abriga uma grande diversidade de ambientes, compreendendo lagoas, baías, enseadas, deltas de rios, planícies, manguezais, restingas, recifes de corais, pradarias de gramas marinhas e áreas de ressurgência, entre

outros. Esses ecossistemas apresentam diferentes níveis de vulnerabilidades às mudanças climáticas, como mostrado nas Seções 2 e 3.

A ciência brasileira já detectou alterações na abundância das espécies e na estrutura das comunidades de costões rochosos, praias, baías e lagoas costeiras, manguezais, bancos de macroalgas e pradarias de gramas marinhas. Especialmente impactados estão os manguezais e recifes de corais brasileiros, temas tratados nas Seções 3, 4 e 5. Embora ocupem apenas 0,1% do fundo do oceano, os recifes abrigam cerca de 25% a 30% de todas as espécies marinhas conhecidas, incluindo 65% dos peixes. São comparáveis em diversidade às florestas tropicais, sustentam comunidades humanas, fornecem alimento através da pesca, movimentam o turismo, produzem compostos bioativos com potencial farmacêutico e protegem o litoral contra a erosão causada pelas ondas. Daí os repetidos alertas da ciência para os eventos de branqueamento e morte de corais, que se intensificaram nas últimas duas décadas, afetando mais de 26 espécies. Além de seu papel na biodiversidade marinha, os recifes de corais reduzem a energia das ondas, assim protegendo a costa da erosão e das inundações.

Já no limite entre terra e mar, as florestas de manguezais, além de funcionarem como barreiras físicas à erosão, acumulam em seu solo até três vezes mais carbono do que as florestas tropicais terrestres. Além dos impactos diretos do aquecimento, estão expostas a outros estressores, como o desmatamento para a urbanização.

Se, de um lado, perdem espaço pelo desmatamento e a urbanização, de outro lado os manguezais estão sofrendo reconfigurações provocadas pelas mudanças climáticas, que os levam a tomar o espaço de outros ambientes costeiros.

O deslocamento de espécies tropicais para regiões extratropicais, em busca de águas menos quentes, é uma das consequências mais comuns do aumento da temperatura da água do mar. Na costa brasileira, tal deslocamento de espécies, das águas quentes do Nordeste para as águas mais temperadas do Sul, tem sido observado para invertebrados, peixes, macroalgas e gramas marinhas. Além do aquecimento gradual das águas, as ondas de calor marinhas no Atlântico Sudoeste (entre Cabo Frio e Argentina) vêm afetando a disponibilidade de larvas de invertebrados e reduzindo a quantidade de pescado. As consequências das mudanças climáticas para a pesca industrial e artesanal e para o setor de aquicultura estão descritas na Seção 6.

Já na Seção 7, vemos que a ciência brasileira tem uma razoável infraestrutura de monitoramento e observação oceânica e costeira; ferramentas de modelagem para previsão de tendências e uma extensa rede de cooperação nacional e global de pesquisas essenciais para compreender as mudanças no clima e no oceano, proteger os ecossistemas e apoiar políticas públicas. Mas persistem lacunas de cobertura e integração para dar conta das especificidades locais da nossa vasta Amazônia Azul.

Uma boa notícia é que, nas próprias águas costeiras e oceânicas, há oportunidades para o enfrentamento das mudanças climáticas, através de medidas de mitigação, de adaptação e mesmo uma combinação dos dois tipos. Na Seção 4, por exemplo, são destacadas as chamadas Soluções Baseadas na Natureza (SBNs), que, como o nome indica, utilizam ou se inspiram em processos naturais, dos próprios ecossistemas, para enfrentar problemas ambientais. Já a Seção 8 descreve as múltiplas fontes de energia renovável disponíveis no mar – entre as quais o movimento das ondas e marés, o gradiente térmico, o vento e a possibilidade de gerar produtos a partir dessas fontes, como hidrogênio verde e água dessalinizada – para que façamos a transição energética baseada em fontes renováveis.

As quatro últimas seções desenvolvem aspectos relativamente recentes no campo das ciências do mar e das mudanças climáticas, que vão além dos aspectos físicos, biológicos e tecnológicos. Trata-se da necessidade imperativa de uma mudança de visão, de cultura e de comportamento nas instituições de Estado, no setor produtivo e na sociedade em geral. A Seção 9 mostra que é imprescindível compreendermos a relação entre oceano e saúde, lembrando que o mar é, ao mesmo tempo, fonte de bem-estar físico e mental e vetor de doenças. Por isso deve ser incorporado nas políticas de saúde pública.

O desenvolvimento de uma justiça climática, capaz de levar em conta as disparidades dos impactos das mudanças do clima, que afetam com mais intensidade as populações mais frágeis do ponto de vista econômico e social, é o tema da Seção 10. Por sua vez, a Seção 11 descreve esforços numa área em que o Brasil é protagonista: a disseminação, através de ações de educação e comunicação, de uma cultura oceânica – ou seja, a compreensão de como o oceano está presente e afeta nossas vidas, mesmo para quem vive longe dele, e de como nossas ações também o afetam.

Finalmente, a Seção 12 mostra que, para que as ideias, tecnologias e ações propostas para o enfrentamento dos impactos da crise climática

no oceano sejam implementadas e funcionem, é fundamental estabelecer uma governança oceânica e costeira, com a estruturação de normas, instituições, políticas e práticas voltadas à mitigação dos impactos e à adaptação. A interseção dos regimes de governança do oceano e do clima representa não apenas uma necessidade ambiental urgente, mas também uma oportunidade estratégica de liderança científica e diplomática do Brasil no cenário internacional.

6.1 Clima e oceano

Regina R. Rodrigues

Cobrindo 70% da superfície da Terra, o oceano desempenha um papel crucial na regulação do clima do planeta e é essencial para nossa resposta ao aquecimento global, causado pelos gases de efeito estufa gerados pelas atividades humanas, e suas consequentes mudanças climáticas. Em seu papel de regulador do clima, o oceano já absorveu 90% do excesso de calor gerado na atmosfera (1) pelas emissões de dióxido de carbono (CO_2), o maior causador do efeito estufa, além de absorver diretamente em suas águas 30% do próprio CO_2 .

O aquecimento provoca a elevação do nível do mar, devido à expansão térmica da água do oceano e ao derretimento acelerado das camadas de gelo do planeta. Além disso, o aumento da temperatura da água também significa a redução da concentração de oxigênio e nutrientes presentes no mar e essenciais à manutenção da vida marinha. Esta ainda é prejudicada pelo CO_2 absorvido pela água, que fica mais ácida. A combinação de aquecimento, desoxigenação e acidificação do oceano tem um impacto devastador para os ecossistemas marinhos, principalmente em áreas de alta produtividade biológica e importância econômica.

Se, de um lado, o oceano ajuda a reduzir a concentração de carbono na atmosfera, mitigando o aquecimento do ar, por outro lado contribui, com suas águas mais quentes, para os eventos climáticos extremos, como secas, excesso de chuvas e furacões, que se tornaram mais frequentes e intensos.

O conteúdo de calor na água do mar tem aumentado constantemente desde o início das medições em 1955, quebrando recordes em 2023, conforme mostrado na Figura 1. A maior parte da energia adicional é armazenada em uma camada superficial, de 0 a 700 metros de profundidade. E desde pelo menos o século 19, quando a temperatura de suas águas começou a ser medida, os últimos 10 anos foram a década mais quente do oceano. O recorde foi registrado em 2024.

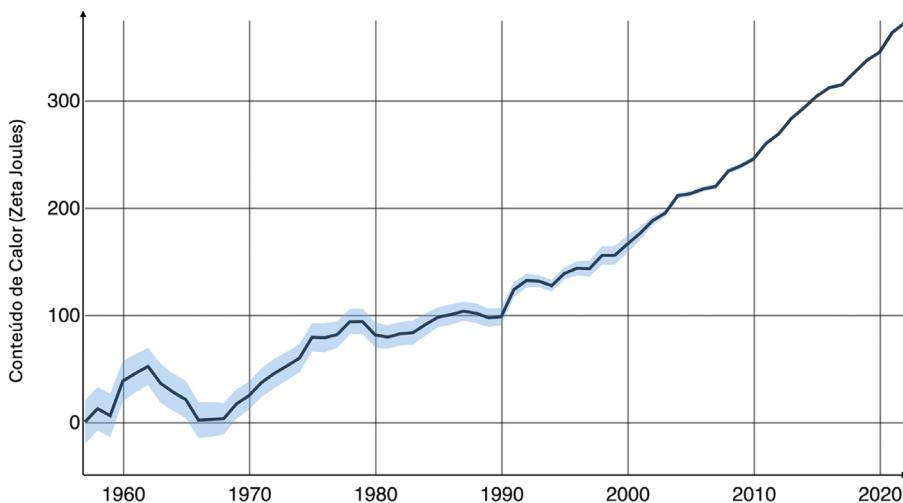


Figura 1: Estimativas anuais de conteúdo de calor para os primeiros 2.000 metros de profundidade do oceano em Zeta Joules (1021 Joules). Cada ponto representa uma média de cinco anos. A região sombreada em azul indica a margem de incerteza dentro do intervalo de confiança de 95%. Fonte: *Climate NASA*.

Todo esse calor adicional leva a mais eventos de temperatura extrema no oceano, chamados de ondas de calor marinhas. Estudos recentes, de caráter global, mostram um aumento significativo na frequência, duração e intensidade das ondas de calor marinhas em todo o planeta (2,3). Outras pesquisas foram conduzidas para eventos específicos que ocorreram no Pacífico Norte, Atlântico Norte, Austrália Ocidental e Mar Mediterrâneo (4,5).

As ondas de calor marinhas podem ser causadas por processos atmosféricos ou oceânicos, dependendo do evento e da localidade (6). Têm um impacto devastador para ecossistemas marinhos (7). Por exemplo, o evento que ocorreu no Mediterrâneo em 2003 causou uma mortalidade em massa de pelo menos 25 espécies de invertebrados de costões rochosos (8). Já a onda de calor marinha que ocorreu no noroeste do Oceano Atlântico em 2012 teve um impacto nos pescados de grande importância comercial (9). As ondas de calor podem ter efeitos negativos até em aves e outros animais marinhos (10).

Um estudo em nível global avaliou os impactos das ondas de calor marinhas para as sociedades humanas. Os danos ecológicos, que variaram desde proliferação de algas nocivas e eventos de mortalidade

em massa até reconfigurações de ecossistemas inteiros, resultaram em custos econômicos superiores a US\$ 800 milhões em perdas diretas e US\$ 3,1 bilhões em perdas indiretas de serviços ecossistêmicos por vários anos (11).

O nível do mar já subiu mais de 101 milímetros desde o início das medições em 1992, aumentando as inundações costeiras em alguns locais. De um terço a metade dessa elevação é atribuído à expansão da água pelo calor armazenado (12). Mas esta não é a única razão. O calor adicional no ar e no oceano também está derretendo as camadas de gelo e geleiras do planeta, o que adiciona água doce ao oceano e eleva ainda mais o nível do mar (13).

O gelo marinho também se derrete e, embora não afete o nível do mar, impacta as temperaturas globais: o gelo marinho tem coloração clara e reflete a luz solar de volta para o espaço; já as águas abertas são mais escuras e absorvem mais luz solar. O aquecimento das águas oceânicas derrete o gelo marinho por baixo; o ar mais quente ajuda a derretê-lo por cima. À medida que a camada de gelo se afina e encolhe, mais oceano fica exposto e menos luz solar é refletida, aquecendo ainda mais a água e o ar.

As correntes oceânicas são transportadoras vitais de calor ao redor do planeta. À medida que as camadas de gelo da Groenlândia e da Antártida derretem, o excesso de água doce que corre para o oceano pode perturbar o equilíbrio de temperatura e salinidade que impulsiona as correntes oceânicas profundas. A circulação profunda do oceano pode ficar mais lenta.

Quanto mais quente estiver o oceano, mais energia e umidade ele fornece para a atmosfera. Por isso é capaz de alimentar tempestades extremas, como furacões, tufões, ciclones tropicais ou extratropicais. Essas tempestades precisam de água quente para se formar e se fortalecer. Pesquisas recentes apontam para o aumento das temperaturas oceânicas como um fator-chave para a rápida intensificação de furacões (14). Além disso, níveis mais altos do mar agravam as inundações causadas por mares de tempestade quando esta se desloca sobre o litoral.

O oceano também atua como uma esponja que absorve dióxido de carbono da atmosfera. O aumento das emissões de CO₂ pelas atividades humanas e sua absorção pelo oceano faz com que a água se torne mais ácida, o que está acontecendo agora a uma taxa mais rápida do que em qualquer outro momento nos últimos 300 milhões de anos.

À medida que o oceano se torna mais ácido, os corais e outros organismos marinhos têm dificuldade para formar suas estruturas e sua velocidade de crescimento diminui. Isso ocorre porque os esqueletos de coral são feitos de um tipo de carbonato de cálcio. Quando o dióxido de carbono vindo da atmosfera é adicionado à água, ocorrem reações químicas que levam à ligação de íons carbonato com o excesso de íons de hidrogênio em vez de íons de cálcio. Isso prejudica a calcificação dos esqueletos de diversos animais marinhos. Se a água se tornar muito ácida, pode até dissolver essas estruturas. As ondas de calor marinhas estão complicando a situação, tornando a água quente demais para a sobrevivência de muitos corais. As previsões atuais para as emissões de gases de efeito estufa colocam quase todos os corais de recife em um caminho de quase extinção, se não houver intervenção humana. Tomar medidas urgentes para atingir os níveis de emissão pré-industriais permitirá que os corais e outras formas de vida se recuperem.

No Brasil, a pesquisa sobre oceano e clima tem avançado. Estudos recentes identificaram a ocorrência de extremos oceânicos no Atlântico Sul, não só de ondas de calor marinhas e sua ligação com extremos de precipitação sobre o Brasil (15), mas também de acidificação e baixa concentração de clorofila (16), com seus impactos no branqueamento dos corais (17). Outros estudos mostram que ondas de calor marinhas estão impactando espécies ao longo da costa brasileira, podendo reduzir a ocorrência de espécies de interesse comercial (18).

À medida que aumentam os desafios dos extremos oceânicos para as áreas costeiras, medidas de mitigação (redução das emissões de gases do efeito estufa, para não agravar as mudanças climáticas) e de adaptação às mudanças já instaladas (para aumentar a resiliência dos ecossistemas e das populações costeiras), devem ser objetivos-chave no planejamento e implementação de políticas públicas nas zonas costeiras. O oceano oferece muitas oportunidades de mitigação e adaptação.

Para impedir um aumento ainda maior do aquecimento, da acidificação e da desoxigenação da água do mar, é imprescindível uma redução nas emissões dos gases do efeito estufa. Para tal, o Brasil deve fazer uma transição para energia renovável. E o oceano oferece grandes oportunidades, como implementação de energia eólica offshore e energia das mares. O Brasil deve desenvolver pesquisas para avançar nessas áreas de grande potencial. Além disso, ambientes marinhos e costeiros têm grande capacidade de sequestro de carbono. Portanto, a preservação e restaura-

ção desses ambientes pode contribuir com a redução das emissões. Essas medidas baseadas na natureza também são eficientes em proteger as zonas costeiras contra tempestades e ressacas, ou seja, são igualmente medidas de adaptação.

A adaptação bem-sucedida baseia-se em uma ampla gama de recursos, desde a modelagem baseada na ciência até o conhecimento da comunidade local e abrange muitos tipos de intervenções, desde estruturas projetadas até as chamadas Soluções Baseadas na Natureza. Em particular, os modelos climáticos da próxima geração fornecerão detalhes sem precedentes sobre os impactos climáticos locais. Estes ajudarão a melhorar os sistemas de alerta precoce e podem ser integrados na preparação para desastres e na adaptação a longo prazo. O investimento em plataformas de observação *in situ* é necessário para melhorar as condições iniciais de previsão e fornecer a chamada “verdade do terreno” para previsões e projeções de modelos. As soluções que se adaptam às mudanças climáticas podem gerar vários cobenefícios, incluindo o progresso em direção aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU. A pesquisa interdisciplinar é essencial para identificar os cobenefícios e as compensações das estratégias de adaptação para otimizar seu planejamento e implementação.

REFERÊNCIAS

1. K. Von Schuckmann et al., Heat stored in the earth system: Where does the energy go? The GCOS earth heat inventory team. *Earth System Science Data Discussions*, 1-45 (2020).
2. E.C. Oliver et al., Longer and more frequent marine heatwaves over the past century. *Nature Communications* 9, 1-12 (2018).
3. J. Terhaar, F.A. Burger, L. Vogt, L., T.L. Frölicher, T.F. Stocker, Record sea surface temperature jump in 2023–2024 unlikely but not unexpected. *Nature* 639(8056), 942-946 (2025).
4. H.A. Scannell, A.J. Pershing, M.A. Alexander, A.C. Thomas, K.E. Mills, Frequency of marine heatwaves in the North Atlantic and North Pacific since 1950. *Geophysical Research Letters* 43, 2069–2076 (2016).
5. A.J. Hobday et al., A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography* 141, 227-238 (2016).
6. N.J. Holbrook et al., A global assessment of marine heatwaves and their drivers. *Nature Communications* 10, 2624 (2019).

7. D.A. Smale et al., Marine heatwaves threaten global biodiversity and the provision of ecosystem services. *Nature Climate Change* 9, 306 (2019).
8. J. Garrabou et al., Mass mortality in Northwestern Mediterranean rocky benthic communities: effects of the 2003 heat wave. *Global Change Biology* 15, 1090-1103 (2009).
9. K.E. Mills et al., Fisheries management in a changing climate: lessons from the 2012 ocean heat wave in the Northwest Atlantic. *Oceanography* 26, 191-195 (2013).
10. L.M. Cavole et al., Biological impacts of the 2013–2015 warm-water anomaly in the Northeast Pacific: winners, losers, and the future. *Oceanography* 29, 273-285 (2016).
11. K.E. Smith et al., Socioeconomic impacts of marine heatwaves: Global issues and opportunities. *Science* 374(6566), eabj3593 (2021).
12. R.J. Nicholls et al., A global analysis of subsidence, relative sea-level change and coastal flood exposure. *Nature Climate Change* 11(4), 338-342 (2021).
13. E. Rignot, Observations of grounding zones are the missing key to understand ice melt in Antarctica. *Nature Climate Change* 13(10), 1010-1013 (2023).
14. K.T. Bhatia et al., Recent increases in tropical cyclone intensification rates. *Nature Communications* 10(1), 635 (2019).
15. R.R. Rodrigues, A.S. Taschetto, A.S. Gupta, G.R. Foltz, Common cause for severe droughts in South America and marine heatwaves in the South Atlantic. *Nature Geoscience* 12(8), 620-626 (2019).
16. R.R. Rodrigues et al., Extreme compound events in the equatorial and South Atlantic. *Nature Communications* 16(1), 3183 (2025a).
17. R.R. Rodrigues, A.H. Gonçalves Neto, E.A. Vieira, G.O. Longo, The severe 2020 coral bleaching event in the tropical Atlantic linked to marine heatwaves. *Communications Earth & Environment* 6(1), 208 (2025b).
18. J.A.A. Perez, R. Sant'Ana, Tropicalization of demersal megafauna in the western South Atlantic since 2013. *Communications Earth & Environment* 3(1), 227 (2022).

6.2 Vulnerabilidade e resiliência costeira e oceânica

Moacyr Cunha de Araujo Filho

O oceano aquece mais lentamente do que a atmosfera, mas também esfria mais lentamente. A manutenção do calor acumulado na água do mar por mais tempo que o da atmosfera torna o aquecimento do oceano um processo permanente e quase irreversível. Em consequência do aumento contínuo de suas temperaturas, observado principalmente nos últimos 100 anos, a capacidade do mar de absorver o excesso de dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera se reduz. Estamos perdendo progressivamente um importante aliado na luta pela redução do carbono atmosférico.

De fato, a ciência tem alertado que a “saúde” do oceano está pior do que se pensava e que o tempo para proteger os ecossistemas marinhos está se esgotando rapidamente. Duas consequências do excesso de carbono absorvido pelo mar são a acidificação (aumento da acidez) e a desoxigenação (redução do oxigênio) em suas águas, com impactos negativos para a vida marinha.

A acidificação, por exemplo, apelidada de “gêmea maligna” da crise climática, ocorre quando o dióxido de carbono é absorvido pela água do mar. O excesso de CO_2 absorvido reduz a concentração de carbonato de cálcio na água do mar, prejudicando a vida em recifes de coral e outros habitats marinhos. Em casos graves, até as conchas de moluscos marinhos, como ostras e mariscos, que dependem dessas estruturas calcificadas para sobreviver, podem se dissolver.

Até há pouco tempo, não se considerava que a acidificação houvesse ultrapassado sua “fronteira planetária”, mas um novo estudo revelou que esse limite foi atingido em 2020 e até ultrapassado em algumas regiões (1). As fronteiras planetárias representam limites naturais de sistemas globais essenciais, como o clima e a biodiversidade, além dos quais a capacidade de manter um planeta saudável pode ser comprometida. No caso da acidificação do oceano, foi constatado que em 2020 as condições médias globais estavam muito próximas do limite aceitável de redu-

ção da concentração de carbonato de cálcio nas águas do mar: não mais que 20% em relação aos níveis existentes antes da Revolução Industrial. Em algumas regiões, já haviam até ultrapassado esse limite, resultando em declínios significativos em habitats importantes, como recifes de coral tropicais e subtropicais.

