



Impactos climáticos em ecossistemas costeiros: vulnerabilidade, consequências e caminhos para a sustentabilidade

Reinaldo Dias¹

Como Citar:

DIAS; Reinaldo. Impactos climáticos em ecossistemas costeiros: vulnerabilidade, consequências e caminhos para a sustentabilidade. Revista Sociedade Científica, vol.7, n. 1, p.426-454, 2024. <https://doi.org/10.61411/rsc202420517>

DOI: [10.61411/rsc202420517](https://doi.org/10.61411/rsc202420517)

Área do conhecimento: Interdisciplinar

Palavras-chaves: Impactos ambientais. Ecossistemas costeiros. Mudanças climáticas.

Publicado: 26 de janeiro de 2024

Resumo

Os ecossistemas costeiros, com a sua rica biodiversidade e papéis socioeconômicos vitais, estão cada vez mais ameaçados pelas alterações climáticas. Esta revisão abrangente investiga os impactos multifacetados das alterações climáticas nesses habitats frágeis, examinando dimensões ecológicas e centradas nos seres humanos. As mudanças induzidas pelo clima, como o aumento do nível do mar e a acidificação dos oceanos, têm efeitos reverberantes que vão desde a degradação direta do habitat até ramificações socioeconômicas mais amplas. Observações significativas incluem a vulnerabilidade pronunciada de ecossistemas como manguezais, estuários e restingas entre outros, que simultaneamente oferecem serviços ecossistêmicos inestimáveis e desempenham papéis cruciais na mitigação do clima. Há necessidade de soluções adaptativas, interdisciplinares e globalmente colaborativas, considerando como insuficientes as abordagens reativas. Priorizar estratégias holísticas, integrativas e com visão de futuro é primordial. Destaque aos caminhos potenciais para a resiliência, enfatizando a importância da cooperação internacional e da harmonização de iniciativas científicas, políticas e comunitárias. Esta revisão visa não apenas elucidar os desafios atuais, mas também desencadear um impulso coletivo para salvaguardar os ecossistemas costeiros diante dos crescentes desafios climáticos.

Abstract

Coastal ecosystems, with their rich biodiversity and vital socio-economic roles, are increasingly threatened by climate change. This comprehensive review investigates the multifaceted impacts of climate change on these fragile habitats, examining ecological and human-centered dimensions. Climate-induced changes, such as sea level rise and ocean acidification, have reverberating effects ranging from direct habitat degradation to broader socioeconomic ramifications. Significant observations include the pronounced vulnerability of ecosystems such as mangroves, estuaries and sandbanks among others, which

¹CPDI do IBRACHINA/IBRAWORK - Parque Tecnológico da Unicamp - Campinas - Brasil ✉



simultaneously offer invaluable ecosystem services and play crucial roles in climate mitigation. There is a need for adaptive, interdisciplinary and globally collaborative solutions, considering reactive approaches as insufficient. Prioritizing holistic, integrative and forward-thinking strategies is paramount. Highlight potential pathways to resilience, emphasizing the importance of international cooperation and harmonization of scientific, political and community initiatives. This review aims not only to elucidate current challenges, but also to unleash a collective push to safeguard coastal ecosystems in the face of growing climate challenges.

Keywords: Environmental impacts. Coastal ecosystems. Climate change.

1. Introdução

1.1 A relevância dos ecossistemas costeiros

Os ecossistemas costeiros, caracterizados por sua interface entre ambientes terrestres e marinhos, estão entre os sistemas mais produtivos e biologicamente diversos do planeta. Esses sistemas abrangem uma variedade de habitats, incluindo manguezais, estuários, restingas, brejos e recifes de coral. Sua produtividade e biodiversidade contribuem significativamente para o ciclo global do carbono, particularmente no sequestro do carbono armazenado nos ecossistemas costeiros e marinhos [1].

Quarenta por cento da população mundial e sessenta por cento das grandes áreas urbanas estão dentro de 100 quilômetros das zonas costeiras, que são vitais para alimentos, água, energias renováveis, turismo, comércio, transporte e biodiversidade.

Esses ecossistemas protegem comunidades contra ameaças naturais, como tempestades, e desempenham um papel na redução da erosão e no sequestro de carbono. Contudo, mais de 600 milhões de pessoas vivem em áreas costeiras a menos de 10 metros acima do nível do mar, tornando-as e aos Pequenos Estados Insulares vulneráveis a impactos climáticos, como aumento do nível do mar, erosão e eventos extremos. Estes efeitos são agravados por degradação dos ecossistemas, uso insustentável de recursos e poluição. Estratégias de adaptação são urgentemente necessárias [2].



1.2 **Importância e vulnerabilidade dos ecossistemas costeiros às alterações climáticas**

Os ecossistemas costeiros, dada a sua localização na linha da frente da subida do nível do mar e do aumento das atividades de tempestades, são particularmente vulneráveis às alterações climáticas. Esses impactos são agravados por pressões antropogênicas, como desenvolvimento urbano, poluição e pesca predatória. As mudanças climáticas globais exacerbam esses desafios existentes, potencialmente empurrando muitos desses ecossistemas para pontos de inflexão, além dos quais a recuperação pode ser impossível [3]. Por exemplo, os recifes de coral, muitas vezes apelidados de "florestas tropicais do mar" devido à sua imensa biodiversidade, estão sendo branqueados a uma taxa sem precedentes devido ao aquecimento das águas e à acidificação dos oceanos [4].

Assim como as florestas terrestres, os bosques de macroalgas abrigam uma diversidade de espécies, muitas endêmicas, e atuam como refúgios e berçários para diversas criaturas, enfatizando sua importância conservacionista. Estas florestas subaquáticas fornecem valiosos serviços ecossistêmicos, incluindo proteção contra tempestades, segurança alimentar para comunidades litorâneas e atrativos turísticos.

Representam 30% das zonas costeiras globais. São vitais na captura e armazenamento de carbono, conhecido como carbono azul, uma função também exercida por manguezais, estuários e prados marinhos. Contudo, o potencial de sequestro de carbono das macroalgas é frequentemente subestimado. Infelizmente, cerca de 40% das florestas de macroalgas estão em declínio devido a fatores como aumento da temperatura da água e desequilíbrios na cadeia alimentar [5].

1.3 **Objetivo e estrutura do estudo**

Este estudo tem como objetivo revisar e sintetizar de forma abrangente a literatura mais recente sobre os impactos ambientais das mudanças climáticas nos



ecossistemas costeiros. Ele busca abordar não apenas as mudanças biofísicas que ocorrem nesses ecossistemas, mas também as implicações socioeconômicas mais amplas para as comunidades que dependem deles. Por meio dessa abordagem sistemática, se pretende identificar vulnerabilidades, mostrar resiliência e discutir potenciais estratégias transformadoras para o futuro. A estrutura deste artigo segue um método sequencial, começando com uma explicação detalhada da metodologia, seguida por um histórico sobre as mudanças climáticas e seus impactos particulares nas áreas costeiras, levando a seções detalhadas sobre biodiversidade, implicações socioeconômicas, serviços ecossistêmicos e estratégias de mitigação e adaptação. A conclusão discute os resultados obtidos no contexto mais amplo, oferecendo recomendações para políticas e direções de pesquisas futuras.

