

CAPÍTULO XVII

MUDANÇAS CLIMÁTICAS¹

Sinopse

Este capítulo apresenta o papel dos oceanos e das zonas costeiras nas mudanças do clima e busca demonstrar a participação das atividades humanas no sistema climático através do efeito estufa. O texto destaca a importância dos oceanos e das zonas costeiras como componentes do clima e descreve tanto os impactos decorrentes do aquecimento global no ambiente marinho como as mudanças que já são observadas nos oceanos, abordando, ainda, os riscos aos ecossistemas marinhos e costeiros e a seus serviços. O artigo também apresenta os sistemas de observação dos oceanos para o clima e fornece um breve panorama da situação de políticas, pesquisas e iniciativas sobre o assunto no Brasil, concluindo com sugestões de ações para aprimorar o conhecimento e a capacidade do País de superar os desafios impostos pelas mudanças do clima na zona costeira e no oceano Atlântico Sul.

Abstract

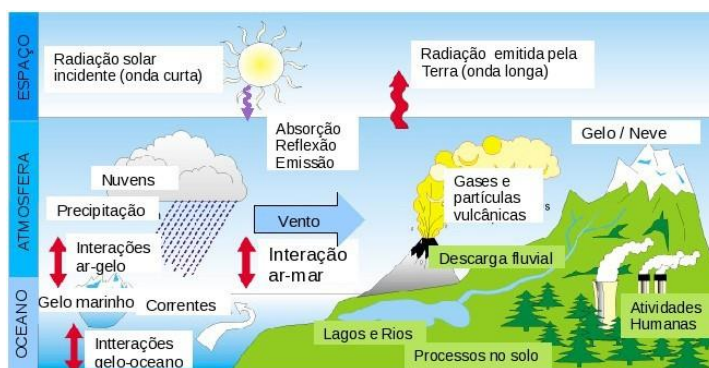
This chapter presents the role of oceans and coastal zones in climate changes and demonstrates the participation of human activities in the climate system through the greenhouse effect. It emphasizes the importance of oceans and coastal zones as climate components and describes not only the impacts of global warming on the marine environment but also the changes that have already been observed in the oceans and the risks to marine and coastal ecosystems and their services. Furthermore, it presents ocean observing systems for climate and provides a brief overview of policies, researches and initiatives on the subject in Brazil. Lastly, it offers some suggestions of actions to enhance knowledge and to develop capabilities to overcome the challenges of climate change in the coastal areas and in the South Atlantic Ocean.

1. INTRODUÇÃO

O clima da Terra é o resultado de um sistema de interações complexas formado por diversos componentes, que vão desde as trocas de energia nas camadas superiores da atmosfera desde a energia solar incidente até processos físicos e biogeoquímicos nas profundezas do oceano, que são interligados e interdependentes de maneira nem sempre óbvia, mas indissociável (IPCC, 2019d). A partir da intensificação da ação humana sobre o meio ambiente, principalmente após a revolução industrial, as atividades humanas podem ser consideradas como um importante componente do sistema, conforme mostra a Figura 1, a seguir.

¹ A atualização deste capítulo contou com a colaboração do Prof. Dr. José Henrique Muelbert, da Universidade Federal do Rio Grande, e da Prof^a. Dra. Mônica Mathias Costa Muelbert, da Universidade Federal de São Paulo.

Figura 1: Os diversos componentes do sistema climático.



O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC na sigla em inglês – *Intergovernmental Panel on Climate Change*) é uma organização científico-política criada em 1988 no âmbito das Nações Unidas (ONU) por iniciativa do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e da Organização Meteorológica Mundial (WMO na sigla em inglês – *World Meteorological Organization*). O IPCC tem como objetivo principal sintetizar e divulgar o conhecimento mais avançado sobre as mudanças climáticas, especificamente o aquecimento global, apontando suas causas, efeitos e riscos para a humanidade e o meio ambiente e sugerindo maneiras de combater os problemas. O IPCC procura agir em três frentes, de forma a concentrar e avaliar:

- a informação científica a respeito de mudanças climáticas;
- os impactos ambientais e socioeconômicos das mudanças climáticas; e
- a formulação de estratégias de resposta (mitigação e adaptação) às mudanças climáticas.

Já foram produzidos cinco grandes relatórios e outros documentos. O primeiro relatório (*First Assessment Report – FAR*) foi publicado em 1990 (IPCC, 1990) e o último (*Fifth Assessment Report – AR5*), em 2014 (IPCC, 2014). O sexto relatório (AR6) é esperado para junho de 2022.

O IPCC também produz relatórios especiais sobre temas específicos e relatórios metodológicos que orientam a preparação dos inventários sobre a emissão de gases estufa. Os mais recentes foram o *Relatório Especial sobre o Aquecimento Global de 1,5°C* (IPCC, 2018a), o *Relatório Especial sobre Mudanças Climáticas e Ecossistemas Terrestres* (IPCC, 2019a), e o *Relatório Especial sobre Mudanças Climáticas, Oceanos e Criosfera* (IPCC, 2019c). A decisão de preparar um relatório sobre mudança do clima, oceanos e a criosfera foi tomada em função da constatação irrefutável de que o oceano e a criosfera sustentam habitats únicos e estão interconectados com outros componentes do sistema climático por meio da troca global de água, energia e carbono. O cerne da existência do IPCC está representado pela relação entre o ser humano, o aquecimento do planeta e o sistema solar.

O sol é a fonte primária da energia que alimenta o sistema climático, fornecendo a radiação incidente na forma de ondas curtas no topo da atmosfera. Uma quantidade equivalente de energia, em ondas longas, é devolvida pelo planeta ao espaço. De acordo com princípios básicos da física, ao receber uma quantidade de energia, todo corpo muda sua temperatura e irradia calor, até atingir um estado de equilíbrio termodinâmico no qual a quantidade de radiação emitida é igual à recebida. Na Terra, esse equilíbrio não é estacionário nem estável. A maior parte da energia solar que atravessa a atmosfera divide-se em diferentes componentes até atingir a superfície do planeta. No

equilíbrio, o planeta devolve ao espaço a mesma quantidade de calor recebida no topo da atmosfera. O aumento dos gases causadores do efeito estufa na atmosfera aprisiona parte da radiação de onda longa emitida pela superfície, fazendo com que a temperatura aumente (Figura 2). As variações na forma como essa energia se divide em partes e as condições e interações dos diferentes componentes do sistema resultam em alterações significativas no estado de equilíbrio climático.

Figura 2: Balanço radiativo do sistema climático.

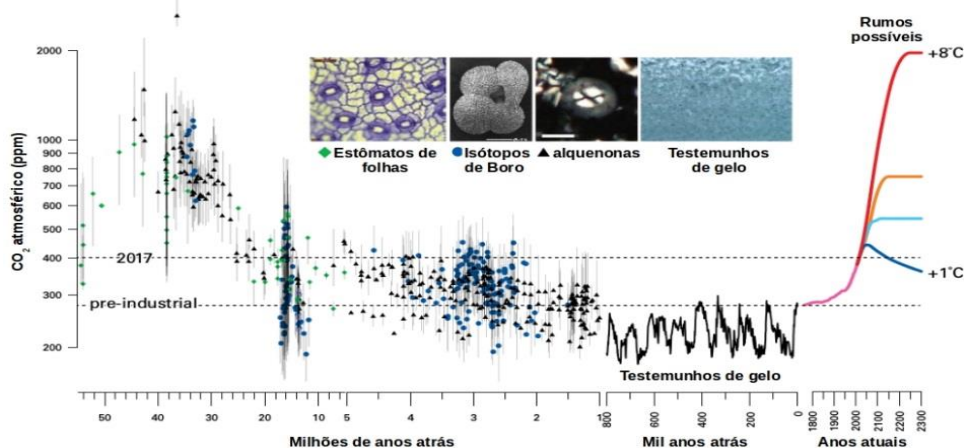


Ao longo da história do planeta, o clima tem passado por diversas variações naturais em uma multiplicidade de escalas temporais (GHIL, 2002; IPCC, 2014, 2019d). Isso significa que o balanço entre a energia incidente, proveniente do sol, e a energia retransmitida pela Terra de volta ao espaço variou ao longo do tempo. Essas variações foram forçadas por mecanismos naturais, como as alterações na radiação incidente devido a mudanças na atividade solar, no albedo² terrestre, na deriva continental, na circulação oceânica, nos processos biogeoquímicos do ecossistema terrestre, nas atividades vulcânicas e na órbita do planeta. Entretanto, é incontestável que a atividade humana tem contribuído para alterar o clima da Terra (IPCC, 2014, 2019d).

Um componente muito importante do balanço de energia do planeta (cf. Figura 2) é a concentração dos gases de efeito estufa, sendo o gás carbônico (CO₂) um dos principais. A concentração de CO₂ na atmosfera tem aumentado significativamente desde a Revolução Industrial (IPCC, 2014), como mostra a Figura 3. Esse aumento de CO₂ decorre, principalmente, da queima de combustíveis fósseis e tem como consequência o aumento da temperatura média do planeta. Essas mudanças no clima do planeta implicam importantes consequências econômicas, sociais, políticas e ambientais (IPCC, 2018b).

² O albedo de uma superfície, que é a relação da energia refletida sobre a incidente, expressa a fração de radiação visível refletida pela superfície, ou seja, a capacidade que as superfícies têm de refletirem a radiação incidente sobre elas. (Nota do Revisor).

Figura 3: Reconstrução da evolução do CO₂ atmosférico nos últimos 55 milhões de anos.



Versão adaptada de WMO / GAW (2017). Tradução nossa.

Nota: Reconstruções geradas a partir de dados *proxy* incluem isótopos de boro (círculos azuis), alquenonas³ (triângulos pretos) e estômatos⁴ das folhas (losangos verdes). Medições diretas dos últimos 800.000 anos obtidas a partir de testemunhos de gelo da Antártica e instrumentos modernos (rosa). Estimativas futuras incluem possíveis rumos para a concentração de CO₂ com aumentos de temperatura de 8,5°C (vermelho), 6°C (laranja), 4,5°C (azul claro) e 2,6°C (azul).

Portanto, este capítulo aborda o papel dos oceanos e das zonas costeiras no sistema climático. O oceano vem sendo cada vez mais reconhecido como um componente importante do clima que tem impacto nas mudanças atuais. O texto está dividido de forma a propiciar ao leitor uma introdução sobre a contribuição do oceano e das zonas costeiras ao clima, com a atualização do conhecimento sobre a inserção das atividades humanas como um dos componentes do sistema climático e a descrição dos mecanismos pelos quais o mar desempenha um papel de vital importância na manutenção do clima. Incorporando a contribuição do Relatório Especial do IPCC para os efeitos das mudanças climáticas nos oceanos e na criosfera, este capítulo apresenta não só os efeitos da alteração do clima sobre as zonas costeiras e oceânicas a partir de mudanças nas suas variáveis físicas, em seus ecossistemas e nos serviços ecossistêmicos, mas também as consequências inerentes às atividades antrópicas. Inclui, ainda, uma breve revisão sobre o conhecimento da circulação oceânica no Atlântico Sul e sua relação com as mudanças do clima, apontando a necessidade de um sistema sustentável de observações integrado e multidisciplinar. São mencionadas iniciativas recentes de cooperação regional e internacional – como a Aliança para todo o Atlântico, a Década da Ciência Oceânica e novas práticas para a observação sustentável dos oceanos⁵.

³ Grupo de compostos químicos muito resistentes à decomposição produzidos pela *Emiliania huxleyi*, espécie de alga marinha unicelular que faz parte do fitoplâncton. Esses compostos químicos podem ser encontrados nos sedimentos marinhos muito tempo depois de as partes moles desses organismos terem sofrido decomposição. As alquenonas são usadas como pista para aferir as temperaturas à superfície da água. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Emiliania_huxleyi>. Acesso em: 8 nov. 2020. (Nota do Revisor)

⁴ Estômatos são estruturas especializadas encontradas na epiderme vegetal, principalmente das folhas, que garantem a realização das trocas gasosas da planta com o meio. Disponível em: <<https://www.biologianet.com/botanica/estomatos.htm>>. Acesso em: 8 nov. 2020. (Nota do Revisor)

⁵ Plano de Ação Continuada do *OceanObs'19*: estratégia adaptativa que está sendo construída nesta década em continuidade às discussões, apresentações e resultados do *OceanObs'19*, desenvolvendo e integrando os pontos levantados na síntese de recomendações do evento. Disponível em: <<http://www.oceanobs19.net/living-action-plan/>>. Acesso em: 28 abr. 2021.

2. O HOMEM E O SISTEMA CLIMÁTICO: O EFEITO ESTUFA

Ao longo do tempo e em escalas geológicas, a Terra passou por grandes alterações do clima. Sucessões de períodos glaciais e interglaciais têm ocorrido desde muito antes do aparecimento do ser humano. Pode-se até dizer que, para sofrer variabilidade, o clima não necessita do homem; contudo, sabe-se também que a intensa atividade humana (bilhões de indivíduos) tem influência no equilíbrio climático ao longo do tempo (IPCC, 2018b, 2019d).

