

<https://rbgeomorfologia.org.br/>  
ISSN 2236-5664

## Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 26, nº 4 (2025)

<https://dx.doi.org/10.20502/rbg.v26i4.2716>



Artigo de Pesquisa

# Função Protetiva de Habitats Costeiros na Mitigação da Vulnerabilidade Erosiva: Estudo de Caso em Praias Arenosas do Atlântico Equatorial, Nordeste do Brasil

*The Protective Function of Coastal Habitats in Mitigating Erosive Vulnerability: A Case Study on Sandy Beaches of the Equatorial Atlantic, Northeastern Brazil*

Gabriel Dalla Rosa Carvalho<sup>1</sup>, Venerando Eustáquio Amaro<sup>2</sup>, Lívian Rafaely de Santana Gomes Pinheiro<sup>3</sup>, Nadia Selene Zamboni<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Natal, Brasil. [gabrieldrcarvalho@gmail.com](mailto:gabrieldrcarvalho@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2026-5211>

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Natal, Brasil. [venerando.amaro@gmail.com](mailto:venerando.amaro@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7357-2200>

<sup>3</sup> Universidade Federal do Ceará, Departamento de Geologia, Fortaleza, Brasil. [livianrafaely@gmail.com](mailto:livianrafaely@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6606-8807>

<sup>4</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Laboratório de Geotecnologias Aplicadas, Modelagens Costeira e Oceânica, Natal, Brasil. [nselenezamboni@gmail.com](mailto:nselenezamboni@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7828-5910>

Recebido: 22/06/2025; Aceito: 10/11/2025; Publicado: 09/12/2025

**Resumo:** Os ambientes costeiros estão sujeitos à intensa pressão de fatores naturais e antrópicos, que frequentemente culminam em alterações paisagísticas, como a erosão de praias arenosas. No litoral setentrional do Rio Grande do Norte (RN), a rápida expansão urbana e turística intensificou esses processos. Este estudo avalia a vulnerabilidade costeira à erosão ao longo de trechos de praias arenosas no município de São Miguel do Gostoso (RN), considerando a função protetiva de habitats naturais, especificamente dunas, vegetação e faixas de praia. A metodologia baseia-se em dados de sensoriamento remoto e geoprocessamento, envolvendo a análise da variação histórica da linha de costa entre 1986 e 2023, por meio da aplicação do Índice de Vulnerabilidade Costeira, através do modelo *Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs* (InVEST). Os resultados indicam um aumento na mobilidade média da linha de costa no período recente (2014–2023), com intensificação das taxas mínimas e máximas de variação, especialmente em áreas sujeitas a maior antropização, onde a taxa de erosão média atinge -14,55m/ano. Constatou-se ainda que as dunas e praias arenosas funcionam como barreiras naturais eficazes, reduzindo os riscos de erosão. A conservação desses habitats é essencial para o equilíbrio ambiental da zona costeira, especialmente diante da crescente expansão urbana no município.

**Palavras-chave:** Infraestruturas costeiras; InVEST; Modelagem hidrossedimentar; Uso e cobertura do solo litorâneo.

**Abstract:** Coastal environments are subject to intense pressure from both natural and anthropogenic factors, often culminating in landscape alterations such as sandy beach erosion. On the northern coast of Rio Grande do Norte (RN), rapid urban and tourist expansion has intensified these processes. This study assesses coastal vulnerability to erosion along sandy beaches segments in the municipality of São Miguel do Gostoso (RN), considering the protective function of natural habitats,

specifically dunes, vegetation, and beach stretches. The methodology is based on remote sensing and geoprocessing data, involving the examination of historical shoreline variation from 1986 to 2023, as the application of the Coastal Vulnerability Index via the Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs (InVEST) model. The results indicate an increase in mean shoreline mobility during the more recent period (2014–2023), with intensified minimum and maximum rates of variation, particularly in areas subjected to greater anthropogenic influence, where the average erosion rate reaches -14.55 m/year. It was further found that dunes and sandy beaches function as effective natural barriers, thereby reducing erosion. The conservation of these habitats is essential for the environmental balance of the coastal zone, especially in the face of increasing urban expansion in the municipality.

**Keywords:** Coastal infrastructures; InVEST; Hydro-sedimentary modeling; Coastal land use and cover.

---

## 1. Introdução

Zonas costeiras são ambientes de intensa geodinâmica externa, resultante da ação combinada de fatores naturais e antropogênicos. As forças hidrodinâmicas e climatológicas atuam na modificação permanente desses ambientes. Paralelamente, as atividades antrópicas e a ocupação do solo litorâneo alteram significativamente o arranjo espacial das feições naturais costeiras (Chen et al., 2015). No litoral do Nordeste brasileiro, esse cenário de transformação da paisagem costeira é histórico, resultando em mudanças significativas nos volumes de sedimentos, nos processos físicos de transporte transversal e longitudinal, e em alterações na biogeoquímica dos ecossistemas costeiros (Brasil, 2002; Marroni; Asmus, 2005; Muehe, 2018; Prudêncio et al., 2019; Vousdoukas et al., 2020; Matos et al., 2022a; 2022b). Consequentemente, as comunidades costeiras dessa região tornam-se mais vulneráveis à dinâmica costeira, sofrendo perdas materiais e, ocasionalmente, perdas de vidas humanas devido a deslizamentos de massa em falésias costeiras ativas (Amaro et al., 2014; Pollock; Wartman, 2020; Juvino da Silva et al., 2023). Em contrapartida, a manutenção da integridade de habitats naturais auxilia na proteção das zonas costeiras, aumentando sua resiliência a eventos erosivos e, consequentemente, reduzindo riscos ambientais (Guannel et al., 2016).

A complexa interação entre eventos naturais e ações antrópicas no ambiente costeiro frequentemente resulta em eventos erosão sedimentar em praias arenosas, caracterizada pela retração da linha de costa (Charlier; Meyer, 1998; Wannowitz et al., 2014). A linha de costa é definida como a representação espacial linear contínua da interface terra-água na face da praia, delimitando a área seca e molhada, ou o alcance máximo da linha d'água do espraiamento das ondas na maré de preamar (Parker, 2003; Santos; Amaro; Souto, 2011; Amaro et al., 2014; Muehe; Klumb-Oliveira, 2014). Em se tratando de uma feição natural evidente para observação *in loco* ou através de sensoriamento remoto, inclusive com amparo de algoritmos computacionais, a linha de costa é amplamente utilizada em estudos sobre erosão costeira (Luijendijk et al., 2018; Vousdoukas et al., 2020; Almeida et al., 2021; Matos et al., 2022).

Outra abordagem de avaliação dos efeitos erosivos em praias arenosa é a utilização de índices de vulnerabilidade. Vulnerabilidade costeira associa-se à susceptibilidade de sistemas naturais e humanos a eventos costeiros perigosos como erosão, inundação e tempestades (IPCC, 2014; Pollard et al. 2018). A complexa relação entre as forças, a resposta morfológica do sistema e os receptores de risco exige que o Gerenciamento Costeiro Integrado analise os riscos de erosão e inundação de forma interativa (Pollard et al. 2018). Na perspectiva da gestão costeira integrada, a avaliação da vulnerabilidade permite identificar áreas prioritárias para mitigação e adaptação, subsidiando políticas de redução de riscos de desastres e conservação de serviços ecossistêmicos.

Estudos como Busman, Amaro e Souza-Filho (2016) e Lacerda et al. (2022) avaliam a exposição de ambientes costeiros no litoral setentrional do estado do Rio Grande do Norte (RN) por meio de índices de vulnerabilidade física e ambiental que permitem considerar variáveis como: geologia, geomorfologia, declividade, pedologia, cobertura vegetal e uso e cobertura do solo para classificar o nível de vulnerabilidade. Assim, a vulnerabilidade costeira requer análise abrangente para compreender sua complexidade, avaliando a influência de diversas variáveis, incluindo os impactos antropogênicos. Estudos da erosão sedimentar e vulnerabilidade costeira têm sido realizados no litoral do RN (Grigio et al., 2006; Busman; Amaro; Souza-Filho, 2016; Prudêncio; Amaro; Scudelari, 2019; Amaro et al., 2021a; Matos et al., 2022; Lacerda et al., 2022; Zamboni et al., 2022; Zamboni et al., 2025). Nessas pesquisas, avaliações da vulnerabilidade costeira com e sem ecossistemas costeiros naturais revelaram a importância da cobertura natural na proteção das populações litorâneas contra alterações climáticas e processos erosivos. Adicionalmente, ferramentas de geoprocessamento demonstraram eficácia em estudos litorâneos,

proporcionando celeridade, eficiência econômica e consistência com observações *in situ* (Almeida et al., 2021; Araújo, 2022).

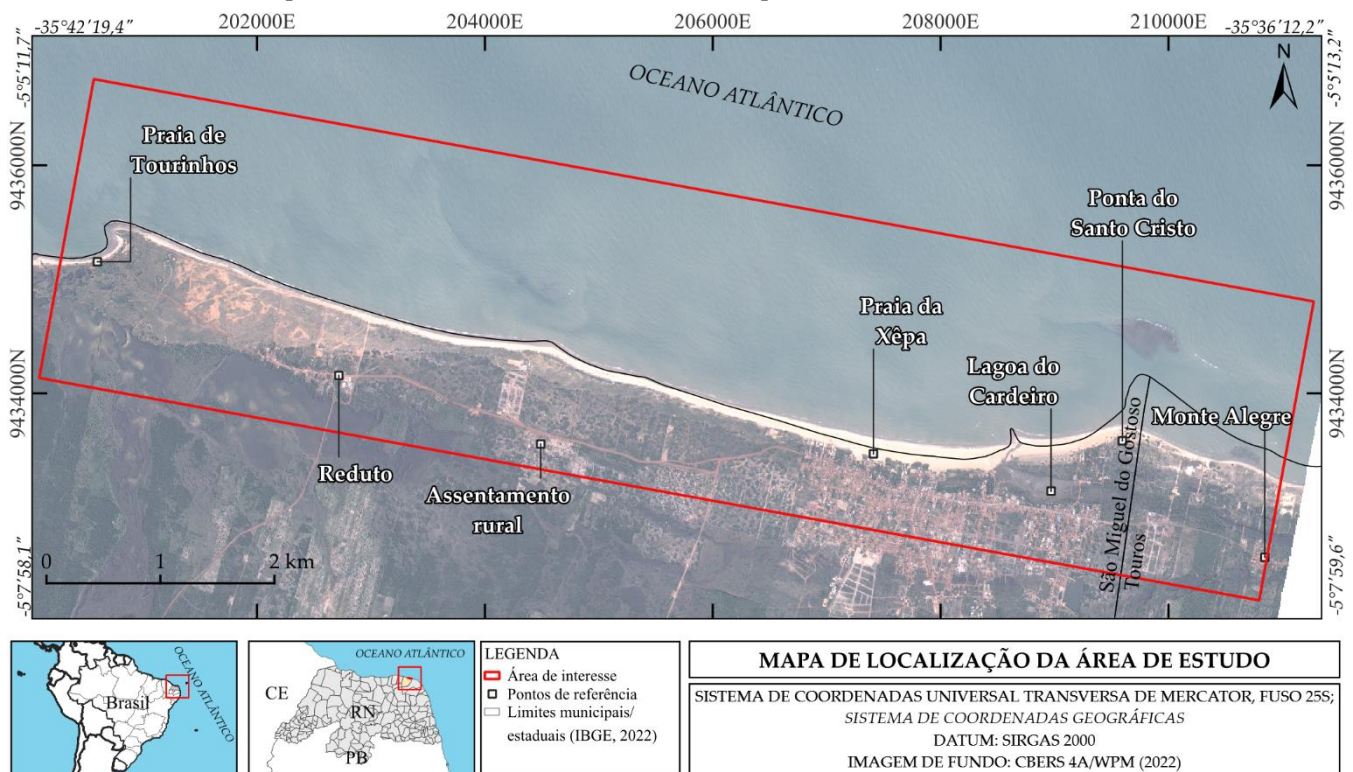
Esta abordagem é particularmente relevante para áreas com urbanização acelerada, como o Município de São Miguel do Gostoso (RN). A importância socioeconômica dessa localidade é predominantemente impulsionada pelo turismo, fomentado por praias de águas cristalinas, ecossistemas naturais preservados, recursos pesqueiros e atributos paisagísticos distintos (Brasil, 2002), além de atividades como surfe, *kitesurf*, gastronomia e eventos culturais (Taveira, 2015). Nesse contexto, dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022) evidenciam que o município registrou um dos maiores crescimentos demográficos e econômicos do RN na última década. Diante desses fatores, investigações em múltiplas escalas espaço-temporais tornam-se essenciais para o planejamento e gestão costeira.

Este estudo objetiva avaliar a vulnerabilidade costeira à erosão nas praias arenosas de São Miguel do Gostoso/RN, por meio da análise multitemporal da linha de costa (1986–2023) e do cálculo de um índice de exposição costeira. Igualmente, analisa a influência do crescente processo de antropização na dinâmica costeira e determina o papel protetivo e mitigatório de *habitats* costeiros, como dunas, vegetação e faixas de praias arenosas.

## 2. Área de Estudo

A área de interesse abrange trecho da orla marítima do Município de São Miguel do Gostoso (SMG), localizado no litoral setentrional do RN. Este segmento costeiro foi escolhido por seu expressivo interesse turístico e o crescente processo de antropização, induzido pelos setores imobiliário e turístico.

A Figura 1 exibe o mapa de localização da área de estudo que perfaz uma linha de costa de aproximadamente 11,4 km de comprimento. Ao longo do trecho, observam-se diferentes padrões de urbanização e pontos de concentração turística, como as praias do Cardeiro, Xêpa, Tourinhos, Ponta do Santo Cristo e o setor oeste do centro urbano, onde novos empreendimentos turísticos estão sendo implantados.



**Figura 1.** Localização da área de estudo, litoral setentrional do Rio Grande do Norte (RN), orla do Município de São Miguel do Gostoso.

O município apresenta clima tropical de nordeste oriental, subdomínio semiárido, com 7 a 8 meses secos (Diniz; Pereira, 2015). A precipitação média anual varia entre 889,72 mm e 1216,17 mm, conforme dados históricos da estação TELEPLU/SMG (EMPARN, 2022). Quanto à incidência de ventos, na região incidem ventos com

velocidades de entre 4m/s e 7m/s nas direções de leste-sudeste durante dezembro a maio, e de aproximadamente 8m/s, com direção de sudeste predominante, durante junho e novembro (González et al., 2018).

Geologicamente, a área apresenta duas unidades litoestratigráficas principais, conforme dados da CPRM (Pfaltzgraff; Torres, 2010): o Grupo Barreiras e os depósitos litorâneos. O Grupo Barreiras é predominantemente composto por rochas sedimentares (argilitos, arenitos e conglomerados) que formam tabuleiros e falésias ativas e inativas ao longo da costa. Depósitos litorâneos de praias e dunas móveis ocorrem em faixa estreita paralela à linha de costa, sendo constituídos por areias quartzosas bem selecionadas (CPRM, 2005; 2007).

A geomorfologia local apresenta dois compartimentos de relevo: tabuleiros costeiros setentrionais e planícies costeiras (IBGE, 2019). Os tabuleiros costeiros são relevos aplainados (0 a 30m de altitude), desenvolvidos sobre arenitos e conglomerados do Grupo Barreiras. As planícies costeiras, em contraste, são formações holocênicas de sedimentos marinhos predominantemente arenosos (Diniz et al., 2017).

