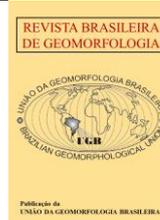




<https://rbgeomorfologia.org.br/>
ISSN 2236-5664



Artigo de Pesquisa

Geoindicadores de vulnerabilidade à erosão e risco costeiro em praias estuarinas da costa amazônica

Geoindicators of vulnerability to erosion and coastal risk in estuarine beaches on the Amazon coast

Gabriela de Oliveira Novaes ¹, Fabrício Costa Lobo ² e Leilanne Almeida Ranieri ³

¹ Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, Brasil. gabrielaonovaes@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1647-8991>

² Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, Brasil. fabric.c.lobo@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4898-9035>

³ Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, Brasil. laranieri@ufpa.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9870-4879>

Recebido: 12/08/2023; Aceito: 26/04/2024; Publicado: 14/05/2024

Resumo: A erosão costeira é um processo natural que origina alterações morfológicas e sedimentares em praias decorrentes da ação de forçantes físicas (ondas, marés, ventos, correntes) e a elevação do nível do mar. Este processo está se agravando em alguns locais da costa amazônica, como na ilha fluviomarina de Mosqueiro. Este artigo analisa a vulnerabilidade costeira à erosão e o grau de risco de 16 praias estuarinas desta ilha da costa amazônica. Um índice de vulnerabilidade costeira foi elaborado combinando variáveis semiquantitativas como: coleta de dados topográficos e sedimentos. O grau de risco identificado a partir da análise da variação da linha de costa (2006-2020) por sensoriamento remoto e aplicação de checklist de indicadores ambientais de erosão praial. Os resultados demonstraram que 50% das praias possuem alto índice de vulnerabilidade à erosão (IVC: 5,0-7,4) e alto risco costeiro. A presença de falésias ativas, muro de contenção e elevada ocupação humana litorânea (> 70% na maioria das praias) favoreceram estes resultados, com os processos erosivos influenciados pela ação antrópica. O método aplicado é largamente utilizado em praias oceânicas e se apresentou adequado para praias estuarinas, podendo ser útil para uma análise regional, contribuindo para a gestão costeira de praias.

Palavras-chave: Erosão; Geoindicadores; Ocupação Antrópica; Praias Amazônicas; Zona Costeira

Abstract: Coastal erosion is a natural process that causes morphological and sedimentary changes on beaches resulting from the action of physical forces (waves, tides, winds, currents) and rising sea levels. This process is getting worse in some places on the Amazon coast, such as the fluviomarine Mosqueiro island. This article analyzes the erosion vulnerability and the degree of risk of 16 estuarine beaches on this island on the Amazon coast. A coastal vulnerability index was created based on semi-quantitative combinations such as: collection of topographic and sediment data. The degree of risk identified from the analysis of shoreline change (2006-2020) by remote sensing and application of a checklist of environmental indicators of beach erosion. The results revealed that 50% of beaches have a high rate of vulnerability to erosion (CVI: 5.0-7.4) and high coastal risk. The presence of active cliffs, retaining walls and elevated coastal human occupation (> 70% on most beaches) favored these results, with erosion processes influenced by human action. The applied method is widely used on oceanic beaches and is presented appropriately for estuarine beaches, and may be useful for regional analysis, contributing to coastal beach management.

Keywords: Erosion; Geoindicators; Anthropic Occupation; Amazonian Beaches; Coastal Zone.

1. Introdução

A zona costeira consiste numa zona de transição entre o continente e oceano, onde ocorrem mudanças de curto, médio e longo períodos, as quais envolvem a descarga de sedimentos de estuários, posição da linha de costa, correntes litorâneas, ondas e correntes das marés, e resultam em paisagens com alta complexidade dinâmica (MARTINS; BARBOZA, 2006; BRAND et al., 2020). Dentre os subambientes que compõem a zona costeira, a praia é um dos mais importantes, pois é amplamente utilizada por populações humanas (SCHLACHER et al., 2007), principalmente devido ao turismo associado às diversas atividades recreativas. O seu uso se divide entre o lazer (práticas esportivas, banho), as atividades comerciais/industriais, as atividades tradicionais/extratvistas, ou mesmo culturais e, habitacionais nas suas adjacências.

Desta forma, existe uma combinação de variáveis socioeconômicas (subsistência, infraestrutura, segurança), geoambientais (morfologia e sedimentação praias), físicas (forçantes meteo-oceanográficas) e biológicas (diversidade de seres vivos) interagindo em praias antropizadas. Nestas praias, o aumento do uso para fins de turismo e os processos de ocupação da zona costeira, impulsionados por múltiplos fatores de desenvolvimento, ocasiona diversos impactos negativos de ordem ambiental, econômica, social e cultural para a própria comunidade costeira (BUTLER, 1980).

Dentre os impactos negativos que ocorrem nas praias, a erosão é um dos processos mais atuantes nelas, principalmente com a elevação do nível do mar, quando as praias tendem a migrar em direção ao continente e a ação abrasiva das ondas desgasta as falésias e desenvolve escarpas arenosas de bermas. Portanto, a erosão é um processo natural, embora muitas vezes tenha causas antrópicas, que origina alterações morfológicas e sedimentares no ambiente decorrentes das interações com os agentes físicos (ondas, marés, ventos, correntes), as variações do nível do mar, além dos processos antrópicos (NICLODI, 2008; PRASETYA, 2007). Bird (2008) destaca a intensificação da erosão costeira pelo denso povoamento humano, que por fim impacta no próprio desenvolvimento social, urbano e na economia local (LINS-DE-BARROS, 2005; MARTINS; BARBOZA, 2006; NICHOLLS; CAZENAVE, 2010; MENEZES et al., 2018). Cerca de 24% das praias arenosas do mundo estão sob processo de erosão a taxas superiores a 0,5 m/ano (LUIJENDIJK et al., 2018). No Brasil, as regiões Norte e parte do Nordeste apresentam de 60 a 65% da linha de costa sob processo erosivo (MUEHE, 2018).

Segundo Cutter (2011), em costas erosivas de países subdesenvolvidos e emergente existe um agravante adicional: uma parcela considerável de populações que ocupam estas costas apresenta vulnerabilidade socioeconômica. Os residentes destas áreas ficam muitas vezes em condições de desamparo financeiro que os deixam suscetíveis aos eventos naturais. Por isso, é importante monitorar os indícios da erosão e os riscos agregados a ela. Uma das formas de monitoramento é a análise de um conjunto de geoindicadores que possuem índices quantificáveis e qualificáveis para a avaliação da vulnerabilidade costeira.

A vulnerabilidade costeira é compreendida como o estado ao qual determinados setores da costa são identificados como afetados ou não ao processo de erosão, diante da ação de agentes de natureza física, responsáveis pela dinâmica local, tais como as ondas, as marés e a elevação do nível do mar (GORNITZ, 1991). Esta vulnerabilidade tem sido intensificada por fatores antropogênicos (políticos, econômicos e sociais), assim como pelo fator natural de aumento do nível do mar, porém recebe menos atenção quando comparado a este último fator (climático/oceanográfico), e por ser um processo comum e contemporâneo, deveria ser mais investigado (NICHOLLS; CAZENAVE, 2010).

Visando entender os níveis no qual determinada costa está sujeita à erosão, tem sido empregado Índices de Vulnerabilidade Costeira (IVC) em vários litorais do mundo, como os aplicados na costa canadense (SHAW et al., 1998), norte-americana (THIELER; HAMMAR-KLOSE, 1999), na costa da Irlanda do Norte (MCLAUGHLIN et al., 2002), de Puducherry, Índia (MURALI et al., 2013), costa do Piauí (ARAÚJO et al., 2019) e do Pará, Brasil (BRAGA et al., 2019).

Na Amazônia, alguns ambientes costeiros estão sendo afetados com a erosão, seja de origem apenas natural ou intensificada pelo homem (ANTHONY; GRATIOT, 2012; EL-ROBRINI et al., 2018; BRAGA et al., 2019; FRANÇA et al., 2020; SANTOS; SILVA; ANDRADE, 2020; NITTROUER et al., 2021; LIMA et al., 2022; NEGRÃO; SOUSA; RANIERI, 2022; SOUSA; RANIERI, 2023), mesmo sendo uma região que recebe elevado aporte sedimentar de vários estuários que desaguam no Oceano Atlântico, como o estuário do rio Amazonas. Dentre os ambientes costeiros amazônicos afetados atualmente pela erosão, cita-se as praias da ilha de Mosqueiro, localizada no Setor Continental Estuarino da costa do Estado do Pará. Nas margens desta ilha existem praias estuarinas banhadas pelo rio Pará, situadas nas adjacências de falésias ativas, cujo efeito de processos erosivos naturais têm se intensificado

nas últimas décadas, combinado ao processo de urbanização (VIANA, 2017) e chuvas regulares (EL-ROBRINI et al., 2018).

No ano de 2017 foram implantadas na ilha obras de proteção costeira, com a construção de muros de contenção de concreto em 10 praias, visando impedir o problema da erosão. Contudo, questiona-se a persistência do processo erosivo na área, com o propósito de avaliar a situação atual nas praias da ilha através da adaptação de um índice de vulnerabilidade à erosão para áreas estuarinas. Partiu-se da hipótese de que todas as praias da ilha de Mosqueiro, especialmente as que possuem falésias, apresentavam vulnerabilidade à erosão costeira moderada a alta. Assim, o objetivo deste estudo foi de analisar os processos erosivos nestas praias estuarinas amazônicas, através do uso de Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC). Este índice pode ser útil para avaliações futuras da erosão em outras praias estuarinas da região, bem como a nível nacional e mundial em zonas costeiras com geomorfologia semelhante.

2. Área de Estudo

A ilha de Mosqueiro está localizada no estado do Pará, região norte do Brasil, inserida no bioma amazônico (Figura 1). Está situada na costa estuarina oriental do Rio Pará, limitada ao Norte pela Baía do Sol e ao Sul pela Baía de Santo Antônio. A ilha fica a uma distância de 80 km da capital do estado, Belém, sendo a maior ilha deste município (IBGE, 2020). Seu território possui uma área de 212 km², tendo como principal atrativo suas praias que recebem influência das águas do Oceano Atlântico, mesmo situada a 90 km da foz do rio Pará. Sua população aproximada é de 30 mil habitantes (IBGE, 2020).

As 16 praias analisadas neste estudo estão situadas em três setores da ilha de Mosqueiro (Figura 2): a) Setor Norte (com urbanização em expansão) – praias da Baía do Sol, Bacuri, Paraíso, Caruara, Marahu; b) Setor Noroeste – praias de Carananduba, São Francisco, Murubira, Ariramba, Porto Arthur, Chapéu Virado, Farol; c) Setor Oeste – praias da Prainha, Grande, Bispo e Areião. Ambos os setores com urbanização consolidada.