Com a Revolução Industrial, ocorrida no século XIX, começou a utilização cada vez mais intensa de combustíveis fósseis em escala mundial. A industrialização intensificou o êxodo rural, e a população nas cidades superou em muito a população do campo. A busca por um melhor modo de vida estendeu a longevidade e a saúde do ser humano, resultando em um incremento acelerado da população global. Florestas foram destruídas para alimentar e acomodar esse aumento populacional. A grande demanda por energia e transporte multiplicou ainda mais a utilização de combustíveis fósseis, resultando em maior emissão de dióxido de carbono para a atmosfera. A criação cada vez maior de animais de corte para alimentação, a produção de energia e certas práticas de agricultura também fizeram crescer de forma considerável a emissão do gás metano para o meio ambiente. O resultado de tudo isso tem sido o aumento progressivo da concentração de gases que produzem o efeito estufa.

O efeito estufa é um fenômeno físico comum na natureza que está relacionado à opacidade seletiva de um meio à radiação eletromagnética. Por exemplo: o vidro é transparente à radiação de onda curta, mas é consideravelmente opaco à radiação de ondas mais longas. O telhado de vidro de uma estufa permite a penetração da radiação de ondas curtas do sol (espectro visível), e essa radiação é absorvida pelos corpos no interior da estufa, que se aquecem e passam a irradiar calor na forma de ondas mais longas (infravermelho). Como o vidro dificulta a saída da radiação de ondas longas, o calor fica aprisionado e as temperaturas aumentam até atingir um estado de equilíbrio diferente daquele que ocorreria na ausência do telhado de vidro.

No sistema climático, o efeito estufa é causado por gases – como dióxido de carbono, metano, óxido nitroso e monóxido de carbono – e, principalmente, pelo vapor d'água presente na atmosfera (Figura 4). Esse efeito, aliás, é de fundamental importância para a vida no planeta. Na ausência do vapor d'água, por exemplo, a temperatura da atmosfera seria muito inferior às condições presentes. Entretanto, as altas concentrações desses gases na atmosfera provocam um aumento da opacidade aos raios infravermelhos, resultando, assim, na elevação da temperatura.

Figura 4: O aumento nos gases efeito estufa acarretou um aumento da energia e da temperatura da atmosfera, com um consequente aumento da energia armazenada nos oceanos



As emissões antrópicas dos gases de efeito estufa aumentaram desde a era pré-industrial, impulsionadas especialmente pelo crescimento econômico e populacional, e agora estão mais altas do que nunca. Hoje, temos concentrações atmosféricas de dióxido de carbono, metano e óxido nítrico sem precedentes em pelo menos 800 mil anos (WMO; GAW, 2018), conforme visto na Figura 3. Seus efeitos, juntamente com os de outros fatores antrópicos, foram detectados em todo o sistema climático e, muito provavelmente, constituem a principal causa do aquecimento observado desde meados do século XX.

3. O OCEANO E A ZONA COSTEIRA: COMPONENTES DO SISTEMA CLIMÁTICO

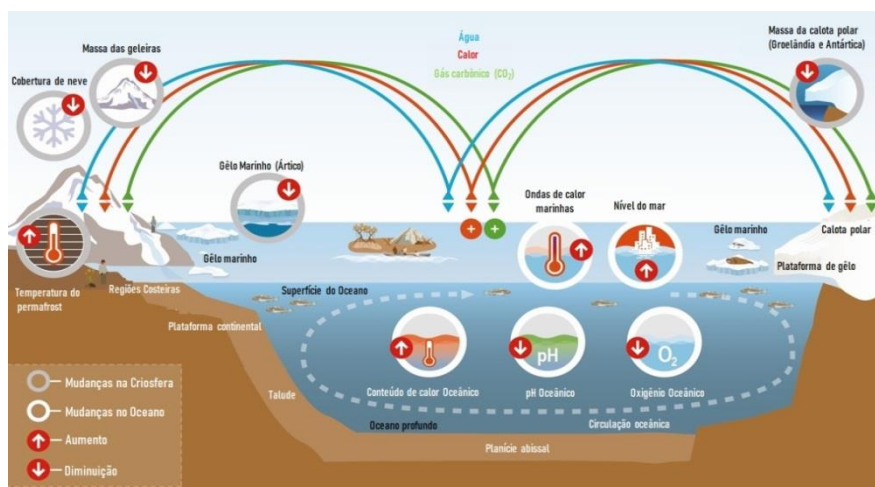
O oceano e a zona costeira têm um papel fundamental na manutenção do nosso clima. O grande volume de água que cobre cerca de três quartos da superfície do planeta e a alta capacidade térmica desse fluido fazem com que o oceano atue como um eficiente atenuante de qualquer variação no sistema climático. Na ausência dos oceanos, as variabilidades climáticas ocorreriam de formas tão extremas e rápidas que as reações químicas que resultaram em vida na Terra seriam definitivamente inviáveis. O aquecimento do oceano controla o aumento da energia armazenada no sistema climático, representando mais de 90% da energia acumulada e contrastando com cerca de apenas 1% armazenada na atmosfera (IPCC 2014, 2019d). É difícil determinar a quantidade de carbono retida nos oceanos, mas estima-se que o oceano concentre 50 vezes mais carbono do que a atmosfera, enquanto a vegetação dos ecossistemas costeiros captura concentrações significativas de carbono durante seu desenvolvimento, o que demonstra o papel desses ambientes para o clima da Terra.

A Figura 5 apresenta uma ilustração esquemática dos principais componentes do clima e suas mudanças no oceano e na criosfera⁷, além de suas ligações no sistema terrestre por meio dos movimentos de calor, água e carbono. Os efeitos relacionados às mudanças climáticas no oceano incluem elevação do nível do mar, aumento do conteúdo de calor e de ondas de calor marinhas, desoxigenação e acidificação. Mudanças na criosfera incluem o declínio da extensão do gelo marinho do Ártico, perda de massa da camada de gelo da Antártica e da Groenlândia, perda de massa de geleiras, degelo do *permafrost*⁸ e diminuição da extensão da cobertura de neve.

⁷ Criosfera: elemento do sistema climático que abrange calotas polares, geleiras, gelo marinho, gelo de rios e lagos, neve e solos congelados, que são componentes sensíveis ao clima e a mudanças de temperatura ou precipitação. Cobre 10% da superfície terrestre e tem enorme importância na regulação dos processos hídricos e atmosféricos. Mais informações em: <<https://cienciaclima.com.br/imagem-dos-componentes-da-criosfera/>>. Acesso em: 21 jun. 2022. (Nota do Revisor).

⁸ *Permafrost* (ou pergelissolo): tipo de solo permanentemente congelado existente na região do Ártico, no extremo norte do planeta. Contém material orgânico que se decompõe lentamente, mas, quando o *permafrost* derrete, bactérias e fungos decompõem o carbono contido na matéria orgânica muito mais rapidamente, liberando-o na atmosfera como dióxido de carbono ou metano – gases de efeito estufa. Mais informações em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Pergelissolo>>. Acesso em: 21 jun. 2022. (Nota do Revisor).

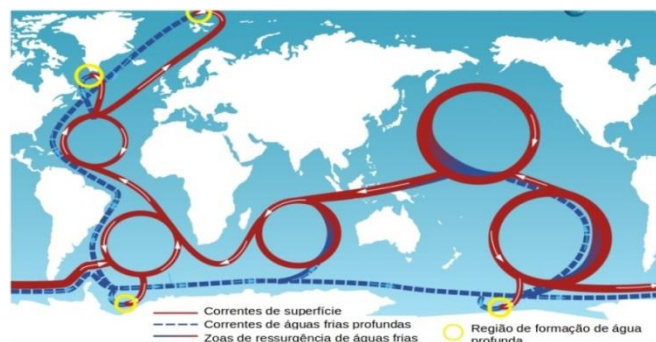
Figura 5: Ilustração esquemática dos principais componentes do clima, suas mudanças no oceano e na criosfera e suas ligações no sistema terrestre por meio dos movimentos de calor, água e carbono.



Abram et al. (2019). Adaptação do Quadro 1.1, Figura 1 (tradução nossa).

A circulação oceânica é um dos principais mecanismos pelos quais o oceano contribui para o clima e sua variabilidade, pois é fundamental no transporte do excedente de calor das regiões tropicais para as altas latitudes, amenizando as diferenças geográficas de temperatura e contribuindo decisivamente para a estabilidade do clima. Esse volume de água está em constante movimento. É fundamental entender que os movimentos oceânicos ocorrem de forma lenta, com baixa frequência e em grandes escalas espaciais (ordem de centenas de quilômetros ou mais). Nessas grandes escalas, os principais agentes fornecedores de energia são: a gravidade terrestre, os gradientes de densidade resultantes das diferentes distribuições de temperatura e salinidade, e o arrasto do vento na superfície do mar. O vento é a principal forçante da circulação nas camadas superficiais do oceano e provoca a chamada “circulação forçada pelo vento”. O termo “circulação” se deve ao fato de esse movimento ser caracterizado por circuitos fechados, com o transporte de águas entre as regiões tropicais e de altas latitudes através de grandes células de circulação anticiclônicas (sentido horário no hemisfério norte e anti-horário no hemisfério sul) nas regiões subtropicais, conforme ilustrado pela Figura 6. O movimento resultante das diferenças latitudinais de temperatura e salinidade é denominado circulação termoalina, que se estende até as profundezas do oceano. Em escala global, a circulação termoalina média pode ser representada por um circuito tridimensional que se assemelha a uma esteira transportadora de uma fábrica, conduzindo e redistribuindo calor por todas as bacias oceânicas. Devido à esfericidade e à rotação da Terra (efeito de Coriolis), as correntes do lado oeste das bacias são bem mais intensas do que as do lado leste. Atualmente, o padrão de circulação termoalina vem sendo alterado pelas mudanças do clima (MEREDITH et al., 2019).

Figura 6: Representação da circulação termohalina global dos oceanos.

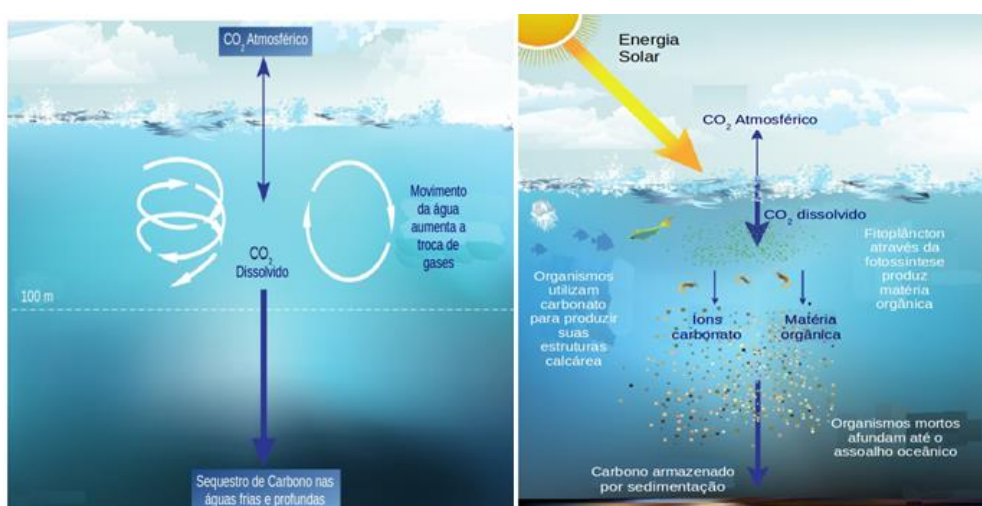


Fonte: Ocean & Climate Platform⁹ (tradução nossa).

Nota: Esse padrão de circulação médio pode ser interpretado como uma correia de transmissão, transportando águas em duas camadas. Na superior, águas mais quentes e mais salgadas que eventualmente atingem as regiões de altas latitudes, onde cedem calor para a atmosfera e afundam, retornando pela camada profunda em direção às outras bacias. O ciclo completo dessa “correia transportadora termohalina” pode durar até mil anos.

O oceano é também altamente eficiente no sequestro de gás carbônico da atmosfera, que ocorre por meio da “bomba de carbono do oceano”, composta por dois compartimentos: uma bomba biológica, que transfere o carbono da superfície para o fundo do mar por meio da cadeia alimentar; e uma bomba física, que resulta da circulação oceânica (Figura 7). Nas regiões polares, a água mais fria facilita a dissolução atmosférica do CO₂ e o armazena com mais facilidade. Essa água é mais densa e flui para o mar profundo levando consigo o carbono dissolvido, evidenciando a importância das regiões polares no ciclo do carbono. Apesar de ser difícil determinar a quantidade de carbono armazenada por esses mecanismos, estima-se que o oceano concentre 50 vezes mais carbono do que a atmosfera. A bomba biológica, que é sensível a distúrbios, pode ser desestabilizada e devolver o carbono para a atmosfera. Já a bomba física é menos sensível a perturbações, mas é afetada no longo prazo. Com o aquecimento dos oceanos e sua acidificação, a “bomba de carbono do oceano” se tornará menos eficiente.

Figura 7: Bomba física e bomba biológica: responsáveis pelo sequestro de carbono pelos oceanos.



Fonte: Ocean & Climate Platform¹⁰ (tradução nossa).

⁹ Infográfico original disponível em: <<https://ocean-climate.org/en/awareness/>>. Acesso em: 22 jun. 2022. (Nota do revisor).