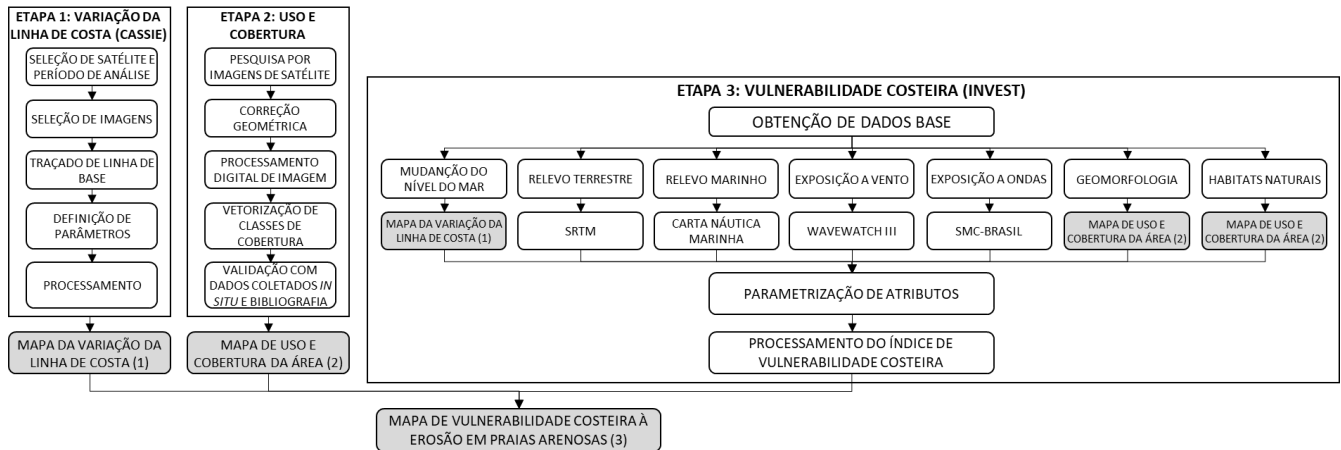
A cobertura vegetal no município insere-se no bioma Caatinga, mas próximo à Mata Atlântica, destacando-se a savana-estépica e as formações pioneiras (IBGE, 2022). As savanas-estépicas, no interior do município, possuem fisionomia de Caatinga, com arbustos e árvores espinhosas (CPRM, 2005). As formações pioneiras, vegetações de primeira ocupação em terrenos com deposição de areias marinhas, são compostas por indivíduos herbáceos e arbustivos, podendo incluir espécies arbóreas. Na orla, as pioneiras atuam como fixadoras de dunas (IBGE, 2012).

Com 431,44 km<sup>2</sup> de área total, SMG possui 5,19 km<sup>2</sup> urbanizados, indicando vasta porção natural preservada (IBGE, 2022). O censo de 2022 reportou 10.221 habitantes e densidade demográfica de 23,69 hab/km<sup>2</sup> (IBGE, 2022). Dados históricos mostram acentuado crescimento populacional (o maior estimado no estado entre 2018 e 2019), com notável aumento da população urbana na região litorânea. O PIB per capita cresceu 518% entre 2010 e 2019, justificado pela intensificação de investimentos em energia eólica e turismo entre 2010 e 2020, corroborado por dados de licenciamento ambiental do IDEMA.

O turismo local, iniciado nos anos 1990 e intensificado a partir dos anos 2000 pela prática de esportes náuticos (*kitesurf*, *windsurf*), impulsionou a expansão imobiliária e a contínua afluência de turistas internacionais (SMG, 2025). Ponta do Santo Cristo e Tourinhos consolidam-se como destinos turísticos internacionais proeminentes no RN (Taveira, 2015). A Ponta do Santo Cristo, na divisa com Touros/RN, destaca-se pela maior expansão imobiliária, estimulada por investimentos estrangeiros (Costa; Fonseca, 2019). A Praia de Tourinhos é procurada para fins recreativos, como balneabilidade e apreciação paisagística (Taveira, 2015).

### 3. Materiais e Métodos

A vulnerabilidade costeira foi avaliada usando o modelo *Coastal Vulnerability* da plataforma *Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs* (InVEST – versão 3.11.0), vinculada ao projeto *Natural Capital* da *Stanford University*. Para execução, empregaram-se bases de dados públicas e gratuitas, incluindo o Sistema de Modelagem Costeira (SMC-Brasil; Quetzalcóatl et al., 2019), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Marinha do Brasil, *United States Geological Survey* (USGS), a ferramenta de geoprocessamento *Coastal Analyst System from Space Imagery Engine* (CASSIE), além de registros observacionais e fotográficos obtidos em campo para validação. Este procedimento de aferição utilizou como suporte imagens de alta resolução espacial provenientes de sobrevoos com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT ou *drones*), essenciais para o refinamento da classificação das unidades geológicas, geomorfológicas e de uso e cobertura, e para assegurar a acurácia cartográfica em detalhe (e.g., LOEW et al., 2017). Os dados georreferenciados foram compilados e processados no software *QGIS Desktop* v. 3.40.5. As etapas metodológicas deste estudo são sintetizadas na Figura 2 e detalhadas subsequentemente.



**Figura 2.** Fluxograma metodológico para análise da variação da linha de costa, uso e cobertura do solo e vulnerabilidade costeira.

### 3.1. Etapa 1: Variação da linha de costa

A variação da linha de costa foi analisada com a ferramenta CASSIE, uma plataforma web de código aberto que utiliza imagens das séries LANDSAT e SENTINEL-2 do *Google Earth Engine*. A partir dessas imagens, o *Normalized Difference Water Index (NDWI)* é gerado e, com o algoritmo de segmentação de Otsu (1979), permite a definição automática do limiar da interface terra-água (Almeida et al., 2021).

Em seguida, algoritmos do Digital Shoreline Analysis System (DSAS), desenvolvido pelo USGS, foram utilizados para extrair automaticamente as linhas de costa e calcular parâmetros de variação. Os parâmetros incluem: *Shoreline Change Envelope (SCE)*, que quantifica a distância máxima entre as posições mais recuada e avançada da linha de costa por transecto; *Net Shoreline Movement (NSM)*, a distância (em metros) entre as linhas de costa mais antiga e mais recente por transecto; e *Linear Regression Rate (LRR)*, a taxa de variação da linha de costa (m/ano), determinada pela inclinação de uma regressão linear simples ajustada por mínimos quadrados aos pontos da linha de costa em cada transecto (Himmelstoss et al., 2018), que são equidistantes em 50 metros no presente trabalho.

Três análises foram realizadas a partir das imagens de satélites selecionadas: a Multidecadal, referindo-se à avaliação do período unificado de 1986 a 2023; Decadal, referente à subdivisão do período de 1986 a 2023 em quatro intervalos de aproximadamente 10 anos cada; e a de Alta Resolução (maior resolução comparada às análises Multidecadal e Decadal), entre o período de 2017 e 2024, descritas na Tabela 1. Ressalta-se que apenas imagens de preamar foram utilizadas (com tolerância de ±1 hora), marcando os maiores alcances da lâmina d'água sobre o continente, para minimizar a oscilação nos resultados.

**Tabela 1.** Aspectos de análise da variação da linha de costa realizadas através da ferramenta CASSIE.

Satélite/sensor	Resolução espacial	Análise	Período	Número de imagens
LANDSAT-5/TM; LANDSAT-8/OLI	30 m	Multidecadal	1986-2023	19
			1986-1993	4
		Decadal	1993-2006	3
			2006-2014	4
			2014-2023	11
SENTINEL-2/MSI	10 m	Alta Resolução	2017-2024	10

### 3.2. Etapa 2: Mapeamento das feições geológicas, geomorfológicas e de uso e cobertura do solo

O mapeamento do uso e cobertura do solo subsidia a compreensão do padrão de ocupação costeira, correlacionando características naturais e antrópicas com a dinâmica sedimentar registrada. Para o mapa de uso e cobertura do solo, utilizou-se a imagem CBERS-4A de 26/07/2022, com resolução espacial final de 2 metros (após o processamento) e resolução temporal de 31 dias, obtida no catálogo digital do INPE. A correção geométrica da imagem foi realizada utilizando as feições do mapa-base do programa *Google Earth*, visando assegurar a acurácia posicional e a compatibilidade com resultados de análises subsequentes. Posteriormente, sobre uma imagem em

composição colorida básica (R-3, G-2, B-1), procedeu-se à vetorização das classes de cobertura, referenciadas pelos mapas de Macedo et al. (2017) e do IBGE (2019) na escala de 1:250.000. A fase de validação *in situ*, crucial no fluxo de trabalho cartográfico, foi executada com o intuito de mitigar a incerteza posicional das unidades mapeadas e os desalinhamentos geométricos decorrentes da integração de bases cartográficas de escala pequena e de dados de Sensoriamento Remoto de resoluções distintas (Noardo, 2022). O controle de qualidade, fundamental para aprimorar a acurácia posicional e temática do mapeamento (LOEW et al., 2017), foi substanciado por imagens derivadas de sobrevoos com VANT. A alta resolução espacial dessas imagens permitiu a verificação pormenorizada das feições geológicas, geomorfológicas e de uso e cobertura em campo. A análise e o ajuste rigoroso desses dados *in situ* viabilizaram a elaboração dos mapas finais com o maior nível de detalhe e rigor científicos, fornecendo a base cartográfica para a parametrização do modelo InVEST.

### 3.3. Etapa 3: Análise da vulnerabilidade costeira

O modelo InVEST de vulnerabilidade costeira gera um índice de exposição à erosão ao longo da costa, calculado a partir de seis variáveis biogeofísicas: relevo (marinho e terrestre), habitats naturais (bióticos e abióticos), exposição a vento e ondas, geomorfologia e mudança do nível do mar. A Tabela 2 exhibe as variáveis de entrada do modelo de vulnerabilidade costeira, incluindo fonte e escala/resolução espacial.

**Tabela 2.** Variáveis de entrada no modelo de vulnerabilidade costeira.

Variável	Fonte	Escala	Resolução espacial	Resolução temporal
Relevo (altimetria)	MDE-SRTM (USGS, 2023)	-	30m	-
Relevo (batimetria)	Vetorização da Carta Náutica 21900 (DHN, 2022)	1:300.000	-	-
Habitats	Sensoriamento remoto através de imagens CBERS-4A (INPE, 2022) e adaptações de Macedo et. al (2017).	-	2m	31 dias
Vento	Wavewatch-III (TOLMAN, 2009)	-	Grade de 55x55km	-
Ondas	SMC-Brasil (Quetzalcóatl et al., 2019) e Wavewatch-III (Tolman, 2009)	-	Grade de 55x55km	-
Geomorfologia	Sensoriamento remoto com imagem CBERS-4A (INPE, 2022) e adaptações de Macedo et. al (2017) e IBGE (2019)	-	2m	31 dias
Mudança do nível do mar (Variação de linha de costa)	SENTINEL-2 (ESA, 2023)	-	10m	5 dias

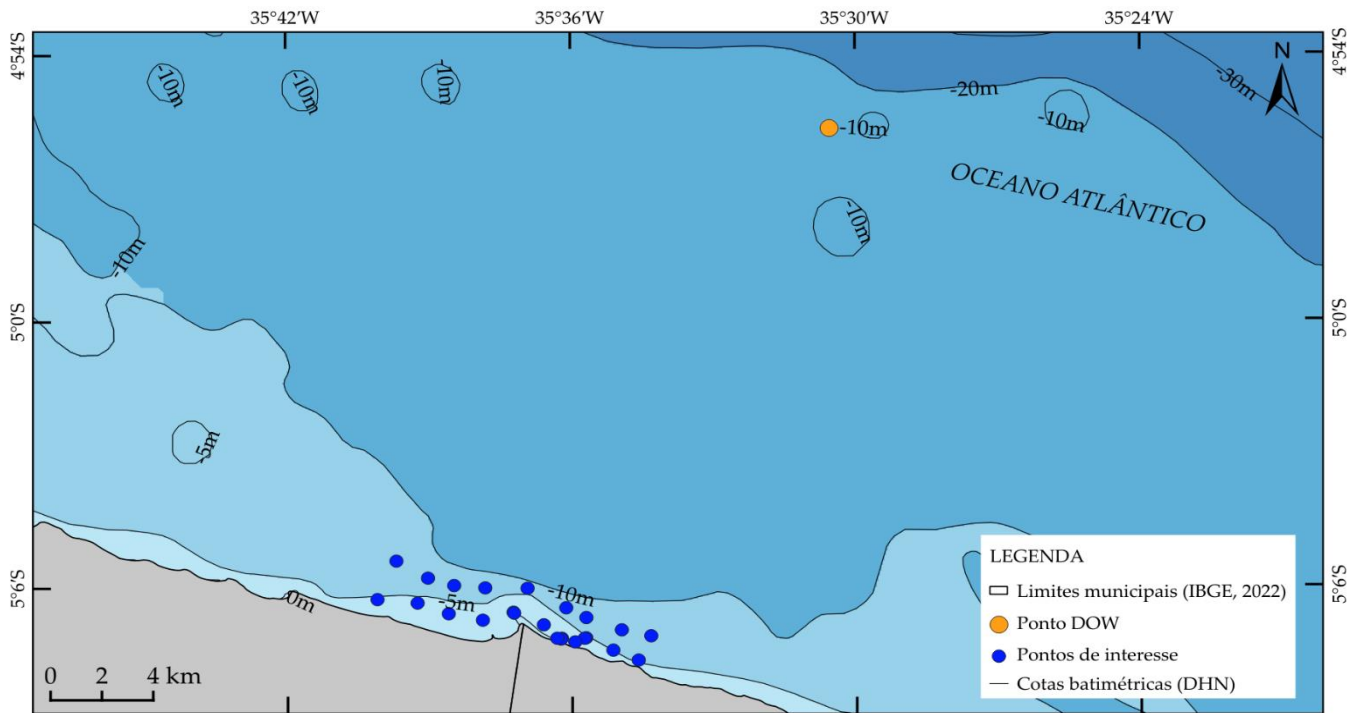
As variáveis de relevo referem-se à elevação do terreno e do leito oceânico. Para os dados do relevo terrestre, foi utilizado o modelo digital de elevação da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) Versão 4. Para o relevo marinho, dados batimétricos da Carta Náutica 21900 da Marinha do Brasil foram vetorizados e modelados conforme Moura (2010). Os habitats naturais foram definidos a partir do mapeamento de uso e cobertura, obtido na Etapa 2.

Para dados de exposição a ondas e ventos, utilizaram-se informações do Wavewatch-III (Tolman, 2009), fornecidas pelo InVEST e desenvolvidas pelo *National Weather Service / National Oceanic and Atmospheric Administration*. Complementarmente, dados de ondas (1948-2008) foram obtidos via SMC-Brasil. O SMC-Brasil emprega dados de reanálise Wavewatch-III, calibrados e propagados pelo modelo *Simulating Waves Nearshore* (Booij; Ris; Holthuijsen, 1999), formando a base de reanálise *Downscaled Ocean Waves* (DOW), com 60 anos de séries de ondas reconstruídas entre 1948 e 2008 (Camus et al., 2013). Parâmetros analisados incluem altura significativa (Hs), período de pico do espectro (Tp) e direção média de propagação (Dir), além de eventos extremos de onda estimados por função de distribuição generalizada (GEV), conforme as equações de parametrização abaixo.

$$Hs_{Tr} = \mu_{Hs} - (\Psi_{Hs}/\xi_{Hs}) * (1 - (\frac{1}{Tr})^{-\xi_{Hs}}) \tag{1}$$

$$Tp_{Tr} = \mu_{Tp} - (\Psi_{Tp}/\xi_{Tp}) * (1 - (\frac{1}{Tr})^{-\xi_{Tp}}) \tag{2}$$

Para caracterizar o regime de ondas ao largo, analisou-se o ponto DOW (Figura 3), calculado pelo módulo de Análise Matemática e Estatística de Variáveis Ambientais do SMC-Brasil. O ponto foi escolhido após comparar tabelas de probabilidade de Hs e Tp com pontos até 21 m de profundidade, indicando ausência de deformações significativas dos parâmetros de onda por atrito com o fundo. Após a seleção do ponto DOW, o clima de ondas ao largo da área de estudo foi obtido, e a modelagem de propagação das ondas até a linha de costa, realizada. Conseqüentemente, foi gerada a grade do Fluxo Médio de Energia das Ondas, cujos valores correspondentes foram extraídos em Pontos de Interesse próximos à área de estudo para calcular o índice de vulnerabilidade.