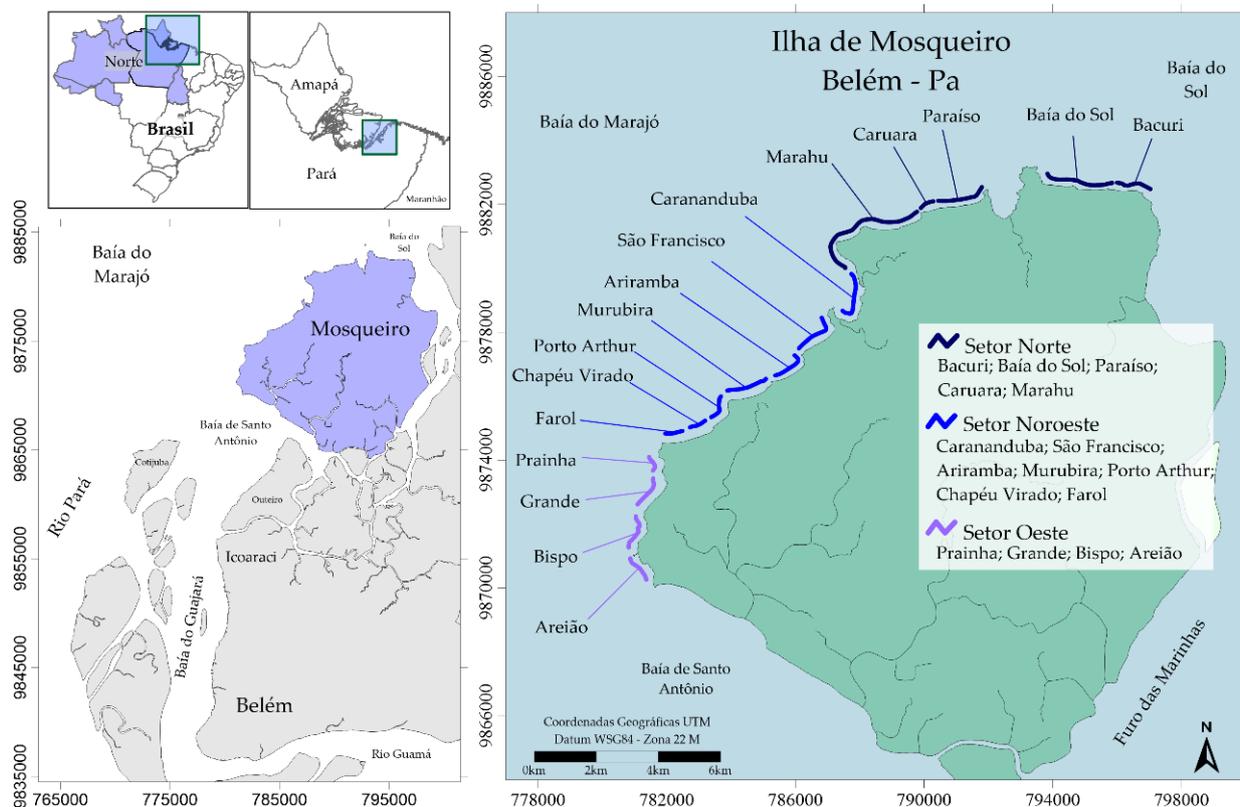


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo (ilha de Mosqueiro), com destaque para as praias onde foram realizadas a pesquisa.



Figura 2. Praias do setor norte, noroeste e oeste da ilha de Mosqueiro/PA.

O clima da região é tropical úmido ou superúmido – Af (KÖPPEN, 1918). Apresenta elevada precipitação pluviométrica, com média anual entre 2.400 e 3.330 mm, em que os meses de dezembro a maio compreende a estação chuvosa e, de junho a novembro, a estação menos chuvosa. A temperatura média anual é de 26 °C, e a umidade relativa do ar é acima de 80% (MORAES et al., 2005). Os ventos alísios de nordeste (ENE) atuam na formação das ondas na costa amazônica, inclusive com importante atuação no desenvolvimento de ondas local em algumas praias estuarinas da ilha de Mosqueiro, especialmente as situadas ao norte da ilha.

Ocorrem mesomares semidiurna, com variação média de 3,5 m na sizígia e 1,4 m na quadratura. As ondas que se desenvolvem próximas à ilha são o agente modificador secundário da costa, processo físico de menor intensidade que as marés. Elas possuem baixa energia, com altura média de 0,35-0,6 m, embora durante as premares possam alcançar aproximadamente 1m de altura em algumas praias (EL-ROBRINI et al., 2018). No entorno da ilha estão presentes pontais rochosos e enseadas, sendo que em algumas destas ocorrem falésias, que estão susceptíveis a intensa ação erosiva. Em regiões internas mais protegidas podem ser encontrados mangues e planícies de inundação (EL-ROBRINI et al., 2018).

3. Material e Métodos

Os procedimentos metodológicos desse estudo incluem (Figura 3): a) atividades de campo: coleta de dados topográficos, largura praial, altura de falésias e amostragens de sedimentos superficiais na zona de intermaré; b) avaliação de indicadores ambientais de erosão costeira, tanto nas praias, como por meio de imagens de satélite; c) tratamento de dados coletados em campo e por meio de geoprocessamento; d) aplicação do IVC para avaliar a erosão nas praias e; e) identificação de grau de risco nestas praias, frente aos dados de vulnerabilidade à erosão e ocupação humana.

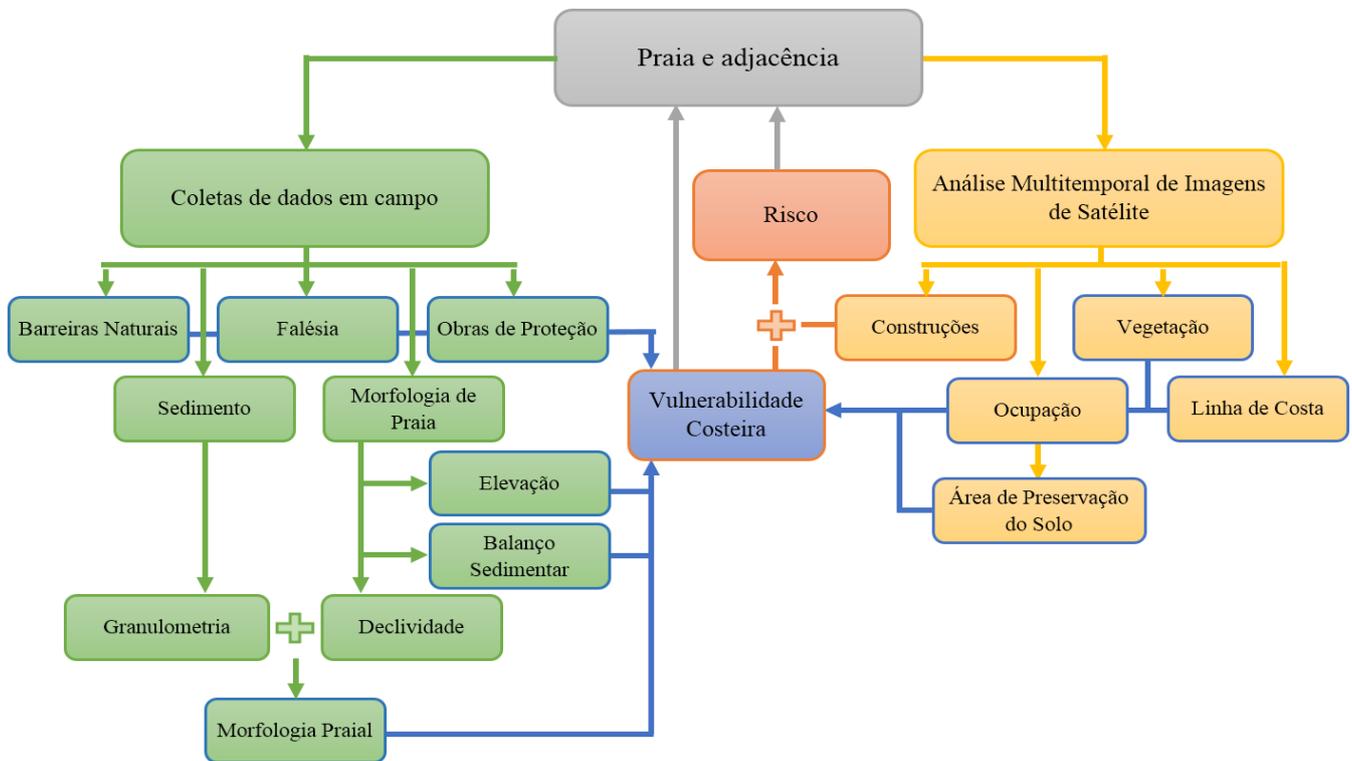


Figura 3. Fluxograma da metodologia aplicada.

A aquisição de dados em campo foi realizada no mês de maio de 2021 (estação mais chuvosa) e, em outubro de 2021 (estação menos chuvosa). Todos os pontos de coleta foram georreferenciados com auxílio de GPS (Global Positioning System) portátil, cujo erro de posicionamento pode ser de 10 a 15 metros.

Neste artigo foi utilizado a metodologia adaptada de Sousa, Siegle e Tessler (2013) para verificar o IVC através da avaliação de geoindicadores ambientais (medidas de magnitude ou frequência de processos geológicos e fenômenos que ocorrem na superfície da terra e sujeitos a mudanças). Foram subdivididos dois conjuntos de variáveis com 5 indicadores naturais e antrópicos cada. Para o ambiente costeiro, as variáveis são: declividade e granulometria da praia, balanço sedimentar, variação da linha costeira, características de falésias e presença de barreiras naturais. Para o ambiente continental, as variáveis são: elevação do terreno, vegetação, estruturas de engenharia costeira, percentagem de ocupação e áreas de preservação do solo). Os indicadores são classificados em baixa, moderada e alta vulnerabilidade à erosão, descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Indicadores de vulnerabilidade costeira aplicados nas praias da ilha de Mosqueiro.

Ambiente	Indicadores	Baixa	Moderada	Alta
Costeiro	Declividade e granulometria da praia (I)	Presença de areia muito fina a média, praia com baixa declividade ($D \leq 2^\circ$)	Presença de areia média, praia com declividade moderada ($2^\circ < D \leq 4^\circ$)	Presença de sedimentos mais grosseiros (areia média a muito grossa), praia com alta declividade ($D > 4^\circ$)
	Balanço sedimentar praial - sazonal (II)	Positivo ($>10 \text{ m}^3.\text{m}^{-1}$)	Aproximadamente estável (até $10 \text{ m}^3.\text{m}^{-1}$)	Negativo ($> -10 \text{ m}^3.\text{m}^{-1}$)
	Varição da linha de costa (III)	Avanço ($> 1 \text{ km}^2$)	Estável (até +/- 1 km^2)	Recuo ($<1 \text{ km}^2$)
	Falésias ¹ (IV)	Presença de falésias inativas, mais de 50% da faixa de pós-praia	Presença de falésias ativas, mais de 50% da faixa de pós-praia	Presença de falésias ativas, menos de 50% ou ausentes no pós-praia
	Barreiras naturais (V)	Presença de barreiras naturais (promontórios, afloramentos rochosos, barra arenosa)	Presença de bancos de areia offshore	Sem obstáculos naturais
Continental	Elevação do terreno (VI)	$>6 \text{ m}$	$4-6 \text{ m}$	$<4 \text{ m}$
	Vegetação (VII)	Densa e sem evidências erosivas (mais de 50% do pós-praia ou setor)	Bem estabelecida com grama/gramínea e arbustos (mais de 50% do pós-praia ou setor)	Pouca ou nenhuma vegetação (menos de 50% do pós-praia ou setor)
	Estruturas de engenharia costeira (VIII)	Ausência de estruturas costeiras	Estruturas pequenas ou poucas significativas (menos de 50% do perfil longitudinal da praia ou setor)	Presença de espigão na praia/setor ou presença de paredões, quebra-mares, molhes, muros de contenção, calçadões, etc. (mais de 50% do perfil longitudinal da praia ou setor)
	Porcentagem de ocupação consolidada (IX)	$<30\%$	Entre 30 e 70%	$>70\%$
	Áreas preservadas (X)	$>70\%$ (pouca ou nenhuma ocupação no solo)	70 a 30% (densidade moderada de áreas preservadas)	$<30\%$ (densidade baixa de preservação / assentamento urbano)

¹Litotipos da Formação Barreiras e Pós-Barreiras na Ilha de Mosqueiro/PA.

3.1. Descrição dos Indicadores de Vulnerabilidade Costeira

- Indicadores I e II

Foram utilizados parâmetros morfométricos na análise de cada praia (altura e largura do perfil praial) para se obter o grau de declividade (indicador I). Para tais resultados, utilizou-se o equipamento Estação Total, onde foi verificada a cota topográfica da linha de costa (falésia, vegetação, calçadão), e da linha de preamar e baixa-mar de sizígia (alcance máximo e mínimo do nível d'água, respectivamente), sendo assim, obteve-se a diferença entre as

duas medidas (altura do perfil praial em metros), adotando-se como cota 0 de referência o nível de maré baixa de sizígia. Já a largura da praia foi obtida através da verificação do deslocamento (m) nestes dois pontos medidos.

