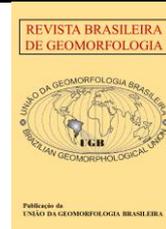




<https://rbgeomorfologia.org.br/>
ISSN 2236-5664



Artigo de Pesquisa

Mapa de Risco à Erosão Costeira e Movimentos Gravitacionais de Massa no Litoral Oriental do Nordeste do Brasil: Estudo de Caso na Praia de Pipa/RN

Risk map of coastal erosion and gravitational mass movements of the Brazilian eastern coast: a Case Study of Pipa Beach/RN

Luana Raquel Juvino da Silva ¹, Venerando Eustáquio Amaro ², Ada Cristina Scudelari ³, Lívian Rafaely de Santana Gomes Pinheiro ⁴

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, Brasil. luana.raquel.365@ufrn.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8368-2494>

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, Brasil. venerando.amaro@gmail.com

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

³ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, Brasil. adaufrn@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7594-1196>

⁴ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Natal, Brasil. livianrafaely@gmail.com

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

Recebido: 08/08/2022; Aceito: 13/12/2022; Publicado: 11/05/2023

Resumo: A orla marítima oriental do Estado do Rio Grande do Norte (RN) possui domínio de falésias ativas da Formação Barreiras e praias arenosas, interceptadas por desembocaduras de laguna, rios e estuários. Neste contexto geológico-geomorfológico localiza-se a Praia de Pipa, no Município de Tibau do Sul, onde as atividades socioeconômicas estão fortemente baseadas no turismo. Submetido à intensa dinâmica costeira, desastres tem ocorrido devido ao inadequado uso e ocupação do solo e às decisões embasadas em políticas públicas ineficazes. Este estudo apresenta o mapa de risco à erosão costeira e movimentos gravitacionais de massa para o trecho urbano da praia de Pipa realizado por meio da análise integrada em ambiente de Sistema de Informações Geográficas de dados espaciais do meio físico, pluviométricos, reanálises do regime de ondas e infraestruturas instaladas inadequadamente. Os resultados mostraram o domínio de setores categorizados em risco alto (R3), risco muito alto (R4) e pontos de risco de desastres iminentes, confirmados em visitas a campo. O mapa de risco forneceu compreensão da sinergia entre os processos continentais e marinhos, atuantes na retração da linha de costa, e, subsídios para o planejamento e controle ambiental costeiro, em tomadas de decisões referentes a intervenções adequadas para a redução de desastres.

Palavras-chave: Geoprocessamento; Dinâmica Costeira; Eventos Extremos de Precipitação; Estruturas de Contenção.

Abstract: The eastern coast of Rio Grande do Norte state (RN) is outlined by the Barreira's Group active cliffs domain and its sandy beaches, which are intercepted by lagoon, river's outlets and estuaries. The Pipa beach, in Tibau do Sul, is situated within the mentioned geological-geomorphological context, where socioeconomic activities are strongly linked to tourism. Subjected to intense coastal dynamics and activities, disasters have been occurring in the region can be attributed to

inadequate use and occupation of urban lands, as well as to poor public political decisions. This study presents the Risk Map of coastal erosion and gravitational mass movements for the urban coastal extent of Pipa Beach/RN, which has been prepared by the integrated analysis with a Geographic Information System of spatial data of the physical environment, rainfall, reanalysis of the waves regime and inadequately installed infrastructure. Results showed domain sectors categorized as high risk (R3) and very high risk (R4), and risky points regards to imminent desasters, which were confirmed during field visits. The Risk Map provided a comprehension of the synergy between continental and oceanic processes active in the retreat of the coastline, and subsidies for coastal environmental control and planning, and guiding decision making regards adequate intervention for disasters reduction.

Keywords: Geoprocessing; Coastal Dynamics; Extreme Precipitation Events; Containments Structure.

1. Introdução

Em escala global, as zonas costeiras compostas por praias arenosas e falésias ativas estão cada vez mais expostas aos riscos de desastres devido à erosão e inundação costeira (NICHOLLS *et al.* 2007; POLETTE e BARROS, 2012; LUIJENDIJK *et al.*, 2018; POLLARD *et al.* 2019). As mudanças climáticas projetadas resultariam em aumento do nível médio do mar, incremento nas condições de altura significativa e energia de ondas, aumento na frequência e intensidade dos eventos extremos de precipitação (EEP) em regiões equatoriais, aumento das tempestades nas latitudes médias, entre outras alterações (RANASINGHE 2016; RUEDA *et al.*, 2017; IPCC, 2021).

Os processos erosivos e consequentes inundações das orlas marítimas, ocasionadas pelo aumento na energia das forçantes meteoceanográficas, são potencializadas pelas atividades antropogênicas desordenadas instaladas e têm representado significativo aumento no risco de desastres, pois a instalação dessas infraestruturas comumente ocorre sem o conhecimento adequado da dinâmica dos processos costeiros e desconsideram as mudanças climáticas (COGHLAN *et al.*, 2012; TOIMIL *et al.*, 2019). Tais fatores geram notadamente desequilíbrio no transporte natural dos sedimentos costeiros, promovendo processos erosivos severos nas linhas de praia e intensificando a incidência de ondas nas porções basais de falésias, ocasionando prejuízos socioeconômicos às comunidades locais (AMARO *et al.*, 2015; World Economic Forum, 2018; MATOS *et al.*, 2020).

O Quadro de Sendai das Nações Unidas para Redução de Risco de Desastres 2015-2030 (UNISDR, 2015) é uma ferramenta de referência na prevenção e redução de riscos de catástrofes de pequena e grande escala, visando orientar à gestão a melhorar a resiliência das comunidades por meio da coerência entre as metas e indicadores das políticas públicas e do empreendimento de ações contra riscos de desastres múltiplos (COSTA, 2020; DRMIMS, 2021).

No entanto, aumentar a resiliência das comunidades e minimização ao risco de desastres na orla marítima de países em desenvolvimento é um desafio (MARENGO *et al.*, 2016) pois, mesmo tendo sua relevância frequentemente enfatizada na literatura, alguns dados espaciais sistematizados para a zona costeira ainda são espaço-temporalmente reduzidos e de difícil coleta, armazenamento e processamento (HUANG *et al.* 2021). Quando existentes, o seu potencial científico e operacional para a escala local ainda é ineficientemente explorado e incorporado às tomadas de decisões da gestão costeira (CUTTER, 2015). Isto decorre pelo menos por três questões principais (TORABI *et al.*, 2017): (i) acesso à informação; (ii) recursos limitados; (iii) mecanismos institucionais de gestão costeira confusos. Assim, a compreensão e rigorosos controles dos processos costeiros, resultantes da interação entre forçantes meteoceanográficas, continentais e antropogênicas na orla marítima, são determinantes para a gestão pública na avaliação da estabilidade de falésias ativas e propensas a movimentos gravitacionais de massas, igualmente correlacionadas aos processos erosivos nas praias arenosas defrontantes (POLLARD *et al.* 2019; MATOS *et al.*, 2020; AMARO *et al.*, 2021a).

O litoral oriental do Rio Grande do Norte (RN) é marcado pelo domínio de falésias ativas e praias arenosas, frequentemente associadas a campos de dunas móveis e fixadas por vegetação (SILVA *et al.*, 2020, AMARO *et al.* 2015), interceptadas por desembocaduras de rios e estuários. As falésias ativas correspondem às bordas marinhas e estuarinas dos Tabuleiros Costeiros constituídos predominantemente por rochas sedimentares da Formação Barreiras e pós-Barreiras, de topo plano e suavemente mergulhante para o oceano. A geometria das falésias ativas é retilínea, de direção geral NS e NNW, com praias arenosas defrontantes e comumente modeladas em enseadas parabólicas (ou na forma da letra grega *zeta*) limitadas por promontórios (BARRETO *et al.*, 2004; AMARO *et al.*, 2015). Este arranjo geomorfológico peculiar acompanha a estruturação geotectônica pretérita das bacias costeiras do Nordeste do Brasil retrabalhadas no tempo geológico pela orientação preferencial dos ventos e forçantes

hidrodinâmicas incidentes na costa, com transporte preferência de sedimentos no sentido de sul para norte (BEZERRA *et al.*, 2001; AMARO *et al.*, 2015; MATOS *et al.*, 2020).

Especificamente o trecho da praia de Pipa está inserido neste contexto geológico-geomorfológico costeiro de alta fragilidade natural, onde as atividades socioeconômicas se baseiam fortemente no turismo nacional e internacional, incentivando oportunidades de negócios e investimentos do setor imobiliário, além da construção de segundas residências. Esta dinâmica local, conectada aos serviços prestados pelos setores turístico e imobiliário, é a principal responsável pela movimentação da economia no município, transformando a região no segundo maior polo turístico do RN (MINISTÉRIO DO TURISMO, 2018). Tais fatos induziram relevantes investimentos públicos e privados sobre a orla marítima nas últimas décadas. Entretanto, a maioria dos trechos desta faixa litorânea está submetida aos intensos processos erosivos e desastres têm ocorrido, devido ao uso e ocupação do solo realizado inadequadamente e pautados em decisões ineficazes da gestão pública (MATOS *et al.*, 2022).

Logo, o objetivo deste artigo é a elaboração do mapa síntese de risco à erosão costeira e movimentos gravitacionais de massa no trecho da praia de Pipa/RN, considerando elementos do meio físico, fatores modeladores do relevo e infraestruturas instaladas na orla marítima com intuito de proteção contra tais desastres. Alinham-se as propostas do Quadro Sendai, com o intuito de fortalecer o entendimento sobre a dinâmica da orla marítima e fornecer dados e informações espaciais que auxiliam na tomada de decisões referentes às intervenções locais aos órgãos de planejamento e controle ambiental costeiro.

2. Área de Estudo

O município de Tibau do Sul está localizado no litoral oriental sul do RN, distante aproximadamente 60 km de Natal/RN e possui uma linha de costa com cerca de 16 km de extensão. O acesso rodoviário se dá pela BR- 101 entre Natal e Goianinha e com a RN-003 até a praia de Pipa. O mapeamento de risco proposto neste estudo será realizado na orla marítima urbana da praia de Pipa, desde o denominado Chapadão de Pipa até parte da Praia da Baía dos Golfinhos (Figura 1).