2. **Metodologia**

Nesta pesquisa, empregou-se uma abordagem metodológica dupla, englobando tanto a análise sistemática da literatura quanto o exame de dados já publicados. A análise sistemática, essencial para uma compreensão holística, focou-se em publicações anteriores relacionadas ao tema. Para isso, realizou-se uma busca minuciosa em bases de dados reconhecidas, como Web of Science, Scopus, Google Scholar, Academia.edu e ResearchGate, utilizando palavras-chave pertinentes como "mudança climática", "ecossistemas costeiros" e "acidificação dos oceanos" entre outras. Esta etapa se distinguiu pela sua rigorosidade, transparência e abrangência, permitindo uma avaliação detalhada e revelando potenciais lacunas e novas áreas de investigação.

Complementarmente, a pesquisa incluiu o exame de dados secundários, como estudos anteriores, relatórios e publicações acadêmicas. Esta abordagem, ao superar as limitações comuns na coleta de novos dados, como restrições de tempo e recursos, enriqueceu o estudo com uma variedade mais ampla de informações. A validade e eficácia desta técnica residem na conveniência de acessar dados pré-existentes, economizando tempo e recursos.



Para assegurar a integridade e precisão dos dados utilizados, estabeleceram-se critérios rigorosos de seleção. Priorizou-se artigos avaliados por especialistas, documentos oficiais e publicações de fontes reconhecidas. A atualidade dos dados também foi um fator importante, focando-se em publicações mais recentes para garantir a relevância das descobertas. Além disso, cada documento foi cuidadosamente avaliado quanto à sua robustez metodológica e alinhamento com os objetivos da pesquisa.

Especificamente, os critérios de inclusão envolveram artigos revisados por pares publicados entre 2000 e 2021, que abordassem os impactos das mudanças climáticas nos ecossistemas costeiros, incluindo aspectos biofísicos e socioeconômicos. Foram considerados também estudos sobre estratégias de adaptação, mitigação e resiliência.

Em contrapartida, excluíram-se artigos não publicados em inglês, sem evidência empírica (como opiniões ou comentários) e aqueles focados exclusivamente em ecossistemas marinhos sem uma conexão clara com zonas costeiras.

3. Antecedentes das alterações climáticas e dos ecossistemas costeiros

3.1 Panorama das mudanças climáticas e seus efeitos globais

As mudanças climáticas, impulsionadas principalmente por atividades antropogênicas, como desmatamento, processos industriais e queima de combustíveis fósseis, estão levando a um aumento sem precedentes nas temperaturas médias globais.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) documentou extensivamente essas mudanças, observando impactos significativos em vários sistemas terrestres, desde o derretimento do gelo polar até mudanças nos padrões climáticos e eventos climáticos extremos mais frequentes [6]. Com a trajetória atual, as temperaturas globais podem aumentar de 2 a 3°C até o final do século, inaugurando uma série de impactos ecológicos e socioeconômicos em cascata.



Em março de 2023, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) apresentou o Relatório Síntese do Sexto Relatório de Avaliação na Suíça. Ele ressalta que a emissão contínua de gases de efeito estufa, devido a práticas insustentáveis, estilos de vida e padrões de consumo, intensifica o aquecimento global.

O relatório alerta que as atuais ações contra as mudanças climáticas são inadequadas. Se não forem alterados os padrões de emissão, a temperatura global subirá mais de 2°C acima dos níveis pré-industriais, levando a eventos climáticos extremos, escassez de água e insegurança alimentar. As consequências são particularmente devastadoras para as comunidades vulneráveis em regiões como África, Ásia, América Central e do Sul, Pequenas Ilhas e Ártico, impactando principalmente povos indígenas, pequenos agricultores e pescadores [7].

3.2 Alterações específicas observadas nas zonas costeiras

As zonas costeiras são especialmente vulneráveis a dois grandes fenômenos provocados pelas alterações climáticas: a subida do nível do mar e a acidificação dos oceanos. O aumento do nível do mar, devido ao derretimento das calotas polares e à expansão da água do mar à medida que aquece, ameaça inundar habitats costeiros e assentamentos humanos [8]. Ao mesmo tempo, o aumento dos níveis de CO₂ atmosférico está levando à acidificação dos oceanos, já que os oceanos absorvem aproximadamente 30% do dióxido de carbono emitido. Isso resulta em níveis de pH reduzidos, que afetam negativamente os organismos marinhos, especialmente aqueles que dependem de carbonato de cálcio para suas estruturas esqueléticas, como corais e crustáceos [9].

Cientistas alertam que, devido ao derretimento do gelo e à expansão da água quente, o nível do mar pode subir até 1,20 metros até o fim do século se as emissões não forem reduzidas. Tal elevação teria um impacto profundo em áreas baixas, afetando nações insulares e metrópoles como Nova Iorque e Mumbai. Mesmo pequenos aumentos no nível do mar podem resultar em custos significativos, danos à



infraestrutura e perturbações. Até 2050, nos EUA, espera-se que haja danos frequentes a estruturas como estradas e estações de tratamento. Praias icônicas correm o risco de desaparecer e ecossistemas costeiros são ameaçados pela água salgada, que pode também contaminar os aquíferos de água doce essenciais para a agricultura e consumo.

Países como Bangladesh, onde grande parte do território é vulnerável, já enfrentam consequências diretas dessa mudança [10].

3.3 **Previsões para as futuras alterações nos climas costeiros**

Prever futuros impactos climáticos é complexo, mas modelos sugerem que os ecossistemas costeiros enfrentarão estressores intensificados nas próximas décadas.

Além do aumento contínuo do nível do mar e do aumento da acidificação dos oceanos, essas regiões devem experimentar surtos de tempestade elevados, mudanças nos padrões de precipitação levando a entradas de água doce alteradas e aumento das temperaturas influenciando a distribuição das espécies e as funções do ecossistema [11].

O efeito cumulativo dessas mudanças apresenta profundos desafios para a conservação e gestão dos ambientes costeiros e das comunidades que deles dependem.

4. **Impactos na Biodiversidade Costeira e no Habitat**

4.1 **Efeitos sobre as espécies marinhas**

As alterações climáticas estão tendo impactos profundos nas espécies marinhas.

