



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**VULNERABILIDADE COSTEIRA EM UMA COMUNIDADE
TRADICIONAL AMAZÔNICA: ESTUDO DE CASO NA VILA
DE JUBIM, SALVATERRA – PA**

Dissertação Apresentada por:

FABRÍCIO DE SOUSA FIGUEIREDO

Orientadora: Profa. Dra. Leilanne Almeida Ranieri (UFPA)

**BELÉM – PARÁ
2025**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**VULNERABILIDADE COSTEIRA EM UMA COMUNIDADE
TRADICIONAL AMAZÔNICA: ESTUDO DE CASO NA VILA
DE JUBIM, SALVATERRA – PA**

Dissertação Apresentada por:

FABRÍCIO DE SOUSA FIGUEIREDO

Orientadora: Profa. Dra. Leilanne Almeida Ranieri (UFPA)

**BELÉM – PARÁ
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará

Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F475v Figueiredo, de Sousa Fabrício.

Vulnerabilidade costeira em uma comunidade tradicional amazônica: estudo de caso na vila de Jubim, Salvaterra - PA / Fabrício de Sousa Figueiredo. — 2025.

xii 70 f. : il. color.

Orientador(a): Prof^a. Dra. Leilanne Ranieri

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Belém, 2025.

1. Elevação do nível do mar. 2. Erosão costeira. 3. Mudanças climáticas. 4. Zona costeira. I. Título.

CDD 551.4607



Universidade Federal do Pará
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Oceanografia

**VULNERABILIDADE COSTEIRA EM UMA COMUNIDADE
TRADICIONAL AMAZÔNICA: ESTUDO DE CASO NA VILA
DE JUBIM, SALVATERRA – PA**

Dissertação Apresentada por:
FABRÍCIO DE SOUSA FIGUEIREDO

Como requisito parcial à obtenção de Grau Mestre em Oceanografia na
Área de Sistemas Costeiros e Oceânicos e Linha de Pesquisa Avaliação e
Gestão de Recursos Aquáticos

Data de Aprovação: 16/04/2025
Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br LEILANHE ALMEIDA RANIERI
Data: 16/06/2025 21:35:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Leilanne Almeida Ranieri
(Orientadora – UFPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br MARCELO ROLLNIC
Data: 16/06/2025 17:18:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo Rollnic
(Membro Interno – UFPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br MILENA MARILIA NOGUEIRA DE ANDRADE
Data: 16/06/2025 16:50:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Profa. Dra. Milena Marília Nogueira de
Andrade**
(Membro Externo – UFPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br WILSON DA ROCHA NASCIMENTO JUNIOR
Data: 16/06/2025 21:27:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Dr. Wilson da Rocha Nascimento
Júnior**
(Membro Externo – Instituto Vale)

Dedico esta dissertação às pessoas que estiveram sempre ao meu lado:
Minha família e amigos (em seu sentido mais genuíno).

AGRADECIMENTOS

À Deus, à energia superior, que me deu forças e perseverança nos últimos meses de estudo, concedendo tranquilidade para finalizar este trabalho.

À minha família e aos meus amigos, especialmente Eugênio (que me emprestou um notebook após o meu ir de base) e Rodrigo, que estiveram sempre ao meu lado, apoiando meu trabalho e entendendo quando eu me distanciava para concluir algo. Meu mais sincero “muito obrigado”. Nada disso seria possível sem vocês.

Aos amigos da graduação, que permaneceram durante o mestrado. Cada um é essencial nessa caminhada que iniciamos juntos e estamos finalizando juntos. Não posso esquecer também de mencionar os amigos de laboratório, onde dividimos momentos divertidos e de aprendizado, especialmente quando eu era bombardeado por dúvidas.

Ao Lohan Baía, por me auxiliar no uso dos softwares e ferramentas. Apesar do pouco contato que tivemos, foi essencial para o entendimento do DSAS e na interpretação dos dados obtidos.

À minha orientadora Leilane Ranieri. Muito obrigado por aceitar estar comigo na produção desta dissertação. Obrigado pela paciência, dedicação e amizade.

À Universidade Federal do Pará e ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, pelo oportunidade de desenvolver a pesquisa e obter a titulação de Mestre em Oceanografia.

À CAPES, pelo fornecimento da bolsa de pesquisa durante os dois anos do mestrado.