**Figura 3.** Ponto DOW adotado para a análise de clima de ondas ao largo da área de estudo. Latitude: 4°55'41,26"S, Longitude: 35°30'32,53"O, profundidade de 12,18m.

A variação do nível médio do mar foi avaliada usando os resultados da análise da linha de costa descritos na Etapa 1, sendo subdivididos em percentis. Essa abordagem foi adotada, pois o LRR representa uma taxa abrangente, considerando todas as linhas traçadas (Zamboni et al., 2022).

Cada variável recebeu uma pontuação de 1 a 5, refletindo a vulnerabilidade em ordem crescente. Essa classificação foi estabelecida conforme a Tabela 3.

**Tabela 3.** Pontuação das variáveis de entrada do modelo de vulnerabilidade costeira, definido a partir de Gornitz et al. (1990), Hammar-Klose e Thieler (2001), Grigio et al. (2006), Busman, Amaro e Souza-Filho (2016) e Zamboni et al. (2022).

Variável	1-Muito baixo	2-Baixo	3-Moderado	4-Alto	5-Muito alto
Relevo	Percentil 81 a 100	Percentil 61 a 80	Percentil 41 a 60	Percentil 21 a 40	Percentil 0 a 20
Habitats	Mata de carnaúbas; Falésia; Duna com vegetação arbustiva; Caatinga	Duna com vegetação herbácea; Laguna	Duna móvel; Agropecuária	Faixa de praia; Campo de Várzea	Área antropizada
Vento	Percentil 0 a 20	Percentil 21 a 40	Percentil 41 a 60	Percentil 61 a 80	Percentil 81 a 100
Ondas	Percentil 0 a 20	Percentil 21 a 40	Percentil 41 a 60	Percentil 61 a 80	Percentil 81 a 100
Geomorfologia	-	Falésia	-	Lagoa ou estuário	Praia
Mudança no nível do mar (MNM)	Percentil 0 a 20	Percentil 21 a 40	Percentil 41 a 60	Percentil 61 a 80	Percentil 81 a 100

A pontuação de cada variável serviu de base para o cálculo do Índice de Exposição (EI) à erosão, determinado conforme a Equação 3.

$$EI = (\text{Relevo} \times \text{Habitats} \times \text{Exposição ao vento} \times \text{Exposição a onda} \times \text{Geomorfologia} \times \text{MNM})^{\frac{1}{6}} \quad (3)$$

#### 4. Resultados

Os resultados são apresentados segmentadamente. Primeiramente, detalham-se os achados da análise de variação da linha de costa, seguidos pelo mapeamento de uso e cobertura do solo da região. Por fim, expõem-se os resultados da vulnerabilidade costeira.

##### 4.1. Variação da linha de costa

##### 4.1.1. Análise multidecadal

A Figura 4 apresenta o resultado da análise multidecadal e a Tabela 4 mostra a respectiva estatística obtida.

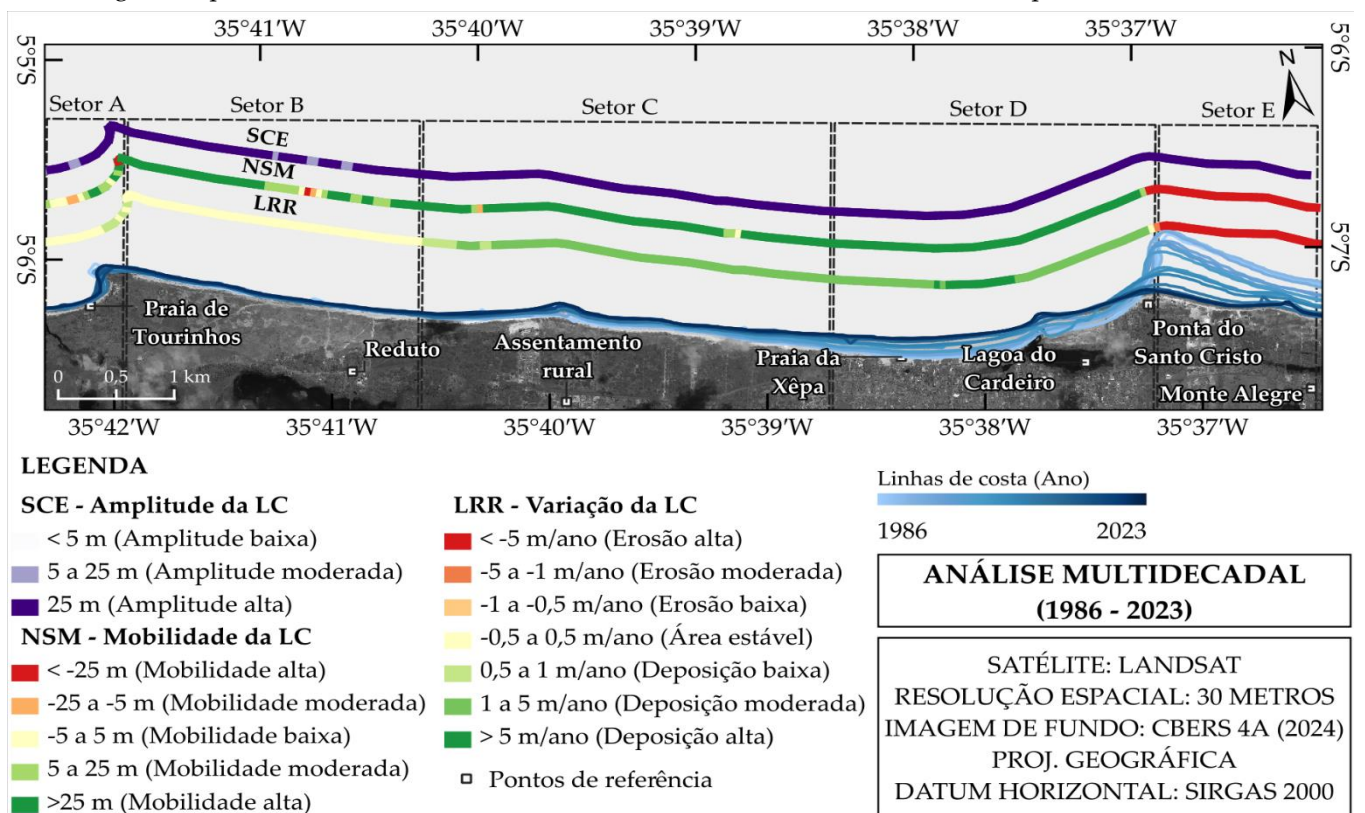


Figura 4. Variação multidecadal da linha de costa.

Tabela 4. Estatística descritiva da análise multidecadal da linha de costa entre 1986 e 2023.

Estatística	Parâmetro de análise		
	LRR (m/ano)	NSM (m)	SCE (m)
Média	0,27	20,20	134,01
Mediana	1,19	45,90	92,04
Desvio Padrão	4,79	164,44	125,52
Máximo	5,55	197,24	575,91
Mínimo	-16,53	-544,94	15,10
Média-Setor A (Praia de Tourinhos)	0,22	5,66	50,19
Média-Setor B (Praia do Reduto)	0,27	24,58	31,78
Média-Setor C (Zona de expansão)	1,74	69,81	83,26
Média-Setor D (Praias urbanas)	4,07	151,64	176,87
Média-Setor E (Ponta do Santo Cristo)	-11,39	-378,43	419,47

O mapeamento das linhas de costa evidencia alteração no formato da costa no período, especialmente na Ponta do Santo Cristo, com retração linear média de -378,43 m e amplitude de 419,47 m. Isso alterou a morfologia praial regional e reduziu a linha de costa em cerca de 600 m. No promontório da Praia de Tourinhos, a mudança das linhas de costa é mais sutil.

A taxa de variação da linha de costa (LRR) (1986–2023) mostra um perfil médio de estabilidade com tendência à deposição (0,27 m/ano) em 29% do setor. Na Ponta do Santo Cristo, a maior oscilação ocorre com erosão média de -11,39 m/ano em segmento de aproximadamente 1,4 km, e deposição média de 4,07 m/ano em 6,4 km nas praias urbanas adjacentes a sotamar. Estes resultados indicam fluxo de sedimentos no sentido leste-oeste, oriundos da Ponta de Santo Cristo e depositados nas praias urbanas do Cardeiro e da Xêpa, retificando a linha de costa para uma direção geral leste-oeste. A configuração original da linha de costa no local era de praia em formato de “zeta” (letra grega, ζ), que, em planta, é assimétrica, apresentando raio de curvatura decrescente em direção a uma das extremidades (CHAPMAN, 1984). Essa morfologia prévia foi alterada por processos erosivos, que causaram transporte longitudinal de sedimentos para oeste e o consequente preenchimento da reentrância com material da erosão da Ponta do Santo Cristo, resultando na morfologia atual mais retilínea. Tal alteração na morfologia em planta da linha de costa, onde a Ponta do Santo Cristo atua como ponto de difração, aumenta a exposição da praia à ação das ondas. Nos setores a oeste dos limites urbanos, observa-se padrão que varia de deposição moderada na zona de expansão, com LRR médio de 1,74m/ano, até a estabilidade nas praias do Reduto e Tourinhos, cuja variação média da linha de costa é de 0,27 e 0,22m/ano, respectivamente.

Quanto à mobilidade da linha de costa (NSM), a maior extensão da costa (71%), cerca de 8,15 km, apresenta alta mobilidade, indicando intensa dinâmica sedimentar no segmento da Ponta do Santo Cristo até a orla do assentamento rural. Após esse trecho, a mobilidade mantém-se baixa a moderada. A amplitude da variação da linha de costa (SCE) é alta na maior parte da área de estudo, oscilando para moderada na porção oeste.

#### 4.1.2. Análise decadal

A Figura 5 ilustra o mapa da variação decadal da linha de costa, abrangendo o período de 1986 a 2023. Esta análise foi subdividida em quatro períodos distintos. A Tabela 5 apresenta os resultados estatísticos das variáveis para cada período.

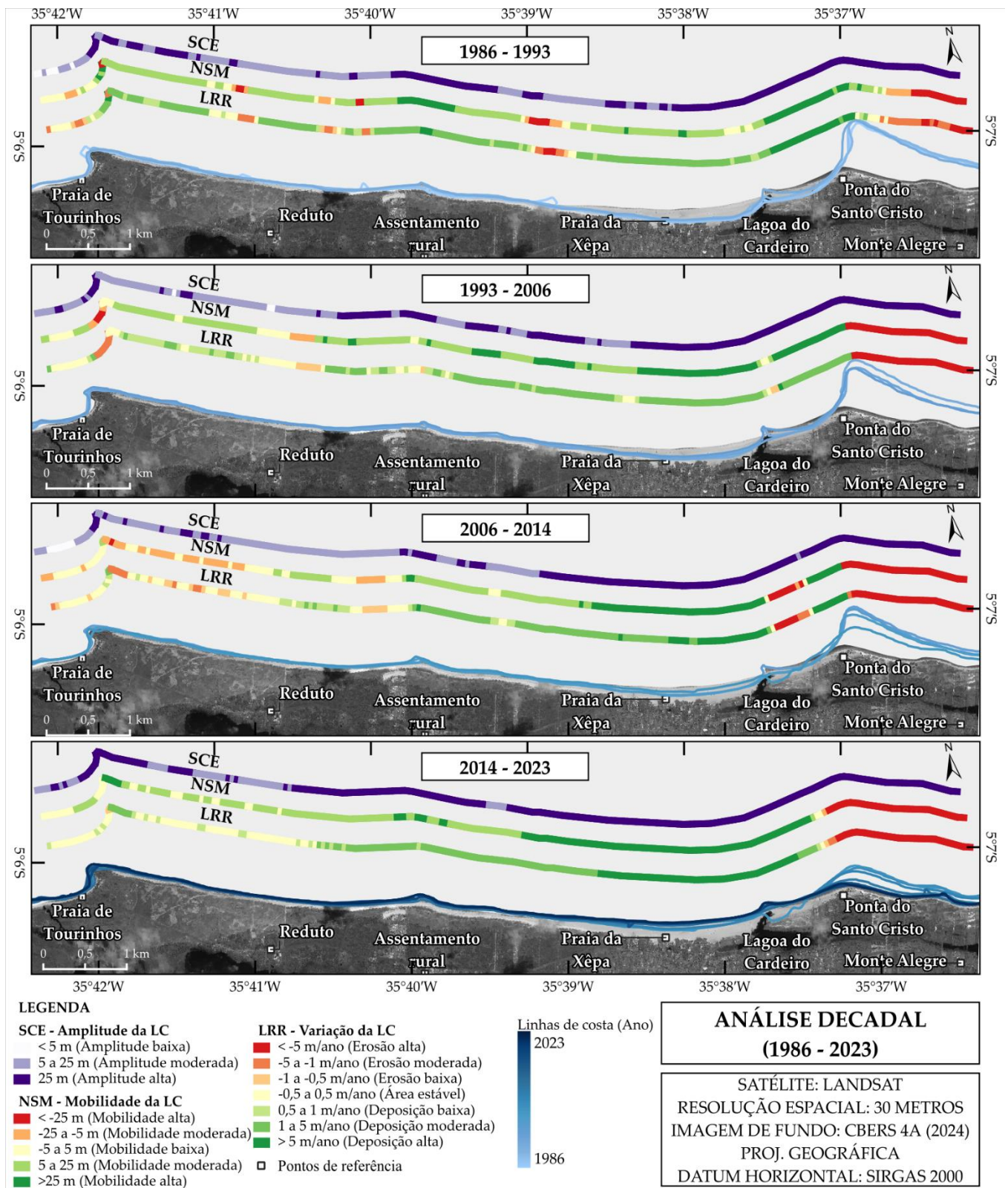


Figura 5. Análise da variação decadal da linha de costa.

**Tabela 5.** Estatística descritiva da variação de linha de costa para os transectos analisados ao longo de quatro décadas, de 1986 a 2023.