As zonas costeiras também desempenham um papel importante na captura de carbono. A vegetação de manguezais, pradarias marinhas e marismas absorvem e armazenam pelo menos dez vezes mais carbono que as florestas continentais quando se desenvolvem. No entanto, esses ecossistemas costeiros cobrem uma pequena superfície em uma escala planetária global. Além disso, esses ambientes estão ameaçados pela urbanização e pelas atividades econômicas, e sua preservação e restauração devem ser prioridades para melhorar o armazenamento de carbono liberado em excesso por atividades antrópicas para a atmosfera, o que requer políticas ambiciosas. Levantamentos recentes demonstram a fragilidade desses ambientes costeiros diante dos efeitos das mudanças do clima (IPCC, 2019d; Bindoff et al., 2019; Meredith et al., 2019).

4. IMPACTOS DO AQUECIMENTO GLOBAL NO OCEANO E ZONAS COSTEIRAS

As mudanças do clima causam alterações no oceano que, por sua vez, provocarão modificações importantes no sistema climático como um todo. Somente a partir de seu 5º Relatório, o IPCC passou a considerar os oceanos de maneira formal na avaliação das questões climáticas globais (IPCC, 2014).

Recentemente, a importância dos oceanos e da criosfera em relação às mudanças do clima foi reconhecida por meio da publicação de um relatório específico que demonstra suas conexões com o funcionamento do planeta e a repercussão dessas mudanças em nossas vidas (IPCC, 2019d; Abram et al., 2019).

O 6º Relatório, cuja publicação está prevista para 2022, deve explorar a relação entre o oceano e a criosfera, além de assuntos transversais dos demais relatórios do IPCC. Essa demora para a inclusão dos oceanos nas avaliações sobre as mudanças do clima pode ser explicada pela lentidão de sua reação às alterações do meio ambiente.

Em uma escala global, o aquecimento do oceano é maior perto da superfície; os primeiros 75 metros aqueceram em $0,11^{\circ}\text{C}$ por década em média ao longo do período de 1971 a 2010 (IPCC, 2014). Desde 1993, a taxa de absorção de calor pelo oceano praticamente dobrou: de $3,22 \pm 1,61$ ZJ¹¹/ano para $6,28 \pm 0,48$ ZJ/ano, demonstrando aquecimento na parte superior do oceano (0-700 m de profundidade). Um padrão semelhante é relatado entre 700 e 2000 metros, onde a taxa de absorção de calor aumentou de $0,97 \pm 0,64$ ZJ/ano para $3,86 \pm 2,09$ ZJ/ano entre 1993 e 2017. É praticamente certo que esse aquecimento seja devido à forçante antrópica (IPCC, 2019d; BINDOFF et al., 2019).

O aumento da temperatura média do planeta provocará modificação no regime de ventos, chuvas e eventos extremos, bem como em outras interações do oceano com a atmosfera (Figura 8). O efeito combinado dessas diferentes mudanças deverá impactar significativamente a forma como o oceano se move. Alterações da temperatura superficial do oceano entre 2004 e 2017 indicam um

¹⁰ - Infográfico original disponível em: <<https://ocean-climate.org/en/awareness/>>. Acesso em: 22 jun. 2022. (Nota do revisor)

¹¹ O zettajoule (ZJ) unidade para medir energia, seguido de 21 zeros. É igual a um sextilhão (10^{21}) de joules. (Nota do Revisor).

enfraquecimento da Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico (CRMA/AMOC)¹², ainda que sem dados suficientes para quantificar a magnitude desse enfraquecimento ou atribuir sua causa à forçante antrópica (IPCC, 2019d; COLLINS et al., 2019).

Mudanças radicais no equilíbrio climático podem ser causadas por alterações na circulação oceânica que, por sua vez, podem afetar significativamente as regiões polares (Meredith et al., 2019). As observações de alterações na salinidade da superfície do oceano fornecem evidências indiretas de mudanças no ciclo hídrico global sobre o oceano. É muito provável que as regiões de alta salinidade, onde a evaporação domina, tenham se tornado mais salinas, enquanto regiões de baixa salinidade, onde a precipitação domina, tenham se tornado menos salgadas desde 1950 (IPCC, 2014).

Em escalas de tempo mais longas (décadas), sinais robustos de mudanças em maior escala na circulação do oceano e desequilíbrios integrados em bacias de água doce desencadeiam mudanças de salinidade próximas à superfície, resultando em um Oceano Atlântico (tropical e subtropical) e um Mar Mediterrâneo cada vez mais salgados, enquanto os Oceanos Pacífico e Ártico pouco a pouco se tornam mais doces (IPCC, 2019d; MEREDITH et al., 2019).

Eventos climáticos – como ciclones tropicais, elevação do nível do mar, enchentes, ondas de calor marinho e perda de gelo marinho – têm se intensificado e apresentado natureza mais intensa. Alturas extremas de ondas que contribuem para eventos extremos do nível do mar, erosão costeira e inundações aumentaram no Oceano Austral (Antártico) e no Atlântico Norte cerca de 1cm/ano e 0,8cm/ano, respectivamente, entre 1985 e 2018 (MEREDITH et al., 2019). As ondas de calor marinho (*marine heatwaves*) muito provavelmente dobraram de frequência e vêm aumentando em intensidade desde 1982 (BINDOFF et al., 2019; COLLINS et al., 2019).

A emissão de dióxido de carbono vem crescendo significativamente há várias décadas devido às atividades humanas, conforme mostra a Figura 3. Um dos efeitos do aumento da temperatura no oceano é a sua acidificação, que reduz a sua capacidade de absorver e reter o carbono. Essa redução da eficiência do oceano em sequestrar o carbono pode desencadear um processo de retroalimentação, elevando ainda mais a concentração de CO₂ na atmosfera. Estudos recentes sugerem que o pH oceânico esteja se reduzindo, com conseqüente diminuição de sua capacidade de absorção de gás carbônico (ORR et al., 2005). A acidificação dos oceanos interfere diretamente na absorção de carbonato de cálcio, estrutura de sustentação de muitos organismos marinhos. Com isso, se espera um impacto em recifes de corais, moluscos e peixes, o que trará conseqüências sociais, econômicas e ambientais relevantes (IPCC, 2019d; BINDOFF et al., 2019).

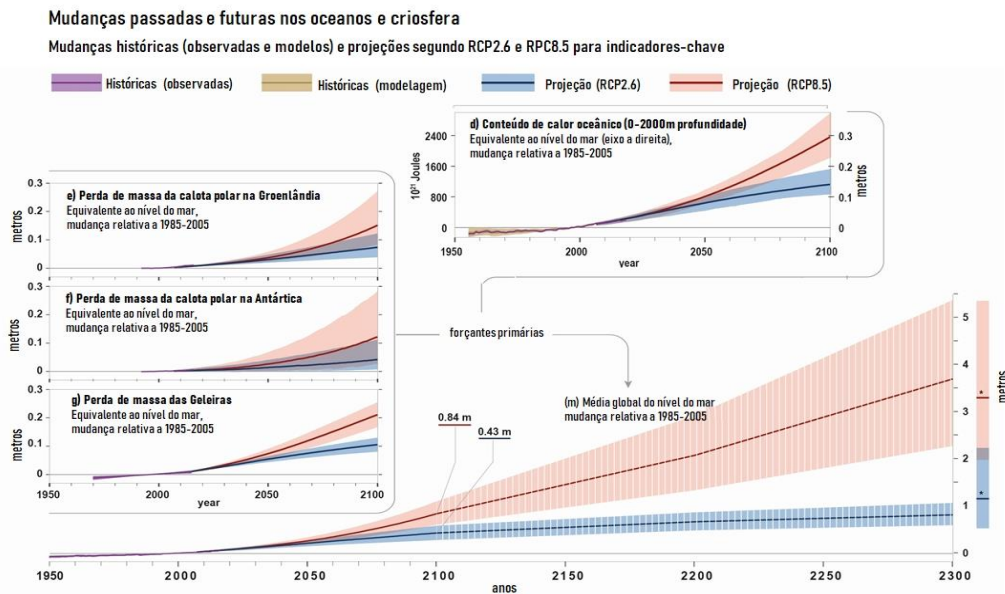
Com o aquecimento da Terra, houve uma contração generalizada da criosfera, com perda de massa de plataformas de gelo e geleiras, redução da cobertura de neve, variação na extensão e na espessura das plataformas de gelo marinho e aumento da temperatura do *permafrost* (IPCC, 2019d; MEREDITH et al., 2019). O derretimento do gelo promove mudanças no albedo da Terra e ainda

¹² O ramo da Circulação Termohalina no Oceano Atlântico é, portanto, chamado de Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico (CRMA, do inglês *Atlantic Meridional Overturning Circulation* – AMOC), que consiste de um membro superior com águas quentes e salinas se deslocando para o norte e submergindo em altas latitudes, e um membro inferior frio e denso se deslocando para o sul, sendo este último representado pela Água Profunda do Atlântico Norte – APAN (CHENG et al., 2013; DRIJFHOUT et al., 2011). (Nota do Revisor).

diminui a salinidade das águas dos oceanos, o que contribui para uma redução na velocidade da circulação termoalina, com consequências sobre o clima da Terra.

A elevação do nível do mar é um dos sinais já detectáveis de mudanças no planeta e ocorre em função do aumento da temperatura e da expansão do volume dos oceanos, além da contribuição do derretimento de geleiras continentais para o aumento de sua massa, conforme mostra a Figura 8.

Figura 8: Alterações projetadas para os oceanos.



Fonte: Abram et al. (2019). Adaptação da Figura 1.5 – painéis d, e, f, g, m (tradução nossa).

Notas: (d) Faixas muito prováveis de mudança global do conteúdo de calor do oceano (0-2000 m de profundidade). Um equivalente aproximado do nível do mar estérico é mostrado com o eixo da direita multiplicando o conteúdo de calor do oceano pelo coeficiente de expansão térmica global médio ($\epsilon \approx 0,125$ m por 1024 Joules) para o aquecimento observado desde 1970. As tendências observacionais avaliadas vão de 1970 a 2010, centradas em 1996.

(e, f) Perda de massa da camada de gelo da Groenlândia e da Antártica.

(g) Perda de massa de geleiras.

(m) Intervalos prováveis para mudança média global do nível do mar. O sombreado hachurado reflete a baixa confiança nas projeções do nível do mar além de 2100, enquanto as barras em 2300 refletem propostas de especialistas para a faixa de possível mudança do nível do mar.

Áreas costeiras são particularmente vulneráveis às respostas do oceano às mudanças climáticas (Figura 9): o aumento do nível do mar pode causar inundações de vastas áreas litorâneas, erosão, (Fig. 9 e Fig. 10) alterações nos sistemas de ressurgências costeiras e intrusão de águas do mar em lençóis aquíferos.

Várias ilhas na Oceania se encontram em perigo de submersão, assim como as megacidades ao nível do mar (Fig. 10). Em 2007, cerca de dois mil residentes das Ilhas Carteret, na Papua Nova Guiné, tiveram que ser evacuados em consequência do avanço do mar sobre suas casas – estes constituem, possivelmente, a primeira comunidade de refugiados do clima. É crescente o número de evidências demonstrando alterações no nível médio do mar em função do aquecimento global (Oppenheimer et al., 2019).

Figura 9: Erosão e perda de patrimônio em regiões costeiras como resultado do aumento do nível médio do mar e da intensificação de eventos extremos – Praia do Hermenegildo (RS).

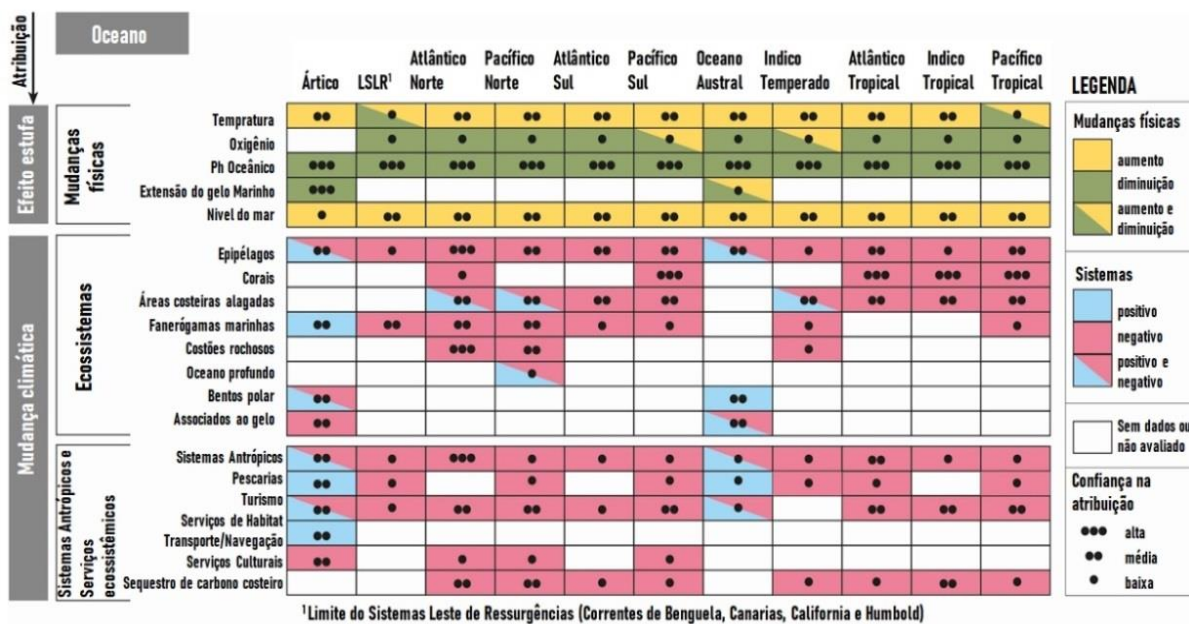


Foto de Lauro Calliari (LOG/IO/FURG)¹³.

