



Modelos digitais de elevação na sustentabilidade costeira: uma análise bibliométrica sobre erosão e morfodinâmica

Filipe de Oliveira Santana^{1*}, Éder Pinho Magalhães², Willian Rodrigues dos Santos³, Milton Ferreira da Silva Junior⁴

¹Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal do Sul da Bahia, Brasil. (*Autor correspondente: filipeosambiental@outlook.com)

²Doutorando em Biosistemas, Universidade Federal do Sul da Bahia, Brasil.

³Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal do Sul da Bahia, Brasil

⁴Doutor em Educação, Universidade Federal do Bahia, Brasil.

Histórico do Artigo: Submetido em: 23/01/2026 – Revisado em: 20/03/2026 – Aceito em: 26/03/2026

RESUMO

Os ecossistemas costeiros estão entre os mais vulneráveis do planeta, desempenhando funções ecológicas essenciais e sustentando significativa biodiversidade. A pressão antrópica e as mudanças climáticas intensificam processos de erosão e perda de habitat, demandando abordagens científicas integradas para a conservação e gestão sustentável. Este estudo realiza uma análise bibliométrica da produção científica internacional (2015–2025) focada na aplicação de Modelos Digitais de Elevação (MDE) no monitoramento da morfodinâmica e erosão costeira, destacando seu papel para a sustentabilidade ambiental. A revisão, estruturada nas bases *Scopus* e *Web of Science*, resultou em um corpus de 638 artigos, analisados com o software RStudio e o pacote Bibliometrix. Os resultados evidenciam um crescimento expressivo das publicações a partir de 2018, alinhado ao aumento da preocupação global com eventos climáticos extremos. A análise temática revelou a forte associação entre técnicas geoespaciais e estudos de vulnerabilidade, adaptação e gestão integrada da zona costeira. Países com grandes extensões litorâneas e desafios ambientais, como USA, China e Reino Unido, lideram a produção. A pesquisa evidencia a transição para metodologias digitais preditivas, fundamentais para o planejamento de estratégias de resiliência costeira e conservação ambiental, apontando, contudo, para a necessidade de maior inclusão de estudos em regiões tropicais biologicamente ricas e socialmente vulneráveis.

Palavras-Chaves: Bibliometria, Tecnologias Geoespaciais, Mudanças Climáticas.

RESUMO GRÁFICO // GRAPHICAL ABSTRACT



Santana, F. de O., Magalhães, É. P., Santos, W. R. dos, & Silva Junior, M. F. da. (2026). Modelos digitais de elevação na sustentabilidade costeira: uma análise bibliométrica sobre erosão e morfodinâmica. **Meio Ambiente (Brasil)**, v.8, n.2, p.02-18.



Direitos do Autor. A Meio Ambiente (Brasil) utiliza a licença *Creative Commons* - CC BY 4.0.

Digital elevation models in coastal sustainability: a bibliometric analysis of erosion and morphodynamics.

ABSTRACT

Coastal ecosystems are among the most vulnerable on the planet, playing essential ecological roles and supporting significant biodiversity. Anthropogenic pressures and climate change intensify processes of erosion and habitat loss, demanding integrated scientific approaches for conservation and sustainable management. This study conducts a bibliometric analysis of international scientific production (2015–2025) focused on the application of Digital Elevation Models (DEMs) in monitoring coastal morphodynamics and erosion, highlighting their role in environmental sustainability. The review, structured using the Scopus and Web of Science databases, resulted in a corpus of 638 articles, analyzed using RStudio software and the Bibliometrix package. The results indicate exponential growth in publications from 2018 onward, aligned with increasing global concern over extreme weather events. Thematic analysis revealed a strong association between geospatial techniques and studies on vulnerability, adaptation, and integrated coastal zone management. Countries with extensive coastlines and significant environmental challenges, such as the United States, China, and the United Kingdom, lead scientific production. The research highlights a transition toward predictive digital methodologies, which are fundamental for planning coastal resilience and environmental conservation strategies, while also emphasizing the need for greater inclusion of studies in biologically rich and socially vulnerable tropical regions.

Keywords: Bibliometrics, Geospatial Technologies, Climate Change

1. Introdução

A zona costeira constitui uma interface dinâmica e ecologicamente vital entre os ambientes terrestre e marinho, abrigando manguezais, restingas, recifes de coral e praias que oferecem serviços ecossistêmicos indispensáveis, como proteção contra tempestades, sequestro de carbono e suporte à pesca (Masselink & Hughes, 2003). Contudo, esses ambientes enfrentam crescentes ameaças decorrentes da elevação do nível do mar, da intensificação de eventos climáticos extremos e da pressão urbana e industrial desordenada (Nicholls; Cazenave, 2010). A erosão costeira acelerada não é apenas um problema geomorfológico, mas um fenômeno ambiental de amplas repercussões, levando à perda de habitat, à salinização de aquíferos e ao comprometimento da infraestrutura e das comunidades humanas (Muehe, 2018). Neste cenário, o monitoramento preciso e contínuo torna-se uma ferramenta fundamental para a compreensão dos processos naturais e para a formulação de políticas públicas baseadas em evidências, alinhadas aos objetivos de desenvolvimento sustentável.

A gestão costeira enfrenta desafios crescentes decorrentes da interação entre processos naturais dinâmicos e pressões antrópicas intensificadas. A expansão urbana, a ocupação desordenada e a implantação de infraestruturas costeiras frequentemente alteram o equilíbrio sedimentar e ampliam a vulnerabilidade desses ambientes (Santos et al., 2015). Estudos recentes demonstram que a análise integrada de variáveis geomorfológicas, climáticas e socioeconômicas tem se consolidado como uma abordagem fundamental para avaliar riscos e orientar estratégias de adaptação costeira, especialmente em regiões altamente expostas à elevação do nível do mar e à intensificação de eventos extremos (Li et al., 2022; Xu et al., 2023). Assim, compreender a dinâmica morfodinâmica e os processos erosivos torna-se essencial para subsidiar políticas públicas de adaptação e conservação, bem como orientar práticas de ordenamento territorial mais resilientes (Masselink; Hughes, 2003; Muehe, 2018).

O avanço das geotecnologias tem revolucionado a capacidade de observar e quantificar mudanças ambientais na costa. Modelos Digitais de Elevação (MDE) de alta resolução, derivados de LiDAR, VANTs e sensoriamento remoto orbital, permitem não apenas mapear a erosão, mas também modelar cenários futuros de inundação, avaliar a saúde de ecossistemas e planejar intervenções de restauração ecológica (Turner et al., 2016; Ferreira et al., 2024). A integração dessas ferramentas com análises de vulnerabilidade socioecológica representa um caminho promissor para uma gestão costeira adaptativa e proativa (Ferreira et al., 2023).

Nesse sentido, a integração entre técnicas de sensoriamento remoto, modelagem digital do terreno e análises espaciais possibilita a geração de diagnósticos ambientais mais robustos e a identificação de

tendências de erosão, deposição sedimentar e inundação costeira. O uso combinado de dados derivados de VANTs, imagens orbitais e algoritmos de análise geoespacial permite avaliar alterações morfodinâmicas em diferentes escalas temporais e espaciais, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias de adaptação baseadas em evidências científicas e para o fortalecimento da gestão costeira sustentável (Ferreira et al., 2023; Turner et al., 2016)

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar, por meio de uma abordagem bibliométrica, a produção científica internacional recente sobre o uso de MDE no monitoramento da erosão e da morfodinâmica costeira, com ênfase em sua contribuição para a sustentabilidade ambiental e a gestão integrada de zona costeira.