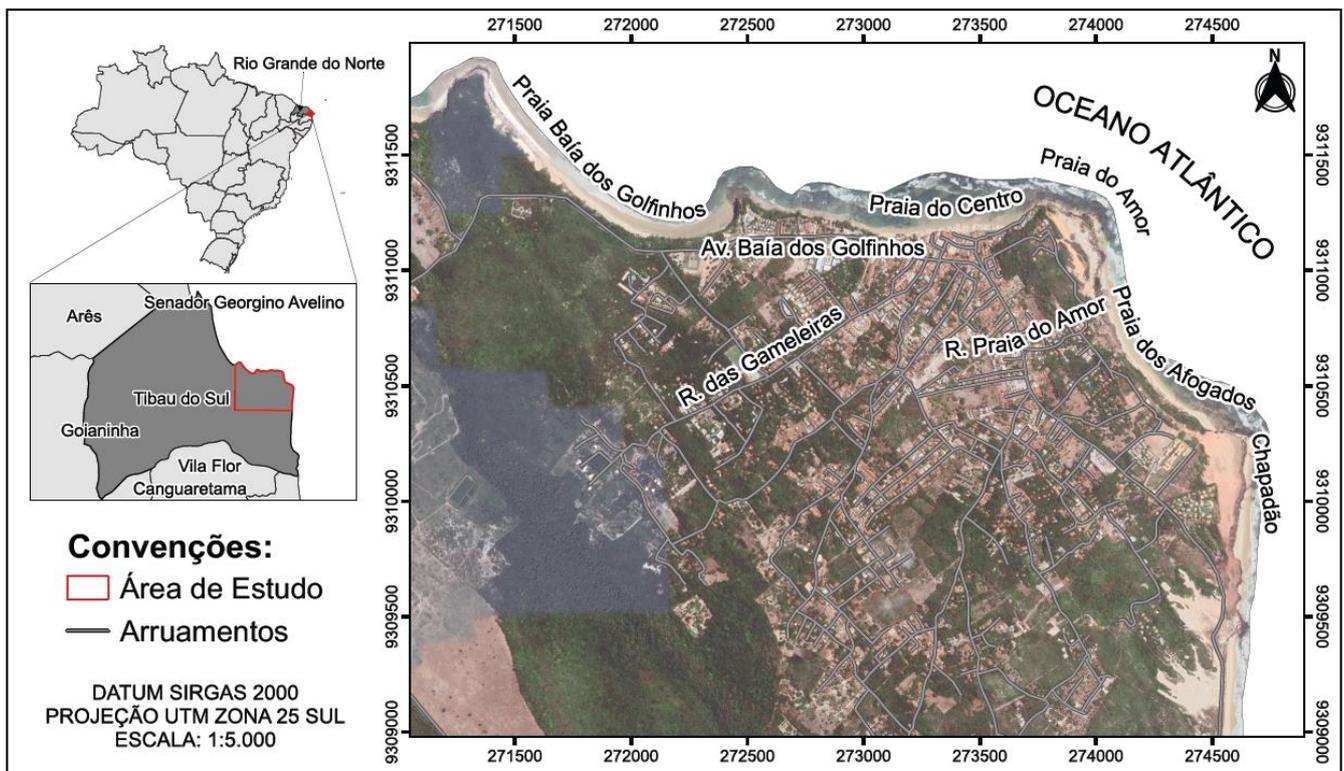


Figura 1. Localização do estado do Rio Grande do Norte, o Município de Tibau do Sul e a Praia de Pipa.

Durante décadas, as principais atividades econômicas do município foram a agricultura e a pesca, realizada sobretudo na Laguna Guaraira (NUNES, 2014). Contudo, a partir da década de 1980 e com as problemáticas

geradas pelas grandes secas do Nordeste, tais atividades declinaram. Atualmente, o setor turístico e as atividades correlatas são as principais responsáveis pelas ofertas de emprego formal e aumento nos investimentos, incluindo a expansão do setor de empreendimentos imobiliários (SILVA *et al.*, 2019).

O município se desenvolveu sobre o topo plano de Tabuleiro Costeiro, por vezes com campos de dunas sobrepostos, e a expansão urbana acarretou vários problemas ambientais e socioeconômicos, por estar sujeita à alta vulnerabilidade decorrente de fatores erosivos costeiros e aos movimentos gravitacionais de massa (PIÉRRRI, 2008).

As falésias ativas são compostas por rochas miocênicas a plio-pleistocênicas da Formação Barreiras e pós-Barreiras, com alturas que variam entre 20 m e 40 m e dominam toda a orla marítima, com taludes inclinados de 45° a 90° (SILVA *et al.*, 2016; SILVA, *et al.*, 2020), comumente com praias arenosas defrontantes. A região se insere na Província Costeira, estratigraficamente sobreposta ao embasamento cristalino da Província Borborema e às rochas cretácicas da Bacia Pernambuco-Paraíba (CÓRDOBA *et al.*, 2007). Ao domínio das intercalações de rochas sedimentares da Formação Barreiras se sobrepõem os depósitos colúvio-eluvionares, flúvio-lagunares, campos de dunas e praias arenosas, que configuram a paisagem costeira (CPRM, 2005).

As praias arenosas se distribuem em trechos retilíneos, frontais às falésias ativas, e em baías parabólicas, com presença de terraços marinhos e, por vezes, linhas de arenitos de praia (*beachrocks*). Esta geomorfologia é interceptada pelas fozes do rio Catu e do Sistema Estuário Lagunar da Guaraiaras (SILVA *et al.*, 2003; PIÉRRRI, 2008; SILVA e OLIVEIRA, 2013; CAMARA *et al.*, 2019).

O litoral oriental do RN está em zona de clima tropical do tipo As, com verão seco e inverno chuvoso, com precipitação anual acumulada superior a 700 mm concentrada entre os meses de maio e junho, temperatura média anual de 26°C e umidade relativa anual de 74% (ALVARES *et al.*, 2013). Entretanto, a região está sob a atuação dos ventos alísios de leste e sudeste, cuja confluência em baixos níveis está associada à Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Além disso, recebe o efeito do sistema anticiclônico permanente de alta pressão atmosférica, conhecido como a Alta Pressão do Atlântico Sul (APAS), e dos Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL), que são perturbações nos ventos equatoriais de leste que se destacam pela influência sobre os EEP. O domínio de ondas é de sudeste a leste, acompanhando os ventos alísios, e configuram a corrente de deriva litorânea predominante no sentido de sul-norte no decorrer de quase todo o ano. O regime é de mesomares semidiurnas com alturas máximas entre 2,5m e 3,3m nas marés de quadratura e sizígia, respectivamente (SILVA *et al.*, 2020; VITAL *et al.*, 2008).

2. Materiais e Métodos

A metodologia foi baseada nas seguintes etapas: (i) Compilação da base de dados espaciais a partir de repositórios públicos e gratuitos; (ii) Análise climática, do meio físico e da vulnerabilidade ambiental; (iii) Levantamento de campo; (iv) Integração e processamento dos dados espaciais em Sistema de Informação Geográfica (SIG); (v) Elaboração do mapa de risco à erosão costeira e movimentos gravitacionais de massa.

2.1. Compilação da base de dados

A compilação cartográfica ocorreu inicialmente com a seleção de imagens da Câmera Multiespectral e Pancromática de Ampla Varredura (WPM) do satélite CBERS-4A de 27/04/2021 (<http://www2.dgi.inpe.br/catalogo/explore>) com resolução espacial de 8,0 m (bandas multiespectrais) e 2,0 m (banda pancromática), de dados altimétricos do satélite ASTER-PALSAR com resolução espacial de 12,5 m e da base de dados do MapBiomias (<https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>).

Como apoio para a atualização dos mapas temáticos da área de estudo à escala local foram aproveitadas as seguintes bases cartográficas de repositórios públicos: o mapa geológico em escala 1:100.000 do Serviço Geológico Brasileiro (SGB); o mapa geomorfológico em escala 1:250.000, no Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE); classes de uso e cobertura da terra em escala 1:250.000 do Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil (MapBiomias, 2020).

Na análise dos EEP foram coletados dados de precipitação nas escalas diária e mensal entre os anos de 1980 e 2022 em estações meteorológicas (Tabela 1) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN).

Tabela 1. Relação das estações de coleta dos dados de precipitação.

Estação	Microrregião	Município	Latitude	Longitude
INMET – UFRN	Natal	Natal	-5,83722221	-35,20777777
EMPARN - DESTILARIA VALE VERDE	Litoral Sul	Baía Formosa	-6,4	-35,05
EMPARN - PREFEITURA	Litoral Sul	Espírito Santo	-6,3333	-35,3167

2.2. Análise de dados climáticos e meteoceanográficos

Na análise da variabilidade dos EEP utilizou-se a metodologia proposta por Amorim *et al.* (2019), onde foi identificado o limiar para um EEP diário em cada uma das estações meteorológicas, através da técnica dos *quantis* de Wilks (2006), e foram considerados EEP aqueles com precipitação acima do percentil 98 (EEP98), que exibiu um ajuste adequado a uma Distribuição Generalizada de Pareto para o período de análise proposto (Figura 2A). Na análise de tendência linear foi aplicado o teste de *Mann-Kendall* (KENDALL, 1975), considerado um método apropriado para o estudo de mudanças climáticas. O teste *Pettit* (PETTIT, 1979), foi utilizado para identificar possíveis inflexões ao longo da série de EEP.

Na análise do regime de ondas que atingem a costa de Tibau do Sul foi empregado o Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC - Brasil) de reanálise do comportamento de ondas da base de dados *Downscaling Ocean Waves* (DOW) para as ocorrências entre os anos de 1948 e 2008, a partir da transferência da dinâmica em águas profundas para águas intermediárias através de simulações executadas com o modelo numérico SWAN (BOOIJ *et al.*,1999). O ponto DOW integra métodos de assimilação, interpolação e tratamento estatístico de dados da reanálise do *Wavewatch III* da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) com resolução de 0,5° x 0,5°. Quatro pontos DOW foram analisados e calculados para profundidades variáveis (Figura 2B, Tabela 2), conforme a metodologia de Almeida *et al.* (2015) no módulo de Análise Matemática e Estatística de Variáveis Ambientais (AMEVA).

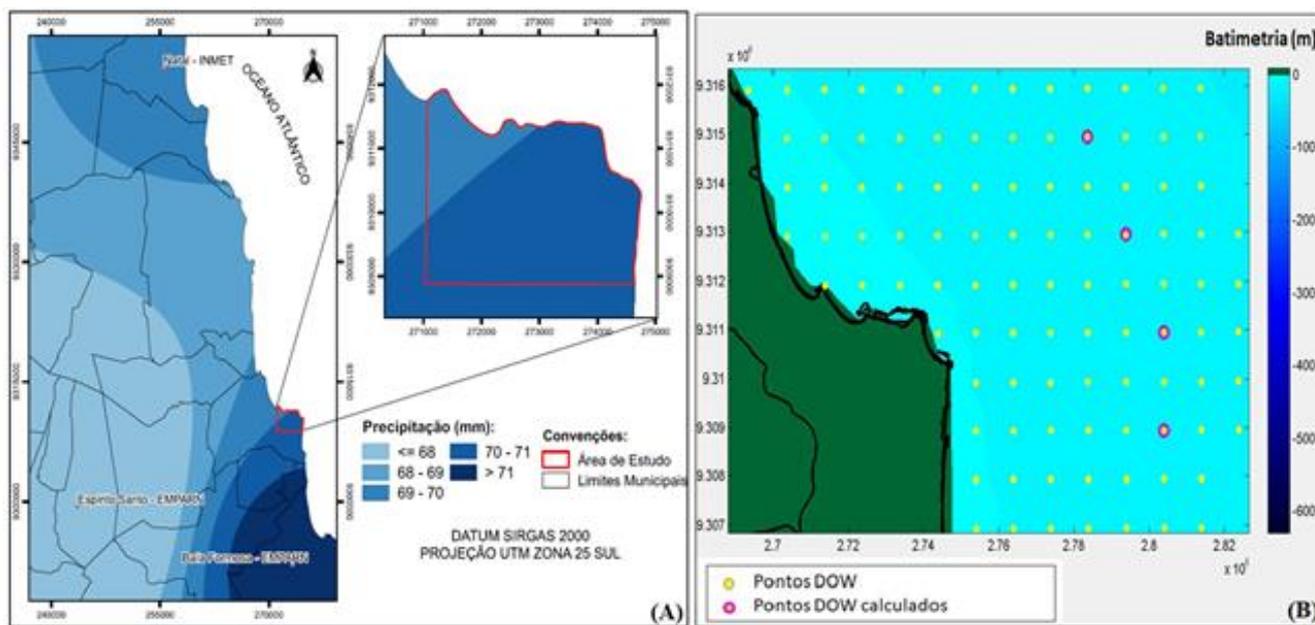


Figura 2. (A) Variabilidade espacial dos Extremos de Precipitação da microrregião de Natal Sul; (b) Localização dos pontos DOW de reanálise do regime de ondas.