¹³ Laboratório de Oceanografia Geológica (LOG) – Instituto de Oceanografia (IO) da Universidade Federal do Rio Grande (FURG).

Figura 10 - Síntese dos perigos e impactos regionais observados nos oceanos avaliados no SROCC. São mostradas as mudanças físicas, os impactos nos principais ecossistemas e os impactos nos sistemas antrópicos bem como nas funções e serviços ecossistêmicos. Mudanças físicas, amarelo ou verde, refere-se a um aumento ou diminuição, na quantidade ou frequência da variável medida, respectivamente. Impactos nos ecossistemas, nos sistemas antrópicos ou nas funções e serviços ecossistêmicos, estão representados e o impacto observado é positivo (azul - benéfico) ou negativo (vermelho - adverso) para o sistema ou serviço em questão, respectivamente. As células designadas como "aumento e diminuição" (bicolores) indicam que, dentro dessa região, tanto o aumento quanto a diminuição das mudanças físicas são encontrados, mas não são necessariamente iguais; o mesmo é válido para células que mostram impactos atribuíveis "positivos e negativos". O nível de confiança para regiões oceânicas se refere à confiança em atribuir as mudanças observadas à ação de gases de efeito estufa provocando mudanças físicas, no ecossistema, nos sistemas antrópicos e serviços nos ecossistêmicos. Indicadores de “sem avaliação”, “não aplicável”, “não avaliado em escala regional” ou “evidência insuficiente para avaliação” também são mostrados. As mudanças físicas no oceano são definidas como: Mudança de temperatura na camada de 0-700 m do oceano, exceto para o Oceano Antártico (0-2000 m) e Oceano Ártico (camada mista superior e principais ramos de influxo); Oxigênio na camada de 0–1200 m ou camada mínima de oxigênio; O pH do oceano como pH de superfície (diminuição do pH corresponde ao aumento da acidificação do oceano). Ecossistemas no oceano: Coral refere-se a recifes de coral de água quente e corais de água fria. A categoria "coluna de água superficial" se refere à zona epipelágica (epipelágos) para todas as regiões do oceano, exceto regiões polares, onde os impactos sobre alguns organismos pelágicos em águas mais profundas do que os primeiros 200 m foram incluídos. As zonas alagadas costeiras incluem pântanos salgados, manguezais e pradarias de grama marinha. As florestas de algas marinhas são habitats de um grupo específico de macroalgas. Os costões rochosos são habitats costeiros dominados por organismos sesséis calcificados como mexilhões e cracas. Oceano profundo são ecossistemas do fundo do mar com de 3.000 a 6.000 m de profundidade. Ecossistemas associados ao gelo marinho incluem as regiões dentro, sobre e abaixo do gelo. Os serviços de habitat referem-se a estruturas e serviços de apoio (por exemplo, habitat, biodiversidade, produção primária). O sequestro de carbono costeiro se refere à absorção e armazenamento de carbono pelos ecossistemas costeiros de carbono azul. Os impactos no turismo referem-se às condições de funcionamento do setor turístico. Os serviços culturais incluem identidade cultural, senso de lar e valores espirituais, intrínsecos e estéticos, bem como contribuições da arqueologia glacial.

Fonte: Figura adaptada da Figura 5.24 de Bindoff et al. 2019. Traduzido pelos autores.



Bindoff et al. (2019) – Figura 5.24. Adaptação e tradução feitas pelos autores.

5. MUDANÇAS OBSERVADAS

Em seu quinto relatório (AR5 – IPCC, 2014), o IPCC sintetiza várias das alterações observadas nos oceanos em função das mudanças climáticas (GHIL, 2002). Recentemente, o relatório especial sobre o efeito das mudanças do clima no oceano e na criosfera (IPCC, 2019c) demonstrou a extensão das alterações já observadas em termos de distribuição, fenologia e consequências nos ecossistemas marinhos, polares e das zonas costeiras.

Muitas espécies marinhas modificaram padrões de distribuição geográfica, atividades sazonais, migração, abundâncias e interações de espécies em resposta às mudanças climáticas em curso. Numerosas observações nas últimas décadas em todas as bacias oceânicas mostram que alterações na temperatura, por exemplo, facilitaram mudanças na abundância, na distribuição de espécies em direção aos polos e/ou para águas mais profundas e mais doces (peixes marinhos, invertebrados e fitoplâncton). Alguns corais de água quente e seus recifes responderam ao aquecimento com substituição de espécies, branqueamento e redução da cobertura, causando perda de habitat (cf. Figuras 11 e 12, mais adiante). O enfraquecimento das conchas de pterópodes¹⁴ e foraminíferos¹⁵ e o declínio das taxas de crescimento dos corais são impactos da acidificação dos oceanos em organismos marinhos.

Desde o início da era industrial, a absorção oceânica de CO₂ resultou em acidificação do oceano, e o pH da água da superfície está diminuindo em uma faixa muito provável de 0,017 a 0,027 unidades de pH/década desde o final dos anos 1980. Essas mudanças no pH reduziram a estabilidade de formas minerais de carbonato de cálcio, principalmente nas regiões de ressurgência e de altas latitudes (IPCC 2019d; BINDOFF et al., 2019; MEREDITH et al., 2019).

Em paralelo ao aquecimento, o oceano aberto perdeu oxigênio numa taxa de 0,5 a 3,3% entre 1970 e 2010 para os primeiros 1000 metros de profundidade (IPCC 2019d; BINDOFF et al., 2019). As concentrações de oxigênio diminuíram nas águas costeiras e na termoclina do oceano aberto em muitas regiões, com uma expansão provável das zonas mínimas de oxigênio tropical nas últimas décadas. Essas zonas mínimas de oxigênio não só estão se expandindo progressivamente nos oceanos Pacífico, Atlântico e Índico tropicais devido à ventilação reduzida e à solubilidade do O₂ em oceanos mais quentes e estratificados, mas também estão restringindo o habitat de peixes.

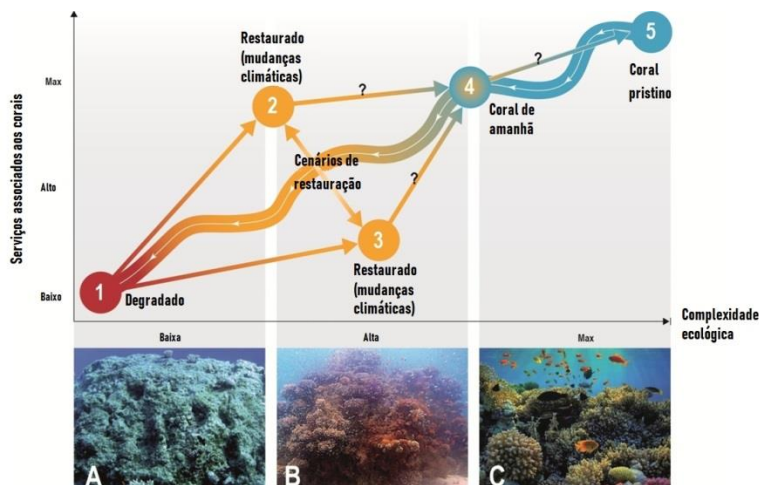
Medidas do nível do mar mostram que houve uma elevação no século XX. Durante o período de 1902 a 2015, o nível médio global do mar aumentou 0,16 [0,12 a 0,21] m. A taxa global média de aumento do nível do mar entre 2006 e 2015 foi de 3,6 mm/ano (3,1 a 4,1 mm/ano), considerada sem precedentes, e 2,5 vezes aquela entre 1901 e 1990, que foi de 1,4 mm/ano (0,8 a 2,0 mm/ano). A taxa de aumento do nível do mar desde meados do século XX foi maior do que a taxa média nos dois milênios anteriores (IPCC, 2019; OPPENHEIMER et al., 2019). É provável que a elevação extrema do nível do mar (como em tempestades, por exemplo) tenha aumentado

¹⁴ Pterópodes: também conhecidos como borboletas-do-mar, são moluscos cujos pés têm forma de barbatanas. Disponível em: <<https://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/pter%C3%B3podes>>. Acesso em: 8 nov. 2020. (Nota do Revisor).

¹⁵ Foraminíferos: são micro-organismos que possuem conchas, frequentemente calcárias, e vivem no fundo do oceano sobre o sedimento ou dentro dele. O estudo dos foraminíferos vivos ou dos fósseis de suas conchas pode fornecer informações sobre a variação da qualidade da água na região. Disponível em: <<http://www.usp.br/aunantigo/exibir?id=7834&ed=1377&f=27>>. Acesso em: 8 nov. 2020. (Nota do Revisor).

desde 1970, como resultado, principalmente, da elevação do nível médio do mar. Devido à escassez de estudos e à dificuldade de distinguir tais impactos de outras modificações em sistemas costeiros, existem evidências limitadas sobre os impactos dessa elevação do nível do mar (IPCC, 2014).

Figura 11: Restauração de recifes de coral como ferramenta de adaptação às mudanças climáticas sobre o oceano.



Bindoff et al. (2019) – Quadro 5.5 da Figura 1. Adaptação e tradução feitas pelos autores.

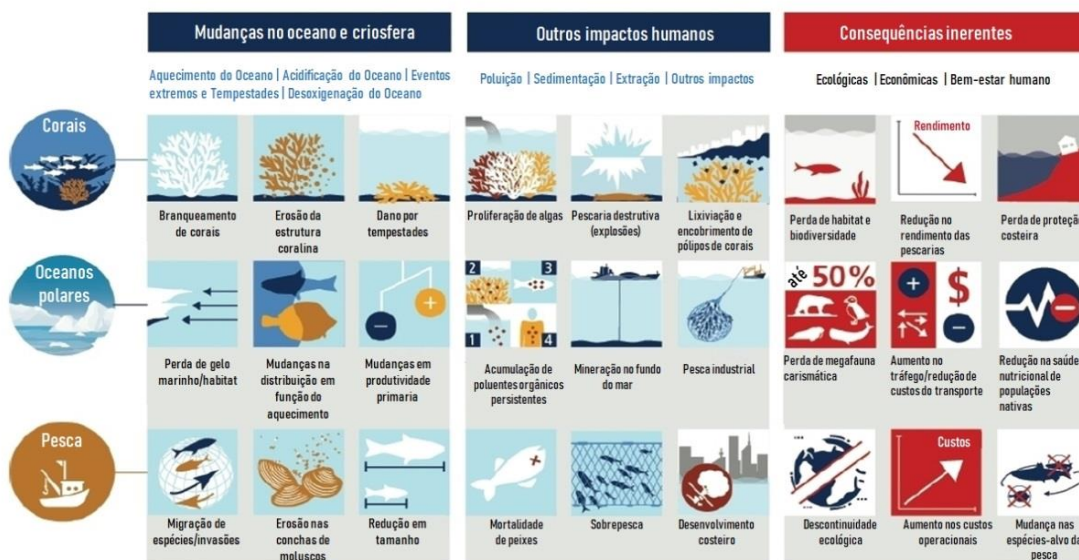
Notas: - A linha ondulada representa estados ecológicos não lineares ao longo de uma trajetória, com cinco estados de um recife de coral (círculos 1-5) em complexidade ecológica variável (eixo x) e níveis de serviço (eixo y), incluindo dois estados extremos (um primitivo *versus* um altamente degradado: círculos 5 e 1, respectivamente). Dois cenários de “estado de recife restaurado” (círculos 2 e 3) levam ao estado de “recife do amanhã” restaurado (círculo 4). A rota do estado de “recife do amanhã” (círculo 4) para um estado pristino (círculo 5) é duvidosa (ponto de interrogação) e ainda está em um nível teórico. As rotas dos dois cenários de “estado de recife restaurado” para “recife do amanhã” estão em investigação (pontos de interrogação). A, B e C representam diferentes status de recifes: A = um recife na forma de monte/colina deserta na Praia Dekel, em Israel, antes do transplante feito em novembro de 2005; B = o mesmo recife restaurado (junho de 2016). Mais de 800 colônias recifais cultivadas em viveiros de sete espécies de corais foram transplantadas em três ocasiões sucessivas (2005, 2007, 2009). Em 2016, a colina já estava repleta de cardumes de peixes que vivem em recifes; C = um recife intocado, inexistente nas condições atuais e antecipadas do recife.

- Os cenários de restauração são desenvolvidos ao longo da trajetória de “recife degradado” (baixa complexidade ecológica, serviços mínimos de recife) a “recife do amanhã” saudável, passando por dois estados de restaurados que são impactados pelas mudanças climáticas. O emprego de abordagens de engenharia ecológica pode ajudar a mover os estados ecológicos de qualquer recife restaurado para o status de "recife do amanhã" (confiança média).