2. Material e Métodos

2.1 Tipo de pesquisa

A presente investigação caracteriza-se como uma pesquisa bibliométrica de abordagem predominantemente quantitativa, com suporte interpretativo qualitativo na análise dos padrões científicos identificados. A bibliometria consiste na aplicação de métodos estatísticos e matemáticos a registros bibliográficos, com o objetivo de mapear a estrutura, evolução e dinâmica da produção científica em determinado campo do conhecimento (Aria; Cuccurullo, 2017).

Esse tipo de abordagem tem sido amplamente utilizado para identificar tendências emergentes, redes de colaboração, núcleos intelectuais e lacunas científicas em diferentes áreas, incluindo sustentabilidade ambiental, mudanças climáticas e geotecnologias (Donthu et al., 2021; Zupic; Čater, 2015). Trata-se de um estudo documental, pois utiliza exclusivamente dados secundários provenientes de bases indexadas.

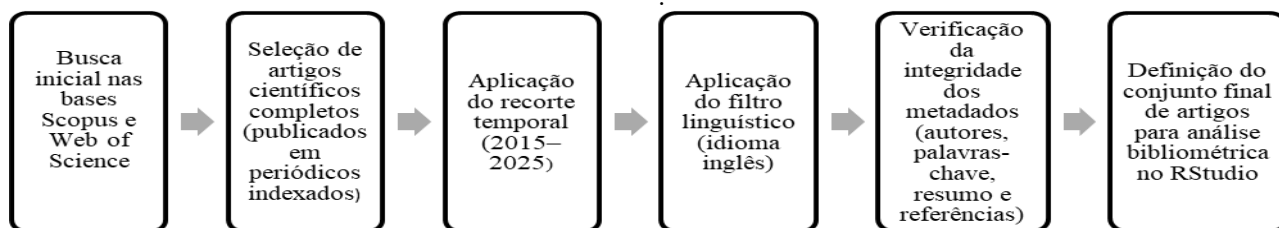
2.2 Procedimentos de coleta de dados

A coleta dos dados foi realizada por meio de levantamento sistemático nas bases *Scopus* e *Web of Science (WoS)*, reconhecidas internacionalmente pela qualidade, rigor de indexação e abrangência multidisciplinar (Monteiro; Santos, 2023). A estratégia de busca foi estruturada com operadores booleanos aplicados aos campos de título, resumo e palavras-chave, visando recuperar publicações relacionadas à aplicação de MDE no monitoramento ambiental costeiro.

Foram adotados os seguintes critérios de inclusão (Figura 1):

Figura 1 - Fluxograma metodológico.

Figure 1 - Methodological flowchart.



Fonte: Autores (2025)
Source: Authors (2025)

Foram aplicadas análises quantitativas descritivas (produção anual, autores mais produtivos, periódicos e países) e análises estruturais de ciência de mapeamento (*science mapping*), incluindo (Tabela 1):

Tabela 1 – Principais técnicas de análise bibliométricas utilizadas no estudo.
 Table 1 – Main bibliometric analysis techniques used in the study.

Técnicas bibliométrica	Definição
Redes de co-citação	Técnica que analisa a frequência com que dois ou mais documentos, autores ou periódicos são citados conjuntamente em outros trabalhos científicos. A co-citação permite identificar relações intelectuais entre estudos e revelar a estrutura teórica de um campo de pesquisa.
Co-ocorrência de palavras-chave	Método que examina a frequência e a associação entre palavras-chave presentes em títulos, resumos ou listas de <i>keywords</i> dos artigos. Essa análise permite identificar os principais temas abordados na literatura e revelar tendências e áreas emergentes de investigação.
Redes de colaboração internacional	Análise das relações de coautoria entre pesquisadores ou instituições de diferentes países. Esse tipo de rede evidencia padrões de cooperação científica, destacando os principais polos de produção do conhecimento e os fluxos de colaboração global.
Identificação de clusters temáticos	Procedimento que agrupa documentos, autores ou palavras-chave com base em similaridades ou conexões bibliométricas. Os clusters representam conjuntos de pesquisas com afinidade temática, permitindo visualizar subáreas, linhas de pesquisa e estruturas conceituais dentro de um campo científico.

Fonte: Adaptado de Aria e Cuccurullo (2017); Donthu et al., (2021); Zupic e Carter (2015)

Source: Adapted from Aria and Cuccurullo (2017); Donthu et al. (2021); Zupic and Čater (2015).

O uso do pacote *Bibliometrix* para construção de redes bibliométricas é amplamente validado na literatura científica recente (Donthu et al., 2021). Adicionalmente, utilizou-se o software RStudio para visualização gráfica complementar das redes de co-ocorrência e co-citação, ferramenta frequentemente empregada em estudos bibliométricos indexados em bases internacionais (Van Eck; Waltman, 2010).

2.3 Rigor metodológico

Para assegurar confiabilidade e reprodutibilidade a *string* de busca foi previamente testada e refinada, foram usados “*ALL=*(“*coastal morpholog*” OR “*coastal erosion*”) AND (“*digital elevation model*” OR DEM OR “*remote sensing*”) AND (*monitor* OR *manag** OR *vulnerab**))” na base *Web of Science* e “*ALL=*(“*coastal morpholog**” OR “*coastal erosion*”) AND (“*digital elevation model*” OR DEM OR “*remote sensing*”) AND (*monitor** OR *manag** OR *vulnerab**))” na base *Scopus*.

O processamento foi conduzido em ambiente estatístico aberto (RStudio), permitindo auditoria metodológica. Esse delineamento metodológico está alinhado às recomendações contemporâneas para estudos de mapeamento científico e revisões bibliométricas estruturadas (Donthu et al., 2021; Zupic; Čater, 2015).

2.4 Limitações da pesquisa

Apesar da robustez metodológica adotada, algumas limitações devem ser consideradas na interpretação dos resultados. Em primeiro lugar, a análise bibliométrica depende diretamente da cobertura e dos critérios de indexação das bases de dados utilizadas. Embora *Scopus* e *Web of Science* sejam amplamente reconhecidas pela qualidade e abrangência de seus registros científicos, ambas apresentam limitações quanto à cobertura de periódicos regionais, literatura cinzenta e publicações em idiomas diferentes do inglês. Dessa forma, parte da produção científica relevante, especialmente aquela publicada em periódicos locais ou em idiomas menos representados nas bases internacionais, pode não ter sido capturada na amostra analisada (Monteiro; Santos, 2023; Donthu et al., 2021).

Outra limitação refere-se à própria natureza dos métodos bibliométricos, que priorizam análises quantitativas da produção científica, baseadas em indicadores como número de publicações, citações e relações entre autores ou palavras-chave. Embora esses indicadores sejam amplamente utilizados para identificar tendências, estruturas intelectuais e redes de colaboração científica, eles não necessariamente refletem a qualidade intrínseca ou o impacto real dos estudos analisados. Além disso, fatores como autocitações, diferenças nas práticas de citação entre áreas do conhecimento e o tempo de maturação das publicações podem influenciar os resultados das análises bibliométricas (Aria; Cuccurullo, 2017; Zupic; Čater, 2015).