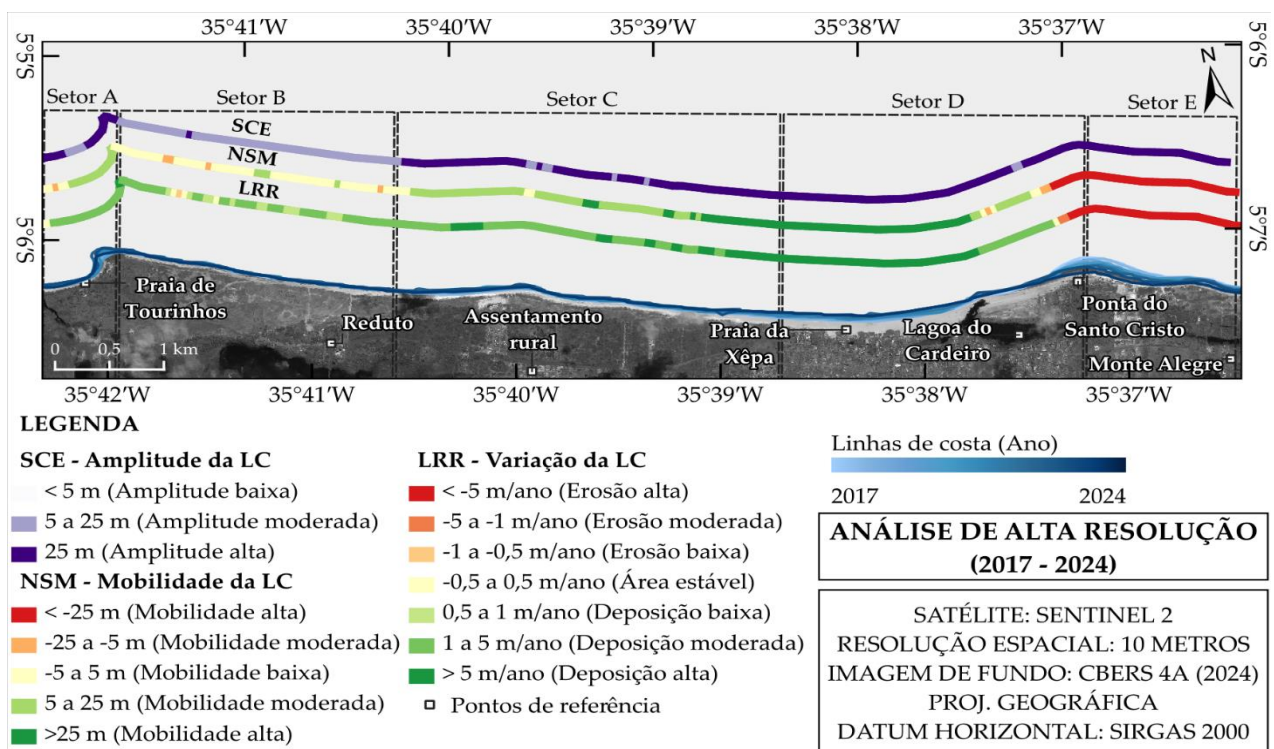
Parâmetro de análise	Estatística	Período			
		1986 a 1993	1993 a 2006	2006 a 2014	2014 a 2023
LRR (m/ano)	Mínimo	-7,46	-9,70	-26,95	-26,55
	Média	1,76	0,11	-0,75	0,25
	Máximo	35,01	5,56	7,96	14,52
NSM (m)	Mínimo	-87,39	-123,82	-217,98	-235,99
	Média	13,44	4,81	-8,49	9,90
	Máximo	228,79	88,97	63,60	228,21
SCE (m)	Mínimo	0,00	2,17	0,00	12,23
	Média	33,74	37,04	43,22	64,40
	Máximo	235,55	166,91	217,98	235,99

A taxa de variação da linha de costa (LRR) indica que o primeiro período (1986–1993) foi o único com padrão médio deposicional, com taxa de erosão média de 1,76m/ano. O terceiro período (2006 a 2014) foi o único com padrão médio erosivo (-0,75m/ano), enquanto os demais períodos indicam padrão médio estável. Na Ponta do Santo Cristo, a intensidade erosiva acelerou ao longo das décadas: -1,68m/ano entre 1986 e 1993, -7,98m/ano entre 1993 e 2006, -15,48m/ano entre 2006 e 2014 e -17,66m/ano entre 2017 e 2023.

A mobilidade da linha de costa (NSM) é similar nas quatro décadas, com predominância de setores de mobilidade moderada e alta. A amplitude média da variação da linha de costa (SCE) mostrou-se mais elevada nas décadas mais recentes, devido à intensificação nos setores leste. A maior supressão de faixa de areia na Ponta do Santo Cristo ocorreu nos períodos mais recentes de 2006 a 2023, ratificado pelo elevado valor de SCE no período.

4.1.3. Análise de alta resolução

A Figura 6 ilustra os resultados derivados da análise de imagens de sensoriamento remoto do satélite SENTINEL-2 no período entre os anos de 2017 e 2024. A Tabela 6 complementa, detalhando a análise estatística.



**Figura 6.** Variação da linha de costa da análise de alta resolução.

**Tabela 6.** Estatística descritiva da análise de alta resolução da linha de costa entre 2017 e 2024.

Estatística	Parâmetro de análise		
	LRR (m/ano)	NSM (m)	SCE (m)
Média	1,81	1,19	44,80
Mediana	2,81	7,89	35,58
Desvio Padrão	7,75	48,62	31,81
Máximo	12,21	62,16	162,37
Mínimo	-24,29	-162,37	9,60
Média-Setor A (Praia de Tourinhos)	3,35	5,57	38,95
Média-Setor B (Praia do Reduto)	1,20	-0,08	17,11
Média-Setor C (Zona de expansão)	4,63	19,57	36,60
Média-Setor D (Praias urbanas)	6,26	26,83	55,14
Média-Setor E (Ponta do Santo Cristo)	-14,55	-99,62	99,65

A dinâmica costeira observada no período de 2017 a 2024 corrobora o padrão espacial multidecadal previamente identificado. Contudo, esta nova análise revela notável intensificação da deposição de sedimentos, especialmente na Praia da Xêpa, com taxas de deposição da ordem de 6,26m/ano, em detrimento de taxas de erosão muito elevadas de -14,55 m/ano registradas na Ponta de Santo Cristo. Nos demais setores a oeste da área de estudo predomina um padrão médio deposicional de baixa intensidade, com valores médios de LRR entre 1,20 e 3,35m/ano, associado a mobilidade moderada.

As análises de alta resolução e multidecadal convergem na indicação espacial da mobilidade da linha de costa. A intensidade dos processos de erosão-deposição é mais acentuada na porção leste da área de estudo, correlacionando-se com a região mais antropizada, especialmente próximo ao centro urbano de SMG.

#### 4.2. Uso e cobertura do solo

A Figura 7 apresenta o mapa de uso e cobertura do solo, resultado da análise e interpretação da imagem multiespectral CBERS-4A de 22/06/2022. A validação do mapeamento ocorreu por levantamentos de campo, complementados por registros fotográficos que exemplificam cada uma das 11 classes identificadas na área de estudo.

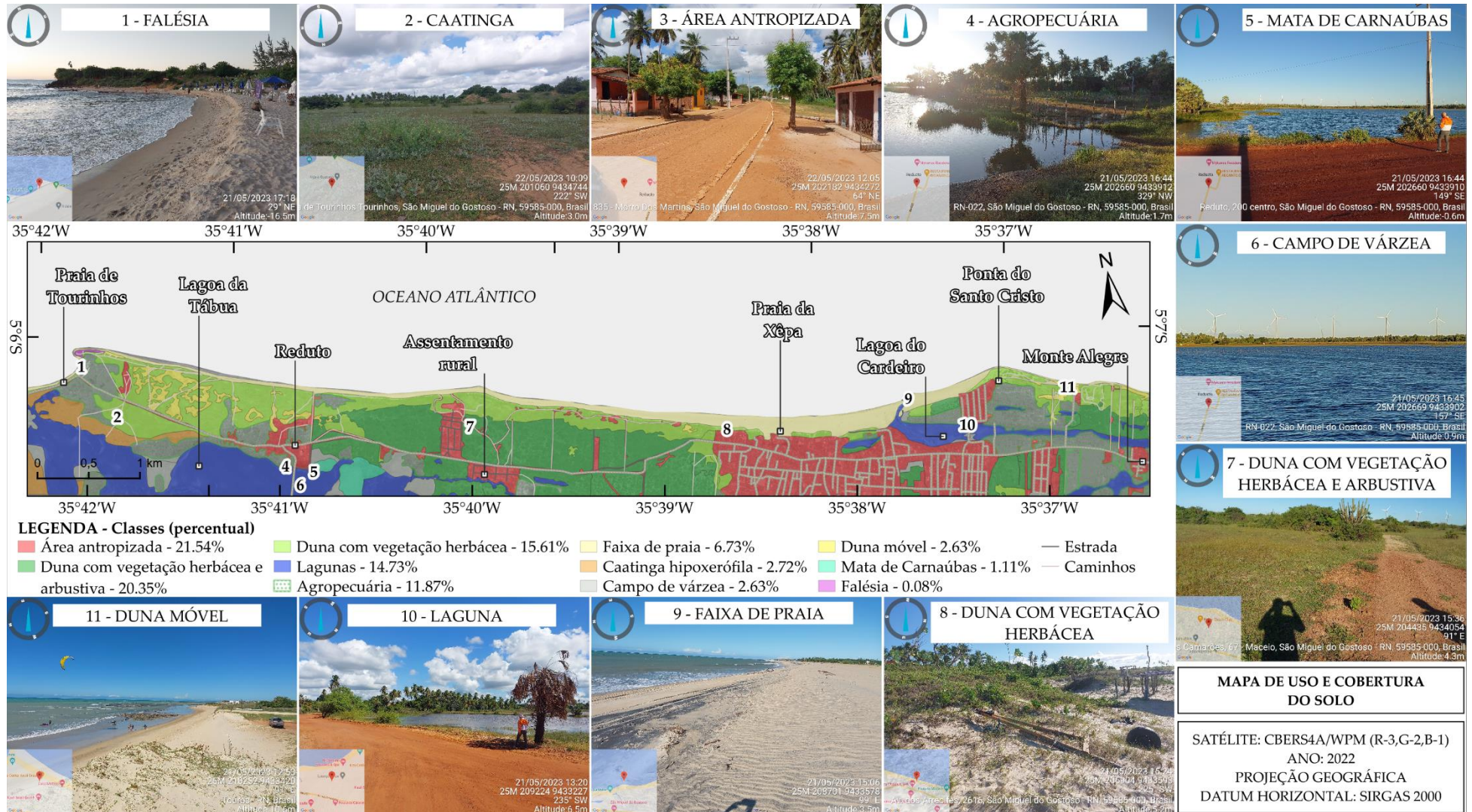


Figura 7. Mapa de uso e cobertura com registros de campo na área de estudo, exemplificando as classes identificadas.

Falésias ocorreram apenas na Praia de Tourinhos, onde rochas sedimentares escarpadas em erosão contínua foram observadas. Levantamentos de campo confirmaram este sítio como ponto de interesse antrópico, com visitas frequentes de turistas para contemplação da paisagem.

Ao sul da Praia de Tourinhos, em área adjacente à Lagoa da Tábua, foi identificada uma fisionomia de caatinga hipoxerófila. Esta formação vegetal é característica de ambientes de Tabuleiros Costeiros estabelecida sobre um substrato pedológico de natureza predominantemente Latossolo Vermelho-Amarelo. A coloração mais escura observada no horizonte superficial (*horizonte A*) está intrinsecamente conectada ao aumento no teor de matéria orgânica, favorecido pela condição hidromórfica localizada pela proximidade à área lagunar, resultando em processos de decomposição mais lentos sob maior saturação hídrica (Macedo et al., 2017). Nas margens da Lagoa da Tábua, notou-se mata de carnaúbas (*Copernicia prunifera*), alternando com atividades agropecuárias.

As áreas antropizadas mapeadas incluem a comunidade do Reduto, o centro urbano de SMG e o assentamento rural, estrategicamente localizado entre esses núcleos. Estradas e trilhas de veículos, discerníveis nas imagens de satélite, também foram categorizadas como áreas antropizadas. A classe agropecuária abrange predominantemente o cultivo de coqueiros, além de outras culturas de menor escala e criação de animais. Essa tipologia de uso da terra é mais acentuada perto da Lagoa da Tábua e na porção leste do centro municipal de SMG.

Campos de várzea foram identificados em áreas adjacentes a lagoas, especialmente perto da Lagoa da Tábua. Nesses locais, o terreno apresenta umidade e indícios de salinidade, sugerindo intrusão salina. A cobertura vegetal, natural e antrópica, são insignificantes nesses campos.

Ao longo da orla, delimitaram-se campos dunares com distintas tipologias de cobertura vegetal. Imediatamente após a faixa de praia, que se estende por toda a costa, identificou-se dunas com vegetação herbácea. Mais para o interior, na porção central do litoral, observa-se a transição para campos dunares com vegetação arbustiva. Em áreas de maior adensamento antrópico, registraram-se extensas dunas desprovidas de vegetação.

Os corpos d'água mapeados são as lagoas (lagunas) do Cardeiro e da Tábua, com leitos de configuração espacial difusa. Durante o levantamento de campo, estas lagoas temporárias exibiam lâmina d'água.

O mapeamento revelou a predominância de áreas antropizadas, que constituem 21,54% da área de estudo. Em seguida, destacam-se as dunas com vegetação herbácea e arbustiva (20,35%) e as dunas com vegetação herbácea (15,61%). A área de estudo mantém significativa cobertura vegetal, especialmente nos campos dunares. Contudo, os dados também evidenciam a expansão da ocupação antrópica.

#### 4.3. Clima de Ondas ao Largo

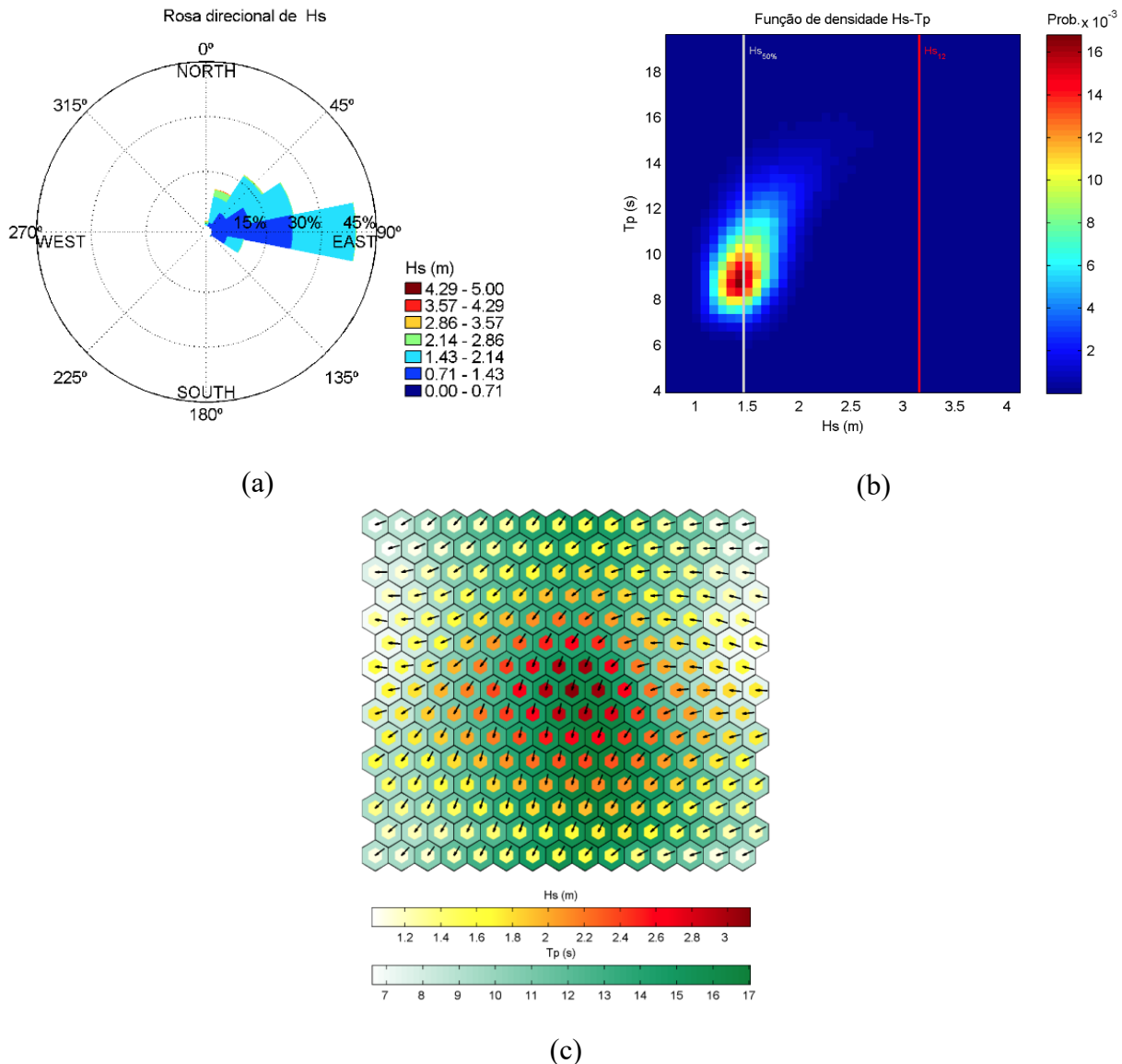
No ponto DOW (1948–2008), as ondas predominantes vêm de Norte e Leste-Sudeste: 39,40% de Leste; 22,74% de Leste-Nordeste; 17,15% de Nordeste; 10,39% de Norte-Nordeste e 1,39% de Norte (Figura 8a). Probabilidades de 8,84% e 0,08% foram obtidas para ondas de Leste-Sudeste e Sudeste, respectivamente. Contudo, essas frentes de onda que atingem o ponto DOW não alcançam significativamente a linha de costa na área de interesse, sendo quase paralelas a ela.