“There’s nothing wrong with loving who u are.
Cause He made u perfect.”
Stefani Germanotta (2011)

RESUMO

A vulnerabilidade costeira é um tema de grande relevância em escala global devido às questões climáticas atuais e à elevação do nível do oceano. Compreender o grau de vulnerabilidade costeira é essencial para prevenir perdas socioeconômicas e ambientais, como as oriundas de processos erosivos. Este estudo teve como objetivo avaliar quantitativamente as condições de vulnerabilidade à erosão costeira em uma comunidade tradicional da Ilha do Marajó: Jubim, município de Salvaterra, estado do Pará. Para alcançar esse objetivo, foi utilizado um Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC), considerando duas projeções de elevação do nível médio do mar, propostas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC): uma elevação de 4 mm/ano e outra de 15 mm/ano até 2100. Com o propósito de identificar a vulnerabilidade costeira frente os dois cenários de elevação do nível do mar, associou-se eles às características geomorfológicas e físicas ao longo da costa estuarina de Jubim. Foram analisadas e classificadas variáveis oceanográficas (amplitude de maré, altura significativa de ondas e variação do nível do mar) e geológicas (geomorfologia costeira, declividade praial e taxa de erosão/acreção da linha de costa), cujos índices de vulnerabilidade variaram de muito baixo a muito alto. A determinação da taxa de erosão/acreção da linha de costa foi realizada por meio de análise multiespectral e multitemporal (33 anos) utilizando imagens de satélite Landsat e a ferramenta Digital Shoreline Analysis System (DSAS). A espacialização e integração dos dados, com base no IVC, foram executadas em software de Sistema de Informação Geográfica (SIG). A área de estudo foi segmentada em três setores: Norte (praia do Salazar), Central (praia das Meninas) e Sul (praias da Baleia e do Curuanã). Entre 1990 e 2023, o recuo médio linear registrado para toda a área de estudo foi de -35,24 m (NSM), enquanto o avanço médio linear foi de 15,10 m (NSM), evidenciando o predomínio da erosão costeira. O setor Norte, com o menor gradiente topográfico, apresentou um recuo máximo de 170 metros e um recuo médio de 1,99 m/ano (EPR), evidenciando o recuo da vegetação de manguezal e a sobreposição da praia do Salazar sobre esse ecossistema. O IVC revelou que, em ambas as projeções de elevação do nível médio do mar, o litoral de Jubim tende a apresentar vulnerabilidade de moderada a alta (30,3% e 27,3%) nas áreas com falésias e extensas faixas arenosas, respectivamente. O mapa elaborado com base no IVC mostrou-se uma ferramenta útil para apoiar a gestão costeira na costa amazônica e a tomada de decisões diante do avanço da erosão causada pela hidrodinâmica estuarina, associada ao aumento do nível do mar.

Palavras-chave: Elevação do nível do mar; Mudanças Climáticas; Erosão Costeira; Zona Costeira.

ABSTRACT

Coastal vulnerability is a topic of great relevance on a global scale due to current climate issues and rising ocean levels. Understanding the degree of coastal vulnerability is essential to prevent socioeconomic and environmental losses, such as those resulting from erosive processes. This study aimed to quantitatively assess the conditions of vulnerability to coastal erosion in a traditional community on Marajó Island: Jubim, located in the municipality of Salvaterra, state of Pará. To achieve this objective, a Coastal Vulnerability Index (CVI) was used, considering two projections of sea-level rise proposed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): one with a rise of 4 mm/year and the other with 15 mm/year until 2100. To identify coastal vulnerability under the two sea-level rise scenarios, they were associated with geomorphological and physical characteristics along the estuarine coast of Jubim. Oceanographic variables (tidal range, significant wave height, and sea-level variation) and geological variables (coastal geomorphology, beach slope, and shoreline erosion/accretion rate) were analyzed and classified, with vulnerability indices ranging from very low to very high. The determination of the shoreline erosion/accretion rate was carried out through multispectral and multitemporal analysis (33 years) using Landsat satellite images and the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) tool. The spatialization and integration of the data, based on the CVI, were performed using Geographic Information System (GIS) software. The study area was segmented into three sectors: North (Salazar Beach), Central (Meninas Beach), and South (Baleia and Curuanã Beaches). Between 1990 and 2023, the average linear retreat recorded for the entire study area was -35.24 m (NSM), while the average linear advance was 15.10 m (NSM), highlighting the predominance of coastal erosion. The North sector, with the lowest topographic gradient, showed a maximum retreat of 170 meters and an average retreat of 1.99 m/year (EPR), revealing the retreat of mangrove vegetation and the overlapping of Salazar Beach over this ecosystem. The CVI revealed that, under both sea-level rise projections, Jubim's coastline tends to present moderate to high vulnerability (30.3% and 27.3%) in areas with cliffs and extensive sandy stretches, respectively. The map developed based on the CVI proved to be a useful tool to support coastal management on the Amazonian coast and decision-making in the face of advancing erosion caused by estuarine hydrodynamics, associated with rising sea levels.