A cobertura de gelo é um dos parâmetros mais afetados pelas mudanças do clima. Entre 1979 e 2018, a extensão do gelo marinho do Ártico diminuiu em todos os meses do ano, com reduções muito prováveis de $12,8 \pm 2,3\%$ por década no mês de setembro. Essas mudanças no gelo marinho em setembro supostamente não têm precedentes há pelo menos 1000 anos. A perda de gelo marinho no verão e a perda de cobertura de neve de primavera no continente contribuiriam para amplificar o aquecimento no Ártico, onde a temperatura do ar na superfície aumentou mais do que o dobro da média global nas últimas duas décadas. A Antártica é marcada por sinais regionais

contrastantes e grande variabilidade interanual, o que faz com que um padrão único de comportamento da cobertura do gelo marinho para todo o continente não possa ser descrito e tendências estatisticamente significativas (1979-2018) não sejam evidentes (MEREDITH et al., 2019).

Figura 12: Resumo esquemático de impactos e consequências resultantes das mudanças do clima (aquecimento, acidificação, tormentas e desoxigenação), além de outros impactos antrópicos em recifes de corais, oceanos polares e pesca.



Bindoff et al. (2019) – FAQ5.1. Adaptação e tradução feitas pelos autores.

6. RISCOS AOS ECOSISTEMAS COSTEIROS E MARINHOS E A SEUS SERVIÇOS

Todas as alterações observadas nos oceanos e nas zonas costeiras impõem riscos ao ecossistema e ao ser humano. Em seus últimos relatórios, o IPCC adverte para os riscos de impactos aos ecossistemas costeiros e marinhos devido ao aumento das taxas e da magnitude do aquecimento, da acidificação dos oceanos e da elevação do nível médio do mar, entre outras dimensões das mudanças climáticas (IPCC, 2014, 2019a, 2019b).

A observação de que a mudança climática global natural – que causou alterações significativas nos ecossistemas e extinções de espécies nos últimos milhões de anos nos oceanos – tenha ocorrido com taxas inferiores àquelas das mudanças climáticas antrópicas atuais demonstra o risco futuro aos ecossistemas. Muitas espécies de plantas e animais serão incapazes de se adaptar às mudanças em seu habitat ou de encontrar condições adequadas em tempo hábil para sua sobrevivência durante o século XXI: recifes de corais, ecossistemas polares e pesca são particularmente vulneráveis (cf. Figura 12); os ecossistemas costeiros, muito provavelmente, apresentarão contração de habitats, migração de espécies e perda de biodiversidade e funcionalidade (IPCC, 2019c; Bindoff et al., 2019; Meredith et al., 2019).

Uma grande quantidade de espécies enfrenta um aumento do risco de extinção devido à mudança climática durante e além do século XXI, especialmente porque as mudanças climáticas interagem com outros estressores. Em todos os cenários estudados, o risco de extinção é aumentado em relação aos períodos pré-industriais e atuais, como resultado tanto da magnitude quanto da taxa de mudança climática. As extinções serão impulsionadas por vários fatores associados ao clima (aquecimento, perda de gelo marinho, variações na precipitação, redução dos fluxos dos rios, acidificação dos oceanos e baixos níveis de oxigênio oceânico) e pelas interações entre esses fatores e outros impactos antrópicos, como a modificação simultânea de habitat, sobrepesca, poluição, eutrofização¹⁶ e mineração (cf. Figuras 12 e 13).

A redistribuição global das espécies marinhas e a redução da biodiversidade no cenário de mudanças do clima vão desafiar a sustentabilidade da produtividade das pescarias e outros serviços ecossistêmicos, especialmente em baixas latitudes. Em meados do século XXI, com o aquecimento global de 2°C em relação às temperaturas pré-industriais, mudanças na produtividade primária líquida devem reduzir o potencial máximo de captura global e alterar a distribuição e a composição das espécies exploradas. A expansão progressiva das zonas mínimas de oxigênio e as "zonas mortas" anóxicas dos oceanos restringirão ainda mais os habitats dos peixes, favorecendo um ambiente mais apropriado para microrganismos.

Oceanos tropicais devem sofrer uma diminuição no potencial de captura de três vezes ou mais que a média global até o final deste século em um cenário de emissão extrema de CO₂. Nas zonas econômicas exclusivas dos estados das ilhas do Pacífico, projeta-se que mais de 50% dos peixes e invertebrados explorados se tornem localmente extintos em relação ao passado recente. Espécies de atum de águas temperadas comercialmente importantes devem se deslocar para os polos e ter sua abundância reduzida nos trópicos, enquanto algumas espécies tropicais devem permanecer abundantes, mas com mudanças nos padrões de distribuição em regiões de baixa latitude. Já o potencial de captura de algumas espécies de peixes tropicais resilientes às mudanças no ambiente pode ter menor risco climático no curto prazo. Em contraste, o potencial de captura no Ártico é projetado para crescer, embora exista alta variabilidade entre previsões de modelos (IPCC, 2019d; Meredith et al., 2019).

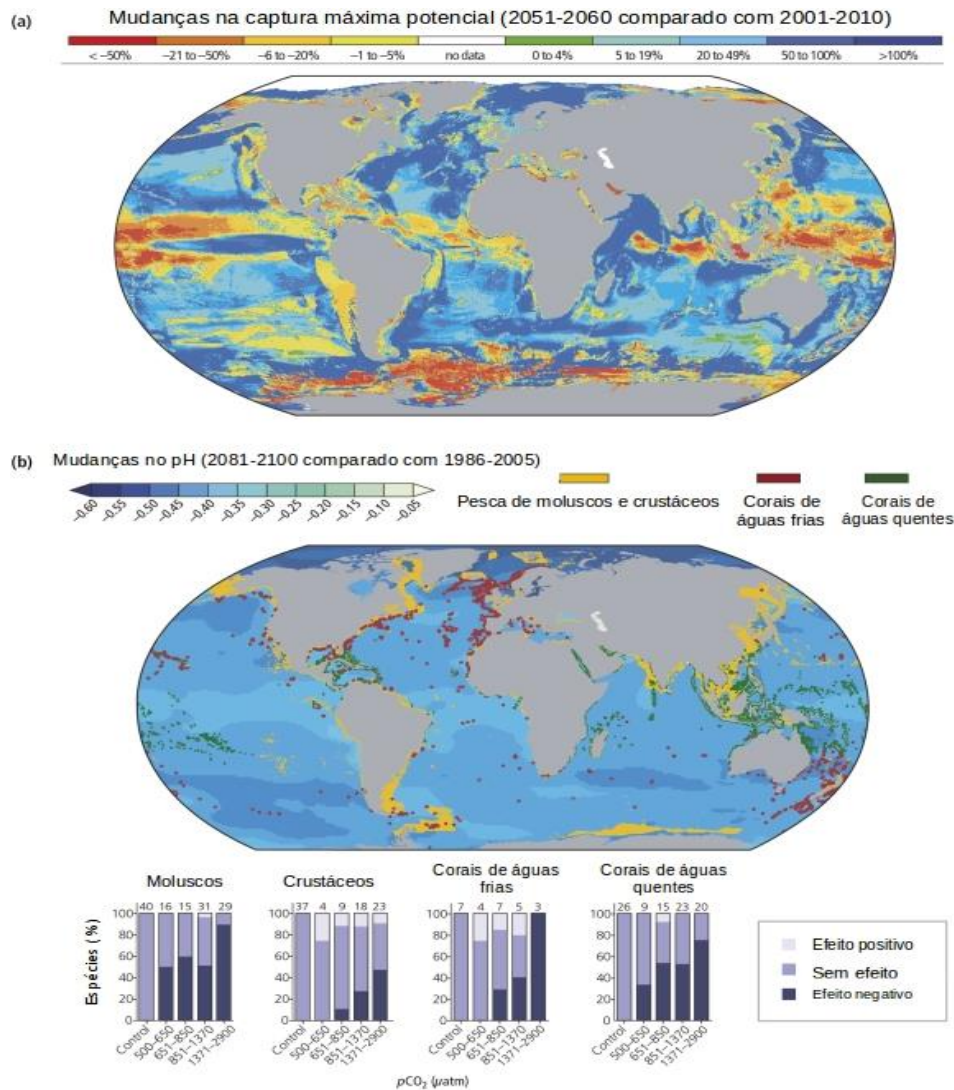
O risco projetado de impactos sobre a pesca aumenta com a elevação do nível das emissões de gases de efeito estufa (Figura 13). Devido a interações significativas entre o potencial de captura e o nível de exploração da pesca, as capturas realizadas no século XXI dependerão de cenários futuros de pesca e de sua governança.

Os ecossistemas marinhos, especialmente os polares e os de recifes de corais, estão ameaçados pela acidificação dos oceanos. Os impactos em espécies individuais e em grupos de espécies se multiplicam com o aumento de CO₂. Moluscos altamente calcificados, equinodermos e corais de construção de recifes são mais sensíveis do que os crustáceos e peixes. A acidificação dos oceanos atua em conjunto com outras mudanças globais (como aquecimento, níveis de oxigênio

¹⁶ Eutrofização: (do grego *eutrophos*, que significa bem nutrido) é um processo observado em diferentes corpos d'água que se caracteriza pelo aumento de nutrientes, especialmente fósforo e nitrogênio, e provoca o surgimento excessivo de organismos como algas e cianobactérias. Um ambiente eutrofizado adquire uma coloração turva e a quantidade de oxigênio diminui, causando a morte de várias espécies. Mais informações em: <<https://brasilecola.uol.com.br/biologia/eutrofizacao.htm>>. Acesso em: 22 mar 2021. (Nota do Revisor).

progressivamente menores) e com mudanças locais (como poluição, eutrofização), levando a impactos interativos, complexos e amplificados para espécies e ecossistemas.

Figura 13: Riscos de mudança climática para a pesca.



Fonte: IPCC (2014) – Figura 2.6, Tópico 2¹⁷. Adaptação e tradução feitas pelos autores.

Notas: (a) Projeção da redistribuição global do potencial de captura máximo de ~1000 espécies de peixes e invertebrados explorados, comparando as médias de 10 anos (de 2001-2010 em relação a 2051-2060) usando condições oceânicas baseadas em um único modelo de clima em um cenário de aquecimento moderado a alto (2°C em relação às temperaturas pré-industriais), sem análise dos impactos potenciais de sobrepesca ou de acidificação dos oceanos;

(b) Pesca de moluscos e crustáceos marinhos (taxas atuais de captura estimadas em $\geq 0,005$ toneladas/km²) e locais conhecidos de corais de água fria e quente representados em um mapa global que mostra a projeção da

¹⁷ Disponível em: <<https://archive.ipcc.ch/report/graphics/index.php?t=Assessment%20Reports&r=AR5%20-%20Synthesis%20Report&f=Topic%202>>. Acesso em: 28 abr. 2021.

distribuição da acidificação superficial dos oceanos até 2100 no cenário RCP8.5¹⁸. O painel inferior compara a porcentagem de espécies sensíveis à acidificação oceânica para corais, moluscos e crustáceos. O número de espécies analisadas em todos os estudos é dado no topo das barras para cada categoria de CO₂. Os valores de pressão parcial do CO₂ (pCO₂) são equivalentes a diferentes cenários de projeções do IPCC: RCP4.5 para 500 a 650 μ atm, RCP6.0 para 651 a 850 μ atm e RCP8.5 para 851 a 1370 μ atm. Em 2150, o RCP8.5 cai na categoria 1371 a 2900 μ atm. A categoria de controle corresponde a 380 μ atm.

Os sistemas costeiros e as áreas rasas sofrerão cada vez mais submersões, inundações e erosões ao longo do século XXI e além por causa do aumento do nível do mar. Os empreendimentos expostos aos riscos costeiros e as pressões humanas sobre os ecossistemas costeiros crescerão significativamente nas próximas décadas devido ao crescimento populacional, ao desenvolvimento econômico e à urbanização. Os fatores climáticos e não climáticos que afetam os ambientes costeiros vão diminuir os habitats, aumentar a exposição do litoral às ondas e tempestades e degradar as características ambientais importantes para a pesca e o turismo (IPCC, 2019d; BINDOFF et al., 2019).

7. MUDANÇAS DO CLIMA E A CIRCULAÇÃO DO OCEANO ATLÂNTICO SUL

A circulação termohalina no Oceano Atlântico é representada por uma célula vertical com direção norte-sul denominada de *Meridional Overturning Cell* (MOC; em português: Célula de Revolvimento Meridional – CRM).

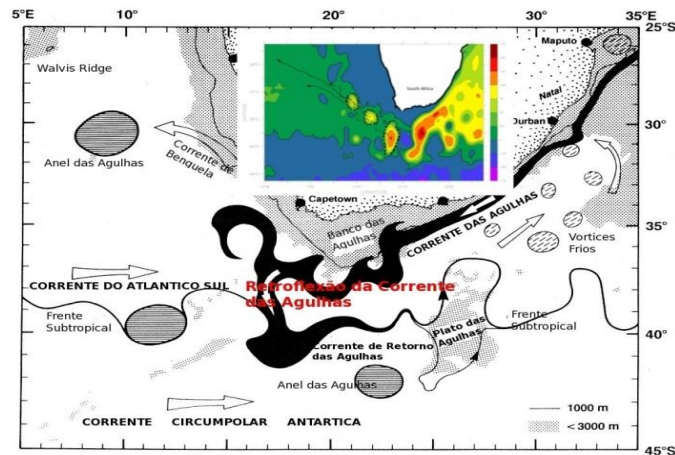
De maneira geral, a circulação termohalina global é mantida pelo seguinte mecanismo: águas superficiais das outras bacias oceânicas fluem para o Atlântico Sul pela Passagem de Drake e pelos anéis liberados na retroflexão da Corrente das Agulhas, ao sul da África, e eventualmente são transportadas para o Atlântico Norte (cf. Figura 6). Ao passar pela região equatorial do Atlântico, essas águas se aquecem e se tornam mais salinas devido à evaporação. Quando atingem altas latitudes no hemisfério norte, as águas mais quentes vindas do Sul liberam calor para a atmosfera e, em virtude da maior concentração de sal em comparação com as águas de origem local, se tornam mais pesadas e afundam. A massa de água resultante desse afundamento, denominada Água Profunda do Atlântico Norte (APAN), flui de volta para o Atlântico Sul, de onde é exportada para as outras bacias oceânicas, completando a circulação termohalina.