Mudanças na temperatura, na química dos oceanos e no nível do mar levaram a mudanças na distribuição das espécies à medida que os organismos se movem para o polo ou para águas mais profundas em busca de temperaturas mais baixas [12]. Muitas espécies estão experimentando mudanças na abundância devido a padrões de reprodução alterados e perda de habitat. Além disso, mudanças comportamentais têm sido observadas, com algumas espécies alterando seus hábitos alimentares, de acasalamento e migração em resposta a mudanças ambientais [13].



O aquecimento global, resultante do derretimento das geleiras e elevação dos níveis de dióxido de carbono, tem efeitos devastadores no meio ambiente, em especial nos ecossistemas marinhos. Essas mudanças climáticas afetam o ambiente marinho, levando a mudanças significativas no habitat e comportamento das espécies marinhas.

Em resposta ao aumento da temperatura oceânica, diversas espécies se deslocam buscando condições mais adequadas, gerando uma redistribuição. Além disso, mudanças bruscas na temperatura causam estresse térmico nos organismos, afetando seu crescimento, comportamento, imunidade e capacidade reprodutiva. As espécies ficam também mais vulneráveis a doenças devido ao estresse e mudança na virulência das doenças. O fitoplâncton, sensível às variações de CO₂, experimenta mudanças em sua estrutura ecológica, impactando a cadeia alimentar marinha. Adicionalmente, os ambientes marinhos costeiros enfrentam estressores antropogênicos como sedimentação, eutrofização e poluição, interagindo com as mudanças climáticas e afetando aspectos vitais das espécies marinhas, como reprodução e sobrevivência [14].

4.2 **Perda de habitats**

Os habitats costeiros críticos estão enfrentando ameaças terríveis devido às mudanças climáticas:

1. **Manguezais:** Essas árvores únicas tolerantes ao sal atuam como amortecedores contra tempestades e desempenham um papel vital no sequestro de carbono. No entanto, eles estão diminuindo rapidamente devido a uma combinação de aumento do nível do mar, aumento das temperaturas e atividades relacionadas ao homem, como a carcinicultura [15].

Os manguezais são essenciais para o sequestro de carbono, com zonas úmidas entre marés atuando como compensação significativa para as emissões de CO₂.



Contudo, muitos países, incluindo o Brasil - que possui a segunda maior extensão de manguezais globalmente - ainda não contam com inventários adequados para inseri-los em mercados de crédito de carbono. Os manguezais no Brasil são responsáveis por 8,5% do carbono global armazenado em manguezais, contendo até 4,3 vezes mais carbono no solo do que outros biomas. Seu sequestro de carbono supera as estimativas globais, representando 13,5% do carbono anualmente enterrado nos manguezais mundiais. Notavelmente, são centros globais de "carbono azul", o carbono armazenado em ecossistemas marinhos e costeiros. Eles armazenam significativamente mais carbono por hectare do que outros ecossistemas, incluindo a Amazônia. Globalmente, os manguezais podem absorver cerca de 1 bilhão de toneladas de carbono anualmente, correspondendo a 10% das emissões humanas globais [16].

2. **Estuários:** Como zonas de transição entre os ambientes fluviais e marinhos, os estuários servem como locais de reprodução e alimentação ricos em nutrientes para numerosas espécies aquáticas. Esses habitats, particularmente prevalentes no Brasil, são suscetíveis a alterações no influxo de água doce, elevação do nível do mar e aumento da sedimentação devido ao desmatamento e escoamento agrícola. Sua biodiversidade e funcionalidade são, conseqüentemente, ameaçadas tanto por intervenções humanas diretas quanto por implicações nas mudanças climáticas [17].

A avaliação dos efeitos das alterações climáticas em zonas de transição entre o oceano e a terra, como estuários, é uma lacuna significativa. Estes sistemas são centrais para atividades humanas, com 22 das 32 maiores cidades do mundo situadas em estuários e cerca de 60% da população global vivendo ao longo das costas. Os estuários também são ecossistemas ricos em biodiversidade. O aquecimento oceânico, elevação



do nível do mar e outros efeitos climáticos estão levando a uma maior salinização e hipóxia nos estuários. Estas mudanças afetam a distribuição de espécies marinhas e a disponibilidade de habitats. A hipóxia é agravada pelo aumento de nutrientes nos estuários desde os anos 1970, muitos deles derivados de atividades humanas. A elevação do nível do mar também altera as marés estuarinas, resultando em inundações mais frequentes e expansão da salinização, que ameaçam áreas agrícolas. Desde os anos 1980, a proliferação de algas nocivas tem se intensificado em estuários. Globalmente, estuários em locais como Austrália e Reino Unido têm experimentado rápidas mudanças climáticas. Contudo, há uma carência de informações detalhadas sobre o impacto climático nos estuários em diferentes contextos geográficos [18].

3. Recifes de Coral: Experimentando eventos de branqueamento em grande escala, impulsionados principalmente pelo aumento da temperatura do mar e exacerbados pela acidificação dos oceanos, a complexidade estrutural e a biodiversidade desses ecossistemas estão em risco significativo [19].

Até 2035, metade dos recifes de corais do mundo enfrentará ameaças significativas devido às mudanças climáticas. Estas ameaças podem resultar na morte dos corais, afetando a biodiversidade marinha e perturbando a cadeia alimentar. Pesquisas recentes indicam que os efeitos negativos nas mudanças climáticas nos corais são mais graves do que se pensava anteriormente, graças a uma combinação de estressores induzidos pelo clima. Vários estressores, como aumento da temperatura do mar e acidificação oceânica, estão atuando simultaneamente em diferentes regiões.

Quando considerado um único estressor, como a temperatura, os recifes parecem ser impactados mais lentamente, deslocando os efeitos mais severos para 2050. Porém, até 2055, quase todos os recifes, 99% deles, enfrentarão condições desfavoráveis devido a, pelo menos, um estressor. Até 2100, 93% dos recifes estarão sob ameaça de múltiplos



fatores. Além das alterações climáticas, os impactos humanos adicionais intensificam os riscos para esses ecossistemas [20].

4.3 Migração e adaptação das espécies em resposta à mudança das condições

Em resposta às alterações dos ambientes, muitas espécies marinhas estão migrando para encontrar condições ideais. Enquanto algumas espécies estão se adaptando com sucesso, outras, especialmente aquelas com preferências estreitas de habitat, estão enfrentando dificuldades [21]. Áreas antes muito frias para certas espécies estão agora se tornando adequadas, levando à introdução de novos predadores, competidores e doenças nessas regiões. Essas mudanças têm impactos em cascata, interrompendo as interações ecológicas existentes e potencialmente levando à extinção local de espécies menos adaptáveis [22].