O parâmetro de declividade praial (β) foi calculado a partir da tangente de β pela seguinte Eq. (1) de Short e Hesp (1982), também utilizada por Ranieri e El-Robrini (2016):

$$Tg\beta = \text{CatetoOposto}/\text{CatetoAdjacente} \quad (1)$$

Onde:

Cateto Oposto equivale a altura do perfil praial;

Cateto Adjacente equivale a largura do perfil praial.

Sedimentos superficiais de praia (5 cm) foram coletadas simultaneamente à realização das medições topográficas na zona de intermaré média e acondicionadas em sacos plásticos. Em laboratório as amostras sedimentares passaram por peneiramento a seco para obtenção do tamanho dos grãos (indicador I), conforme classificação de Wentworth (1922).

O balanço sedimentar (indicador II) nas praias foi obtido através do software Surfer 10 comparando-se o volume de sedimentos ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$) de cada perfil praial realizado na estação chuvosa e menos chuvosa. O perfil praial visou apenas a obtenção do desnível entre a linha de preamar e baixa-mar durante as medições topográficas, e a área resultante (altura x largura de praia) que foi calculada para obtenção da taxa de volume sedimentar. Considerou-se que valores acima de $10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ indicam balanço sedimentar positivo e, abaixo de $-10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ indicam balanço negativo. Entre $+10$ e $-10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$, aproximadamente estável, considerando os dados da estação chuvosa a menos chuvosa. Estes intervalos foram utilizados considerando dados médios de pesquisas anteriores realizadas em praias estuarinas da costa Norte do Brasil (EL-ROBRINI et al., 2018; RAMOS; RANIERI, 2021).

- Indicador III

Para a análise da variação da linha de costa, aplicou-se o método de polígono de mudança (SMITH; CROMLEY, 2012), considerando o valor de 1 km^2 como uma variação razoável de estabilidade costeira, visto que a ilha de Mosqueiro é limitada por muitas falésias, calçadões e muros de contenção de erosão, que resulta numa maior resistência ao avanço ou recuo da linha de costa.

Inicialmente foram obtidas imagens de satélite previamente ortoretificadas, gratuitamente disponíveis no site do United States Geological Survey (USGS) <https://earthexplorer.usgs.gov/>, do Landsat 4-5/TM para o ano de 2006 e Landsat 8/OLI para os anos de 2013 e 2020 (Tabela 2). As imagens foram selecionadas seguindo critérios de baixa cobertura de nuvens e estado de maré baixa, para melhor representatividade da linha de costa.

Tabela 2. Informações das imagens de satélite utilizadas na análise da linha de costa das praias da ilha de Mosqueiro.

Data e hora de Aquisição	Satélite	Sensor	Resolução Espacial	Banda (RGB)
09/08/2006 13:16	Landsat 5	Landsat Thematic Mapper (TM) OLI/OLI-2	30	7, 5 e 3
27/07/2013 13:24	Landsat 8	Multispectral bands OLI/OLI-2 panchromatic band OLI/OLI-2	30 15	4,3 e 2
14/07/2020 13:20	Landsat 8	Multispectral bands OLI/OLI-2 panchromatic band	30 15	4,3 e 2

O processamento digital das imagens foi realizado no software ArcGIS 10.5, todas as imagens foram reprojatadas para o sistema Universal Transverse Mercator (UTM), Zona 22S, Datum WGS-1984 e registradas. A composição das bandas espectrais para Landsat 5 foi 7R5G3B e Landsat 8 4R3G2B. Para cada ano foi desenhada uma forma (polígono) seguindo a linha de costa obtida a partir da: a) linha limite da vegetação em praias e trechos de praia sem falésias e estruturas rígidas artificiais, b) orlas/calçadões em praias ou trechos de praia mais

urbanizados e, c) borda superior das falésias em praias ou trechos dela onde essa feição geomorfológica ocorre. Com conseguinte combinação das áreas dos anos 2006/2013, 2006/2020 e 2013/2020, destacou-se as partes não compartilhadas entre os pares de polígonos para definir se houve avanço ou recuo da linha de costa, e calculado geometricamente essas áreas em m². Tendo em vista o erro obtido durante o processo de georreferenciamento, foi obtido a margem de erro geométrico individual para cada imagem e de erro geométrico cumulativo por período analisado, conforme a Tabela 3.

Tabela 3. Margem de erro geométrico individual e cumulativo das imagens processadas.

Ano da Imagem	Erro Geométrico Individual			Erro Geométrico Cumulativo			
	Resolução(m)	RMSE* (pixel)	Erro (km ²)	Erro Linear (m)	Períodos Analisados	Erro (km ²)	Erro Linear (m)
2006	30	0,16	0,02	4,93	2006-2013	0,08	12,28
2013	15	0,48	0,05	7,33	2006-2020	0,08	12,20
2020	15	0,48	0,05	7,26	2013-2020	0,11	14,60

- Indicadores IV, V, VI, VII e VIII

Para obter a área total de falésias (indicador IV), vegetação (indicador VII) e estruturas de engenharia costeiras (indicador VIII) em cada praia, foi utilizado o software ArcGIS 10.5 para análise de até 200 m em direção ao continente (indicador VII) a partir da linha de costa. A interpretação visual das feições nas imagens de satélite foi por meio da composição de bandas espectrais que mais favoreceram sua identificação, bem como pela validação observacional dessas informações nos trabalhos de campo, georreferenciando linearmente o início e o fim das áreas em investigação através de GPS portátil. As áreas delimitadas nas imagens de satélite foram calculadas utilizando a Eq. (2) sugerida por Sousa, Siegle e Tessler (2013):

$$A = (E \times 100)/P \quad (2)$$

Onde:

A é o total da área que a estrutura, vegetação ou falésia ocupa em relação a praia (%);

E é a área linear da estrutura encontrada sobre a praia (m);

P é a área total linear da praia (m).

O indicador VI (elevação do terreno) foi obtido pela altura da linha de costa em relação à linha de maré baixa-mar de sizígia nas praias, cujo resultado foi extraído da mesma metodologia aplicada para obtenção da declividade praial. O indicador V (barreiras naturais) é qualitativo, portanto, indicando apenas presença ou ausência de feições sedimentares nas praias (afloramentos rochosos e bancos arenosos).

- Indicadores IX e X

Um dos indicadores para o obter o IVC é a percentagem de ocupação consolidada (indicador IX da tabela 1), obtida por meio de análise e processamento das imagens de satélite anteriormente citadas, comparadas com imagens de alta resolução do Google Earth, apenas para confirmação da presença de edificações e habitações. Por esta comparação foi possível averiguar áreas com presença da ocupação humana, e diferenciá-las de áreas preservadas (indicador X), de modo a limitar o espaço de interesse para o cálculo. A delimitação empregada se estende a partir da linha de costa até 200 m em direção ao continente, limite sugerido como orla preservada, por legislação nacional vigente, decreto nº 5.300/2004 (MMA, 2006). Tal limite tem sido considerado uma distância segura para a ocupação humana em relação à linha de costa.

Com o uso do software ArcGIS 10.5 foram criados shapefiles de subáreas analisadas por meio de polígonos, considerando uma área total (AT) em m², que se estendeu da linha de costa (LC), linha limite da vegetação, em direção ao continente (até 200 m). As subáreas analisadas incluem: edificações (prédios, hotéis, casas, comércios), ruas, estradas e outras construções humanas que venham a ocorrer na área total mapeada.

Para obter a percentagem de ocupação, primeiramente é necessário realizar o cálculo da área ocupada conforme mostra a Eq. (3), adquirida pela soma de todas as variáveis urbanas (subáreas analisadas), conforme Sousa, Siegle e Tessler (2013):

$$A_o = A_b + A_r \dots + A_n \quad (3)$$

Onde:

A_o é a área de ocupada (em m^2);

A_b é a subárea de edificações;

A_r é a subárea das estradas;

A_n é a n-ésima variável que pode ser adicionada.

Após adquirir o total de área ocupada (A_o), o resultado obtido integra a equação da percentagem de ocupação em que (AT) equivale a área total do espaço delimitado para adquirir as áreas das variáveis urbanas, permitindo assim estimar a percentagem de ocupação (P_o) sobre uma área que poderia estar preservada conforme a Eq. (4) (Sousa; Siegle; Tessler, 2013):

$$P_o = (A_o \times 100) / AT \quad (4)$$

Onde:

P_o é a percentagem de ocupação (%);

AT é a área total (m^2);

A_o é a área de ocupação (m^2).

Após o cálculo da equação 4, os resultados inferiores a 30% indicam baixa ocupação humana; entre 30% e 70% é moderada; e acima de 70% indica alta percentagem de ocupação. De modo que, por meio da relação inversa é obtido o nível de preservação do solo (indicador X) como: alto (> 70%), moderado (entre 70% e 30%) e baixo (< 30%) (Tabela 1).

3.2. Índice de Vulnerabilidade Costeira

Para classificar as praias quanto a vulnerabilidade à erosão costeira, a partir dos indicadores apresentados na Tabela 1, atribuiu-se pesos de modo crescente para cada indicador na seguinte forma: 0 para baixa, 5 para moderada e 10 para alta vulnerabilidade em cada indicador individualmente. Estes dados são calculados de acordo com a Eq. (5) (SOUSA; SIEGLE; TESSLER, 2013):

$$l = (1/nv) \cdot \sum (1)/(ni) v \cdot \sum xii \quad (5)$$

Onde:

l é a média aritmética para os dois conjuntos de indicadores (costeiro e continental);

nv é o número de ambientes (no caso, costeiro e continental);

ni é o número de indicadores de um ambiente;

xi é a soma dos indicadores.

A partir do cálculo do índice de vulnerabilidade costeira é obtido o resultado da classificação das praias (Tabela 4).

Tabela 4. Classificação do índice de vulnerabilidade costeira em: alta, moderada e baixa com seus respectivos valores. Adaptado de Sousa, Siegle e Tessler (2013).

Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC)	
Muito Alta	7,5-10
Alta	5-7,49
Moderada	2,5-4,9
Baixa	0-2,49

3.3. Grau de risco costeiro

Na análise do grau de risco, deve-se considerar a maior ou menor exposição das construções costeiras ou da população a eventos que podem causar danos (DAL CIN; SIMEONI, 1994; DOLAN; WALKER, 2004).

Desta forma, para essa classificação foi considerada a vulnerabilidade local (índice de vulnerabilidade costeira) relacionada à posição das construções (residências, comércios, restaurantes bares, prédios), tendo como base sua proximidade com a linha de costa, visto que, quanto mais próximo a ocupação humana estiver de áreas com alta vulnerabilidade costeira, maior será o risco previsto (LINS-DE-BARROS, 2005).

Os dados foram obtidos por meio da observação em campo e análise das imagens de satélite recentes disponíveis, utilizando a ferramenta “régua” presente no software ArcMap 10.5 onde foi possível medir a distância das construções em relação à linha de costa, definindo-se três posições: mais distante, próximo e muito próximo (Tabela 5). A referência inicial de 50 m tem como base o Projeto Orla, decreto nº 5.300/2004 (MMA, 2006), para classe de orlas urbanizadas, visto que na ilha de Mosqueiro ocorre desde orla natural a orla com urbanização consolidada.

Tabela 5. Classificação do posicionamento das construções em relação a linha de costa.

Posicionamento das construções – Classificação	
Distante	Construções distantes, mais de 100 metros da linha de costa
Próximo	Construções próximas, de 50 a 100 metros da linha de costa
Muito Próximo	Construções próximas, em menos 50 metros da linha de costa

Por fim, para obter o grau de risco costeiro, foram feitas as seguintes relações, onde o risco é: a) alto – se houver vulnerabilidade alta à erosão e construções muito próximas ou próximas da linha de costa; b) moderado – se houver vulnerabilidade moderada à erosão e construções muito próximas ou próximas da linha de costa; c) iminente – se houver vulnerabilidade baixa à erosão e construções próximas da linha de costa; e d) sem risco iminente – se houver baixa vulnerabilidade à erosão e construções distante da linha de costa ou sem ocupação (Tabela 6).