O Hs médio (ou com 50% de probabilidade de não excedência – Hs50) é de 1,40m de Leste e 1,45m de Leste-Nordeste, que representam 62,14% da probabilidade de ocorrências. O Hs<sub>50</sub> de Nordeste é de 1,57m; ondas médias com 1,80m vem de Norte-Nordeste, representando 27,54% do regime de ondas. As ondas médias vindas de Norte têm 2,22m de Hs, com 1,39% de probabilidade de ocorrência.

Em tempestades marítimas, a onda superada em 12 horas por ano (Hs12) tem de 2,13 a 2,46m vindas de Leste e Nordeste, representando 79,29% da probabilidade dessa ocorrência no ponto DOW. Ondas de Norte-Nordeste e de Norte apresentaram Hs12 de 3,86 e 4,07m, respectivamente, somando 11,78% de probabilidade do regime. Apesar de menor ocorrência, esses valores de altura significativa de ondas são considerados severos para a região, sendo alertados como de alto risco para navegação pelo Boletim de Avisos aos Navegantes da Marinha do Brasil. Trata-se de ondas que atingem as porções mais rasas da plataforma continental com alta energia hidráulica de mobilização de sedimentos, comumente relacionadas aos episódios de retirada mais intensos de areia na linha de costa, durante eventos de tempestade. Isto é, em escala de horas, o sedimento retirado do estirâncio é levado ao compartimento de antepraia, onde fica passível de ser transportado para fora do sistema geodinâmico da praia, pelas correntes de deriva litorânea.

A função de densidade conjunta Hs-Tp indica que a maioria das ocorrências se concentrou em ondas com 1,5 m de Hs e Tp de aproximadamente 8,6 s (Figura 8b), sugerindo regime médio de onda gerado por ventos locais, próximo ao ponto DOW.

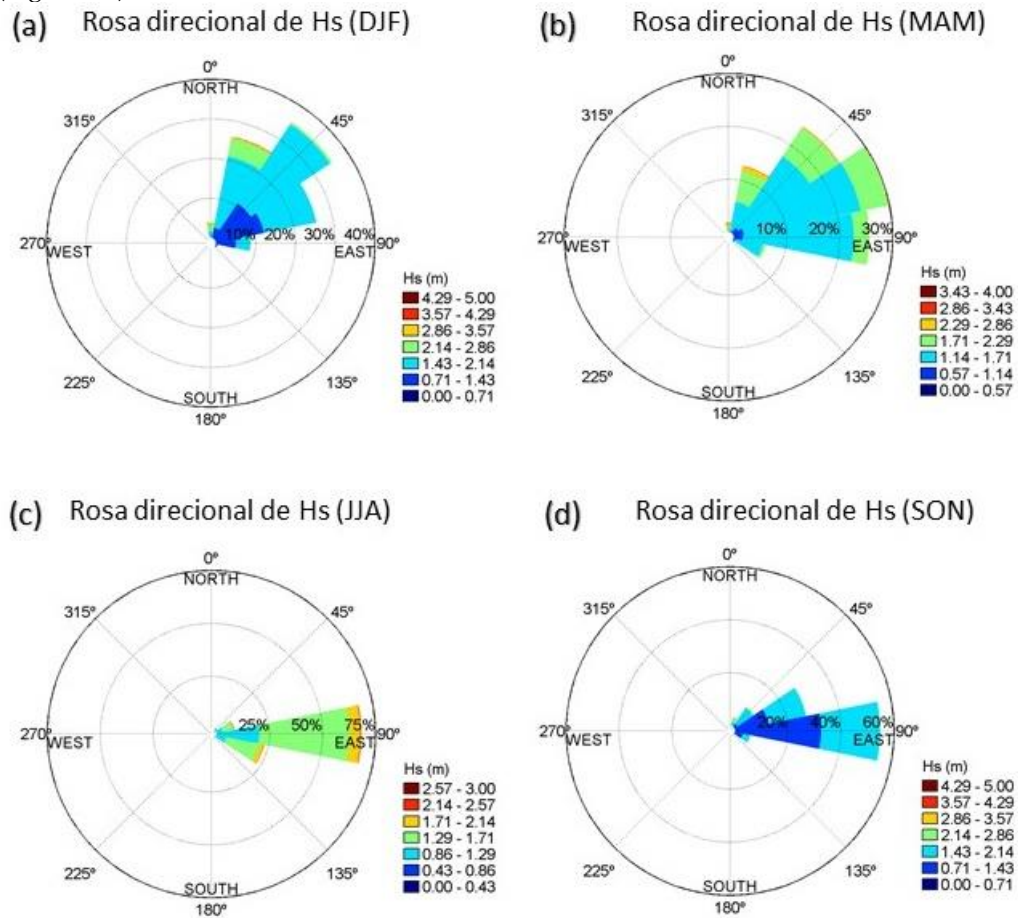
A análise multivariada dos parâmetros de onda indicou que ondas com  $H_s > 2,4$  m (tons vermelhos na Figura 8c) possuem  $T_p$  superiores a 13 s (tons mais escuros de verde na Figura 8c), associadas às direções de Norte-Nordeste (setas na Figura 8c). Esses dados indicam que as ondas com maior potencial de mobilização de sedimentos, ocorrendo em tempestades, formam-se em locais distantes da área de estudo e se propagam até o Ponto DOW. Como grupos de ondas em alto mar tendem a se tornar paralelas ao campo de ventos que as gerou, as direções apontam predominância dos ventos alísios de nordeste.



**Figura 8.** Gráficos do clima de ondas ao largo avaliadas no ponto DOW. (a) Diagrama de rosa das probabilidades de ocorrência de ondas para valores de  $H_s$ . (b) Função de densidade conjunta  $H_s$ - $T_p$ . (c) Caracterização multivariada dos parâmetros de onda. Núcleos em tons de branco, amarelo, laranja e vermelho indicam valores de  $H_s$ ; as bordas, em tons de branco e verde, indicam valores de  $T_p$ ; setas internas indicam a Direção.

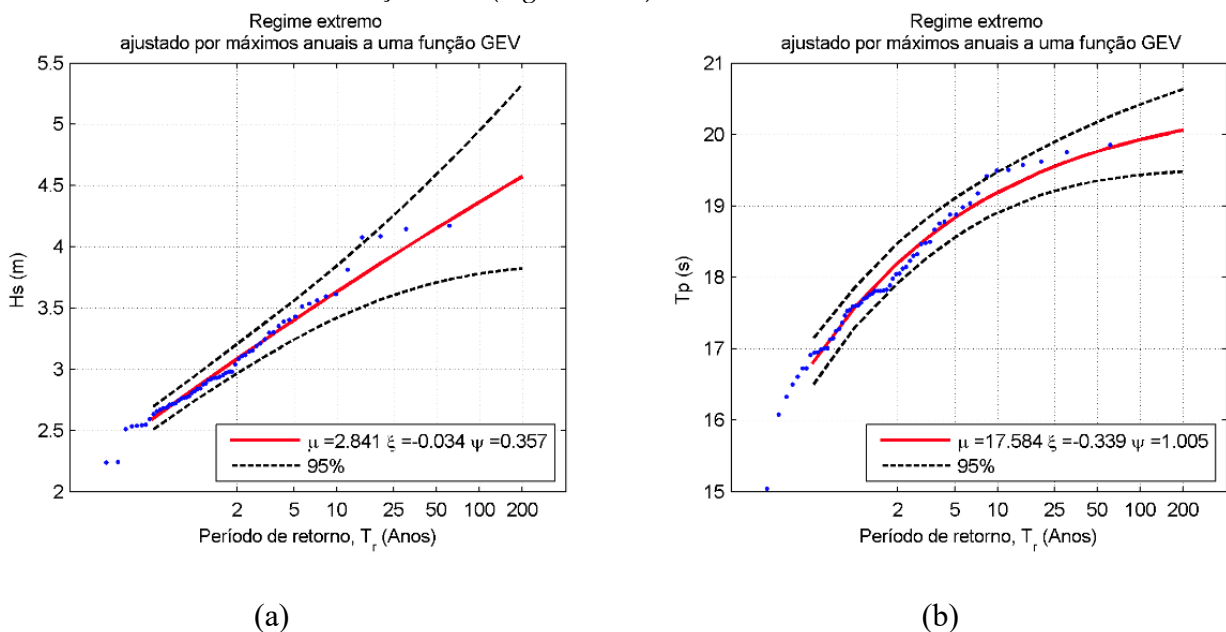
Sazonalmente, ondas de Norte-Nordeste e Nordeste atingem a área durante os meses de dezembro a maio, condições de verão e outono na área de estudo (Figura 9a,b), meses em que a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) está atuando na sua posição climatológica mais a sul (Souza; Cavalcanti, 2009; Melo; Cavalcante; Souza, 2009). Dessa forma, o ramo nordeste dos ventos alísios atua na região do ponto DOW. Ondas de Leste começam a aparecer durante os meses de março a maio e predominam de junho a novembro (Figura 9c,d). Durante os meses de inverno e primavera, o ramo sudeste atua sobre a região, ajudado por vórtices ciclônicos de altos níveis sobre a costa do Nordeste Brasileiro e pela aproximação do Sistema de Alta Pressão do Atlântico Sul da costa leste brasileira (Reboita; Ambrizzi; Da Rocha, 2012). Em anos mais secos ou com anomalias positivas da temperatura da superfície do mar no Atlântico Norte, a ZCIT atua deslocada a norte da sua posição climatológica (Souza;

Cavalcanti, 2009), favorecendo a atuação do ramo de sudeste dos ventos alísios na área de estudo desde os meses de abril e maio (Figura 9b).



**Figura 9.** Diagramas sazonais de Hs no ponto DOW; para os meses de (a) dezembro, janeiro e fevereiro - DJF; (b) março, abril e maio - MAM; (c) junho, julho e agosto - JJA; (d) setembro, outubro e novembro - SON.

A equação parametrizada GEV para Hs e Tp indica que a onda com tempo de retorno  $T_r$  de 60 anos possui 4,20m e 19,81 s, a um nível de confiança de 5% (Figura 10a,b).



**Figura 10.** Ajustamento generalizado de valores extremos de (a) Hs e (b) Tp, no ponto DOW.

Os máximos anuais de Hs e Tp (Figura 11) confirmam que ondas de tempestade, com maiores valores de Hs (>2,4m), apresentam Tp > 10 s, sendo geradas em áreas-fonte distantes do ponto DOW e influenciadas por eventos atmosféricos tropicais de ampla escala no Oceano Atlântico.

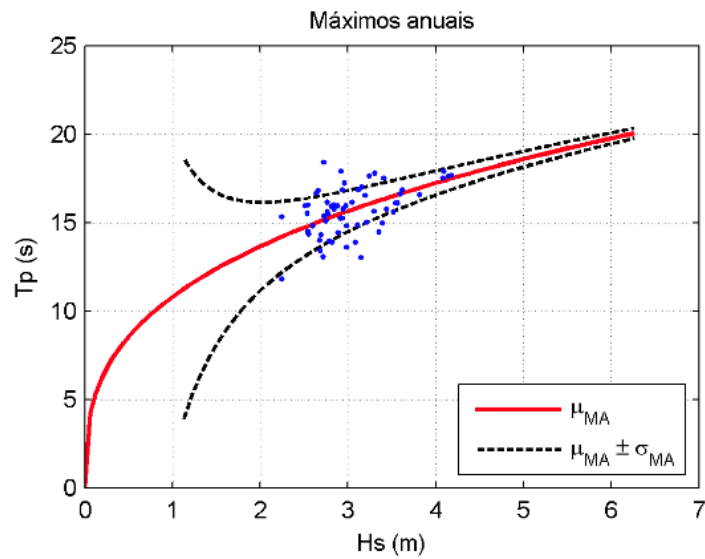


Figura 11. Gráfico dos máximos anuais de Hs e Tp no ponto DOW.

#### 4.4. Regime de Marés

A série de dados do ponto DOW teve os níveis de maré modelados a partir de dados de marégrafo da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil, referenciados ao nível médio do mar local no marégrafo do Porto de Guamaré.

A maré astronômica na área de estudo é semidiurna em regime de mesomarés, com ciclos de preamares e baixa-mares a cada 6 horas, aproximadamente, e amplitude média total de 2,84 m (Figura 12a). A contribuição da maré meteorológica mostra variação modular de  $\pm 0,09$  m em relação ao nível médio do mar (Figura 12b).