5. Impactos Socioeconômicos

5.1 Impacto nas comunidades costeiras que dependem dos ecossistemas para subsistência

As comunidades costeiras estão intrinsecamente ligadas à saúde de seus ecossistemas circundantes. À medida que as espécies marinhas enfrentam mudanças de distribuição e declínios populacionais devido a estressores induzidos pelo clima, a pesca está experimentando taxas de captura reduzidas, ameaçando a principal fonte de renda para milhões de pessoas em todo o mundo [23]. Muitas comunidades pesqueiras tradicionais também estão testemunhando a perda de espécies que têm importância cultural e de subsistência. Essa faca de dois gumes de perda econômica e cultural está colocando imensa pressão sobre essas comunidades, empurrando-as para meios de subsistência alternativos, muitas vezes menos sustentáveis [24].



Os ecossistemas oceânicos e costeiros, abrangendo dois terços da Terra, são vitais para a biodiversidade, o clima e o bem-estar humano, fornecendo alimentos, energia e empregos. Novos estudos e conhecimentos tradicionais têm reforçado evidências dos impactos das mudanças climáticas nestes ecossistemas e nas comunidades humanas. Alterações climáticas provocadas pelo homem estão submetendo estes ecossistemas a condições inéditas, afetando a distribuição e abundância de organismos, desde micróbios a mamíferos. A migração de espécies marinhas tem sido influenciada pelo aquecimento global, causando deslocamentos em direção aos polos. Este aquecimento, juntamente com a acidificação e desoxigenação, está comprometendo habitats, populações e cadeias alimentares [25].

Ecossistemas marinhos têm enfrentado ondas de calor extremas, resultando em perda de biodiversidade e impactos na pesca e aquicultura. Estas alterações climáticas estão afetando economias, culturas e atividades recreativas globalmente. Deslocamentos de peixes devido ao clima estão influenciando práticas de pesca, enquanto doenças marinhas ameaçam a saúde humana. O aumento de toxinas e salinização, exacerbados por fatores climáticos e não climáticos, também comprometem a saúde e expõem zonas costeiras a inundações e riscos diversos [25].

5.2 **Efeitos no turismo e nas economias associadas**

O turismo é uma indústria importante para numerosas regiões costeiras, oferecendo emprego e sustentando as economias locais. Recifes de corais, praias e espécies marinhas únicas estão entre as principais atrações. No entanto, a degradação desses ecossistemas, juntamente com o aumento da frequência de eventos climáticos extremos, está resultando em um declínio nas chegadas de turistas. Só a perda de recifes de coral, devido ao branqueamento e à acidificação dos oceanos, ameaça o setor do turismo no valor de bilhões de dólares anualmente [26]. Consequentemente, muitas empresas e serviços ligados ao turismo enfrentam dificuldades econômicas.



Os recifes de coral são frequentemente estudados devido à sua relevância turística e sensibilidade às mudanças climáticas. Eles sofrem branqueamento com o aumento da temperatura oceânica e estão ameaçados pela acidificação dos oceanos. A frequência crescente de eventos extremos, como ciclones e furacões, impede sua completa recuperação, podendo levar à invasão de algas e redução do turismo. Importante destacar que os corais protegem as praias da erosão. Um estudo mostrou que recifes saudáveis podem diminuir a altura das ondas em até 0,44 m, protegendo costas e infraestruturas. Estas alterações nos recifes afetam o turismo, com consequências econômicas significativas. Em lugares como Santa Lúcia e Tobago, o turismo de recifes compõe 21% e 40% do PIB, respectivamente. A perda de biodiversidade em recifes pode reduzir o retorno dos turistas. Um estudo previu que, até 2100, a degradação dos corais poderia custar até 0,18% do PIB global devido à acidificação [27]. Além dos corais, outros habitats marinhos enfrentam riscos. Para algumas espécies, os impactos podem variar: enquanto tempestades mais intensas prejudicam praias de desova de tartarugas, temperaturas mais quentes podem beneficiá-las ao aumentar a disponibilidade de alimento.

5.3 Custos de adaptação e mitigação nas regiões costeiras

A adaptação e a mitigação dos impactos das alterações climáticas têm custos significativos. A construção de infraestruturas como paredões, a restauração de ecossistemas como manguezais e o redesenho de áreas costeiras urbanas para o aumento antecipado do nível do mar são projetos de capital intensivo. Muitos países em desenvolvimento com costas vulneráveis lutam para garantir as finanças necessárias. Sem apoio ou investimento internacional, é provável que o déficit de adaptação nessas regiões cresça, levando a maiores riscos diante dos extremos climáticos [28].

Os portos, essenciais para o crescimento econômico, juntamente com outras infraestruturas costeiras como estradas e aeroportos, enfrentarão desafios como



inundações marítimas devido ao aumento do nível do mar, danos estruturais por chuvas intensas e impactos da elevação das temperaturas. Pequenos Estados insulares serão particularmente afetados. Apesar das novas oportunidades de rotas marítimas no Ártico devido ao aquecimento global, desafios como erosão costeira e degelo do permafrost (solo que passa todo ano congelado) persistem. Ventos e ondas extremas também apresentam ameaças como erosão e falhas de infraestrutura. Os países estão desenvolvendo políticas para facilitar a adaptação. As autoridades fornecem diretrizes para promover infraestruturas resilientes. Contudo, muitas ações se concentram mais na mitigação do clima do que na preparação para seus impactos. Alguns locais já estão tomando medidas para sua resiliência climática, focando frequentemente em soluções físicas, enquanto medidas de adaptação "suaves", como gestão de emergência e mudanças operacionais, ainda são subutilizadas. Os custos de adaptação e mitigação em regiões costeiras são incontestáveis, considerando as implicações potenciais das alterações climáticas nas infraestruturas vitais. Ações proativas e integradas podem ajudar a preservar esses ativos críticos e garantir a continuidade das cadeias de abastecimento globais [29].

6. **Serviços ecossistêmicos e mudanças funcionais**

6.1 **Mudanças em serviços ecossistêmicos**

Os ecossistemas, particularmente os costeiros, fornecem uma miríade de serviços que são inestimáveis para a sobrevivência e o bem-estar humanos. Os ecossistemas costeiros desempenham um papel significativo no sequestro de carbono, sendo os ecossistemas como manguezais, e marismas, sumidouros de carbono particularmente eficazes [30]. No entanto, a degradação desses ecossistemas leva à redução da capacidade de armazenamento de carbono, exacerbando os níveis de CO₂ atmosférico.

Além disso, manguezais e recifes saudáveis atuam como amortecedores naturais, reduzindo o impacto de tempestades e tsunamis [31]. À medida que esses ecossistemas



diminuem, as comunidades costeiras ficam mais expostas ao impacto desses eventos naturais. O serviço de purificação da água prestado por áreas úmidas e estuários também é comprometido com o aumento das temperaturas e dos níveis de salinidade, afetando tanto o equilíbrio ecológico quanto a saúde humana [32].