Ao sul da África, águas oriundas do Índico adentram o Atlântico por meio do processo conhecido como o Vazamento das Agulhas, que se caracteriza por enormes quantidades de águas mais quentes e salinas do Índico aprisionadas em anéis ou laços formados e destacados da Corrente das Agulhas na região onde essa corrente retroflete e se volta para leste (Figura 14). Em torno de seis vezes por ano, o laço formado pela retroflexão se fecha, formando esses anéis que aprisionam

¹⁸ *Representative Concentration Pathways* ou Vias de Concentração Representativa (RCP) são trajetórias de concentração de gases de efeito estufa (não emissões) adotadas pelo IPCC para descrever diferentes futuros climáticos considerados possíveis dependendo do volume de gases de efeito estufa emitidos nos próximos anos. Quatro RCPs (RCP2.6, RCP4.5, RCP6 e RCP8.5) foram usados em modelagem climática e pesquisa para o quinto Relatório de Avaliação do IPCC (AR5) em 2014. Mais informações em: <https://www.no-regime.com/rupt/wiki/Representative_Concentration_Pathway>. Acesso em: 28 abr. 2021.

enormes quantidades de águas com temperatura cerca de 5°C mais alta e com salinidade de 0,3 psu¹⁹, maior do que das águas do Atlântico Sul.

Figura 14: O Vazamento das Agulhas (*Agulhas Leakage*).



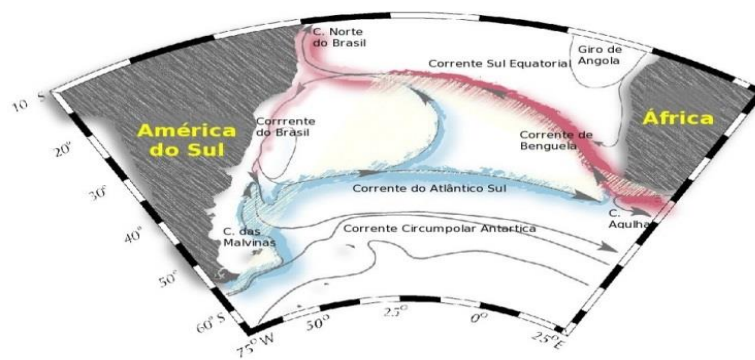
Nota: A Corrente das Agulhas desloca-se ao longo da borda leste da África. Ao ultrapassar o limite sul do continente, flui para oeste até cerca de 010°E, onde retroflete e passa a escoar no sentido leste. Instabilidades hidrodinâmicas resultam em crescimento e eventual fechamento e destacamento do laço formado pela retroflexão. Esses anéis, com cerca de 320 km de diâmetro, aprisionam em seu interior e transportam para o Atlântico Sul consideráveis quantidades de água oriundas do Oceano Índico.

Do lado oeste da bacia, ao sul da América do Sul, águas mais frias e menos salinas transportadas pela Corrente Circumpolar Antártica (CCA) adentram o Atlântico Sul e uma parte dessas águas flui para norte, ao largo da plataforma continental argentina, alimentando a Corrente das Malvinas (CM). Aproximadamente na altura de 38°S, essa corrente encontra com a Corrente do Brasil (CB) na Confluência Brasil-Malvinas (CBM) e volta-se para sudeste, onde uma parte reintegra-se à CCA e outra forma a Corrente do Atlântico Sul – CAS (STRAMMA e ENGLAND, 1999). Na região de confluência com a CB, uma parte dessas águas da CCA vindas do Pacífico se mistura com águas locais e, eventualmente, contribui para a formação de massas d’água das regiões superiores do Atlântico Sul.

Nas camadas superiores da região subtropical do Atlântico Sul, essas duas massas d’água provenientes do Índico e do Atlântico contribuem para a formação da Corrente Sul Equatorial (Figura 15) que se dirige para noroeste, onde se bifurca próximo à costa brasileira na altura de 15°S. O ramo sul dessa bifurcação dá origem à Corrente do Brasil (CB), enquanto o ramo norte forma a Corrente Norte do Brasil (CNB), a qual transporta águas em direção ao Equador, alimentando o complexo sistema de correntes que resulta em um transporte líquido de águas para o Hemisfério Norte.

¹⁹ PSU – *Practical Salinity Unit* (Unidade de Salinidade Prática): escala de salinidade determinada com base na relação direta entre a condutividade elétrica da água do mar e a sua salinidade. (Nota do revisor)

Figura 15: Principais correntes no Oceano Atlântico Sul



Adaptado de Petterson & Stramma (1991 and Stramma & England (1999)

Nota: As águas provenientes do Oceano Índico por meio do Vazamento das Agulhas juntam-se às águas vindas do Pacífico através da Passagem de Drake, formando o ramo superior da Célula Meridional do Atlântico. Essas águas fluem em direção ao continente sul-americano pela Corrente Sul-Equatorial. Próximo ao Nordeste do Brasil, essa corrente bifurca-se, dando origem à Corrente do Brasil (para o sul) e à Corrente Norte do Brasil (para o norte). Anomalias no Vazamento das Agulhas podem ter implicações importantes tanto para as condições oceânicas na parte oeste do giro subtropical quanto para o clima sobre o território brasileiro por meio da conexão atmosférica.

Estudos sugerem que o Vazamento das Agulhas tem aumentado nos últimos anos em resposta a um deslocamento para sul do sistema de ventos no Atlântico Sul (BIASTOCH et al., 2009). A CB transporta, ao longo do litoral brasileiro, parte das águas injetadas no Atlântico Sul pelo Vazamento das Agulhas, o que pode significar um aumento da temperatura e, conseqüentemente, da quantidade de calor armazenado na região oceânica ao largo do continente sul-americano (Sato e Polito, 2008). É prevista uma intensificação consistente na CB entre 30°S e 40°S de cerca de 40%, e há projeções de deslocamento da CBM para o sul impulsionada por um enfraquecimento da CM (PONTES et al., 2016).

Independente de sua causa, a elevação da temperatura da superfície do mar resulta em alterações que impactam a sociedade, podendo levar, por exemplo, a um aumento de intensidade de eventos extremos, como os ciclones extratropicais semelhantes ao Furacão Catarina, que atingiu o Sul do Brasil em 2004 (PEZZA et al., 2009). Podem ocorrer, ainda, alterações dos modos de variabilidade do Atlântico com modificação do padrão de circulação atmosférica sobre o continente, resultando em mudanças no regime de precipitação em uma vasta área da América do Sul que inclui as regiões Sul e Sudeste do Brasil e praticamente toda a Bacia do Prata (GRIMM e ZILLI, 2009), com importantes implicações para o clima continental. O aumento de intensidade e frequência das ondas de calor marinho (*marine heatwaves*) também pode ter conseqüências no regime de secas do Brasil e na produtividade primária e de pescarias (COLLINS et al., 2019; RODRIGUES et al., 2019).

8. SISTEMAS DE OBSERVAÇÃO DO OCEANO PARA O CLIMA

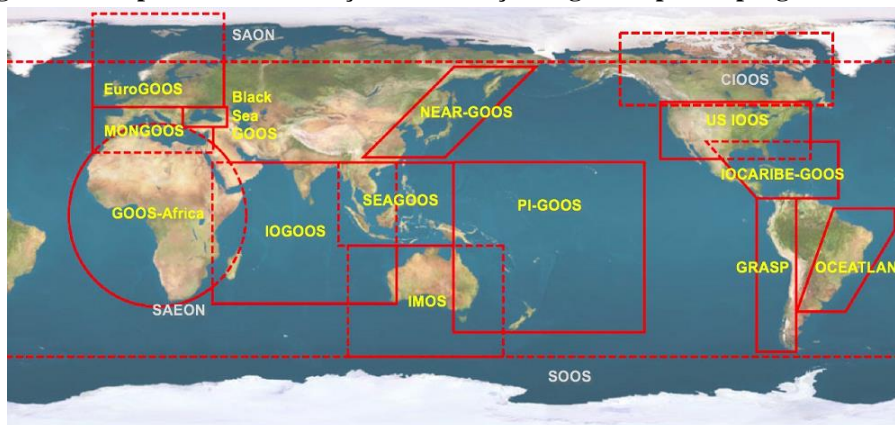
Tendo em vista a dimensão e a diversidade dos aspectos envolvidos para a melhor compreensão do papel dos oceanos no clima, as observações sistemáticas dos oceanos requerem um

alto grau de cooperação e coordenação regional e internacional. Dessa forma, a Comissão Oceanográfica Intergovernamental (COI) da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (IOC/Unesco) executa o programa Sistema Global de Observação dos Oceanos (GOOS, sigla em inglês de *Global Ocean Observing System*)²⁰. O GOOS adotou uma configuração de observação dos oceanos flexível e adaptada às necessidades da sociedade (Lindstrom et al., 2012), e não voltada apenas para questões de mudanças do clima. Requisitos científicos que resultam das demandas da sociedade e que permitem identificar as plataformas de observação mais adequadas direcionam essa configuração.

O GOOS conta com três painéis de especialistas: um físico, um biogeoquímico e um biológico e de ecossistemas. Esses painéis têm como responsabilidade identificar as variáveis essenciais para a observação dos oceanos (EOV). O programa GOOS também fomenta o uso de padrões globais de observação oceânica obedecendo às melhores práticas (*Best Practices*) de coleta de dados, bem como a disponibilização desses dados e informações de maneira aberta por meio da adoção do modo FAIR (Facilmente encontrado, Acessível, Interoperacional e Reutilizável).

A atuação regional do GOOS é facilitada pela sua divisão em Alianças Regionais (Figura 16), como a Aliança Regional para a Oceanografia no Atlântico Sudoeste Superior e Tropical (Oceatlan).

Figura 16: Mapa com a distribuição das Alianças Regionais para o programa GOOS.



Disponível em: <http://www.goocean.org/images/elements/ob_gra.png>.

As observações do GOOS são coordenadas por um comitê conjunto de observações oceanográficas e meteorológicas (*Joint Intergovernmental Oceanographic Commission / World Meteorological Organization Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology – JCOMM*)²¹ que tem a função de disponibilizar as informações obtidas pelas redes de observação.

²⁰ Mais informações disponíveis em: <<http://www.goocean.org>>.

²¹ Em decorrência de Decisão do 18º Congresso Mundial de Meteorologia e 30ª Sessão da Assembleia da COI, ambos em 2019, o JCOMM foi substituído pelo Comitê de Cooperação conjunta COI-OMM (Joint WMO-IOC Collaborative Board).

Várias dessas redes contribuem diretamente para o monitoramento e o conhecimento das mudanças climáticas. Um dos esforços mais importantes é o Programa Argo²², que utiliza flutuadores dotados de sensores capazes de amostrar propriedades dos oceanos nos primeiros 2000 metros da coluna de água. Os primeiros Argo continham apenas sensores de salinidade e temperatura, mas hoje em dia já existem flutuadores com sensores biogeoquímicos e estão sendo desenvolvidos flutuadores de profundidade capazes de ir além dos 2000 metros.

Também fornecem contribuições importantes as redes:

- *Data Buoy Cooperation Panel (DBCP)*²³, cujas estações meteo-oceanográficas são responsáveis pela coleta de dados atmosféricos e oceanográficos em regiões remotas dos oceanos;
- *Global Ocean Ship-Based Hydrographic Investigations Program (GO-SHIP)*²⁴, que congrega observações de oceanografia física, ciclo do carbono, biogeoquímica marinha e ecossistemas, além de outras análises baseadas em dados hidrográficos coletados por navios;
- *Global Sea Level Observing System (GLOSS)*²⁵, que tem relevância para os estudos do clima tendo em vista seu objetivo de estabelecimento de uma rede global de alta qualidade de observação do nível do mar.

Outras redes também observam os oceanos e gradualmente estão se adaptando à configuração de observação adotada pelo GOOS. Um exemplo é a Rede de Telemetria de Animais Marinhos, que tem um longo registro de observação dos oceanos a partir de plataformas de dados acopladas a animais marinhos. As informações e os dados obtidos através dos sensores desses “animais oceanógrafos” já são um dos principais elementos do sistema de observação dos oceanos e foram disponibilizados por meio do sistema operacional da antiga *Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology (JCOMMOPS)*.

A cobertura oferecida por esses elementos de observação dos oceanos pode ser vista na Figura 17, a seguir.