Adicionalmente, deve-se considerar que os resultados dependem das estratégias de busca adotadas, incluindo a definição das palavras-chave, operadores booleanos e critérios de filtragem aplicados durante a coleta dos dados. Ainda que a *string* de busca tenha sido cuidadosamente estruturada e testada previamente para garantir a recuperação de estudos relevantes, é possível que algumas publicações relacionadas ao tema não tenham sido incluídas, especialmente aquelas que utilizam terminologias distintas ou abordagens metodológicas específicas. Essa limitação é recorrente em estudos bibliométricos e reforça a importância da transparência metodológica e da reprodutibilidade das estratégias de busca utilizadas na pesquisa (Donthu et al., 2021; Zupic; Čater, 2015).

2.5 Estruturação do corpus bibliográfico e confiabilidade da amostra

Antes da apresentação gráfica dos resultados, é importante destacar que a composição do corpus bibliográfico constitui etapa crítica em estudos bibliométricos, uma vez que influencia diretamente a robustez e a representatividade das análises subsequentes. A utilização combinada das bases *Scopus* e *Web of Science* é amplamente recomendada na literatura por ampliar a cobertura temática e reduzir vieses de indexação (Aria; Cuccurullo, 2017; Donthu et al., 2021).

A busca inicial teve como retorno 1.113 documentos. A aplicação dos filtros de tipo de documento, período e duplicatas resultou no corpus analítico de 638 artigos. A Tabela 2 detalha a estratégia de busca e os resultados iniciais, enquanto a Tabela 3 apresenta o processo sequencial de refinamento, demonstrando o rigor metodológico aplicado para compor uma base de dados robusta e focada.

Tabela 2 – Estratégia de busca e volume de documentos recuperados por base de dados.
Table 2 – Search strategy and volume of documents retrieved per database.

Base de Dados	String de Busca	Quantidade
<i>Web of Science</i>	<i>ALL= ("coastal morpholog" OR "coastal erosion") AND ("digital elevation model" OR DEM OR "remote sensing") AND (monitor OR manag* OR vulnerab*)</i>	341

<i>Scopus</i>	<i>ALL=(("coastal morpholog*" OR "coastal erosion") AND ("digital elevation model" OR DEM OR "remote sensing") AND (monitor* OR manag* OR vulnerab*))</i>	772
Total		1113

Fonte: Autores (2025)
Source: Authors (2025)

Tabela 3 – Processo de filtragem para definição do corpus de análise.

Table 3 – Filtering process for defining the corpus of analysis.

Quantidade Inicial	Critério Aplicado	Quantidade Final
895 (Artigos em periódicos: 311 <i>WoS</i> + 584 <i>Scopus</i>)	Intervalo de 10 anos (2015-2025)	659 (205 <i>WoS</i> + 454 <i>Scopus</i>)
659	Remoção de duplicatas	638

Fonte: Autores (2025)
Source: Authors (2025)

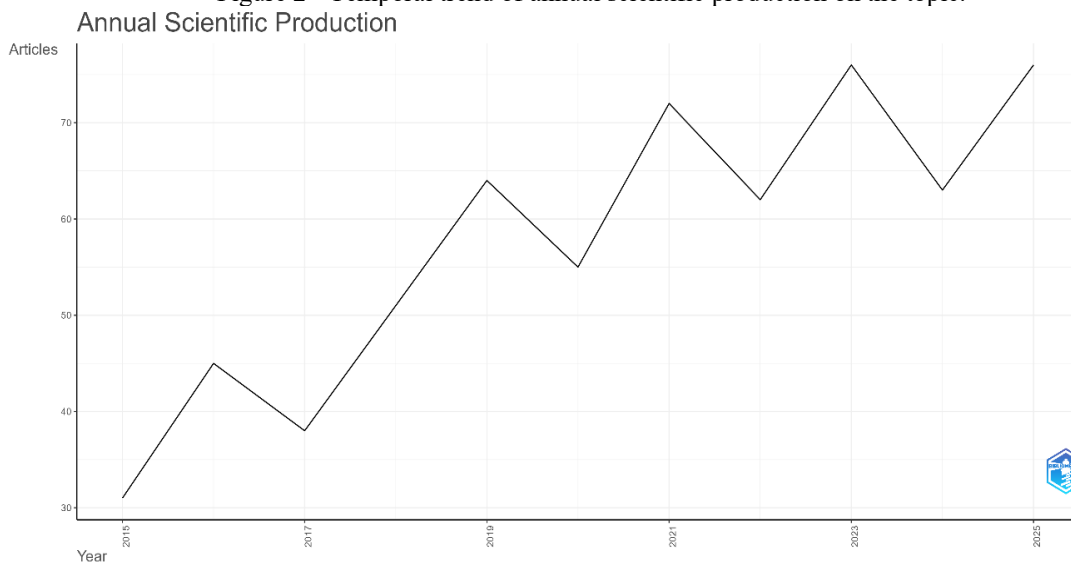
Estudos bibliométricos recentes nas áreas de sustentabilidade ambiental e monitoramento costeiro adotaram estratégia semelhante, reconhecendo que a integração dessas bases permite capturar tanto a produção científica consolidada quanto pesquisas emergentes em periódicos de alto impacto (Li et al., 2022; Xu et al., 2023). Assim, o corpus analisado neste estudo apresenta consistência metodológica e aderência às boas práticas internacionais de mapeamento científico.

3. Resultados e Discussão

3.1 Evolução temporal da produção científica

A análise da produção científica ao longo do tempo constitui um dos indicadores fundamentais para compreender a maturidade e a dinâmica de um campo de pesquisa. Em estudos bibliométricos, o crescimento temporal das publicações costuma refletir tanto avanços tecnológicos quanto o surgimento de novas demandas sociais, ambientais e políticas (Zupic; Čater, 2015) (Figura 2).

Figura 2 - Tendência temporal da produção científica anual sobre o tema.
Figure 2 - Temporal trend of annual scientific production on the topic.



Fonte: Autores (2025)
Source: Authors (2025)

No contexto das zonas costeiras, a intensificação das pesquisas relacionadas ao uso de Modelos Digitais de Elevação e geotecnologias está fortemente associada à ampliação do debate global sobre mudanças climáticas, elevação do nível do mar e aumento da frequência de eventos extremos (Nicholls; Cazenave, 2010; Voudokas et al., 2018). Trabalhos anteriores já indicavam que o aprimoramento de sensores remotos e a popularização de técnicas como LiDAR, VANTs e modelagem digital do terreno impulsionariam significativamente a produção científica nessa área (Turner et al., 2016; Ferreira et al., 2023).

A Figura 2, que apresenta a produção científica anual, revela uma tendência de crescimento notável, particularmente acentuada a partir de 2018. Este aumento coincide com a publicação de relatórios climáticos alarmantes e a maior frequência de desastres costeiros, refletindo uma resposta da comunidade científica à urgência ambiental. A pesquisa tem se intensificado como um subsídio crítico para a ação.