Tabela 2. Descrição geográfica dos pontos DOW.

Ponto DOW	Coordenadas N*	Coordenadas E*	Profundidade (m)**
P01	9.314.937	278.363	15,859
P02	9.312.941	279.371	16,088
P03	9.310.945	280.379	15,582
P04	9.308.945	280.386	16,364

*Projeção UTM, Datum SIRGAS 2000, zona 25S. **Em nível de redução referente à Carta Náutica nº810 da Marinha do Brasil.

2.3. *Elaboração de mapas temáticos em Sistemas de Informações Geográficas (SIG)*

As imagens digitais de sensoriamento remoto e os mapas temáticos foram processados no programa de código aberto QGIS 3.16.5 e, após adequações e levantamentos de campo, os mapas resultantes foram uniformizadas ao Sistema Geodésico Brasileiro, no datum SIRGAS2000, sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM, Fuso 25S, MC 39° W. Gr.) e na escala 1:5.000, apropriada às estratégias de tomadas de decisões.

As classes temáticas foram atualizadas a partir da análise, interpretação e classificação supervisionada das imagens do sensor WPM do satélite CBERS-4A, baseadas nas classes prévias de unidades litoestratigráficas do SGB (Figura 3A); das unidades geomorfológicas do IBGE e das possibilidades dinâmicas e evolutivas da paisagem de Diniz *et al.* (2017) (Figura 3B); e, das classes de uso e ocupação do solo (Figura 3C), incluindo classes de vegetação (Figura 3D), com informações do MapBiomas (<https://mapbiomas.org>).

A partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) baseado nos dados do sensor ALOS-PALSAR foi elaborado o mapa de declividade (Figura 3E), com as classes definidas conforme a Lei Nacional nº 6.766/79 (Lei Lehmann), que regula a atividade do parcelamento do solo urbano.

Para o mapa de vulnerabilidade ambiental (Figura 3F), as variáveis temáticas do meio físico foram avaliadas de acordo com a escala de ponderação do Processo Analítico Hierárquico e lógica booleana (BUSMAN *et al.*, 2016; AMARO *et al.* 2021b) na determinação dos pesos das classes de vulnerabilidade (Tabela 3), seguindo a expressão:

$$VULN = (GEOL * peso) + (GEOM * peso) + (VEG * peso) + (USO * peso) + (DECL * peso) + (PREC * peso) \quad (1)$$

Onde: GEOL – Geologia; GEOM – Geomorfologia; VEG – Vegetação; USO – Uso e Ocupação; DECL – Declividade; PREC – Precipitação.

Tabela 3. Escores das classes temáticas para os índices de vulnerabilidade por lógica booleana. Adaptado de Busman *et al.* (2016) e Amaro *et al.* (2021b).

DECLIVIDADE %		GEOLOGIA	
Classes	Pontuações	Classes	Pontuações
0 – 5	1	Depósitos de Sopé de Encostas e Tálus	2,5
5 – 10	1	Depósitos Eólicos Litorâneos Não Vegetados	3
10 – 15	1,5		
15 – 20	2	Depósitos Litorâneos Praiais	2
20 – 25	2,5	Depósitos Eólicos Litorâneos Vegetados	2,5
25 – 30	2,5		
> 30	3	Formação Barreiras	1,5
GEOMORFOLOGIA		VEGETAÇÃO (MAPBIOMAS)	
Classes	Pontuações	Classes	Pontuações
Dunas não vegetadas (móveis)	3	Floresta	1,5
Dunas vegetadas (fixas)	2,5	Formação Natural Não Florestal	2

Praias	2	Agropecuária	2,5
Falésias	1	Área Não Vegetada	3
USO E OCUPAÇÃO DO SOLO		CLIMA (EEP98)	
Classes	Pontuações	Classes	Pontuações
Dunas Fixas	2,5	<= 68	2
Área Urbana	3	68 – 69	2,5
Dunas Móveis	3	69 – 70	2,5
Praias	1	70 – 71	3
Solo Exposto e/ou Fm. Barreiras	2,5	> 71	3

2.4. Levantamento de Campo

Os levantamentos de campo foram realizados entre Junho e Julho/2022, período da quadra chuvosa no litoral oriental, e em condições de baixa-mar e preamar, em que foram registrados diversos deslizamentos nas falésias do setor urbano da praia de Pipa, contexto da área de interesse. No dia 04/07/2022 a precipitação acumulado foi de 203,6 mm (EMPARN, 2022) e os deslizamentos foram pervasivos. Para a identificação das classes temáticas e caracterização dos processos de erosão marinha e continental foi utilizado um *checklist* adaptado de Camara (2018). Os dados coletados serviram de subsídio para caracterização das classes e correlação com os fatores desencadeadores da erosão costeira e dos movimentos de massa. Ainda, tiveram o objetivo de validar os mapas temáticos, identificar a ação dos processos erosivos na linha de costa, identificar os pontos de alagamento na área urbana, delimitar as áreas de Risco 3 (alto) e Risco 4 (muito alto), investigar as estruturas de contenção existentes e equipamentos de infraestrutura para o escoamento das águas superficiais.

2.5. Análise de risco à erosão costeira e movimentos gravitacionais de massa

No diagnóstico local para a elaboração do mapa de risco à erosão costeira e movimentos gravitacionais de massa, para as categorias de risco alto (R3) e risco muito alto (R4), baseados nos critérios e diretrizes de setorização de áreas de risco geológico e categorias de grau de probabilidade, adaptado por Lana *et al.* (2021) dos protocolos de mapeamento de risco em encostas e margem de rios (BRASIL, 2007). O grau de probabilidade de risco R3 é dado para condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes e o nível de intervenção são de alta potencialidade para o desenvolvimento de processos de deslizamentos e solapamentos, sendo observados a presença de feições de instabilidade, processo de instabilização em pleno desenvolvimento, mas ainda sendo possível monitorar a evolução; e caso mantida as condições existente, é possível a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas. O grau R4 de probabilidade de risco os sinais de instabilidade são expressivos e estão presentes em grande magnitude, com processo de instabilização em estágio avançado de desenvolvimento, caracterizando-se como uma condição mais crítica, sendo impossível monitorar a evolução do processo, sado seu elevado estágio de desenvolvimento; mantida as condições existentes, é muito provável a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas. Na investigação foram avaliadas a característica e intensidade de indícios, tais como: dimensão e inclinação do talude; presença de blocos de rocha no regolito; umidade nas rochas e regolito; surgência de água; distância das edificações em relação à borda e base do talude, do alcance máximo da preamar e das ondas; lançamento de água ou esgoto no topo e no talude da falésia ativa; infraestruturas deformadas; cicatrizes de deslizamento e/ou de queda de blocos, dentre outros. Igualmente foram considerados: o sentido do escoamento superficial via tubulações residenciais ou comerciais; pontos de alagamento e escoamento em direção à praia e taludes; presença de estruturas de contenção em locais que recebem diretamente o impacto de ondas; estado de conservação das estruturas; as evidências de processos erosivos costeiros nas praias (erosão laminar por afloramento do lençol freático, erosão por fluxo concentrado, superfície de abrasão marinha) e nos taludes (erosão por colisão das chuvas e ondas ou *splash*, incisão basal, zona de fraturas, erosão radicular em fraturas e fissuras).

A partir da compilação dessas informações, espacializadas em mapas diagnósticos, foi elaborado o mapa de risco à erosão e movimentos gravitacionais de massa, contendo a setorização de áreas definidas como de risco alto (R3) e risco muito alto (R4), segundo Lana *et al.* (2021), e com destaque para trechos considerados de desastre

iminente devido ao conexão entre vários desses critérios num único local. Igualmente foram indicados no mapa os deslizamentos recentes nos taludes, a presença de infraestruturas e estruturas de contenções, os pontos de alagamento e a direção do fluxo do escoamento superficial. Ainda na avaliação dos riscos alto (R3) e muito alto (R4) foi considerado o tipo de ocupação, a presença recorrente de pessoas, a incidência dos EEP, a incidência de ondas e o recuo da linha de praia obtido por Matos *et al.* (2022) para o período entre 2008 e 2018, baseados em imagens de sensoriamento remoto de resolução espacial alta.