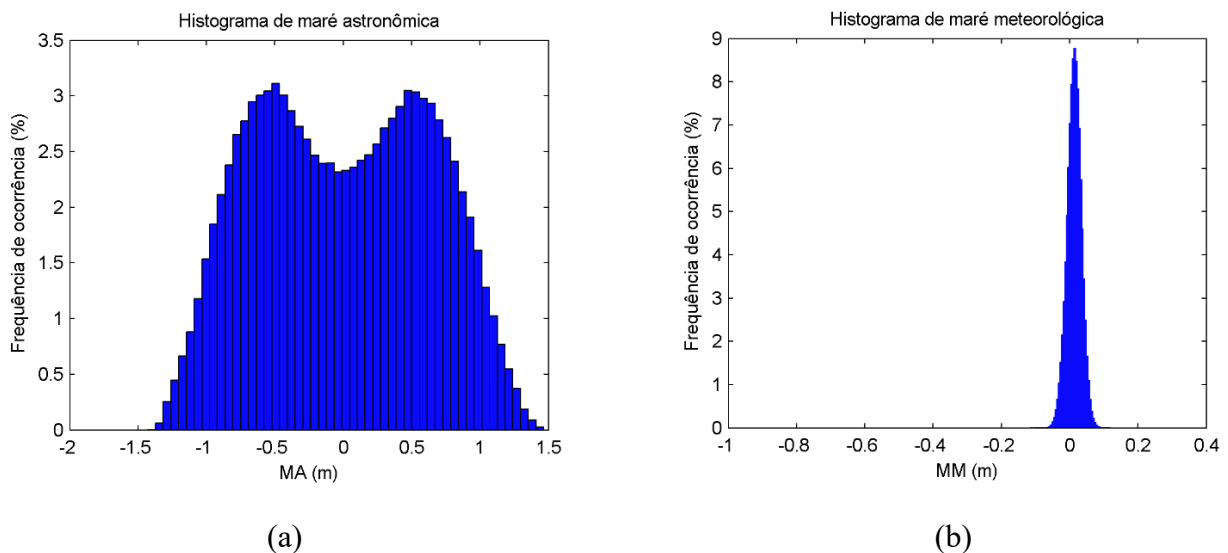
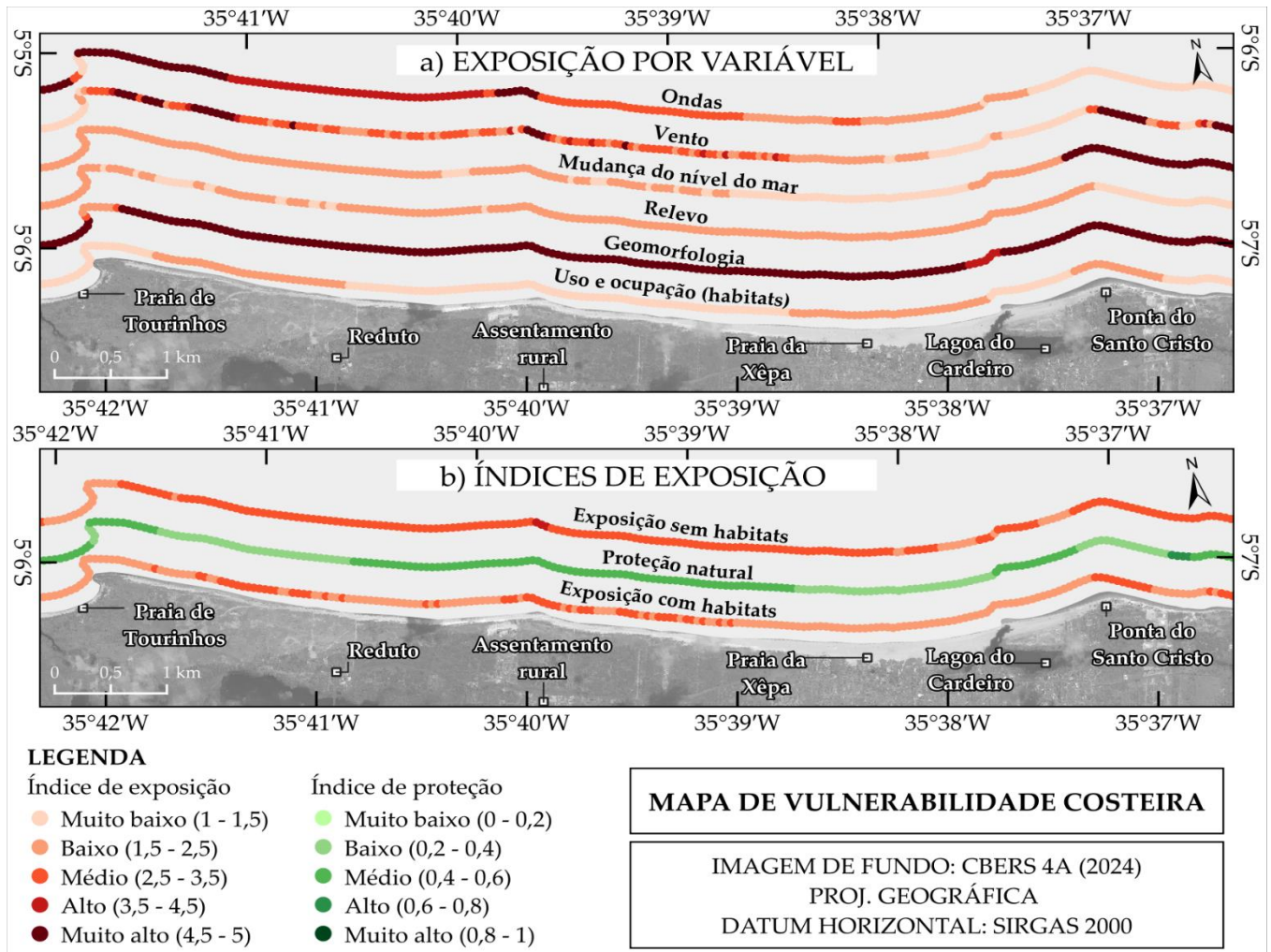


Figura 12. Histogramas de (a) maré astronômica e (b) maré meteorológica no ponto DOW.

4.5. Vulnerabilidade costeira

Na Figura 13a, são expostos os resultados da exposição costeira à erosão imposta por cada variável considerada na análise, sendo: ondas, ventos, mudança do nível do mar, relevo, geomorfologia e uso e ocupação do solo. Na Figura 13b, por sua vez, é exposto o índice de vulnerabilidade costeira da área de estudo é exposto na, sendo explicitado a exposição com e sem a consideração da função protetiva dos habitats.

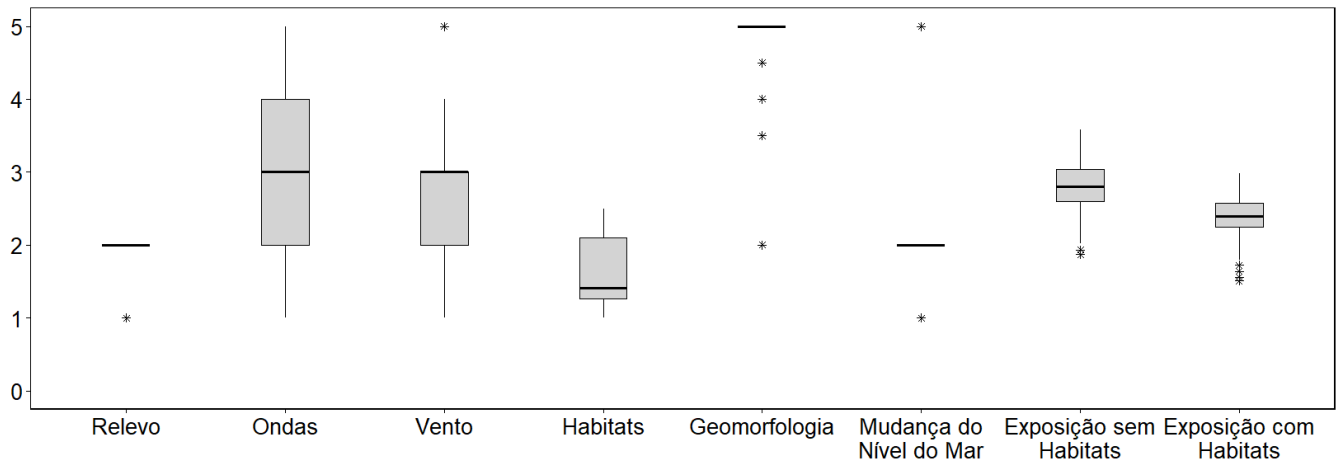


**Figura 13.** Vulnerabilidade costeira expondo: a) o nível de exposição associado a cada uma das variáveis consideradas no índice final. b) os índices de exposição à erosão ao longo da costa estudada considerando a proteção resultante dos habitats (em verde) e sem a proteção dos habitats.

A Figura 13b revela que a presença de habitats costeiros é crucial para mitigar a exposição à erosão, mantendo-a em níveis baixos a médios. Em contraste, a ausência dessa proteção resulta em predominante elevação da vulnerabilidade para o índice médio, com o surgimento de um setor de alta vulnerabilidade ao norte do assentamento rural, na porção central da área de estudo. A geomorfologia praial, predominantemente arenosa, é fator primário de suscetibilidade à erosão, conforme evidenciado na Figura 13a. Adicionalmente, a vulnerabilidade associada à ação de ondas e ventos demonstra impacto significativo nesse ambiente, particularmente onde a morfologia da praia arenosa forma ângulos quase ortogonais à sua incidência.

A variação do nível médio do mar, inferida pela variação planimétrica da linha de costa, isto é, as taxas de erosão em pontos ao longo da costa, exerceu impacto notável, particularmente próximo à Praia da Ponta do Santo Cristo. No setor oeste, notadamente na Praia de Tourinhos, as ondas também se revelaram fator significativo de vulnerabilidade costeira. O relevo e o uso/ocupação do solo contribuíram para a modulação geral da vulnerabilidade na área de estudo. A análise estatística revelou que a mediana do índice de exposição,

considerando a proteção dos habitats costeiros, foi de  $2,39 \pm 0,27$  (risco baixo). Contudo, sem essa proteção, a mediana elevou-se para  $2,80 \pm 0,29$  (risco médio), enfatizando a importância dos serviços ecossistêmicos de proteção contra a erosão e inundações costeiras fornecida por esses ambientes. Os diagramas de dispersão dos valores de vulnerabilidade costeira são apresentados na Figura 14.



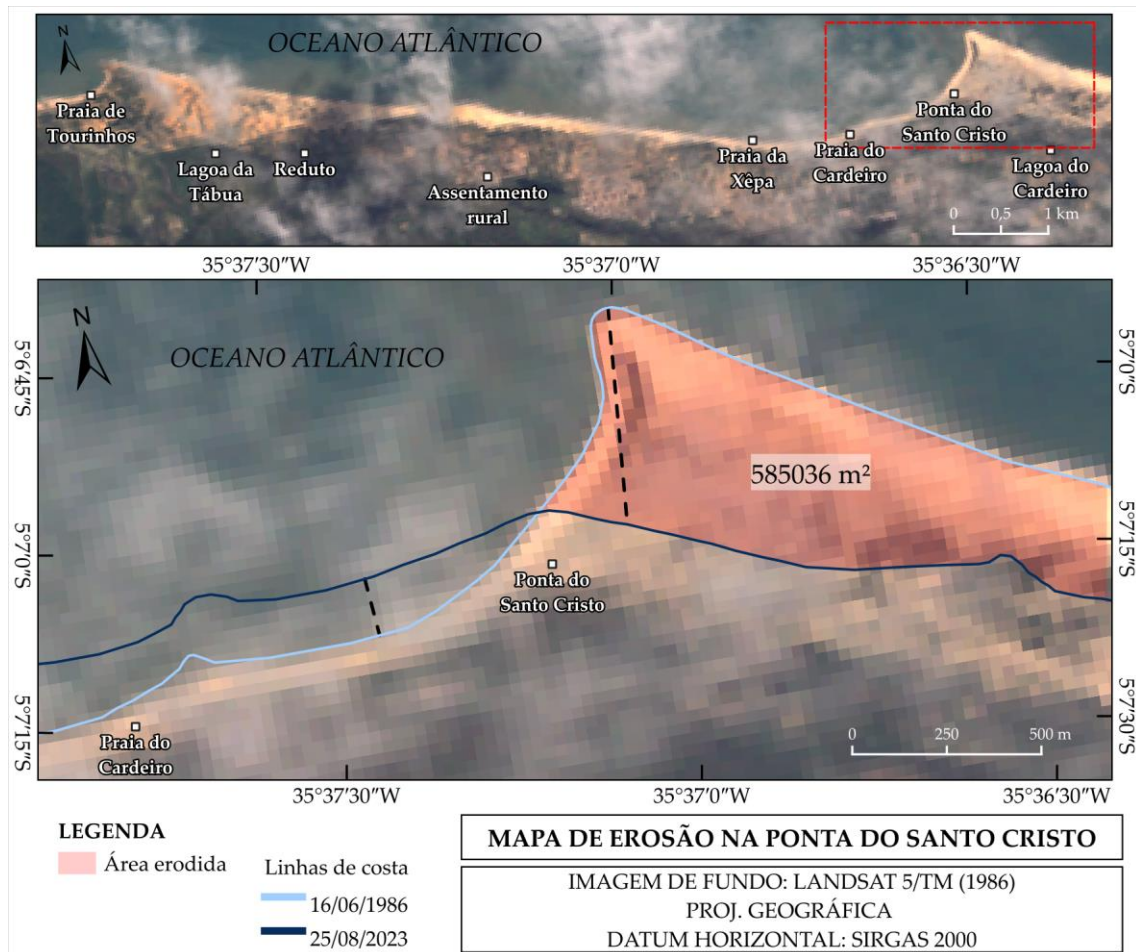
**Figura 14.** Diagrama *box-plot* de dispersão dos dados de exposição à vulnerabilidade costeira.

A Figura 14 demonstra que a presença de habitats está associada a significativa redução da exposição à erosão costeira na área de estudo, evidenciada pela distinção nos agrupamentos dos dados. Adicionalmente, os resultados explicitam maior heterogeneidade nas distribuições das variáveis ondas, vento e uso e ocupação do solo em comparação com relevô, geomorfologia e variação do nível do mar.

Os valores discrepantes (*outliers*) identificados refletem condições locais específicas ou feições pontuais que destoam do padrão predominante, possivelmente associadas à heterogeneidade espacial de determinados trechos da área de estudo. Como exemplo, para a geomorfologia, considerando que a linha de costa é majoritariamente praial, as demais feições (lagoas e falésias) foram definidas como discrepantes. Os valores discrepantes nos índices de exposição sem e com habitats, refletem pequenos trechos de menor exposição na área de estudo.

## 5. Discussão

A análise da variação da linha de costa na área de estudo, de 1986 a 2023, revelou taxas de variação espacialmente heterogêneas. Notavelmente, aproximadamente 1,4 km da costa exibiu taxas de erosão superiores a 5m/ano, uma magnitude classificada como erosão extrema em uma perspectiva global, conforme demonstrado por estudos comparáveis em períodos similares (Luijendijk et al., 2018). Na Ponta do Santo Cristo, observou-se retração continental linear média de -378,43m entre 1986 e 2023 (atingindo valor máximo de 575,91m), com taxas de erosão da ordem de -11,00m/ano, correspondendo a uma perda planimétrica em área de cerca de 585.036 m<sup>2</sup>, conforme explicitado na Figura 15. Na análise de maior resolução, com dados de um período mais recente (2016 a 2024), a tendência erosiva se intensifica, atingindo valor médio de -14,55m/ano. Esses resultados inegavelmente evidenciam a severidade dos processos erosivos na região, particularmente em pontos de maior vulnerabilidade.



**Figura 15.** Área erodida na Ponta do Santo Cristo entre os anos de 1986 e 2023.

Observou-se a intensificação da dinâmica sedimentar na área de estudo nas últimas décadas, evidenciada pela acentuação das taxas de variação (LRR) e amplitude de variação (SCE). A erosão extrema, superior a 5m/ano, foi registrada em 11% da costa entre 1986 e 1993, em 14% entre 2006 e 2014, e em 21% entre 2014 e 2023, demonstrando um aumento progressivo da extensão das áreas com erosão severa. Em relação à amplitude da variação (SCE), a classificação de amplitude alta, acima de 30 m, foi observada em 61% do trecho avaliado entre 1986 e 2006, em 56% entre 2006 e 2014, e um aumento notável para 83% na década mais recente (2014 a 2023), enfatizando a amplificação da instabilidade da linha de costa ao longo do tempo. Esses dados confirmam um cenário de agravamento da erosão costeira na região, com implicações significativas para a gestão costeira e planejamento territorial. Essa situação é agravada pelas pressões meteoceanográficas decorrentes de eventos extremos com períodos de retorno decadais, cuja frequência é intensificada pelas mudanças climáticas devido ao aquecimento global. Os dados DOW evidenciam a influência de fenômenos atmosféricos tropicais sobre as ondas que incidem na área de estudo, carreando energia potencial para mobilização hidráulica dos sedimentos na praia. Apesar de serem curtos no tempo, com poucas horas de duração, eventos meteoceanográficos intensos estão diretamente relacionados a desastres costeiros de grande impacto ambiental (Pinheiro et al., 2023).

As alterações na dinâmica da linha de costa são proeminentes nos setores leste da área de estudo, adjacentes à Ponta do Santo Cristo, e nas praias centrais da Xêpa e do Cardeiro. Nessas áreas, as taxas de variação exibem modificação perceptível a partir de 1993–2006. É crucial notar que a aceleração dos processos erosivos observada na área de estudo coincide com o desenvolvimento urbano de SMG. Este desenvolvimento intensificou-se a partir dos anos 2000, caracterizado pela intensificação do uso da praia, instalação de infraestrutura turística próxima à orla marítima, aumento da população flutuante, prática de esportes náuticos e alterações na dinâmica social (Matias, 2017). Tais resultados sugerem uma forte correlação entre a pressão antrópica e o agravamento da erosão costeira na região.

Constatou-se que os segmentos costeiros com taxas de variação mais intensas, cuja erosão ou deposição superior a 5m/ano, estão localizados nas proximidades de manchas urbanas mais consolidadas. Em contrapartida, no setor com menor grau de antropização, situado entre o centro urbano de SMG e a Praia de Tourinhos, um perfil mais estável é notado, com pequenas oscilações ao longo do período de análise. Esses resultados indicam uma correlação direta entre a ocupação humana e a dinâmica costeira, sugerindo que a antropização induz ao desequilíbrio do balanço sedimentar, principalmente devido à interrupção do suprimento de sedimentos provenientes do continente, em decorrência da impermeabilização do solo devido à construção de edificações próximo à linha de costa (Figura 7). Nesses setores com as feições de praia mais preservadas, apesar da incidência de ondas de ressacas e agitação marítima intensa, a praia ainda desempenha a função ecossistêmica de proteção costeira, sendo capaz de conter o avanço do mar e atuando como regulador adaptativo frente pressões climáticas de médio e longo termos. Esta relação é consistentemente corroborada por diversas outras pesquisas (Addo; Jayson Quashigah; Kufogbe, 2011; Hennig, 2016; Forgiarini et al., 2019; Daud; Milow; Zakaria, 2021).