Os especialistas destacam que a única maneira de lidar com a acidificação globalmente é reduzir as emissões de CO₂.

A situação na zona costeira não é menos crítica, uma vez que se trata do local onde ocorrem majoritariamente as ações humanas. Essa região tem se tornado o palco em que os efeitos das mudanças do clima são exibidos quase diariamente. Ondas de calor fortalecidas por um oceano excessivamente quente atingem nossas cidades e a saúde das populações costeiras; eventos extremos de precipitação produzem inundações e deslizamentos de encostas; e, não menos grave, o aumento contínuo do nível do mar corrói progressivamente nossa linha de costa, com uma ampla gama de consequências negativas.

Todos esses processos têm causado mortes e perdas irreversíveis e se devem em muito à elevada vulnerabilidade da nossa zona costeira, entendendo-se vulnerabilidade como a combinação entre a ação atípica de forças da natureza e a capacidade de enfrentarmos essas novas forças.

Considerando a tendência inequívoca de continuarmos aquecendo o planeta para além do 1,5°C idealizado pelo Acordo de Paris, é de se esperar que forças naturais atípicas se tornem cada vez mais frequentes e intensas até o final do século. A questão principal passa a ser, então, como podemos reduzir a vulnerabilidade e aumentar a resiliência de nossa zona costeira.

O aumento observado do nível do mar pode, por exemplo, aumentar a erosão das linhas de costa, contribuir para inundações e aumentar o fluxo de água salgada para estuários e aquíferos subterrâneos próximos do litoral, tornando a infraestrutura costeira mais vulnerável a danos causados por eventos climáticos extremos.

A verdade é que não só os níveis globais do mar estão subindo, mas a velocidade em que isso ocorre está aumentando. Esse incremento se dá, sobretudo, pela ação combinada de dois processos principais: a expansão térmica da água, à medida que ela se aquece, e a adição de água doce ao oceano por meio do derretimento de camadas de gelo terrestres e geleiras.

De acordo com o Sexto Relatório de Avaliação do IPCC, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (2), a taxa média de elevação do nível do mar, que foi de 1,3 mm ao ano entre 1901 e 1971, subiu para 3,7 mm ao ano entre 2006 e 2018. Ou seja, a velocidade média de aumento do nível do mar praticamente triplicou nos últimos 10 anos, quando comparada ao registrado no século passado inteiro. E ainda: em 2024, com o oceano superaquecido, o nível global do mar subiu ainda mais rapidamente do que o esperado, principalmente devido à expansão da água do mar. Nos últimos anos, cerca de dois terços da elevação do nível do mar foram devidos ao derretimento de camadas de gelo e geleiras, e cerca de um terço veio da expansão térmica da água do mar. Mas em 2024 essas contribuições se inverteram, com dois terços da elevação do nível do mar vindos da expansão térmica. De acordo com a análise liderada pela NASA, a agência espacial dos Estados Unidos, a velocidade de aumento do nível médio do mar em 2024 foi de 5,9 mm por ano, superando a expectativa de que ficaria em 4,3 mm ao ano.

A ciência brasileira vem contribuindo intensamente para o entendimento do tema das vulnerabilidades e resiliência das regiões oceânicas e costeiras às mudanças climáticas. Cerca de 180 artigos científicos, livros e capítulos de livros, realizados principalmente nos últimos 15 anos, foram produzidos por equipes de pesquisadores(as) lotados(as) em instituições nacionais de ciência e tecnologia, com destaque para as equipes das universidades públicas e das sub-redes Oceanos e Zonas Costeiras da Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais (Rede Clima) e do Centro de Síntese em Mudanças Ambientais e Climáticas (SIMACLIM).

Os principais pontos são relacionados à ampliação do conhecimento sobre:

1. Avariabilidade do fenômeno El Niño no Pacífico Sul (El Niño Southern Oscillation) e sua influência remota nos padrões de precipitação no Brasil, bem como as consequências socioeconômicas associadas.
2. A biogeoquímica marinha dos ciclos do carbono e do oxigênio, com destaque para os estudos de fluxos de CO₂, em estuários, plataformas e região oceânica, e os processos de acidificação e de redução de concentração de oxigênio dissolvido decorrentes do aquecimento da água do mar.

3. A variabilidade da Circulação de Revolvimento Meridional do Atlântico (Atlantic Meridional Overturning Circulation – AMOC), a principal corrente oceânica de regulação do clima. O foco das pesquisas brasileiras é a região oceânica adjacente à borda oeste do Atlântico Tropical e Sul.
4. As variações observadas no Amazon River Ocean Continuum (AROC), a região de interface do rio Amazonas com o Oceano Atlântico. Os estudos brasileiros investigam o balanço de quantidade de movimento, sal, nutrientes e calor no Atlântico tropical decorrentes das mudanças do clima.
5. A variabilidade de ocorrência e de intensidade das ondas de calor oceânicas e de suas consequências nas cidades brasileiras.
6. As alterações na variabilidade das trocas oceano-atmosfera de calor no Atlântico Tropical e Sul, derivadas das mudanças climáticas.
7. O papel do oceano Atlântico Tropical, Atlântico Sul e Antártico no aumento de intensidade e frequência de eventos climáticos extremos (excessos de precipitação e de secas) nas diferentes regiões do Brasil e da América do Sul.
8. A variação do aumento do nível do mar na borda oeste do Atlântico, com foco na análise de cenários futuros climáticos e na elevada vulnerabilidade da região costeira brasileira.
9. A perda de biodiversidade marinha brasileira derivada das mudanças do clima, e seus impactos socioeconômicos e nos serviços ecossistêmicos associados.
10. A utilização de Soluções Baseadas na Natureza como estratégia de adaptação na região costeira do Brasil, com foco na criação de Áreas Marinhas Protegidas associadas aos sistemas coralíneos e aos manguezais.
11. O papel, a importância e a viabilidade tecnológica e econômica da implantação de energias oceânicas renováveis (eólica inshore e offshore, conversão térmica, correntes, ondas e marés) como parte do processo de transição energética em curso no Brasil.

Destaca-se também a participação de cientistas marinhos brasileiros no Capítulo de Oceano do Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (2021), além da elaboração da 3^a, e da 4^a Comunicação do Brasil à Convenção-quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change). Esses docu-

mentos incluíram a avaliação dos Inventários Nacionais de Emissões de Gases de Efeito Estufa, cenários de projeção climática atualizados e reavaliação das vulnerabilidades e das medidas de adaptação para o país.

No que diz respeito às políticas públicas, houve participação ativa da comunidade científica marinha brasileira na coordenação dos trabalhos do GT 1 Base Científica das Mudanças Climáticas do PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (2016-2017); na Rede Clima – Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais (2014-2025); no CONAPA – Comitê Nacional de Pesquisas Antárticas - 2023-2025); e mais recentemente, na criação e implantação do INPO – Instituto Nacional de Pesquisas Oceânicas (2023-2024).

Internacionalmente, destacam-se as contribuições brasileiras no processo de elaboração do Atlantic Ocean Observing System Blueprint (2018-2019); do Tropical Atlantic Observing System - TAOS Review (2018-2021); do Atlantic Ocean Observing System Blueprint (2018-2019); e no Life Science Group do Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR), assim como na coordenação do Projeto PIRATA - Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic (2014-2022).

Por fim, algumas obras mais recentes que trazem o estado da arte da ciência oceânica e climática nacional merecem destaque. Essas produções trazem contribuições para a identificação das áreas onde as políticas podem ter maior impacto na promoção da sustentabilidade oceânica, alinhando-se com os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODS) relevantes, como o ODS 14 - Vida na Água (3, 4, 5). Há também contribuições para o entendimento da Economia Azul como vetor para o desenvolvimento do Brasil (6, 7); para a identificação dos impactos das mudanças climáticas nos ambientes marinhos brasileiros e uma revisão sobre circulação, biogeoquímica e fluxos de CO₂ entre o oceano e a atmosfera no Oceano Atlântico tropical (8). Acrescente-se a isso o diagnóstico brasileiro marinho-costeiro de biodiversidade e serviços ecossistêmicos (9, 10, 11); e a síntese dos pontos relevantes ao Brasil contidos no 6º Relatório de Avaliação do IPCC, que aborda vários aspectos do conhecimento mais atualizado sobre o desafio que a mudança do clima representa para o país (6, 12).

REFERÊNCIAS

1. H.S. Findlay, R.A. Feely, L.Q. Jiang, G. Pelletier, N. Bednarsek, Ocean Acidification: Another Planetary Boundary Crossed. *Global Change Biology* (2025), doi 10.1111/gcb.70238.
2. IPCC, “Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”, V. Masson-Delmotte et al., Eds. (Cambridge University Press, 2021), doi:10.1017/9781009157896.
3. L.C. Da Cunha, L.Q. Pinho, G.A.O Moser, C. Russi, “Por Um Oceano Sustentável” in Políticas Públicas e os ODS da Agenda 2030, A. C. Warpechowski, H.H.A.M. Godinho, S.N. locken, Eds. (Fórum, 2021).
4. C. Cunha, “Coastal Nutrient Supply and Global Ocean Biogeochemistry” in Life Below Water. *Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*, W. Leal Filho, A.M. Azul, L. Brandli, A.L. Salvia, T. Wall, Eds. (Springer, Cham. 2022). Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-98536-7_115 [Acessado em 25 de junho de 2025].
5. M. Araujo et al., “Circulation, Biogeochemical Cycles and CO₂ Flux Variability in the Tropical Atlantic Ocean” in *Tropical Marine Environments of Brazil: Spatio-Temporal Heterogeneities and Responses to Climate Changes*, J. M. L. Dominguez, R. K. P. Kikuchi, M. Araujo, R. Schwamborn, H. Vital, Orgs. (Springer Nature 2023), v. 1, pp. 231-264.
6. M. Araujo, L.C. Cunha, G.A. Hounsou-Gbo, R.R. Rodrigues, C.A. D. Lentini, “Oceano e Clima: Novos Desafios Advindos com as Mudanças Climáticas” in *Economia Azul: Vetor para o Desenvolvimento do Brasil*, T. Santos, A. P. Beirão, M. C. Araujo, A. B. Carvalho, Orgs. (Essential Idea Editora Ltda, 2022), v. 1, pp. 397-430.
7. T. Santos, A.P. Beirão, M.C. Araujo, A.B. Carvalho, *Economia Azul: Vetor para o desenvolvimento do Brasil* (Essential Idea Editora, 2022). Disponível em: https://www.marinha.mil.br/sites/all/modules/livro_economia_azul/arquivo.pdf [Acessado em 25 de junho de 2025].
8. J.M.L. Dominguez, R.K.P. Kikuchi, M. Araujo, R. Schwamborn, H. Vital, *Tropical Marine Environments of Brazil* (Springer, 2023), 266 p., doi 10.1007/978-3-031-21329-8.
9. M.S. Copertino et al., “Histórico de Mudança e o Estado Atual da Biodiversidade da Zona Marinha-Costeira” in *1º Diagnóstico Brasileiro Marinho-Costeiro sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos*, C.S. Seixas, A. Turra, B.P. Ferreira, Eds. (Plataforma Brasileira de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos (BPBES) e Cátedra Unesco para a Sustentabilidade do Oceano, 2023), pp. 62-127, doi:10.4322/978-65-01-27749-3.

10. W.C. de Sousa Júnior WC et al., “Cenários de Transformação da Zona Marinha-Costeira” in *1º Diagnóstico Brasileiro Marinho-Costeiro sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos*, C.S. Seixas, A. Turra, B.P. Ferreira, Eds. (Plataforma Brasileira de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos (BPBES) e Cátedra Unesco para a Sustentabilidade do Oceano, 2023), cap. 04, pp. 170-217, doi 10.4322/978-65-01-27749-3.
11. C.S. Seixas, A. Turra, B.P. Ferreira, *1º Diagnóstico Brasileiro Marinho-Costeiro sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos* (Plataforma Brasileira de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos e Cátedra Unesco para a Sustentabilidade do Oceano, 2023).
12. C.A.W. C. Coelho et al., *Mudança do Clima no Brasil: Síntese Atualizada e Perspectivas para Decisões Estratégicas* (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2024), 106 p. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/arquivos/Relatorio_Mudanca_Clima_Brasil_v2025.pdf [Acessado em 25 de julho de 2025].

AGRADECIMENTOS

Um reconhecimento especial aos/as cientistas da Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais – Rede Clima e do Centro de Síntese em Mudanças Ambientais e Climáticas – SIMACLIM, por sua dedicação e compromisso público.

6.3 Acidificação do oceano

Leticia Cotrim da Cunha

Já sabemos que as mudanças climáticas são inequivocamente provocadas pela emissão antropogênica de gases de efeito estufa. Além do aumento da temperatura média na superfície terrestre, alterações climáticas e no ciclo hidrológico, o oceano também é afetado em sua totalidade (1).

Cerca de 90% do excesso de calor provocado pelo acúmulo de gases de efeito estufa na atmosfera já foi absorvido pelo oceano, e todos os anos cerca de 1/4 das emissões antropogênicas de CO₂ também é absorvido. Eses impactos já são perceptíveis, e infelizmente são irreversíveis na escala de tempo da vida humana (2). É importante lembrar que, apesar de termos registros sedimentares de mudanças climáticas no passado do planeta, não há nada comparável com as mudanças provocadas pelo homem nos últimos 150 anos. Os registros do passado geológico (na escala de tempo acima de dezenas de milhares de anos) indicam que processos de mudança, incluindo a acidificação, levaram alguns milhares de anos (3).

A absorção pelo oceano do CO₂ em excesso na atmosfera leva a uma reação com a água do mar, que por sua vez leva à formação de ácido carbônico (H₂CO₃). Esse ácido sofre dissociação química e o resultado é a diminuição do pH da água do mar, com redução na disponibilidade de íons carbonato (CO₃⁻²). Os íons carbonato são importantes para muitos organismos, desde o microscópico fitoplâncton, até organismos construtores de recifes, como os corais (4) e outros animais marinhos, como os moluscos, que têm estruturas de carbonato de cálcio (CaCO₃, Figura 1).

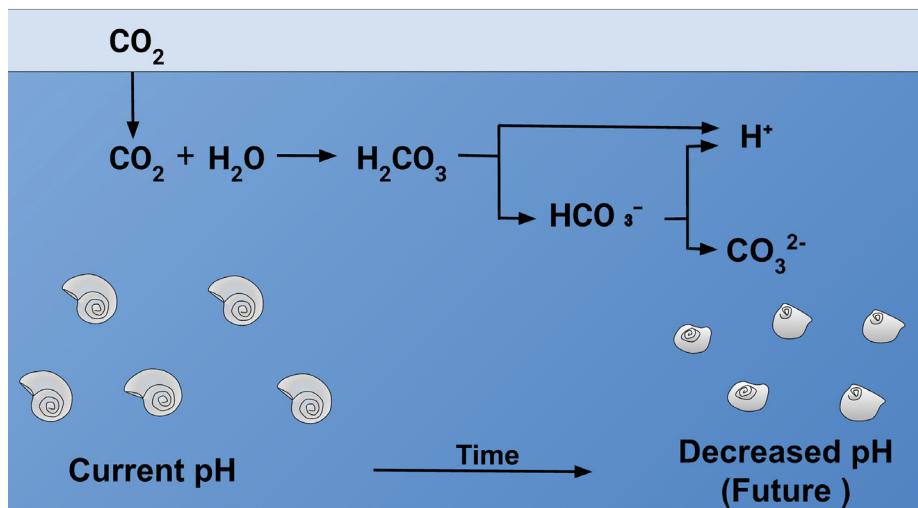


Figura 1: Esquema da reação química da água do mar com o CO_2 atmosférico: produção de ácido carbônico e sua dissociação. Fonte: By Elizajans, Own work, CC BY-SA 4.0. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=79625305> [Acessado em 25 de julho de 2025].

Na Amazônia Azul, ainda não temos a dimensão total dos impactos da acidificação do oceano: esse processo precisa de observações contínuas de longo prazo, especialmente nas áreas mais próximas ao litoral. Já sabemos, no entanto, que a porção equatorial oeste do Atlântico apresenta uma tendência de diminuição do pH de -0.001 unidades de pH ano $^{-1}$ na superfície (5), estimada através de dados coletados pela rede de boias PIRATA (Prediction and Moored Array in the Atlantic), um projeto que existe há mais de 25 anos de colaboração entre Brasil, França e Estados Unidos (6).

Mais ao sul no oceano Atlântico Oeste (7) já foi registrada diminuição no pH de cerca de -0.17 ± 0.07 (nas profundidades sob influência da Água Central do Atlântico Sul – ACAS, por volta de 200 m) e -0.10 ± 0.06 (nas profundidades sob influência da Água Intermediária Antártica – AIA, por volta de 700 m), desde o início da Revolução Industrial.

Sob o ponto de vista do oceano global, a análise mais recente (8) dos dados disponíveis sobre a acidificação aponta que já ultrapassamos os limites planetários que marcam mudanças ambientais graves ou mesmo irreversíveis na escala de tempo da vida humana (9). Cerca de 40% da superfície do oceano já está abaixo do limite planetário seguro para

a disponibilidade de íons carbonato (8) (Ver Figura 1) e cerca de 60% da camada subsuperficial do oceano (até 200 m de profundidade) já está abaixo deste limite, em comparação com o estado do oceano no período pré-industrial. As regiões mais críticas são as altas latitudes, tanto no Sul (o Oceano Austral, faixa de oceano que circunda o continente antártico), quanto no Norte (o Ártico).

No Brasil, o tema “ciclo do carbono marinho” e suas vertentes vem sendo estudado há muitos anos por diversos grupos de pesquisa. No entanto, a partir de 2012, a comunidade científica organizou-se em torno do tema “acidificação do oceano”, com a criação da Rede BrOA – Rede Brasileira de Pesquisa em Acidificação do Oceano, que integra a rede global de pesquisa sobre acidificação, a GOA-ON. A Rede BrOA atua em diversos ecossistemas marinhos brasileiros com pesquisadores de mais de 16 instituições de pesquisa nacionais, e também no oceano Austral (10). Além da pesquisa em si, a Rede BrOA dedica-se a assegurar a excelência de seus resultados com vistas a aplicar as melhores práticas da comunidade científica internacional nas análises necessárias para o estudo da acidificação (11).

A rede BrOA identificou na Amazônia Azul os recifes de corais e as regiões de plataforma carbonática – ou seja, aquelas onde há predomínio de carbonato de cálcio nos sedimentos de fundo – como áreas sensíveis à acidificação. Exemplos são a região dos rodolitos, um tipo de macroalga que tem partes formadas por carbonato de cálcio, e o banco Royal-Charlotte, ao largo do litoral do Espírito Santo e do sul da Bahia. Outras áreas sensíveis são os estuários e ecossistemas costeiros, que sofrem com a eutrofização. Esta exacerba o efeito do excesso de CO₂ na coluna d’água, pois os micro-organismos degradam a matéria orgânica contida nos efluentes lançados ao mar, o que resulta em consumo do oxigênio (O₂) e aumento da concentração de CO₂ na água (10).

A existência de iniciativas de longa duração, como o programa nacional PELD (Pesquisa Ecológica de Longa Duração) e a presença de observatórios costeiros e boias fundeadas (o sistema SIMCosta) é essencial para a realização do diagnóstico da acidificação e a detecção de tendências (12). Esse tipo de iniciativa é importante também para a detecção e fornecimento de dados para o desenvolvimento de modelos de predição para eventos, isolados ou combinados, de ondas de calor e desoxigenação, tanto costeira (13) quanto em regiões oceânicas no Atlântico Sul (14).

Para a adaptação a esses eventos, a comunidade científica vem, há muito, apontando para a importância do conhecimento dos processos físicos e químicos da acidificação (dentre outros problemas relacionados à mudança climática) e da biodiversidade, bem como o uso de modelagem numérica e sistemas de alarme como formas de adaptação (15).

A diminuição das emissões de gases de efeito estufa, mesmo a nível regional, deve ser buscada, assim como o controle de poluição e eutrofização, processos que podem exacerbar a acidificação (16). Estão em curso estudos para medidas de mitigação da acidificação que compreendem a conservação de ecossistemas costeiros e as chamadas estratégias “mCDR” (do inglês Marine Carbon Dioxide Removal) que compreendem a remoção de carbono marinho através do cultivo de macroalgas (17); a promoção da produção primária de fitoplâncton em áreas oceânicas, uma vez que a fotossíntese “captura” CO₂, convertendo-o em biomassa e exportando-o para o interior do oceano (18); ou a adição de alcalinidade ao oceano (19, 20).

Claramente, todas as medidas de adaptação e/ou mitigação precisam de políticas públicas a nível nacional e regional de combate à mudança climática, incluindo o planejamento espacial marinho, já que a Amazônia Azul brasileira é bastante heterogênea e apresenta especificidades regionais.

Como exposto, a acidificação do oceano é um problema grave e com consequências duradouras, que ultrapassam a escala de vida do ser humano (21). No Brasil, a comunidade científica apontou a vulnerabilidade de ecossistemas costeiros e está organizada para estudar esse tema (10-12). Já apontou inclusive tendências de acidificação em massas de água que atingem a margem continental brasileira (-0.10 a -0.17 unidades de pH) (7); o oceano Atlântico Sul, em eventos provocados por ondas de calor marinho (14); e Equatorial (-0.001 unidades de pH por ano) (5). E está apontando caminhos para a mitigação e a adaptação. Além da necessidade de redução rápida e consistente das emissões de dióxido de carbono, há medidas de mitigação e adaptação que podem ser mais facilmente implementadas, como estratégias de redução da eutrofização, conservação, aplicação de modelagem aliada à observação de ecossistemas a longo prazo e as estratégias mCDR: cultivo de biomassa de macroalgas, incremento da produção de fitoplâncton ou adição de alcalinidade ao oceano. Mas é necessária também a implementação de ações em diferentes níveis nos programas de Estado, incluindo o planejamento

espacial marinho, para que as especificidades e a extensão da Amazônia Azul sejam contempladas.

