



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 10, n° 1 (2024)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n1ID31738>



Vulnerabilidade Costeira no Trecho entre as Praias de Peroba e Redonda no Município de Icapuí-Ceará, Brasil

Coastal Vulnerability in the Stretch Between Beaches of Peroba and Redonda in the Municipality of Icapuí-Ceará, Brazil

Mário Silva Chacanza¹; Narelle Maia de Almeida²; George Satander Sá Freire³; Cláudio Ângelo da Silva Neto⁴; Matheus Edson Mendes Medeiros⁵; Eduardo Viana Freires⁶; Maykon Targino da Silva⁷

- ¹ Universidade Púnguê (UniPúnguê), Cidade de Tete, Moçambique. Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada (LGMA), Fortaleza-Ceará, Brasil. mschacanza@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7679-1441>
- ² Universidade Federal do Ceará, Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada (LGMA), Fortaleza-Ceará, Brasil. narelle@ufc.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2586-4502>
- ³ Universidade Federal do Ceará, Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada (LGMA), Fortaleza-Ceará, Brasil. satanderfreire@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8850-7225>
- ⁴ Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Laboratório de Geoprocessamento do Ceará (GEOCE), Fortaleza-Ceará, Brasil. claudioasn@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6749-9438>
- ⁵ Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada (LGMA), Fortaleza-Ceará, Brasil. matheunh@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4496-4760>
- ⁶ Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Laboratório de Geoprocessamento do Ceará (GEOCE), Fortaleza-Ceará, Brasil. Secretaria Municipal de Educação de Maracanaú, Secretaria da Educação do Estado do Ceará - SEDUC/CE. eduardovgeo@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7010-5260>
- ⁷ Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Laboratório de Geoprocessamento do Ceará (GEOCE), Fortaleza-Ceará, Brasil. maykontargino@hotmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9486-2714>

Resumo: Zonas costeiras são regiões dinâmicas cuja morfologia é diretamente influenciada por fatores físicos naturais ou de origem antrópica. A depender do nível de ocupação e do estágio de desenvolvimento, estas áreas podem estar sujeitas a riscos associados à ocorrência de inundações ou processos erosivos que as tornam vulneráveis. Considerando esse contexto, este trabalho quantificou a vulnerabilidade relativa da costa quanto às alterações físicas entre as praias de Peroba e Redonda no município de Icapuí, litoral leste do Ceará, destacando os trechos de praia onde os efeitos na linha costa pode ser extremos. Na implementação do Índice de Vulnerabilidade Costeira, foram utilizadas as variáveis naturais geomorfologia, declividade, taxa de variação da linha de costa, amplitude média de maré, altura significativa de onda e variação do nível médio do mar. Os resultados indicaram a ocorrência de três classes de vulnerabilidade, desde moderada a muito alta. Cerca de 2.940 m (58%) foram registrados como trecho de moderada vulnerabilidade, 2.100 m (41%) de alta vulnerabilidade e cerca de 30 m (1%) muito alta vulnerabilidade. Os trechos com maior vulnerabilidade estão associados a faixas de praias arenosas e os de menor vulnerabilidade a falésias ativas constituintes dos tabuleiros costeiros e áreas de conservação.

Palavras-chave: Erosão; Risco; IVC.

Abstract: Coastal zones are dynamic regions whose morphology is directly influenced by natural or anthropic physical factors. Depending on the level of occupation and stage of development, these areas may be subject to risks associated with floods or erosive processes that make them vulnerable. Considering this context, this work quantified the relative vulnerability of the coast to physical changes between the Peroba and Redonda beaches in the municipality of Icapuí, east coast of Ceará, highlighting the stretches of beach where the effects on the coastline can be extreme. In the implementation of the Coastal Vulnerability Index, the natural variables geomorphology, slope, shoreline variation rate, mean tidal range, significant wave height, and mean sea level variation were used. The results indicated the occurrence of three vulnerability classes, ranging from moderate to very high. About 2,940 m (58%) were recorded as moderate vulnerability, 2,100 m (41%) as high vulnerability and about 30 m (1%) as very high vulnerability. The most vulnerable stretches are associated with sandy beaches. The less vulnerable ones are with active cliffs that are part of the coastal tablelands and conservation areas.

Keywords: Erosion; Risk; CVI.

Recebido: 07/03/2023; Aceito: 12/12/2023; Publicado: 23/05/2024.

1. Introdução

Zonas costeiras são áreas extremamente dinâmicas por conta de sua interação entre o mar, continente e atmosfera. Seu alto dinamismo é geralmente influenciado por agentes físicos que podem atuar isoladamente ou em conjunto, tornando-as vulneráveis à ocorrência de inundações, mudanças na posição da linha de costa ou, ainda, a salinização de aquíferos (KANTAMANENI *et al.*, 2018; GHOSSEIN *et al.*, 2018). As constantes mudanças que ocorrem nas zonas costeiras também são fortemente influenciadas pela atividade antropogênica devido à crescente ocupação do solo resultante do aumento da população, aumento da urbanização e industrialização, entre outras atividades de desenvolvimento, e acentuam o problema de erosão costeira (DEL RÍO & GRACIA, 2009; MUTMAINAH, 2022).

A vulnerabilidade destas áreas apresenta diferentes graus de intensidade em função das ocupações relacionadas à distância segura em relação à praia (NEVES *et al.*, 2010; MUEHE, 2011; KOROGLU, 2019; KOVALEVA *et al.*, 2022). Em situações de ocorrência de eventos extremos, como marés de sizígia, áreas costeiras com faixas de praia de menor declividade tendem a apresentar um maior potencial de risco à ocorrência de inundação e rapidez de recuo da linha de costa (DENNER *et al.*, 2015; LOPES, 2021). Na geologia costeira, o desafio geralmente reside na determinação da resposta física da costa frente à elevação do nível do mar e a previsão do recuo da linha de costa face à crescente vulnerabilidade associada à ocupação dos terrenos costeiros (THIELER & HAMMAR-KLOSE, 2000).