Os manguezais são ecossistemas altamente produtivos, cruciais para economias de países em desenvolvimento. Eles oferecem alimentos, matérias-primas, recursos medicinais, promovem a biodiversidade e ciclagem de nutrientes. Sua estrutura ajuda na regulação hídrica, prevenção da erosão e intrusão marinha. Notavelmente, os manguezais agem como barreiras naturais, protegendo áreas costeiras de inundações e erosões através da dissipação de ondas e da retenção de sedimentos. Esta proteção é essencial para propriedades, atividades econômicas e vidas nas zonas litorâneas.

No entanto, apesar de seus vastos benefícios, os manguezais enfrentam ameaças. Cerca de 25% já foram perdidos devido a ações humanas como urbanização, poluição e alteração geomorfológica. Mudanças climáticas também são prejudiciais, pois afetam o suprimento de sedimentos e padrões de maré, fundamentais para a saúde dos manguezais. A elevação do nível do mar aumenta a vulnerabilidade das áreas costeiras, causando intrusão salina e erosão. A degradação desses ecossistemas resulta em perda de biodiversidade e serviços ecossistêmicos, afetando diretamente o bem-estar humano e gerando perdas financeiras [33].

6.2 Impacto nas cadeias alimentares e interações tróficas

Mudanças induzidas pelo clima na distribuição e abundância das espécies têm impactos em cascata na estrutura e no funcionamento das cadeias alimentares marinhas.

Abundâncias alteradas de espécies fundacionais ou predadores de topo de cadeia podem levar a cascatas tróficas, afetando espécies em todos os níveis da cadeia alimentar [34]. Por exemplo, a perda de herbívoros-chave em sistemas de recifes de coral pode resultar em predomínio de algas, afetando a saúde e a resiliência dos recifes



[35]. A ruptura das cadeias alimentares pode levar a consequências imprevistas, tais como ciclos de rápido crescimento e declínio súbito de certas espécies, afetando a estabilidade dos ecossistemas marinhos.

Os ecossistemas marinhos enfrentam crescentes desafios antropogênicos, com estressores erodindo a biodiversidade e alterando a dinâmica da cadeia alimentar. A superexploração tem desequilibrado muitos desses sistemas, mas o aquecimento global deve intensificar tais impactos. A elevação das temperaturas e a acidificação dos oceanos comprometem o fluxo de energia, desde os produtores primários, como algas, até os predadores de topo, afetando a produção de alimentos e a sustentabilidade ecológica. Ecossistemas marinhos saudáveis são vitais para a subsistência humana. As alterações climáticas, juntamente com outros fatores, como a degradação de habitats e a sobreexploração, podem desencadear colapsos nas cadeias alimentares, alterando a conexão entre espécies e resultando em perdas de biodiversidade. Interferências podem alterar ou concentrar fluxos de energia, reduzindo a resiliência do sistema e potencialmente levando ao seu colapso. Espécies marinhas já estão experienciando mudanças em sua fisiologia, comportamento e distribuição devido ao aquecimento e acidificação. A elevação da temperatura impacta o crescimento dos peixes, enquanto a acidificação afeta processos biológicos essenciais [36].

6.3 Mudança na ciclagem de nutrientes e produtividade primária

Alterações na temperatura, acidez e salinidade da água podem influenciar significativamente a ciclagem de nutrientes em águas costeiras. Mudanças no tempo e na intensidade dos eventos de ressurgência, impulsionadas por padrões alterados de vento e correntes oceânicas, podem afetar a disponibilidade de nutrientes, influenciando as taxas de produtividade primária [37]. Além disso, o aumento da temperatura dos oceanos pode levar à estratificação, onde água mais quente e menos densa permanece na



superfície, impedindo a mistura vertical de nutrientes. Essa estratificação pode resultar em áreas localizadas de diminuição da produtividade, o que tem efeitos em cascata na cadeia alimentar [38].

7. **Estratégias de Adaptação e Mitigação**

7.1 **Soluções de infraestrutura rígida**

À medida que as mudanças climáticas continuam a ameaçar as áreas costeiras, muitas nações estão se voltando para soluções de engenharia rígida para enfrentar esses desafios. Os paredões, por exemplo, são construídos paralelos à costa e servem para proteger o interior de tempestades e erosão. Eles podem ser eficazes no curto prazo, mas também podem levar ao aumento da erosão à deriva descendente e alterar a dinâmica dos sedimentos [39]. Estruturas hidráulicas rígidas, construídas perpendicularmente à linha de costa, aprisionam sedimentos e ajudam a manter a largura da praia. No entanto, assim como os paredões, eles podem inadvertidamente exacerbar a erosão em outras áreas, destacando a importância de projetos holísticos e específicos do local [40].

7.2 **Estratégias baseadas na natureza (Estratégias flexíveis)**

Reconhecendo as desvantagens das defesas rígidas, há um interesse crescente em soluções mais sustentáveis e baseadas no ecossistema. A restauração de manguezais, por exemplo, oferece tanto mitigação climática, por meio do sequestro de carbono, quanto benefícios de adaptação, reduzindo a energia das ondas e prevenindo a erosão da linha de costa [41]. Da mesma forma, a adição artificial de sedimentos a uma praia, pode proteger contra a erosão, mantendo a estética natural e o valor recreativo da praia. Essa estratégia, no entanto, requer manutenção contínua e uma fonte confiável de sedimentos [42].

Com o crescente entendimento de que ecossistemas e biodiversidade são essenciais para combater desafios globais, o conceito de soluções baseadas na natureza



ganhou proeminência na política internacional. Essas soluções promovem a proteção e gestão sustentável de ecossistemas, atendendo desafios socioeconômicos e ambientais, ao mesmo tempo em que potencializam bem-estar humano e resiliência. A conservação de habitats costeiros, como manguezais e recifes de coral, oferece proteção contra riscos, com manguezais, por exemplo, entregando benefícios contra inundações superiores a \$US 65 bilhões anualmente, protegendo mais de 15 milhões de pessoas.

Embora a terminologia seja recente, a ideia de salvaguardar a biodiversidade e serviços ecossistêmicos tem raízes em práticas locais e indígenas, complementando outras estratégias de resiliência climática [43].

7.4 Estratégias de adaptação integradas (infraestruturas rígidas e baseadas na natureza)

Abordagens combinadas de adaptação climática, que unem tecnologia e soluções baseadas na natureza, oferecem potencial robusto, abrangente e econômico. Em zonas costeiras e oceânicas, estas soluções variam desde sistemas de alerta precoce até combinações de restauração de vegetação costeira com paredes artificiais.