Keywords: Sea Level Rise; Climate changes; Coastal Erosion; Coastal Zone.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Setorização da Zona Costeira Paraense (ZCP). Adaptado de Pará (2020).	17
Figura 2 - Mapa de localização da comunidade de Jubim. Fonte: Autor.	24
Figura 3 - Mapa morfológico da zona costeira dos municípios de Soure e Salvaterra (margem leste da Ilha de Marajó-PA).....	25
Figura 4 - Organograma do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) considerando duas projeções de elevação do nível médio do mar. Seleção de coloração verde: materiais e métodos; seleção de coloração amarela: variáveis físicas e dinâmicas; seleção de coloração preta: resultados. Organização: autor.	28
Figura 5 - Representação da relação entre as estatísticas de variação da linha de costa: Net Shoreline Movement (NSM) e End Point Rate (EPR). O NSM corresponde à distância, medida ao longo do transecto em metros (m), entre a linha de costa mais antiga (1936, indicada em vermelho) e a mais recente (2005, indicada em magenta). Já o EPR é calculado dividindo-se a distância NSM pelo intervalo de tempo entre essas duas linhas costeiras (1936 e 2005), que, neste exemplo, corresponde a 69 anos. Fonte: Himmelstoss et al. (2018).	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Apresentação dos anos das imagens de satélite, o modelo e suas respectivas bandas. Adaptado de USGS (2024).....	29
Tabela 2 - Parâmetros quantitativos disponíveis no DSAS. Adaptado de Conti e Rodrigues (2011).	30

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
EPÍGRAFE	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	ix
LISTA DE TABELAS	x
1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	20
2.1 GERAL:	20
2.2 ESPECÍFICOS:.....	20
3 REFERENCIAL TEÓRICO	21
3.1 LINHA DE COSTA.....	21
3.2 VULNERABILIDADE COSTEIRA	22
4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	24
4.1 LOCALIZAÇÃO	24
4.2 GEOMORFOLOGIA.....	24
4.2 OCEANOGRAFIA	26
4.2 CLIMATOLOGIA.....	26
5 METODOLOGIA	28
5.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	28
5.2 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	28
5 ARTIGO 1 EVOLUÇÃO DA LINHA DE COSTA EM VILA TRADICIONAL DA AMAZÔNIA: JUBIM, ILHA DO MARAJÓ, PARÁ	15
6 ARTIGO 2 AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À EROSÃO COSTEIRA EM UMA COMUNIDADE TRADICIONAL AMAZÔNICA	38
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	63

8 REFERÊNCIAS.....65

1 INTRODUÇÃO

A Zona Costeira (ZC) configura-se como um complexo ambiente resultante da confluência dos sistemas terrestres, oceanográficos e atmosféricos, portanto, inclui uma área marinha (Zona Econômica Exclusiva – ZEE, ilhas oceânicas, zona contígua até 12 milhas náuticas, no Brasil) e outra continental (área dos municípios costeiros), incluindo os recursos renováveis e não renováveis (Brasil 2002, Apostolopoulos & Nikolakopoulos 2021, Viana *et al.* 2021).

Por conta da importância dos recursos naturais disponíveis e a relação histórica da humanidade com a ZC (Marean *et al.* 2007), cerca de 10% da população mundial habitam elas, e a tendência é aumentar (Rizzo & Anfuso 2020). No Brasil cerca de 1/3 da população habita a ZC, onde quase a metade reside a menos de 200 km da costa, cerca de 26,58% da população nacional encontra-se nessa região, com uma parcela substancial concentrada em centros urbanos de médio e grande porte (Ibge 2011).

A dinâmica da ZC é afetada por diversos fatores, além de ações humanas relacionadas à habitação, lazer, transporte e atividades extratistas e industriais (Ranieri & El-Robrini 2015). Sua dinâmica natural inclui as condições climáticas (como pluviosidade, ventos e eventos extremos), os processos hidrológicos (descarga fluvial) e as forças hidrodinâmicas (marés, ondas e correntes), atuando em escalas temporais longas, médias e curtas (Rizzo & Anfuso 2020, Baía *et al.* 2021). A ZC brasileira é uma das mais extensas do mundo, sendo superior a 8.500 km e abrangendo uma área estimada em aproximadamente 514.000 km². Esse território compreende a faixa oceânica, águas interiores e os territórios de 395 municípios distribuídos por 17 estados costeiros (Zamboni & Nicolodi 2008).