Atualmente, a avaliação da vulnerabilidade costeira tem sido amplamente usada em vários estudos pela sua importância na identificação, em primeira instância de segmentos costeiros suscetíveis ao risco de exposição a vários fatores naturais (APPEANING ADDO, 2013; KOVALEVA *et al.*, 2022). Diversos estudos já aplicaram o Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) na escala regional e local em diferentes costas do planeta, empregando diferentes variáveis naturais e socioeconômicas para avaliar a susceptibilidade da costa a desastres face à elevação do nível do mar (THIELER & HAMMAR-KLOSE, 2000; MUEHE *et al.*, 2011; LINS-DE-BARROS, 2017; PANTUSA *et al.*, 2018; KOMI *et al.*, 2022; LOPES *et al.*, 2022). Estudos de vulnerabilidade já foram aplicados em praias da zona costeira do Nordeste do Brasil, como Araújo *et al.* (2019), que estimaram o índice de vulnerabilidade costeira no litoral do Estado do Piauí. Lopes (2021) estudou a vulnerabilidade no litoral do município de São Gonçalo do Amarante no Ceará. Amaro *et al.* (2021) estabeleceram o índice de vulnerabilidade costeira à erosão a partir de variáveis naturais e ambientais, considerando a dinâmica das mudanças climáticas para diferentes cenários futuros estabelecidos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, para a região da Barreira do Inferno/RN. Queiroz *et al.* (2022) aplicaram indicadores globais no estudo da vulnerabilidade costeira para gestão da erosão no litoral norte do estado do Pernambuco. Lacerda *et al.* (2022) avaliaram variáveis naturais para determinar vulnerabilidade costeira antes e depois da instalação do parque eólico nas cidades de Pedra Grande e São Miguel do Gostoso/RN.

Há ocorrência de processos erosivos observados na zona costeira do município de Icapuí, litoral leste do estado Ceará foram amplamente descritos por Barros *et al.* (2020), Silva (2021), Chacanza *et al.* (2022) e Chacanza *et al.* (2023). Face ao fenômeno de erosão identificado, este estudo teve como objetivo mapear e quantificar as áreas de vulnerabilidade relativa da costa suscetíveis às alterações físicas entre as praias de Peroba e Redonda no município de Icapuí, destacando os trechos de praia onde os riscos naturais ou antrópicos na linha costa que podem ser extremos e ambientalmente impactantes.

2. Metodologia

2.1. Área de estudo

A área de estudo compreende a extensão do trecho entre as praias de Peroba e Redonda, litoral do município de Icapuí, extremo leste do estado do Ceará, Nordeste do Brasil (Figura 1). A área de estudo é constituída por duas praias, a leste, a praia de Peroba (setor 1) e a oeste a praia de Redonda (setor 2). A área é caracterizada por uma topografia constituída de falésias ativas, formando acidentes geográficos em forma de promontórios, sobretudo no extremo leste do setor 1 e na região entre os dois setores. Campos de dunas são observados na porção oeste do setor 2.



Figura 1 – Área de estudo no município de Icapuí–Ceará, Brasil, a qual é constituída pelas Praias de Peroba (setor 1) e Redonda (setor 2).

Fonte: Elaborado com base em dados cartográficos do IBGE e Imagem RapidEye/REIS de 27/06/2015 disponibilizado pelo MMA.

2.2. Índice de vulnerabilidade costeira (IVC)

Para cálculo do Índice de Vulnerabilidade Costeira foram escolhidas seis variáveis físicas, utilizando como referências as abordagens de Thieler & Hammar-Klose (2000), Ghoussein *et al.* (2018) e Pantusa *et al.* (2018). As variáveis aplicadas foram: geomorfologia, declividade da costa, taxa de variação da linha de costa, amplitude média de maré, altura significativa de onda e nível médio do mar. Para quantificar a vulnerabilidade costeira foram atribuídas, seguindo Thieler & Hammar-Klose (2000), classificações individuais para cada variável, com valores de 1 a 5, onde 1 indica menor risco e 5 maior risco face à elevação do nível do mar (Tabela 1). Em seguida, foi atribuída uma porcentagem para cada classe, indicando o impacto específico; ou seja, o nível de resposta que cada parâmetro exerce num determinado trecho de praia. Os valores de ponderação foram de 0,2 para vulnerabilidade muito baixa, 0,4 baixa, 0,6 moderada, 0,8 alta e 1,0 muito alta.

Tabela 1 – Ranking do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC).

| Referência | Variável | Peso (x) | Muito Baixa | Baixa | Moderada | Alta | Muito Alta |
|---|--|----------|------------------|-----------|----------------------------|-------------|------------------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Thieler & Hammar-Klose (2000); Pantusa <i>et al.</i> (2018) | Taxa de variação da linha de costa (m/ano) | 15% | > 2,0 Acreção | 1,0 – 2,0 | -1,0 – 1,0 Estabilidade | -1,0 – -2,0 | < -2,0 Erosão |
| Ghoussein <i>et al.</i> (2018) | Declividade da costa (%) | 25% | > 45 | 30 – 45 | 15 – 30 | 8 – 15 | < 8 |

| | | | | | | | |
|-------------------------------|----------------------------------|-----|---------|-------------------|------------|-------------|----------------------|
| Thieler & Hammar-Klose (2000) | Geomorfologia | 10% | - | Costa de falésias | - | - | Praia arenosa, dunas |
| Thieler & Hammar-Klose (2000) | Amplitude média de maré (m) | 30% | > 6,0 | 4,0 – 6,0 | 2,0 – 4,0 | 1,0 – 2,0 | < 1,0 |
| Thieler & Hammar-Klose (2000) | Altura significativa de onda (m) | 15% | < 1,1 | 1,1 – 2,0 | 2,0 – 2,25 | 2,25 – 2,60 | > 2,60 |
| Thieler & Hammar-Klose (2000) | Nível médio do mar (mm/ano) | 5% | < -1,21 | -1,21 – 0,1 | 0,1 – 1,24 | 1,24 – 1,36 | > 1,36 |

Fonte: Autor (2023)

As variáveis definidas receberam um determinado valor de risco que indica sua influência em relação ao trecho costeiro. Como referência espacial para mapeamento temático e calcular a vulnerabilidade costeira, foram utilizados todos os pontos de intercessão entre transectos gerados e a linha de costa de agosto de 2021. O IVC foi calculado a partir da expressão proposta por Denner *et al.* (2015) e Mutmainah (2022), consistindo na soma do produto das variáveis envolvidas na análise com o respectivo peso (Equação 1).

Equação 1 Índice de vulnerabilidade costeira

$$IVC = (a * x_1) + (b * x_2) + (c * x_3) + (d * x_4) + (e * x_5) + (f * x_6)$$

Onde a = taxa de variação da linha de costa, b = declividade da costa, c = geomorfologia, d = amplitude média de maré, e = altura significativa de onda e f = nível médio do mar. Os valores de x representam os pesos das variáveis. x1 = peso da taxa de variação da linha de costa, x2 = peso da declividade da costa, x3 = peso da geomorfologia da costa, x4 = peso da amplitude média de maré, x5 = peso de altura significativa de onda e x6 = peso do nível médio do mar.

