

IMPACTOS DA ELEVAÇÃO DO NÍVEL MÉDIO DO MAR SOBRE O ECOSISTEMA MANGUEZAL: UMA REVISÃO DE BASES DE DADOS E PLATAFORMAS DE ACESSO LIVRE**IMPACTS OF RISING AVERAGE SEA LEVELS ON MANGROVE ECOSYSTEMS: A REVIEW OF DATABASES AND OPEN ACCESS PLATFORMS** <https://doi.org/10.63330/aurumpub.012-055>**Felipe Martins Sousa**Universidade Federal do Maranhão, Mestrando em Ciência e Tecnologia Ambiental
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/1933589345525424>**Edilane Medeiros Santos**Universidade Federal do Maranhão, Mestranda em Desenvolvimento e Meio Ambiente
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/3983908548995107>**Ingryd Lorena Batista de Oliveira**Universidade Federal do Maranhão, Graduanda em Oceanografia
LATTES: <https://lattes.cnpq.br/1084198445977861>**José Alves de Oliveira Bisneto**Universidade Federal do Maranhão, Graduando em Oceanografia
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/1317254282144981>**Nerval de Jesus Santos Junior**Universidade Federal do Maranhão, Mestrando em engenharia elétrica
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/9100096308318796>**Evander dos Santos Sanches**Mestre em Biologia Animal pela Universidade Federal do Mato Grosso do Sul
LATTES: <https://lattes.cnpq.br/4993120029097863>**Denilson da Silva Bezerra**Doutor em Ciência do Sistema Terrestre pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/6162113647472848>**Ítalo Rosário de Freitas**Universidade Estadual de Santa Cruz, Doutorando em Biologia e Biotecnologia de Microrganismos
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/9903782675151768>**RESUMO**

A elevação do nível médio do mar (ENMM) ameaça os manguezais globalmente, mas o estudo desses impactos é dificultado por barreiras de custo em softwares e dados. Este trabalho realiza uma revisão sistemática da literatura para identificar e analisar as principais plataformas de software de código aberto e bases de dados de acesso livre aplicáveis à análise de vulnerabilidade desses ecossistemas. A análise de 105 publicações revelou um desequilíbrio geográfico na pesquisa, com 60% dos estudos concentrados na Ásia e apenas 5% no Brasil. Foram identificadas ferramentas essenciais como QGIS, R e Python, modelos como



InVEST e SLAMM, e sistemas nacionais como o BR-MANGUE. Bases de dados como Global Mangrove Watch (GMW), MapBiomass e Modelos Digitais de Elevação mostraram-se fundamentais. Conclui-se que, apesar da disponibilidade de um robusto ecossistema de ferramentas abertas que democratizam a ciência, existe uma lacuna na aplicação destes recursos em estudos de impacto internacional sobre a costa brasileira.

Palavras-chave: Geotecnologias; Mudanças Climáticas; Vulnerabilidade Costeira.

ABSTRACT

Sea-level rise (SLR) threatens mangrove ecosystems globally, but the study of these impacts is often hindered by cost barriers in software and data. This paper conducts a systematic literature review to identify and analyze the main open-source software platforms and open-access databases applicable to the vulnerability analysis of these ecosystems. The analysis of 105 publications revealed a geographical imbalance in research, with 60% of studies concentrated in Asia and only 5% in Brazil. Essential tools such as QGIS, R, Python, models like InVEST and SLAMM, and national systems like BR-MANGUE were identified. Databases like the Global Mangrove Watch (GMW), MapBiomass, and Digital Elevation Models proved to be fundamental. It is concluded that, despite the availability of a robust ecosystem of open tools that democratize science, there is a gap in the application of these resources in international impact studies on the Brazilian coast.

Keywords: Mangroves; Sea-Level Rise; Open Source Software.



1 INTRODUÇÃO

A crise climática global, impulsionada por atividades antrópicas, manifesta-se de formas diversas, sendo a elevação do nível médio do mar (ENMM) uma de suas consequências mais diretas e bem documentadas (Oppenheimer et al., 2019). O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), em seu mais recente relatório de síntese, reafirma com alta confiança que o nível global do mar continuará a subir por séculos, com projeções que indicam um aumento irreversível que ameaça ecossistemas e populações costeiras em todo o planeta (IPCC, 2023). Essa transformação progressiva da linha de costa, que já resulta em maior frequência de inundações e intensificação da erosão, exige uma compreensão aprofundada dos sistemas naturais que atuam como barreiras de proteção, entre os quais os manguezais se destacam pela sua criticidade (Taherkhani et al., 2020).