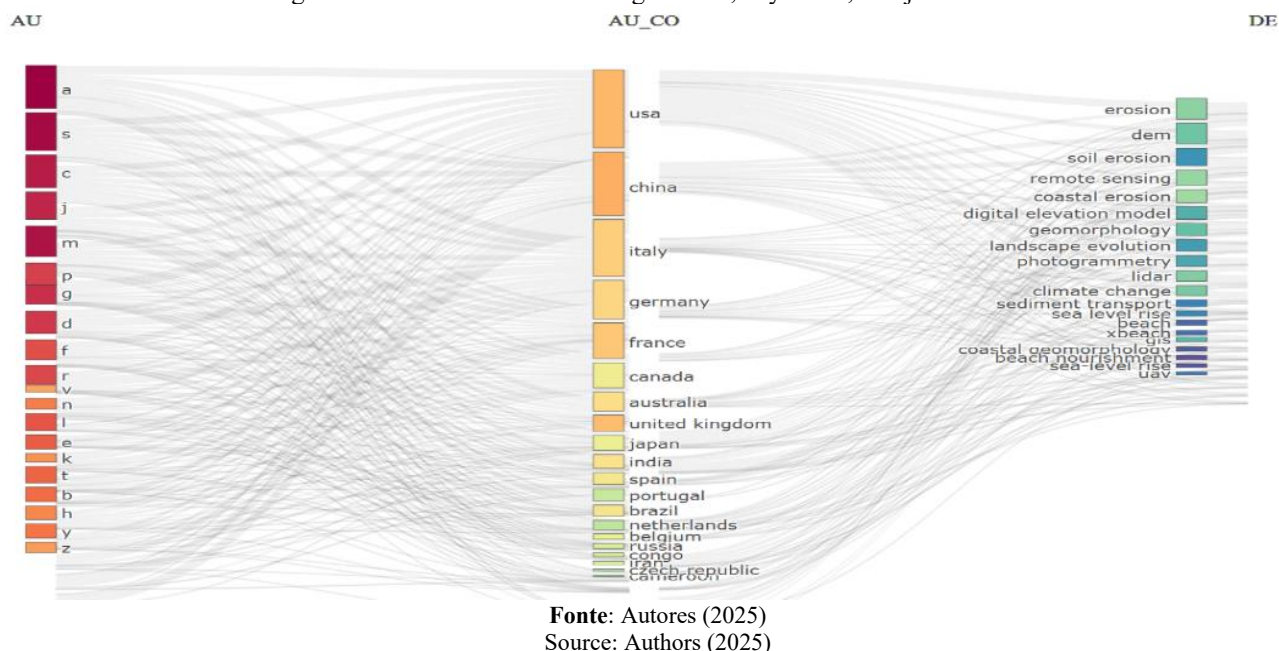
3.2 Periódicos, autores e redes de publicação

A identificação dos periódicos mais relevantes e dos autores mais produtivos permite compreender os principais canais de difusão do conhecimento e os núcleos intelectuais que estruturam determinado campo científico. Segundo Aria e Cuccurullo (2017), essa análise é fundamental para identificar áreas consolidadas, bem como domínios emergentes de pesquisa.

No caso das geotecnologias aplicadas ao ambiente costeiro, observa-se forte inserção em periódicos voltados às ciências ambientais, geomorfologia, oceanografia e sensoriamento remoto, refletindo o caráter interdisciplinar do tema. Estudos metodologicamente semelhantes demonstram que essa interdisciplinaridade é uma característica recorrente em pesquisas que envolvem sustentabilidade costeira, gestão ambiental e análise de riscos naturais (Donthu et al., 2021; Monteiro; Santos, 2023).

O *Three-Field Plot* (Figura 3) conecta autores a palavras-chave como "*vulnerability*", "*climate change*" e "*coastal management*", e a periódicos das áreas de ciências ambientais e oceanografia, mostrando a natureza aplicada e interdisciplinar do campo.

Figura 3 - Diagrama Three-Field Plot relacionando autores, palavras-chave e periódicos/países.
 Figure 3 - Three-Field Plot relating authors, keywords, and journals/countries.



O diagrama de três campos evidencia as relações entre autores, países de afiliação e descritores utilizados nas pesquisas sobre modelos digitais de elevação aplicados à sustentabilidade costeira. Observa-se que a produção científica está concentrada em alguns países, com destaque para Estados Unidos, China, Itália, Alemanha e França, que apresentam maior número de conexões com autores e palavras-chave. Essa concentração indica que esses países atuam como principais polos de pesquisa na área de análise costeira baseada em modelos digitais de elevação.

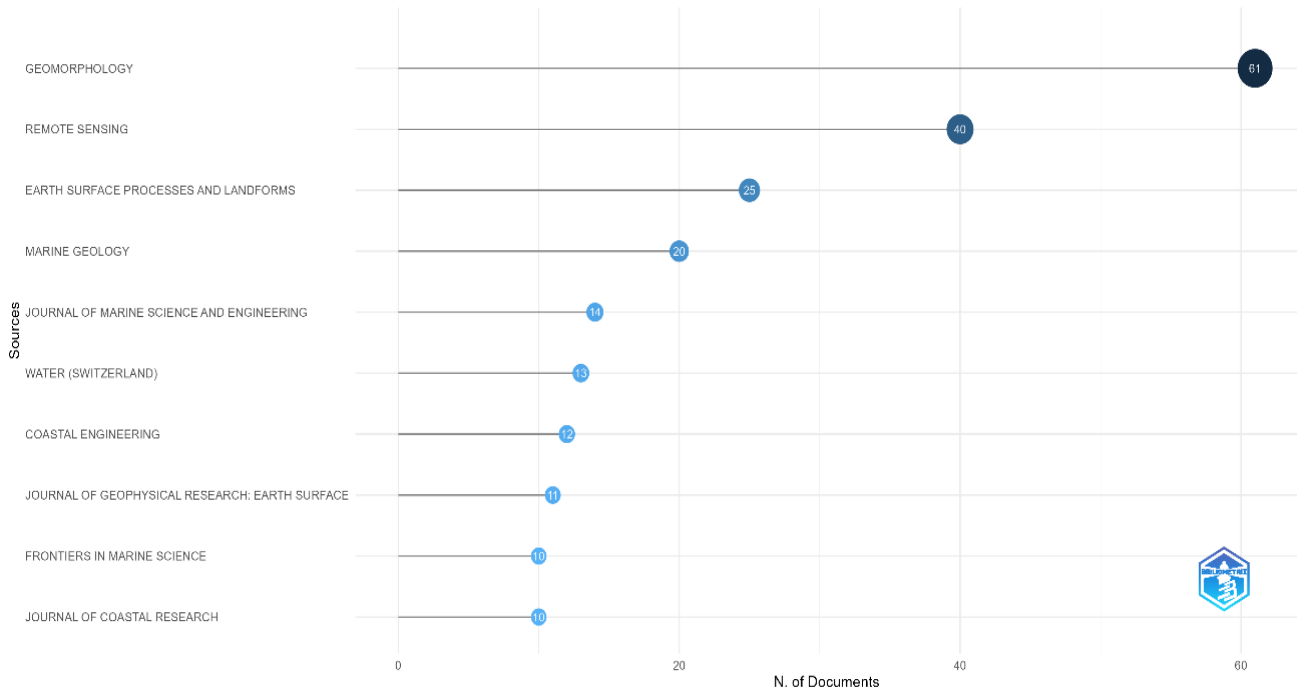
No campo dos descritores, destacam-se termos como: *erosion*; *soil erosion*; *coastal erosion*; *remote sensing*; *digital elevation model*; *geomorphology*; *climate change*; *photogrammetry*; LiDAR. A forte conexão entre *digital elevation model*, *remote sensing*, *photogrammetry* e LiDAR indica que os estudos utilizam predominantemente tecnologias de sensoriamento remoto e dados altimétricos para analisar a dinâmica costeira. Esses métodos são amplamente empregados para monitoramento da morfodinâmica costeira, mapeamento topográfico e avaliação de processos erosivos (Ferreira et al., 2023).