Geomorfologia: Foi definida por meio de observações em campo e do ortomosaico gerado do conjunto de imagens de alta resolução coletadas por uma aeronave remotamente pilotada (RPA) entre agosto de 2020 e agosto de 2021. Neste contexto, o valor correspondente a esta variável foi extraído com base na forma do relevo local, considerando o método descrito por Thieler & Hammar-Klose (2000). A geomorfologia regional, onde a área de estudo se enquadra, engloba tabuleiros pré-litorâneos e a planície litorânea. Esta última engloba as praias, dunas, lagoas costeiras e interdunares, sistema estuarino-lagunar e os terraços marinhos, enquanto os tabuleiros pré-litorâneos agregam grande parte do território de Icapuí, estendendo-se nas regiões adjacentes à costa onde, em algumas áreas, está coberto por antigas dunas, limitado interiormente por falésias mortas e por falésias vivas quando alcançam o litoral (MEIRELES & SANTOS, 2012).

Declividade da costa: A variável declividade é tida como um indicador primário de risco de inundação ou da rapidez de recuo da linha de costa (HEGDE & REJU, 2007). Esta variável foi calculada a partir de valores extraídos do modelo digital de elevação (MDE) gerado a partir de dados coletados em campo em agosto de 2021, com uso de RPA. A variável foi expressa em porcentagem (%), e os intervalos de valores das classes foram definidos segundo Ghoussein *et al.* (2018). Nos dados extraídos foi considerada a declividade presente sobre a linha de costa em agosto de 2021, onde todos valores superiores 45% indicam muito baixa sensibilidade e valores inferiores a 8% sensibilidade muito alta a ocorrência de erosão.

Taxas de variação da linha de costa: Os valores foram obtidos a partir do histórico de curto prazo baseado na taxa de regressão linear (LRR) resultado de cinco cenas obtidas de composição de imagens coletadas trimestralmente por RPA no período entre agosto de 2020 e agosto de 2021. As imagens foram processadas no *software* Agisoft Metashape Pro, onde no final foi gerado o ortofotomosaico. Ele foi exportado para o *software* ArcGIS 10.8, onde foram vetorizadas cinco linhas de costa e posteriormente, foi aplicada a ferramenta *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS), versão 5.0. A taxa média de variação de toda a extensão da linha de costa foi de 1,15 m/ano. As classes de vulnerabilidade foram baseadas em Thieler & Hammar-Klose (2000) e Pantusa *et al.* (2018). Prever taxas de recuo costeiro, perda de sedimentos e erosão de falésias é importante para melhor planejar o gerenciamento costeiro (THIELER & HAMMAR-KLOSE, 2000). A taxa de variação da linha de costa é uma variável que também valida a metodologia de cálculo do IVC (MANNO *et al.*, 2013).

Amplitude média de maré: A variável maré está ligada aos riscos de inundação permanente e episódica (THIELER & HAMMAR-KLOSE, 2000). A amplitude média da maré foi calculada a partir de valores históricos de 15 anos, entre janeiro de 2006 e dezembro de 2021 disponibilizados pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), referentes aos registros do Porto de Areia Branca-RN, o mais próximo da área de estudo. A média anual foi de 1,83 m, que se enquadra da classe de vulnerabilidade alta, segundo a classificação de Thieler & Hammar-Klose (2000).

Altura significativa de onda (*H_s*): A altura significativa de onda é uma variável usada como indicador de energia das ondas que atingem na costa, por ser um importante influenciador de processos costeiros que impulsiona o transporte de sedimentos, resultando em erosão costeira (GAKI-PAPANASTASSIOU *et al.*, 2010). Neste caso foi usado o valor médio de *H_s* apresentado por Barros (2018) correspondente ao período de dez anos (10), entre janeiro de 2006 e dezembro de 2016, no qual as ondas que chegam a Icapuí apresentam *H_s* médio de 1,64 m, com máximas de 3,1 m e mínimas de 0,80 m e período médio de 8,2 s, máximo de 17,9 s e mínimo de 4,6 s. Este valor enquadra-se na faixa de 1,1 a 2,0 classificado como de baixa vulnerabilidade. Medidas efetuadas por Pinheiro *et al.* (2016) na região mais próxima de Icapuí (vizinho município de Aracati), apresentaram valores de *H_s* com frequências que variou entre 1,3 e 1,73 m. Medidas de altura de onda efetuadas na zona de arrebentação, em cinco campanhas de campo, apresentaram valores médios entre 0,8 e 1,0 m com períodos entre 3,72 e 6,56 s (CHACANZA, *et al.*, 2023).

Nível médio do mar: O sexto relatório do IPCC (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas) prevê o aumento do nível do mar até 2100, com intervalo provável entre 0,26 a 0,55 m para uma estimativa otimista (média de 0,40 m). Para variações entre 0,58 a 1,07 m em uma estimativa pessimista, o incremento médio será 0,81 m (IPCC, 2021). Qualquer erosão ou avanço visível na costa está diretamente relacionado com a variação do nível do mar (GHOUSSEIN *et al.*, 2018). Partindo deste pressuposto, variações superiores a 1,36 mm/ano enquadram-se na classe de vulnerabilidade muito alta (THIELER & HAMMAR-KLOSE, 2000). Segundo Lopes (2021), todos cenários propostos pelo relatório do IPCC apresentam variações superiores a 1,36 mm/ano.

3. Resultados e discussão

3.1. Resultados

As taxas de variação da linha de costa e a declividade da costa apresentaram valores IVC que variaram entre muito baixa a muito alta vulnerabilidade. Já em relação à variável geomorfologia, o registro foi apenas de duas feições classificadas como baixa e muito alta vulnerabilidade (Tabela 2). Quanto às variáveis hidrodinâmicas os valores foram constantes, a amplitude média de maré apresentou uma média correspondente a alta vulnerabilidade, a altura significativa de onda apresentou uma média correspondente a baixa vulnerabilidade e o nível médio do mar com valor correspondente a muito alta vulnerabilidade.

Tabela 2 – Valores de vulnerabilidade por variáveis

| Variáveis | Mínimo | Médio | Máximo | Desvio Padrão |
|------------------------------------|--------|-------|--------|---------------|
| Taxa de variação da linha de costa | 0,2 | 0,48 | 1,0 | ± 0,21 |
| Declividade da costa | 0,2 | 0,39 | 1,0 | ± 0,24 |
| Geomorfologia | 0,4 | 0,93 | 1,0 | ± 0,19 |

Fonte: Autor (2023)

As variáveis envolvidas no processo apresentaram valores do índice de vulnerabilidade diferentes ao longo da linha de costa (Tabela 3).