Historicamente, os investimentos em adaptação climática focavam em infraestrutura como diques. Embora forneçam proteção, podem ser caros e apresentar impactos negativos. Em contraste, as abordagens integradas, que incluem sistemas naturais, tendem a ser mais econômicas e abordam de forma mais eficaz os riscos climáticos para uma resiliência de longa duração. Existem diversas estratégias de adaptação tecnológica e ecossistêmica pelo mundo, mas a necessidade é integrá-las e dimensioná-las para os desafios específicos das áreas costeiras. Abordagens híbridas, como as infraestruturas verde-cinzentas, fundem elementos "verdes", como ecossistemas naturais, com infraestruturas "cinzentas". Exemplos incluem a combinação de áreas úmidas restauradas com diques, aproveitando a capacidade natural de mitigação e benefícios estruturais. Essas abordagens não só prolongam a vida útil da



infraestrutura convencional, mas também oferecem co-benefícios, como melhor qualidade da água e sequestro de carbono [2].

7.3 **Adaptações comunitárias e cogestão**

O envolvimento das comunidades locais em estratégias de adaptação e mitigação surgiu como uma abordagem eficaz. Comunidades que dependem fortemente de seu ambiente costeiro geralmente têm conhecimento local que pode fornecer insights sobre práticas adaptativas aprimoradas ao longo de gerações [44]. A cogestão, em que as decisões de gestão de recursos são compartilhadas entre a comunidade e outras partes interessadas, garante resultados mais equitativos e específicos do contexto. A integração do conhecimento local com a pesquisa científica pode fomentar soluções inovadoras e aumentar a resiliência tanto dos ecossistemas quanto das comunidades que deles dependem [45].

As comunidades locais, especialmente as costeiras onde reside 10% da população mundial, sofrem os impactos mais diretos das alterações climáticas, como desastres naturais e aumento da pobreza. Mesmo possuindo conhecimentos tradicionais, estas comunidades precisam de novas estratégias e políticas para se adaptar e proteger seus meios de subsistência. Embora a adaptação climática tenha sido amplamente discutida, é crucial focar na adaptação comunitária e integrar essas abordagens às políticas públicas. As intervenções internacionais são vitais, mas também é essencial que as comunidades estejam bem informadas sobre os impactos e estratégias de adaptação. As comunidades rurais, que dependem da agricultura, necessitam de atenção especial para compreender as interconexões entre pobreza, sustentabilidade e ambiente.

A longo prazo, somente a inclusão destas iniciativas comunitárias nas políticas governamentais garantirá a continuidade dos esforços. A base para meios de subsistência sustentáveis e desenvolvimento sustentável é um governo responsivo. A



colaboração entre governos locais, estaduais, nacionais e comunidades é vital para enfrentar os desafios climáticos [46].

8. **Discussão**

8.1 **Síntese dos principais resultados**

A revisão abrangente dos impactos das mudanças climáticas nos ecossistemas costeiros destaca a natureza multifacetada desses efeitos. De impactos diretos na biodiversidade marinha e habitat a ramificações socioeconômicas mais amplas e serviços ecossistêmicos alterados, os efeitos em cascata das mudanças induzidas pelo clima são palpáveis e interconectadas. Particularmente significativo é a vulnerabilidade de ecossistemas como manguezais, que não apenas fornecem serviços ecossistêmicos inestimáveis, mas também servem como mitigadores climáticos por meio do sequestro de carbono. No entanto, estão entre os mais ameaçados pelas mudanças climáticas e pelas intervenções humanas [47].

8.2 **Comparação com a literatura e estudos anteriores**

Os resultados obtidos estão alinhados com estudos anteriores que observaram declínios significativos nos habitats costeiros e na biodiversidade associada [3]. No entanto, o foco nas dimensões ecológica e socioeconômica oferece uma visão mais holística. Há uma notável lacuna na literatura que aborda a intersecção desses dois aspectos, com muitos estudos priorizando um em detrimento do outro. Essa abordagem abrangente elucida a interconectividade dos ecossistemas e das sociedades humanas e ressalta a necessidade de soluções que reconheçam essa interconexão [48].



8.3 **Potenciais áreas de discordância e lacunas na investigação existente**

Embora a comunidade científica mais ampla concorde com os impactos das mudanças climáticas nos sistemas costeiros, a eficácia de várias estratégias de mitigação e adaptação permanece uma questão controversa. Por exemplo, enquanto infraestruturas rígidas oferecem proteção imediata, seus impactos de longo prazo na dinâmica dos sedimentos e na saúde do ecossistema são questionáveis [49]. Além disso, a revisão identificou uma escassez de estudos aprofundados de longo prazo sobre estratégias adaptativas lideradas pela comunidade. Pesquisas mais extensas sobre o conhecimento local e sua integração com insights científicos modernos podem ser fundamentais para moldar futuras estratégias adaptativas [50].

9. **Implicações e recomendações futuras**

9.1 **Recomendações para os tomadores de decisão políticos e gestores costeiros**

Tendo em conta os impactos expansivos e interligados das alterações climáticas nos ecossistemas costeiros, é indispensável uma abordagem de gestão adaptativa e multifacetada. Para os tomadores de decisão políticos:

- I. **Priorizar a gestão baseada em ecossistemas (ebm - ecosystem-based management):** A gestão baseada em ecossistemas, que considera todo o ecossistema, incluindo os seres humanos, é mais eficaz do que focar em espécies ou habitats individuais. A integração dessa abordagem pode abordar impactos ecológicos e socioeconômicos [51].
- II. **Promover a colaboração interdisciplinar:** Reconhecer que os desafios costeiros envolvem diversas disciplinas, promover a colaboração



entre ecologistas, economistas e cientistas sociais pode levar a soluções abrangentes [52].

III. Legislar medidas de proteção para ecossistemas sensíveis: Com seu duplo papel na mitigação e adaptação climática, salvaguardas legais para manguezais, e pântanos de maré são imperativas [53].

9.2 Sugestões para novas pesquisas e coleta de dados

Existem necessidades prementes de investigação que podem melhorar a compreensão e gestão das zonas costeiras:

- 1. Estudos longitudinais sobre estratégias de mitigação suave:** Embora haja evidências da eficácia de soluções suaves como a restauração de manguezais, estudos de longo prazo fornecerão insights mais profundos sobre sua durabilidade e impactos secundários [54].
- 2. Valoração Econômica dos Serviços Ecossistêmicos:** Avaliações econômicas mais rigorosas podem ressaltar o valor tangível dos serviços ecossistêmicos, reforçando ainda mais a defesa de sua preservação [55].
- 3. Sistemas de Conhecimento local:** Um mergulho mais profundo no conhecimento indígena e local pode produzir insights sobre práticas de manejo sustentável aperfeiçoadas ao longo de gerações [56].