Tabela 6. Grau de risco nas praias e variáveis associadas.

Grau de risco		
Classe de risco	Vulnerabilidade	Posição das Construções ¹
Alto	alta	muito próxima ou próxima
Moderado	moderada	muito próxima ou próxima
Iminente	baixa	próxima
sem risco iminente	baixa	distante ou sem ocupação

¹Em relação à proximidade com a linha de costa.

4. Resultados

4.1. Declividade, granulometria e balanço sedimentar praial (Indicadores I e II)

Em relação à morfologia (indicador I), a maioria das praias analisadas apresentou moderada declividade (>2°) e granulometria de areia média (1 a 2 φ). Diferindo-se apenas Ariramba e Areião (porção sul), com areia fina (2 a 3 φ) e baixa declividade (<2°) (Tabela 7).

Quanto ao balanço sedimentar (indicador II), as praias na Baía do Sol (porção leste), Paraíso (porção centro), São Francisco (porção sudoeste), Ariramba (porção sudoeste), Murubira, Grande, Bispo (porção centro) e Areião (porção norte), atingiram perfil aproximadamente estável (poucas variações, balanço sedimentar mais equilibrado). As demais apresentaram balanço sedimentar negativo da estação chuvosa (inverno amazônico) a menos chuvosa (verão amazônico) (Tabela 7).

4.2. Variação da linha de costa (Indicador III)

Após o processamento das imagens de satélite se verificou a variação na posição da linha de costa para os respectivos anos: 2006, 2013 e 2020 (Tabela 8). Entre os anos de 2006 e 2013, a maioria das praias apresentaram avanço da linha de costa, exceto: Caruara, Farol, Marahu, Murubira e Porto Artur. Já entre 2013 e 2020, a maioria das praias tiveram recuo costeiro. Contudo, considerando a escala de tempo total analisada (2006-2020) (Figura 4), houve predomínio de avanço da linha de costa em direção à baía. Destaca-se a praia do Areião, com maior acreção sedimentar e contínuo ganho de área, totalizando 29,32 km². O avanço da linha de costa em direção à baía pode ter relação com a implantação de estruturas artificiais de proteção costeira, tanto pelo poder público como pela própria população no resguardo de suas residências.

Tabela 7. Resultados obtidos para cada praia em relação à altura, largura, declividade, volume sedimentar (estação chuvosa e menos chuvosa) e balanço sedimentar.

Praia	Altura (m)	Largura (m)	Declividade (grau)	Estação Chuvosa		Estação menos chuvosa		Balanço sedimentar (m ³ .m ⁻¹)
				Volume sedimentar (m ³ .m ⁻¹)	Largura (m)	Declividade (grau)	Volume sedimentar (m ³ .m ⁻¹)	
Bacuri	4	60	2	68,94	60	2	90,42	21,48
Baía do Sol (leste)	6	63,85	5	180,88	54,5	6	182,79	1,91
Baía do Sol (oeste)	8	90,7	3	209,40	85,8	3	227,99	18,59
Paraíso (leste)	8	87,3	3	158,53	72,5	3	143,63	-14,90
Paraíso (centro)	7	77,5	2	89,37	77	2	89,66	0,29
Paraíso (oeste)	6	78	4	136,43	78	4	148,08	11,65
Caruara	5	72,6	4	147,79	70,6	4	164,09	16,30
Marahu (leste)	14	141,2	2	224,53	149,8	2	310,04	85,51
Marahu (centro)	5	61,3	3	113,98	68,1	4	128,25	14,27
Marahu (oeste)	10	48,5	5	135,96	78,5	>4	166,36	30,40
Carananduba	6	393,5	1	394,53	393,0	1	383,39	-11,14
São Francisco (nordeste)	3	232,7	>2	102,73	230,4	>2	88,44	-14,29
São Francisco (sudoeste)	3	138,2	4	104,42	135,6	4	99,02	-5,40
Ariramba (nordeste)	8	154,6	1	178,75	170,4	1	158,24	-20,51
Ariramba (sudoeste)	11	133,3	<2	238,38	133	<2	231,40	-6,98
Murubira	4	59,8	3	73,40	75,5	2	75,06	1,66
Porto Arthur	4	170,7	1	188,14	168,3	1	164,18	-23,96
Chapéu Virado	7	98,7	5	358,68	124,5	5	380,84	22,16
Farol	5	94,7	3	313,43	79,8	3	301,71	-11,72
Prainha	3	163,9	1	153,78	166,5	1	171,05	17,27
Grande	10	63,3	3	182,00	52,2	3	184,32	2,32
Bispo (norte)	11	282,4	1	382,63	281,3	1	370,06	-12,57
Bispo (centro)	11	282,2	1	330,54	282	1	335,24	4,70
Bispo (sul)	7	129,3	1	229,75	111,9	1	211,73	-18,02
Areião (norte)	4	100,4	3	158,52	95,4	<4	167,71	9,19
Areião (sul)	2	178,6	1	210,89	141,6	0,54	172,91	-37,98

Fonte: Autor

Tabela 8. Dados das praias analisadas de acordo com a sua variação de linha de costa (VLC) entre 2006 e 2020 e o estado resultante (avanço ou recuo costeiro).

Praia	VLC entre 2006 e 2020 (km ²)	VLC entre 2006 e 2013 (km ²)	VLC entre 2013 e 2020 (km ²)	Varição da Linha de Costa
Areião	29,32	19,45	9,87	Avanço
Ariramba	1,83	4,37	-2,54	Avanço
Bacuri	1,59	3,19	-1,60	Avanço
Baía do Sol	7,09	0,58	6,51	Avanço
Bispo	-2,70	5,30	-8,01	Recuo
Carananduba	10,16	49,09	-38,94	Avanço
Caruara	-4,72	-3,64	-1,08	Recuo
Chapéu Virado	1,50	2,97	-1,47	Avanço
Farol	5,17	-3,55	8,71	Avanço
Grande	-1,17	5,60	-6,77	Recuo
Marahu	9,23	-11,67	20,90	Avanço
Murubira	1,17	-5,96	7,13	Avanço
Paraíso	-2,39	0,16	-2,56	Recuo
Porto Arthur	1,55	-2,25	3,80	Avanço
Prainha	1,54	12,30	-10,76	Avanço
São Francisco	11,01	5,19	5,82	Avanço

Fonte: A partir das análises multitemporais das imagens Landsat 5/TM (2006) e Landsat 8/OLI (2013 e 2020).

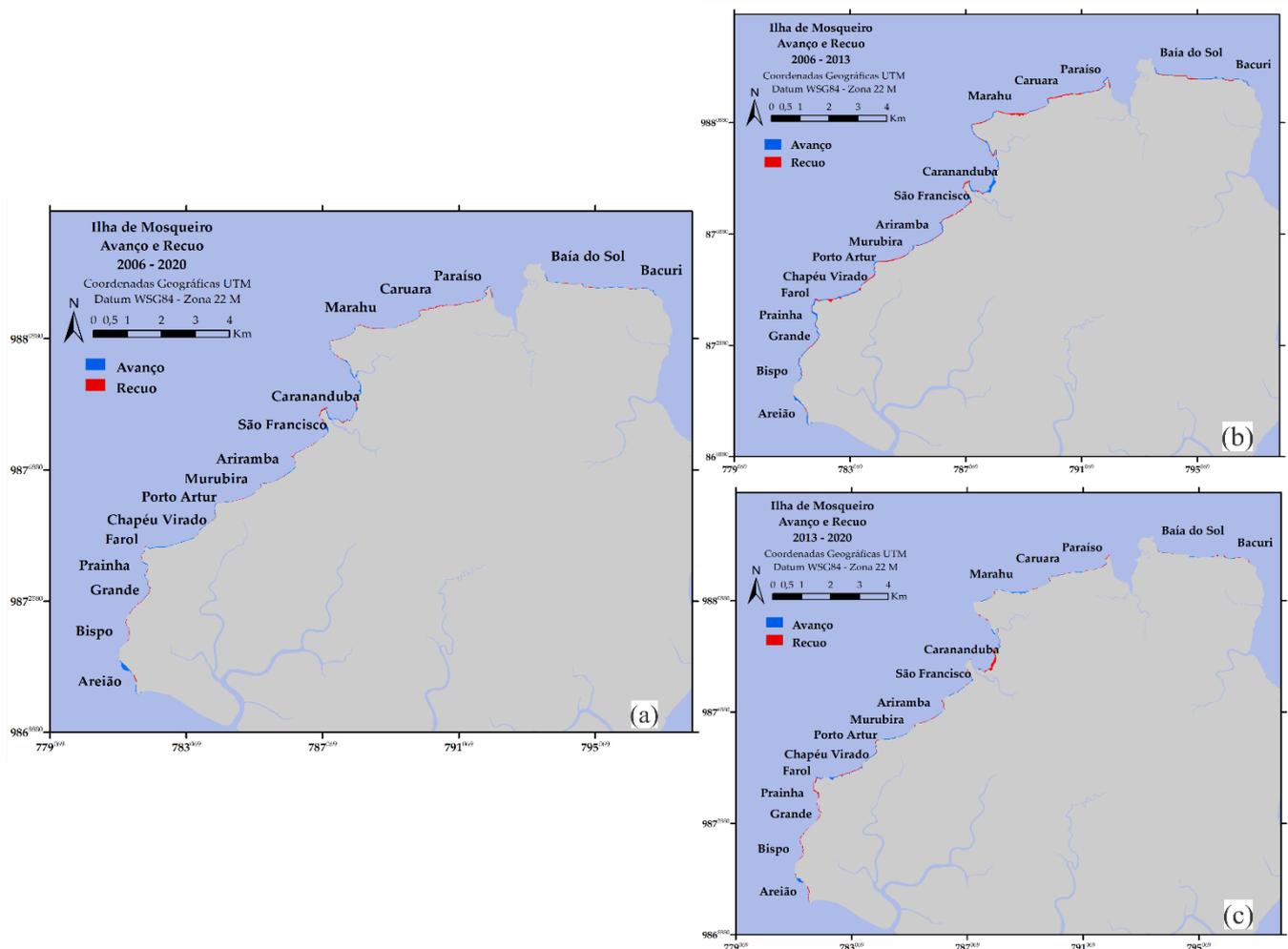


Figura 4. Variação da linha de costa da ilha de Mosqueiro de 2006 a 2020 (a), 2006 a 2013 (b) e 2013 a 2020 (c). Avanço/Acreção (Azul) e Recuo/Erosão (Vermelho). Fonte: A partir das análises multitemporais das imagens Landsat 5/TM (2006) e Landsat 8/OLI (2013 e 2020).

4.3. Estruturas de engenharia costeira, vegetação, falésia e promontório rochoso (Indicadores IV, V, VI, VII e VIII)

As estruturas artificiais contidas na linha de costa da ilha (Figura 5) referem-se principalmente aos calçadões de praia, muros de contenção (estruturas rígidas vertical ou quase vertical apoiadas em uma fundação sólida) e enrocamentos (estruturas maciças compostas por blocos de rocha compactados). A presença de vegetação densa ou esparsa e as falésias ativas também ocorrem nas praias. As falésias ativas (indicador IV) estão em mais de 50% da linha de costa na maioria das praias da ilha (Figura 6). Além delas são identificadas em muitas das praias da ilha de Mosqueiro outras barreiras naturais (indicador V): os promontórios e afloramentos rochosos, estendendo-se pela face praial. Estes geram praias de enseadas formadas entre eles, quando dispostos transversalmente à costa.



Figura 5. Calçadão da praia do Murubira (setor noroeste) (a). Enrocamento na praia do Paraíso (setor norte) (b). Muro de contenção de erosão na praia Grande (setor oeste) (c).