Tabela 3 – Valores do Índice de Vulnerabilidade Costeira ao longo da linha de costa

| Variáveis | Ranking de vulnerabilidade | | | | | | | | | |
|--|----------------------------|-------|-----------|-------|--------------|-------|----------|-------|----------------|-------|
| | Muito baixa (1) | | Baixa (2) | | Moderada (3) | | Alta (4) | | Muito alta (5) | |
| | m | % | m | % | m | % | m | % | m | % |
| Taxa de variação da linha de costa (m/ano) | 1.550 | 30,57 | 560 | 11,05 | 2.530 | 49,90 | 330 | 6,51 | 100 | 1,97 |
| Declividade da costa (%) | 2.770 | 54,63 | 650 | 12,82 | 970 | 19,13 | 520 | 10,26 | 160 | 3,16 |
| Geomorfologia | - | - | 620 | 12,23 | - | - | - | - | 4.450 | 87,77 |

| | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|---|---|-------|-----|---|---|-------|-----|-------|-----|
| Amplitude média de maré (m) | - | - | - | - | - | - | 5.070 | 100 | - | - |
| Altura significativa de onda (m) | - | - | 5.070 | 100 | - | - | - | - | - | - |
| Nível médio do mar (mm/ano) | - | - | - | - | - | - | - | - | 5.070 | 100 |

Fonte: Autor (2023)

Implementado o IVC, os níveis de vulnerabilidade encontrados variaram de moderado a muito alto (Figura 2A), onde os valores variaram entre 0,47 e 0,85, com média de $0,61 \pm 0,07$. Este valor indicou uma classificação de alta vulnerabilidade costeira entre o trecho das praias de Peroba e Redonda no município de Icapuí. Os trechos com registro de vulnerabilidade muito alta encontram-se na porção leste da praia de Peroba e os valores variaram entre 0,82 e 0,85.

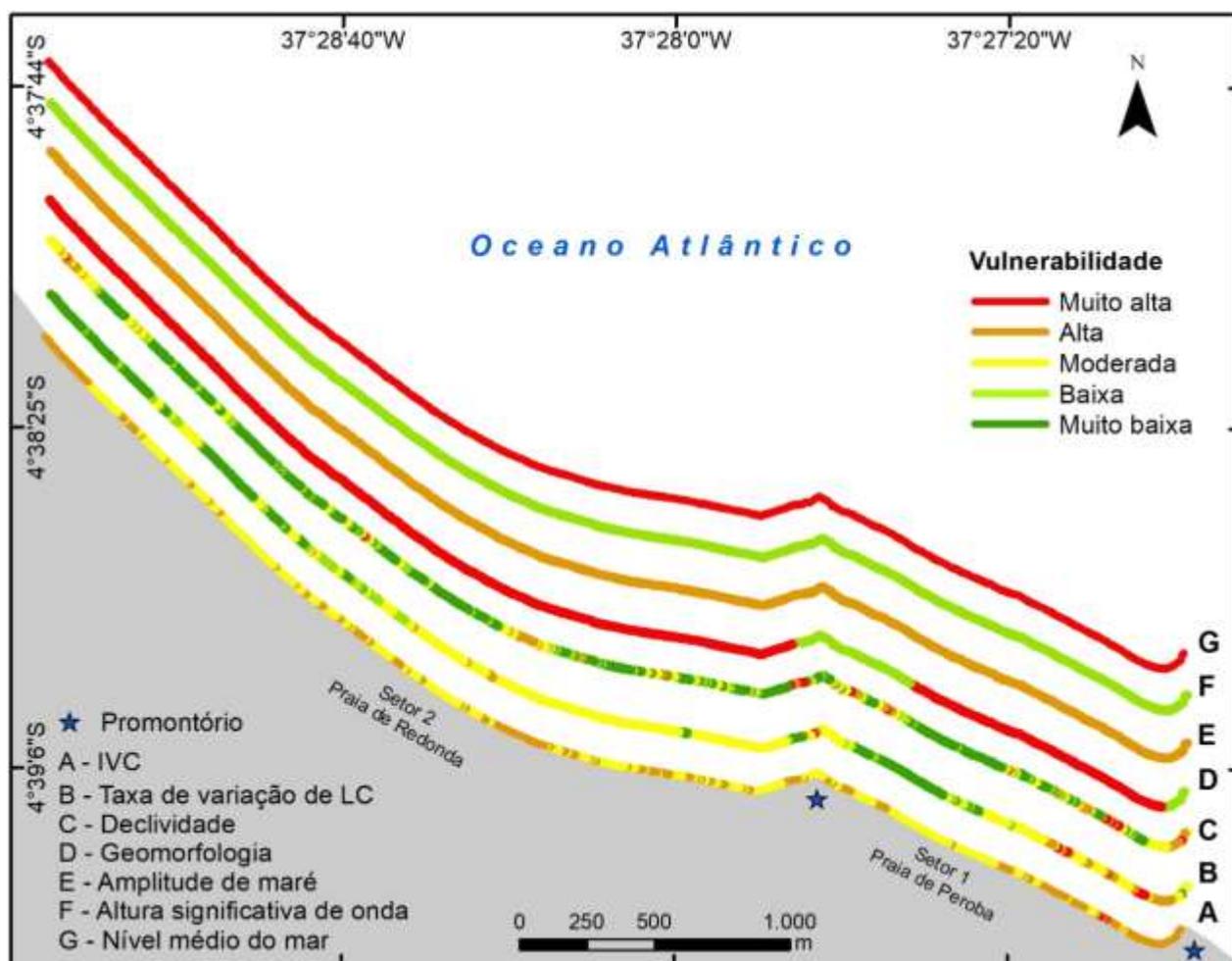


Figura 2 – (A) IVC: Índice de vulnerabilidade costeira entre as praias de Peroba e Redonda; (B – G) Classes de índice de vulnerabilidade costeira por variáveis. LC: linha de costa.

Fonte: Autor (2023)

A Figura 3 mostra os gráficos de distância e porcentagem de vulnerabilidade costeira, onde dos 5.070 m de linha de costa do trecho analisado, cerca de 2.940 m (58%) foram registrados como trecho de moderada vulnerabilidade, 2.100 m (41%) como trecho de alta vulnerabilidade e cerca de 30 m (1%) como de muito alta vulnerabilidade.