9.3 Importância da colaboração internacional e da gestão holística



As mudanças climáticas são um desafio global e seus impactos nos ecossistemas costeiros transcendem as fronteiras nacionais. As colaborações internacionais podem:

- 1 **Facilitar a transferência de conhecimento:** o compartilhamento de estratégias e resultados pode agilizar a identificação das melhores práticas [57].
- 2 **Fortalecer o Compromisso Global:** Esforços conjuntos podem galvanizar uma ação global mais ampla, especialmente em ecossistemas transfronteiriços [58].
- 3 **Adotar abordagens holísticas:** Dada a natureza interligada dos desafios ecossistêmicos, soluções que considerem simultaneamente as dimensões ecológica, econômica e social são primordiais [59].

10. Conclusão

Como a revisão ilustrou, os ecossistemas costeiros estão em uma conjuntura crucial, atingidos pelos impactos de longo alcance das mudanças climáticas. Esses ecossistemas, inerentemente dinâmicos e intrinsecamente valiosos, não apenas sustentam uma biodiversidade, mas também acolhem uma infinidade de atividades humanas, da pesca ao turismo. A degradação de habitats costeiros, como manguezais e recifes de coral, não apenas significa uma perda de biodiversidade, mas também apresenta profundas implicações para os milhões que dependem deles.

As vulnerabilidades elucidadas neste estudo, sejam elas ecológicas, socioeconômicas ou entrelaçadas, ressaltam um chamado urgente à ação. É evidente que as medidas reativas são insuficientes; estratégias proativas, holísticas e integrativas são imperativas para a saúde desses sistemas costeiros e das sociedades humanas que eles



suportam. A chave para esses esforços é a mistura de ciência, política e engajamento da comunidade. Embora os desafios sejam significativos, há caminhos para a resiliência e a sustentabilidade.

Para enfrentar esses desafios, a colaboração internacional surge como uma importante ferramenta. As mudanças climáticas e seus efeitos em cascata não reconhecem fronteiras políticas. Portanto, as soluções também devem ser globais, transcendendo fronteiras e disciplinas. Há expectativa de que este estudo contribua para um renovado compromisso, colaboração e inovação na preservação e restauração dos ecossistemas costeiros. À medida que há avanço nesta época do Antropoceno, é importante lembrar de que os destinos de muitas pessoas estão profundamente entrelaçados com a saúde desses ecossistemas costeiros.

Em suma, se as ameaças são multifacetadas e profundas, também o são as oportunidades de resiliência, adaptação e transformação. Ao aproveitar o conhecimento coletivo, priorizar a saúde dos ecossistemas e promover a cooperação internacional, é possível traçar um caminho para um futuro mais sustentável e resiliente para os ecossistemas costeiros e as comunidades que deles dependem.

11. Declaração de direitos

O(s)/A(s) autor(s)/autora(s) declara(m) ser detentores dos direitos autorais da presente obra, que o artigo não foi publicado anteriormente e que não está sendo considerado por outra(o) Revista/Journal. Declara(m) que as imagens e textos publicados são de responsabilidade do(s) autor(s), e não possuem direitos autorais reservados à terceiros. Textos e/ou imagens de terceiros são devidamente citados ou devidamente autorizados com concessão de direitos para publicação quando necessário. Declara(m) respeitar os direitos de terceiros e de Instituições públicas e privadas. Declara(m) não cometer plágio ou auto plágio e não ter considerado/gerado conteúdos falsos e que a obra é original e de responsabilidade dos autores.

12. Referências

- [1] Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdés, L., De Young, C., Fonseca, L., & Grimsditch, G. (Eds.). (2009). Blue Carbon. A Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal.



- [2] UNFCCC (2020). Policy Brief: Technologies for averting, minimizing and addressing loss and damage in coastal zones. Technology Executive Committee & Executive Committee of Warsaw International Mechanism on Loss and Damage. <https://unfccc.int/ttclear/coastalzones/>
- [3] Doney, S. C., Ruckelshaus, M., Duffy, J. E., et al (2012). Climate change impacts on marine ecosystems. *Annual Review of Marine Science*, 4, 11-37.
- [4] Hoegh-Guldberg, O., Poloczanska, E. S., Skirving, W., & Dove, S. (2017). Coral reef ecosystems under climate change and ocean acidification. *Frontiers in Marine Science*, 4:158.
- [5] National Geographic Brasil – NGB - Florestas submersas de macroalgas podem ser a chave no combate às mudanças climáticas. 21 março 2023 Disponível em: <https://www.nationalgeographicbrasil.com/meio-ambiente/2023/03/florestas-submersas-de-macroalgas-podem-ser-a-chave-no-combate-as-mudancas-climaticas>
- [6] IPCC. (2018). *Global warming of 1.5°C. 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*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- [7] IPCC (2023) Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115
- [8] Church, J.A., Clark, P.U., Cazenave, A., et al. (2013). Sea Level Change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [9] Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. (2009). Ocean acidification: The other CO₂ problem. *Annual Review of Marine Science*, 1, 169-192.
- [10] Lindwall, C. (2022). What Are the Effects of Climate Change? Natural Resources Defense Council - NRDC, available in: <https://www.nrdc.org/stories/what-are-effects-climate-change#weather>



- [11] Nicholls, R. J., & Cazenave, A. (2010). Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science*, 328(5985), 1517-1520.
- [12] Poloczanska, E. S., Brown, C. J., Sydeman, W. J., et al (2013). Global imprint of climate change on marine life. *Nature Climate Change*, 3(10), 919-925.
- [13] Parmesan, C., & Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421(6918), 37-42.
- [14] Assan, D., Kuebutornye, F., Mustapha, U., Chen, H. e Li, G. (2020) Efeitos das mudanças climáticas nos organismos marinhos. *American Journal of Climate Change* , 9 , 204-216.
- [15] Alongi, D. M. (2008). Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76(1), 1-13.
- [16] Rovai A.S., Twilley R.R., Worthington T.A. & Riul P. (2022) Brazilian Mangroves: Blue Carbon Hotspots of National and Global Relevance to Natural Climate Solutions. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4:787533, 1-11.
- [17] Barletta, M., Barletta-Bergan, A., Saint-Paul, U., & Hubold, G. (2005). The role of salinity in structuring the fish assemblages in a tropical estuary. *Journal of Fish Biology*, 66(1), 45-72.
- [18] Biguino, B., Haigh, I.D., Dias, J.M., Brito, A.C. (2023) Climate change in estuarine systems: Patterns and gaps using a meta-analysis approach, *Science of The Total Environment*, 858 (1)
- [19] Hughes, T. P., Anderson, K. D., Connolly, S. R., et al (2018). Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene. *Science*, 359(6371), 80-83.
- [20] Setter RO, Franklin EC, Mora C (2022) Co-occurring anthropogenic stressors reduce the timeframe of environmental viability for the world's coral reefs. *PLoS Biol* 20(10).
- [21] Pinsky, M. L., Worm, B., Fogarty, M. J., et al (2013). Marine taxa track local climate velocities. *Science*, 341(6151), 1239-1242.
- [22] Sorte, C. J., Williams, S. L., & Carlton, J. T. (2010). Marine range shifts and species introductions: comparative spread rates and community impacts. *Global Ecology and Biogeography*, 19(3), 303-316.
- [23] Brander, K.M. (2007) Global fish production and climate change. *PNAS*. 104(50), 19709-19714