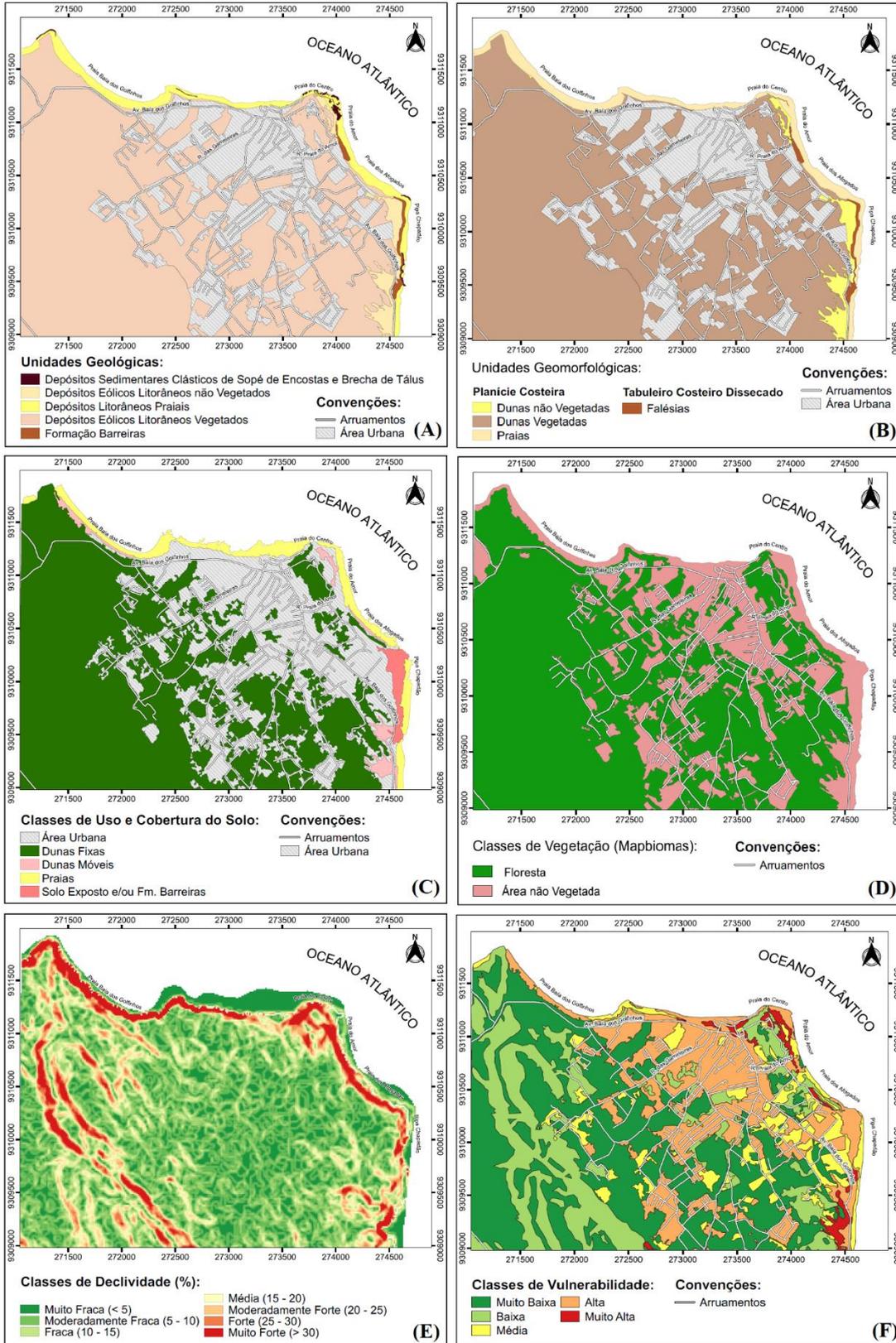


Figura 3. Mapas temáticos da área de estudo; (A) Unidades Geológicas; (B) Unidades Geomorfológicas; (C) Classes de Uso e Cobertura dos Solos; (D) Classes de Vegetação; (E) Classes de Declividade; (F) Classes de Vulnerabilidade Ambiental.

3. Resultados e Discussões

3.1. Eventos Extremos de Precipitação e meteoceanografia local

As distribuições mensais do acumulado de precipitação diária, para a série histórica de 1980 a 2020, em Natal (A), Baía Formosa (B) e Espírito Santo (C), foi analisada considerando o limiar de 70 mm (AMORIM *et al.*, 2019), como na Figura 4. Os dados da estação de Tibau do Sul – TELEPLU (D) correspondem apenas ao período de 01/05/2021 à 07/07/2022, apresentadas com o intuito de destacar os acumulados durante os levantamentos de campo, como o acumulado de 203,6 mm ocorrido no dia 04/07/2022, responsável por extensivos movimentos gravitacionais na praia de Pipa. Os EEP estão destacados acima da linha EEP98 e ocorreram predominantemente entre janeiro e agosto em Natal, de fevereiro a agosto em Baía Formosa e de abril a junho em Espírito Santo e Tibau do Sul. O período entre abril e julho é considerado o principal período chuvoso nesse litoral do Nordeste do Brasil (AMORIM *et al.*, 2019; MOURA *et al.*, 2009), com predominância dos EEP no mês de junho, frequentemente condicionados às ocorrências dos DOL, período de maior intensidade dos sistemas associados, responsável por 70% da precipitação (TORRES e FERREIRA, 2011; SILVA *et al.*, 2011).

Na caracterização meteoceanográfica local foi selecionado o ponto DOW P02, com profundidade 16,088m, referente ao nível de redução da Carta Náutica n° 810 da Marinha do Brasil. A altura significativa de onda (Hs) variou entre 1,25 a 2,25m (Figura 5A) e período de pico (Tp) entre 6 e 9s (Figura 5B). O regime de marés astronômicas do tipo mesomareis semidiurnas tem amplitude de 2,79m (Figura 5C) e a contribuição da maré meteorológica varia em cerca de 0,09 m acima ou abaixo do nível médio do mar (Figura 5D).

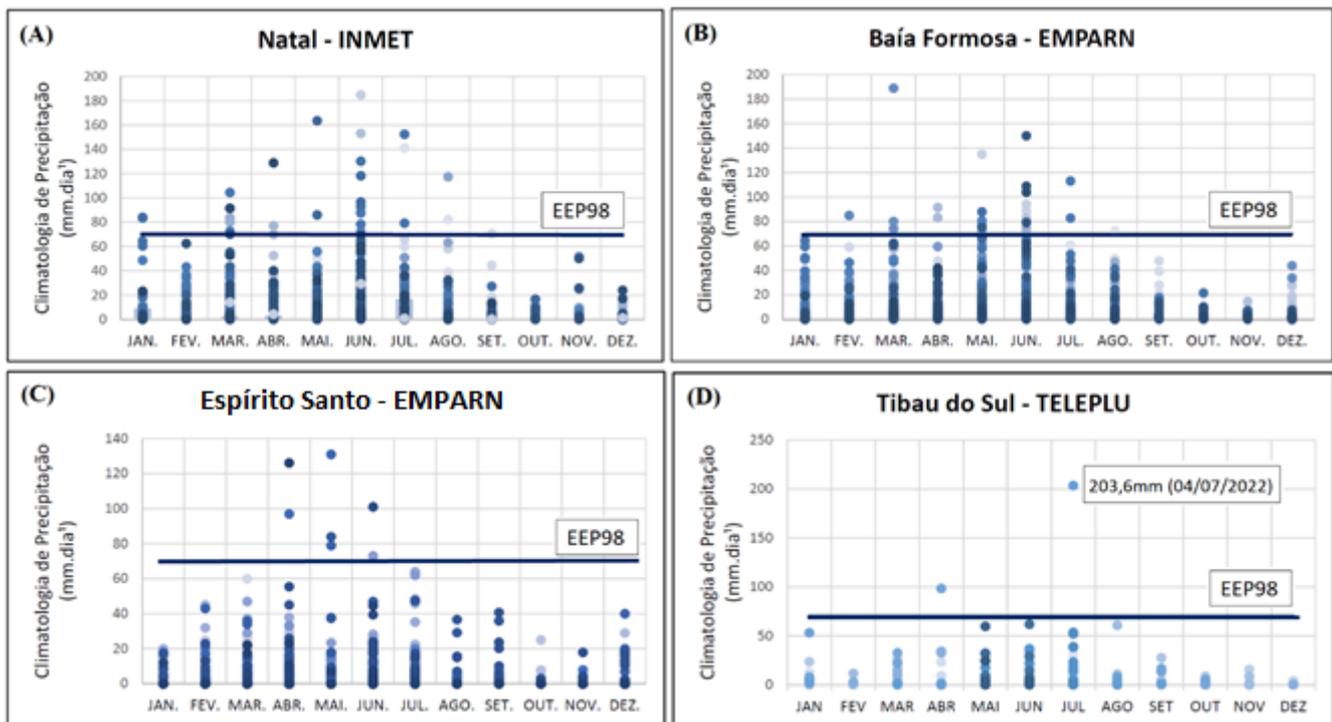


Figura 4. Distribuição anual do acumulado de precipitação diária (mm.dia⁻¹) para o período de 1980 a 2020 nas cidades de Natal (A), Baía Formosa (B) e Espírito Santo (C), para o período de 01/05/2021 e 07/07/2022 na cidade de Tibau do Sul (D), e representação do valor do limiar para EEP98 (70 mm).

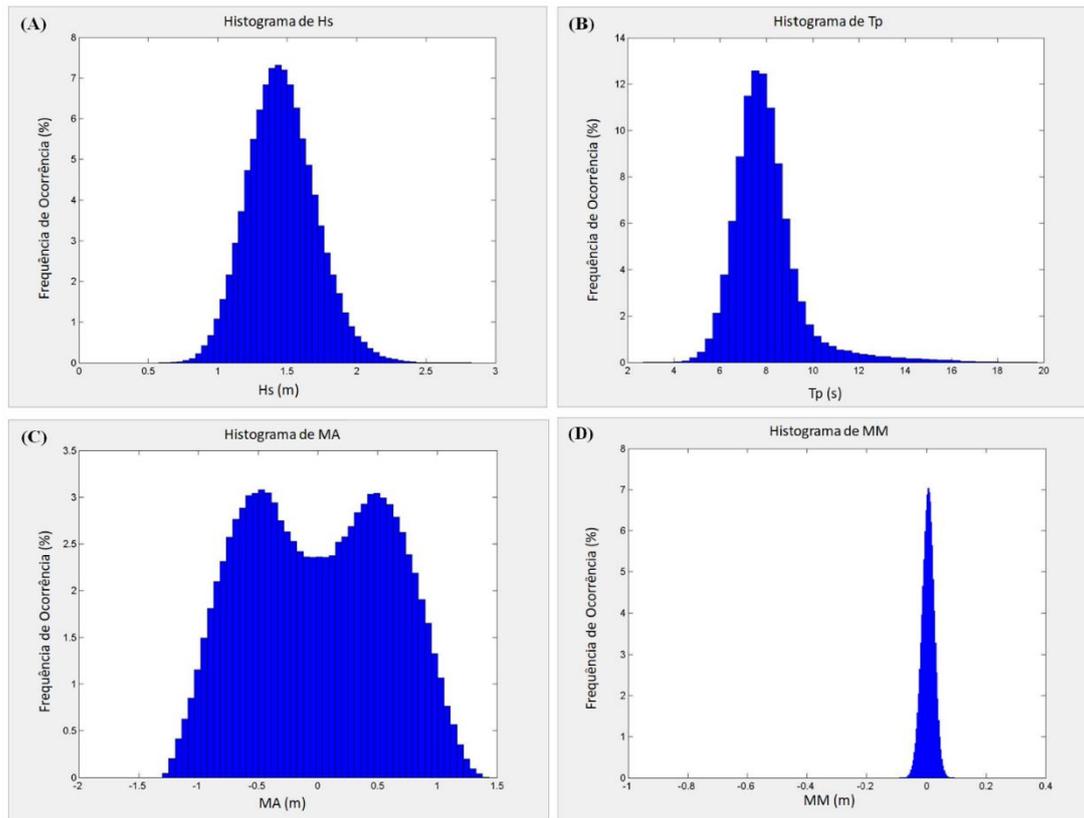


Figura 5. Condições hidrodinâmica locais oriundos da série histórica do ponto DOW P02: (A) altura significativa de ondas (Hs); (B) período de ondas (Tp); (C) maré astronômica; (D) maré meteorológica.

Os trechos da orla marítima de Pipa apresentam diferentes orientações de linha de costa, fato que promove sucessivas difrações da frente de ondas propagadas desde maiores profundidades causando, conseqüentemente, a dissipação de energia. As ondas de maior frequência do espectro calculado pelo SMC-Brasil chegam de sudeste até a área de estudo (Figura 6a), sofrem difração no promontório do Chapadão e atingem a linha de costa da praia dos Afogados em alto ângulo, com Hs entre 1,80 e 2,40 m. Esse é o trecho da orla de Pipa que recebe as condições mais severas de ondas. A praia do Amor promove nova difração e as ondas atingem a praia do Centro, já amortecidas pela dissipação de energia, tanto pelos processos de difração quanto pela fricção com as rochas de praia paralelas à linha de costa. Porém, a praia do Centro e a praia da Baía dos Golfinhos recebem direções de onda em menor ângulo com a linha de costa, o que favorece a retirada de sedimentos da face de praia. Nesses trechos, as ondas chegam com Hs entre 0,5 e 1,8 m. A praia da Baía dos Golfinhos recebe ondas mais atenuadas no seu trecho mais oriental, pela proteção conferida por rochas de praia que atuam como difrator secundário do trem de ondas.