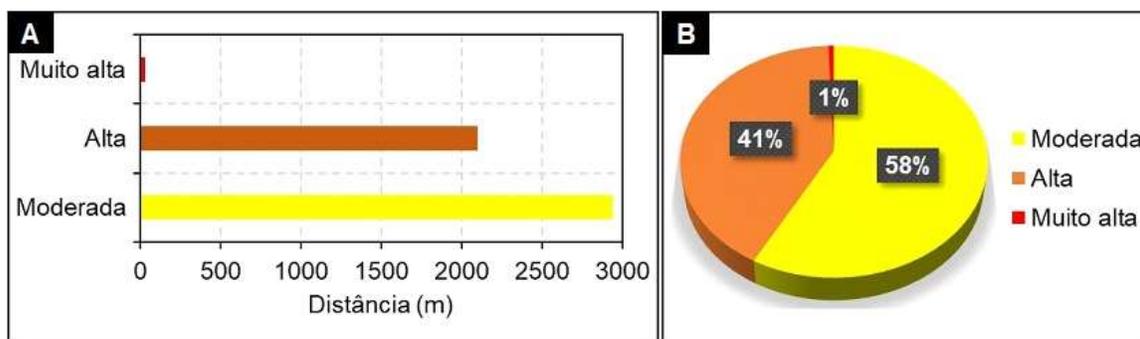


Figura 3 – Classes de vulnerabilidade costeira. (A) Distância em relação à linha de costa; (B) Porcentagem de vulnerabilidade ao longo do trecho analisado.

Fonte: Autor (2023)

O índice de vulnerabilidade mais alto está concentrado a leste do setor 1, coincidindo com as maiores variações negativas da linha de costa (Figura 2A e 4B, C e D). No setor 2, os trechos de alta vulnerabilidade se encontram distribuídos ao longo do subsetor leste, área com estruturas de contenção à erosão (Figura 2E e 4F e G), enquanto o subsetor a oeste apresenta uma vulnerabilidade moderada com trechos localizados de alta vulnerabilidade.

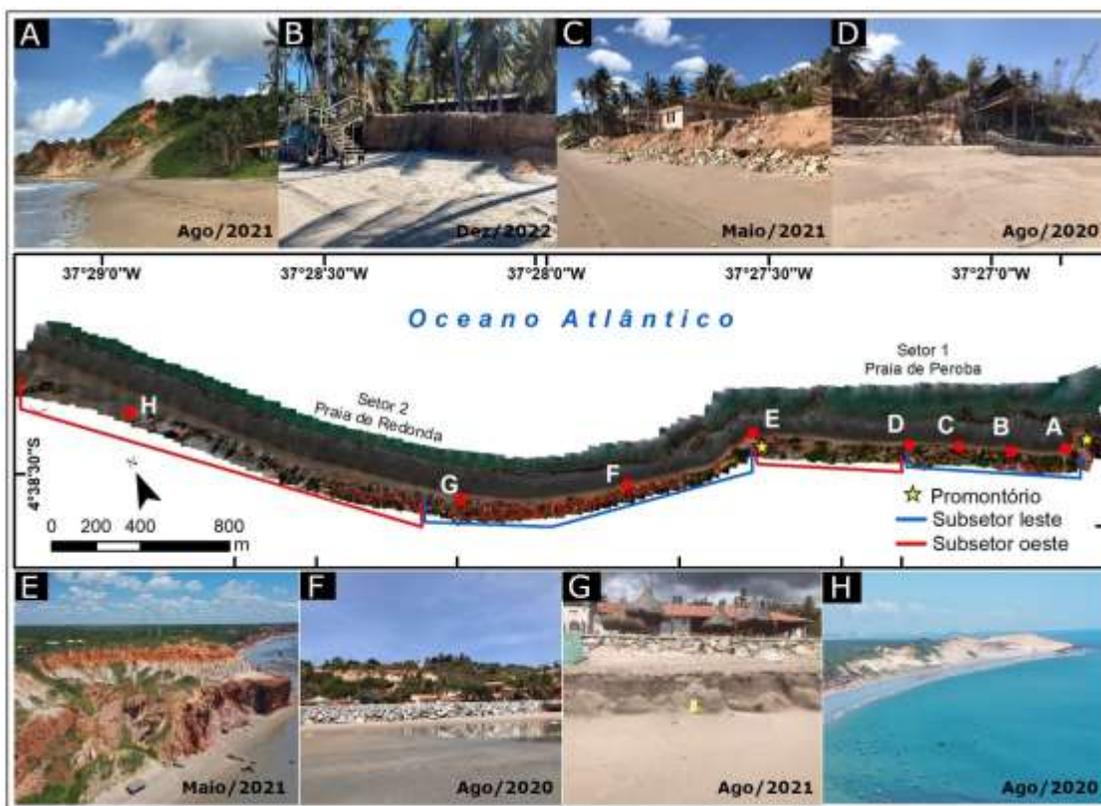


Figura 4 – Trechos de praia representando diferentes morfologias face ao nível de resposta da linha de costa em relação aos riscos físicos devido à interação com mar. (A) Promontório rochoso no extremo leste do setor 1; (B, C e D) Trechos do setor 1 que representam uma alta vulnerabilidade costeira; (E) Área de falésia ativa com promontório rochoso entre os setores 1 e 2; (F e G) Trechos do setor 2 com vulnerabilidade alta e temporariamente controlada devido à estrutura de contenção à erosão; (H) Trecho com uma extensa área de retropraia (área de conservação).

Fonte: Autor (2023)

3.2. Discussão

A classe de vulnerabilidade moderada coincide com trechos de praia onde ocorrem maiores taxas de progradação da linha de costa, principalmente nas porções a oeste dos dois setores analisados. Os trechos de costa com vulnerabilidade alta estão concentrados nas porções mais a leste, também coincidindo com as maiores taxas de retrogradação da linha de costa. A linha de costa variou a uma taxa correspondente a 1,15 m/ano, onde o setor 1, o mais vulnerável, apresentou uma taxa média equivalente a 0,87 m/ano e no setor 2 a taxa média foi de 1,27 m/ano. Meireles *et al.* (2020) descreveram o trecho entre as praias de Peroba e a porção leste de Redonda como estágio crítico de erosão e a porção oeste de Redonda como temporariamente estável face à elevação do nível do mar. Neste trabalho, o estágio temporariamente estável também foi encontrado ao longo do trecho oeste da praia de Peroba (Figura 2A).

A variável geomorfologia apresenta trechos com baixa e muito alta vulnerabilidade. Os trechos de baixa vulnerabilidade estão associados às falésias ativas e os de alta, às porções de praias arenosas (Figura 2D). A geomorfologia de falésias proporciona alta declividade na linha de costa junto ao sopé da falésia e isto faz com que a vulnerabilidade face à elevação do nível mar, seja minimizada nos trechos com declividade muito íngreme, apesar dos valores terem apontado para classificações de moderada a alta vulnerabilidade. Por mais que os processos erosivos estejam num estágio progressivo, em áreas de declividade íngreme devido à presença de falésias ativas, a velocidade de erosão é minimizada (HEGDE & RUJU, 2007; MEIRELES *et al.*, 2020). Pontos localizados de falésia ativa apresentaram alta vulnerabilidade e estes valores coincidiram com taxas de recuo da linha de costa iguais ou superior a 2 m/ano. Processos erosivos em falésia na área analisada foram reportados por Silva (2021) em sua análise de vulnerabilidade de erosão de falésias no leste do Ceará.