Os ecossistemas de manguezal fornecem serviços ecossistêmicos insubstituíveis, atuando como barreiras naturais que protegem as comunidades costeiras da erosão e de eventos climáticos extremos, como tempestades e tsunamis (Menéndez et al., 2020). Além disso, funcionam como "berçários" para uma vasta gama de espécies marinhas com valor comercial e ecológico, sustentando a pesca artesanal e a segurança alimentar local (Zu, 2023). Mais recentemente, seu papel como sumidouros de "carbono azul" (*blue carbon*) ganhou proeminência, uma vez que são capazes de sequestrar e armazenar carbono atmosférico em sua biomassa e solo a taxas muito superiores às das florestas terrestres (Aburto-Oropeza et al., 2021), tornando sua conservação uma estratégia vital para a mitigação das mudanças climáticas (Saho; Behera, 2023).

Apesar de sua resiliência, os manguezais são extremamente sensíveis às alterações no nível do mar, existindo limiares ecológicos para sua sobrevivência (Saintilan et al., 2022). A inundação permanente ou prolongada, causada pela ENMM, pode levar ao estresse fisiológico e à morte das árvores, enquanto o aumento da salinidade pode degradar o solo e impedir a regeneração natural (Friess et al., 2019). Este cenário é agravado pelo fenômeno do "*coastal squeeze*" (espremedura costeira), onde a migração natural do mangue para áreas mais interiores é bloqueada por barreiras artificiais, como estradas e diques, ou por topografia elevada, resultando em uma perda líquida de área de habitat (Lovelock et al., 2021; Schuerch et al., 2018).

A análise e a modelagem desses impactos complexos, no entanto, enfrentam barreiras significativas. Tradicionalmente, os estudos de vulnerabilidade costeira dependem de softwares de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) comerciais e de dados topográficos de alta resolução, cujos custos de aquisição e licenciamento são proibitivos para muitas instituições (Piarulli et al., 2021). Essa dependência cria uma lacuna de conhecimento e capacidade, especialmente no Sul Global, deixando muitas das áreas de mangue mais vulneráveis do mundo sem avaliações de risco adequadas e dificultando a implementação de políticas de adaptação eficazes (Ayanlade et al., 2023).

Felizmente, a última década testemunhou um avanço significativo no campo das geotecnologias de código aberto e na disponibilização de dados globais gratuitos (Piarulli et al., 2021). Plataformas como o QGIS, R e Python tornaram-se alternativas robustas aos softwares proprietários, oferecendo ferramentas de análise espacial poderosas e acessíveis a uma comunidade global de usuários (Tsorlini et al., 2021). Simultaneamente, iniciativas como o Global Mangrove Watch (GMW) passaram a fornecer mapas detalhados e atualizados da extensão dos manguezais em escala planetária (Bunting et al., 2022), democratizando o acesso a informações que antes eram escassas e viabilizando estudos em escala local e regional.

Diante deste novo paradigma, torna-se essencial avaliar e divulgar o potencial dessas ferramentas e bases de dados abertas para o estudo dos impactos da ENMM nos manguezais, alinhando-se aos princípios da ciência aberta para acelerar a pesquisa climática (Hessels et al., 2023). Portanto, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão crítica das principais plataformas de software livre e das bases de dados gratuitas disponíveis, demonstrando sua aplicabilidade na modelagem da vulnerabilidade dos ecossistemas de manguezal. A intenção é fornecer um guia metodológico que possa capacitar pesquisadores e gestores a conduzirem análises de risco costeiro de forma eficaz e com baixo custo (Singh et al., 2022), fomentando a conservação informada desses ecossistemas vitais.

2 METODOLOGIA

Este estudo consiste em uma revisão de literatura com o objetivo de identificar e analisar as principais bases de dados de acesso livre e plataformas de software de código aberto aplicáveis ao estudo dos impactos da elevação do nível do mar em ecossistemas de manguezal. A metodologia foi estruturada em três etapas: definição da estratégia de busca, estabelecimento dos critérios de seleção e, por fim, a análise e extração das informações.