As correntes geradas pela propagação diferencial entre os grupos de ondas têm velocidade média entre 0,30 e 0,40 m/s na área de estudo (Figura 6b). Na praia dos Afogados predomina o sentido sudeste-noroeste, girando para leste-oeste na praia do Centro e na praia da Baía dos Golfinhos. No trecho de orla estudado as maiores velocidades de correntes ocorrem na praia do Centro, atingindo até 0,5 m/s, sendo também as correntes com maior competência de carreamento de sedimentos para fora da zona de estirâncio. A praia do Centro, apesar de exibir as maiores velocidades de correntes de ondas, tem alto índice de difração e maior expressão frontal de rochas de praia, que funcionam como importantes dissipadores da energia de ondas incidentes que atingem as praias. A praia da Baía dos Golfinhos é parcialmente protegida por rochas de praia na sua porção oriental.

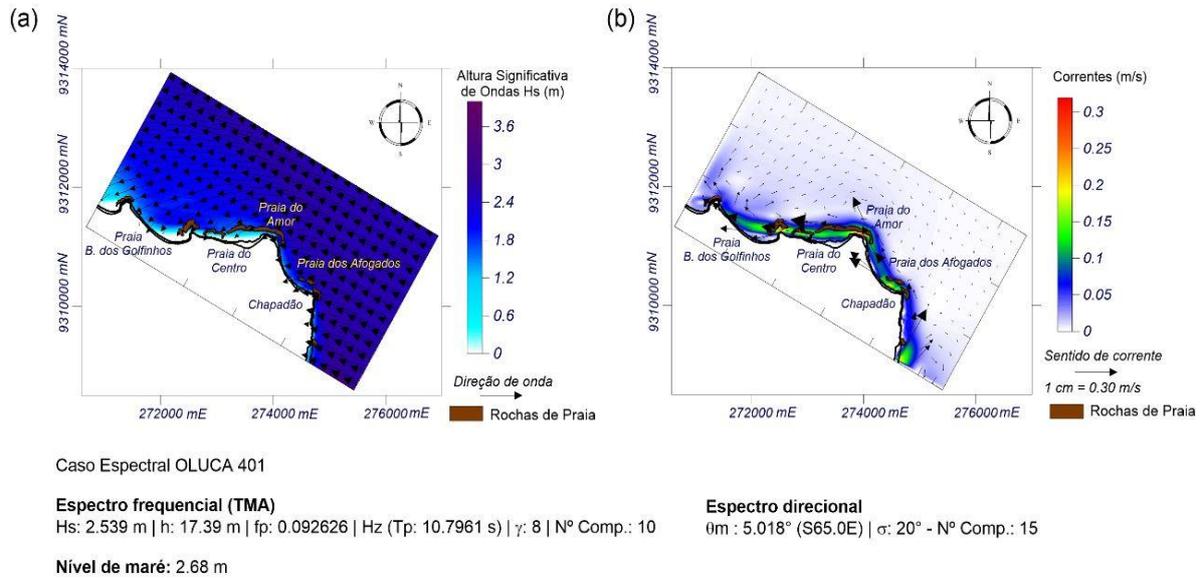


Figura 6. (a) Campo de magnitude e direção de ondas; (b) correntes de ondas propagadas até a linha de costa, a partir do ponto DOW P02.

3.2. Diagnósticos e Mapa de Risco à Erosão Costeira e Movimentos Gravitacionais de Massa

O risco de desastres é consequência da interação entre o perigo de ocorrência desse desastre acontecer e das características que expõem e tornam pessoas e locais vulneráveis. Nos modelos e indicadores de riscos de desastres propostos pelo Quadro Sendai, a modelagem computacional abalizada no diagnóstico integrado de dados espaciais possibilita maior eficiência na avaliação dos riscos de desastres por meio da combinação de dados sobre perigo, exposição, vulnerabilidade e perdas de bens e vidas humanas (DRMIMS, 2021; HUANG *et al.* 2021).

Na estruturação do SIG para o diagnóstico das condicionantes ao risco a desastres na praia de Pipa, a orla marítima foi dividida em três setores (N, NE e S), considerando a geometria da linha de costa e o grau de modificação antropogênica. Além dos fatores do meio físico (geologia, geomorfologia, vegetação, declividade) foram consideradas outras características físicas relevantes que indicam perigo à erosão e aos movimentos gravitacionais de massa (LANA *et al.*, 2021), tais como uso e ocupação, intervenções de engenharia por meio de estruturas de contenção e pontos de escoamento superficial.

Os processos erosivos atuantes sobre os taludes costeiros, resultando nos movimentos gravitacionais de massa são deflagrados, principalmente, pelas fortes chuvas e ação direta de ondas na base das falésias. As quedas e tombamentos de blocos têm sido os tipos mais comuns na área de estudo, como indica o acúmulo de depósitos ferruginosos e tálus na base das falésias (SANTOS JÚNIOR *et al.*, 2006; SILVA *et al.*, 2020). Por toda a extensão das falésias ativas da área de estudo é conspícua a presença de incisão basal, promovendo o solapamento da parte superior do talude.

No setor N (Figura 6), que se estende desde a praia da Baía dos Golfinhos até a praia do Centro, ocorre intensa aglomeração de banhistas e barracas na faixa de praia. Neste setor se destacam as infraestruturas instaladas, sobretudo as estruturas de contenções, e os deslizamentos de massa recorrentes (pontos II e III). Os pontos IV, VI e VII apresentam, respectivamente, estrutura de contenção contra a ação direta de ondas baseados em enrocamento aderente, com blocos soltos ou agregados em armações de madeira, e muro de concreto, onde se destacam patologias como fissuras, rachaduras e desagregação em função da intensificação das energias de ondas e erosão do substrato arenoso onde se apoiam. No entanto, a geometria, o local e o tipo inadequado dessas instalações notadamente potencializam os processos erosivos a jusante, como mostra o ponto VIII.

As quedas, tombamentos e deslizamentos de massa são recorrentes nesse setor, como indicam os pontos I e III (Figura 7), ocorridos após as chuvas intensas entre junho e julho/2022 (Figura 4). Um fato que intensifica os processos erosivos, e são comumente empregados por toda a orla marítima, é o escoamento de água pluvial e/ou esgoto das habitações hotéis lançados diretamente na face de praia por meio de tubulações (ponto V).

Apesar dos desmoronamentos constantes, em trechos já sinalizados pela Defesa Civil, tanto a população local como os turistas permanecem utilizando as áreas classificadas como de risco muito alto. Mesmo na praia dos Golfinhos (ponto I), que possui um difícil acesso e apresenta vários pontos de deslizamentos, nos períodos de baixa-mar permanece repleta de banhistas e comerciantes locais.

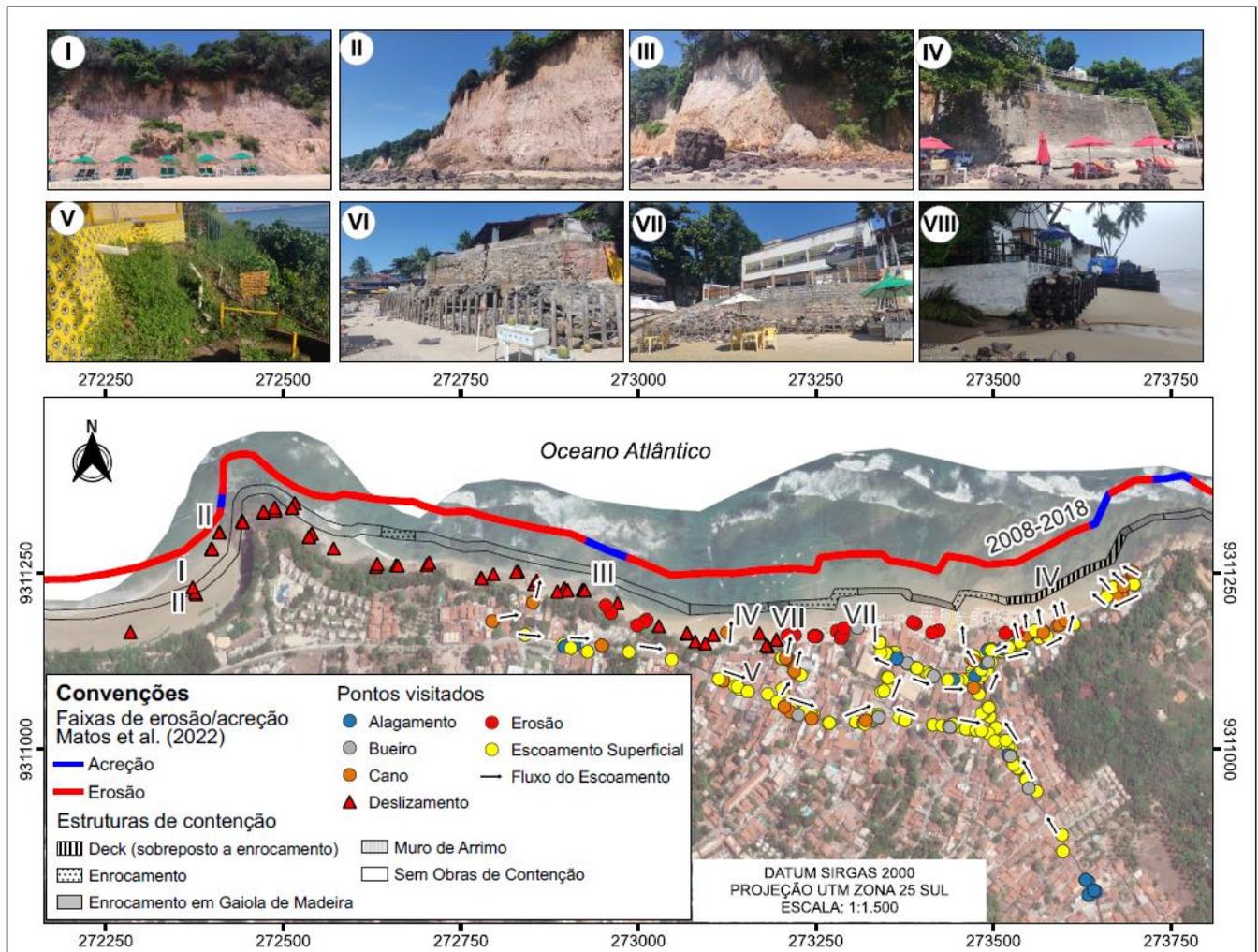


Figura 7. Mapa diagnóstico das condicionantes ao risco de desastres no Setor N.