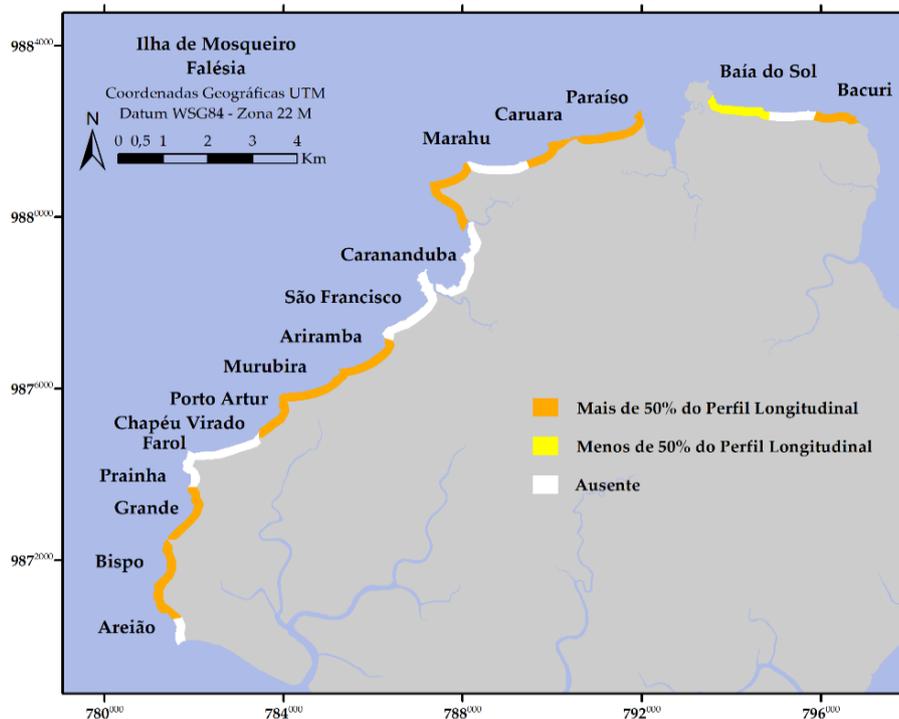


Figura 6. Mapa de distribuição das falésias ao longo da LC das praias da ilha de Mosqueiro. Fonte: a partir da interpretação da imagem Landsat 5/TM (2006) e Landsat 8/OLI (2013 e 2020).

A vegetação (indicador VII) foi classificada predominantemente como bem estabelecida com grama/gramínea e arbustos (mais de 50% do pós-praia ou setor). Nota-se que a vegetação nas praias da ilha de Mosqueiro é mais abundante no setor norte, principalmente arbórea, enquanto nos setores noroeste e oeste é mais espaçada (Figura 7).

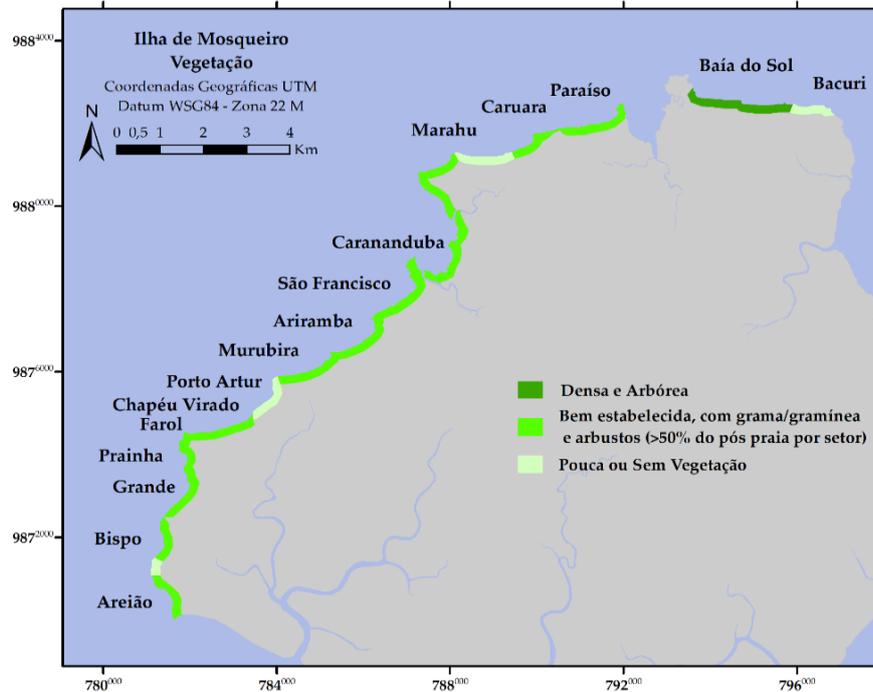


Figura 7. Mapa de vegetação distribuídas ao longo da LC das praias da ilha de Mosqueiro. Fonte: a partir da interpretação de imagens de satélite Landsat 5/TM (2006) e Landsat 8/OLI (2013 e 2020).

Estruturas de muros de contenção e enrocamento (indicador VIII) distribuídas em mais de 50% da linha de costa ocorreu em: Paraíso, Marahu (porção centro), Ariramba, Murubira, Porto Arthur, Prainha, Grande e Bispo (Figura 8).

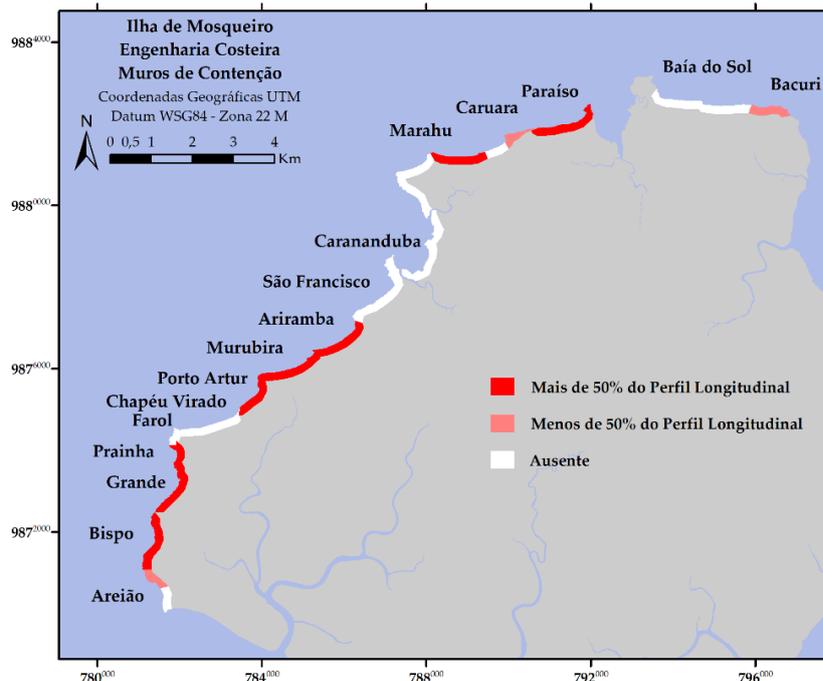


Figura 8. Mapa de estruturas de engenharia costeira (calçadão, muro de contenção e enrocamentos), distribuídas ao longo da LC das praias da ilha de Mosqueiro. Fonte: a partir da interpretação de imagens de satélite Landsat 5/TM (2006) e Landsat 8/OLI (2013 e 2020).

4.4. Percentagem de Ocupação humana próximo à linha de costa e áreas de preservação (Indicadores IX e X)

Nas praias analisadas foram identificados aumento da ocupação humana (%) do ano de 2006 para 2020, dentre elas: Bispo, Carananduba, Caruara, Grande, Marahu, Paraíso, Porto Arthur, Prainha. Nas praias onde houve diminuição – Areião e Bacuri – do percentual atual de ocupação, acredita-se que seja por aumento da cobertura vegetal em terras antes expostas ou em terrenos abandonados. O que acaba se configurando erroneamente como área não ocupada na análise das imagens (Figura 9).

Níveis de ocupação moderado (praias do Areião, Baía do Sol, Carananduba, Caruara, Marahu, Paraíso e São Francisco) próximo à linha de costa indicam que o solo possui áreas de preservação reduzidas (de 30 a 70%) devido a média ocupação e, quando o nível de ocupação próximo à linha de costa é alto (praias do Ariramba, Bacuri, Bispo, Chapéu Virado, Farol, Grande, Murubira, Porto Arthur e Prainha), além de significar maior exposição aos processos erosivos, indica que a superfície do solo (<30%) é seriamente afetada devido ao assentamento urbano bem desenvolvido (SOUSA; SIEGLE; TESSLER, 2013).

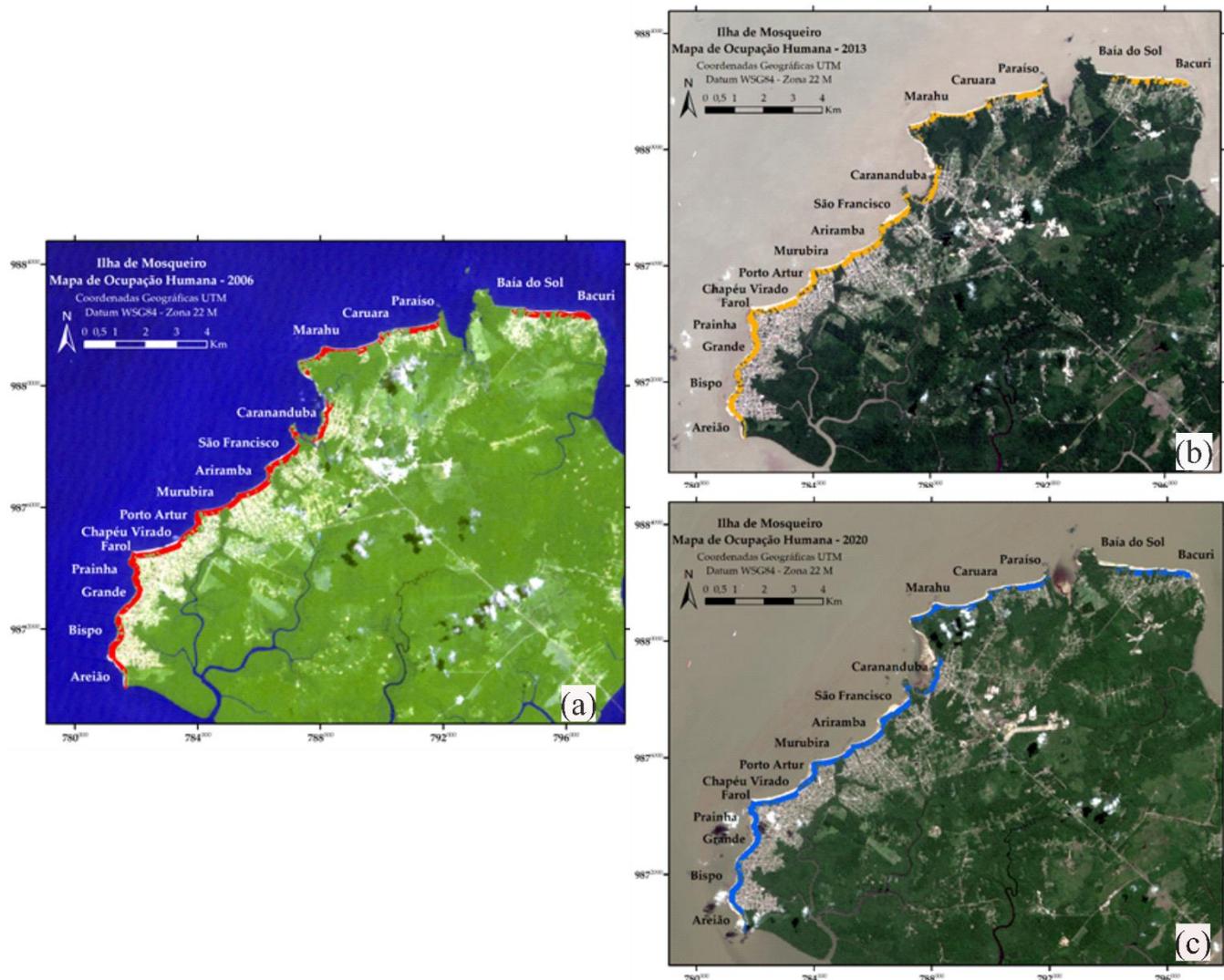


Figura 9. Mapa de Ocupação Humana, ano de 2006, 2013 e 2020. Contempla área de 200m a partir da LC em direção ao continente. Fonte: a partir da interpretação de imagens de satélite Landsat 5/TM (2006) e Landsat 8/OLI (2013 e 2020).