Além disso, a presença de descritores como *climate change* e *sea level rise* sugere que parte significativa das pesquisas relaciona os processos erosivos costeiros aos impactos das mudanças climáticas, especialmente no contexto de aumento do nível do mar e intensificação de eventos extremos. As conexões entre países e descritores também indicam uma distribuição temática relativamente homogênea, com diferentes grupos de pesquisa investigando temas semelhantes, principalmente ligados à erosão costeira, geomorfologia e uso de modelos digitais de elevação para análise ambiental.

De forma geral, o gráfico evidencia que a literatura científica sobre sustentabilidade costeira baseada em modelos digitais de elevação é caracterizada por forte integração entre técnicas geoespaciais, sensoriamento remoto e estudos geomorfológicos, consolidando essas ferramentas como fundamentais para o monitoramento e gestão de ambientes costeiros.

A Figura 4 destaca os periódicos de maior impacto, muitos deles dedicados a temas ambientais e de conservação.

Figura 4 - Periódicos científicos mais relevantes na base analisada.
Figure 4 - Most relevant scientific journals in the analyzed database.
 Most Relevant Sources



Fonte: Autores (2025)

Source: Authors (2025)

A figura 4 apresenta as fontes científicas mais relevantes no campo de estudo, evidenciando os periódicos com maior número de publicações relacionadas à temática analisada. Destacam-se revistas consolidadas como *Geomorphology*, *Remote Sensing* e *Earth Surface Processes and Landforms*, que concentram a maior produção científica, indicando sua centralidade na disseminação do conhecimento sobre dinâmica costeira e aplicações de geotecnologias. E, estudos bibliométricos, a identificação das principais fontes permite compreender onde o conhecimento está sendo produzido e difundido, além de indicar os periódicos de maior fator de impacto e relevância em determinado domínio científico (Donthu et al., 2021). Nesse sentido, a concentração de artigos em periódicos específicos reflete não apenas a maturidade do campo, mas também a existência de canais consolidados de comunicação científica.

A diversidade de periódicos revela uma forte interdisciplinaridade, com a presença de revistas voltadas à geomorfologia, sensoriamento remoto, geologia marinha e engenharia costeira. Esse padrão indica que os estudos sobre erosão costeira e modelos digitais de elevação estão inseridos em um campo científico transversal, que integra abordagens físicas, tecnológicas e ambientais. A literatura aponta que análises bibliométricas são fundamentais para mapear essa estrutura interdisciplinar, permitindo identificar como diferentes áreas do conhecimento contribuem para a evolução de um determinado tema (Aria; Cuccurullo, 2017). Além disso, a diversidade de fontes sugere que a pesquisa na área tem se expandido para além dos núcleos tradicionais, incorporando novas abordagens metodológicas e tecnológicas.

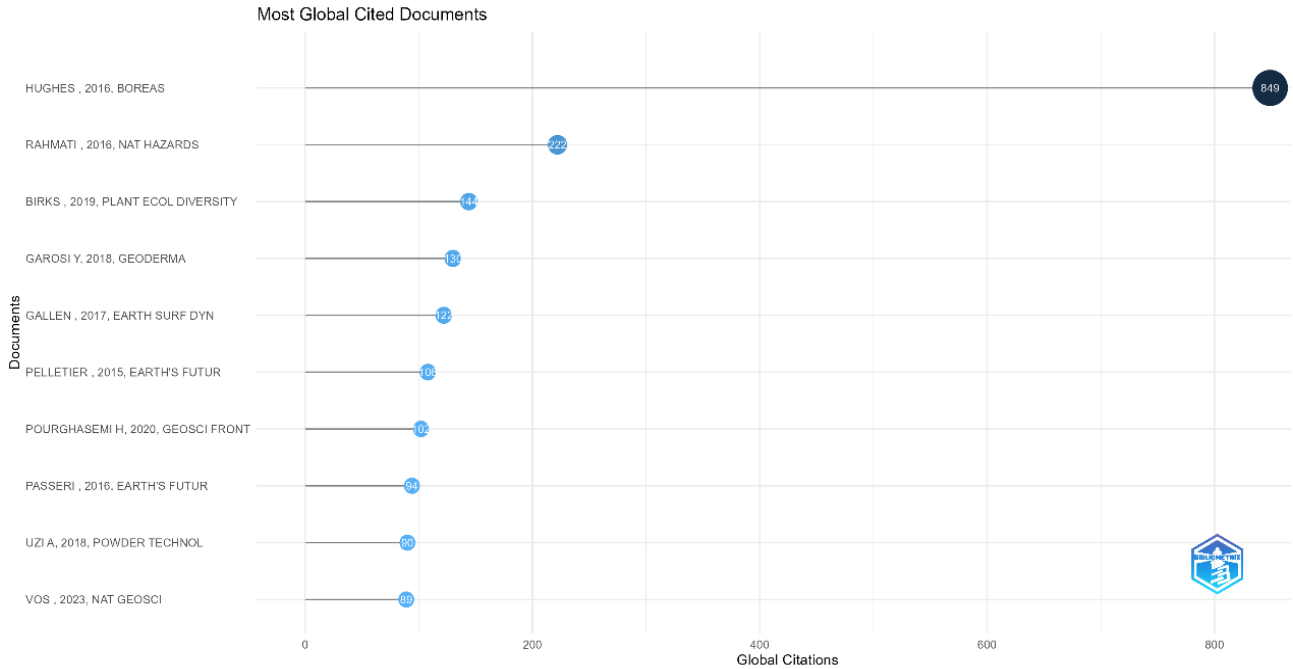
A predominância de determinados periódicos também pode estar associada à cobertura das bases de dados utilizadas, como *Scopus* e *Web of Science*, que tendem a indexar majoritariamente periódicos internacionais de alto impacto, especialmente nas áreas de ciências naturais e engenharia. Esse fator pode influenciar a visibilidade e a concentração da produção científica em determinados veículos, reforçando padrões já consolidados na literatura acadêmica global. Estudos comparativos indicam que essas bases

apresentam diferenças de cobertura, mas mantêm forte convergência na identificação das principais fontes científicas, o que reforça a robustez dos resultados bibliométricos (Duarte; Pavani, 2025). Assim, a análise das fontes mais relevantes contribui para compreender a estrutura de publicação do campo e orientar futuras estratégias de pesquisa e submissão científica.

A Figura 5 identifica os autores mais citados, muitos dos quais estão vinculados a instituições de países que enfrentam grandes desafios costeiros.

Figura 5 - Os 10 documentos mais citados globalmente no corpus analisado.

Figure 5 - The 10 most cited documents globally in the analyzed corpus.