O Setor NE se estende do *deck* da praia do Centro até as praias dos Afogados e do Amor (Figura 8). O *deck* em madeira apoiado em pilares de madeira e muro de tijolos comumente recebe enrocamento inapropriado com blocos de rochosos para proteção contra ataques das ondas. Contudo, os blocos são de dimensões inexpressivas contra a energia das ondas e se deslocam por toda a face de praia, aumentando o risco de acidentes (ponto II). Por toda a estrutura do *deck* são evidentes patologias nos elementos estruturais, tais como: pilares e vigas flambados e deteriorados; trincas e rachaduras no muro; tábuas quebradas no piso; entre outras.

Em diversos trechos da Av. Baía dos Golfinhos e em direção às praias são frequentes os pontos de alagamentos em dias chuvosos, com todo o escoamento de superfície, ou por bueiros e dutos, direcionado para a face de praia e falésias (pontos I, III, IV e V). Por todo esse setor foram também registrados pontos de escoamento de água e/ou esgoto provenientes das habitações lançados diretamente na praia (ponto III).

No trecho do promontório ocorrem depósitos de tálus e blocos ferruginosos na base do talude, decorrentes de desmoronamentos pretéritos, que atuam reduzindo o impacto das ondas no sopé das falésias ativas. Desde o topo até a base da falésia ocorrem inúmeros sulcos e ravinamentos pervasivos no terreno, comumente acompanhando zonas de fraturas nas rochas, por vezes com desprendimento de blocos (ponto IV). Nos taludes frequentes os deslizamentos, com acúmulo de depósitos de tálus carreando vegetação do topo da falésia, e nos trechos de praias é evidente o processo erosivo indicado pelo reduzido volume arenoso na face de praia em

baixa-mar e afloramento do lençol freático (ponto VI). Nos pontos onde há habitações no topo da falésia, geralmente próximas às bordas dos taludes, destaca-se o lançamento de águas superficiais diretamente na praia, e acessos de usuários às praias, comumente aproveitando a compleição de ravinamentos.

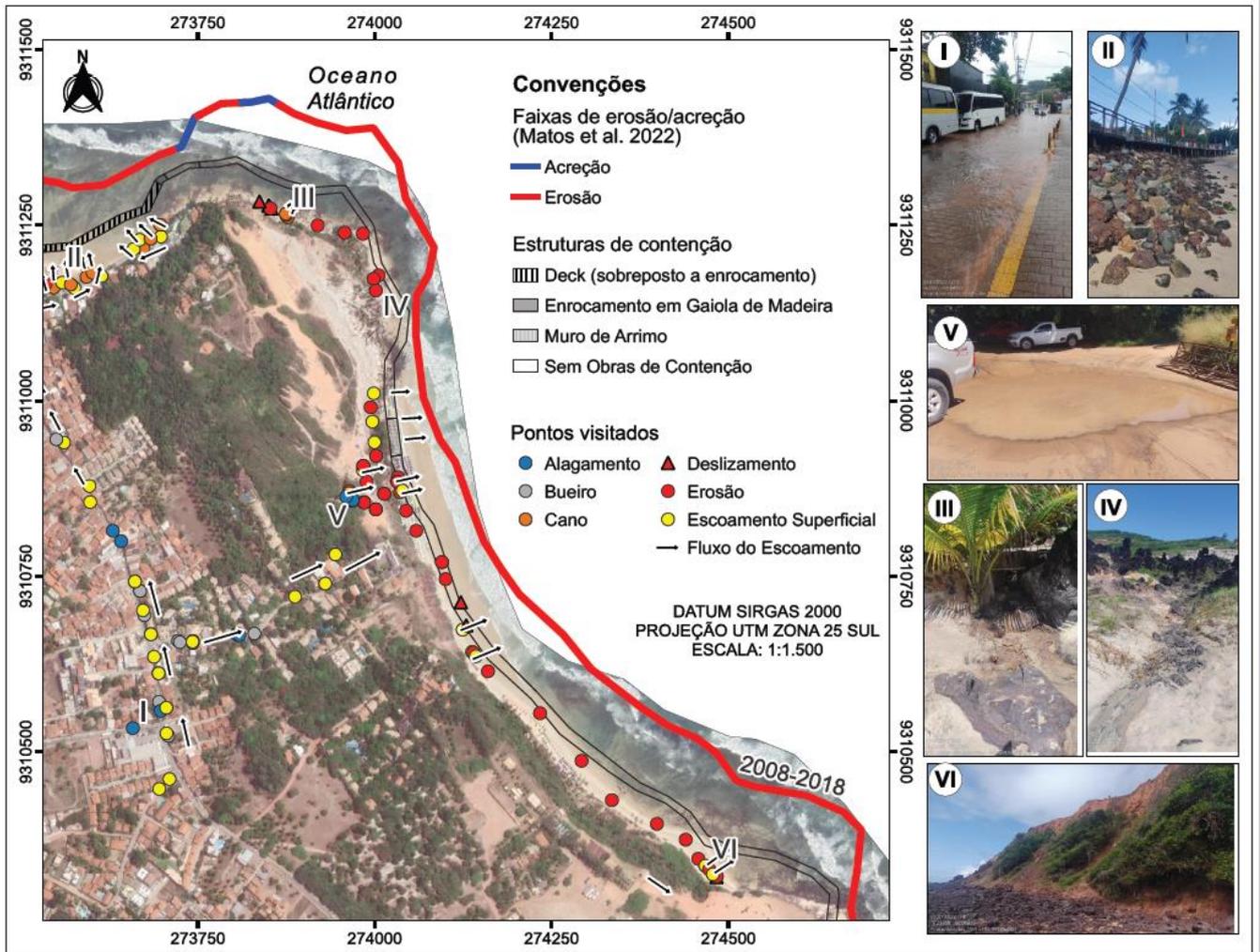


Figura 8. Mapa diagnóstico das condicionantes ao risco de desastres do Setor NE.

O Setor S (Figura 9) compreende o Chapadão de Pipa em que há redução nas infraestruturas instaladas próximas às bordas das falésias, contudo se destaca pela intensa circulação de turistas e comerciantes. No topo do Chapadão de Pipa, no trecho desprovido de vegetação, ocorrem conspícuas feições erosivas e cicatrizes de deslizamentos prévios (pontos IV e VI). Por meio do traçado dos arruamentos de acesso ao setor há o aproveitamento das infraestruturas instaladas para o escoamento pluvial, lançado diretamente na falésia (pontos I, II e II) e, conseqüentemente, acentuando a erosão. Na porção basal do talude, os movimentos gravitacionais constantes coadunam-se aos trechos de intensa erosão marítima, com surgência do lençol freático e erosão presente tanto no talude como na praia defrontante (ponto V).

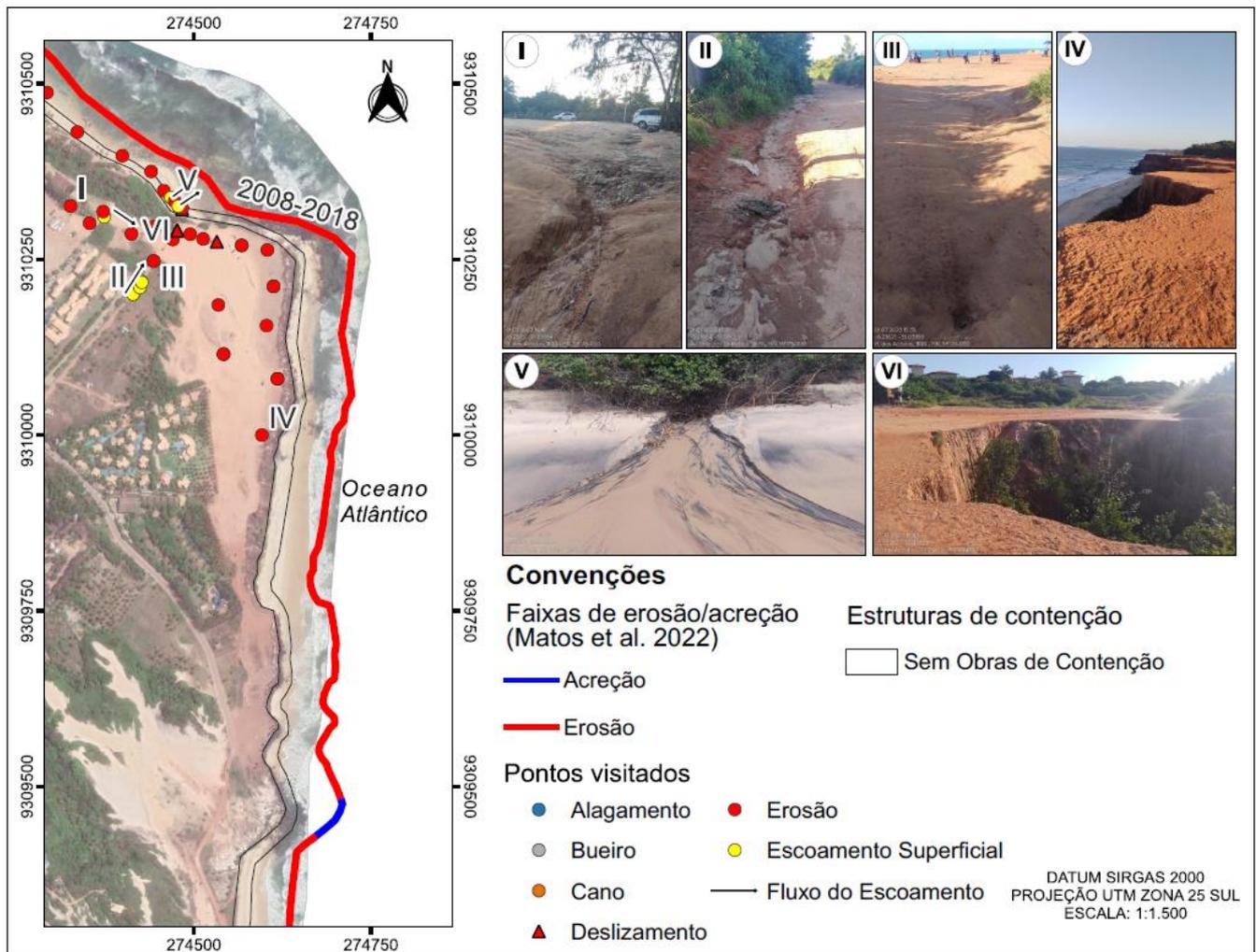


Figura 9. Mapa diagnóstico das condicionantes ao risco de desastres do Setor S.

Com base nos mapas diagnósticos de feições erosivas descritas nos terrenos foi elaborado o mapa síntese de risco de desastres relacionados à erosão costeira e movimentos gravitacionais de massa (Figura 10), com ênfase para as categorias de risco alto (R3), risco muito alto (R4) e trechos de probabilidade iminente de desastres. Nos setores da orla marítima com menos ocupação com habitações, a classificação de risco muito alto (R4) se justifica pela circulação contínua de pessoas e usos intermitente das praias.