REFERÊNCIAS

1. IPCC, “Summary for Policymakers” in Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, V. Masson-Delmotte et al., Eds. (Cambridge University Press, 2021), pp. 3–32.
2. H.O. Pörtner et al., The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (2022), pp. 1–756. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9781009157964> [Acessado em 25 de julho de 2025].
3. J.G. Canadell et al., “Global Carbon and Other Biogeochemical Cycles and Feedbacks” in Climate Change 2021 – The Physical Science Basis, V. Masson-Delmotte et al., Eds. (Cambridge University Press, 2023), pp. 673–816.
4. S.C. Doney, V.J. Fabry, R.A. Feely, J.A. Kleypas, Ocean Acidification: The Other CO₂ Problem. *Ann Rev Mar Sci* 1, 169–192 (2009).
5. C.A.M. de Assis, L.Q. Pinho, A.M. Fernandes, M.Araujo, L.C.da Cunha, Reconstruction of the marine carbonate system at the Western Tropical Atlantic: trends and variabilities from 20 years of the PIRATA program. *Front Mar Sci* 11, 1286960 (2024).
6. B. Bourlès et al., PIRATA: A Sustained Observing System for Tropical Atlantic Climate Research and Forecasting. *Earth and Space Science* 6, 577–616 (2019).
7. M. de Carvalho-Borges, I.B.M. Orselli, M.L. de C. Ferreira, R. Kerr, Seawater acidification and anthropogenic carbon distribution on the continental shelf and slope of the western South Atlantic Ocean. *Journal of Marine Systems* 187, 62–81 (2018).
8. H.S. Findlay, R.A. Feely, L.Q. Jiang, G. Pelletier, N. Bednaršek, Ocean Acidification: Another Planetary Boundary Crossed. *Glob Chang Biol* 31, e70238 (2025).
9. J. Rockström et al., A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475 (2009).
10. R. Kerr et al., The Western South Atlantic Ocean in a High-CO₂ World: Current Measurement Capabilities and Perspectives. *Environ Manage* 57, 740–752 (2016).

11. A.R. Perretti, A.C.R. de Albergaria-Barbosa, R. Kerr, L.C. da Cunha, Ocean acidification studies and the uncertainties relevance on measurements of marine carbonate system properties. *Braz J Oceanogr* 66, 234–242 (2018).
12. G. Franz et al., Coastal Ocean Observing and Modeling Systems in Brazil: Initiatives and Future Perspectives. *Front Mar Sci* 8, 681619 (2021).
13. K.M. Brauko et al., Marine Heatwaves, Sewage and Eutrophication Combine to Trigger Deoxygenation and Biodiversity Loss: A SW Atlantic Case Study. *Front Mar Sci* 7 (2020).
14. R.R. Rodrigues et al., Extreme compound events in the equatorial and South Atlantic. *Nature Communications* 16, 1–15 (2025).
15. R.R. Rodrigues, A.H. Gonçalves Neto, E.A. Vieira, G.O. Longo, The severe 2020 coral bleaching event in the tropical Atlantic linked to marine heatwaves. *Commun Earth Environ* 6, 208 (2025).
16. E.A. Wolters et al., Shellfisheries' adaptation to ocean acidification in OR and CA: Linking strategies to strategic policy action. *Mar Policy* 171, 106484 (2025).
17. I. Eswar et al., Seaweed responses to ocean acidification: global impacts on growth, biochemical composition, and CO₂ mitigation potential. *Discover Oceans* 2, 19 (2025).
18. K.O. Buesseler et al., Next steps for assessing ocean iron fertilization for marine carbon dioxide removal. *Frontiers in Climate* 6, 1430957 (2024).
19. A.A. Anschütz et al., Direct effects of ocean alkalinity enhancement in the Baltic Sea—results from in-silico experiments. *Frontiers in Climate* 7, 1450468 (2025).
20. W. Yao et al., Exploring Site-Specific Carbon Dioxide Removal Options With Storage or Sequestration in the Marine Environment – The 10 Mt CO₂ yr⁻¹ Removal Challenge for Germany. *Earth's Future* 13, e2024EF004902 (2025).
21. N.L. Bindoff et al., “Changing Ocean, Marine Ecosystems, and Dependent Communities” in *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, N.M.W.H.O. Pörtner et al., Eds. (2019).

6.4 Biodiversidade

Margareth S. Copertino

O aquecimento global recente está entre as maiores ameaças à vida no oceano. Os ecossistemas marinhos e costeiros estão expostos a quase todos os impactos das mudanças climáticas que ocorrem no oceano e na costa. O oceano cada vez mais quente, ácido e sem oxigênio afeta o metabolismo, o desenvolvimento e as interações dos organismos marinhos, expondo-os a condições ambientais que ultrapassam seus limites de tolerância e aclimatação. Os danos à biodiversidade e às funções ecológicas impactam, por sua vez, os bens e serviços providos pelo oceano à sociedade.

O Atlântico Sudoeste, a parte do oceano que banha o Brasil, é uma das regiões do planeta mais afetadas pelo aquecimento global (1). A intensificação e o deslocamento da Corrente do Brasil para sul (2), causada pelo aumento médio da temperatura superficial do mar (3) e o aquecimento em águas profundas (4), provocam deslocamento de espécies tropicais para o sul – em busca de águas menos quentes – e alterações nas rotas de animais migratórios. Os recentes extremos de temperatura e ondas de calor intensificaram o branqueamento de corais e a frequência de florações de algas oportunistas e nocivas. A acidificação das águas, observada em regiões de ressurgência costeira (Cabo Frio, RJ; Cabo de Santa Marta, SC) e no litoral do Nordeste, ameaça bancos de rodolitos e recifes de corais (5,6). Em boa parte do litoral brasileiro, a elevação do nível do mar (entre 1,8 a 4,2 mm por ano desde 1950, para uma média global de 4,7 mm entre 2015 e 2024) (7, 8) causa aumento na energia das ondas e na frequência e intensidade dos eventos oceanográficos extremos, acentuando processos de erosão e inundações.

O Diagnóstico Marinho Costeiro da Plataforma Brasileira de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos (DMC-PBBSE) evidenciou transformações marcantes ao longo dos últimos 30 anos, como a perda de habitats vegetados, redução na abundância de espécies fundadoras (aquele-

que têm papel fundamental na formação do ecossistema) e alterações na estrutura das comunidades (9).

Os impactos das mudanças climáticas no Atlântico Sudoeste, em sinergia com outros fatores antropogênicos, estão modificando a biodiversidade marinha-costeira brasileira desde áreas emersas até a plataforma continental (10, 11). Houve alterações na abundância das espécies e na estrutura das comunidades de costões rochosos, praias arenosas, baías e lagoas costeiras, manguezais, bancos de macroalgas e pradarias de gramas marinhas. Além das mudanças climáticas, estuários e grandes baías apresentam alterações rápidas e intensas causadas por múltiplos outros impactos, como destruição de habitats, poluição, pesca predatória, turismo e expansão portuária (12, 13).

O deslocamento de espécies tropicais para regiões extratropicais é uma das consequências mais comuns do aumento de temperatura. Na costa brasileira, a ampliação do limite de distribuição para o sul tem sido registrada para espécies de invertebrados, peixes, macroalgas e gramas marinhas (11). Além do aquecimento gradual das águas, as ondas de calor marinhas no Atlântico Sudoeste (entre Cabo Frio e Argentina) vêm afetando o recrutamento de larvas de invertebrados e reduzindo a quantidade de pescado (3, 13).

Eventos de branqueamento de corais se intensificaram nas últimas duas décadas, afetando mais de 26 espécies de corais brasileiros. No evento de 2019-2020 a mortalidade chegou a 50% em Abrolhos e no Atol das Rocas (14, 15), lançando um alerta sobre o futuro desses ecossistemas.

No limite entre terra e mar, os ecossistemas estão expostos a estressores múltiplos, aumentando a vulnerabilidade aos impactos das mudanças climáticas. Entre 2000 e 2020, os manguezais brasileiros perderam 2% de sua cobertura arbórea (taxa média anual de - 0,13%), além de 12% dos apicuns (áreas planas e de pouca vegetação, entre manguezais e a terra firme) (16). As perdas são atribuídas principalmente à erosão costeira, eventos climáticos extremos, aquicultura e salicultura. No Pará, com a elevação do nível do mar, os manguezais avançam sobre o continente, particularmente sobre as áreas de apicuns e alagados (17). No Nordeste, os manguezais avançam para dentro dos estuários devido à redução de chuvas e à intrusão salina (18), além de sofrerem com urbanização, carcinicultura e exploração de recursos (19, 20). No Sudeste, os manguezais estão comprimidos entre o oceano e a Serra do Mar e limitados por rodovias e urbanização, o que impedirá sua migração em direção

ao continente. Mas no limite de sua distribuição (Laguna, SC), o mangue avança sobre campos e marismas (áreas em estuários, cobertas por gramineas) em resposta ao aquecimento global (21, 22).

As mudanças climáticas têm gerado comunidades biológicas alteradas, menos complexas, colonizadas por espécies oportunistas, exóticas, com potencial invasor. O declínio na cobertura de corais pétreos e algas calcáreas, seguido pelo aumento de macroalgas filamentosas e foliosas, é um exemplo típico de tais mudanças nos recifes tropicais do Nordeste, reduzindo a complexidade estrutural do sistema e abrindo espaço para a colonização do coral-sol invasor (*Tubastraea* spp).

Agregações de animais gelatinosos, como medusas, têm aumentado no mundo e no Brasil, causando prejuízos à pesca e acidentes com banhistas (23, 24). Grandes medusas alteram o equilíbrio das cadeias tróficas ao consumir muita quantidade de zooplâncton e peixes (25).

A formação de um grande cinturão de sargaço no Oceano Atlântico Central que se estende desde o oeste da África até o Caribe e o Golfo do México é um exemplo típico de mudança, considerada um novo normal desde 2011 (26). A formação desse cinturão está relacionada a mudanças oceanográficas e ao aumento no aporte de nutrientes provenientes da bacia Amazônica e da ressurgência costeira do Oeste da África. Quase todo ano, grandes biomassas de algas se formam, transportadas até a costa das Américas, causando inundações e encalhes de *Sargassum* nas praias do Atlântico tropical, incluindo o litoral Norte e Nordeste brasileiro, com impactos ecológicos, estéticos e turísticos (27).

Proteger, conservar e restaurar ecossistemas marinho-costeiros aumenta a resiliência climática, contribuindo com medidas de adaptação e mitigação. Barreiras naturais formadas por recifes, dunas costeiras, manguezais e marismas dissipam a energia das ondas, reduzindo o risco de erosão e inundações. A presença de recifes ao longo da costa pode amortecer em 46% os impactos de aumento de ondas em um cenário com subida de 1 metro no nível do mar, enquanto a sua ausência elevaria esse risco para 76%. Os manguezais podem reduzir em 20% os níveis de vulnerabilidade, ao mesmo tempo que protegem a população exposta.

A manutenção de sumidouros de carbono e barreiras naturais costeiras é um exemplo das chamadas Soluções Baseadas na Natureza (SBNs). A conservação e a restauração de manguezais, ao mesmo tempo que removem o excesso de carbono da atmosfera e contribuem com a regulação do clima, garantem a manutenção de inúmeros bens e servi-

ços ecossistêmicos, com benefícios sociais e econômicos. À medida que o desenvolvimento costeiro e as alterações climáticas se intensificam, a relação custo-benefício das medidas de mitigação e adaptação torna-se mais urgente. Nesse aspecto, as SBNs são mais econômicas e eficientes, atendendo objetivos múltiplos: conservação da biodiversidade, manutenção dos recursos pesqueiros, restauração da qualidade ambiental, sequestro de gases de efeito estufa e redução do risco de inundação e erosão costeira. A implementação de um combo de medidas “cost-effective” (razão custo-benefício), combinando SBNs e soluções de engenharia, pode reduzir em mais de 50% o risco de perdas.

A costa brasileira tem mais de 2 milhões de quilômetros quadrados de ecossistemas costeiros vegetados, como manguezais, marismas e pradarias de gramas marinhas (28). Esses ecossistemas são grandes sumidouros de carbono, reconhecidos como ecossistemas de “carbono azul”. Além de removerem o dióxido de carbono (CO_2) atmosférico, as folhas e raízes capturam e fixam sedimento e matéria orgânica. Quando não perturbado, o carbono soterrado pode ser preservado por longos períodos no solo aquoso. Os manguezais brasileiros detêm 8,4% do total de carbono dos manguezais do planeta (28, 29). Medições de fluxos líquidos de CO_2 na interface solo-vegetação-atmosfera comprovam a eficácia de manguezais e marismas brasileiros na mitigação de gases de efeito estufa (30, 31). A degradação e perda desses ambientes, além de reduzir a capacidade de sequestro de carbono, causa emissões de gases de efeito estufa (32, 33). Portanto, a restauração e reabilitação dos manguezais tem o potencial de gerar sequestro adicional de carbono e/ou evitar emissões. No setor de mercado de carbono internacional, o Brasil tem grande oportunidade para obter recursos através da conservação e restauração de manguezais. Mas ainda é necessário estabelecer modelos regulatórios entre os setores público e privado, para atrair investimentos no carbono azul e avançar na restauração dos manguezais brasileiros.

Como vimos, alterações drásticas e graves na biodiversidade marinha e costeira brasileira vêm acontecendo nas últimas décadas, impulsionadas pelas mudanças climáticas e agravadas por outros estressores antropogênicos, entre eles a poluição do mar por esgotos. Compreender as diferentes respostas na escala espacial, diversidade e heterogeneidade do mar brasileiro permanece um grande desafio, que deve ser enfrentado para nos preparamos para as mudanças futuras. Apesar dos avanços nas pesquisas, inúmeras lacunas dificultam as avaliações e atribuições dos

impactos. Recomenda-se ampliar e fortalecer os programas de monitoramento contínuo e integrado da biodiversidade, a integração de dados climáticos e oceanográficos, modelagem ecológica preditiva, avaliação da resiliência dos ecossistemas e estudos sobre interações entre espécies invasoras e comunidades nativas. Grandes lacunas no conhecimento, nos níveis local e nacional, exigem investigação de como as alterações da biodiversidade afetam as funções ecológicas, incluindo a quantificação dos fluxos dos processos e a valoração dos serviços ecossistêmicos fornecidos pelo mar.

REFERÊNCIAS

1. E. Popova *et al.*, From global to regional and back again: common climate stressors of marine ecosystems relevant for adaptation across five ocean warming hotspots. *Glob Change Biol* 22, 2038–2053 (2016).
2. H. Yang *et al.*, Poleward shift of the major ocean gyres detected in a warming climate. *Geophys Res Lett* 47, e2019GL085868 (2020).
3. B.C. Franco *et al.*, Climate change impacts on the atmospheric circulation, ocean, and fisheries in the southwest South Atlantic Ocean: a review. *Clim Change* 162, 2359–2377 (2020).
4. C.S. Meinen, R.C. Perez, S. Dong, A.R. Piola, E. Campos. Observed ocean bottom temperature variability at four sites in the northwestern Argentine Basin: Evidence of decadal deep/abyssal warming amidst hourly to interannual variability during 2009–2019. *Geophys Res Lett* 47, e2020GL089093 (2020).
5. A. Piñango *et al.*, Ocean acidification and long-term changes in the carbonate system properties of the South Atlantic Ocean. *Glob Biogeochem Cycles* 36, e2021GB007196 (2022).
6. R.T. de Carvalho *et al.*, Global assessment of coralline algae mineralogy points to high vulnerability of Southwestern Atlantic reefs and rhodolith beds to ocean acidification. *Sci Rep* 12, 9589 (2022).
7. WMO, *World Meteorological Organization State of the Global Climate*, (2025). 55 p.
8. A. Bella-Manley, R.S. Nerem, B.D. Hamlington. Extrapolation of the satellite altimeter record to understand regional variations in future sea level change. *J Geophys Res Oceans* 130(5), e2024JC022094 (2025).
9. C.S. Seixas, A. Turra, B.P. Ferreira, Eds. *1º Diagnóstico Brasileiro Marinho-Costeiro sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos* (Plataforma Brasileira

de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos (BPBES) e Cátedra Unesco para a Sustentabilidade do Oceano, 2024).

10. A. Turra, M.R. Denadai, Linking biodiversity and global environmental changes in Brazilian coastal habitats. *Braz J Oceanogr* 64, 3–4 (2016).
11. M.S. Copertino et al., “Histórico de mudança e o estado atual da biodiversidade da zona marinha-costeira” in *1º Diagnóstico Brasileiro Marinho-Costeiro sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos*, C.S. Seixas, A. Turra, B.P. Ferreira, Eds. (Plataforma Brasileira de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos – BPBES e Cátedra Unesco para a Sustentabilidade do Oceano, 2024), pp. 62–127, doi:10.4322/978-65-01-27749-3.cap02.
12. L. Travassos et al., “Vetores de mudança da biodiversidade e serviços ecosistêmicos da zona marinha-costeira” in *1º Diagnóstico Brasileiro Marinho-Costeiro sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos*, C.S. Seixas, A. Turra, B.P. Ferreira, Eds. (Plataforma Brasileira de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos – BPBES e Cátedra Unesco para a Sustentabilidade do Oceano, 2024), pp. 128–169, doi:10.4322/978-65-01-27749-3.cap03.
13. W.C. de Sousa Júnior et al., “Cenários de transformação da zona marinha-costeira” in *1º Diagnóstico Brasileiro Marinho-Costeiro sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos*, C.S. Seixas, A. Turra, B.P. Ferreira, Eds. (Plataforma Brasileira de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos – BPBES e Cátedra Unesco para a Sustentabilidade do Oceano, 2024), pp. 170–217, doi:10.4322/978-65-01-27749-3.cap04.
14. L.C.L. Ferreira et al., Different responses of massive and branching corals to a major heatwave at the largest and richest reef complex in South Atlantic. *Mar Biol* 168(54), (2021).
15. T.L. Gaspar et al., Severe coral bleaching of *Siderastrea stellata* at the only atoll in the South Atlantic driven by sequential marine heatwaves. *Biota Neotrop* 21(2), e20201131 (2021)
16. MapBiomass, *Projeto MapBiomass. Mapeamento anual de cobertura e uso da terra na zona costeira*, (Coleção 7, 2022). Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/2022/11/18/radiografia-da-costa-brasileira-nos-ultimos-37-anos-manguezais-estaveis-praias-e-dunas-em-retracao/> [Acessado em 11 de novembro de 2024].
17. M.C. Cohen, A.V. de Souza, D.F. Rossetti, L.C. Pessenda, M.C. França, Decadal-scale dynamics of an Amazonian mangrove caused by climate and sea level changes: Inferences from spatial-temporal analysis and digital elevation models. *Earth Surf Process Landf* 43(14), 2876–2888 (2018).
18. T.C. Jennerjahn et al., “Mangrove ecosystems under climate change” in *Mangrove Ecosystems: A Global Biogeographic Perspective: Structure, Function, and Services*. Cham: (Springer, 2017), pp. 211–244.

19. L. Pelage, G. Domalain, A.S. Lira, P. Travassos, T. Frédou. Coastal land use in Northeast Brazil: mangrove coverage evolution over three decades. *Trop Conserv Sci* 12, 1940082918822411 (2019).
20. D.N. Bryan-Brown *et al.*, Global trends in mangrove forest fragmentation. *Sci Rep* 10, 7117 (2020).
21. A.E. Torres *et al.*, A 1500-year multi-proxy record of subtropical mangrove dynamics in relation to sea level and climate changes on Babitonga Bay, Southern Brazil. *Holocene* 34, 387–399 (2024).
22. M.C. França *et al.*, Late-Holocene subtropical mangrove dynamics in response to climate change during the last millennium. *Holocene* 29, 445–456 (2019).
23. C. Resgalla *et al.*, Outbreaks, coexistence, and life cycle of jellyfish species in relation to abiotic and biological factors along a South American coast. *Hydrobiologia* 839, 87–102 (2019), doi:10.1007/s10750-019-03998-0.
24. V. Haddad Junior, A.C. Morandini, L.E. Rodrigues. Jellyfish blooms causing mass envenomations in aquatic marathonists: report of cases in S and SE Brazil (SW Atlantic Ocean). *Wilderness Environ Med* 29, 142–145 (2018), doi:10.1016/j.wem.2017.09.012.
25. R.M. Nagata, A.C. Morandini. Diet, prey selection, and individual feeding rates of the jellyfish *Lychnorhizalucerna* (Scyphozoa, Rhizostomeae). *Mar Biol* 165, 1–17 (2018), doi:10.1007/s00227-018-3445-5.
26. N.F. Putman *et al.*, Systems to monitor and forecast pelagic Sargassum inundation of coastal areas across the North Atlantic: present tools and future needs. *Harmful Algae* 123, 102933 (2025).
27. M.N. Sissini *et al.*, The floating Sargassum (Phaeophyceae) of the South Atlantic Ocean – Likely scenarios. *Phycologia* 56, 321–328 (2017), doi:10.2216/16-92.1.
28. V. Hatje *et al.*, Vegetated coastal ecosystems in the Southwestern Atlantic Ocean are an unexploited opportunity for climate change mitigation. *Commun Earth Environ* 4, 160 (2023), doi:10.1038/s43247-023-00828-z.
29. A.S. Rovai, R.R. Twilley, T.A. Worthington, P. Riul. Brazilian mangroves: blue carbon hotspots of national and global relevance to natural climate solutions. *Front For Glob Change* 4, 787533 (2022), doi:10.3389/ffgc.2021.787533.
30. R.B. Souza *et al.*, Salt marsh-atmosphere CO₂ exchanges in Patos Lagoon Estuary, southern Brazil. *Front Mar Sci* 9, 892857 (2022).
31. A.S.C. Freire, M.I. Vitorino, A.M.L. de Souza, M.F. Germano, Analysis of the energy balance and CO₂ flow under the influence of the seasonality of climatic elements in a mangrove ecosystem in Eastern Amazon. *Int J Biometeorol* 66, 647–659 (2022).