Fonte: Autores (2025)

Source: Authors (2025)

A análise dos autores mais citados permite identificar os estudos que estruturam a base conceitual e metodológica da literatura sobre erosão costeira e aplicação de Modelos Digitais de Elevação (MDE). De modo geral, os trabalhos com maior número de citações concentram-se em três eixos principais: o uso de geotecnologias para monitoramento ambiental, a análise da vulnerabilidade costeira frente às mudanças climáticas e estudos aplicados de dinâmica morfodinâmica em diferentes regiões litorâneas. Esse padrão indica que o campo de pesquisa tem evoluído a partir da integração entre geomorfologia costeira, sensoriamento remoto e modelagem digital do terreno, consolidando abordagens cada vez mais baseadas em dados geoespaciais de alta resolução.

Entre os artigos mais influentes, destacam-se aqueles que exploram o potencial de técnicas como LiDAR, fotogrametria e sensoriamento remoto orbital para a geração de MDE de alta precisão. Esses estudos demonstram como a análise detalhada da topografia costeira permite quantificar taxas de erosão, identificar padrões de transporte sedimentar e compreender a evolução morfológica de praias e sistemas costeiros. Nesse contexto, pesquisas recentes, como a de Ferreira et al., (2024), reforçam a importância da integração entre modelos digitais de elevação e ferramentas de análise espacial para aprimorar o monitoramento ambiental e apoiar estratégias de gestão costeira baseadas em evidências científicas.

Outro conjunto relevante de trabalhos altamente citados está relacionado à avaliação da vulnerabilidade costeira diante dos impactos das mudanças climáticas, especialmente no que se refere à

elevação do nível do mar e à intensificação de eventos extremos. Esses estudos frequentemente combinam dados topográficos derivados de MDE com modelos preditivos e indicadores socioambientais, permitindo identificar áreas mais suscetíveis à erosão e à inundação, como Amaral et al., (2025). A ampla repercussão desses artigos na literatura científica evidencia a crescente preocupação da comunidade acadêmica com os riscos associados às transformações ambientais nas zonas costeiras e reforça o papel das geotecnologias como ferramentas essenciais para o planejamento e a gestão sustentável desses ambientes.

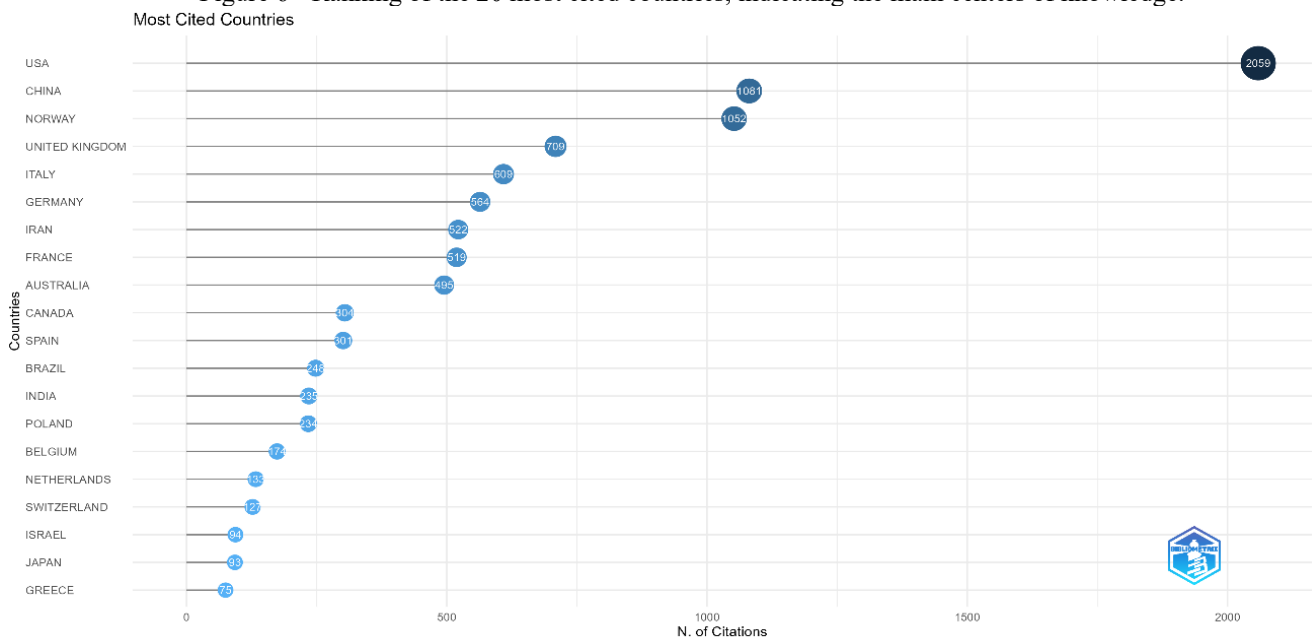
3.3 Distribuição geográfica da produção científica e colaboração internacional

A análise da distribuição espacial das publicações e das redes de colaboração internacional fornece importantes subsídios para a compreensão das assimetrias globais na produção do conhecimento científico. Países com maior investimento em ciência e tecnologia e com histórico de eventos extremos tendem a liderar a produção científica na área (Li et al., 2022). Além disso, análises recentes reforçam a concentração da produção científica em países desenvolvidos, enquanto regiões do sul global permanecem sub-representadas, apesar de apresentarem maior vulnerabilidade ambiental (Genchi et al., 2025). Essa assimetria pode influenciar a definição de prioridades de pesquisa e limitar a aplicação de modelos e metodologias em regiões tropicais e em países em desenvolvimento (Ankrah et al., 2022).

A distribuição geográfica do impacto científico (Figura 6) mostra a liderança dos Estados Unidos da América (USA), China e Reino Unido, nações com extensos litorais, grande investimento em pesquisa e desenvolvimento, além de históricos de desastres ambientais costeiros que demandam soluções tecnológicas. De forma semelhante, esses países também desempenham papel central no desenvolvimento de pesquisas voltadas à economia azul, exercendo forte influência na definição das agendas científicas no contexto global (Liang et al., 2022), norteando e financiando pesquisas, inclusive as litorâneas, evidenciando a centralidade da produção científica em países de maior capacidade tecnológica, o que pode influenciar a definição de prioridades de pesquisa em escala global.

Figura 6 - Ranking dos 20 países mais citados, indicando os principais pólos de conhecimento.

Figure 6 - Ranking of the 20 most cited countries, indicating the main centers of knowledge.