4.5. Índice de vulnerabilidade costeira

A maioria das praias analisadas (50% delas em toda sua extensão) apresentaram altos índices de vulnerabilidade costeira (IVC), ou seja, classificação de alta vulnerabilidade à erosão. As exceções ocorreram nas praias da Baía do Sol, Caruara, Marahu (porções leste e oeste), Carananduba, São Francisco (porção sudoeste),

Ariramba (porção sudoeste), Chapéu Virado e Areião que obtiveram moderada vulnerabilidade na classificação do IVC, devido apresentarem indicadores de erosão costeira com menor peso, como a ausência ou inatividade de falésias altas e presença de barreiras naturais (indicadores IV a VI). Dentre os setores da ilha de Mosqueiro, verifica-se que o oeste é o mais vulnerável, seguido do noroeste e norte. O primeiro possui IVC alto na totalidade de suas praias, com exceção do Areião, que tem acreção costeira (indicador III). Já o setor norte possui IVC moderado em 50% da linha de costa, com exceção do Paraíso, Bacuri e trecho central do Marahú (Figura 10, Tabela 9), onde muros de contenção de erosão foram inclusive instalados (indicador VIII).

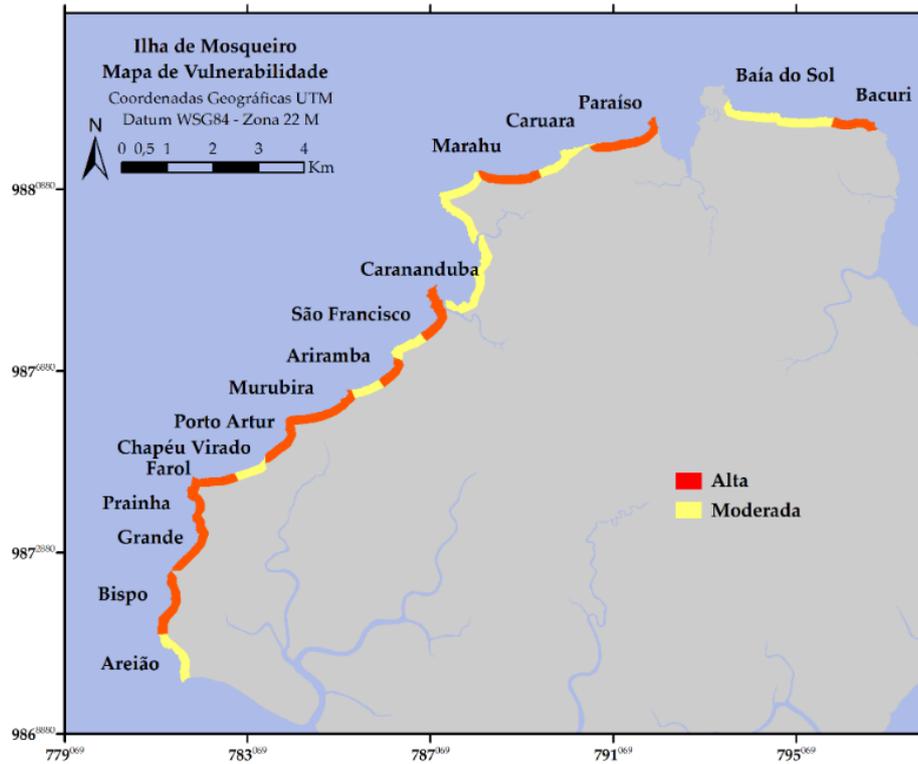


Figura 10. Mapa da Vulnerabilidade Costeira das praias da ilha de Mosqueiro.

Tabela 9. Resultado do índice de vulnerabilidade costeira à erosão (IVC) das praias da ilha de Mosqueiro.

Índice de Vulnerabilidade Costeira												
Setor / Praias	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	IVC	Classificação
Bacuri	5	0	0	0	0	5	10	5	10	10	5	Alta
Baía do sol (leste)	10	5	0	0	0	0	0	0	5	5	3,5	Moderada
Baía do sol (oeste)	5	0	0	0	0	0	0	0	5	5	2,5	Moderada
Paraíso (leste)	5	10	10	10	0	0	5	10	5	5	5,5	Alta
Paraíso (centro)	5	5	10	10	0	0	5	10	5	5	5	Alta
Paraíso (oeste)	10	0	10	10	0	0	5	10	5	5	5	Alta
Caruara	5	0	10	10	0	5	5	5	5	5	4,5	Moderada
Marahu (leste)	5	0	0	0	0	0	5	0	5	5	2,5	Moderada
Marahu (centro)	5	0	0	0	0	5	10	10	5	5	5	Alta
Marahu (oeste)	10	0	0	0	0	0	5	0	5	5	3	Moderada
Carananduba	0	10	0	0	0	0	5	0	5	5	3,5	Moderada
São Francisco (noroeste)	5	10	0	0	0	10	5	0	5	5	5	Alta

	São Francisco (sudoeste)	5	5	0	0	0	10	5	0	5	5	4,5	Moderada
	Ariramba (noroeste)	0	10	0	0	0	0	5	10	10	10	5	Alta
	Ariramba (sudoeste)	0	5	0	0	0	0	5	10	10	10	4,5	Moderada
	Murubira	5	5	0	0	0	5	5	10	10	10	5,5	Alta
	Porto Arthur	0	10	0	0	0	5	10	10	10	10	6	Alta
	Chapéu Virado	10	0	0	10	0	0	5	0	10	10	4,5	Moderada
	Farol	5	10	0	0	0	5	5	0	10	10	5,5	Alta
Oeste	Prainha	0	0	0	0	0	10	5	10	10	10	5,5	Alta
	Grande	5	5	10	10	0	0	5	10	10	10	6	Alta
	Bispo (norte)	0	10	10	10	0	0	5	10	10	10	6	Alta
	Bispo (central)	0	5	10	10	0	0	5	10	10	10	5,5	Alta
	Bispo (sul)	0	10	10	10	0	0	10	10	10	10	6,5	Alta
	Areião (norte)	5	5	0	0	0	5	5	5	5	5	4	Moderada
	Areião (sul)	0	10	0	0	0	10	5	0	5	5	4,5	Moderada

4.6. Grau de risco

Os resultados obtidos para as praias analisadas revelam que a maioria delas estão sob alto e moderado grau de risco, com danos provocados pela erosão (deslizamentos de encosta com ocupação próxima, perda parcial ou total de patrimônio). Riscos moderados na totalidade da extensão de praias foram obtidos apenas em: Baía do Sol, Caruara, Carananduba e Areião (Figura 11, Tabela 10). As demais apresentam pelo menos um trecho com alto risco de erosão.

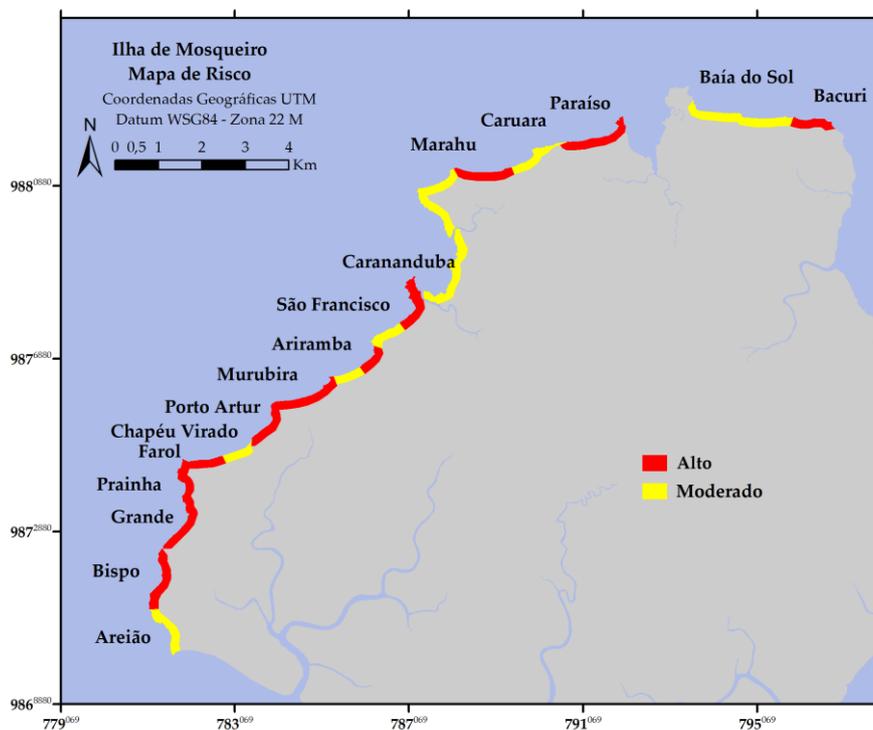


Figura 11. Mapa de Risco Costeiro das praias da ilha de Mosqueiro.

Tabela 10. Grau de risco das praias da ilha de Mosqueiro, como resultado da relação da classificação do IVC e posição das construções.

Setor	Praia	Classificação do IVC	Posição das Construções	Grau de Risco
Norte	Bacuri	Alta	Muito próxima	Alto
	Baía do sol (leste)	Moderada	Muito próxima	Moderado
	Baía do sol (oeste)	Moderada	Muito próxima	Moderado
	Paraíso (leste)	Alta	Muito próxima	Alto
	Paraíso (centro)	Alta	Muito próxima	Alto
	Paraíso (oeste)	Alta	Muito próxima	Alto
	Caruara	Moderada	Muito próxima	Moderado
	Marahu (Leste)	Moderada	Próxima	Moderado
	Marahu (centro)	Alta	Muito próxima	Alto
Noroeste	Marahu (oeste)	Moderada	Próxima	Moderado
	Carananduba	Moderada	Próxima	Moderado
	São Francisco (noroeste)	Alta	Muito próxima	Alto
	São Francisco (sudoeste)	Moderada	Muito próxima	Moderado
	Ariramba (noroeste)	Alta	Muito próxima	Alto
	Ariramba (sudoeste)	Moderada	Muito próxima	Moderado
	Murubira	Alta	Muito próxima	Alto
	Porto Arthur	Alta	Muito próxima	Alto
	Chapéu Virado	Moderada	Muito próxima	Moderado
Oeste	Farol	Alta	Muito próxima	Alto
	Praíinha	Alta	Muito próxima	Alto
	Grande	Alta	Muito próxima	Alto
	Bispo (norte)	Alta	Muito próxima	Alto
	Bispo (central)	Alta	Muito próxima	Alto
	Bispo (sul)	Alta	Muito próxima	Alto
	Areião (norte)	Moderada	Muito próxima	Moderado
Areião (sul)	Moderada	Próxima	Moderado	

5. Discussão

A maioria das praias estuarinas que foram analisadas nesta pesquisa apresentaram valores altos no IVC, ou seja, classificação de alta vulnerabilidade à erosão. As praias dos setores norte e noroeste são as mais expostas à ação dos ventos e, conseqüentemente, sujeitas a incidências de ondas geradas localmente, que são frequentemente classificadas como de baixa energia no ambiente estuarino (OLIVEIRA, 2021; JACKSON, 2002). Já o setor oeste é o mais abrigado da ação de ventos e sem incidência de ondas local, porém foi classificado como o mais vulnerável à erosão. É o setor com urbanização mais consolidada, permitindo identificar que uma causa que potencializa a erosão neste setor é a ocupação irregular no pós-praia, diminuindo principalmente a resiliência do ambiente costeiro.