2.1 FONTES DE PESQUISA E ESTRATÉGIA DE BUSCA

Para a coleta de informações, foram utilizadas as seguintes bases de dados científicas: Scopus, Web of Science e Google Scholar. A busca foi realizada entre março e junho de 2025, utilizando combinações de termos-chave em inglês e português, conectados por operadores booleanos (AND, OR). Os termos foram organizados em quatro grupos conceituais conforme o quadro 1.



Quadro 1. Termos de busca

Categoria	Termos de Busca
Ecossistema	"mangrove" OU "mangroves" OU "manguezal"
Ameaça	"sea level rise" OU "elevação do nível do mar"
Ferramentas (Software)	"open source software" OU "software livre" OU "QGIS" OU "RStudio" OU "Jupyter" OU "geoprocessing" OU "geotecnologias"
Ferramentas (Dados)	"open data" OU "dados abertos" OU "database" OU "base de dados" OU "remote sensing" OU "sensoriamento remoto"

Fonte: Os autores

2.2 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Após a busca inicial, os resultados foram filtrados com base em critérios predefinidos destacados no quadro 2, para garantir a relevância e a atualidade do material selecionado.

Quadro 2. Critérios de inclusão e exclusão aplicados

Critérios de Inclusão	Critérios de Exclusão
Artigos científicos revisados por pares, dissertações, teses, capítulos de livro e relatórios técnicos de organizações renomadas.	Trabalhos que utilizem exclusivamente softwares proprietários (ex: ArcGIS) sem discutir alternativas livres.
Publicações dos últimos 10 anos (2015-2025) para focar nas ferramentas e dados mais recentes.	Artigos de opinião, editoriais e resumos de conferências sem conteúdo metodológico detalhado.
Trabalhos que abordam explicitamente o uso de softwares de código aberto ou bases de dados gratuitas para a análise de ecossistemas costeiros.	Publicações cujo idioma não seja português, inglês ou espanhol.

Fonte: Os autores

2.3 ANÁLISE E EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÕES

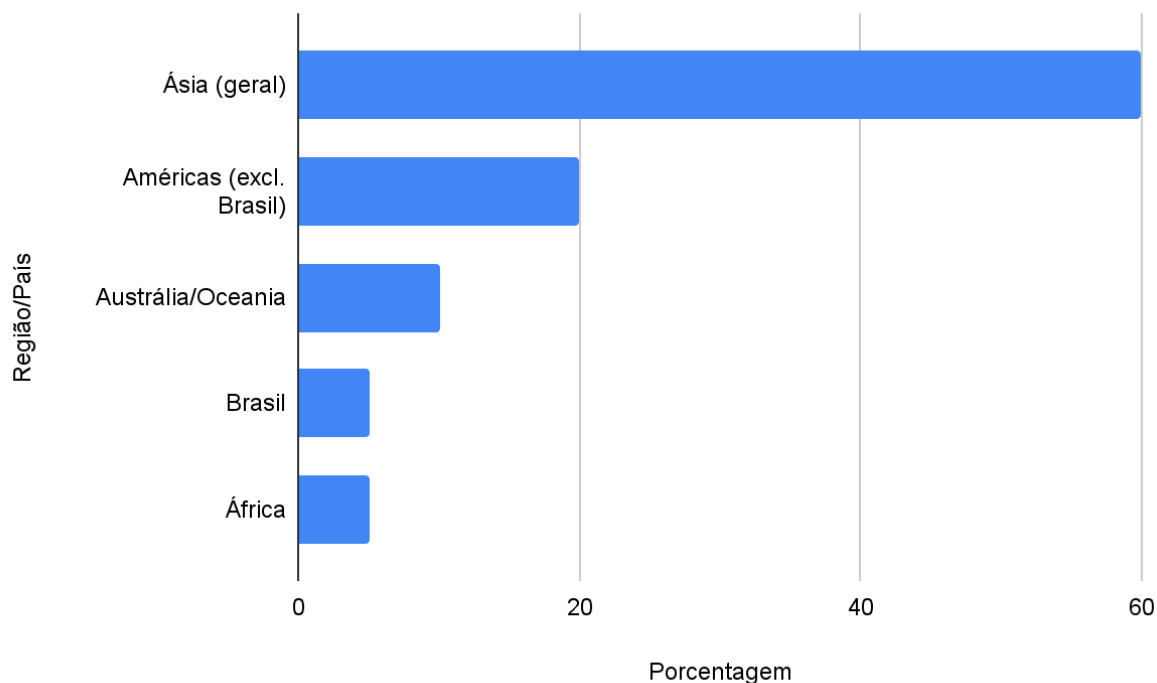
Os documentos selecionados após a aplicação dos critérios foram lidos na íntegra. As informações foram extraídas e categorizadas sistematicamente em uma planilha, registrando os seguintes dados para cada fonte:

- **Plataformas de Software:** Nome da ferramenta, principais funcionalidades descritas, vantagens e desvantagens apontadas pelos autores.
- **Bases de Dados:** Nome da base, tipo de dado fornecido (vetorial, matricial, tabular), abrangência espacial e temporal, e sua aplicação no estudo em questão.

3 RESULTADOS

A aplicação da estratégia de busca e dos critérios de seleção resultou em um portfólio de 105 artigos científicos, teses e relatórios técnicos que foram analisados na íntegra. Uma análise da origem geográfica destas publicações revelou uma concentração significativa de estudos na Ásia, que correspondem a 60% do total de trabalhos analisados. Dentro deste continente, destacam-se a Indonésia, a China e a Índia como os países com maior volume de publicações sobre o tema. As Américas (excluindo o Brasil) representam 20% dos estudos, seguidas pela Austrália/Oceania com 10%. Notou-se uma contribuição quantitativamente menor de trabalhos com origem na África (5%) e no Brasil (5%), indicando uma lacuna de publicações de impacto sobre a realidade nacional em periódicos internacionais. O gráfico 1 ilustra essa distribuição geográfica.

Gráfico 1. Distribuição geográfica dos estudos analisados.



Fonte: Os autores

A análise do conteúdo destes trabalhos permitiu identificar um conjunto recorrente de plataformas de software, modelos e bases de dados, que são centrais para a pesquisa sobre os impactos da elevação do



nível do mar em manguezais. Os resultados desta revisão são apresentados a seguir, divididos em plataformas, sistemas e modelos de código aberto e bases de dados de acesso livre.

3.1 PLATAFORMAS, SISTEMAS E MODELOS DE CÓDIGO ABERTO

O quadro 3 sintetiza as principais plataformas, sistemas e modelos especializados identificados na literatura. Eles são categorizados por tipo, aplicação principal e vantagens, destacando-se uma complementaridade entre as ferramentas de propósito geral, sistemas de mapeamento nacionais e os modelos de simulação específicos.

Quadro 3. Comparativo entre plataformas, sistemas e modelos de código aberto.

Plataforma/Modelo	Tipo	Aplicação Principal na Literatura	Vantagens e Exemplos Notáveis
Quantum GIS (QGIS)	Software SIG de Desktop	Mapeamento, edição de dados vetoriais/matriciais e análises espaciais visuais.	Interface gráfica intuitiva, vasta biblioteca de plugins e alta interoperabilidade de dados.
R (via RStudio)	Linguagem de Programação (Ambiente Estatístico)	Análise estatística de dados espaciais, automação de rotinas e modelagem computacional.	Alta reprodutibilidade; pacotes especializados como <i>sf</i> (vetorial) e <i>terra</i> (matricial).
Python (via Jupyter)	Linguagem de Programação (Propósito Geral)	Processamento de grandes volumes de dados, integração com sensoriamento remoto e <i>machine learning</i> .	Alta performance; bibliotecas como GeoPandas (vetorial) e Rasterio (matricial).
InVEST	Modelo de Valoração de Serviços Ecossistêmicos	Quantificar e valorar os impactos da perda de habitat em serviços como proteção costeira e estoque de carbono.	Traduz impactos físicos em termos socioeconômicos; Modelo "Coastal Vulnerability".
SLAMM	Modelo de Simulação Dinâmica	Simular a resposta de ecossistemas costeiros (mangues, sapais) à ENMM a longo prazo.	Incorpora processos dinâmicos como acreção e subsidência, superando modelos estáticos.
BR-MANGUE	Sistema de modelagem espacialmente explícito e Análise baseado em autômatos celulares	Mapeamento e análise da dinâmica dos manguezais na costa brasileira.	Desenvolvido para a realidade dos mangues brasileiros, oferecendo maior acurácia local (Bezerra, 2013).