32. J.B. Kauffman et al., Shrimp ponds lead to massive loss of soil carbon and greenhouse gas emissions in northeastern Brazilian mangroves. *Ecol. Evol.* 8, 5530–5540 (2018).
33. L.D. Lacerda et al., 20-years cumulative impact from shrimp farming on mangroves of Northeast Brazil. *Front. For. Glob. Change* 4, 653096 (2021).

6.5 Recifes de corais

Beatrice Padovani Ferreira

Os recifes de corais são ecossistemas marinhos diversos e complexos, cuja estrutura é formada principalmente pela atividade de corais e outros animais construtores que produzem esqueletos calcários, os quais, ao serem secretados, se fundem e acumulam, formando estruturas complexas distribuídas nas zonas tropicais do oceano. Embora ocupem apenas 0,1% do fundo oceânico, estimativas indicam que os recifes abrigam cerca de 25% a 30% de todas as espécies marinhas conhecidas (1). São comparáveis em diversidade às florestas tropicais e sua importância vai muito além da biodiversidade: sustentam comunidades humanas, fornecem alimento através da pesca, movimentam o turismo, produzem compostos bioativos com potencial farmacêutico e protegem o litoral contra a erosão causada pelas ondas. Estimativas para o Brasil indicam que os recifes de coral geram até R\$ 167 bilhões ao Brasil em proteção e turismo (2).

Apesar de sua importância ecológica e econômica, os recifes enfrentam sérias ameaças. Estas incluem degradação por ações humanas já observadas há décadas e crescente intensificação dos efeitos das mudanças climáticas (3). Desde a década de 1980, o aumento da temperatura da superfície do mar devido ao aquecimento global tem provocado um branqueamento sem precedentes dos corais, o que ameaça sua existência e os bens e serviços associados (4). Quatro eventos globais de branqueamento em massa já foram registrados, sendo dois deles nos últimos 10 anos (5).

Além disso, a acidificação dos oceanos, impulsionada pela maior absorção de CO₂ atmosférico pela água do mar, compromete a calcificação dos esqueletos dos corais, afetando negativamente o crescimento e a resistência das estruturas recifais (6). Interações sinérgicas entre estresse térmico, acidificação, eutrofização, sobre pesca e poluição aumentam a vulnerabilidade dos recifes e dificultam sua recuperação (7).

O Brasil abriga os únicos recifes de coral rasos do Atlântico Sul (8). Formações recifais rasas são encontradas em ilhas oceânicas e ao longo da costa brasileira desde o Maranhão até o sul da Bahia (8,9) e incluem ainda formações recentemente descritas no Espírito Santo (10). Os recifes da costa brasileira apresentam baixa diversidade, porém com altos níveis de endemismo – de até 50% – e formas únicas, já extintas em outras partes do mundo, e por isso são considerados “relíquias” (9). Além dos corais, estudos têm revelado a expressiva contribuição de outros organismos construtores, como as algas calcárias (11) e os briozoários, pequenos invertebrados com surpreendente dominância na formação do Banco de Abrolhos, ao largo da costa da Bahia, elevando ainda mais a peculiaridade das formações recifais brasileiras (12).

Além dos recifes rasos, que são os mais estudados e acessíveis, recifes mesofóticos ocorrem em profundidades maiores, geralmente entre 30 e 150 metros. Presentes na plataforma continental média e externa desde a região Norte (13), costa Nordeste (14, 15) e Leste (9), essas formações, que se desenvolveram na época do último glacial, não acompanharam a subida do nível do mar no final do Pleistoceno e são chamadas de *give up reefs* (8,14). Os chamados Recifes Amazônicos são exemplos de recifes mesofóticos, que se conectam ecologicamente com outros sistemas recifais ao longo da margem da plataforma continental nordeste (15), resultando num corredor de biodiversidade profundo (16) que se formou e evoluiu em resposta a dinâmicas de nível do mar e condições oceanográficas específicas.

Os recifes brasileiros têm sido historicamente impactados pela remoção direta de corais e pelo aumento de sedimentação provocado pelo desmatamento da Mata Atlântica e pela agricultura, bem como pela pesca e turismo não regulados (8). Nas últimas décadas, apesar dos esforços de conservação, os impactos de origem terrestre com o desenvolvimento costeiro acelerado, maior aporte de esgotos e contaminantes e a invasão de espécies exóticas, têm se somado às pressões sobre esses ambientes.

As mudanças climáticas, porém, representam a ameaça mais grave. A ocorrência de temperaturas anômalas persistentes tem se intensificado em frequência e duração (17) com ondas de calor cinco vezes mais frequentes (18). Esta intensificação tem levado a eventos de branqueamento que causam mortalidades elevadas de espécies mais sensíveis de coral, incluindo espécies endêmicas e ameaçadas (19, 18).

Os corais têm simbiose – relação na qual ambos os organismos participantes se beneficiam – com um tipo específico de organismo dinoflagelado conhecido como zooxantela, que vive no interior de suas células. Por meio da fotossíntese, as zooxantelas fornecem energia e recebem do hospedeiro dióxido de carbono e nutrientes. Estimativas sugerem que essa relação simbiótica existe há milhões de anos (20). O aumento da temperatura da água faz com que os corais expulsem as zooxantelas — responsáveis por sua coloração e principal fonte de energia, levando ao seu branqueamento e possível morte. Desde 2023, o mundo enfrenta o quarto e mais severo episódio de branqueamento em massa de recifes já registrado. Segundo a International Coral Reef Initiative (ICRI), até março de 2025 84% dos recifes globais já haviam sido afetados. De acordo com o IPCC, com um aumento de 1,5 °C na temperatura média global, entre 70% e 90% dos recifes podem desaparecer. Com 2 °C de aumento, a perda pode atingir 99% (21).

A ciência brasileira sobre recifes de coral tem raízes em estudos pioneiros realizados a partir das décadas de 1960 e 1970 (9). Um marco decisivo ocorreu em 1997 com o evento Workshop Sobre os Recifes de Coral Brasileiros: Pesquisa, Manejo Integrado e Conservação, que reuniu especialistas de todo o país e fortaleceu a articulação entre ciência, políticas públicas e conservação (22). Esse esforço influenciou também a legislação ambiental. Desde então, a mobilização científica e institucional tem sido crescente, com novas tecnologias permitindo o avanço do mapeamento de regiões rasas e profundas (23,24); descoberta de formações recifais (25); descrições detalhadas de áreas pouco conhecidas e já ameaçadas (26,13); sínteses de conhecimento de pesca e restauração (27,28); avaliação de cenários recentes de aquecimento e perspectivas para o Atlântico Sul Tropical (29,18); e estudos sobre alterações na composição dos simbiontes (30,31). Além disso, ações de monitoramento contínuo têm promovido a participação brasileira nos relatórios da rede global de monitoramento de recifes de coral GCRMN (32), ligada à ICRI, com ponto focal do Ministério do Meio Ambiente.

Os eventos de ondas de calor no Atlântico tropical aumentaram em frequência, intensidade, duração e extensão espacial (19), previsão comprovada pelo evento extremo de 2024. Este cenário ocorre num momento de intensificação também de outros impactos oriundos de atividades desenvolvidas sem as devidas considerações ambientais. Perante o cenário global, é de suma importância compreender essas interações,

visando aumentar a resiliência dos recifes e orientar ações de conservação e restauração.

Nesse sentido, muitos avanços científicos têm sido impulsionados por ações de programas governamentais como os dos ministérios do Meio Ambiente e da Ciência, Tecnologia e Inovação, e do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico). Destacamos o Programa Ecológico de Longa Duração PELD/CNPq, com vários sítios em áreas de ocorrência de recifes de coral, que fazem monitoramento e pesquisas de longo prazo, e os institutos nacionais de ciência e tecnologia (INCTs) com abrangência nacional em biodiversidade, como o INCT Amb Trop e Biodiversidade da Amazônia Azul, e o de SinBiose. Fortalecer esses e outros programas, bem como a ciência integrada e colaborativa, é essencial para embasamento das ações de conservação e adaptação no presente cenário.

A Estratégia Nacional para a Conservação e o Uso Sustentável dos Recifes de Coral (ProCoral), decretada em 2025, busca implementar, orientar, articular e coordenar políticas públicas integradas para a conservação, o uso sustentável e a recuperação dos recifes de coral. A criação e gestão eficaz de unidades de conservação marinha, para a proteção de áreas sensíveis e o estímulo à regeneração natural dos ecossistemas, também é importante, bem como promover o engajamento das comunidades costeiras, valorizando seus conhecimentos e resiliência. A educação ambiental e a ciência cidadã também desempenham papel fundamental na conservação a longo prazo.

O futuro dos recifes de coral depende das medidas que tomarmos agora. É urgente reduzir as emissões de carbono, combater a poluição, restaurar ecossistemas costeiros e fortalecer a governança marinha. Proteger os recifes é proteger a biodiversidade marinha, os meios de vida de quem depende dos recursos do mar e o equilíbrio climático do planeta. Ainda é possível evitar o colapso desses ecossistemas extraordinários — desde que ciência, política e sociedade atuem juntos.

REFERÊNCIAS

1. R. Fisher *et al.*, Species richness on coral reefs and the pursuit of convergent global estimates. *Current Biology* 25(4), 500-505 (2015).

2. Fundação Boticário, Oceano sem mistérios – Desvendando os recifes de corais, (Fundacao Grupo Boticario, 2024). Disponível em https://fundacaogrupoboticario.org.br/wp-content/uploads/2024/11/OsM_outubro-3_leve31-10-23.pdf [Acessado em 25 de julho de 2025].
3. T.P. Hughes *et al.*, Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature* 543(7645), 373-377 (2017).
4. O. Hoegh-Guldberg, E.S. Poloczanska, W. Skirving, S. Dove, Coral reef ecosystems under climate change and ocean acidification. *Frontiers in marine science* 4, 252954 (2017).
5. J.D. Reimer *et al.*, The fourth global coral bleaching event: where do we go from here? *Coral Reefs* 43(4), 1121-1125 (2024).
6. J.S. Kikstra *et al.*, The IPCC Sixth Assessment Report WGIII climate assessment of mitigation pathways: from emissions to global temperatures. *Geoscientific Model Development* 15(24), 9075-9109 (2022).
7. T.P. Hughes *et al.*, Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature* 543(7645), 373-377 (2017).
8. M. Maida, B. Ferreira, “Coral Reefs of Brazil: Overview and field guide” in Proc. 8th Int Coral Reef Sym., (1), 263-274 (1997).
9. Z.M. Leão *et al.*, Brazilian coral reefs in a period of global change: A synthesis. *Brazilian Journal of Oceanography* 64(spe2), 97-116 (2016).
10. E.F. Mazzei *et al.*, Newly discovered reefs in the southern Abrolhos Bank, Brazil: Anthropogenic impacts and urgent conservation needs. *Marine pollution bulletin* 114(1), 123-133 (2017).
11. M.A. Oliveira de Figueiredo, M. Abreu, P.A. Horta, A.G. Pedrini, J.M.C. Nunes, Benthic marine algae of the coral reefs of Brazil: a literature review. *Oecologia Brasiiliensis* 2(12), 7-11 (2008).
12. L.V. Ramalho *et al.*, Bryozoan framework composition in the oddly shaped reefs from Abrolhos Bank, Brazil, southwestern Atlantic: taxonomy and ecology. *Zootaxa* 4483(1), 155-186 (2018).
13. R.L. Moura *et al.*, An extensive reef system at the Amazon River mouth. *Science Advances* 2(4), e150125 (2016).
14. J.M.R. Camargo, T.C.M. Araújo, B.P. Ferreira, M. Maida, Topographic features related to recent sea level history in a sediment-starved tropical shelf: Linking the past, present and future. *Regional Studies in Marine Science* 2, 203-211 (2015).
15. M.O. Soares, T.C.L. Tavares, P.B.M. Carneiro, Mesophotic ecosystems: Distribution, impacts and conservation in the South Atlantic, *Diversity and Distributions* 25.2, 255-268 (2019).

16. G. Olavo, P.A. Costa, A.S. Martins, B.P. Ferreira, Shelf-edge reefs as priority areas for conservation of reef fish diversity in the tropical Atlantic. *Aquatic conservation: marine and freshwater ecosystems* 21(2), 199-209 (2011).
17. G.L.X. da Silva, M. Kampel, T. Nakamura, Thirty years of coral bleaching in the Southwestern Atlantic Ocean: a historical assessment based on degree heating week indices. *Coral Reefs*, 1-15 (2025).
18. R.R. Rodrigues, A.H. Gonçalves Neto, E.A. Vieira, G.O. Longo, The severe 2020 coral bleaching event in the tropical Atlantic linked to marine heatwaves. *Communications Earth & Environment* 6(1), 208 (2025).
19. T.J. Vidal *et al.*, Mortality patterns and recovery challenges in *Millepora alcicornis* after mass bleaching event on Northeast Brazilian reefs. *Marine Environmental Research* 204, 106864 (2025).
20. T.C. LaJeunesse *et al.*, Systematic revision of Symbiodiniaceae highlights the antiquity and diversity of coral endosymbionts. *Current Biology* 28(16), 2570-2580 (2018).
21. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), International Coral Reefs Initiative (ICRI), 2024. Disponível em: <https://icriforum.org/news-4gbe/>. [Acessado em 28 de julho de 2025].
22. B.P. Ferreira, M. Maida, Monitoramento dos Recifes de Coral do Brasil. Situação Atual e Perspectiva. MMA (1), 120 (2006).
23. A.P.L. Prates, *Atlas dos recifes de coral nas unidades de conservação brasileiras* (Ministério do Meio Ambiente/Secretaria de Biodiversidade e Florestas, 2003).
24. C.B.L. da Silveira, G. M. R. Strenzel, M. Maida, B.P. Ferreira, Pushing satellite imagery to new depths: Seascapes feature mapping in a tropical shelf. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 19, 100345 (2020).
25. E.F. Mazzei *et al.*, Newly discovered reefs in the southern Abrolhos Bank, Brazil: Anthropogenic impacts and urgent conservation needs. *Marine Pollution Bulletin* 114(1), 123-133 (2017).
26. R.B. Francini-Filho *et al.*, Perspectives on the Great Amazon Reef: extension, biodiversity, and threats. *Frontiers in Marine Science* 5, 142 (2018).
27. L. Eggertsen *et al.*, Complexities of reef fisheries in Brazil: a retrospective and functional approach. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 34(1), 511-538 (2024).
28. M. Mies *et al.*, Challenges for coral restoration in Southwestern Atlantic reefs: guidelines for ethical and sustainable practices. *Biodiversity and Conservation*, 1-27 (2025).

29. G.L.X. da Silva, M. Kampel, T. Nakamura, Thirty years of coral bleaching in the Southwestern Atlantic Ocean: a historical assessment based on degree heating week indices. *Coral Reefs*, 1-15 (2025).
30. L.B. Villela *et al.*, Bacterial and Symbiodiniaceae communities' variation in corals with distinct traits and geographical distribution. *Scientific Reports* 14(1), 24319 (2024).
31. L.B. Villela, Y.R. Aiube, A.W. Silva-Lima, R.L. Moura, P.S. Salomon. Climate-driven introduction of an opportunistic symbiont in the most extensive reef system of the Southwestern Atlantic Ocean (2024).
32. B.P. Ferreira *et al.*, «Status and trends of coral reefs of the Brazil region» in D. Souter *et al.*, Eds. *Status of coral reefs of the world: 2020 Report* (International Coral Reef Initiative, 2021).

6.6 Pesca e aquicultura

Flávia Lucena Frédou, Ronaldo Olivera Cavalli

A produção brasileira de pescado é uma atividade estratégica para o desenvolvimento socioeconômico, a segurança alimentar e o desenvolvimento regional. No entanto, os efeitos das mudanças climáticas impõem desafios crescentes ao setor, como o desenvolvimento de tecnologias e sistemas de gestão mais eficientes e sustentáveis, que contribuam para a mitigação e a adaptação às mudanças climáticas.

A pesca e a aquicultura são importantes fontes de alimento, trabalho e renda para centenas de milhões de pessoas em todo o mundo. Ao contrário do que muitos pensam, a proteína animal mais produzida, consumida e comercializada no mundo não é a de frango, suínos ou bovinos, mas o pescado. Em 2022, a produção mundial de pescado (soma da pesca com a aquicultura), foi estimada em 185,4 milhões de toneladas (1). Nos últimos anos, a produção global de pescado tem sido dividida igualmente entre a pesca e a aquicultura. Mas, considerando o crescimento da população humana e a estagnação no volume da pesca, espera-se que o fornecimento de pescado para alimentação proveniente da aquicultura precise aumentar ainda mais para atender à demanda global futura.

No Brasil, a situação estatística é menos clara, pois desde 2011, quando foi publicado o último boletim do Ministério da Pesca e Aquicultura (MPA), não há dados oficiais. A precariedade das estatísticas atinge sobretudo a pesca, com suas modalidades (pesca industrial, pesca artesanal) e muitos pontos de desembarque ao longo do extenso litoral brasileiro e na grande malha de rios da região Norte, a de maior produção continental de pescado.

Apesca é uma atividade tradicional no Brasil, com importância histórica, cultural, econômica e alimentar. Apesar de representar uma pequena fração do PIB nacional, é essencial para a segurança alimentar de milhões de brasileiros, especialmente em comunidades tradicionais. Em 2018, o consumo brasileiro de pescado foi estimado em 9,75 kg/pessoa/ano.

A pesca é praticada em uma grande variedade de ecossistemas – do ambiente continental ao mar profundo - utilizando mais de 70 modalidades, como redes de emalhar, linhas e armadilhas, para capturar peixes, crustáceos (como camarões, siris, lagostas e caranguejos) e moluscos (como ostras, berbigões e sururus). O último boletim do MPA apontava uma produção nacional total de 1.431.974,4 t, sendo a pesca extrativa marinha responsável por 553.670,0 t (38,7% do total de pescado), seguida pela aquicultura continental (544.490,0 t; 38,0%), a pesca extrativa continental (249.600,2 t; 17,4%) e a aquicultura marinha (84.214,3 t; 5,9%). A pesca artesanal dominava, produzindo mais da metade de todo o pescado nacional (2), com destaque para os pescadores do Nordeste, que chegaram a alcançar 31,7% da captura.

Na aquicultura, o panorama estatístico é mais atualizado. Desde 2013, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) fornece estatísticas oficiais sobre o setor. No período de 2013 a 2023, a produção aquícola aumentou 66,6% - de 488,6 mil t para 813,7 mil t (3). A aquicultura representa, portanto, uma das fronteiras mais promissoras, sobretudo no Brasil, que dispõe de cerca de 8.500 km de litoral com diversos estuários e uma Zona Econômica Exclusiva (ZEE), grande biodiversidade, grande mercado consumidor e uma sólida comunidade científica para apoiar a exploração sustentável dos ecossistemas marinhos (4).

Os números parecem indicar que o Brasil está seguindo a tendência mundial da produção da pesca ser ultrapassada pela da aquicultura. Mas a carência estatística da primeira recomenda cautela na comparação. Como não temos dados atualizados e confiáveis sobre o volume de pescado capturado no Brasil nos últimos anos, é difícil estimar a participação proporcional da pesca e da aquicultura no país.

Nos dois casos, porém, os efeitos das mudanças climáticas têm suscitado preocupações quanto à estabilidade e viabilidade da atividade de produção de pescado. O aumento da temperatura das águas, alterações no regime de chuvas, a acidificação dos oceanos, o aumento do nível do mar e a ocorrência de eventos extremos põem em risco a qualidade da água, assim como a produtividade e a saúde dos organismos aquáticos (5).

O aumento da temperatura e a alteração dos padrões de chuva podem diminuir o crescimento das espécies e consequentemente a produtividade, tanto nas fazendas aquícolas quanto na natureza. Por serem pecilotérmicos (a temperatura corporal varia com a do ambiente), os pei-

xes, crustáceos e moluscos têm uma faixa ideal de temperatura para seu desenvolvimento, alimentação, metabolismo e reprodução. Assim, temperaturas mais altas podem acelerar o crescimento, mas também afetar negativamente o sistema imunológico e aumentar a vulnerabilidade a doenças e parasitas (6). Variações de salinidade devidas a inundações, estresse hídrico ou aumento do nível do mar podem levar ao estresse osmótico e também afetar o desempenho das espécies.

Da mesma forma, as alterações climáticas podem afetar a dinâmica dos ecossistemas marinhos. O aumento da temperatura favorece a floração de algas nocivas e pode levar à acumulação de biotoxinas em moluscos, o que cada vez mais frequentemente provoca interdições de comercialização nas principais áreas de produção do país (7). O aquecimento resulta também em menor concentração de oxigênio dissolvido, o que agrava as condições para o desenvolvimento das espécies; e a acidificação da água causada pela absorção do excesso de CO₂ na atmosfera afeta processos fisiológicos essenciais em peixes, crustáceos e moluscos, como a calcificação do esqueleto e a formação das carapaças e valvas.