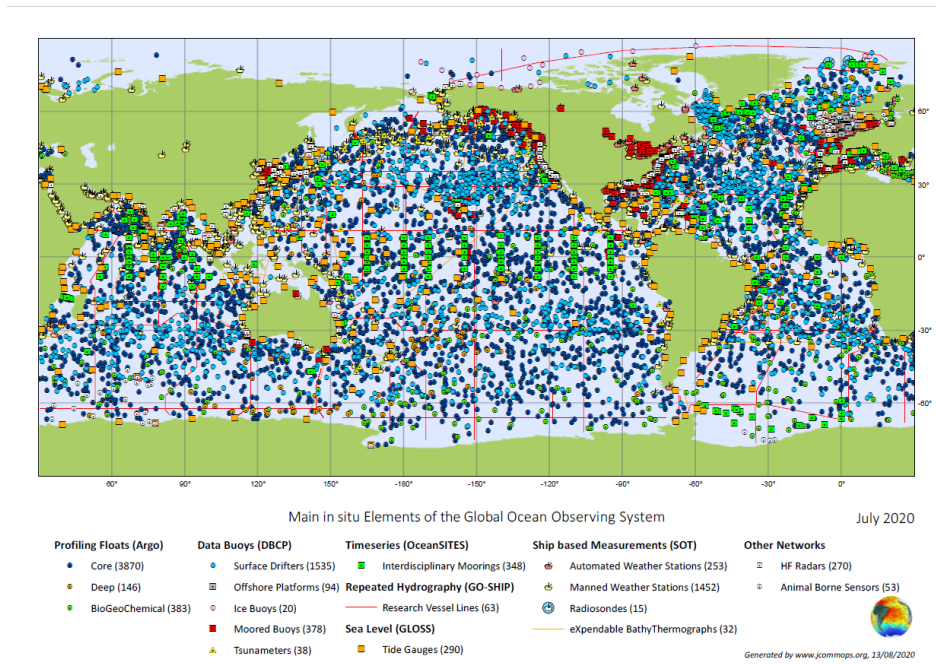
²² Mais informações disponíveis em: <<http://www.oceanlan.org/argo/>>. Acesso em: 27 jun. 2022. (Nota do revisor)

²³ Mais informações em: <<http://www.jcommops.org/dbcp/>>. Acesso em: 28 abr. 2021.

²⁴ Mais informações em: <<http://www.go-ship.org/>>. Acesso em: 28 abr. 2021.

²⁵ Mais informações em: <<http://www.gloss-sealevel.org/>>. Acesso em: 28 abr. 2021.

Figura 17: Principais elementos de observação *in situ* dos oceanos coordenados pelo Programa GOOS. A figura apresenta o total das plataformas observando os oceanos em julho de 2020.



Disponível em <<http://www.goosocan.org/>>. Acesso em 31 ago. 2020.

O Brasil participa do GOOS com o seu próprio programa – o GOOS-Brasil²⁶, um sistema nacional de observação dos oceanos que visa à coleta, ao controle de qualidade, à distribuição operacional de dados oceanográficos e ao monitoramento oceanográfico e climatológico no Atlântico Sul e Tropical. Além disso, o País também faz parte da Oceatlan, que representa o esforço de instituições da Argentina, do Brasil e do Uruguai engajadas no planejamento e na implementação de um sistema oceanográfico operacional cujo propósito é monitorar e investigar os processos oceânicos no Atlântico Sul e Tropical. As atividades da Oceatlan contribuem para a avaliação do papel do oceano nas mudanças climáticas.

Um dos principais programas do GOOS-Brasil é o *Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic* (PIRATA), uma rede de observações multidisciplinares no Atlântico Tropical que faz uma contribuição importante do Brasil para a rede OceanSites ao coletar dados multidisciplinares em alta frequência de longo prazo a partir de plataformas fixas no oceano aberto. O PIRATA é composto por 21 boias fixas com responsabilidade compartilhada entre Brasil, França e Estados Unidos.

O GOOS-Brasil também contribui com o DBCP por meio do Programa Nacional de Boias (PNBOIA), que tem 22 boias fixas e 297 de deriva em funcionamento (Figura 18), bem como com a Rede Argo, por meio do lançamento de 29 flutuadores.

²⁶ Mais informações em: <<http://www.goosbrasil.org/>>. Acesso em: 28 abr. 2021.

Figura 18: Boias meteo-oceanográficas fixas (em vermelho) e de deriva (espaguetes no oceano) do Programa Nacional de Boias do GOOS-Brasil.



Disponível em <<http://www.goosbrasil.org/>>. Acesso em: 28 abr. 2021.

Outra preocupação do GOOS-Brasil é o nível do mar, que é monitorado através de 13 marégrafos que fazem parte do Programa GLOSS Brasil. A Rede Ondas possui ondógrafos fundeados em águas rasas ao longo da costa brasileira com o objetivo de monitorar o clima de ondas por meio do conhecimento, em tempo real, das condições do mar. Já o Projeto Movar (Monitoramento da Variabilidade Regional do Transporte de Calor na Camada Superficial do Oceano Atlântico Sul entre o Rio de Janeiro e a Ilha de Trindade-ES) é um programa de observações de alta densidade espacial da temperatura do oceano com o uso de sondas descartáveis do tipo XBT²⁷ (*Expendable Bathythermograph* – em português: batitermógrafo descartável).

Além desses programas, várias atividades de observação dos oceanos no Brasil são oriundas de iniciativas da comunidade acadêmica:

- o consórcio *South American Climate Change* (SACC), financiado pelo *Inter-American Institute for Global Change Research* (IAI)²⁸, representou uma iniciativa formada por instituições do Brasil, da Argentina, do Uruguai, do Chile, do Peru e dos Estados Unidos com o objetivo principal de entender o papel do Atlântico Sul no clima regional. Uma importante contribuição do SACC é o Projeto *South Atlantic Meridional Overturning Circulation* (SAMOC)²⁹, que monitora fluxos de calor e de sal na latitude de 34,5°S;

- o Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira (SiMCosta)³⁰ é uma iniciativa que busca implementar uma rede de monitoramento de parâmetros meteorológicos e oceanográficos na zona costeira brasileira a fim de estabelecer padrões de variabilidade climática e tendências de longo período, além de modelar possíveis cenários causados por efeitos naturais e/ou antrópicos;

²⁷ XBT é uma sonda usada para medir a temperatura em toda a coluna d'água: um batitermógrafo descartável. (Nota do Revisor).

²⁸ Mais informações em: <<https://www.iai.int/en/>>. Acesso em: 28 abr. 2021.

²⁹ Disponível em: <http://www.aoml.noaa.gov/phod/SAMOC_international/index.php>. Acesso em: 28 abr. 2021.

³⁰ Disponível em: <<https://simcosta.furg.br/home>>. Acesso em: 28 abr. 2021.

- o Brasil é componente da *Ocean Tracking Network (OTN)*³¹, uma rede de telemetria acústica de animais marinhos que visa monitorar o deslocamento de animais e as variáveis oceanográficas, contribuindo, assim, para a observação dos ecossistemas oceânicos;
- o Programa de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração (PELD)³² é uma iniciativa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) para formar uma rede de sítios de referência na pesquisa científica da ecologia de ecossistemas. Os sítios costeiros e marinhos do PELD vêm coletando dados de longo prazo e contribuindo para a observação dos ambientes marinhos brasileiros;
- o Programa Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia (INCT)³³ do CNPq visa capacitar recursos humanos altamente qualificados e estabelecer redes de pesquisa com uma abordagem multidisciplinar em temas estratégicos e investimentos em longo prazo. O INCT tem projetos dedicados exclusivamente ao ambiente marinho e costeiro (como o INCT-Mar) que conduzem programas de observação nos oceanos.

9. BRASIL: POLÍTICAS E INVESTIMENTOS NAS CIÊNCIAS DO MAR E AS MUDANÇAS DO CLIMA

Paralelamente ao esforço mundial de redução das emissões de gases de efeito estufa e à criação de condições internas para lidar com os impactos das mudanças climáticas globais (adaptação), o Brasil também passou a contar com o Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas, criado por meio do Decreto Presidencial nº 3.515/2000. O Fórum, cujo nome foi recentemente alterado para Fórum Brasileiro de Mudança do Clima, reúne colaboradores de várias áreas da sociedade, da ciência e do governo com o objetivo de assessorar a Presidência da República na questão das mudanças climáticas.

Reconhecido em 2009 como um dos instrumentos institucionais da Política Nacional de Mudanças Climáticas (Lei nº 12.187/2009), o Fórum produz deliberações e articula-se com as demais instâncias de governança climática no País a fim de elaborar orientações estratégicas e de grande alcance, obtidas por consenso, deixando as definições de cunho operacional para outros âmbitos do Executivo. O Fórum é composto por dez Câmaras Temáticas – Florestas, Biodiversidade, Agricultura e Pecuária; Energia; Mobilidade e Transportes; Indústria; Cidades e Resíduos; Financiamento; Defesa e Segurança; Visão de Longo Prazo; Ciência, Tecnologia e Inovação, e Adaptação, Gestão de Riscos e Resiliência.

O exame dos documentos citados mostra pouca informação sobre oceanos e zonas costeiras. O Fórum, por exemplo, não tem uma Câmara Temática dedicada à zona costeira ou ao mar brasileiro. Mesmo assim, o Brasil tem iniciativas que procuram reconhecer o papel dos oceanos no clima e nos processos de adaptação às mudanças e mitigação de seus efeitos.

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) passou a representar o Sistema Costeiro-Marinho em suas publicações (IBGE, 2019), reconhecendo a multiplicidade de feições e

³¹ Disponível em: <<https://members.oceantrack.org/projects>>. Acesso em: 28 jun. 2022. (Nota do revisor)

³² Disponível em: <<http://memoria.cnpq.br/sitios-peld>>. Acesso em: 28 jun. 2022. (Nota do revisor)

³³ Disponível em: <<http://inct.cnpq.br/>>. Acesso em: 28 abr. 2021.

características físicas e bióticas de cada porção do litoral brasileiro e os processos que marcam esses ambientes. O Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) implementou o Programa Ciência no Mar, que reúne seis linhas temáticas, incluindo a variabilidade climática.

Na esfera internacional, o Brasil é signatário da Declaração de Belém (*Belem Statement*), que reconhece o papel dos oceanos na economia e no alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)³⁴ das Nações Unidas e tem como uma de suas áreas de interesse comuns o estudo das mudanças no clima. A Declaração de Belém, assinada em 2017, é um acordo conjunto de cooperação em pesquisa e inovação no Atlântico Sul entre a União Europeia, o Brasil e a África do Sul, seguindo os passos da Declaração de Galway (*Galway Statement*), assinada em 2013, para cooperação no Atlântico Norte entre União Europeia, Canadá e Estados Unidos. Esses acordos refletem um movimento significativo na busca de uma abordagem conjunta e integrada da investigação e do desenvolvimento do Oceano Atlântico e seus países limítrofes. A Declaração de Belém está sendo implementada por meio do projeto *All Atlantic Cooperation for Ocean Research and Innovation* (AANCHOR)³⁵. Esforços recentes têm procurado minimizar as lacunas e novas versões dos documentos citados estão em discussão e tratam do assunto com mais pertinência.

A comunidade científica brasileira tem sido ativa na análise dos problemas climáticos e dos oceanos e zonas costeiras. Vários estudos vêm sendo desenvolvidos pela comunidade oceanográfica brasileira com o objetivo de entender os impactos das mudanças climáticas no Atlântico para sugerir as possíveis respostas a essas mudanças no clima regional. A participação do Brasil no programa GOOS e nas demais iniciativas mencionadas são importantes contribuições para o sistema global de observação oceânica. O Brasil conduz um programa de pesquisa de vanguarda na Antártica – o Programa Antártico Brasileiro (Proantar) – que traz muitos subsídios para compreender o papel dos oceanos e das regiões polares no clima.

Não obstante essas iniciativas, a contribuição brasileira ainda está muito aquém da capacidade do País em termos de recursos humanos e financeiros. Considerando-se a enorme extensão de seu litoral e sua intensa relação com o oceano, o Brasil investe muito pouco em Ciências do Mar. Houve um período, entre 2010 e 2015, em que se acreditava que teria início uma nova era na Oceanografia brasileira. Em 2011, foram aprovados quatro Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia (INCTs) para o mar. Para amenizar o grave problema da falta de meios flutuantes, novas embarcações foram adquiridas: o Navio Hidroceanográfico (NHo) *Cruzeiro do Sul* e o Navio Polar (NPo) *Almirante Maximiano* pela Marinha do Brasil; o *Alpha-Crucis* e o *Alpha-Delphini* pela USP). Em 2015, foi recebido o Navio de Pesquisa Hidroceanográfico (NPqHo) *Vital de Oliveira*, embarcação moderna e equipada para pesquisas de ponta que lançaria o Brasil em um novo caminho na Oceanografia do Atlântico Sul. Adicionalmente, foi contratada a construção de quatro embarcações para equipar as universidades brasileiras e aprimorar a formação de profissionais nas Ciências do Mar, três das quais já foram entregues.

Nesse período, também foram feitos estudos para a criação de um Instituto Nacional para Pesquisas Oceanográficas³⁶, considerado importante para executar tarefas de logística,

³⁴ Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 28 abr. 2021.

³⁵ Disponível em: <<https://allatlanticocean.org>>. Acesso em: 28 abr. 2021.