Fonte: Os autores

3.2 BASES DE DADOS DE ACESSO LIVRE

O quadro 4 resume as principais fontes de dados gratuitos identificadas como insumos essenciais para as análises de vulnerabilidade. As bases de dados variam em escopo, de global a nacional, e fornecem desde informações físicas fundamentais até dados biológicos e de conservação.



Quadro 4. Resumo das principais bases de dados de acesso livre e sua relevância.

Base de Dados	Organização Principal	Tipo de Dado e Escopo	Relevância para Análise de Impacto
Global Mangrove Watch (GMW)	JAXA, TNC, Aberystwyth University	Vetorial/Matricial da extensão de mangues (Global, multitemporal).	Fundamental: Define a localização e a área de mangue a ser impactada.
MapBiomass	Rede colaborativa (universidades, ONGs, etc.)	Matricial de uso e cobertura da terra (Nacional/Continental, anual).	Estratégico: Mapeia o uso do solo no entorno, permitindo análises de "coastal squeeze" (barreiras à migração do mangue).
Modelos Digitais de Elevação (MDEs)	NASA (SRTM), JAXA (ALOS PALSAR)	Matricial de altitude da superfície terrestre (Global).	Crítico: Variável indispensável para modelar a mancha de inundação costeira.
Global Sea Level Observing System (GLOSS)	UNESCO (COI)	Séries temporais de medições de marégrafos (Pontual, global).	Suporte: Essencial para calibração, validação de modelos e análise de tendências locais.
World Database on Protected Areas (WDPA)	UNEP-WCMC, IUCN	Vetorial dos limites de áreas protegidas (Global).	Contextual: Permite avaliar o impacto sobre manguezais em unidades de conservação.
Global Biodiversity Information Facility (GBIF)	Rede internacional de governos e instituições	Dados de ocorrência de espécies (Pontual, global).	Contextual: Ajuda a identificar a biodiversidade específica sob ameaça em áreas impactadas.

Fonte: Os autores

4 DISCUSSÃO

A análise dos resultados revela um cenário de contrastes. Por um lado, confirma-se a existência de um ecossistema robusto e crescente de ferramentas de código aberto e bases de dados gratuitas, que teoricamente democratizam a pesquisa sobre os impactos da elevação do nível do mar (ENMM) em manguezais. Por outro, a análise quantitativa da produção científica evidencia um notável desequilíbrio

Contribuições Multidisciplinares Para o Conhecimento Atual



geográfico, sugerindo que o acesso a essas ferramentas ainda não se traduziu em uma produção de conhecimento globalmente distribuída.

4.1 O PARADIGMA DA CIÊNCIA ABERTA E A COMPLEMENTARIDADE DAS FERRAMENTAS

Os resultados demonstram que a análise de vulnerabilidade costeira com recursos abertos não depende de uma única solução, mas de um conjunto de ferramentas complementares. O QGIS se consolida como uma porta de entrada, essencial para a manipulação visual e elaboração de mapas, enquanto R e Python oferecem a capacidade de automação, reprodutibilidade e escalabilidade necessárias para análises mais complexas. Essa complementaridade representa um avanço significativo, permitindo que pesquisadores modulem sua abordagem de acordo com a complexidade do problema e sua proficiência técnica. A existência de modelos mais avançados, como o dinâmico SLAMM e o socioeconômico InVEST, aponta para a maturidade da área, que avança de simples análises de inundação para a avaliação integrada dos impactos biofísicos e nos serviços ecossistêmicos.

4.2 O PAPEL ESTRATÉGICO DE SISTEMAS NACIONAIS COMO O BR-MANGUE

A inclusão de um sistema como o BR-MANGUE (Bezerra, 2013) na discussão é particularmente relevante, pois ele exemplifica a transição de uma dependência de dados globais para a construção de capacidades nacionais de monitoramento. Enquanto ferramentas como o Global Mangrove Watch (GMW) são cruciais para avaliações de macroescala, a literatura aponta consistentemente que a sua resolução espacial pode não ser suficiente para a gestão em escala local. O BR-MANGUE surge como uma resposta a essa lacuna, oferecendo um mapeamento de maior acurácia, calibrado para as feições fisionômicas específicas dos manguezais da costa brasileira. Isso não só aumenta a confiabilidade das simulações de impacto, mas também cria um produto com maior aplicabilidade direta para a formulação de políticas públicas, o planejamento de unidades de conservação e o licenciamento ambiental em nível nacional.