Na porção oeste da praia de Redonda, área caracterizada por campo de dunas que integram a reserva estadual marinha de Ponta Grossa, há uma ampla região de retropraia constituída por dunas frontais e campo de dunas móveis e fixas que interagem diretamente com a praia, trocando sedimentos no sentido duna-praia ou vice-versa, fazendo com que a alta taxa de vulnerabilidade desta praia arenosa seja, na prática, muito baixa em relação ao risco de perda de patrimônio edificado como resultado de impacto de erosão. A ausência da pressão urbana neste subsetor da praia de Redonda também minimiza a vulnerabilidade local e impactos sociais.

A alta amplitude de maré (1,83 m) associada à baixa declividade da faixa de praia são as variáveis que mais contribuem na variação do IVC na área. Quando conjugadas com a altura significativa de onda, podem elevar a vulnerabilidade costeira face à elevação do nível do mar em relação à capacidade de resposta num cenário de eventos extremos. Ações antrópicas tem fortemente influenciado os processos costeiros e, tratando-se de praias arenosas, muitas vezes tem sido a principal causa da vulnerabilidade costeira, tais como construções em áreas próximas à linha de costa, bem como a mineração de areia e aterros em novos locais, construção de estruturas de contenção a erosão sem o devido respeito aos processos geológicos (THIELER & HAMMAR-KLOSE, 2000; GHOSSEIN *et al.*, 2018). Em campo, esta situação foi amplamente verificada no setor 1, principalmente quando comparado ao setor 2, com uma vasta presença de infraestruturas em estágio de vulnerabilidade alta a muito alta, situadas a menos de 20 m de distância da linha de costa e, em alguns casos, juntas a atual linha de costa (Figura 4B, C e D). Este cenário local desvaloriza as infraestruturas no mercado imobiliário.

Para minimizar os níveis de exposição a riscos, alguns países instituíram distância mínima da linha de costa. Segundo Dronkers (2022), vários países da América Latina estabeleceram distâncias de recuo que variam entre 20 e 80 m da linha de costa, com exceção das Bahamas e Venezuela, com distâncias inferiores a 20 m; e Brasil e Costa Rica, com distâncias entre 50 e 200 m. A distância estabelecida no Brasil, 50 m, foi definida para áreas urbanizadas e 200 m para áreas não urbanizadas Ministério do Meio Ambiente (MMA, s.d.). Esta distância mínima não foi verificada na área de estudo, principalmente na praia de Peroba e no subsetor leste de Redonda, com exceção dos trechos com falésias ativas. A distância foi verificada apenas no subsetor oeste da praia de Redonda, onde não existem ocupações por ser uma área de conservação (Figura 5). Além das distâncias estabelecidas para o recuo, é importante que se inclua o turismo no plano de gerenciamento costeiro, sobretudo em municípios com praias de elevado potencial turístico, pois esta atividade contribui na degradação dos ambientes costeiros (LINS-DE-BARROS, 2017). Este potencial turístico pode ser encontrado nas Praias de Peroba e Redonda.

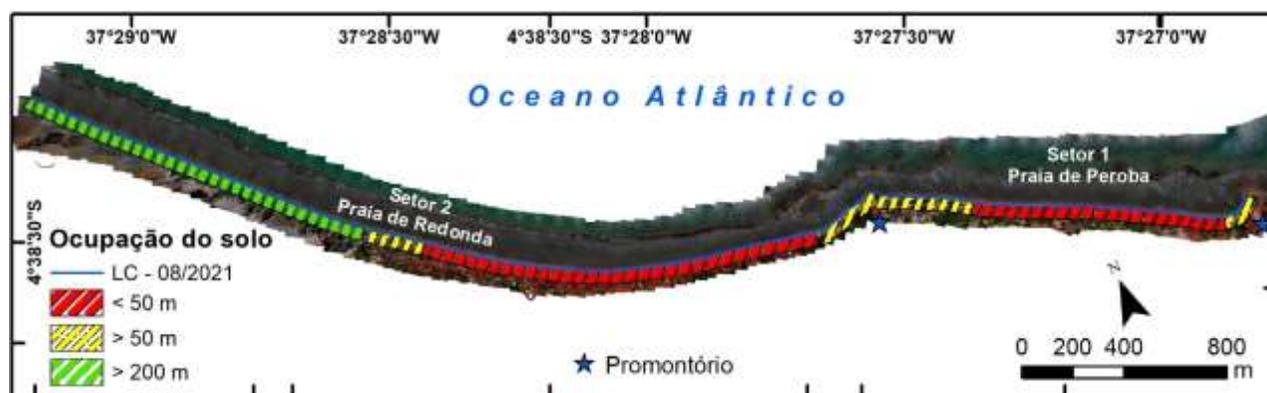


Figura 5 – Uso e ocupação do solo costeiro em função a distância de recuo em relação à linha de costa. Vermelho indica ocupações numa distância inferior a 50 m da linha de costa, amarelo são ocupações numa distância superior a 50 m e o verde significa sem ocupação no raio superior a 200 m (área de conservação).

Fonte: Autor (2023)

A implementação de ações que visam minimizar a vulnerabilidade costeira está conforme ODS 13 (objetivos de desenvolvimento sustentáveis) que diz: “reforçar a resiliência e a capacidade de adaptação a riscos relacionados ao clima e às catástrofes naturais em todos os países; integrar medidas da mudança do clima nas políticas, estratégias e planejamentos nacionais” Organização das Nações Unidas (ONU, 2018). A não tomada de medidas poderá implicar na ocorrência de danos ambientais e socioeconômicos (SANTOS *et al.*, 2015).

4. Considerações finais

A metodologia aplicada neste estudo permitiu a determinação detalhadamente da vulnerabilidade costeira de cerca de 5 km das praias de Peroba e Redonda face às alterações físicas ao longo da linha de costa, onde o valor médio de vulnerabilidade foi classificado como alto (IVC 0,61). As praias anteriormente mencionadas apresentaram três níveis de vulnerabilidade: moderada com 58% (2.940 m), alta com 41% (2.100 m) e muito alta com 1% (30 m).

A praia de Peroba foi classificado com os três níveis de vulnerabilidade, enquanto a praia de Redonda apresentou dois níveis, moderada e alta. Os trechos de maior vulnerabilidade estão associados a praias arenosas e dunas, os de menor vulnerabilidade associados a trechos de falésias ativas, pois o processo erosivo é mais lento quando comparado com faixas de praia arenosas e de dunas.