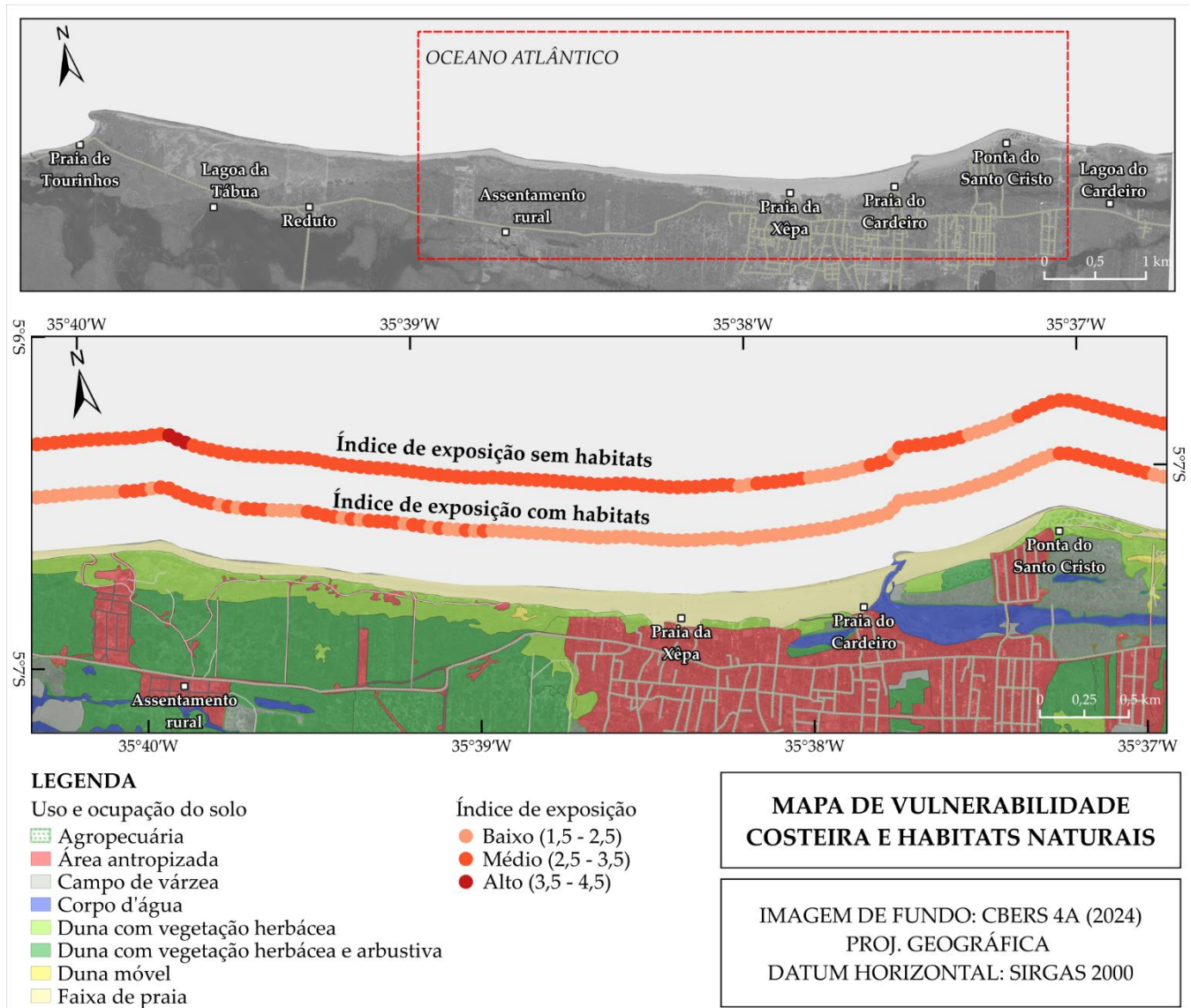
A análise de vulnerabilidade na Praia de Tourinhos revelou índice consistentemente baixo em ambos os cenários (com e sem habitats costeiros). Essa condição é primariamente atribuída ao provável menor impacto da energia de ondas localmente, além de a faixa arenosa ser reduzida ou inexistente em baixa-mar, diretamente defronte à falésia ativa. A presença dessa falésia ativa confere menor vulnerabilidade à erosão em comparação com análises de linha de costa em faixas arenosas. Tais resultados destacam a importância da estabilidade da geomorfologia costeira na modulação da vulnerabilidade, mesmo diante de alterações ambientais.

Da Praia de Tourinhos até a Praia da Xêpa, trecho da orla com emergente interesse turístico e imobiliário, observa-se oscilação entre risco médio e baixo. Essa variação é predominantemente influenciada pela vulnerabilidade às ondas quando se considera a presença dos habitats. Contudo, ao desconsiderar a proteção desses ecossistemas, o risco eleva-se para o nível médio em quase todo o setor, com identificação de aproximadamente 150 m altamente expostos à erosão.

Na Ponta do Santo Cristo, a alta vulnerabilidade associou-se a fatores como vento, geomorfologia e variação planimétrica da linha de costa (mudança no nível do mar), com branda exposição às ondas. Isso possivelmente se atribui à estrutura rochosa submersa próxima, que refrata e difrata o clima de ondas, reduzindo o FE das ondas que atingem a orla local. Consequentemente, o índice de vulnerabilidade para este setor foi classificado como médio, independentemente da presença de habitats.

O mapeamento de uso e cobertura do solo, juntamente com o reconhecimento *in situ*, revelou que, em áreas com maior presença humana, os campos dunares, que atuam como barreiras naturais contra as forças hidrodinâmicas, encontram-se atenuados e, frequentemente, desprovidos de vegetação significativa. Tal fator resulta em um sistema costeiro mais energético e, consequentemente, mais suscetível à perda de sedimentos devido à movimentação oceânica e costeira. O impacto da antropização não se restringe às ocupações fixas próximas à orla, mas é acentuado pelo aumento do fluxo de transeuntes, banhistas e veículos. Este se concentra tipicamente perto de estruturas inadequadamente construídas na orla, impactando dunas e faixas de praia, conforme reconhecimento *in situ*.

A análise da vulnerabilidade costeira ratifica a importância dos campos dunares e dunas de pós-praia, especialmente no setor que se estende da Praia da Xêpa até a Praia de Tourinhos. Essa região demonstrou significativa redução na exposição a riscos costeiros, mas é de crescentes interesses imobiliários e turísticos, com novos empreendimentos em instalação ou planejados. Constatou-se que a presença de campos dunares preservados abranda a vulnerabilidade em cerca de 2,6 km da orla marítima (Figura 16). Além disso, a ampla faixa de praia entre a Ponta do Santo Cristo e a Praia da Xêpa também desempenha função protetora relevante, embora o sistema duna-praia nesse segmento tenha sido comprometido pela antropização inadequada.



**Figura 16.** Mapa de vulnerabilidade do setor urbano com sobreposição do uso e cobertura do solo mapeado, evidenciando a proteção resultante dos habitats costeiros presentes.

Os resultados da avaliação de vulnerabilidade costeira evidenciam a natureza multifatorial e inter-relacionada dos processos que governam a exposição da linha de costa às forças hidrodinâmicas, às atividades antrópicas e aos consequentes efeitos erosivos e deposicionais. Para a área em estudo, as variáveis cruciais na determinação do risco costeiro incluem: a morfologia da costa, dada sua relação direta com a exposição à incidência de ventos e ação marinha; a proximidade de habitats costeiros, como a presença de dunas adjacentes e a extensão da faixa de praia; e a mudança do nível médio do mar. Consequentemente, a alteração da linha de costa, impulsionada pela variação da linha de costa e acelerada pela remoção de habitats protetores, pode implicar na intensificação da dinâmica costeira, resultando em efeito cumulativo de impactos adversos na área litorânea, que apresenta crescente interesse socioeconômico.

Os locais de maior exposição aos efeitos erosivos na área estudada foram a Ponta do Santo Cristo e as praias urbanas do município (Cardeiro e Xêpa), caracterizados por significativos investimentos turísticos, conforme evidenciado pelos novos empreendimentos. A ocupação antrópica indiscriminada, concomitantemente à supressão dos habitats protetores contra a erosão, poderá resultar em severas consequências ao turismo local. Isso se manifestará pela redução da faixa de praia, na deterioração da qualidade da água costeira, na perda de espaços verdes e, em cenários mais extremos, na perda de propriedades públicas e privadas, equipamentos e infraestruturas costeiras, um fenômeno que já ocorre na região.

## 6. Conclusões

Este estudo avaliou a vulnerabilidade costeira de um segmento da orla marítima em São Miguel do Gostoso, RN, com foco em sua relação com a crescente intensificação da energia hidrodinâmica e o processo de uso inadequado do solo pela ação humana. A metodologia empregou técnicas de geoprocessamento que acoplaram dados de sensoriamento remoto orbital, modelagem numérica costeira e oceânica e levantamentos de campo, proporcionando uma análise espacial e temporal robusta. Os resultados revelaram taxas de erosão extrema, atingindo média de -14,55 m/ano em setor da área de estudo, uma magnitude classificada como severa em um contexto global.

Além disso, o período de 1986 a 2023 demonstrou variações significativas no perfil do balanço sedimentar, com notável acentuação da mobilidade de sedimentos e na taxa de variação da linha de costa a partir de 2004, e mais expressivamente após 2014. Essa intensificação foi proeminente em locais de maior densidade de ocupação antrópica, como a Ponta do Santo Cristo e as praias do Cardeiro e da Xêpa.

O mapeamento de uso e cobertura do solo, aliado ao reconhecimento *in situ*, confirmou o processo de antropização da área, embora significativa cobertura natural ainda persista. As feições dunares, especialmente as vegetadas, presentes ao longo de quase toda a extensão da faixa litorânea, algumas das quais ainda mantendo o equilíbrio duna-praia, foram ratificadas como elementos cruciais para o controle dos processos erosivos. A análise de vulnerabilidade costeira demonstrou um evidente abrandamento do índice de exposição em decorrência da presença dessas feições dunares, enfatizando sua função protetora.

A análise da vulnerabilidade costeira permitiu concluir que os fatores que influenciam a exposição da costa aos efeitos erosivos são multifatoriais e inter-relacionados. Para a área estudada, as variáveis mais impactantes na classificação da vulnerabilidade costeira à erosão foram a geomorfologia da costa, a incidência de ondas e ventos, e a presença de dunas.

Diante desses resultados, a ocupação antrópica de orlas marítimas – ambientes altamente visados por interesses socioeconômicos, particularmente das indústrias da construção civil e turística – deve ser intrinsecamente acompanhada por avaliações ambientais rigorosas, ações estratégicas de gestão costeira e implementação de medidas eficazes de controle ambiental. Tais ações objetivam fomentar soluções mais sustentáveis para esses ecossistemas, que ainda preservam características naturais com potencial para mitigar e adaptar-se aos desafios das mudanças climáticas.

**Contribuições dos Autores:** G.D.R.C.: Concepção, Metodologia, Análise formal, Investigação, Redação – versão inicial, Redação – revisão e edição. V.E.A.: Concepção, Investigação, Redação – revisão e edição, Supervisão, Administração do projeto. L.R.S.G.P.: Análise formal, Redação – revisão e edição. N.S.Z.: Concepção, Redação – revisão e edição.

**Conflito de Interesse:** Os autores declaram não haver conflito de interesse. Os financiadores não tiveram interferência no desenvolvimento do estudo; na coleta, análise ou interpretação dos dados; na redação do manuscrito, ou na decisão de publicar os resultados.

**Agradecimentos:** Este trabalho é uma contribuição aos temas de pesquisa do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – KLIMAPOLIS, financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação do Brasil (MCTI). Agradecemos ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPCIVAM) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), no qual o presente trabalho foi desenvolvido e em especial à Professora Ada Scudelari por suas contribuições. Agradecemos também à Dra. Maria de Fátima Alves de Matos, pelas suas orientações, sugestões e contribuições no desenvolvimento do presente trabalho. Nossos agradecimentos se estendem à Defesa Civil do Estado do Rio Grande do Norte ao Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte (IDEMA), em especial à Cintia Brito Prudente da Silva, pelas contribuições sobre os desafios da região que se tornou objeto do presente estudo. Por fim, agradecemos à equipe da Ecoeng, que trouxe, de diversas formas, a inspiração, o apoio e as ferramentas para o desenvolvimento da presente pesquisa.