4.3 O DESEQUILÍBRIO GEOGRÁFICO E O PARADOXO BRASILEIRO

O dado mais provocativo dos resultados é a disparidade geográfica na produção científica. A concentração de 60% dos estudos na Ásia é compreensível, dada a vasta extensão de manguezais e a alta densidade populacional em zonas costeiras. Contudo, a baixa representatividade do Brasil (5%) nos trabalhos de impacto analisados configura um paradoxo. A existência de ferramentas sofisticadas de desenvolvimento nacional como o BR-MANGUE, aliada à vasta área de manguezais do país, sugere que a capacidade técnica e os dados de qualidade existem. A lacuna parece estar na tradução dessa capacidade em publicações de alto impacto internacional, o que pode indicar uma necessidade de maior fomento à



pesquisa que utilize essas ferramentas para investigar a vulnerabilidade da costa brasileira e de maior inserção dos pesquisadores nacionais nos debates globais.

4.4 IMPLICAÇÕES PARA A GESTÃO E DIREÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

As ferramentas e dados revisados têm implicações diretas para a gestão costeira no Brasil. Órgãos ambientais e prefeituras podem utilizar o QGIS e dados do MapBiomass e GMW para realizar diagnósticos preliminares, mas devem, sempre que possível, recorrer a dados de maior detalhe, como os gerados por sistemas como o BR-MANGUE, para subsidiar decisões regionais e nacionais.

Para a academia, existem direções futuras: Aplicação Local que há uma necessidade urgente de aplicar os modelos e ferramentas revisados para gerar estudos de caso detalhados sobre a vulnerabilidade dos diferentes setores da costa brasileira, preenchendo a lacuna de produção científica identificada.



REFERÊNCIAS

- ABURTO-OROPEZA, O. et al. Harnessing the potential of nature-based solutions for coastal protection and blue carbon. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 50, p. 276-284, 2021.
- AYANLADE, A. et al. A systematic review of the barriers to climate change adaptation in the Global South. *Environmental Research Letters*, v. 18, n. 6, p. 063001, 2023.
- BUNTING, P. et al. Global Mangrove Extent Change 1996–2020: Global Mangrove Watch Version 3.0. *Remote Sensing*, v. 14, n. 15, p. 3657, 2022.
- FRIESS, D. A. et al. The State of the World's Mangrove Forests: Past, Present, and Future. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 44, p. 89-115, 2019.
- HESSELS, A. et al. The role of open science in accelerating climate change research and action. *Environmental Science & Policy*, v. 147, p. 103-111, 2023.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. 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. Geneva: IPCC, 2023.
- LOVELOCK, C. E. et al. The capacity of saltmarshes and mangroves to keep pace with sea-level rise. *Nature Climate Change*, v. 11, n. 12, p. 1059-1067, 2021.
- MENÉNDEZ, P. et al. The global flood protection benefits of mangroves. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, p. 4404, 2020.
- OPPENHEIMER, M. et al. Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Geneva: IPCC, 2019.
- PIARULLI, F. et al. OpenSource Geotechnologies for the Enhancement of Tourism and the Territory. *Environmental Sciences Proceedings*, v. 10, n. 1, p. 9, 2021.
- SAHO, B.; BEHERA, M. D. Sea-level rise and its impact on coastal and marine ecosystems in India: A review. *Ocean & Coastal Management*, v. 231, p. 106399, 2023.
- SAINTILAN, N. et al. Thresholds of mangrove survival under rapid sea level rise. *Science*, v. 376, n. 6592, p. 522-525, 2022.
- SCHUERCH, M. et al. Future response of global coastal wetlands to sea-level rise. *Nature*, v. 561, p. 231–234, 2018.
- SINGH, C. et al. Bridging the science-policy-action gap for climate adaptation: a focus on decision support tools. *Climate and Development*, v. 14, n. 10, p. 875-882, 2022.
- TAHERKHANI, M. et al. Sea-level rise and coastal vulnerability: a review of the state of the art. *Water*, v. 12, n. 10, p. 2795, 2020.



TSORLINI, A. et al. Use of open-source software for the assessment of coastal vulnerability to erosion and sea-level rise. *Water*, v. 13, n. 15, p. 2095, 2021.

ZU, L. Mangrove conservation is crucial for fisheries and biodiversity. *Nature Ecology & Evolution*, v. 7, n. 6, p. 784-785, 2023