No caso da aquicultura, onde é mais fácil observar os efeitos das mudanças climáticas, já se sabe que mudanças nos padrões de precipitação e no escoamento superficial comprometem a qualidade da água para a atividade. Períodos de seca prolongada e enchentes afetam diretamente os estuários, onde é criada parcela significativa do camarão e das ostras de mangue no Brasil. A ocorrência de ciclones e enchentes causadas por precipitações acima das médias históricas também pode afetar estruturas fixas, como viveiros para criação de camarões, mesas e espinheiros para ostras, causando prejuízos consideráveis a produtores em diversas regiões do país, com perdas estruturais, morte de animais e impactos na cadeia logística.

Os impactos das mudanças climáticas podem afetar a produção de pescado, atingindo milhões de trabalhadores, principalmente os mais vulneráveis. No setor da pesca são registrados quase 2 milhões de pescadores, destacando-se os estados do Maranhão, Pará, Bahia e Amazonas como os que têm mais pessoas ocupadas nessa atividade (2). Em relação ao gênero, mulheres representam 50,17% do total, mas dominam na região Nordeste. Em termos de embarcações, pouco mais de 28 mil embarcações (2), principalmente de pequeno porte, são registradas. Estima-se que haja um número muito maior de embarcações na pesca costeira/marinha no Brasil. Para a pesca continental, não há sequer um

programa de cadastro de frota. Portanto, o montante de embarcações é desconhecido no Brasil.

Em 2023 houve um avanço na disponibilidade de dados sobre a pesca, com a publicação de estudos de pesquisadores que avaliaram os estoques de 70 dos 135 pesqueiros marinhos brasileiros (8). Para driblar a carência de dados, os pesquisadores utilizaram uma nova família de modelos chamados “pobres em dados”, que conseguem modelar estoques de uma forma que requer poucas informações. O trabalho mostrou que as regiões Sul e Sudeste concentram o maior número de pescarias marinhas e as mais plenamente ordenadas, em comparação com as regiões Norte e Nordeste. Embora os estoques avaliados só representem pouco mais de 50% do total, esse avanço foi considerado um salto de conhecimento, após um longo período de escassez, uma verdadeira “cegueira” sobre os recursos marinhos. O principal resultado é que, dos estoques avaliados, mais de 60% estão em situação crítica de sobrepesca, ou seja, a biomassa atual está menor do que a biomassa necessária para manter o estoque em níveis sustentáveis.

O MPA anunciou ações para a retomada da estatística pesqueira marinha no Brasil, com a reconstrução histórica de dados de desembarque de 1950 a 2022, e a retomada da estatística pesqueira marinha em regiões com lacunas temporais e espaciais críticas. Adicionalmente, desde 2023, o MPA vem realizando o recadastramento de pescadores (marinhos e continentais) e lançou o Programa Nacional de Regularização de Embarcação de Pesca (PROPESQ), com a finalidade de regularizar e atualizar as informações das embarcações de pesca.

O resultado do hiato no levantamento de dados sobre a pesca no país é uma fragilidade no gerenciamento dos recursos marinhos brasileiros. Menos de 10% dos estoques avaliados têm plano de gestão e pouco mais da metade têm medidas de regulamentação, como quotas (limites), período de fechamento da estação de captura e limite de tamanho [8]. Além disso, é preciso salientar que várias dessas regulamentações são apenas para as chamadas espécie-alvo, ou seja, as que são de interesse na pescaria. Há uma grande quantidade da chamada “fauna acompanhante”, que são espécies capturadas incidentalmente – por não serem desejadas ou por não terem valor comercial. Isso inclui baleias, golfinhos, tubarões e outras espécies que não são comercializadas. Apenas 12% das pescarias são obrigadas a adotar medidas para redução ou mitigação das capturas incidentais, ou seja, da fauna acompanhante (5).

A capacidade dos ambientes aquáticos de responder às mudanças ambientais, preservar as funções do ecossistema e manter a sustentabilidade dos recursos explorados pela pesca é limitada. Além da ameaça da sobrepesca, essa atividade vem sendo ameaçada por diversos impactos como a poluição por pesticidas, metais pesados e plásticos. O aquecimento do oceano e as consequentes mudanças climáticas vêm se somar a esse panorama, afetando sobremaneira a atividade pesqueira. Regiões tropicais, como o Brasil, poderão apresentar uma redução de até 40% nas suas capturas até a década de 2050 (9).

A redução da disponibilidade de determinadas espécies tanto pode ser consequência da sobrepesca, como das mudanças climáticas. Ou mesmo uma combinação dos dois fatores. Isso já está comprovado no Brasil para o camarão (10). No Nordeste, com a intensificação das secas reduz-se a quantidade de lama, que é o aporte de nutrientes para os camarões. Modelos simularam um aumento do esforço de pesca e um aumento da seca, para ver a reação da biomassa e da captura, comprovando que o efeito conjugado dos dois fatores é ainda pior que o de cada um isoladamente.

Os recursos pesqueiros podem ser impactados também por deslocamentos das espécies em busca de temperaturas ideais para seu funcionamento, ocasionando mudanças do potencial de um determinado local (11). Um exemplo já detectado: uma espécie de pequeno atum, tradicionalmente pescada no Nordeste, está aumentando sua área de expansão, indo para o sul em busca de águas menos aquecidas. Logo estará chegando ao Uruguai e à Argentina, o que vai requerer a negociação de um gerenciamento compartilhado entre os três países.

Há, ainda, os impactos sociais, pois a distribuição dos impactos ambientais não é igualitária entre a população, sendo a parcela marginalizada e historicamente invisibilizada a mais afetada. No caso, as pequenas comunidades tradicionais, praticantes da pesca artesanal.

A manutenção dos recursos pesqueiros depende de um projeto estruturado de estatística pesqueira e avaliação dos recursos marinhos e continentais, estes últimos praticamente invisíveis em termos de políticas públicas. As ações existentes são muito frágeis para serem a base de um projeto de longo prazo, uma vez que são iniciativas descontinuadas a cada fim de ciclo de financiamento ou mudança de governo. A instabilidade institucional e as lacunas na estatística pesqueira ocasionam uma pesca mal gerenciada. Onde não há gerenciamento apropriado, há riscos.

Isso também se aplica aos demais impactos, principalmente aos relacionados com as mudanças climáticas.

Com exceção de alguns poucos estudos específicos, a comunidade científica brasileira vem se dedicando de forma ainda tímida ao estudo dos impactos das mudanças climáticas na pesca e na aquicultura. Em decorrência disso, o conhecimento técnico-científico específico para as condições brasileiras é limitado. Isso se aplica também ao caso da aquicultura, uma atividade mais recente e, por sua natureza, com mais facilidade de gerenciamento e captação de dados para embasar pesquisas e ações. Embora alguns estudos sobre tolerância térmica, salina e de manejo adaptativo estejam disponíveis, se desconhece a existência de mapas de vulnerabilidade climática por região e espécie. São inexistentes os sistemas de monitoramento climático locais integrados à produção. A ausência de dados em tempo real e de modelos de previsão limita a capacidade de resposta dos aquicultores frente a variações bruscas do clima. Ainda se observam importantes lacunas em políticas públicas, pois, embora o Brasil possua uma Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC (12), a integração da aquicultura e da pesca em estratégias de adaptação ainda é limitada.

Para enfrentar os desafios das mudanças climáticas, são necessárias diversas medidas de adaptação e mitigação, as quais devem ser ajustadas de acordo com as circunstâncias regionais, pois ameaças diferentes exigem opções de adaptação diferentes. No caso da aquicultura, o aprimoramento das práticas de manejo é o primeiro passo para a adaptação da atividade ao clima, especialmente o aprimoramento da biossegurança, considerando densidades de estocagem menores e garantindo a localização adequada das áreas de produção. Nesse sentido, a implementação das melhores práticas de manejo – BMPs (do inglês Best Management Practices) em todos os aspectos da produção aquícola melhorará a resiliência geral. A suscetibilidade a doenças e parasitas tende a aumentar com as mudanças climáticas, principalmente em animais estressados. Garantir a saúde de peixes e camarões por meio da implementação de BMPs reduzirá os riscos sanitários.

Ainda no setor aquícola, o desenvolvimento de sistemas fechados de produção, com nenhuma ou pouca troca de água, como os de recirculação - RAS (*Recirculating Aquaculture Systems*) ou de bioflocos - BFT (*Biofloc Technology*), são algumas estratégias promissoras, uma vez que, com exceção da demanda por energia, são menos dependentes de recur-

sos ambientais externos. A aquicultura multitrófica integrada - IMTA (*Integrated Multi-Trophic Aquaculture*), ao utilizar espécies de diferentes níveis tróficos (peixes, camarões, moluscos, algas marinhas e/ou plantas halófitas), cria um sistema mais eficiente e ecologicamente correto. No IMTA, resíduos de uma espécie são utilizados por outra, otimizando o uso de recursos e minimizando o desperdício. Além do menor impacto ambiental, o IMTA oferece benefícios adicionais como maior eficiência de produção e diversificação de produtos.

Outras estratégias importantes são a diversificação de espécies, o que pode ajudar a mitigar o risco de perdas, pois algumas espécies podem ser mais resistentes a mudanças climáticas do que outras; e o melhoramento genético de espécies com maior resistência aos diferentes fatores de estresse ambiental. Ambas estratégias podem ajudar a garantir a segurança da produção e a sustentabilidade do setor de aquicultura. Ao se afastar das águas costeiras e, portanto, reduzir a pressão sobre os ecossistemas costeiros, a aquicultura em mar aberto (ou *offshore*) pode ser uma opção para reduzir o impacto dos eventos climáticos nessas regiões, mas seu desenvolvimento no Brasil requer avanços tecnológicos, logísticos e de legislação (13).

A produção de rações sustentáveis, principalmente pela redução da dependência de farinha e óleo de pescado, por meio da migração para ingredientes à base de plantas, insetos ou biomassa microbiana é outro caminho. A dependência de rações comerciais aumenta a vulnerabilidade do setor, pois as mudanças climáticas afetam a produção de insumos, como, por exemplo, a soja e o milho. Por isso, é recomendável priorizar a aquicultura de espécies de base da cadeia trófica, que não necessitam de rações. A criação de moluscos e o cultivo de algas e plantas halófitas devem ser priorizados, pois têm menor potencial de impacto ambiental, menor demanda por tecnologia e capital e, ao mesmo tempo, grande potencial de geração de renda e trabalho.

A capacitação técnica de aquicultores para práticas sustentáveis e adaptativas, através de programas de extensão focados em adaptação climática, é essencial para promover a adoção de boas práticas e o manejo preventivo. A inclusão da aquicultura em planos de adaptação, acesso a crédito climático, seguros agrícolas específicos e programas de apoio técnico são fundamentais para garantir a sustentabilidade do setor.

Já no caso da pesca, as necessidades mais urgentes são muito básicas: o país necessita de um programa perene de estatística pesqueira e

gestão da pesca. É fundamental garantir estabilidade institucional e continuidade das ações de gestão e pesquisa, antecipando e compreendendo os potenciais efeitos dos impactos ambientais, auxiliando os gestores na formulação de planos e tomada de decisão.

A adaptação às mudanças climáticas está intimamente relacionada com a capacidade de antecipar e compreender essas mudanças. As pesquisas atuais podem prever os efeitos e consequentemente auxiliar os gestores na formulação de planos e tomada de decisão. O tempo urge.

REFERÊNCIAS

1. FAO, *The state of world fisheries and aquaculture 2024. Blue transformation in action* (FAO, 2024).
2. BRASIL, Ministério da Pesca e Aquicultura, *Boletim Estatístico da Pesca e Aquicultura – Ano 2011* (Ministério da Pesca e Aquicultura, 2011).
3. IBGE, *Pesquisa da Pecuária Municipal 2013, e 2023*. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/3940> [Acessado em 02 de junho de 2025].
4. W.C. Valenti et al., Aquaculture in Brazil: past, present and future. *Aquaculture Reports* 19, 100611 (2021).
5. S.S. De Silva, D. Soto, “Climate change and aquaculture: potential impacts, adaptation and mitigation” in *Climate change implications for fisheries and aquaculture: overview of current scientific knowledge*, K. Cochrane, C. De Young, D. Soto, T. Bahri. Eds. (FAO, 2009), pp. 151-212.
6. S. Zeng et al., Warming-driven migration of enterotypes mediates host health and disease statuses in ectotherm *Litopenaeus vannamei*. *Communications Biology* 8, 126, 2025.
7. L.F.N. Vianna, R.V. de Souza, M.A. Schramm, T.P. Alves, Using climate reanalysis and remote sensing-derived data to create the basis for predicting the occurrence of algal blooms, harmful algal blooms and toxic events in Santa Catarina, Brazil. *Science of the Total Environment* 880, 163086 (2023).
8. Oceana Brasil. *Auditória da Pesca Brasil 2023* (Oceana Brasil, agosto 2024).
9. V.W.Y. Lam et al., Climate change, tropical fisheries and prospects for sustainable development. *Nature Reviews Earth & Environment* 1, 440–454 (2020).
10. A.S. Lira, F.L. Frédou, F. Le Loc 'h, How the fishing effort control and environmental changes affect the sustainability of a tropical shrimp small scale fishery. *Fisheries Research* 235, (March 2023). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2020.105824> [Acessado em 25 de julho de 2025].

11. L.G. Cardoso et al., Poleward catch displacement of blackfin tuna *Thunnus atlanticus* in the southwestern Atlantic Ocean: Possible effect of increasing water temperatures. *Fisheries Management and Ecology* 31(4), (2024).
12. Brasil, MMA, *Plano Nacional sobre Mudança do Clima* (MMA, 2008).
13. R.O. Cavalli, Ed. *Aquicultura do beijupirá (Rachycentron canadum) no Brasil* (Editora da FURG, 2021).

6.7 Observação oceânica e costeira

Carlos Alberto Eiras Garcia

O oceano cobre 70% da superfície da Terra, regula o clima, absorve cerca de 90% do calor excedente e, segundo o IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1), captura 25% do CO₂ emitido anualmente. Sustenta ecossistemas, regula o ciclo hidrológico e garante alimento, energia e subsistência para bilhões de pessoas. A observação oceânica e costeira é, portanto, atividade essencial para a proteção de ecossistemas e a produção de informações para os formuladores e executores de políticas públicas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

Mais de 40% da população mundial vive nas zonas costeiras, que são altamente vulneráveis a impactos como elevação do nível do mar, tempestades, erosão, salinização de aquíferos, alteração de regimes hidrológicos, acidificação, ondas de calor marinhas e perda de biodiversidade. Além dessas vulnerabilidades, a urbanização desordenada e a baixa capacidade adaptativa de muitas comunidades provocam degradação de habitats e agravam as desigualdades sociais.

Nas últimas décadas, a observação oceânica e costeira global evoluiu com a criação e fortalecimento de redes como o GOOS (*Global Ocean Observing System*, ou Sistema Global de Observação do Oceano, coordenado pela Comissão Oceanográfica Intergovernamental da UNESCO) e oGLOSS (*Global Sea Level Observing System*, ou Sistema Global de Observação do Nível do Mar, que mantém marégrafos distribuídos mundialmente). Contam-se ainda nessas redes internacionais o Argo, programa global de boias autônomas que monitoram temperatura e salinidade nos primeiros 2.000 metros de profundidade do oceano; o CMEMS (*Copernicus Marine Environment Monitoring Service*), serviço europeu de monitoramento do ambiente marinho, que fornece dados e previsões oceânicas; e a OceanSITES, rede internacional de observações em locais fixos e profundos, que cobre o oceano global.

Os equipamentos utilizados por tais redes, sistemas, projetos e serviços incluem satélites, boias, radares e gliders (veículos autônomos su-

baquáticos), que captam dados essenciais para o entendimento do clima e dos ecossistemas e para a formulação de políticas públicas. Além disso, a Inteligência Artificial e a tecnologia do Gêmeo Digital – uma réplica virtual que reproduz as condições do oceano em detalhe e em tempo real – têm ampliado a capacidade de análise e previsão.

No Brasil, iniciativas como o GOOS-Br, versão nacional do GOOS, e a ReNOMO (Rede Nacional de Observação e Monitoramento Oceânico), ampliam nossa capacidade de observação, oferecendo dados em tempo real sobre variáveis essenciais para a gestão costeira e a segurança climática.

Focado na observação do Atlântico Sul e Tropical, o GOOS-Br faz a integração de diferentes projetos e serviços: o PIRATA (*Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic*, projeto de cooperação Brasil–EUA–França que mantém boias no Atlântico Tropical; o GLOSS-Br, seção brasileira do GLOSS; o MOVAR, que utiliza termógrafos descartáveis para monitorar o transporte de calor na camada superficial do oceano entre o Rio de Janeiro e a Ilha de Trindade; a REMOBS (Rede de Modelagem e Observação Oceânica), que monitora as condições meteorológicas e oceanográficas na região oceânica adjacente ao território brasileiro; o SiMCosta, maior sistema de monitoramento da costa brasileira, constituído por boias e estações meteo-maregráficas para monitoramento em tempo real; o SAMOC/SAMBAR (*South Atlantic Meridional Overturning Circulation/South Atlantic MOC Basin-wide Array*), que mede a circulação meridional do Atlântico Sul; a Rede Dados; as estações costeiras do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e do CHM (Centro de Hidrografia da Marinha); e o iMePrO (Instrumentação e Melhores Práticas em Oceanografia), para padronizar a coleta e processamento dos dados observacionais no Brasil.

Já a ReNOMO foi criada em 2022, em edital do MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação) e o CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), para fazer a integração das diferentes redes, ampliar a cobertura observacional e qualificar os dados para aplicações como previsões climáticas e segurança marítima. A ReNOMO utiliza plataformas fixas (Figura 1), móveis, remotas e autônomas, e adota padrões internacionais na coleta, processamento e distribuição dos dados em um portal digital.

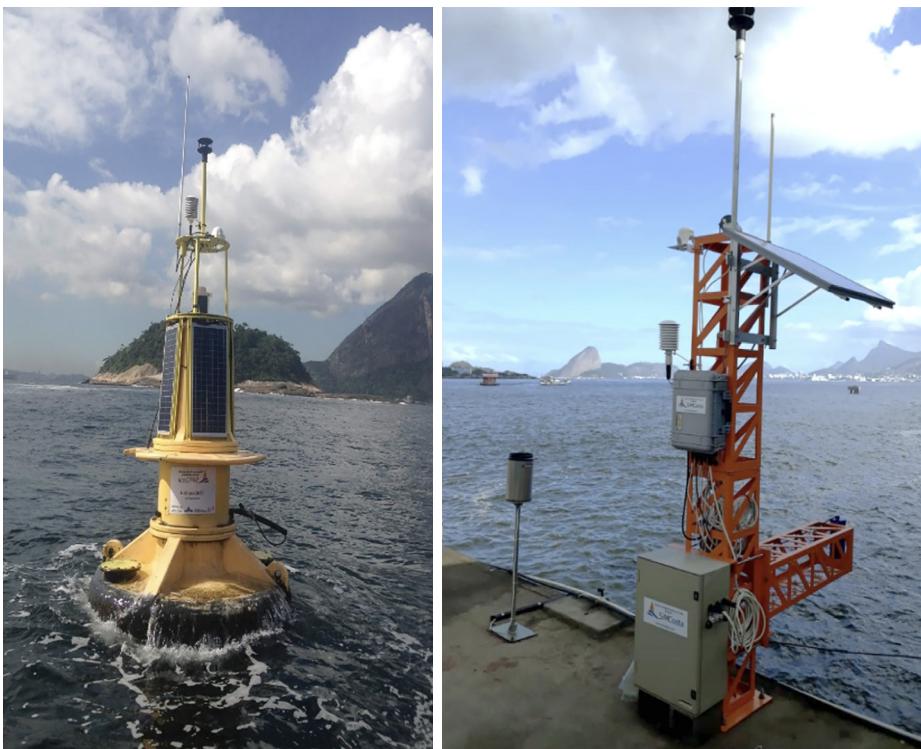


Figura 1: Plataformas fixas do SiMCosta. A boia instrumentalizada (esq.) e o me-
teo-maregráfico (dir.) estão instalados na cidade do Rio de Janeiro.

A ReNOMO identificou lacunas importantes na capacidade brasileira de observação costeira e oceânica: ausência de cobertura nas regiões Norte e Nordeste e na chamada Margem Equatorial, a região da plataforma continental entre o Amapá e o Rio Grande do Norte; falta de dados sobre variáveis críticas (nível do mar, ondas de calor marinhas, CO₂, oxigênio, acidificação); além de fragilidades em manutenção e calibração dos equipamentos e na interoperabilidade de dados.

Três avanços importantes para as atividades de observação oceânica e costeira no Brasil foram registrados recentemente. Em 2024, foi criado o Centro Nacional Multiusuário (CNM) em edital da FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), uma iniciativa do SiMCosta e do CEOCEAN (Centro de Estudos dos Oceanos e Clima, do Instituto de Oceanografia da Universidade Federal do Rio Grande). Seu objetivo é fortalecer o compartilhamento de infraestrutura, a inovação tecnológica, a ciência colaborativa e a capacitação de recursos humanos. Em 2025, a ReNOMO entrou em

nova fase, com a criação do INCT-ReNOMO (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia da ReNOMO), uma estrutura cooperativa nacional, voltada ao desenvolvimento tecnológico, monitoramento, capacitação e geração de produtos aplicados, com foco em modelagem e inteligência artificial. O novo INCT se organiza em quatro áreas: Tecnologia, Observação, Ciência/Educação e Produtos/Ferramentas, buscando impacto em setores como pesca, portos, energia e mitigação/adaptação climática.