A Zona Costeira Amazônica Brasileira (ZCAB) se estende desde o Rio Oiapoque, no estado do Amapá, até a Baía de São Marcos, no estado do Maranhão, compreendendo uma diversidade de ambientes litorâneos, como ilhas, praias, planícies de marés, estuários, manguezais, florestas de várzea (Pereira *et al.* 2009). A ZCAB se distingue das demais zonas costeiras por estar situada sob a influência da foz do Rio Amazonas, cuja vazão e aporte sedimentar expressivos criam um ambiente único e altamente dinâmico (Souza Filho *et al.* 2005). A ZCAB inclui as regiões metropolitanas de Macapá (AP), Belém (PA) e São Luís (MA), além de outros municípios com densidade populacional moderada e vastas áreas com baixa densidade populacional (Pereira *et al.* 2009).

Na Amazônia, a zona costeira apresenta particularidades geomorfológicas,

oceanográficas e meteorológicas quando comparadas a outras regiões costeiras do Brasil, apresentando elevada precipitação anual (até 3.300 mm), altas temperaturas do ar ($>20^{\circ}\text{C}$), com baixa variação térmica anual, ampla plataforma continental (~ 330 km), regime de meso (2 a 4 m) a macro (4 a 6 m) e hipermaré ($>$ a 6 m), além de estar sob a influência da Corrente Norte do Brasil e da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que faz com que a região esteja sob a ação dos ventos alísios (Rollnic *et al.* 2020).

No Estado do Pará, as iniciativas pioneiras relacionadas à gestão costeira tiveram início em 1992, com a realização de estudos voltados ao zoneamento e à elaboração do Plano de Gestão da zona costeira paraense, além da implementação das primeiras ações de monitoramento e administração desse território (Szlafsztein 2009). A partir de 1999, a então Secretaria Executiva de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente (SECTAM) passou a desempenhar as funções relacionadas ao processo de gerenciamento costeiro no Pará, culminando na criação do Programa Estadual de Gerenciamento Costeiro, configurando-se como um dos instrumentos de implementação da Política Estadual de Meio Ambiente do Pará – instituída pela Lei Estadual nº 5.887, de maio de 1995. Esse programa incorporou como ferramentas o Plano Estadual de Gerenciamento Costeiro (PEGC), o Plano Municipal de Gerenciamento Costeiro (PMGC), o Sistema de Informações do Gerenciamento Costeiro (SIGERCO), o Sistema de Monitoramento Ambiental da Zona Costeira (SMA-ZC), o Relatório de Qualidade Ambiental da Zona Costeira (RQA-ZC), o Zoneamento Ecológico-Econômico Costeiro (ZEEC) e o Plano de Gestão da Zona Costeira (PGZC) (Pará 2014).

Atualmente a delimitação da Zona Costeira Paraense (ZCP) está de acordo com a Lei Estadual nº 9604/2020 que institui a Política Estadual de Gerenciamento Costeiro (PEGC) do Pará (Pará 2020). A zona costeira paraense é constituída por 5 setores com características fisiográficas distintas (Figura 1). Os municípios que compõem o Setor I (Marajó Ocidental) são: Afuá, Breves, Anajás, Chaves, São Sebastião da Boa Vista, Curalinho, Melgaço, Portel, Bagre, Oeiras do Pará e Gurupá. O Setor II (Marajó Oriental) apresenta-se formado pelos municípios de Santa Cruz do Arari, Soure, Salvaterra, Cachoeira do Arari, Ponta de Pedras e Muaná. O Setor III (Continental Estuarino) está constituído pelos municípios de Abaetetuba, Barcarena, Belém, Ananindeua, Marituba, Benevides, Santa Bárbara do Pará, Santa Isabel do Pará, Inhangapi e Castanhal. O Setor IV (Flúvio Marinho) engloba os municípios de Colares, Vigia, Santo Antônio do Tauá, São Caetano de Odivelas, São João da Ponta, Curuçá, Terra Alta, Marapanim, Magalhães Barata e Maracanã. E o Setor V (Costa Atlântica Paraense) inclui Santarém Novo, Salinópolis, São João de Pirabas, Primavera, Quatipuru, Capanema,

Tracuateua, Bragança, Augusto Corrêa e Viseu (Pará 2020).