A elevada ocupação, principalmente muito próximo à praia, implica no aumento da vulnerabilidade à erosão e risco costeiro. Visto que estas construções diminuem a área de troca sedimentar, provocam interferências na morfodinâmica praial e diminui a permeabilidade do solo.

As construções adjacentes à linha de costa estão expostas a risco moderado e alto, ocasionando degradação de imóveis e estruturas públicas, que incluem além da perda material, o risco de vida associado aos deslizamentos de encostas e residências, por exemplo.

Pesquisas em outras áreas da costa amazônica brasileira também identificaram riscos altos provocados por uma série de fatores antropogênicos, como os estudos de Pereira et al. (2014) realizado nas praias da Princesa e Ajuruteua, Sousa et al. (2017a, b) nas praias do Murubira, Colares e Marudá, Braga et al. (2019) nas praias do município de Salinópolis e Santos et al. (2020) na ilha de Mosqueiro. De modo que também identificaram processos de erosão ocorridos de forma mais acentuada principalmente durante os períodos equinociais (marés mais altas do ano).

Padrões de variação sazonal no balanço sedimentar das praias foram observados na ilha de Mosqueiro. Durante a estação menos chuvosa houve acreção de sedimentos nas praias do Bacuri, Baía do Sol (porção oeste),

Paraíso (porção oeste), Caruara, Marahu, Chapéu Virado e Prainha, porém a maioria delas apresentaram uma tendência contrária ao observado no perfil sazonal de praias (BAPTISTA NETO et al., 2004), ou seja, houve mais o balanço sedimentar negativo (erosão) na alternância da estação chuvosa (inverno amazônico) a menos chuvosa (verão amazônico). Harris et al. (2020), quando investigaram a praia estuarina de Shoal Bay (Anguilla, Mar do Caribe), também encontraram esses resultados contraditórios, o que pode representar uma característica particular de algumas praias estuarinas ou adjacentes à estuários.

As mudanças sazonais representam uma resposta dos perfis de praia às variações de amplitude de maré, de energia das ondas, correntes e ventos, à disponibilidade de sedimentos da área-fonte, bem como à compartimentação e ao gradiente costeiro (NORDSTROM, 1992; MCLAREN, 1981; MORTON, 1996).

Souza (2015) acrescenta o fenômeno de rotação de praias como um importante critério para avaliação das mudanças sazonais em praia, pois resulta em alternância entre erosão e acreção nas terminações opostas de praias de enseada, como resposta a modificações no transporte longitudinal de sedimentos. Como na ilha de Mosqueiro o transporte longitudinal originado pela incidência de ondas é menos expressivo que o transporte transversal (RAMOS; RANIERI, 2021), não se pode afirmar que este fenômeno influencie nas mudanças sazonais das praias da ilha.

A médio prazo, a linha de costa da ilha de Mosqueiro foi principalmente acrescida do ano de 2006 a 2020 (Figura 3), ou seja, houve avanço costeiro como processo dominante nas praias, destacando-se a praia do Areião. Nela se verificou o crescimento de uma barra arenosa próximo à linha de costa em sua porção norte (Figura 12 a), que favoreceu além do acúmulo sedimentar costeiro, a proteção contra erosão. Nas demais praias se observou que a construção de muros de contenção, enrocamentos, calçadas, entre outros, acabam por impedir o progresso da erosão em direção a essas construções, favorecendo o equilíbrio na posição da linha de costa e, inclusive acreção costeira por implantação das estruturas rígidas sobre as praias (Figura 12 b).



Figura 12. (a) Praia do Areião com a presença de uma volumosa barra arenosa; (b) Praia do Paraíso (centro) com a presença de estrutura rígida para proteção costeira.

Estruturas naturais de proteção costeira também são encontradas na área de estudo, além do banco arenoso da praia do Areião. Dentre elas: os afloramentos e promontórios rochosos e a própria vegetação (Figura 2), que é abundante principalmente no setor norte, em forma arbórea. Além disso, as praias possuem falésias em sua maioria e predomina-se o formato de enseadas com seus consecutivos promontórios com estreitas faixas de areias quartzosas, que influenciam o modo como as ondas e as correntes de marés atuam na dispersão e deposição dos sedimentos, que a médio ou longo prazo interferem na evolução da linha de costa. Ademais são observados afloramentos lateríticos, em especial nas praias do Bispo e Grande (também verificado em outras praias, porém em menor escala), em conjunto com plataforma de abrasão e bancos de cascalho (FRANÇA et al., 2020) que se tornam mais expostos quando o sedimento praiial é removido.

Mesmo havendo falésias ativas em algumas praias, o que é um indicador de erosão, elas proporcionam maior estabilidade à linha de costa do que aquelas sem tal feição geomorfológica, onde as ondas e inundações provocadas por grandes preamares de sizígia podem provocar maior avanço do processo erosivo sobre a zona costeira.

Os resultados encontrados aqui são semelhantes aos das praias oceânicas do Paiva e da Piedade, pertencentes ao litoral de Pernambuco (Brasil), que apresentaram vulnerabilidade média e alta, respectivamente (MENEZES et al., 2018). O mesmo ocorreu na praia de Massaguaçu (litoral norte de São Paulo, Brasil), dividida em setor 1, 2 e 3, que obteve vulnerabilidade moderada, alta e moderada, respectivamente (SOUSA; SIEGLE; TESSLER, 2013). Todas foram embasadas em dez geoindicadores. Porém, contendo variável oceanográfica (exposição às ondas) e feição sedimentar de duna como critério, ao invés de falésias. A similaridade dos resultados advém do fato de que a maior parte dos indicadores utilizados na pesquisa dos autores foram critérios morfológicos, sedimentares e antrópicos, preservados neste artigo, mesmo após adaptação para o ambiente costeiro local.

Em se tratando de praias estuarinas, Sousa e Ranieri (2023) também observaram vulnerabilidade moderada a alta na praia de Barra Velha (Ilha de Marajó, Pará), que fica adjacente a um canal de maré e localizada no estuário do Rio Pará, como a ilha de Mosqueiro. França et al. (2020) obteve resultados de média erosão na parte centro-sul da praia Grande, e alta erosão na parte norte, bem como na praia do Bispo, ilha de Mosqueiro-PA, sendo esses resultados semelhantes aos encontrados nesta pesquisa: maior vulnerabilidade à erosão no setor oeste da ilha. Em estudos internacionais também é possível destacar a potencialidade do ambiente estuarino na erosão costeira. Kuleli (2010), Traini et al. (2012), Hoang et al. (2015) observaram erosão intensa em linhas de costas de praias situadas em desembocaduras fluviais. Vale ressaltar que os resultados podem ser influenciados pela quantidade de geoindicadores, pela intensidade da erosão costeira e de como estes indicadores interagem entre si resultando nos processos erosivos.

6. Conclusões

A presença de falésias ativas, muros de contenção e elevada ocupação humana próxima à linha de costa se destacaram como os principais indicadores ambientais que contribuíram para o resultado de alta vulnerabilidade à erosão em 8 praias das 16 avaliadas. Devido a isso, considerando-se o posicionamento das construções humanas próximo às praias, também foi encontrado alto grau de risco para as populações ali residentes, frente aos potenciais danos a essas construções, visto que diversas formas de ocupação do solo ocorrem na ilha de Mosqueiro, seja por estruturas imobiliárias (casas, comércio, pequenos edifícios e hotéis), orlas ou ruas/estradas. Sendo assim, ações antrópicas interferem na vulnerabilidade à erosão e, principalmente, o risco costeiro das praias estuarinas analisadas neste artigo.

Os indicadores ambientais investigados para obtenção do IVC se mostraram válidos para adquirir informações sobre as áreas sujeitas aos processos erosivos. O método aplicado nesta pesquisa se mostrou como uma boa alternativa para contribuir no planejamento urbano e monitoramento dos impactos provocados pela erosão costeira em praias estuarinas limitadas por falésias, sendo possível escolher quais geoindicadores terão impacto mais expressivo no resultado do estudo, ou modificá-los de acordo com o objetivo da pesquisa, ou particularidades do local a qual serão aplicados.

Contribuições dos Autores: Concepção, G.O.N. e L.A.R.; metodologia, G.O.N., F.C.L. e L.A.R.; pesquisa, G.O.N., F.C.L. e L.A.R.; preparação de dados, G.O.N., F.C.L. e L.A.R.; escrita do artigo, G.O.N., F.C.L. e L.A.R.; revisão, G.O.N. e L.A.R.; supervisão, L.A.R. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: Esta pesquisa não recebeu nenhum financiamento externo.

Agradecimentos: Ao Programa de Pós-graduação em Oceanografia (PPGOC) e ao Laboratório de Oceanografia Geológica (LABOGEO) da Universidade Federal do Pará (UFPA). Ao Laboratório de Análises de Imagens do Trópico Úmido da UFPA pelo empréstimo de materiais utilizados para coleta de dados.

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

Referências

1. ANTHONY, E. J.; GRATIOT, N. Coastal engineering and large-scale mangrove destruction in Guyana, South America: averting an environmental catastrophe in the making. *Ecological Engineering*, v. 47, 268 –273, 2012. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2012.07.005
2. ARAÚJO, I.; GOMES, E.; GONÇALVES, R.; QUEIROZ, H. Estimativa do índice de vulnerabilidade à erosão costeira (IVC) para o litoral do Piauí, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 20, n. 1, p. 105-118, 2019. DOI: 10.20502/rbg.v20i1.1260