Também em 2025, a Petrobras anunciou um investimento de R\$ 100 milhões para expandir a rede REMOObs, em parceria com a Marinha e universidades. O objetivo é aumentar a segurança offshore e fornecer dados em tempo real sobre as condições meteo-oceanográficas na plataforma continental. Parte dos dados será aberta à comunidade científica.

Contudo, apesar dos avanços, persistem muitas lacunas de observação. Há também necessidade de integração transdisciplinar dos dados. Nesse sentido, a governança e o financiamento são prioridades, pois há grande defasagem entre os recursos necessários e os obtidos. Faltam ainda muitas ações estruturantes, a começar pela expansão geográfica para regiões críticas e a padronização de protocolos. Outra necessidade é garantir a interoperabilidade de dados, isto é, nossa capacidade de integrar diferentes sistemas de observação para garantir que as informações sejam compatíveis e acessíveis em tempo real ou quase real, dentro dos princípios FAIR – um conjunto de diretrizes para tornar o dado científico Findable (encontrável), Accessible (acessível), Interoperable (interoperável) e Reusable (reutilizável).

São necessários também mais investimentos em sensores autônomos, radares e tecnologias nacionais. A assimilação dos dados em modelos numéricos e a criação de um repositório nacional de dados abertos são fundamentais. É igualmente urgente fortalecer a formação técnica e acadêmica e estabelecer centros regionais. Por fim, é essencial garantir financiamento contínuo, combinando recursos públicos, parcerias privadas e mecanismos inovadores como os chamados títulos azuis – papéis negociados no mercado financeiro para financiar projetos de proteção e restauração do oceano.

O fortalecimento da observação oceânica e costeira é estratégico para o enfrentamento das mudanças climáticas, a proteção dos ecossistemas marinhos e a formulação de políticas públicas baseadas em evidências observacionais.

O agravamento dos impactos ambientais em regiões costeiras e oceânicas reforça a necessidade urgente de ampliar e consolidar os sistemas de observação no Brasil. Apesar dos avanços com redes como o GOOS-Br e a ReNOMO, persistem lacunas importantes em cobertura geográfica, variáveis monitoradas e integração de dados. A criação do INCT-ReNOMO marca um avanço estratégico, mas, para enfrentar os desafios climáticos e assegurar a sustentabilidade marinha, é fundamental garantir financiamento contínuo para as redes de observação oceânica e costeira, a padronização dos dados e o alinhamento com iniciativas globais.

REFERÊNCIAS

1. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), “Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC» (Cambridge University Press, 2021).

6.8 Transição energética

Segen Farid Estefen

A transição para as energias renováveis, em particular a energia renovável no oceano, contribui para reduzir as emissões de gases do efeito estufa e, portanto, combater as mudanças climáticas. A energia eólica offshore tem tido avanços significativos na última década, impulsionada por inovações tecnológicas e investimentos. Proporciona maior rendimento energético devido a ventos mais fortes e constantes no oceano, além de evitar disputas pela ocupação da zona costeira. A maior maturidade tecnológica em relação a outras fontes renováveis do oceano indica que a implantação de parques eólicos offshore de grande porte abre a possibilidade de terem sua infraestrutura utilizada também para as demais fontes renováveis, o que significará ganho de competitividade para todas. Deve-se registrar, também, o crescente interesse pela energia solar offshore, principalmente os sistemas flutuantes com painéis solares, que podem ocupar grandes áreas no espaço marinho. Embora em estágio inicial de desenvolvimento, demonstram grande capacidade para atender regiões costeiras e setores sustentáveis da economia do oceano, a economia azul.

A energia renovável no oceano pode ser classificada em dois grupos. Um deles engloba as fontes renováveis oriundas da água salgada, tais como onda, corrente, maré, gradiente de temperatura e gradiente de salinidade. O outro grupo é composto por fontes renováveis de outras origens, que podem ser captadas no espaço marinho, como a energia eólica offshore e a solar flutuante. Além da conversão dessas fontes em eletricidade, outros produtos podem ser obtidos, como, por exemplo, a água dessalinizada e um combustível de baixa emissão, o hidrogênio verde. Este é obtido da eletrólise da água do mar, um método que utiliza eletricidade para separar o hidrogênio do oxigênio. Se a eletricidade for obtida de fontes renováveis, o resultado será a produção de um combustível sem emissão de dióxido de carbono para a atmosfera, ao contrário do que acontece com os combustíveis fósseis.

A identificação das regiões mais promissoras em termos de potencial energético das fontes renováveis é feita por medições locais e por sensoriamento remoto. Estudos para a Zona Econômica Exclusiva do Brasil indicam as principais áreas de interesse para a conversão das fontes renováveis (1). As tecnologias adequadas para os recursos potenciais das regiões mais promissoras são baseadas em estudos de viabilidade técnica e econômica para estimar a confiabilidade do sistema de conversão e o custo da energia gerada e dos produtos obtidos.

As fontes renováveis necessitam de estruturas adequadas para a instalação dos equipamentos de conversão. Análises hidrodinâmicas e estruturais são desenvolvidas na avaliação dos conceitos propostos. A depender da região e dos recursos potenciais disponíveis, deve-se também avaliar a efetividade do denominado *Hub* de Energia, a combinação de fontes renováveis a serem convertidas, utilizando infraestrutura comum que incorpora a transmissão elétrica e o sistema de armazenamento. Tendo em vista o maior grau de maturidade tecnológica e a competitividade econômica, a energia eólica offshore atualmente desponta como a mais adequada para viabilizar as demais fontes, estas selecionadas de acordo com o potencial energético disponível para complementar a geração eólica.

A otimização com base em sistemas avançados de controle e o emprego de técnicas de Inteligência Artificial (IA) têm contribuído para os avanços tecnológicos e maior competitividade das fontes renováveis no oceano, podendo se constituir num diferencial positivo para o uso sustentável do oceano, característica da economia azul, que harmoniza preservação com desenvolvimento econômico e social.

A energia eólica offshore está se consolidando como uma das soluções mais promissoras para a transição energética global. A instalação de turbinas eólicas no ambiente marinho garante maior eficiência na conversão do potencial energético em eletricidade, em razão da maior intensidade e constância dos ventos, que propicia o uso de turbinas de alta potência (2,3). A infraestrutura para a implementação desses parques pressupõe a utilização de turbinas eólicas fixas, com a utilização de estacas ou jaquetas para profundidades de até 60 metros, e subestruturas flutuantes em maiores profundidades. Os avanços tecnológicos têm sido significativos, especialmente para as aplicações de subestruturas flutuantes (4,5). A exploração desse recurso oferece grande potencial para a geração de eletricidade renovável em larga escala e a produção de hidrogênio verde.

Os impactos sobre a vida marinha, aves e biodiversidade, assim como nas comunidades da zona costeira nas fases de construção e operação exigem monitoramento regional para o desenvolvimento de soluções adequadas (6). Outra questão relevante é o aprimoramento das previsões de ondas, correntes e vento, que possibilitará otimizar os sistemas de geração e propiciar maior segurança nas operações.

Na Zona Econômica Exclusiva brasileira o potencial eólico offshore é da ordem de 5.833 GW (7), com predominância do Nordeste em termos de potencial e qualidade do vento (velocidade e fator de capacidade), embora potenciais significativos sejam também encontrados nas regiões Sudeste e Sul. O potencial técnico é substancialmente menor, embora ainda relevante, considera as limitações tecnológicas e outros usos do espaço marinho.

Outra fonte renovável é o movimento das ondas. Consequência da transferência de energia dos ventos na superfície oceânica, o movimento das ondas pode ser convertido em energia mecânica e em eletricidade. Com o avanço da engenharia e dos materiais, várias tecnologias foram desenvolvidas, associadas a centenas de patentes registradas. Apesar dos desafios técnicos relativos a concepções eficientes e economicamente competitivas, as tecnologias de conversão de energia das ondas representam alternativas promissoras em nichos específicos de aplicação nas áreas em que essa fonte apresenta altura de onda e frequência de ocorrência adequadas, visto que o potencial energético é proporcional ao quadrado da altura de onda e ao período. Tendo em vista os padrões cílicos relativamente constantes, é possível prever a disponibilidade desse recurso. Estima-se que o potencial teórico global de energia das ondas seja de aproximadamente 32.000 TWh/ano (8).

Como a maior parte do recurso energético das ondas está concentrada em áreas de águas profundas e ultraprofundas, essas regiões tornam-se cruciais para o aproveitamento eficiente. As condições climáticas em ambientes offshore tendem a ser mais constantes, com ondas que apresentam maior regularidade em altura e período, fatores essenciais para a operação contínua e previsível dos conversores de energia de ondas.

Os principais tipos de dispositivos utilizados para a conversão da energia das ondas são: Coluna de Água Oscilante (OWC), Corpo Oscilante (OB) e Overtopping (OT). As patentes registradas, em geral, estão baseadas nesses conceitos. No caso do OWC, a conversão ocorre por meio da compressão pneumática numa câmara de ar em contato com a su-

perfície do mar, propiciando que a massa de ar expulsa da câmara pela variação da altura de onda impulsiona uma turbina bidirecional, a qual continuará operando no mesmo sentido quando o ar retornar à câmara. Para o conceito OB, o processo envolve geralmente um sistema hidráulico ou mecânico, que converte o movimento relativo de dois corpos com deslocamento relativo para produzir energia elétrica ou mecânica. No conceito OT, a água armazenada pela ação das ondas em um reservatório aciona uma turbina hidráulica de baixa queda posicionada no fundo do reservatório, convertendo a energia potencial em energia cinética para a produção de eletricidade.

As pesquisas sobre energias renováveis oceânicas se iniciaram no Brasil, de forma mais consistente, na COPPE/UFRJ em 2001, com foco nas fontes de onda e de maré. Quinze anos depois, com o interesse de outros grupos de pesquisa, foi constituído o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Energias Renováveis Oceânicas e Fluviais (INEOF). Atualmente, dois projetos de conversores de energia de ondas estão em andamento no Grupo de Energia Renovável no Oceano (GERO) da COPPE/UFRJ: o conversor hiperbárico de ondas (9), que teve um protótipo instalado no Porto do Pecém, no Ceará, de 2010 a 2014, e outro, do tipo corpo oscilante, em fase de testes laboratoriais.

Já a energia das marés, também conhecida como energia mareomotriz, é uma forma de geração de eletricidade que aproveita as variações cíclicas do nível do mar e a velocidade do fluxo da água, resultantes do movimento da Terra em relação à Lua e ao Sol, bem como da interação das respectivas forças gravitacionais. Fatores como a inclinação axial da Terra, sua rotação e a interação entre forças gravitacionais e rotacionais influenciam a dinâmica das marés, fazendo com que suas condições variem ao longo do tempo. Essas variações são mais intensas em regiões costeiras, especialmente em canais estreitos, onde o confinamento da água amplifica o fluxo e aumenta a densidade de energia disponível para conversão.

Existem dois fenômenos principais associados à geração de energia a partir das marés: amplitude e corrente de maré. A amplitude refere-se à diferença de altura entre as marés alta e baixa. Quanto maior essa variação, maior o potencial energético disponível. A conversão de energia é a transformação da energia potencial em energia elétrica. Já a corrente de maré é gerada pelo fluxo da água durante os ciclos de maré; a energia cinética daí resultante pode ser convertida em energia elétrica.

A Usina de La Rance, na França, foi a primeira instalação maremotriz de grande porte, com capacidade instalada de 240 MW, tendo iniciado sua operação em 1966. A Usina de Sihwa, na Coreia do Sul, com capacidade instalada de 252 MW, iniciou a operação em 2012. Conceitos inovadores de turbinas submersas têm sido testados e protótipos instalados, principalmente no Reino Unido. A energia das marés tem alta previsibilidade, permitindo projeções sobre a geração de energia a longo prazo.

Estima-se que os recursos globais de energia das marés totalizam 3 TW [8]. Deve ser enfatizada a importância do sensoriamento remoto com o tratamento das imagens de satélites para complementar as medições in-situ (10). No Brasil os recursos mais significativos se encontram na Baía de São Marcos, no Maranhão, e na costa amazônica da região Norte (11,12).

Outra fonte renovável de energia disponível na água do mar é o gradiente térmico, a diferença de temperaturas na superfície e na profundidade do oceano. Essa diferença pode ser convertida em eletricidade tendo por base o Ciclo de Rankine e utilizando o processo denominado Conversão da Energia Térmica do Oceano (OTEC, do inglês Ocean Thermal Energy Conversion).

O sistema OTEC tem o maior potencial teórico entre as fontes oceânicas oriundas da água salgada, cerca de 44.000 TWh/ano, e é preponderante nas regiões tropicais (8). Nessas regiões, a temperatura da superfície do mar pode ultrapassar 25°C, enquanto a mil metros de profundidade cai para valores próximos de 5°C. Para fins de geração elétrica, recomenda-se valores do gradiente térmico iguais ou superiores a 20°C. A grande vantagem da OTEC é poder ser usada como energia de base, sem a intermitência que caracteriza a maioria das fontes renováveis.

A tecnologia é promissora para países em regiões tropicais, oferecendo uma alternativa sustentável e inovadora. O desafio atual é que o desenvolvimento tecnológico possibilite a redução dos custos dos componentes do sistema OTEC e, consequentemente, maior competitividade quanto ao custo da energia gerada. No caso de sistemas flutuantes operando em grandes profundidades, o desafio tecnológico adicional é o dimensionamento dos dutos de captação da água fria (13).

O sistema OTEC pode operar em circuito aberto, fechado ou híbrido, o primeiro utilizado principalmente para o processo de dessalinização da água do mar, o segundo empregando fluidos com menor taxa de va-

porização, como a amônia, para maior eficiência na geração elétrica, e o terceiro explorando ambos os processos para a otimização do sistema.

Existem duas plantas de demonstração de OTEC, uma no Havaí (EUA) e outra em Okinawa (Japão), cada qual com capacidade instalada de 100 kW. O Brasil tem excelentes condições para instalações de OTEC nas regiões Nordeste e Norte, onde o gradiente mínimo de temperatura de 20 graus Celsius está disponível o ano todo. Uma localização de interesse científico para a instalação de um protótipo é a Ilha de Fernando de Noronha, que poderia se beneficiar da OTEC para geração de eletricidade e dessalinização da água do mar, assim como de laboratório para pesquisas científicas visando a otimização da tecnologia para instalação em outros pontos da Zona Econômica Exclusiva.

Do que foi exposto, conclui-se que o Brasil tem um imenso potencial de recursos energéticos renováveis no oceano, o que o posiciona como um importante ator na transição energética global. Com uma vasta costa e condições favoráveis para a exploração de energia eólica offshore, ondas, marés e gradientes térmicos, o país pode não apenas atender às suas demandas internas, mas também contribuir robustamente para a comunidade internacional. A transferência de conhecimento em avaliação de recursos e tecnologias de conversão permitirá ao Brasil compartilhar suas experiências e inovações, fortalecendo sua relevância no setor e ajudando a promover a descarbonização global, bem como a sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

1. M. Shadman et al., Ocean Renewable Energy Potential, Technology, and Deployments: A Case Study of Brazil. *Energies* 12, 3658-3695 (2019).
2. E.C. Nogueira, R.C. Morais, A.O. Pereira Junior, Offshore wind power potential in Brazil: Complementarity and synergies. *Energies* 16, 5912 (2023).
3. L.F. de Assis et al., Assessment of the offshore wind technical potential for the Brazilian Southeast and South regions. *Energy* 196, 117097 (2020).
4. A.A. Shittu et al., Reliability assessment of a hybrid floating wind turbine concept based on coupled aero-hydro-structural dynamics. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy* 15, 100 (2025).
5. M.M. Amiri, M. Shadman, S.F. Estefen, A review of physical and numerical modeling techniques for horizontal-axis wind turbine wakes. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 193, 114279 (2024).

6. O.M. Hernandez C. et al., Environmental impacts of offshore wind installation, operation and maintenance, and decommissioning activities: A case study of Brazil. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 144, 110994 (2021).
7. EPE, Roadmap Eólica Offshore Brasil, NT-EPE-PR-001/2020-r2 (2020).
8. A. Lewis, S.F. Estefen, Eds. “Ocean Energy” in *Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, IPCC SRREN, Org. (Cambridge University Press, 2012), v. 01, pp. 497-534.
9. P.B. Garcia-Rosa et al., Wave-to-Wire Model and Energy Storage Analysis of an Ocean Wave Energy Hyperbaric Converter. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 39, 1-12 (2014).
10. R.M. Ferreira, S.F. Estefen, R.Romeiser, Under What Conditions SAR Along-Track Interferometry is Suitable for Assessment of Tidal Energy Resource. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 1, 1-12 (2016).
11. A. Aguiar, M. M. Almeida, M. Cirano, J. Pereira, L. Cotrim da Cunha, Numerical assessment of tidal potential energy in the Brazilian Equatorial Shelf. *Renewable Energy* 220, 119684 (2024).
12. R.W.Q. Farias, M. El-Robrini, O.R. Saavedra, Assessment of tidal current potential in the Amapa’s inner continental shelf (Eastern Amazonia - Brazil). *Ocean Dynamics* 1, 1-15 (2024).
13. J. Tan et al., Stability analysis on internal flow-induced cold-water pipe with non-uniform and variable cross-section for OTEC subject to multiple clump weights. *Ocean Engineering* 330, 121191 (2025).

6.9 Saúde e oceano

**Carla de Freitas Campos, Wim Degraeve,
Alexander Turra, José Luiz Moutinho, Paulo Gadelha**

O aquecimento e a acidificação do oceano, a erosão costeira e eventos extremos são uma realidade. Esse desequilíbrio ambiental traz importantes riscos para a saúde humana, animal e dos ecossistemas, com ameaças de aparecimento de novas zoonoses e pandemias. Agentes patogênicos novos ou reemergentes e a ocupação de novos nichos por insetos vetores e reservatórios são uma ameaça direta à saúde pública.

As mudanças climáticas representam atualmente um dos maiores desafios globais enfrentados pela humanidade. Seus impactos se manifestam em diversos sistemas naturais e sociais, sendo o oceano e as zonas costeiras particularmente sensíveis e vulneráveis. Há que se considerar que a saúde humana, a dos animais, dos ecossistemas e do ambiente como um todo são interligadas e interdependentes. Essa compreensão, consolidada ao longo das últimas décadas, fundamenta a abordagem de “Uma Só Saúde”, que propõe a atuação integrada entre diferentes setores, instituições e territórios para lidar com os desafios de saúde contemporâneos. Trata-se de uma estratégia que articula conhecimentos e práticas de forma transdisciplinar, multiprofissional e colaborativa, reconhecendo que soluções sustentáveis e efetivas dependem do diálogo entre diferentes saberes e da cooperação entre áreas de conhecimento, instituições e regiões geográficas (1).

A abordagem “Uma Só Saúde” adota a determinação social e ambiental da saúde como eixo central e é norteada pelo conceito ampliado de saúde – definida como o resultado de condições de alimentação, habitação, educação, renda, meio ambiente, trabalho, transporte, emprego, lazer, liberdade, acesso e posse da terra e acesso a serviços de saúde (2). Nesse contexto, o ambiente, incluindo o oceano, deve ocupar lugar estratégico nas políticas públicas de saúde.

O Brasil, com mais de 8 mil quilômetros de costa, dezenas de milhares de pessoas vivendo em regiões costeiras e ecossistemas marinhos

de alta biodiversidade, ocupa uma posição estratégica nesse panorama. Além disso, é um país com importante tradição científica na área ambiental, com contribuições significativas para a compreensão dos efeitos do clima sobre os sistemas oceânicos e costeiros.

Apesar de sua importância vital, o oceano ainda é pouco reconhecido como determinante da saúde. É ele que regula o clima, armazena carbono, modula os ciclos da água e influencia diretamente a produção de alimentos, mesmo em regiões afastadas do litoral (3). Contradictoriamente, a saúde do oceano é pouco conhecida e frequentemente negligenciada; e suas contribuições para o bem-estar humano e manutenção da vida na Terra permanecem invisíveis em muitas tomadas de decisão e estratégias que deveriam incluí-lo. Por outro lado, diversas iniciativas de pesquisa no Brasil devem ser destacadas, como o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC), o Projeto de Monitoramento do Litoral (Projeto MARE) e muitos trabalhos que são realizados por universidades e centros de pesquisa, como a Fiocruz, focando na relação Saúde e Ambiente.

Consciente das lacunas, a Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz) e instituições parceiras iniciaram, em 2023, um movimento para ampliar o reconhecimento do oceano no campo da saúde, dando origem à proposta de “Uma Só Saúde Azul (*Blue One Health*)”. A iniciativa busca integrar explicitamente a saúde do oceano à abordagem “Uma Só Saúde”, considerando os impactos recíprocos entre sistemas marinhos e a vida terrestre — humana e não humana. Nesse sentido, as redes e colaborações regionais, nacionais e internacionais são cruciais, visando parcerias intersetoriais, multiprofissionais e transdisciplinares.