No setor de risco muito alto (R4) ocorrem locais com frequentes deslizamentos; grau elevado de retração da linha de praia; presença frequente de pessoas; habitações no topo e base das falésias, mesmo que intermitentes; infraestruturas de escoamento superficial direcionadas às bordas das falésias e praias; presença de estruturas de contenção que comumente potencializam o processo erosivo. O setor definido como de risco alto (R3) situa-se distanciado poucas centenas de metros das bordas das falésias e praias, com algumas áreas de dunas e vegetação remanescentes. Entretanto, possui múltiplos pontos de alagamento e o escoamento superficial e inteiramente direcionado para os setores de risco muito alto (R4), que já causa extensos e largos ravinamentos, quando o fluxo ocorre sobre trecho não pavimentado, o que acelera a perda de solo. Ambos os setores devem ser continuamente monitorados pelos órgãos responsáveis com o intuito de se evitar a deflagração de quaisquer mecanismos específicos de movimentos de massa e, por conseguinte, perdas econômicas e/ou de vidas humanas.

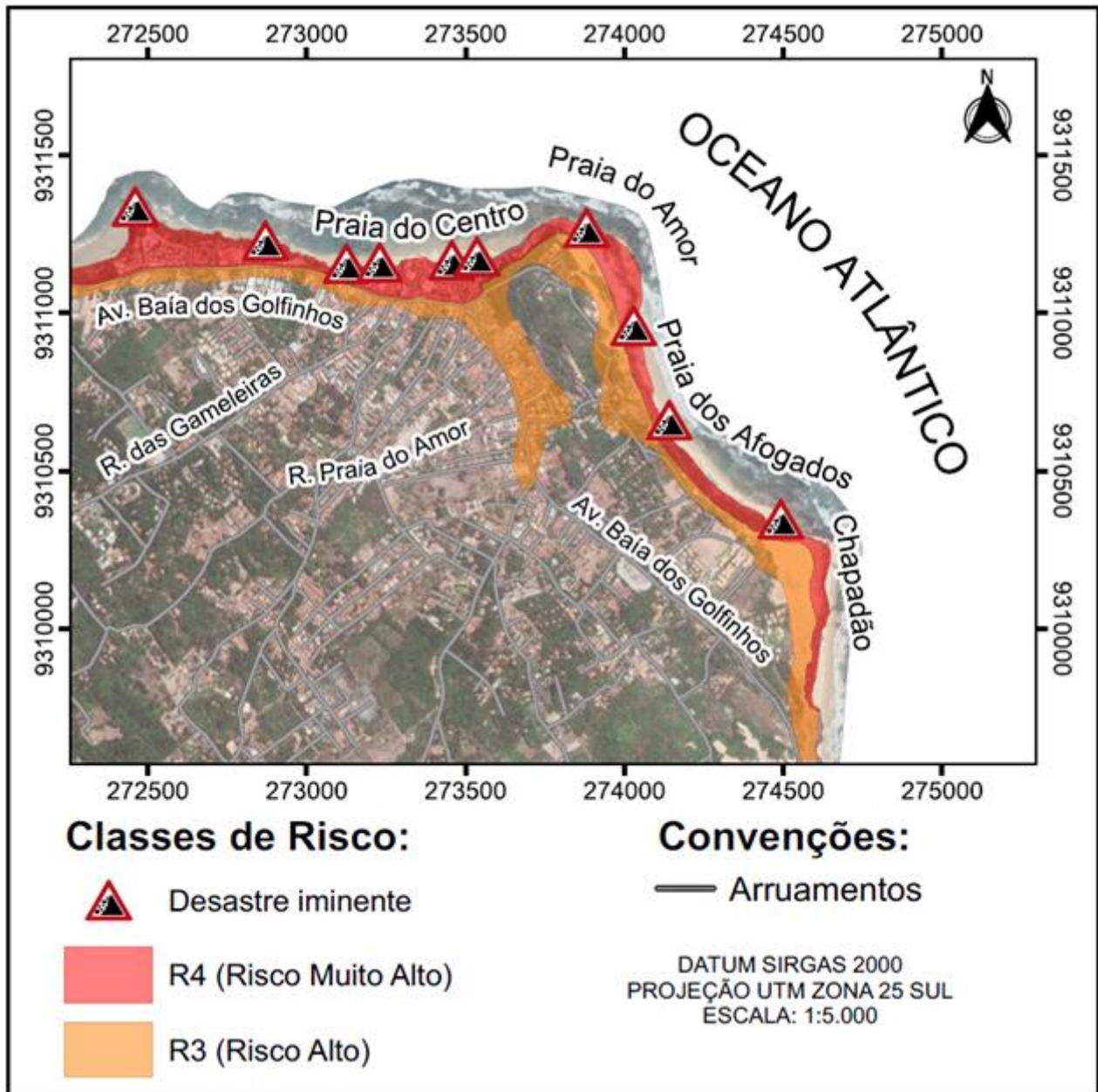


Figura 10. Mapa síntese de risco de desastres relacionados à erosão costeira e movimentos gravitacionais de massa na Praia de Pipa/RN.

4. Conclusões

Os aspectos geológico-geomorfológicos, climáticos e cênicos da região costeira do RN, com falésias ativas e praias arenosas, compõe uma exuberante beleza natural responsável pelo impulso turístico. Neste contexto se desenvolveu a praia de Pipa nas proximidades das bordas das falésias ativas, limites marinhos do Tabuleiro Costeiro, de urbanização desordenada e com políticas públicas sobre o uso e ocupação dessa orla marítima realizadas de maneira inadequada, sobretudo por prescindir de dados e informações espaciais sobre os intensos processos erosivos costeiros. Os recentes casos de desabamentos nas falésias da praia de Pipa, um deles com perdas humanas, acarretam prejuízos socioeconômicos, reduzindo a resiliência da comunidade local e dos turistas, ameaçados em suas integridades físicas. Este fato demonstra a importância de estudos sobre a análise de risco à erosão e movimentos gravitacionais de massa em trechos habitados da orla marítima.

Este artigo apresenta uma abordagem baseada na integração de indicadores espaciais de perigos e suas inter-relações - variáveis do meio físico, forçantes meteoceanográficas, tipos de uso o cobertura do solo e atividades antrópicas - na execução de mapas diagnósticos e sínteses de risco de desastres relacionados tanto à

erosão costeira quanto aos movimentos gravitacionais de massa, pois se tratam de fatores diretamente correlacionados em ambientes costeiros de falésias ativas com praias arenosas defrontantes e submetidos a elevadas energias das forçantes meteoceanográficas.

Além da erosão costeira intensificada nas últimas décadas, evidente na retração continuada da linha de costa, aspectos como a urbanização desordenada na orla marítima, permissiva ao desmatamento de ecossistemas costeiros frágeis como dunas vegetadas e Mata Atlântica, instalação de edificações nas proximidades das bordas de falésias, infraestrutura e equipamentos de sistemas de drenagens que promovem o lançamento inadequado de águas pluviais e/ou esgotos diretamente nas faces expostas dos taludes e praias arenosas, tem potencializado a ocorrência de movimentos gravitacionais de massa na praia de Pipa/RN.

As frequentes quedas, tombamentos e/ou deslizamentos de massa estão igualmente relacionados à intensificação dos EEP e da incidência direta do regime de ondas na base das falésias, devido ao abatimento contínuo no volume de areia na praia arenosa defrontante. A instalação de estruturas de contenção, executadas de forma inadequada e sem regramento por parte da gestão pública, tem intensificado a atuação dos processos erosivos, sobretudo da erosão marinha. Logo, a praia de Pipa foi predominantemente classificada como de probabilidade de risco alto (R3) e muito alto (R4), com trechos onde a conjunção das variáveis alerta para a ocorrência de desastres iminentes, devido à associação de diversas variáveis.

Alinhado às diretrizes propostas pela Estratégia Internacional das Nações Unidas para a Redução de Desastres, este artigo contribui com dados e informações espaciais que auxiliam na análise às intervenções adequadas para a redução de risco de desastres quanto à erosão costeira e movimentos gravitacionais de massa e gestão da orla marítima.

Contribuições dos Autores: Luana Raquel Juvino da Silva: realização da pesquisa; aplicação de Geoprocessamento; atividades de campo; análise e validação de dados, análise formal, elaboração e revisão do manuscrito. Venerando Eustáquio Amaro: concepção da pesquisa; organização do Geoprocessamento; análise e revisão dos dados; participação nos trabalhos de campo; análise formal, elaboração e revisão do manuscrito. Lívia Rafaely de Santana Gomes Pinheiro: preparação e análise de dados meteoceanográficos; participação na escrita e revisão do manuscrito. Ada Cristina Scudelari: contribuições na concepção da pesquisa; análise e revisão de dados; análise formal e elaboração do manuscrito.

Financiamento: Esta pesquisa não recebeu nenhum financiamento externo.

Agradecimentos: Os autores agradecem ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Norte pelo acolhimento e interesse nesta pesquisa.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

1. ALMEIDA, L. R. D.; AMARO, V. E.; MARCELINO, A. M. T.; SCUDELARI, A. C. Avaliação do clima de ondas da praia de Ponta Negra (RN, Brasil) através do uso do SMC-Brasil e sua contribuição à gestão costeira. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, 15(2): 135-151, 2015. DOI: 10.5894/rgci532
2. ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, vol 22, n° 6, 711-728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507
3. AMARO, V. E.; CARVALHO, R. C.; MATOS, M. de F. A. de; 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. 03-25, 2021a. DOI: 10.20502/rbg.v22i1.1887
4. AMARO, V. E.; SCUDELARI, A. C.; OLIVEIRA, D. S. de; LACERDA, I. L. C. de; MATOS, M. de F. A. de. Análise de Índices de Vulnerabilidade Física com uso de geotecnologias na região da Barreira do Inferno/RN. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 7, n° 2, p. 179-192, 2021b. DOI: 10.21680/2447-3359.2021v7n2ID22034
5. AMARO, V. E.; GOMES, L. S.; LIMA, F.; 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**, p. 1-25, 2015. DOI: 10.1080/01490419.2014.904257
6. AMORIM, A. C. B.; SCUDELARI, A. C.; AMARO, V. E.; MATOS, M. de F. A. de. 2019. Variabilidade dos Extremos de Precipitação Diária na Cidade de Natal, Estado do Rio Grande do Sul, Nordeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, vol. 42, n° 4, p. 284 – 295, 2019. DOI: 10.11137/2019_4_284_295