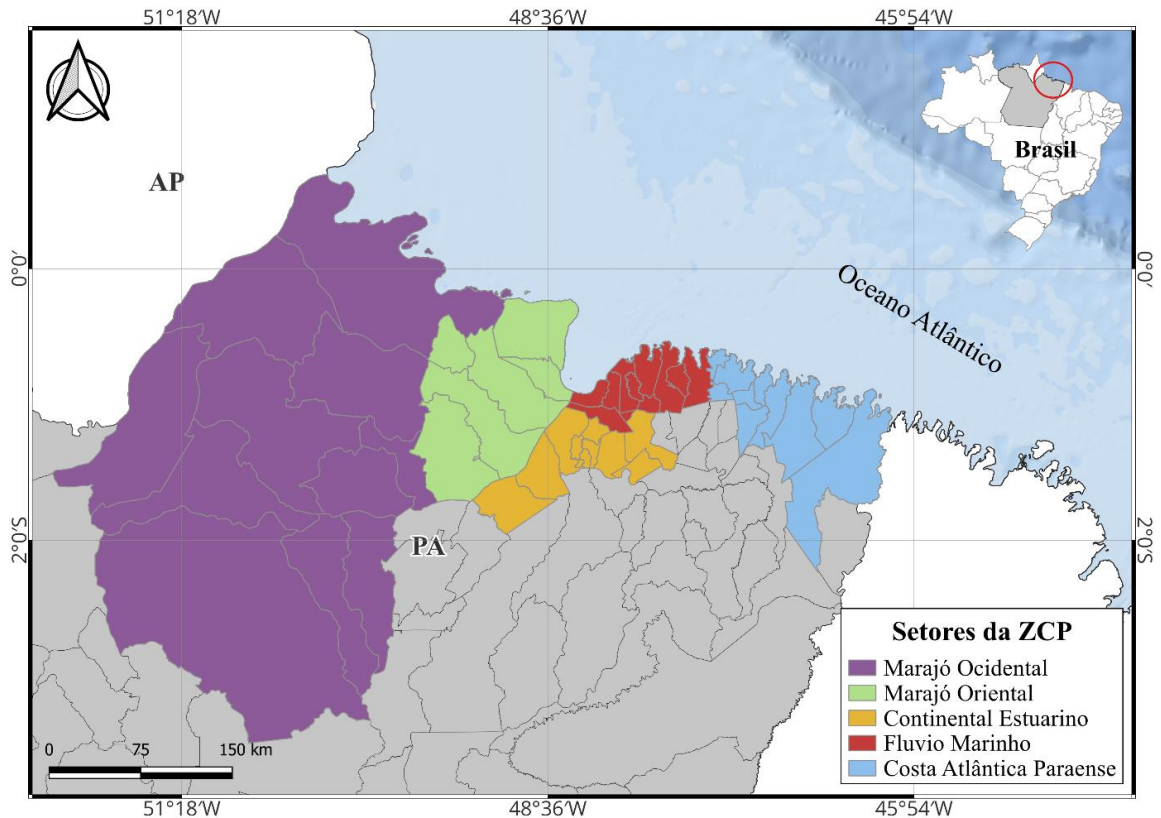


Figura 1 - Setorização da Zona Costeira Paraense (ZCP). Adaptado de Pará (2020).

A comunidade tradicional de Jubim, objeto de estudo desta dissertação de mestrado, está localizada no setor “Marajó Oriental”, especificamente no município de Salvaterra, às margens do rio Pará. Segundo Prestes *et al.* (2020), o rio Pará não é considerado verdadeiramente um rio no sentido estrito da etimologia, uma vez que não possui nascente própria e o fluxo não é unidirecional em sua cabeceira, portanto é considerado um sistema estuarino.

Os estuários da Amazônia têm sua dinâmica condicionada por intensos ventos, ondas, correntes e marés. Atualmente, para analisar as alterações que ocorrem em função dessas forças, utiliza-se a linha de costa (LC) como um relevante indicador geomorfológico das modificações litorâneas. A linha de costa é o segmento de contato entre o oceano/rio e o continente, correspondendo ao limite máximo atingido pela maré. Diversos critérios podem ser empregados para determinar a posição da LC, incluindo a faixa de contato entre a água e o continente, a linha de vegetação costeira e a linha de deposição de sedimentos (Moore 2000). O efeito das forças atuantes na LC varia conforme a localização da área, uma vez que está relacionado ao seu grau de exposição às dinâmicas costeiras (marés, ondas, correntes, descarga fluvial), podendo, em um mesmo município, apresentar segmentos mais protegidos (com tendência à

acrecção) e mais vulneráveis (com tendência à erosão).