O Brasil tem demonstrado protagonismo na agenda de “Uma Só Saúde”, com a elaboração, em andamento, de um Plano de Ação Nacional. Esse plano deve refletir as diretrizes estabelecidas pelo Painel de Especialistas de Alto Nível em Uma Só Saúde - OHHLEP (4). A incorporação do oceano e das águas continentais ao plano representa uma oportunidade estratégica para traduzir em políticas públicas robustas e transformadoras o conhecimento científico acumulado e enfatizar a intrínseca relação entre a saúde do oceano e a saúde humana, destacando como a preservação marinha impacta diretamente nosso bem-estar físico e mental. Além de fornecer alimentos, oxigênio e regular o clima, o oceano oferece oportunidades de recreação e promove a saúde mental, oportunidade ainda pouco valorizada no país.

Por outro lado, o oceano é, também, um vetor de transporte de agentes patogênicos, com infecções virais, bacterianas, fúngicas e parasitárias em aves e animais marinhos, em microalgas com suas toxinas, bem como de contaminação química orgânica, inorgânica, de fertilizantes, plásticos, pesticidas, hormônios, fármacos e drogas. Mas há grande promessa e oportunidade para que estudos científicos desvendem o potencial de organismos marinhos, através da bioprospecção, visando à descoberta de novos processos biotecnológicos, fármacos, moléculas e enzimas com aplicação industrial. No entanto, a biodiversidade marinha é seriamente ameaçada pela pesca ilegal, não reportada e não regulamentada e pela acidificação da água do mar. A pesquisa científica e o desenvolvimento biotecnológico podem ajudar a enfrentar os efeitos das mudanças climáticas sobre a distribuição de espécies marinhas e a disponibilidade de recursos pesqueiros.

Além da promoção da pesquisa, é crucial também promover a conscientização sobre a importância da saúde do oceano, a necessidade de práticas sustentáveis para a proteção dos ecossistemas marinhos e a implementação de medidas para reduzir a poluição, proteger habitats e instaurar o uso sustentável dos recursos oceânicos.

As ações de adaptação e mitigação precisam considerar as desigualdades históricas entre populações e territórios. Grupos em vulnerabilidade social e ambiental serão os mais afetados — e, provavelmente, os primeiros a sofrer os impactos das mudanças climáticas de forma mais evidente (5). Urge fortalecer os sistemas de saúde (humana e animal), ampliar os mecanismos de proteção ambiental e garantir acesso equitativo a condições dignas de vida. Respostas eficazes também requerem o fortalecimento do agenciamento comunitário e adoção de uma ecologia de saberes que inclua a interação entre conhecimento científico e saberes tradicionais e locais, valorizando experiências, práticas e percepções de populações que habitam e cuidam dos territórios.

São parte dos pilares essenciais dessa resposta integrada o estudo e restauração de ecossistemas costeiros; a formalização de grandes áreas costeiras e oceânicas como unidades de proteção ambiental; a proibição de pesca predatória e de arrasto, com fiscalização adequada; a redução das emissões de gases de efeito estufa; a transição energética para fontes renováveis; o consumo consciente e a pesquisa e proteção da biodiversidade, entre outros.

Entre as metas internacionais, destaca-se o compromisso de proteger ao menos 30% das áreas marinhas, terrestres e de águas interiores até 2030, conforme o Marco Global da Biodiversidade de Kunming-Montreal (6). Para que esse objetivo se concretize, será necessário que os países, Brasil incluído, fortaleçam os sistemas de governança e garantam investimentos em ciência, inovação e infraestrutura resiliente. Ações como a implantação de sistemas de alerta precoce, a requalificação urbana e a regulação do uso de poluentes, como agrotóxicos e plásticos, também são componentes indispensáveis. Em termos de políticas públicas no Brasil, o Zoneamento Ecológico-Econômico costeiro tem sido uma ferramenta relevante, mas ainda subutilizada. A integração de dados científicos em planos de adaptação climática em nível municipal e estadual permanece como um desafio.

Os próximos anos serão decisivos para a consolidação de uma governança costeira climática no Brasil. É fundamental fortalecer redes de pesquisa interdisciplinar e interinstitucional, ampliar o financiamento de longo prazo para séries históricas de dados costeiros e investir na formação de recursos humanos em ciências do mar.

Mas nenhuma transformação será possível sem um processo contínuo de educação, comunicação e engajamento social. É preciso promover uma mudança cultural na forma como nos relacionamos com o planeta, com os outros seres vivos e uns com os outros. Pesquisar, conhecer e cuidar do oceano, dos animais e do ambiente é, em última instância, cuidar de nós mesmos. A saúde deve ser compreendida como direito universal e dever do Estado, com base em sua determinação socioambiental e interdependência com todas as formas de vida. Nesse sentido, a criação e implementação de Planos Nacionais em Uma Só Saúde — que incluam explicitamente o oceano — são passos fundamentais para a construção de um futuro mais justo, equilibrado e sustentável.

REFERÊNCIAS

1. WHO Media Team, *Tripartite and UNEP support OHHLEP's definition of "One Health"*. Joint Tripartite (FAO, OIE, WHO) and UNEP Statement (2021). Disponível em: <https://www.who.int/news/item/01-12-2021-tripartite-and-uneep-support-ohhlep-s-definition-of-one-health> [Acessado em 25 de junho de 2025].
2. Conferência Nacional de Saúde, 8, *Anais...* (Centro de Documentação do Ministério da Saúde, Brasília, 1987).

3. L.E. Fleming, B. Maycock, M.P. White, M.H. Depledge, Fostering human health through ocean sustainability in the 21st century. *People and Nature* 1, 276–283 (2019).
4. FAO, UNEP, WHO, WOAH, *One Health Joint Plan of Action* (2022–2026) (FAO, 2022).
5. K. Iskandar, A. Anas, S. Bahri, F. Mennec, T. Baharuddin, Social vulnerability and climate change: a bibliometric analysis. *Cogent Social Sciences* 10(1), (2024).
6. Convenção sobre Diversidade Biológica (CBD), *Marco Global de Biodiversidade de Kunming-Montreal*. COP-15, Montreal, Canadá (2022).

6.10 Justiça climática e comunidades costeiras tradicionais

Leandra Regina Gonçalves

As mudanças climáticas têm provocado impactos severos nas zonas costeiras, como a elevação do nível do mar, acidificação do oceano e aumento da frequência de eventos extremos, que comprometem ecossistemas sensíveis como manguezais e recifes de coral e afetam a disponibilidade de recursos naturais essenciais à subsistência (1). Essas regiões são vitais para habitantes de regiões costeiras, especialmente comunidades tradicionais que nelas constroem suas identidades, modos de vida e laços ancestrais com o território (2).

As populações costeiras vulnerabilizadas enfrentam desproporcionalmente, em relação a outros grupos, os efeitos da crise climática, mesmo sendo historicamente pouco responsáveis por sua origem. Aos impactos ambientais somam-se desigualdades sociais e institucionais, o que resulta em vulnerabilidades múltiplas (3). A pesca artesanal, por exemplo, é altamente sensível às mudanças nos parâmetros oceanográficos, à erosão, à salinização de aquíferos e à perda de biodiversidade. Tudo isso afeta diretamente a segurança alimentar e a estabilidade econômica das comunidades costeiras (4).

Nesse contexto, a justiça climática surge como um campo fundamental para integrar dimensões éticas, sociais e territoriais aos debates sobre adaptação e mitigação. Reconhecer os saberes locais, os direitos territoriais e o protagonismo das populações afetadas é essencial para a construção de respostas mais justas e eficazes (5). Ampliar espaços de escuta e coconstrução e superar práticas extrativas de produção de conhecimento são passos fundamentais para promover uma governança climática e oceânica sensível às desigualdades (6). Isso significa evitar práticas como a retirada de informações, saberes ou dados de comunidades locais ou tradicionais sem que haja retorno, reconhecimento ou benefício direto para essas populações. Um exemplo é a abordagem de pesquisadores que visitam comunidades costeiras para levantar dados sobre

pesca artesanal, mas não compartilham os resultados ou não envolvem os pescadores na interpretação e uso das informações coletadas.

A literatura sobre justiça climática tem se expandido significativamente nas últimas décadas, com ênfase crescente em abordagens interseccionais que reconhecem a vulnerabilidade diferenciada de grupos historicamente marginalizados, como povos indígenas, comunidades quilombolas e populações ribeirinhas e costeiras (7,2). No contexto das zonas costeiras e marinhas, os estudos demonstram que os impactos das mudanças climáticas — como a elevação do nível do mar, eventos climáticos extremos e acidificação do oceano — agravam desigualdades sociais já existentes e colocam em risco modos de vida sustentáveis e profundamente conectados ao território (4,8).

Novos estudos têm demonstrado que as comunidades costeiras, altamente dependentes de recursos naturais, estão na linha de frente das mudanças climáticas (8, 10). A produtividade da pesca e da agricultura tem diminuído e infraestruturas críticas enfrentam crescente vulnerabilidade frente ao avanço do mar e à intensificação de eventos como o branqueamento de corais, fenômenos que afetam gravemente populações dependentes de recifes para alimentação, renda e proteção costeira. A intensidade dos impactos varia para cada região e comunidade, conforme a exposição aos riscos, o grau de dependência dos ecossistemas afetados e a capacidade adaptativa dos grupos.

Apesar do crescente reconhecimento da necessidade de fortalecer a capacidade adaptativa, ainda são escassas as orientações práticas sobre como desenvolvê-la efetivamente (2,3). Estudos recentes sugerem que a adaptação não depende apenas da disponibilidade de recursos financeiros, humanos ou sociais, mas também da disposição e capacidade de converter esses recursos em ações eficazes (3). Além disso, a ausência de dados desagregados, ou seja, de detalhamento dos dados em categorias como gênero, idade, renda, localidade ou pertencimento étnico-cultural, que oculta desigualdades estruturais, dificulta o direcionamento de políticas eficazes e impede que grupos mais vulneráveis sejam priorizados nos planos de adaptação. Isso favorece a exclusão das populações vulneráveis dos processos decisórios e limita o avanço de soluções justas e sustentáveis (5).

A ciência brasileira tem desempenhado papel relevante na análise das vulnerabilidades socioambientais associadas às mudanças climáticas, mas os contextos costeiros e marinhos ainda precisam de mais

atenção. Iniciativas como o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) e a Rede Clima vêm promovendo a aproximação entre ciência, políticas públicas e justiça ambiental – uma iniciativa essencial para a integração entre saberes acadêmicos e conhecimentos tradicionais na formulação de respostas mais justas e eficazes para o enfrentamento da crise climática.

Projetos como o Maretórios Amazônicos (FAPESP, FAPESPA, Fundação Araucária e CNPq) e o Vozes do Mar (British Council) exemplificam abordagens metodológicas participativas e transdisciplinares, que buscam articular o conhecimento científico com as percepções, experiências e práticas das comunidades costeiras. Essas iniciativas contribuem não apenas para a produção de dados mais contextualizados, mas também para o fortalecimento do protagonismo comunitário na governança ambiental (2).



Figura 1: Comunidade de pesca artesanal em Jubim (Ilha de Marajó – PA) e suas práticas tradicionais. Foto: Lara Sartorio/Projeto Maretórios.

É igualmente necessário reconhecer o papel ativo que comunidades tradicionais vêm exercendo na construção de respostas aos impactos climáticos, por meio de sua participação em conselhos gestores, audiências públicas, redes de pesquisa-ação e espaços de consulta territorial. Esses processos reforçam a centralidade do diálogo de saberes na formulação de políticas públicas que respeitem os direitos territoriais e culturais dessas populações.

Experiências brasileiras demonstram que medidas de adaptação eficazes devem ser baseadas em soluções territorializadas e culturalmente sensíveis (10) (Figura 2). Trata-se de propor soluções que considerem as especificidades de cada território (como clima, geografia e modo de vida local) e os valores culturais das populações envolvidas. Uma estratégia de adaptação que incentive, por exemplo, o cultivo de espécies nativas em manguezais caiçaras, respeitando tanto o conhecimento tradicional quanto o ecossistema, é mais eficaz e legitimada socialmente do que uma intervenção externa padronizada.

Fortalecer a soberania alimentar, a gestão comunitária dos recursos naturais e a proteção de ecossistemas estratégicos, como os manguezais, recifes e restingas, são ações fundamentais para promover a resiliência socioecológica frente às mudanças climáticas. Já no campo da mitigação, é essencial reconhecer e apoiar práticas tradicionais de uso sustentável, que contribuem tanto para a conservação da biodiversidade quanto para o sequestro de carbono azul.

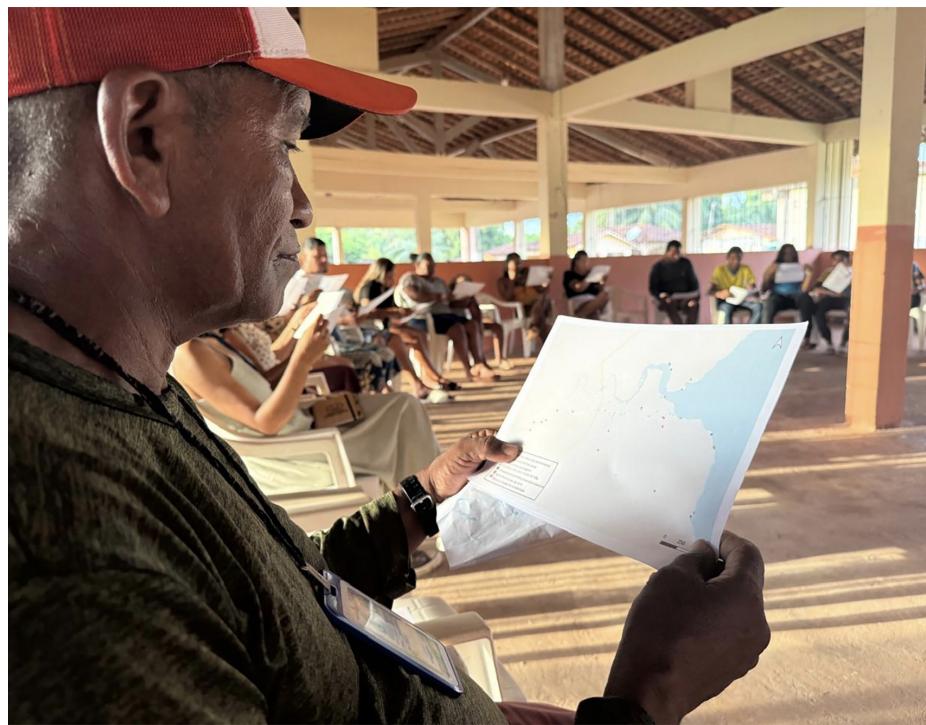


Figura 2: Oficina de coconstrução na comunidade de Jubim, Ilha do Marajó (PA).
Foto: Projeto Maretórios.

Contudo, para que essas estratégias ganhem escala e efetividade, é necessário ampliar mecanismos de escuta ativa e fomentar a ciência cidadã, em que as comunidades colaboram ativamente em todas as etapas da pesquisa científica: coleta de dados, análise, monitoramento e disseminação dos resultados. Exemplo disso são projetos em que as comunidades, usando aplicativos ou protocolos simples, ajudam a alimentar bancos de dados com informações sobre variações no nível da maré ou de espécies marinha.

Para que tais estratégias e ações se realizem, é essencial garantir financiamento público continuado para as pesquisas comprometidas com a justiça ambiental e, dentro desta, a justiça climática. Isso implica também fortalecer arranjos institucionais inclusivos e colaborativos, capazes de articular diferentes escalas e formas de conhecimento. A construção de uma justiça climática costeira passa, portanto, pela valorização das experiências locais, pela promoção da capacidade adaptativa

e pela reorientação das agendas científicas e políticas rumo à equidade socioambiental.

A promoção da justiça climática nas zonas costeiras exige o reconhecimento das especificidades territoriais, sociais e culturais das comunidades tradicionais que ali vivem. Esses grupos não apenas enfrentam de forma desproporcional os efeitos das mudanças climáticas, como também oferecem conhecimentos, práticas e estratégias que podem contribuir significativamente para soluções sustentáveis e equitativas. A literatura e as experiências brasileiras demonstram avanços importantes nesse campo, com iniciativas que articulam saberes locais e acadêmicos, promovem a gestão participativa e reivindicam o reconhecimento dos direitos territoriais. Dois exemplos: na Reserva Extrativista de Canavieiras, litoral sul da Bahia, pescadores e marisqueiras usam práticas tradicionais de manejo do caranguejo-uçá que incluem períodos voluntários de defeso (interrupção da pesca) baseados em observações do ciclo reprodutivo da espécie. Essas práticas ajudaram a manter populações saudáveis do caranguejo e foram incorporadas às regras da reserva. Já na comunidade da Jureia, litoral sul de São Paulo, os caiçaras combinam sistemas tradicionais de roçado, a chamada agricultura de coivara, e de pesca artesanal com o conhecimento sobre os ciclos da maré, das chuvas e da reprodução das espécies. Essa sabedoria vem sendo integrada em iniciativas de comanejo e em planos de conservação costeira naquela região.

No entanto, os desafios persistem. É urgente fortalecer capacidades adaptativas locais, ampliar a representatividade desses grupos nos processos decisórios e garantir a continuidade de políticas e financiamentos que apoiem abordagens transdisciplinares e baseadas em justiça ambiental e social. A resposta à crise climática não pode prescindir da escuta ativa e do protagonismo das comunidades costeiras tradicionais. Investir em sua resiliência é, ao mesmo tempo, um imperativo ético e uma estratégia eficaz para a construção de um futuro mais justo e sustentável.

REFERÊNCIAS

1. IPCC, “IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate” in H.O. Pörtner et al., Eds. (Cambridge University Press, 2019), doi:10.1017/9781009157964.
2. L.R. Gonçalves, M.T. Arruda Filho, P.H.C. Torres, *Justiça Climática em Regiões Costeiras no Brasil* (Paco Editorial, 2022), ISBN: 9788546227846.

3. P.H.C. Torres, G.P. de Araújo, I.C. Cavaco, M.T. Arruda Filho, L.R. Gonçalves, Políticas de Estado e Políticas de Governo: A Justiça Climática e as Estratégias de Resposta para a Zona Costeira Brasileira em Face à Emergência Climática. *Redes* 29, (2024).
4. I.M. Martins, M.A. Gasalla, Adaptive Capacity Level Shapes Social Vulnerability to Climate Change of Fishing Communities in the South Brazil Bight. *Front Mar Sci.* 7, 481 (2020), doi:10.3389/fmars.2020.00481.
5. J. Claudet, J. Blythe, D. Gill, N. Bennett, G. Gurney, Advancing Ocean Equity at the Nexus of Development, Climate and Conservation Policy. *Nat Ecol Evol.* (2024), doi:10.1038/s41559-024-02417-5.
6. 6.N.M. Dawson et al., The Role of Indigenous Peoples and Local Communities in Effective and Equitable Conservation. *Ecol Soc.* 26(3), 19 (2024), doi:10.5751/ES-12625-260319.
7. K.F. Strange, M. Satorras, H. March, Intersectional Climate Action: The Role of Community-Based Organisations in Urban Climate Justice. *Local Environ.* 29(7), 865–885 (2024), doi:10.1080/13549839.2024.2345678.
8. R.D. Pereira et al., Traditional and Local Communities as Key Actors to Identify Climate-Related Disaster Impacts: A Citizen Science Approach in Southeast Brazilian Coastal Areas. *Front Clim* 5, 124300 (2023), doi:10.3389/fclim.2023.1243008.
9. IPCC, *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge University Press, 2022).
10. C.S. Seixas, A. Turra, B.P. Ferreira, Eds. *1º Diagnóstico Brasileiro Marinho-Costeiro sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos* (Plataforma Brasileira de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos e Cátedra Unesco para a Sustentabilidade do Oceano, 2024).

6.11 Cultura oceânica

Ronaldo Christofoletti

Em um mundo marcado por rápidas transformações climáticas, compreender o oceano e nossa relação com ele tornou-se essencial. Ocupando mais de 70% da superfície do planeta, o oceano regula o clima e sustenta a vida. Desempenha, assim, um papel central na mitigação dos impactos das mudanças climáticas. No Brasil, essa conexão é especialmente relevante: mais da metade da população vive a menos de 150 km do litoral, o que torna o vínculo com o oceano uma realidade cotidiana.

Mesmo quem vive longe do mar é impactado diretamente por ele. Ao regular a temperatura e o ciclo das chuvas, o oceano afeta o bem-estar humano, a produção agrícola e os recursos hídricos até de regiões como o Centro-Oeste brasileiro. Por isso, desenvolver a cultura oceânica — ou seja, a compreensão de como o oceano influencia nossas vidas e como nossas ações o afetam — é fundamental. Essa consciência fortalece escolhas individuais e coletivas, promove mudanças de comportamento e embasa políticas públicas eficazes voltadas à mitigação e à adaptação frente à crise climática.

A cultura oceânica tem evoluído de um enfoque restrito à educação formal para ser reconhecida como uma construção social coletiva e multidimensional. Consolidou-se em quatro dimensões interdependentes: educação, comunicação, conexões culturais e sistemas de conhecimento (1). Essa abordagem permite refletir sobre como diferentes setores da sociedade se relacionam com o oceano e mobilizar transformações rumo à sustentabilidade.

Na educação, destacam-se avanços globais como o chamado da UNESCO para o Currículo Azul (2) — a inserção da cultura oceânica nos currículos escolares mundialmente — e ações que promovem aprendizagens participativas e conectadas ao território, como o Programa Escola Azul, que promove projetos interdisciplinares e inclusivos para promover o protagonismo juvenil e vincular o oceano à justiça climática e ambiental.