- [24] Cinner, J. E., Adger, W. N., Allison, E. H., et al (2018). Building adaptive capacity to climate change in tropical coastal communities. *Nature Climate Change*, 8(2), 117-123.
- [25] Cooley, S., D. Schoeman, L. Bopp, et al. (2022) Oceans and Coastal Ecosystems and Their Services. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 379–550
- [26] Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I., Diedhiou, A., ... & Nelson, G. (2019). The human imperative of stabilizing global climate change at 1.5°C. *Science*, 365(6459), eaaw6974.
- [27] Arabadzhyan, A., Figinia, P., García, C., et al (2020) Climate change, coastal tourism, and impact chains—a literature review. *Current Issues in Tourism*. 24 (16), 2233–2268.
- [28] Agrawala, S., Carraro, M., Kingsmill, N., et al (2011). Private sector engagement in adaptation to climate change: Approaches to managing climate risks. *OECD Environment Working Papers*, (39). OECD Publishing, Paris
- [29] UNCTAD (2020). Climate Change Impacts and Adaptation for Coastal Transport Infrastructure: A Compilation of Policies and Practices. Transport and trade facilitation. Series No 12. United Nations, New York.
- [30] Duarte, C. M., Losada, I. J., Hendriks, I. E., et al (2013). The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nature Climate Change*, 3(11), 961-968.
- [31] Barbier, E. B., Koch, E. W., Silliman, B. R., et al (2008). Coastal ecosystem-based management with nonlinear ecological functions and values. *Science*, 319(5861), 321-323.
- [32] Vörösmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., & Lammers, R. B. (2000). Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 289(5477), 284-288.
- [33] Zamboni, N. S. (2020) Valoração de serviços ecossistêmicos costeiros em cenários de mudanças climáticas. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Biociências. Programa de Pós-graduação em Ecologia. Natal, 147 fls



- [34] Terborgh, J., & Estes, J. A. (Eds.). (2010). *Trophic cascades: predators, prey, and the changing dynamics of nature*. Island Press.
- [35] Hughes, T. P., Rodrigues, M. J., Bellwood, D. R., et al (2007). Phase shifts, herbivory, and the resilience of coral reefs to climate change. *Current Biology*, 17(4), 360-365.
- [36] Ullah H, Nagelkerken I, Goldenberg SU, Fordham DA (2018) Climate change could drive marine food web collapse through altered trophic flows and cyanobacterial proliferation. *PLoS Biol* 16(1).
- [37] Behrenfeld, M. J., O'Malley, R. T., Siegel, D. A., et al (2006). Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*, 444(7120), 752-755.
- [38] Capotondi, A., Alexander, M. A., Bond, N. A., et al (2012). Enhanced upper ocean stratification with climate change in the CMIP3 models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C4).
- [39] Schoonees, T., Gijón, A. & Scheres, B. et al (2019). Hard Structures for Coastal Protection, Towards Greener Designs. *Estuaries and Coasts*. 42(7)
- [40] Hanson, H., Brampton, A., Capobianco, M., et al (2002). Beach nourishment projects, practices, and objectives—A European overview. *Coastal Engineering*, 47(2), 81-111.
- [41] Mazda, Y., Magi, M., Ikeda, Y., et al (2006). Wave reduction in a mangrove forest dominated by *Sonneratia* sp. *Wetlands Ecology and Management*, 14(4), 365-378.
- [42] Pilkey, O. H., & Young, R. S. (2011). *The rising sea*. Island Press.
- [43] UNFCCC/IUCN. 2022. Innovative Approaches for Strengthening Coastal and Ocean Adaptation - Integrating Technology and Nature-based Solutions. United Nations Climate Change Secretariat. Bonn.
- [44] Cinner, J. E., McClanahan, T. R., Graham, N. A., et al (2012). Vulnerability of coastal communities to key impacts of climate change on coral reef fisheries. *Global Environmental Change*, 22(1), 12-20.
- [45] Berkes, F. (2009). Evolution of co-management: Role of knowledge generation, bridging organizations and social learning. *Journal of Environmental Management*, 90(5), 1692-1702.
- [46] Shaw, R. (2006). Community-based climate change adaptation in Vietnam: inter-linkages of environment, disaster, and human security. Multiple Dimension of Global Environmental Changes, edited by S. Sonak, TERI publication, 521-547.
- [47] Kelleway, J. J., Saintilan, N., Macreadie, P. I., et al (2016). Seventy years of continuous encroachment substantially increases 'blue carbon' capacity as



- mangroves replace intertidal salt marshes. *Global Change Biology*, 23(3), 1097-1109.
- [48] Turner, R. K., Paavola, J., Cooper, P., et al (2003). Valuing nature: lessons learned and future research directions. *Ecological Economics*, 46(3), 493-510.
- [49] Cooper, J. A., & Pilkey, O. H. (2004). Sea-level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun Rule. *Global and Planetary Change*, 43(3-4), 157-171.
- [50] Ens, E. J., Pert, P., Clarke, P. A., et al (2015). Indigenous biocultural knowledge in ecosystem science and management: Review and insight from Australia. *Biological Conservation*, 181, 133-149.
- [51] Arkema, K. K., Abramson, S. C., & Dewsbury, B. M. (2006). Marine ecosystem-based management: from characterization to implementation. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 4(10), 525-532.
- [52] Nelson, E., Mendoza, G., Regetz, J., et al (2009). Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(1), 4-11.
- [53] Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., et al (Eds.). (2014). Coastal blue carbon: methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrass meadows. *Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature*.
- [54] Barbier, E. B., Hacker, S. D., Kennedy, C., et al (2011). The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, 81(2), 169-193.
- [55] Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., et al (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26, 152-158.
- [56] Berkes, F. (2012). *Sacred ecology*. Routledge
- [57] Ostrom, E. (2009). A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 325(5939), 419-422.
- [58] Young, O. R., King, L. A., & Schroeder, H. (Eds.). (2008). *Institutions and environmental change: principal findings, applications, and research frontiers*. MIT Press.
- [59] Tallis, H., Kareiva, P., Marvier, M., & Chang, A. (2008). An ecosystem services framework to support both practical conservation and economic development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(28), 9457-9464.