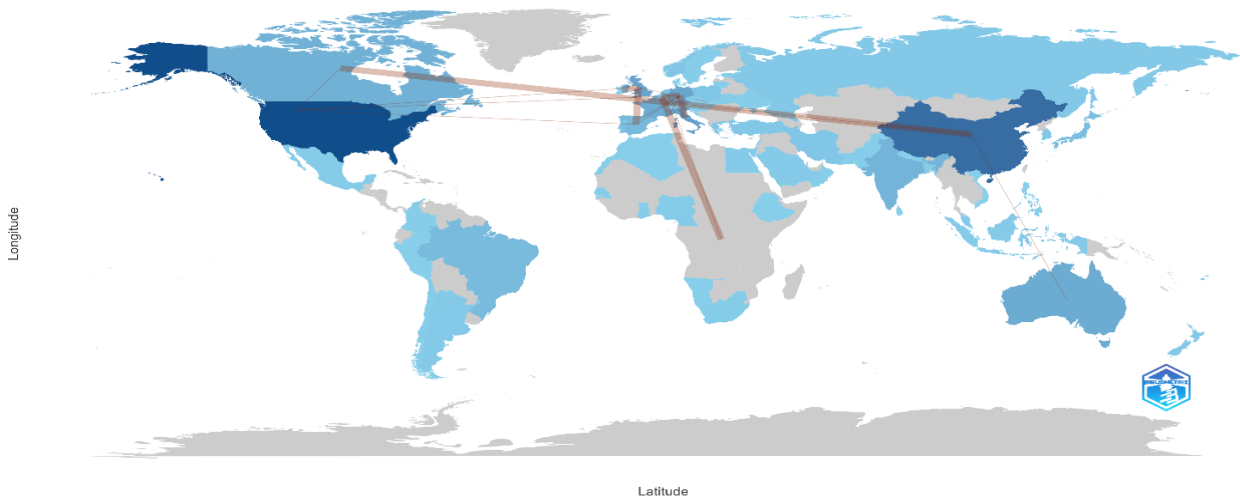
Fonte: Autores (2025)

Source: Authors (2025)

O mapa de colaboração mundial (Figura 7), mostra que a ciência para a sustentabilidade costeira é uma empreitada global e colaborativa, com redes conectando países desenvolvidos e em desenvolvimento. Entretanto, a literatura aponta que regiões tropicais, apesar de sua elevada biodiversidade e vulnerabilidade socioambiental, ainda são sub-representadas em estudos de alta resolução, especialmente aqueles baseados em MDE e monitoramento contínuo (Muehe, 2018; Ferreira et al., 2024).

Figura 7 - Mapa mundial de colaboração científica entre países.
Figure 7 - Global scientific collaboration network between countries.

Country Collaboration Map



Fonte: Autores (2025)
Source: Authors (2025)

Esse padrão reforça a necessidade de ampliar colaborações internacionais e fortalecer capacidades técnicas em países em desenvolvimento, conforme discutido em estudos recentes sobre ciência global e sustentabilidade ambiental, conforme demonstrado na tabela 4.

Tabela 4 – Países mais citados no conjunto de dados.
Table 4 – Most Cited Countries in the Dataset.

Ranking	País	Citações	Porcentagem (%)
1	USA	2059	21,39
2	China	1081	11,23
3	Norway	1052	10,93
4	United Kingdom	709	7,37
5	Italy	608	6,32
6	Germany	564	5,86
7	Iran	522	5,42
8	France	519	5,39
9	Australia	495	5,14

10	Canada	304	3,16
11	Spain	301	3,13
12	Brazil	248	2,58
13	India	235	2,44
14	Poland	234	2,43
15	Belgium	174	1,81
16	Netherlands	133	1,38
17	Switzerland	127	1,32
18	Israel	94	0,98
19	Japan	93	0,97
20	Greece	75	0,78
Total		9.627	100

Fonte: Autores (2025)

Source: Authors (2025)

A análise dos 20 países mais citados, conforme detalhado na tabela 3, demonstra que os estudos de caso são referência internacional na aplicação de MDE e geotecnologias para o monitoramento costeiro. Os USA, líderes em citações (21,39%), destacam-se por pesquisas em cenários de erosão em contexto geológicos e climáticos diversos, como a análise temporal como a utilizada por Lu et al., (2025) e a influência dos manguezais na linha de costa feito por Pennins et al., (2021). De forma paralela, estudos de caso provenientes da China (11,23%) e Noruega (10,93%) ilustram abordagens metodológicas diversas para a investigação de processo nas zonas costeiras. Na China, estudos sobre a dinâmica de sedimentos é mais amplificada, Chen e Jia (2025), investiga a praia Dasha e faz essa quantificação com o uso de VANTs de alta resolução. Na Noruega, destaca-se por estudos que relacionam fotografias aéreas históricas com o uso de GPS diferencial, drone e Laser Scanner Terrestre (TLS), para o monitoramento de taxas de erosão costeira, como o estudo de Nicu et al., (2020).

Os três primeiros países em citação representam quase metade das citações mundiais, indicando uma significativa concentração da produção científica. No entanto, os demais países seguem contribuindo para o avanço metodológico e a compreensão da morfodinâmica costeira em diferentes contextos ambientais. Embora a produção científica se concentre em países com maior capacidade tecnológica, nações de diferentes continentes vem consolidando abordagens metodológicas e socioambientais vinculadas às zonas litorâneas, com avanços significativos na validade de dados de sensoriamento remoto por meio de levantamentos de campo com o uso de GNSS e VANTs na modelagem para a gestão costeira sustentável como Elkotby, (2026), Christofi et al., (2025), Oyedotun et al., (2025) e Büyüksalih e Gazioğlu (2024), Santos et al., (2015), Amaral et al., (2025), Teixeira et al., (2024) e Ferreira et al., (2024).

3.4 Análise temática e integração entre geotecnologias e sustentabilidade

A análise de coocorrência de palavras-chave permite identificar os principais eixos temáticos que estruturam a produção científica. Em estudos bibliométricos, essa abordagem é amplamente utilizada para revelar tendências emergentes e a evolução conceitual de um campo de pesquisa (Zupic; Čater, 2015). Além disso, a literatura indica uma transição progressiva do uso das geotecnologias de abordagens descritivas para aplicações preditivas e integradas, especialmente no contexto da adaptação baseada em ecossistemas e da gestão costeira sustentável (Vousdokus et al., 2018; Ferreira et al., 2024), a nuvem de palavras (Figura 8) dos autores exemplifica essa constatação.

4. Conclusão

Esta análise bibliométrica demonstra que a pesquisa sobre monitoramento costeiro por geotecnologias está intrinsecamente ligada à agenda ambiental global. O crescimento exponencial da literatura, impulsionado pela crise climática, sinaliza um campo de pesquisa maduro e direcionado a oferecer soluções. A predominância de temas como vulnerabilidade, gestão e mudanças climáticas nos clusters de pesquisa indica uma trajetória positiva, na qual a tecnologia serve como alicerce para a ciência da sustentabilidade.

Os resultados reforçam a necessidade de políticas públicas que incorporem sistematicamente os dados e modelos gerados por essa linha de pesquisa no planejamento costeiro, na criação de áreas protegidas e na definição de estratégias de adaptação baseadas na natureza. Para que o potencial transformador desse conhecimento seja plenamente realizado, é essencial superar as assimetrias geográficas identificadas. Fomentar capacitação técnica e colaborações internacionais equitativas para ampliar o monitoramento de alta qualidade em regiões tropicais é um imperativo ético e científico.

Portanto o caminho traçado pela literatura aponta para um futuro no qual a observação da Terra de precisão será cada vez mais crucial para proteger a integridade ecológica das zonas costeiras, salvaguardar os serviços que prestam à humanidade e construir sociedades mais resilientes. Este mapeamento serve, portanto, não apenas como um diagnóstico acadêmico, mas como um chamado para uma ação ambiental informada, colaborativa e urgentemente necessária. Os resultados reforçam o papel das Ciências Ambientais e áreas correlatas na integração de geotecnologias como suporte à gestão costeira sustentável frente às mudanças climáticas.