## 7. Referências

1. ADDO, K. K.; JAYSON-QUASHIGAH, P.-N.; KUFOGBE, S. Quantitative Analysis of Shoreline Change Using Medium Resolution Satellite Imagery in Keta, Ghana. *Marine Sciences*, v. 1, p. 1–9, 2011. DOI: 10.5923/j.ms.20110101.01
2. ALMEIDA, L. P.; OLIVEIRA, I. E. D.; LYRA, R.; DAZZI, R. L. S.; MARTINS, V. G.; KLEIN, A. H. F. D. F. Coastal Analyst System from Space Imagery Engine (CASSIE): shoreline management module. *Environmental Modelling & Software*, v. 140, 2021. DOI: 10.1016/j.envsoft.2021.105033
3. AMARO, V. E.; GOMES, L. R. S.; LIMA, F. G. F. D.; SCUDELARI, A. C.; NEVES, C. F.; BUSMAN, D. V.; SANTOS, A. L. S. Multitemporal Analysis of Coastal Erosion Based on Multisource Satellite Images, Ponta Negra Beach, Natal City, Northeastern Brazil. *Marine Geodesy*, v. 38, n. 1, p. 1–25, 2015. DOI: 10.1080/01490419.2014.904257
4. AMARO, V. E.; CARVALHO, R. C.; MATOS, M. F. A.; INGUNZA, M. D. P. D.; SCUDELARI, A. C. Avaliação da suscetibilidade do solo à erosão nas falésias do litoral oriental do estado do Rio Grande do Norte. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 22, n. 1, p. 3–25, 2021a. DOI: 10.20502/RBG.V22I1.1887
5. AMARO, V. E.; SCUDELARI, A. C.; OLIVEIRA, D. S. D.; LACERDA, I. L. C.; MATOS, M. F. A. Analysis of physical vulnerability indices using geotechnologies in the Barreira do Inferno region of Rio Grande do Norte state, Brazil. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 7, n. 2, p. 179–192, 2021b. DOI: 10.21680/2447-3359.2021v7n2ID22034
6. ARAÚJO, R. V.; PEREIRA, P. S.; LINO, A. P.; ARAÚJO, T. M.; GONÇALVES, R. M. Morphodynamic study of sandy beaches in a tropical tidal inlet using RPAS. *Marine Geology*, v. 438, 2021. DOI: 10.1016/j.margeo.2021.106540
7. ARKEMA, K. K.; GUANNEL, G.; VERUTES, G.; WOOD, S. A.; GUERRY, A.; RUCKELSHAUS, M.; KAREIVA, P.; LACAYO, M.; SILVER, J. M. Coastal habitats shield people and property from sea-level rise and storms. *Nature Climate Change*, v. 3, n. 10, p. 913–918, 2013. DOI: 10.1038/nclimate1944
8. BOOIJ, N.; RIS, R. C.; HOLTHUIJSEN, L. H. A third-generation wave model for coastal regions 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 104, n. C4, p. 7649–7666, 1999. DOI: 10.1029/98JC02622
9. BRASIL. Projeto Orla: fundamentos para gestão integrada. MP/SPU, 2002.
10. BRASIL. MARINHA. DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). *Carta náutica n.º 21900 – Da Ponta Maceió ao Cabo Calcanhar*. Niterói: DHN, 2022. Escala 1:350.000.
11. BUSMAN, D. V.; AMARO, V. E.; SOUZA-FILHO, P. W. M. Análise estatística multivariada de métodos de vulnerabilidade física em zonas costeiras tropicais. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 17, n. 3, 2016. DOI: 10.20502/rbg.v17i3.912
12. CAMUS, P.; MÉNDEZ, F. J.; MEDINA, R.; TOMAS, A.; IZAGUIRRE, C. High resolution downscaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal areas. *Coastal Engineering*, v. 72, p. 56–68, 2013. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2012.09.002
13. CHAPMAN, D. M. Zetaform bays. In: SCHWARTZ, M. (Ed.). *Beaches and Coastal Geology*. New York, NY: Springer US, 1984. p. 883–885.
14. CHARLIER, R. H.; MEYER, C. P. D. *Coastal erosion: response and management*. Springer, Berlin, 343 p. 1998.
15. CHEN, C. T. A.; GAO, X.; ISHIZAKA, J.; LEBEL, L. Coastal seas in a changing world: Anthropogenic impact and environmental responses. *Continental Shelf Research*, v. 111, p. 109–111, 2015. DOI: 10.1016/j.csr.2015.11.007
16. COSTA, W. F.; FONSECA, M. A. P. Lazer, turismo, especulação imobiliária e conflito territorial entre São Miguel do Gostoso e Touros (RN). *Revista Brasileira de Pesquisa em Turismo*, v. 13, n. 3, p. 92–104, 2019. DOI: 10.7784/rbtur.v13i3.1587
17. CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais). *Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do município de São Miguel de Touros, estado do Rio Grande do Norte*. Recife: CPRM, 2005.
18. CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais). *Geologia e recursos minerais do estado do Rio Grande do Norte - escala 1:500.000*. Organizador: Luiz Alberto de Aquino Angelim – Recife/PE. Serviço Geológico do Brasil. 2007.
19. DAUD, S.; MILOW, P.; ZAKARIA, R. Analysis of Shoreline Change Trends and Adaptation of Selangor Coastline, Using Landsat Satellite Data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, v. 49, 2021. DOI: 10.1007/s12524-020-01218-0
20. DINIZ, M. T. M.; OLIVEIRA, G. P. D.; MAIA, R. P.; FERREIRA, B. Mapeamento geomorfológico do estado do Rio Grande do Norte. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 18, n. 4, p. 689–701, 2017. DOI: 10.20502/rbg.v18i4.1255
21. DINIZ, M. T. M.; PEREIRA, V. H. C. Climatologia do estado do Rio Grande do Norte, Brasil: sistemas atmosféricos atuantes e mapeamento de tipos de clima. *Boletim Goiano de Geografia*, v. 35, p. 488–506, 2015.
22. EMPARN (Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte). *Meteorologia – Dados pluviométricos estação TELEPLU – São Miguel do Gostoso*. 2022.
23. EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). *Copernicus Browser: Sentinel-2 imagery*. Paris: ESA, 2023. Disponível em: <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>. Acesso em dezembro de 2023.
24. FORGIARINI, A. P. P.; AMARAL DE FIGUEIREDO, S.; CALLIARI, L. J.; GOULART, E. S.; MARQUES, W.; TROMBETTA, T. B.; OLEINIK, P. H.; GUIMARÃES, R. C.; ARIGONY-NETO, J.; CABRAL SALAME, C. Quantifying the geomorphologic

- and urbanization influence on coastal retreat under sea level rise. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 230, p. 106437, 15 dez. 2019. DOI: 10.1016/j.ecss.2019.106437
25. GONZÁLEZ, M.; NICLODI, K. L.; GUTIÉRREZ, O. Q.; CÁNOVAS, V.; ESPEJO, A. Processos costeiros brasileiros: ventos, clima de ondas e nível do mar com base em reanálise de dados. In: **Sistema de Modelagem Costeira do Brasil – Estudos de Caso**, p. 11–64, 2018.
  26. GORNITZ, V. **Vulnerability of the East Coast, U.S.A. to future sea level rise**. *Journal of Coastal Research*, p. 201–237, 1990.
  27. GRIGIO, A. M.; DE CASTRO, A. F.; SOUTO, M. V. S.; AMARO, V. E.; VITAL, H.; DIODATO, M. A. Use of Remote Sensing and GIS in the Determination of the Natural and Environmental Vulnerability of the Municipal District of Guamaré – Rio Grande do Norte – Northeast of Brazil. *Journal of Coastal Research*, p. 1427–1431, 2006. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/25742990>
  28. GUANNEL, G.; ARKEMA, K.; RUGGIERO, P.; VERUTES, G. The power of three: Coral reefs, seagrasses and mangroves protect coastal regions and increase their resilience. *PLoS ONE*, v. 11, n. 7, 2016. DOI: 10.1371/journal.pone.0158094
  29. HAMMAR-KLOSE, E. S.; THIELER, E. R.; U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Coastal vulnerability to sea-level rise: a preliminary database for the U.S. Atlantic, Pacific, and Gulf of Mexico coasts**. U.S. Geological Survey Data Series DDS-68, 2001. DOI: 10.3133/ds68
  30. HENNIG, T. Damming the transnational Ayeyarwady basin. Hydropower and the water-energy nexus. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 65, p. 1232–1246, 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2016.07.048
  31. HIMMELSTOSS, E. A. et al. **Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide Open-File Report**. Reston, VA: [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/publication/ofr20181179>>.
  32. IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Censo Brasileiro 2010**. 2010.
  33. IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.
  34. IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Base de Dados Espacial Brasil Versão 2019**. Escala 1:250.000, 2019.
  35. IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Censo Brasileiro 2022**. 2022.
  36. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Catálogo de Imagens CBERS**. São José dos Campos: INPE, 2023. Disponível em: <https://www.dgi.inpe.br/CDSR/>. Acesso em dezembro de 2023.
  37. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **Climate change 2014: synthesis report: longer report**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
  38. JUVINO DA SILVA, L. R.; AMARO, V. E.; SCUDELARI, A. C.; PINHEIRO, L. R. S. G. Risk map of coastal erosion and gravitational mass movements of the Brazilian eastern coast: a case study of Pipa Beach/RN. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 24, n. 2, 2023. DOI: 10.20502/rbg.v24i2.2281
  39. LACERDA, I. L. C.; AMARO, V. E.; MATOS, M. F. A.; SCUDELARI, A. C. Physical vulnerability of the coastal zone under wind farms influence of the cities of Pedra Grande and São Miguel do Gostoso/RN, Brazil. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 57, n. 3, p. 422–433, set. 2022. DOI: 10.5327/z2176-94781244
  40. LOEW, A.; BELL, W.; BROCCA, L.; BULGIN, C. E.; BURDANOWITZ, J.; CALBET, X.; DONNER, R. V.; GHENT, D.; GRUBER, A.; KAMINSKI, T.; KINZEL, J.; KLEPP, C.; LAMBERT, C.; SCHAEPMAN-STRUB, G.; SCHRÖDER, M.; VERHOELST, T. Validation practices for satellite-based Earth observation data across communities. *Reviews of Geophysics*, 55(3), 779-817, 2017. <https://doi.org/10.1002/2017RG000562>
  41. LUIJENDIJK, A.; HAGENAARS, G.; RANASINGHE, R.; BAART, F.; DONCHYTS, G.; AARNINKHOF, S. The State of the World's Beaches. *Scientific Reports*, v. 8, n. 1, 2018. DOI: 10.1038/s41598-018-24630-6
  42. MACEDO, Y.; SILVA, E.; OLIVEIRA, V.; JÚNIOR, J.; COSTA, D.; CESTARO, L. Serviços ambientais das unidades geoambientais no município de São Miguel do Gostoso/RN, Brasil. *GOT – Journal of Geography and Spatial Planning*, v. 12, p. 205–229, 2017. DOI: 10.17127/got/2017.12.009
  43. MARINHA DO BRASIL. **Carta Náutica 21900 da Marinha do Brasil: Da ponta Maceió ao Cabo Calcanhar**. Escala 1:300.000. (s.d.)
  44. MARRONI, E. V.; ASMUS, M. L. **Gerenciamento Costeiro: uma proposta para o fortalecimento comunitário na gestão ambiental**. Pelotas: Editora USEB, 2005.
  45. MATIAS, E. M. S. **Microrrealidades transformadas pelo turismo em São Miguel do Gostoso – RN**. Tese (Doutorado em Ambiente e Sociedade) - Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Sociedade, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2017. 167p.
  46. MATOS, M. F. A.; AMARO, V. E.; SCUDELARI, A. C.; ROSADO, S. B. Estimation of long term shoreline changes along the Eastern Coast of Rio Grande do Norte State, Northeast Brazil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 23, n. 1, p. 1027–1053, 2022a. DOI: 10.20502/RBG.V23I1.1953

47. MATOS, M. F. A.; SCUDELARI, A. C.; AMARO, V. E. Variabilidade Interanual do Potencial Energético das Ondas Oceânicas na Costa Setentrional do Rio Grande do Norte, Atlântico Equatorial Sul. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, BR., v. 45, 2022b. DOI: 10.11137/1982-3908\_2022\_45\_46460.
48. MELO, A. B. C.; CAVALCANTI, I. F.; SOUZA, P. P. Zona de Convergência Intertropical do Atlântico. In: CAVALCANTI, I. F. A. (Ed.), **Tempo e clima no Brasil**, cap. 2, p. 25–41. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.
49. MOURA, J. E. **Influência dos modelos digitais de terreno na modelagem de circulação hidrodinâmica 2DH: um estudo de caso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2010. 137p.
50. MUEHE, D. (org.). **Panorama da Erosão Costeira no Brasil**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2018.
51. MUEHE, D.; KLUMB-OLIVEIRA, L. Deslocamento da linha de costa versus mobilidade praial. **Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 5, n. 2, 31 dez. 2014.
52. NOARDO, F. Multisource spatial data integration for use cases applications. **Transactions in GIS**, v. 26, n. 7, p. 2874-2913, 2022. DOI: 10.1111/tgis.12987.
53. OTSU, N. A threshold selection method from gray-level histograms. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v. 9, n. 1, p. 62–66, 1979. DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076
54. PARKER, B. B. The difficulties in measuring a consistently defined shoreline? The problem of vertical referencing. **Journal of Coastal Research**, v. 38, p. 44–56, 2003.
55. PFALTZGRAFF, P. A. S.; TORRES, F. S. M. **Geodiversidade do estado do Rio Grande do Norte**. CPRM, 2010.
56. PINHEIRO, L. R. S. G.; SOUZA, R. F.; AMARO, V. E.; SPYRIDES, M. H. C. 40 Years Extreme Offshore Waves off the Eastern Continental Shelf of Rio Grande do Norte, Northeast Brazil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 2, p. 1040-1059, 2023. DOI: 10.26848/rbgf.v16.2.p1040-1059
57. POLLARD, J. A.; SPENCER, T.; BROOKS, S. M. The interactive relationship between coastal erosion and flood risk. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, v. 42, n. 4, p. 556–578, 2019. DOI: 10.1177/0309133318790089.
58. POLLOCK, W.; WARTMAN, J. Human vulnerability to landslides. **GeoHealth**, v. 4, n. 10, 2020. DOI: 10.1029/2020GH000287
59. PRUDÊNCIO, M. C.; AMARO, V. E.; SCUDELARI, A. C. Coastal evolution analysis between the years 1984 and 2014 of a stretch of Rio Grande do Norte eastern coast, northeast Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, v. 42, n. 4, p. 189–205, 2019. DOI: 10.11137/2019\_4\_189\_205
60. QUETZALCÓATL, O.; GONZÁLEZ, M.; CÁNOVAS, V.; MEDINA, R.; ESPEJO, A.; KLEIN, A.; TESSLER, M. G.; ALMEIDA, L. R.; JARAMILLO, C.; GARNIER, R.; KAKEH, N.; GONZÁLEZ-ONDINA, J. SMCε, a coastal modeling system for assessing beach processes and coastal interventions: Application to the Brazilian coast. **Environmental Modelling & Software**, v. 116, p. 131–152, 2019. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.03.001
61. REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; DA ROCHA, R. P. Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. **Terrae Didactica**, v. 8, n. 1, p. 34–50, 2012.
62. SMG (São Miguel do Gostoso). **Histórico [página eletrônica]**. Disponível em: < <https://site.saomigueldogostoso.rn.gov.br/pages/historico>>. Acesso em junho de 2025.
63. SANTOS, M. S. T.; AMARO, V. E.; SOUTO, M. V. S. Metodologia geodésica para levantamento de linha de costa e modelagem digital de elevação de praias arenosas em estudos de precisão de geomorfologia e dinâmica costeira. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 63, 2011. DOI: 10.14393/rbcv63n0-43760
64. SOUZA, P.; CAVALCANTI, I. F. A. **Atmospheric centres of action associated with the Atlantic ITCZ position**. International Journal of Climatology, v. 29, n. 14, p. 2091–2105, 2009. DOI: 10.1002/joc.1823
65. TAVEIRA, M. S. **Turismo e comunidades de praia: São Miguel do Gostoso no caminho do mar e na direção dos ventos**. Tese (Doutorado em Ciências Sociais) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Sociais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2015. 363p.
66. THIELER, E. R.; HIMMELSTOSS, E. A.; ZICHICHI, J. L.; ERGUL, A.; U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4.0 – an ArcGIS extension for calculating shoreline change**. U.S. Geological Survey Open-File Report, 2009. DOI: 10.3133/ofr20081278
67. TOLMAN, H. L. **User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14**. U.S. Department of Commerce / NOAA/NWS/NCEP, Camp Springs, MD, 2009.
68. UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) – Digital Elevation Model. Sioux Falls: USGS, 2023. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em dezembro de 2023.
69. VOUSDOKAS, M. I.; RANASINGHE, R.; MENTASCHI, L.; PLOMARITIS, T. A.; ATHANASIOU, P.; LUIJENDIJK, A.; FEYEN, L. Sandy coastlines under threat of erosion. **Nature Climate Change**, v. 10, n. 3, p. 260–263, 2020. DOI: 10.1038/s41558-020-0697-0

70. WANNEWITZ, M.; AJIBADE, I.; MACH, K. J.; MAGNAN, A.; PETZOLD, J.; RECKIEN, D.; ULIBARRI, N.; AGOPIAN, A.; CHALASTANI, V. I.; HAWXWELL, T.; HUYNH, L. T. M.; KIRCHHOFF, C. J.; MILLER, R.; MUSA-SURUGU, J. I.; NAGLE ALVERIO, G.; NIELSEN, M.; NUNBOGU, A. M.; PENTZ, B.; REIMUTH, A.; ... GARSCHAGEN, M. Progress and gaps in climate change adaptation in coastal cities across the globe. **Nature Cities**, v. 1, n. 9, p. 610–619, 26 ago. 2024. DOI: 10.1038/s44284-024-00106-9
71. ZAMBONI, N. S.; MATOS, M. F. A.; AMARO, V. E.; PRUDÊNCIO, M. C.; CARVALHO, A. R. The protective role of mangroves in safeguarding coastal populations through hazard risk reduction: a case study in northeast Brazil. **Ocean and Coastal Management**, v. 229, 2022. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2022.106353
72. ZAMBONI, N. S.; MATOS, M. F. A. de; AMARO, V. E.; PRUDÊNCIO, M. C.; VERUTES, G. M.; CARVALHO, A. R. Impacts of land use change on mangrove blue carbon services: a future perspective in northeastern Brazil. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 317, p. 109185, jun. 2025. DOI: 10.1016/j.ecss.2025.109185



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.