7. BARRETO, A.; SUGUIO, K.; BEZERRA, F.; TATUMI, S.; GIANNINI, P. Geologia e Geomorfologia do Quaternário Costeiro do Estado do Rio Grande do Norte. **Revista de Instituto de Geociências – USP**, Geol. USP Sér. Cient., São Paulo, v. 4, n. 2, p. 1-12, 2004. DOI: 10.5327/S1519-874X2004000200001
8. BEZERRA, F.; AMARO, V.; VITA-VINZI, C.; SAAD, A. Pliocene-Quaternary fault control of sedimentation and coastal plain morphology in NE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, 14:61–75, 2001.
9. BOOIJ, N.; RIS, R.; HOLTHUIJSEN, L. A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. **J. Geophys. Res.**, 104. 7649-7656, 1999.
10. BRASIL. 1979. Lei nº 6766, de 19 de dezembro de 1979. Lei Lehmann, Lei Federal de Parcelamento do solo Urbano.
11. BUSMAN, D. V.; AMARO, V. E.; SOUZA-FILHO, P. W. Análise estatística multicritério de métodos de vulnerabilidade física em zonas costeiras tropicais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 3, p. 499-516, 2016. DOI: 10.20502/rbg.v17i3.912
12. BRASIL. Ministério das Cidades / Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios**. Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007.
13. CAMARA, M.; SCUDELARI, A.; AMARO, V.; MATOS, M.; RABELO, T. Geotecnologias como subsídio para gestão de ambientes costeiros: análise do recuo em falésias/arribas no Estado do Rio Grande do Norte, Brasil, e suas implicações socioambientais. **Revista de Geografia e Ordenamento do Território (GOT)**, nº 16 (março). Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território, p. 53-79, 2019.
14. CAMARA, M. R. **Análise de recuo de falésias no litoral do Estado do Rio Grande do Norte**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, CTEC, Pós Graduação em Engenharia Civil, Natal, 2018.
15. COGHLAN, I.; CARLEY, J.; BLACKA, M.; RAYNER, D.; COX, R. Coastal Engineering Options for Adaptation to Climate Change. **Conference: National conference Practical Responses to Climate Change**, At: Canberra, 2012.
16. CÓRDOBA, V. C.; JARDIM de SA, E. F.; SOUZA, D. C.; ANTUNES, A. F. Bacia de Pernambuco-Paraíba. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 391-403, nov, 2007.
17. COSTA, F. S. Redução de riscos de catástrofes e resiliência no quadro de Sendai: o exemplo das cidades resilientes. In: LOURENÇO, L.; LIMA, H. R. (Coord. Ed.). **Resiliência ao Risco**. Coimbra, RISCOS – Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança, 2020. DOI: 10.34037/978-989-54942-7-9_8_1
18. CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Diagnóstico do Município de Tibau do Sul**. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Desenvolvimento Energético. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Serviço Geológico do Brasil. Recife, set. 2005. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/17279/rel_tibau_sul.pdf?sequence=4>. Acesso em: 02 de fev., 2021.
19. CUTTER, S. The landscape of disaster resilience indicators in the USA. **Nat. Hazards** 80, 741–758, 2016.
20. DINIZ, M. T. M.; OLIVEIRA, G. P. De; 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. DRMIMS – Disaster Risk Management Information Management System. SADC – DRM IMS. **Disaster Risk Models and Indicators**. 2021. Disponível em: <<https://drmims.sadc.int/en/sendai-framework/disaster-risk-models-and-indicators>>. Acesso em: 23 de julho de 2022.
22. EMPARN. **Relatórios Pluviométricos**, 2022. Disponível em: <<http://meteorologia.emparn.rn.gov.br/relatorios/relatorios-pluviometricos>>.
23. HUANG, X.; SONG, Y.; HU, X. Deploying Spatial Data for Coastal Community Resilience: A Review from the Managerial Perspective. **International Journal of Environmental Research and Public Health**. 18. 830, 2021. DOI: 10.3390/ijerph18020830.
24. IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Working Group II Sixth Assessment Report (AR6). 2021.
25. KENDALL, M.G. **Rank correlation methods**. London, Charles Griffin, 120p, 1975.
26. LANA, J. C.; JESUS, D. D.; ANTONELLI, T. 2021. **Guia de procedimentos técnicos do Departamento de Gestão Territorial: setorização de áreas de risco geológico**. Brasília: CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 49p., 2021.
27. LUIJENDIJK, A.; HAGENAAARS, G.; RANASINGHE, R.; BEART, F.; DONCHYTS, G.; AARNINKHOF, S. The State os the World’s Beaches. **Scientific Reports**, 8:6641, 2018. DOI: 10.1038/s41598-018-24630-6
28. MARENGO, J.; SCARANO, F.; SANTOS, A.; RIBEIRO, S. (eds). **Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. COPPE – UFRJ. Rio de Janeiro, 184p. 2016.
29. MATOS, M. F. A.; GURGEL, D. F.; SCUDELARI, A. C.; AMARO, V. E. 2020. Estimativa da taxa anual e sazonal do transporte longitudinal sedimentar na zona costeira do litoral oriental do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 21, n. 1, (Jan-Mar) p. 79-99, 2020. DOI: 10.20502/rbg.v21i1.1507

30. MATOS, M. F. A. de; AMARO, V. E.; SCUDELARI, A. C. ROSADO, S. B. Estimativas das alterações de longo prazo na linha de praia do Litoral Oriental do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 23, nº 1, 2022. DOI: 10.20502/rbg.v23i1.1953
31. MINISTÉRIO DO TURISMO. **Pipa atinge o topo do turismo nacional**. 2018. Disponível em: <<https://www.gov.br/turismo/pt-br/>>. Acesso em: 22 de julho de 2022.
32. MOURA, B. A. G.; ARAGÃO, J. O. R.; MELO, J. S. P.; SILVA, A. P. N.; GIONGO, R.; LACERDA, F. F. Z. O. Relação entre a precipitação do leste do Nordeste do Brasil e a temperatura dos oceanos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 13(4): 462 – 469, 2009.
33. NICHOLLS, R. J.; WONG, P. P.; BURKETT, V.; CODIGNOTTO, J.; HAY, J.; MCLEAN, R.; RAGOONADEN, S.; WOODROFFE, C. D.; ABUODHA, P. A. O.; ARBLASTER, J.; BROWN, B.; FORBES, D.; HALL, J.; KOVATS, S.; LOWE, J.; MCINNES, K.; MOSER, S.; RUPP-ARMSTRONG, S.; SAITO, Y. **Coastal systems and low-lying areas**. Reseach Online – University of Wollongong, Faculty of Science, 2007. Disponível em: <<http://ro.uow.edu.au/scipapers/164>>.
34. NUNES, M. R. de O. **Investimentos Internacionais e o Turismo em Tibau do Sul – RN**. 110 f. Dissertação (Mestrado em Turismo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Sociais Aplicadas, Programa de Pós-Graduação em Turismo. Natal, 2014.
35. PETTITT, A. N. A non-parametric approach to the change-point problem. **Applied Statistics**, London, 28 (2): 126-135, 1979.
36. PIÉRRRI, G. C. S. **Análise de Risco à Erosão Costeira na Região de Tibau do Sul/RN Através de Mapeamento Geoambiental e Análise Morfodinâmica**. 140 f. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Natal, 2008.
37. POLETTE, M.; BARROS, F. Os desafios urbanos na zona costeira brasileira frente às mudanças climáticas. **Costas - Revista Iberoamericana de Manejo Costeiro Integrado**, v.1, nº 1, 2012.
38. POLLARD, J. A.; SPENCER, T.; BROOKS, S. M. The interactive relationship between coastal erosion and flood risk. *Progress in Physical Geography*, vol. 43 (4), 574-585, 2019. DOI: 10.1177/0309133318794498
39. QGIS Development Team. **QGIS Geographic Information System (versão 3.16.5)**. 2022. Disponível em: <<http://qgis.osgeo.org>>.
40. RANASINGHE, R. Assessing climate change impacts on open sandy coasts: A review. **Earth-Science Reviews**, vol. 160, 320-332, 2016. DOI: 10.1016/j.earscirev.2016.07.011
41. RUEDA, A.; VITOUSEK, S.; CAMUS, P. A global classification of coastal flood hazard climates associated with large-scale oceanographic forcing. **Scientific Reports**, 7(1): 5038, 2017.
42. SANTOS JÚNIOR, O. F.; AMARAL, R. F.; SCUDELARI, A. C. Failure Mechanisms of a Coastal Cliff in Rio Grande do Norte State, NE Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. 39, p. 629-632, 2006.
43. SILVA, B. M. F.; SANTOS JÚNIOR, O. F.; FREITAS NETO, O.; SCUDELARI, A. C. Erosão em Falésias Costeiras e Movimentos de Massa no Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. **Revista Geociências**, UNESP, v. 39, n. 2, p. 447-462, 2020. DOI: 10.5016/geociencias.v39i2.14233
44. SILVA, R. I.; BEZERRA, M. M. O.; SILVA, M. G.; SANTOS, J. O. Atividade Turística em Natal e Tibau do Sul: Análise a partir de Medidas de Especialização para o Período 2001 – 2016. **DRd – Desenvolvimento Regional em debate**, v. 9, p. 731-752, 2019. DOI: 10.24302/drd.v9i0.2375
45. SILVA, B. M. F.; Freitas Neto, O.; SANTOS JÚNIOR, O. F.; BARBOSA, N. M. ; FRANÇA, F.A N. ; Araujo, E. E. B. Stability Evolution with Basal Erosion Increase in Cliffs on the Coast of Rio Grande do Norte, Brazil. *Applied Mechanics and Materials*, v. 858, p. 342-347, 2016.
46. SILVA, E. F.; OLIVEIRA, J. L. E. Gestão Territorial e Ocupação do Solo no Município de Tibau do Sul/RN – Brasil. **Sociedade e Território**, Natal, v. 25, nº 1, p. 62 – 79, 2013.
47. SILVA, B. F. P.; FEDOROVA, N.; LEVIT, V.; PERESETSKY, A.; BRITO, B. M. de. Sistemas sinóticos associados às precipitações intensas no Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 3, 313-339, 2011.
48. SILVA, W. S.; SANTOS JÚNIOR, O. F.; AMARAL, R. F.; SCUDELARI, A. C. Erosão Costeira nas Falésias de Tibau do Sul – Litoral Leste do Rio Grande do Norte. **II Congresso sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa; IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário; II Congresso do Quaternário dos Países de Língua Ibéricas**, v. 1, p. 1-10, 2003.
49. TOIMIL, A.; LOSADA, I. J.; NICHOLLS, R. J.; DALRYMPLE, R. A.; STIVE, M. J. F. Addressing the challenges of climate change risks and adaptation in coastal areas: A review. **Coastal Engineering**, 2019. DOI: 103611. doi:10.1016/j.coastaleng.2019.1.
50. TORABI, E.; DEDEKORKUT-HOWES, A.; HOWES, M. Not Waving, Drowning: Can Local Government Policies on Climate Change Adaptation and Disaster Resilience Make a Difference? **Urban Pol. Res.** 35 (3):312–332, 2017.

51. TORRES, R. R.; FERREIRA, N. J. Case studies of easterly wave disturbances over Northeast Brazil using the Eta Model. **Weather Forecast**, n. 26, 225–235, 2011. DOI: 10.1175/2010WAF2222425.1
52. UNISDR. 2015. **Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030**. 2015. Disponível em <http://www.unisdr.org/files/43291spanishsendaiframeworkfordisas_terri.pdf>. Acesso em: 23 de julho de 2022.
53. VITAL, H.; SANTOS NETO, F.; PLÁCIDO JÚNIOR, J. S. Morfodinâmica de um canal de maré tropical: Estudo de caso na costa norte rio grandense, Nordeste do Brasil. **Revista da Gestão Costeira**, v. 8, n. 2, p. 113-126, 2008.
54. WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. London: Academic Press. 648 p., 2006.
55. WORLD ECONOMIC FORUM. **The Global Risks Report 2018**, 13th Edition. Geneva: World Economic Forum, p. 80, 2018. ISBN: 978-1-944835-15-6.



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.