A vulnerabilidade natural apresentada neste trabalho, pode ser relacionada a variáveis socioeconômicas na perspectiva de uso e ocupação do solo costeiro, considerando que os dados aplicados na análise de vulnerabilidade da linha de costa foram com base em produtos de alta resolução espacial. Com isso, este estudo abre espaço para os gestores poderem obter informações importantes que auxiliem na tomada de decisões inerente à gestão do solo costeiro, podendo reduzir os níveis de vulnerabilidade a riscos de erosão e perda de propriedades nas áreas costeiras.

Com isso, duas estratégias podem ser aplicadas sobretudo no setor 1: (1) Construção de estrutura de contenção a erosão com soluções baseadas na natureza (*nature based solutions*); (2) Realocação de infraestruturas em situação de risco para áreas seguras, para a praia estabelecer um novo estágio de equilíbrio natural. Para qualquer ação que os gestores locais possam tomar para reduzir a vulnerabilidade costeira local associada ao estágio erosivo progressivo, sobretudo no setor 1, é necessário que se faça uma análise profunda entre os custos e benefícios com implantação e manutenção de uma estrutura de proteção costeira, quando comparado com os custos de realocação das pessoas em situação de vulnerabilidade. Em relação ao setor 2, é necessário que se faça uma importante análise detalhada sobre os recursos a serem investidos com a manutenção da estrutura de proteção existente na área.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a *The Academy of Sciences for the Developing World* (TWAS), pela concessão da bolsa de pesquisa sob o processo No 166322/2018-0. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Programa de Pós-Graduação em Geologia

da Universidade Federal do Ceará, ao Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada (LGMA) e Laboratório de Geoprocessamento do Ceará (GEOCE). Agradecemos a Universidade Púnguè – Moçambique (UniPúnguè).

Referências

- AMARO, V.E.; SCUDELARI, A.C.; OLIVEIRA, D.S.; LACERDA, I.L.C. & MATOS, M.F.A. 2021. Análise de Índice de Vulnerabilidade Física com uso de Geotecnologias na Região da Barreira do Inferno. *Revista de Geociências do Nordeste*, Caicó, v.7, n.2, p.179–192. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2021v7n2ID22034>
- APPEANING ADDO, K. 2013. Assessing Coastal Vulnerability Index to Climate Change: the Case of Accra – Ghana. Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England). *Journal of Coastal Research*. Special Issue. No. 65, pp. 1892-1897. <http://dx.doi.org/10.2112/SI65-320.1>
- ARAÚJO, I.R.G.; GOMES, E.R.; GONÇALVES, R.M. & QUEIROZ, H.A.A. 2019. Estimativa do índice de vulnerabilidade à erosão costeira (IVC) para o litoral do Piauí, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. 20(1). 105–118. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v20i1.1260>
- BARROS, E.L. Erosão Costeira no Litoral do Município de Icapuí-CE na Última Década: Causas, Consequências e Perspectivas Futuras. Tese (Doutorado Ciências Marinhas Tropicais) – Programa de Pós-graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Instituto de Ciências do Mar – LABOMAR, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2018. 254p.
- BARROS, E.L.; PINHEIRO, L.S.; MORAIS, J.O. 2020. Análise dos Indicadores do Processo Erosivo no Litoral do Município de Icapuí, Ceará, Nordeste do Brasil. *Rede - Revista Eletrônica do PRODEMA*. Fortaleza. v.14. n.1. 69–86. <https://doi.org/1022411/rede2020.1401.05>
- CHACANZA, M.S.; ALMEIDA, N.M.; FREIRE, G.S.S; SILVA NETO, C.A.; ABREU NETO, J.C. & JALANE, O.I. 2022. Análise da Variação da Linha de Costa no Trecho Entre as Praias de Peroba e Redonda no Município de Icapuí-Ceará, Brasil, a Partir de Imagens de Satélite Aplicando o DSAS. São Paulo. UNESP. *Geociências*. v.41, n.4, p.377–396. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v41i04.16718>
- CHACANZA, M.S.; ALMEIDA, N.M.; FREIRE, G.S.S; SILVA NETO, C.A.; MEDEIROS, M.E.M.; ABREU NETO, J.C. 2023. Morphometric changes between Peroba and Redonda beaches (Ceará, Brazil), with the use of high resolution remotely piloted aircraft images from 2020 to 2021. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. 2023, v.24 n.4; e2331; DOI: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v24i4.2331>
- DEL RÍO, L. and GRACIA, F.J. 2009. Erosion risk assessment of active coastal cliffs in temperate environments. *Geomorphology* 112. 82–95. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.05.009>
- DENNER, K.; PHILLIPS, R.E.; JENKINS, R.E. and THOMAS, T. 2015. A costal vulnerability and environmental risk assessment of Loughor Estuary, South Wales. *Ocean and Coastal Management*. 116. 478–490. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.09.002>
- DRONKERS, J. 2022. Área de recuo. Disponível em: http://www.coastalwiki/Setback_area [acessado em 22.01.2023].
- GAKI-PAPANASTASSIOU, K.; KARYMBALIS, E.; POULOS, S.E.; SENI, A. and ZOUVA, C. 2010. Coastal vulnerability assessment to sea-level rise based on geomorphological and oceanographical parameters: the case of Argolikos Gulf, Peloponnese, Greece. *Hellenic Journal of Geosciences*, vol. 45. 109–121.
- GHOUSSEIN, Y.; MHAWAJ, M.; JAFFAL, A.; FADEL, A.; EL HOURANY, R.; FAOUR, G. 2018. Vulnerability assessment of the South-Lebanese coast: A GIS-based approach. *Ocean and Coastal Management*. 158, 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.03.028>
- HEGDE, A.V. and REJU, V.R. 2007. Development of coastal vulnerability index for Mangalore coast, India. *Journal of Coastal Research*. West Palm Beach. Florida. 23(5), 1106-1111. ISSN 0749-0208.

- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. 2021. Summary for policymakers. In: MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S.L.; PÉAN, C.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS, M.I.; MATTHEWS, J.B.R.; BERGER, S.; HUANG, M.; YELEKÇI, O.; YU, R.; ZHOU, B.; LONNOY, E.; MAYCOCK, T.K.; WATERFIELD, T.; LEITZELL, K. and CAUD, N. (eds). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <http://dx.doi.org/10.1017/9781009157896>. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- KANTAMANENI, K.; PHILLIPS, M.; THOMAS, T. and JENKINS, R. 2018. Assessing coastal vulnerability: Development of a combined physical and economic index. *Ocean and Coastal Management*. 158. 164–175. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.03.039>
- KOMI, A.; PETROPOULOS, A.; EVELPIDOU, N.; POULOS, S. and KAPSIMALIS, V. 2022. Coastal Vulnerability Assessment for Future Sea Level Rise and a Comparative Study of Two Pocket Beaches in Seasonal Scale, Ios Island, Cyclades, Greece. *Journal of Mar. Sci. Eng.* 10: 1673. <https://doi.org/10.3390/jmse10111673>
- KOROGLU, A.; RANASINGHE, R.; JIMÉNEZ, J.A. and DASTGHEIB, A. 2019. Comparison of Coastal Vulnerability Index applications for Barcelona Province. *Ocean and Coastal Management*. 178. 104799. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.05.001>
- KOVALEVA, O.; SERGEEV, A.; RYABCHUK, D. 2022. Coastal vulnerability index as a tool for current state assessment and anthropogenic activity planning for the Eastern Gulf of Finland coastal zone (the Baltic Sea). *Applied Geography* 143. 102710. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102710>
- LACERDA, I.L.C.; AMARO, V.E.; MATOS, M.F.A. and SCUDELARI, A.C. 2022. Physical vulnerability of the coastal zone under wind farms influence of the cities of Pedra Grande and São Miguel do Gostoso/RN, Brazil. *Brazilian Journal of Environmental Sciences*. v.57. n.3. 422–433. ISSN 2176-9478. <https://doi.org/10.5327/Z2176-94781244>
- LINS-DE-BARROS, F.M. 2017. Integrated coastal vulnerability assessment: A methodology for coastal cities management integrating socioeconomic, physical and environmental dimensions – case study of Região dos Lagos, Rio de Janeiro, Brazil. *Ocean and Coastal Management*. 149: 1–11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.09.007>
- LOPES, D.N. Análise da Dinâmica Costeira e Vulnerabilidade do Município de São Gonçalo do Amarante-CE. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. Programa de Pós-graduação em Geologia. Fortaleza. 2021. 81p.
- LOPES, N.D.R.; LI, T.; MATOMELA, N. and SÁ, R.M. 2022. Coastal vulnerability assessment based on multi-hazards and bio-geophysical parameters. case study – northwestern coastline of Guinea-Bissau. *Natural Hazards*. 114: 989–1013. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05420-w>
- MANNO, G.; AZZARA, G.; LO RE, C.; MARTINELLO, C.; BASILE, M.; ROTIGLIANO, E.; CIRAOLO, G. 2023. Na Approach for the Validation of a Coastal Erosion Vulnerability Index: An Application in Sicily. *J. Mar. Sci. Eng.* 11, 23. <https://doi.org/10.3390/jmse11010023>
- MEIRELES, A.J.A.; SANTOS, A.M.F. 2012. Atlas de Icapuí - CE. Projeto de Olho na Água. *Editora Fundação Brasil Cidadão*. 1a Edição. Fortaleza. 156p.
- MEIRELES, A.J.A.; SOUSA, W.F.; SILVA, A.L.B; LIMA, A.P.S.; SILVA, J.A. 2020. Geomorfologia e os Serviços Ecológicos como Fundamentos para a Gestão Integrada da Planície Costeira de Icapuí, Ceará, Nordeste do Brasil. *Revista de Geomorfologia*. 1(1). 210–231. <https://doi.org/10.48025.ISSN2675-6900.v1n1.p210-231.2020>
- MMA – Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC II). Brasília-DF. (s.d.). Disponível em: https://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_sigercom/arquivos/pngc2_78.pdf. [acessado em 12/09/2019].

-
- MUEHE, D. 2011. Erosão Costeira - Tendência ou Eventos Extremos? O Litoral entre Rio de Janeiro e Cabo Frio, Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada - Journal of Integrated Coastal Zone Management*. v.11. n.3. 315-325. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos Lisboa, Portugal.
- MUEHE, D.; FERNANDEZ, G.B.; BULHOES, E.M.R.; AZEVEDO, I.F. 2011. Avaliação da vulnerabilidade física da orla costeira em nível local, tomando como exemplo o arco praial entre Rio das Ostras e o Cabo Búzios/RJ. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. 12(2). 45–58. <https://doi.org/10.20502/rbg.v12i2.234>
- MUTMAINAH, H. 2022. Coastal Vulnerability at West Pasaman Regency. IOP Conf. Series: *Earth and Environmental Science*. 1105: 012021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1/012021>
- NEVES, M.M.; BELTRÃO, J.A. & NEVES, S.M. 2010. Análise da dinâmica costeira em praias do Município de Cabedelo-PB. *Anais XVI Encontro Nacional dos Geógrafos – Crise, práxis e autonomia: espaços de resistência e de esperanças. Espaço de Diálogo e Práticas*. Porto Alegre-RS. ISBN 978-85-99907-02-3.
- ONU – Organização das Nações Unidas. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. 2018. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. [acessado em 23.01.2023].
- PANTUSA, D.; D’ALSSANDRO, F.; RIEFOLO, L.; PRINCIPATO, F. and TOMASICCHIO, G.R. 2018. Application of a Coastal Vulnerability Index. A Case Study along the Apulian Coastline, Italy. *Water*. 10, 1218. <https://doi.org/10.3390/w10091218>
- PINHEIRO, L.d.S.; MORAIS, J.O. de; MAIA, L.P. The Beaches of Ceará. In: SHORT, A.D.; KLEIN, A.H. da F. (Ed.). *Brazilian Beach Systems. Coastal Research Library*. p. 175-199. 2016. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-30394-9_7
- QUEIROZ, H.A.A.; GONÇALVES, R.M.; MISHRA, M. 2022. Characterizing global satellite-based indicators for coastal vulnerability to erosion management as exemplified by a regional level analysis from Northeast Brazil. *Science of the Total Environment* 817. 152849. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152849>
- SANTOS, M.S.T.; AMARO, V.E.; FERREIRA, A.T.S.; BARBOZA, A.A.; FIGUEIREDO, M.C. & ARAÚJO, A.G. 2015. Metodologia para mapeamento de vulnerabilidade costeira à Elevação do Nível Médio do Mar (NMM) em Escala Local. *Bol. Ciênc. Geod.*. 21:4. 691–705. <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702015000400040>
- SILVA, R.R. Evolução e Vulnerabilidade das Falésias na Costa Leste do Ceará-Nordeste do Brasil. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. Programa de Pós-graduação em Ciências Marinhas e Tropicais. Fortaleza. 2021. 160p.
- THIELER, E.R. and HAMMAR-KLOSE, E.S. 2000. National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: Preliminary Results for the U.S. Pacific Coast. U.S. *Geological Survey*. Woods Hole, Massachusetts.