Na comunicação, pesquisas indicam que o acesso à informação científica, embora necessário, não é suficiente para gerar engajamento público. A integração entre cultura oceânica e comunicação estratégica tem sido essencial para promover mudanças de comportamento. Iniciativas globais como as campanhas “The Ocean is Us” (3) e a plataforma “EU-ceano” (4) exemplificam como narrativas visuais e emocionais aumentam a mobilização social.

Quanto às conexões culturais, cresce o reconhecimento da centralidade do oceano em expressões culturais, práticas espirituais, rituais tradicionais e saberes ancestrais, diversas e ricas em todo o planeta. A cultura oceânica precisa dialogar com essa diversidade, reconhecendo os múltiplos modos de conhecer e vivenciar o oceano e valorizando a pluralidade de territórios e experiências (1, 5).

Nos sistemas de conhecimento, a transdisciplinaridade e a coprodução têm se consolidado como caminhos para responder a desafios socioambientais complexos. Diferentes projetos no mundo mostram como parcerias entre ciência, comunidades e gestão pública podem gerar soluções contextualizadas e duradouras (5).

Outro avanço significativo é a geração de evidências sobre a percepção pública. Pesquisas como a brasileira Oceano sem Mistérios (7) e a internacional Ocean & Society Survey (8) revelam lacunas de conhecimento e indicam caminhos para ações mais eficazes. Também cresce o entendimento da cultura oceânica como suporte à conservação marinha. Estudos demonstram que áreas protegidas têm mais chances de sucesso quando as populações costeiras compreendem a importância dos ecossistemas marinhos (9).

Esses elementos reforçam que a cultura oceânica é um campo emergente e estratégico, com potencial para apoiar transformações estruturais frente às mudanças climáticas. Para isso, é necessário integrar suas dimensões às políticas públicas, com abordagens baseadas em evidências, justiça social e inclusão de vozes diversas.

O Brasil tem protagonizado ações pioneiras em cultura oceânica lideradas pela academia, por organizações da sociedade civil e por escolas. É o líder da produção científica sobre cultura oceânica entre os países do Sul Global (10) e o líder mundial em projetos sobre cultura oceânica (11). Essas ações multissetoriais e que retratam as diferentes realidades brasileiras tornaram o Brasil referência mundial em cultura oceânica, com destaque para a atuação multissetorial e interinstitucional coordenada

pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), em parceria com a UNESCO e a Universidade Federal do Estado de São Paulo (UNIFESP) e envolvendo diferentes plataformas de ação nacional. Essa mobilização vem estruturando políticas e estratégias voltadas a resiliência climática, segurança alimentar, economia azul sustentável, proteção da biodiversidade e integração de saberes científicos e tradicionais.

Na dimensão educacional, o país, por meio da parceria entre Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e Ministério da Educação (MEC), foi o primeiro a responder ao chamado da UNESCO e se comprometer com o Currículo Azul. A implementação se dá em quatro frentes: políticas públicas multiníveis (com 24 municípios e quatro estados já tendo produzido leis específicas); formação de professores (com apoio da CAPES, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior); produção de materiais didáticos e engajamento comunitário. O Programa Escola Azul está presente em todas as regiões do país, promovendo projetos escolares conectados aos desafios globais (12). A Olimpíada do Oceano, com alcance nacional e internacional, atinge milhões de pessoas com atividades integradas de ciência, arte, cultura e inclusão (13).

Na comunicação, diferentes projetos de pesquisa financiados pelo MCTI e organizações da sociedade civil têm ampliado o acesso a informação de qualidade. Por exemplo, a Aliança Brasileira pela Cultura Oceânica tem lançado, desde a COP-28, relatórios técnicos que sistematizam evidências sobre as relações oceano-clima. Esses relatórios têm alcançando ampla repercussão midiática, com milhares de inserções nas mídias nacionais, regionais e locais abordando os temas de gestão de cidades costeiras (14), soluções baseadas na natureza (15), eventos extremos de temperatura (16) e degelo marinho recorde (17).

A pesquisa nacional de percepção pública (7) identificou que 89% dos brasileiros apoiam a inclusão da cultura oceânica nas escolas. Em 2025, sua nova edição mostrou crescimento no reconhecimento do oceano como parte da solução climática. Essa pesquisa fundamenta estratégias de comunicação e formulação de políticas públicas e se integra à rede internacional Ocean & Society Survey (8).

Nos sistemas de conhecimento, o Brasil vem consolidando práticas de coprodução. A elaboração participativa do Plano Nacional da Década do Oceano (18) é um exemplo de articulação entre academia, sociedade civil, povos indígenas e comunidades tradicionais. Projetos financiados

pelo CNPq e universidades reforçam essa abordagem, valorizando saberes diversos para guiar ações de adaptação climática costeira.

A dimensão cultural tem sido abordada em festivais, produções artísticas, exposições, materiais educativos e projetos comunitários. Tais ações reconhecem o oceano como parte do imaginário, da espiritualidade e da identidade coletiva de muitos povos e são essenciais para o engajamento social no longo prazo.

A cultura oceânica é um dos pilares do enfrentamento da crise climática de forma justa, integrada e transformadora. Vai além da produção de conhecimento, pois promove o uso do conhecimento para a mudança necessária na adaptação climática. Ao promover o entendimento da nossa interdependência com o oceano, fortalece ações individuais e coletivas rumo à sustentabilidade. O Brasil tem papel de liderança global, com iniciativas reconhecidas pela ONU e pela UNESCO. Cabe agora consolida esse protagonismo e inspirar cada vez mais políticas públicas que articulem oceano, clima e sociedade rumo a futuros mais resilientes e inclusivos. Para isso, é necessário:

- Ampliar o financiamento público e privado com foco em cultura oceânica, justiça social e equidade territorial, desde a produção ao uso do conhecimento.
- Incluir a cultura oceânica nos planos de adaptação climática e políticas nacionais de educação.
- Fortalecer redes de formação de educadores e produção de recursos pedagógicos contextualizados.
- Promover campanhas de comunicação baseadas em dados e narrativas socialmente relevantes a partir dos impactos da mudança do clima.
- Estimular redes de cooperação entre países do Sul Global.
- Valorizar o papel de jovens, artistas, povos indígenas e comunidades locais na construção de soluções.

REFERÊNCIAS

1. UNESCO-IOC, Ocean Decade Vision 2030 – A Theory of Change for the Ocean Decade Challenge 10 (2025-2030). *The Ocean Decade Series*, 51, 11 (2025).

2. UNESCO-IOC, Um Novo Currículo Azul – Um Guia Prático para Formuladores de Políticas. *Manuais e Guias da COI* 90, (2022). Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380544_por [Acessado em 30 de junho de 2025].
3. The Ocean is Us campaign. *How On Earth Radio* (2024). Disponível em: <https://howonearthradio.org/archives/category/episodes/the-ocean-is-us> [Acessado em 30 de junho de 2025].
4. Home. *EUceano*. Disponível em: <https://www-euceano-org.rds.land/euceano> [Acessado em 30 de junho de 2025].
5. UNESCO-IOC, Cultura Oceânica para todos: Kit Pedagógico. *Manuais e Guias da COI* 90 (2017). Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373449> [Acessado em 30 de junho de 2025].
6. N.G.R. Mello et al., PWays forward in transdisciplinary research: insights from case studies on marine and coastal conflict transformations, *Sustainable Futures* 9, 100768 (2025).
7. Fundação Grupo Boticário, UNIFESP/Maré de Ciência e UNESCO, *Oceano sem Mistérios - A Relação dos Brasileiros com o Mar: Evolução de Cenários* (2022-2025). Fundação Grupo Boticário (2025). Disponível em: <https://fundacaogrupoboticario.org.br/wp-content/uploads/2025/06/Oceano-sem-Misterios-A-Relacao-dos-Brasileiros-com-o-Mar-Evolucao-de-Cenarios-2022-2025.pdf> [Acessado em 30 de junho de 2025].
8. J. McRuer et al., Co-designing the Ocean & Society Survey – a global tool for understanding people-ocean connections and mobilizing ocean action. *Ocean & Society* (in press).
9. J. McRuer, E. McKinley, D. Glithero, R. Christoforetti, D. Payne, Human-ocean relationships: exploring alignment and collaboration between ocean literacy research and marine conservation. *Marine Policy* 171, 106418 (2025).
10. UNESCO-IOC, “State of the Ocean Report”, pilot edition. *IOC Technical Series* 173, (2022). Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000381921.locale=en> [Acessado em 30 de junho de 2025].
11. UNESCO-IOC, “State of the Ocean Report”. *IOC Technical Series* 190 (2024). Disponível em: <https://doi.org/10.25607/4wbg-d349>. [Acessado em 30 de junho de 2025].
12. Home, *Programa Escola Azul Brasil*. Disponível em: <https://escolaazul.mare-deciencia.eco.br/> [Acessado em 30 de junho de 2025].
13. Home, *Olimpíada do Oceano*. Disponível em: <https://olimpiada.maredecien-cia.eco.br/> [Acessado em 30 de junho de 2025].
14. Fundação Grupo Boticário e Aliança Brasileira pela Cultura Oceânica, *Oceano sem mistérios. Construindo Cidades Azuis*. Fundação Grupo Boticá-

- rio (2023). Disponível em: https://fundacaogrupoboticario.org.br/wp-content/uploads/2024/11/Oceano-sem-Misterios_-Construindo-Cidades-Azuis.pdf [Acessado em 30 de junho de 2025].
15. A.S. Martinez, *Cidades Azuis: soluções baseadas na natureza para a resiliência climática costeira* (Aliança Brasileira pela Cultura Oceânica UNIFESP-UNESCO-MCTI/FGB, 2024). Disponível em: <https://maredeciencia.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/Ebook-Cidades-Azuis-Solucoes-Baseadas-na-Natureza-para-a-Resiliencia-Climatica-Costeira.pdf> [Acessado em 30 de junho de 2025].
16. A.S. Martinez, R.A. Christofoletti, Brasil em transformação: o impacto da crise climática - 2024: o ano mais quente da história (Aliança Brasileira pela Cultura Oceânica (UNIFESP-UNESCO-MCTI)/FGB, 2024). Disponível em: <https://maredeciencia.eco.br/wp-content/uploads/2024/12/Brasil-em-transformacao-1-2024-o-ano-mais-quente-da-historia.pdf> [Acessado em 30 de junho de 2025].
17. R.A. Christofoletti, A. Pardal, “O declínio recorde do gelo marinho em 2023-2024: um alerta para o planeta” (Relatório Técnico do projeto Com-ANTAR do Programa Antártico Brasileiro, 2025). Disponível em: <https://maredeciencia.eco.br/wp-content/uploads/2025/01/O-declinio-recorde-do-gelo-marinho-em-2023-2024-um-alerta-para-o-planeta.pdf> [Acessado em 30 de junho de 2025].
18. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, *Plano Nacional de Implementação da Década da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável*. Brasil. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (2021). Disponível em: <https://decada.ciencianomar.mctic.gov.br/wp-content/uploads/2022/01/Plano-Nacional-de-Implementac%CC%A7a%CC%83o-da-De%CC%81ca-da-da-Cie%CC%82ncia-Ocea%CC%82nica-links.pdf> [Acessado em 30 de junho de 2025].

6.12 Governança oceânica

Wânia Duleba, Milena Maltese Zuffo, Andrei Polejack

Os riscos climáticos afetam setores essenciais da economia nacional — como pesca, turismo e infraestrutura urbana — e agravam desigualdades sociais, em especial nos países do Sul Global (1,2). Questões de governança são estratégicas, pois estruturam normas, instituições, políticas e práticas voltadas à mitigação dos impactos e à adaptação frente a esses riscos. A interseção dos regimes de governança do oceano e do clima representa não apenas uma necessidade ambiental urgente, mas também uma oportunidade estratégica de liderança científica e diplomática do Brasil no cenário internacional.

Governança oceânica compreende os sistemas normativos, políticos e técnicos que orientam os direitos e deveres quanto ao uso e à proteção do oceano (3). Seu marco jurídico internacional é a Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (CONVEMAR), que organiza o espaço oceânico por zonas e estabelece princípios de soberania, proteção ambiental e cooperação entre Estados. Analogamente, o regime do clima tem por instrumento norteador a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC). Embora a CONVEMAR não mencione mudanças climáticas diretamente, ambos os regimes têm sido aplicados em interpretações jurídicas sobre os impactos da relação oceano/clima.

No Brasil, um elemento central no regime oceânico é a Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM), criada em 1974 e responsável por diversas políticas como o Plano Setorial para os Recursos do Mar e o Levantamento da Plataforma Continental Brasileira, dentre outros. Já o regime climático conta com o Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima (CIM), responsável pelo Plano Clima e pelas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC).

Ambos os regimes se utilizam da produção científica nacional para embasar propostas de ação. No entanto, apesar de serem semelhantes em seus propósitos, não há processos de integração entre eles, o que di-

ficulta a coordenação de políticas de Estado e a melhoria dos processos decisórios com base no conhecimento (4). O Brasil detém capacidades avançadas em pesquisas oceânicas e climáticas, contando com ampla rede de universidades, centros de pesquisa e laboratórios públicos e privados. Essas instituições pesquisam os processos oceânicos e os impactos climáticos em ecossistemas marinhos e desenvolvem e avaliam estratégias de adaptação costeira às mudanças do clima.

O Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação coordena políticas científicas estratégicas para ambos os regimes, como a Rede Clima e o Instituto Nacional de Pesquisas Oceânicas (INPO), estabelecido como sua mais recente Organização Social. Tanto a Rede Clima quanto o INPO possuem redes avançadas de conhecimento a serviço da sociedade, envolvendo pesquisadores em todo o Brasil (Figura 1).

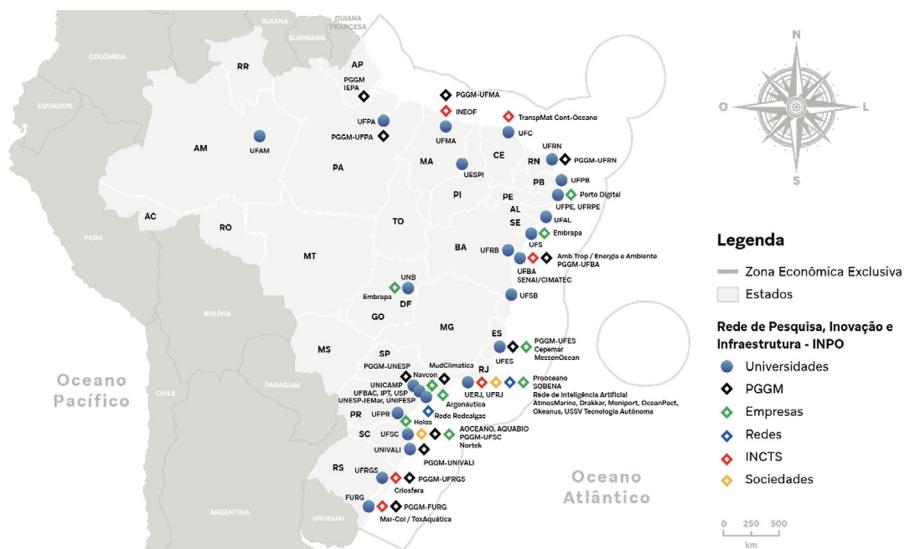


Figura 1: Mapa da Rede de Pesquisa, Inovação e Infraestrutura do Instituto Nacional de Pesquisas Oceânicas – INPO.

Além da produção de conhecimento científico sobre oceano e clima, a ciência brasileira tem contribuído na pesquisa de modelos de governança e articulação entre ciência e saberes tradicionais (5,6,7), para aplicação em instrumentos de políticas públicas, como o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC).

Em decorrência da robustez da ciência nacional, a atuação de pesquisadores brasileiros em fóruns internacionais tem se expandido, principalmente em redes internacionais, como a Aliança para Todo o Atlântico (8), possibilitando a implementação de novos espaços políticos como a ZOPACAS (Zona de Paz e Cooperação no Atlântico Sul), e reforçando o papel do país na diplomacia científica (9).

A governança oceânica é fundamental para responder aos desafios climáticos em territórios marinhos e costeiros. A experiência brasileira demonstra que é possível integrar ciência, política e sociedade em soluções eficazes e escaláveis. Consolidar mecanismos institucionais, ampliar a base científica e incorporar abordagens participativas são passos centrais para ampliar a resiliência costeira e promover justiça ambiental. O sucesso dessa iniciativa dependerá da nossa capacidade de traduzir os avanços científicos nacionais em políticas públicas integradas e da continuidade do investimento em pesquisa oceânica de excelência.

REFERÊNCIAS

1. P. Mazzega, D. M. Rugmini, A. F. Barros-Platiau, Where is the “Global South” located in scientific research? *Earth System Governance* 25, 100269 (2025) Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.esg.2025.100269> [Acessado em 25 de julho de 2025].
2. M.M.C. Muelbert *et al.*, The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate in Latin America: Knowledge Gaps and the Urgency to Translate Science Into Action. *Frontiers in Climate* 3, (November, 2021). Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.748344> [Acessado em 25 de julho de 2025].
3. A.F. Barros-Platiau *et al.*, “Ocean Governance in the Anthropocene: A New Approach in the Era of Climate Emergency” in *Eco-Politics and Global Climate Change. Environment & Policy*, S. Tripathi, R. Bhadouria, R. Singh, P. Srivastava, R.S. Devi, Eds. (Springer, 2023), v. 65, pp. 59–72. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-48098-0_4 [Acessado em 25 de julho de 2025].
4. L.R. Gonçalves *et al.*, “Oportunidades e opções de governança para conservar e restaurar a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos da zona marinha-costeira” in *1º Diagnóstico Brasileiro Marinho-Costeiro sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos*, C.S. Seixas, A. Turra, B.P. Ferreira, Org. (Editora Cubo, 2024).
5. M. Caldeira, A.T. Sekinairai, M. Vierros, Weaving science and traditional knowledge: Toward sustainable solutions for ocean management. *Marine Po-*

- licy 174, (2025). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2025.106591> [Acessado em 25 de julho de 2025].
6. V. Renck *et al.*, Taking fishers' knowledge and it's implications to fisheries policy seriously. *Ecology and Society* 28(2), (2023). Disponível em: <https://doi.org/10.5751/ES-14104-280207> [Acessado em 25 de julho de 2025].
 7. C.N. El-Hani, L. Poliseli, D. Ludwig, D. Beyond the divide between indigenous and academic knowledge: Causal and mechanistic explanations in a Brazilian fishing community. *Studies in History and Philosophy of Science* 91, 296–306 (2022). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2021.11.001> [Acessado em 25 de julho de 2025].
 8. A. Polejack, S. Gruber, M.S. Wisz, Atlantic Ocean science diplomacy in action: the pole-to-pole All Atlantic Ocean Research Alliance. *Humanities and Social Sciences Communications* 8(1), 52 (2021). Disponível em: <https://doi.org/10.1057/s41599-021-00729-6> [Acessado em 25 de julho de 2025].
 9. A. Polejack, A.F. Barros-Platiau, A Ciência Oceânica como ferramenta de Cooperação e Diplomacia no Atlântico, in *Conservation of living resources in areas beyond national jurisdiction: BBNJ and Antarctica*, A.F. Barros-Platiau, C.C. de Oliveira, Eds. (Lumen Juris, 2020), pp. 45–65.

6.13 Conclusões

Uma proporção significativa das atividades humanas, incluindo a atividade econômica, depende das zonas costeiras e oceânicas. Elas são responsáveis por 80% das mercadorias comercializadas globalmente, são fonte de produção de alimentos e podem vir a ser responsáveis por uma grande parcela da energia limpa e renovável necessária para a transição energética. Também sequestram e mantêm no fundo do mar e em seus manguezais o excesso de carbono emitido para a atmosfera. Além disso, quando preservadas ou restauradas, funcionam, no caso das zonas costeiras, como barreira física à erosão e às inundações intensificadas pelos eventos climáticos extremos, como tempestades e furacões.

A ciência tem conhecimento e soluções para oferecer. A ciência brasileira, em particular, vem mostrando os impactos existentes e como as mudanças climáticas estão exacerbando as vulnerabilidades no espaço costeiro-marinho brasileiro; tem apontado também as oportunidades para o Brasil vencer esses desafios.

Mas todas as medidas de adaptação e/ou mitigação precisam da formulação de políticas públicas a nível nacional e regional. É necessária, sobretudo, a inserção da questão climática e seus reflexos oceânicos/costeiros entre as prioridades nacionais e a garantia de continuidade dos investimentos e esforços, tanto para a pesquisa científica como para a implementação das ações. Esse desafio precisa ser enfrentado levando em conta também o conhecimento ecológico local e tradicional, com a ampliação da representatividade desses grupos nos processos decisórios para viabilizar abordagens transdisciplinares e baseadas em justiça ambiental e social.

Tendo em vista que o oceano é local, nacional, regional e global, é preciso desenvolver uma abordagem integrada que conte cole todos esses níveis. Pela extensão de sua área oceânica e costeira, por sua posição na geopolítica mundial e pela sólida base científica de que dispõe, o Brasil está diante de uma oportunidade estratégica de liderança científica e diplomática no cenário internacional.

AGRADECIMENTOS

Especial agradecimento aos cientistas da Rede do Instituto Nacional de Pesquisas Oceânicas (INPO) que contribuíram com o capítulo Oceano e Zonas Costeiras, compartilhando seu conhecimento com a sociedade.

Às jornalistas Dominique Ribeiro e Terezinha Costa, pela contribuição na edição dos textos e na edição executiva deste capítulo.