³⁶ Em publicação feita no Diário Oficial da União de 1º de julho de 2022, o Ministro de Ciência, Tecnologia e Inovações, Marcos Cesar Pontes, anunciou o Instituto Nacional de Pesquisas Oceânicas (INPO) como o vencedor do

infraestrutura de apoio e coordenação da pesquisa oceânica e contribuiria para suprir uma grave lacuna para o desenvolvimento pleno da Oceanografia no País. A qualificação desse Instituto como Organização Social é uma das metas do Programa Ciência no Mar. A formação de recursos humanos também recebeu investimento considerável, permitindo que estudantes e jovens pesquisadores em Ciências do Mar usufruíssem de bolsas do Programa Ciência sem Fronteiras.

Entretanto, o momento de investimento foi curto e, atualmente, houve um retorno aos antigos patamares. O problema se agrava, pois grande parte do significativo investimento feito em infraestrutura, equipamentos e pessoal está se perdendo.

O Brasil precisa estar preparado para ser um expoente na nova era de diplomacia científica que está surgindo no mundo.

10. AS MUDANÇAS DO CLIMA, O OCEANO E A ZONA COSTEIRA NO BRASIL

O Brasil tem uma área de aproximadamente 8,5 milhões de km² com uma zona costeira que se estende por aproximadamente 9.200 km, 17 estados, 11 capitais e pelo menos 365 municípios. O país ainda conta com o direito à exploração de uma área oceânica com cerca de 5,7 milhões de km² denominada “Amazônia Azul”.

As zonas costeiras e os oceanos contribuem com 19% do PIB brasileiro e envolvem aproximadamente 19 milhões de pessoas com quase R\$ 500 bilhões em salários (CARVALHO, 2018). As zonas costeiras são fonte de alimento, lazer, turismo e biodiversidade; já o mar nos proporciona, além disso, petróleo, gás natural, transporte e uma vasta fonte de recursos naturais pouco conhecidos. Com tamanha importância socioeconômica e um litoral extenso, o Brasil é um polo para as Ciências do Mar no Atlântico Sul e no mundo, já que o País representa quase 50% da América do Sul.

A zona costeira é a interface entre a terra e a água, importante não apenas pela biodiversidade nela encontrada, mas porque a maior parte da população mundial habita essas zonas e concentra produtos e serviços ecossistêmicos de grande importância econômica, como portos, navegação, turismo, pesca, entre outros (IPCC, 2019d; Bindoff et al., 2019). A compreensão das interações dos oceanos e da terra é essencial para entender os perigos associados às zonas costeiras, tanto que o IBGE reconheceu recentemente a necessidade de tratamento dessa região separadamente, como um sistema de características e importância própria denominado de Sistema Costeiro-Marinho (IBGE, 2019).

O oceano e as regiões costeiras evoluíram em resposta às mudanças no clima e estão mudando continuamente devido à interação dinâmica entre o oceano e o continente (cf. figuras 8, 9 e 10). A energia que chega à costa proveniente do oceano (marés, correntes, ondas e ventos) se torna alta durante as tempestades, transformando as zonas costeiras em áreas de alta vulnerabilidade

Edital Chamamento Público para a seleção da entidade a ser qualificada como Organização Social responsável por apoiar, difundir e integrar a pesquisa oceanográfica brasileira, através da constituição do Instituto Nacional do Mar (INMAR). Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=m8ejngQDVhE>, acesso em 1º de julho de 2022. (Nota do revisor).

a desastres naturais, que vêm aumentando em frequência e intensidade nos anos recentes devido ao efeito das mudanças climáticas (IPCC, 2019d; Abram et al., 2019).

É evidente a relevância das zonas costeiras e dos oceanos para o Brasil, o que reforça a necessidade do País se preocupar com as mudanças do clima e estar preparado para ser um expoente na nova era de diplomacia científica que está crescendo no mundo.

As Nações Unidas e a comunidade científica internacional reconheceram a importância dos oceanos para a humanidade e o papel dos oceanos e da criosfera na regulação do clima. Assim, promoveram várias iniciativas importantes, como a Década da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável (ONU)³⁷ e o Plano de Ação Continuada (*Living Action Plan*) do *OceanObs'19*, com a participação de vários atores. O Brasil tem um papel importante nessas atividades tanto do ponto de vista regional quanto do internacional, no sentido de melhor compreender e buscar mitigar os impactos das mudanças do clima.

11. SUGESTÕES

Para finalizar, são sugeridas algumas ações com o propósito de promover o fortalecimento das atividades de pesquisa oceanográfica no Brasil voltada para as mudanças climáticas.

- **TORNAR** os oceanos e as zonas costeiras parte integral da política de mudanças do clima, de forma que as atividades relacionadas ao tema possam contribuir significativamente para os processos de adaptação e mitigação.
- **APOIAR** intensivamente os programas nacionais de pesquisa oceanográfica voltada para as mudanças do clima, bem como a participação de pesquisadores brasileiros em programas internacionais.
- **PROMOVER** a atualização e a qualificação de pesquisadores e grupos de pesquisa universitários nas Ciências do Mar e Meteorológicas integradas ao estudo das mudanças do clima.
- **INCREMENTAR** o apoio a projetos de pesquisa e à formação de recursos humanos em áreas relacionadas aos riscos ecossistêmicos das mudanças do clima.
- **CONCEDER** mais recursos financeiros e humanos aos programas de pesquisa em Ciências do Mar voltados para as mudanças do clima de maneira sustentável no médio e no longo prazo.
- **EFETIVAR** a criação de um Instituto Nacional para a Pesquisa Oceanográfica.
- **ASSUMIR** a liderança regional por meio da condução de projetos de pesquisa e programas de monitoramento oceanográfico de longo período no Atlântico Sul, investigando seu papel nas mudanças climáticas. O Brasil deve se tornar um ator importante em atividades como a Década da Ciência Oceânica e o *Living Action Plan – OceanObs'19*.
- **IMPLEMENTAR** um sistema integrado de observação sustentável dos oceanos e gestão de dados para o mar brasileiro.

³⁷ Disponível em: <<http://decada.ciencianomar.mcti.gov.br>>. Acesso em: 28 abr. 2021.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRAM, N. et al. Framing and Context of the Report. In: **IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate** (2019). [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, M. Tignor, V. Masson-Delmotte, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-1-framing-and-context-of-the-report/>>. Acesso em: 28 abr. 2021.
2. BIASTOCH, A.; BÖNING, C. W.; SCHWARZCOPF, F. U.; LUTJEHARMS, J. R. E. Increase in Agulhas leakage due to poleward shift of Southern Hemisphere westerlies. (2009). **Nature**, v. 462, p. 495-498.
3. BINDOFF, N.L. et al. (2019). Changing Ocean, Marine Ecosystems, and Dependent Communities. In: **IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate** [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-5/>>. Acesso em: 28 abr. 2021.
4. CARVALHO, A.B. Economia do Mar: conceito, valor e importância para o Brasil. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Economia do Desenvolvimento, PUC-RS, 2018. 185 p. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10923/11664>>. Acesso em: 28 abr. 2021.
5. CHENG, W.; CHIANG, J. C.; ZHANG, D. Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) in CMIP5 models: RCP and historical simulations. (2013). **Journal of Climate**, v. 26, n.18, 7187-7197. Disponível em: <<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00496.1>>. Acesso em: 28 abr. 2021.
6. COLLINS, M. et al. Chapter 6: Extremes, Abrupt Changes and Managing Risks. In: **IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**. (2019). [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. p. 589-655. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-6/>>. Acesso em: 28 abr. 2021.
7. DRIJFHOUT, S.S.; WEBER, S.L.; VAN DER SWALUW, E. The stability of the MOC as diagnosed from model projections for pre-industrial, present and future climates. (2011). **Climate Dynamics**, v. 37, 1575-1586. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00382-010-0930-z>>. Acesso em: 28 abr. 2021.
8. GHIL, M. Natural climate variability. In: MACCRACKEN, M. C.; PERRY J. S. (eds.). **Encyclopedia of Global Environmental Change**, v. 1. The Earth System: physical and chemical dimensions of global environmental change. Chichester-USA: Wiley & Sons Ltd., 2002. p.544-549.
9. GRIMM, A. M.; ZILLI M. T. Interannual variability and seasonal evolution of summer monsoon rainfall in South America. (2009). **Journal of Climate**, v. 22, n. 9, p. 2257-2275.
10. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Biomass e Sistema Costeiro-Marinho do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE – Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 2019. 168 p. (Série Relatórios Metodológicos – v. 45).

- Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101676.pdf>>. Acesso em: 28 abr. 2021.
11. INTERGOVERNMENTAL OCEANOGRAPHIC COMMISSION OF UNESCO (IOC/UNESCO). **Summary Report of the Thirtieth Session of the Assembly**. Paris, 2019.
 12. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change and Land**. (2019a). An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/srccl/>>. Acesso em: 28 abr. 2021.
 13. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2014: Synthesis Report**. (2014). Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team: R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). Geneva (Switzerland): IPCC. 151 p. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>>. Acesso em: 28 abr. 2021.
 14. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). First Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. HOUGHTON, J. T.; JENKINS, G. J.; EPHRAUMS, J. J. (Eds.). **Climate change: the IPCC Scientific Assessment**. Cambridge University Press, 1990. 410 p. Disponível em: <https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_first_assessment_1990_wg1.shtml>. Acesso em: 28 abr. 2021.
 15. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Global Warming of 1.5°C**. (2018a). An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/sr15/>>. Acesso em: 28 abr. 2021.
 16. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Glossary (Annex I). In: **Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**. (2019b). Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/12_SROCC_AnnexI_Glossary_FINAL.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2021.
 17. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**. (2019c). Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/srocc/>>. Acesso em: 28 abr. 2021.
 18. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Summary for Policymakers. In: **Global Warming of 1.5°C**. (2018b). An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/sr15/>>. Acesso em: 28 abr. 2021.
 19. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Summary for Policymakers. In: **Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**. (2019d). Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policymakers/>>. Acesso em: 28 abr. 2021.

20. LINDSTROM, E. et al. **A Framework for Ocean Observing**. By the Task Team for an Integrated Framework for Sustained Ocean Observing. UNESCO, 2012. IOC/INF-1284. Disponível em: <http://www.oceanobs09.net/foo/FOO_Report.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2021.
21. MEREDITH, M. et al. Polar Regions. In: **IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**. (2019). [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-3-2/>>. Acesso em: 28 abr. 2021.
22. OCEAN & CLIMATE PLATFORM. Disponível em: <<https://ocean-climate.org/en/home-2/>>. Acesso em: 22 jun. 2022.
23. OPPENHEIMER, M. et al. Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. In: **IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**. (2019). [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-4-sea-level-rise-and-implicationsfor-low-lying-islands-coasts-and-communities/>>. Acesso em: 28 abr. 2021.
24. ORR, J.C. et al. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first Century and its impact on calcifying organisms. **Nature**, v. 437, 2005. p. 681-686. Disponível em: <[doi:10.1038/nature04095](https://doi.org/10.1038/nature04095)>. Acesso em: 28 abr. 2021.
25. PEZZA, A.B.; SIMMONDS, I.; PEREIRA FILHO, A.J. Climate perspective on the large scale circulation associated with the transition of the first South Atlantic hurricane. **International Journal of Climatology**, v. 29, n. 8, 2009, p. 1116-1130. Disponível em: <[doi:10.1002/joc.1757](https://doi.org/10.1002/joc.1757)>. Acesso em: 28 abr. 2021.
26. PONTES, G.; GUPTA, A.; TASCETTO, A. Projected changes to South Atlantic boundary currents and confluence region in the CMIP5 models: the role of wind and deep ocean changes. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 9, 2016. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/1748-9326/11/i=9/a=094013>>. Acesso em: 28 abr. 2021.
27. RODRIGUES, R.R.; TASCETTO, A.S.; GUPTA, A.S.; FOLTZ, G.R. Common cause for severe droughts in South America and marine heatwaves in the South Atlantic. **Nature Geoscience**, v. 12, 2019. p. 620-626. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41561-019-0393-8>>. Acesso em: 28 abr. 2021.
28. SATO, O.; POLITO, P. Influence of salinity on the interannual heat storage trends in the Atlantic estimated from altimeters and the Pilot Research Moored Array in the Tropical Atlantic data. **Journal of Geophysical Research**, v.113, n. C2, 2008. Disponível em: <[doi:10.1029/2007JC004151](https://doi.org/10.1029/2007JC004151)>. Acesso em: 28 abr. 2021.
29. STRAMMA, L.; ENGLAND, M. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 104, n. C9, 1999. p. 20863-20883. Disponível em: <[doi:10.1029/1999JC900139](https://doi.org/10.1029/1999JC900139)>. Acesso em: 28 abr. 2021.
30. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION; GLOBAL ATMOSPHERE WATCH (WMO; GAW). **WMO Greenhouse Gas Bulletin**. The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2016. n. 13, 2017. Disponível em: <<https://public.wmo.int/en/resources/library/wmo-greenhouse-gas-bulletin>>. Acesso em: 28 abr. 2021.

31. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION; GLOBAL ATMOSPHERE WATCH (WMO; GAW). **WMO Greenhouse Gas Bulletin**. The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2017. n. 14, 2018. Disponível em: <<https://public.wmo.int/en/resources/library/wmo-greenhouse-gas-bulletin>>. Acesso em: 28 abr. 2021.