3. BAPTISTA NETO, J. A.; PONZI, V. R. A.; SICHEL, S. E. **Introdução à Geologia Marinha**. 1ª Ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. 279p.
4. BIRD, E. C. F. **Coastal geomorphology: an introduction**. 2ª Ed. Chinchester: Wiley and Sons Ltd, 2008. 448p.
5. BRAND, E.; MONTREUIL, A. L.; HOUTHUYS, R.; CHEN, M. Relating Hydrodynamic Forcing and Topographic Response for Tide-Dominated Sandy Beaches. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 8, n. 3, p. 151, 2020. DOI: 10.3390/jmse8030151
6. BRAGA, R.; PIMENTEL, M.; COELHO, C.; SZLAFSZTEIN, C.; ROLLNIC, M. Vulnerabilidade diante da ação energética do mar: Estudo de caso no Município de Salinópolis, Zona Costeira Amazônica, Brasil. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 19, n. 4, p. 245-264, 2019. DOI: 10.5894/rgci-n219
7. BRUUN, P. Sea level, rise as a cause of shore erosion. Journal Waterways and Harbor Division. **American Society of Civil Engineers**, v. 88, n. 1, p. 117-130, 1962. DOI: 10.1061/JWHEAU.0000252
8. BUTLER, R. W. The concept of a tourist area cycle of evolution: implications for management of resources. **Canadian Geographer**, v. 24, n. 1, p. 5-12, 1980. DOI: 10.1111/j.1541-0064.1980.tb00970.x
9. CUTTER, S. Ciência da vulnerabilidade: modelos, métodos e indicadores. **Revista Crítica de Ciências Sociais**, v. 93, p. 59-69, 2011. DOI: 10.4000/rccs.165
10. DAL CIN, R.; SIMENONI, U. A model for determining the Classification, Vulnerability and Risk in the Southern Coastal Zone of the Marche (Italy). **Journal of Coastal Research**, v. 10, n. 1, p. 18-29, 1994.
11. DOLAN, A. H.; WALKER, I. J. Understanding vulnerability of coastal communities to climate change related risks. **Journal of Coastal Research**, v. SI 39, p. 1316-1323, 2004.
12. EL-ROBRINI, M.; RANIERI, L. A.; SILVA, P. V. M.; ALVES, M. A. M. S.; GERREIRO, J. S.; OLIVEIRA, R. R. S.; SILVA, M. S. F.; AMORA, P. B. C.; EL-ROBRINI, M. H. S.; FENZL, N. Pará. In: MUEHE, D. (Ed.). **Panorama da Erosão Costeira no Brasil**. 1ª Ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2018. p. 65-166.
13. FRANÇA, C.; SILVA, R.; FERREIRA JÚNIOR, J. L.; ARAÚJO, F. Erosão da orla costeira grande-bispo, ilha de Mosqueiro, Belém - PA, através da análise de indicadores. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v. 24, p. 1-20, 2020. DOI: 10.5902/2236499433940
14. GORNITZ, V. Global coastal hazards from future sea level rise. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 89, p. 379-398, 1991. DOI: 10.1016/0031-0182(91)90173-O
15. HARRIS, D. L.; VILA-CONCEJO, A.; AUSTIN, T.; BENAVENTE, J. Multi-scale morphodynamics of an estuarine beach adjacent to a flood-tide delta: Assessing decadal scale erosion. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 241, p. 1-12, 2020. DOI: 10.1016/j.ecss.2020.106759
16. HOANG, V.C.; THANH, T.M.; VIET, T.N.; TANAKA, H. Shoreline change at the Da Rang river mouth, Vietnam. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ESTUARIES AND COASTS, 5, **Proceedings**. Omam: Sultan Qaboos University, 2015, p. 312-318.
17. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Biblioteca IBGE**. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=42472>. Acesso em: 2 jun. 2020.
18. JACKSON, N. L.; NORDSTROM, K. F.; ELIOT, I.; MASSELINK, G. 'Low energy' sandy beaches in marine and estuarine environments: a review. **Geomorphology**, v. 48, p. 147-162, 2002. DOI: 10.1016/S0169-555X(02)00179-4
19. KÖPPEN, W. Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahreslauf. **Petermanns Geogr Mitt**, v. 64, p.193-203, 1918.
20. KULELLI, T. Quantitative analysis of shoreline changes at the Mediterranean coast in Turkey. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 1, n. 4, p. 387-397, 2010. DOI: 10.1007/s10661-009-1057-8
21. LIMA, L. G.; FERREIRA, M. S.; FRANCO, B. J.; PARISE, C. K.; SANTOS, J. H. S. Morfodinâmica da praia da Ponta da Areia: considerações sobre a construção de um espigão costeiro em ambiente de macromaré. **Geociências**, v. 41, n. 2, p. 503-515, 2022. DOI: 10.5016/geociencias.v41i02.16457
22. LINS-DE-BARROS, F. M. Risco, vulnerabilidade física à erosão costeira e impactos sócio-econômicos na orla urbanizada do município de Maricá - Rio de Janeiro. **Revista Brasileira De Geomorfologia**, v. 6, n. 2, p. 83-90, 2005. DOI: 10.20502/rbg.v6i2.54
23. LUIJENDIJK, A.; HAGENAARS, G.; RANASINGHE, R.; FEDOR, B.; GENNADII, D.; STEFAN, A. The State of the World's Beaches. **Scientific Reports**, v. 8, n. 6641, p.1-11, 2018. DOI: 10.1038/s41598-018-24630-6
24. MARTINS, L. R.; BARBOZA, E. G. Zona Costeira: um desafio constante. **Gravel**, v. ISSN 1678-5975, n. 3, p. 1-2, 2006.
25. MCLAREN, P. An interpretation of trends in grain size measures. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 51, n. 2, p. 611-624, 1981. DOI: 10.1306/212F7CF2-2B24-11D7-8648000102C1865D
26. MCLAUGHLIN, S.; MCKENNA, J.; COOPER, J. A. G. Socio-economic data in coastal vulnerability indices: constraints and opportunities. **Journal of Coastal Research**, v. SI 36, p. 487-497, 2002. DOI: 10.2112/1551-5036-36.sp1.487

27. MENEZES, A.; PEREIRA, P.; GONÇALVES, R.; ARAÚJO, T.; SOUSA, P. Análise da vulnerabilidade à erosão costeira através de geoindicadores nas praias de Piedade e Paiva (PE), Brasil. *Geociências*, v. 37, n. 2, p. 455-465, 2018. DOI: 10.5016/geociencias.v37i2.11819
28. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Projeto Orla: fundamentos para a gestão integrada**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente (MMA) / Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, 2006. 74p.
29. MORAES, B. C.; COSTA, J. M.; COSTA, A. C. L.; COSTA, M. H. Variação espacial e temporal da precipitação no Estado do Pará. *Acta amazônica*, v. 35, n. 2, p. 207-214, 2005. DOI: 10.1590/S0044-59672005000200010
30. MORTON, R. A. Coastal geoindicators of environmental change in the humid tropics. *Environmental Geology*, v. 42, n. 7, p. 711-724, 1996. DOI: 10.1007/s00254-002-0549-4
31. MUEHE, D. Panorama da Erosão Costeira no Brasil. 1ª Ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2018. 761p.
32. MURALI, R. M.; ANKITA, M. S.; VETHAMONY, P. Coastal vulnerability assessment of Puducherry coast, India, using the analytical hierarchical process. *Natural Hazards Earth and System Science*, v. 13, p. 3291-3311, 2013. DOI: 10.5194/nhess-13-3291-2013
33. NEGRÃO, Y. S.; SOUSA, H. C.; RANIERI, L. A. Vulnerabilidade à erosão costeira em praias amazônicas e a ocupação populacional em áreas de riscos. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 23, n. 2, p. 1264-1284, 2022. DOI: 10.20502/rbg.v23i2.1951
34. NICHOLLS, R.; CAZENAVE, A. Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science*, v. 328, p.1517-1520, 2010. DOI: 10.1126/science.1185782
35. NICOLodi, J. L. **Gaigerco**. 2008. Disponível em: <https://gaigerco.furg.br/images/Arquivos-PDF/documento_sintese_simposio.pdf>. Acesso em: 3 jun. 2020.
36. NITTROUER, C.; DEMASTER, D.; KUEHL, S.; FIGUEIREDO, A.; STERNBERG, R.; FARIA, L. E. C.; SILVEIRA, O.; ALLISON, M.; KINEKE, G.; OGSTON, A.; SOUZA FILHO, P.; ASP, N.; NOWACKI, D.; FRICKE, A. Amazon Sediment Transport and Accumulation Along the Continuum of Mixed Fluvial and Marine Processes. *Annual Review of Marine Science*, v. 13, n. 1, p. 1-36, 2021. DOI: 10.1146/annurev-marine-010816-060457
37. NORDSTROM, K. F. **Estuarine beaches**. 1ª Ed. London: Springer, 1992. 225p.
38. OLIVEIRA, F. S. R.; REIS, F. B.; FERNANDEZ, G. B. Morfodinâmica de praias estuarinas de baixa energia durante dragagem de aprofundamento do canal da Galheta, Paranaçuá-PR. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 14 n. 4, p. 1924-1940, 2021. DOI: 10.26848/rbgf.v14.4.p1924-1940
39. PEREIRA, L. C. C.; VILA-CONCEJO, A.; COSTA, R. M.; SHORT, A. Managing physical and anthropogenic hazards on macrotidal Amazon beaches. *Ocean & Coastal Management*, v. 96, p. 149-162, 2014. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2014.05.008
40. PRASETYA, G. The role of coastal forests and trees in protecting against coastal erosion. In: BRAATZ, S.; FORTUNA, S.; BROADHEAD, J.; LESLIE, R. (Ed.). **Coastal protection in the aftermath of the Indian Ocean tsunami: what role for forests and trees?**. 1ª Ed. Thailand: Proceedings of the Regional Technical Workshop, 2007. p.103-132.
41. RAMOS, C. C.; RANIERI, L. A. Morfologia e Sedimentação de uma Praia Estuarina Amazônica (Marahú/PA) Durante Amplitudes de Marés Distintas. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 14, n. 5, p. 2916-2930, 2021. DOI: 10.26848/rbgf.v14.5.p2916-2930
42. RANIERI, L. A.; EL-ROBRINI, M. Condição oceanográfica, uso e ocupação da costa de Salinópolis (Setor Corvina - Atalaia), Nordeste do Pará, Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, v. 16, n. 2, p. 133-146, 2016. DOI: 10.5894/rgci565
43. SANTOS, I. R., SILVA, C. V, ANDRADE, M. M. N. Avaliação da vulnerabilidade social e percepção de risco à erosão costeira na Ilha do Mosqueiro-PA. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, v.13, n. 8, p. 1-23, 2020.
44. SCHLACHER, T. A.; DUGAN, J.; SCHOEMAN, D. S.; LASTRA, M.; JONES, A.; SCAPINI, F.; MCLACHLAN, A.; DEFEO, O. Sandy beaches at the brink. *Diversity and Distributions*, v. 13, n. 5, p. 556-560, 2007. DOI: 10.1111/j.1472-4642.2007.00363.x
45. SHAW, J.; TAYLOR, R. B.; FORBES, D. L.; RUZ, M. H.; SOLOMON, S. Sensitivity of the coasts of Canada to sea-level rise. Canada, *Geological Survey of Canada*, 78 p. 1998.
46. SHORT, A. D.; HESP P. A. Wave, beach and dune interactions in southeastern Australia. *Marine Geology*, v. 48, p. 259-284, 1982. DOI: 10.1016/0025-3227(82)90100-1
47. SMITH, M. J.; CROWLEY, R. G. Measuring historical coastal change using GIS and the change Polygon approach. *Transactions in GIS*, v. 16, n. 1, p. 3-15, 2012. DOI: 10.1111/j.1467-9671.2011.01292.x
48. SOUSA, R. C.; PEREIRA, L. C. C.; COSTA, R. M.; JIMÉNEZ, J. A. Management of estuarine beaches on the Amazon coast though the application of recreational carrying capacity indices. *Tourism Management*, v. 59, p. 216-225, 2017a. DOI: 10.1016/j.tourman.2016.07.006

49. SOUSA, R. C.; PEREIRA, L. C. C.; TRINDADE, W. N.; INGRID, P. Application of the DPSIR framework to the evaluation of the recreational and environmental conditions on estuarine beaches of the Amazon coast. **Ocean & Coastal Management**, v. 149, n. 15, p. 96-106, 2017b. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2017.09.011
50. SOUSA, P.; SIEGLE, E.; TESSLER, M. Vulnerability assessment of Massaguaçu Beach (SE Brazil). **Ocean & Coastal Management**, v. 77, p. 24–30, 2013. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2012.03.003
51. SOUSA, M. B. P.; RANIERI, L. A. Morfodinâmica de praias estuarinas da costa leste da Ilha do Marajó, Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 3., e2350, 2023. DOI: 10.20502/rbg.v24i3.2350
52. SOUZA, C. R. G. Variabilidade morfológica e granulométrica e balanço sedimentar de uma praia em rotação praial. **Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 6, n.1, p. 01-19, 2015. DOI: 10.5380/abequa.v6i1.38573
53. THIELER, E. R.; HAMMAR-KLOSE, E. S. **National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise, U.S. Atlantic Coast**. 1999. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/of/1999/of99-593/>>. Acesso em: 10 mar. 2021.
54. TRAINI, C.; SCHROTTKE, K.; STRATTEGGER, K.; DOMINGUEZ, J.M.L.; GUIMARÃES, J.K.; VITAL, H.; BESERRA, D. D.; SILVA, A.G.A. Morphology of subaqueous dunes at mouth of the dammed river São Francisco (Brazil). **Journal of Coastal Research**, v. 6, n. 28, p. 1580-1590, 2012. DOI: 10.2112/jcoastres-d-10-00195.1
55. VIANA, I. Análise Do Processo de Uso e Ocupação da Orla da Praia do Areião (Ilha de Mosqueiro-Pa), tendo em Vista o Cumprimento das Diretrizes do Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (LEI 7.661/88). **Revista Geonorte**, v. 8, n. 30, p. 63-77, 2017. DOI: 10.21170/geonorte.2017.V.8.N.30.63.77
56. WENTWORTH, C. K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. **The Journal of Geology**, v. 30, n. 5, p. 377-392, 1922.



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.