5. Referências

- Amaral, D. M.; Moreno, D. dos S.; Santana, F. de O.; Teixeira, N. N.; Silva, T. M.; Michel, R. F. M. Gestão costeira: avaliação da acurácia altimétrica em levantamentos topográficos com RPA para fins de monitoramento de impactos ambientais. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 16, n. 8, e 5140, 2025. DOI: <https://doi.org/10.7769/gesec.v16i8.5140>.
- Aria, M.; Cuccurullo, C. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>.
- Ankrah, J.; Monteiro, A.; Madureira, H. Bibliometric analysis of data sources and tools for shoreline change analysis and detection. **Sustainability**, v. 14, n. 9, p. 4895, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14094895>
- Büyüksalih, G.; Gazioğlu, C. Editorial for a Special Issue: Assessment of Coastal Vulnerability to Sea Level Rise Using Remote Sensing. **PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science**, v. 92, p. 315–316, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41064-024-00302-1>
- Chen, Q.; Jia, J. Morphodynamic responses of a headland-bay beach to sequential typhoons. **Marine Geology**, v. 442, 106915, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2025.106915>
- Christofi, D. A. D.; Mettas, C.; Evágoro, V.; Stylianou, N.; Eliades, M.; Teocharidis, C.; Chatzipavlis, A.; Hasiolis, T.; Hadjimitsis, D. A Review of Open Remote Sensing Data with GIS, AI, and UAV Support for Shoreline Detection and Coastal Erosion Monitoring. **Applied Sciences**, v. 15, n. 9, 4771, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15094771>

Donthu, N.; Kumar, S.; Mukherjee, D.; Pandey, N.; Lim, W. M. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. **Journal of Business Research**, v. 133, p. 285–296, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>.

Duarte, J. D. R. da S.; Pavani, L. Bibliometric comparative analysis of Web of Science, Scopus, and Pubmed Data Bases: A general approach to martial arts. **Journal of Kinesiology and Exercise Sciences**, 110 (35): 61-76, 2025. DOI: 10.5604/01.3001.0055.1741

Elkotby, M. R. Progression in Coastal Vulnerability Index (CVI) approaches for assessing risk: A comprehensive review, **Journal of African Earth Sciences**, Volume 234, 2026, 105917, ISSN 1464-343X, <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2025.105917>.

Ferreira, A. T. da S.; Grohmann, C. H.; Ribeiro, M. C. H.; Santos, M. S. T.; Oliveira, R. C.; Siegle, E. Beach surface model construction: a strategy approach with structure from motion – multi-view stereo. **MethodsX**, v. 12, p. 102694, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.102694>.

Ferreira, A. T. da S.; Oliveira, R. C.; Ribeiro, M. C. H.; Grohmann, C. H.; Siegle, E. Coastal dynamics analysis based on orbital remote sensing big data and multivariate statistical models. **Coasts**, v. 3, n. 2, p. 160–174, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/coasts3020010>.

Genchi, S. A.; Vitale, A. J.; Perillo, G. M. E. Coastal cliff erosion: a bibliometric analysis and literature review. **Anthropocene Coasts**, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44218-025-00072-2>

Li, X.; Zhang, Y.; Wang, J. Global trends in coastal vulnerability assessment research: a bibliometric analysis. **Ocean & Coastal Management**, v. 227, 106281, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106281>.

Liang, J.; Yin, Z.; Yang, J.; Li, Y.; Xu, M.; Li, J.; Yang, M.; Niu, L.. Bibliometrics and visualization analysis of research in the field of sustainable development of the blue economy (2006–2021). **Frontiers in Marine Science**, v. 9, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.936612>

Lu, B.; Wang, W.; Jordan, N.; Wright, D.; Bechle, A.; Zoet, L.; Wu, CA multi-scale assessment for managing coastal geomorphic changes in southwestern Lake Michigan, **Journal of Environmental Management**, Volume 395, 2025, 127878, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.127878>.

Masselink, G.; Hughes, M. G. **Introduction to coastal processes and geomorphology**. London: Hodder Arnold, 2003.

Monteiro, M. C.; Santos, R. P. Scientific production in environmental monitoring: a bibliometric review. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 195, 11025, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11025-7>.

Muehe, D. **Geomorfologia costeira do Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2018.

Nicholls, R. J.; Cazenave, A. Sea-level rise and its impact on coastal zones. **Science**, v. 328, n. 5985, p. 1517–1520, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1185782>.

Nicu, I. C.; Stalsberg, K.; Rubensdotter, L.; Martens, V. V.; Flyen, A. C. Coastal Erosion Affecting Cultural Heritage in Svalbard. A Case Study in Hiorthhamn (Adventfjorden)—An Abandoned Mining Settlement. **Sustainability**, v. 12, n. 6, 2306, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12062306>

Oyedotun, T. D. T.; Poortinga, A.; Teneson, K.; Wafiq, M. W.; Suaruang, W.; Nicolau, A. P.; Hamer, E. A.; Nedd, G. A.; Burningham, H.. Developing a coastal analysis system: the Guyana coastal analysis system (G-CAS) as an example for small island developing states (SIDS). **Frontiers in Environmental Science**, v. 13, 1600858, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1600858>

Pennings, S. C.; Glazner, R. M.; Hughes, Z. J.; Kominoski, J. S.; Armitage, A. R. Effects of mangrove cover on coastal erosion during a hurricane in Texas, USA. **Ecology**, v. 102, n. 4, p. e03309, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecy.3309>

Santos, M. S. T.; Amaro, V. E.; Ferreira, A. T. da S.; Barboza, A. de A.; Figueiredo, M. C.; Araújo, A. G. Metodologia para mapeamento de vulnerabilidade costeira à elevação do nível médio do mar em escala local. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 21, n. 4, p. 691–705, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1982-21702015000400040>.

Teixeira, N. N.; Santos, M. S. T.; Souza, R. P.; LIMA, C. A.; Cruz Júnior, D. C.; Lima, J. S. Análise do desempenho de mapeamento planialtimétrico topográfico executado com aeronave remotamente pilotada para fins de caracterização de zonas de praia. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, v. 17, n. 1, p. 3750–3782, 2024. DOI: <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.1-223>.

Turner, I. L.; Harley, M. D.; Short, A. D.; Simmons, J. A.; Bracs, M. A.; Splinter, K. D. A multi-decade dataset of monthly beach profile surveys and inshore wave forcing at Narrabeen, Australia. **Scientific Data**, v. 3, 160024, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.24>.

Van Eck, N. J.; Waltman, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics**, v. 84, p. 523–538, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>.

Vousdokas, M. I.; Mentaschi, L.; Voukouvalas, E.; Bianchi, A.; Dottori, F.; Feyen, L. Climatic and socioeconomic controls of future coastal flood risk in Europe. **Nature Climate Change**, v. 8, n. 9, p. 776–780, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0260-4>.

Xu, Z.; Liu, H.; Chen, L. Research trends in digital elevation model applications for coastal environments: a bibliometric study. **Remote Sensing**, v. 15, n. 5, 1234, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15051234>.

Zupic, I.; Čater, T. Bibliometric methods in management and organization. **Organizational Research Methods**, v. 18, n. 3, p. 429–472, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1177/1094428114562629>.