Os processos de erosão e acreção resultam, sobretudo, da atuação das dinâmicas costeiras naturais, embora possam ser substancialmente influenciados por atividades antropogênicas. A ocupação irregular, as intervenções de engenharia ao longo da linha de costa e, mais recentemente, a elevação do nível do mar decorrente das mudanças climáticas, configuram-se como fatores determinantes nesse cenário (Mishra *et al.* 2020; Santos *et al.* 2021, Santos 2006). Atualmente, a importância de estudos sobre a vulnerabilidade costeira se faz necessário, muito por conta dos debates acerca do aquecimento global e às previsões da crise climática para os próximos anos, deliberada pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (Ipcc 2019), que mostram a relação entre a elevação atual do NMM e as emissões antrópicas de gases de efeito estufa (Ipcc 2013, Noaa 2017).

Nas últimas décadas, diversos mapas de vulnerabilidade têm sido elaborados para diferentes áreas costeiras no Brasil e em outras regiões do mundo, utilizando ferramentas como Sistemas de Informação Geográfica (SIG), análise computacional multivariada e modelos numéricos (Rangel-Buitrago & Anfuso 2015). As abordagens adotadas variam principalmente em relação à escala de detalhamento, à aplicação de métodos qualitativos ou quantitativos e às diferenças nos critérios considerados, que geralmente são ajustados às particularidades locais (Mallmann 2016, Alcoforado 2017). Dentre essas abordagens, destaca-se o Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC), proposto por Gornitz (1990), amplamente utilizado ou adaptado por sua eficiência em simplificar variáveis físicas e socioeconômicas, organizando-as como dados espaciais e classificando-as em diferentes graus de vulnerabilidade (Mclaughlin & Cooper 2010).

Na margem leste da ilha do Marajó, as áreas ocupadas por populações mais urbanas e outras mais tradicionais, apresentam uma vulnerabilidade significativa frente aos processos erosivos (França *et al.* 2012, Henriques 2022, Sousa & Ranieri 2023, El-Robrini *et al.* 2024). As mudanças climáticas e a consequente elevação do nível do mar são ameaças potenciais à erosão costeira. Behling *et al.* (2004) sugeriram o aumento do nível do mar durante os últimos anos (200-250 anos A.P.) como causas naturais da erosão local, tornando esta ilha mais vulnerável a tal fenômeno. Nesse contexto, torna-se fundamental investigar como os níveis distintos de erosão e acreção costeira impactam essa região, bem como avaliar o grau de vulnerabilidade costeira ao qual esses segmentos estão sujeitos, levando em consideração a geomorfologia, a hidrodinâmica e projeções de elevação do nível do mar.

O distrito de Jubim, no município de Salvaterra (Ilha do Marajó), foi o estudo de caso desta pesquisa, pois abriga uma comunidade tradicional bastante dependente do uso de terra em atividades extrativistas, fazendo-se necessário mapear as mudanças ocorrentes na linha de costa e o grau de vulnerabilidade costeira à erosão.

Sendo assim, esta pesquisa de mestrado se propõe a fornecer resultados que estão ligados com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 13 (Ação contra a mudança global do clima). Foram formuladas as seguintes questões norteadoras para direcionamento da pesquisa: Quais são as áreas em processo de acreção e/ou erosão na região de estudo? Quais são os índices de vulnerabilidade costeira para o litoral de Jubim, considerando dois cenários distintos de elevação do nível do mar propostos pelo IPCC?

A hipótese desta pesquisa é de que o índice de vulnerabilidade costeira à erosão fosse de moderado a alto na área de estudo, pois mesmo estando em uma região estuarina (mais abrigada do Oceano), existem intensas correntes de marés e geomorfologia costeira diversa (falésias, planícies arenosas, lamosas e plataformas de abrasão), que configuram diferentes níveis de vulnerabilidade quando somadas às projeções de elevação do nível do mar.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL:

Identificar os níveis de vulnerabilidade costeira no litoral da comunidade tradicional de Jubim, Salvaterra – PA.

2.2 ESPECÍFICOS:

- a) Analisar a variação da linha de costa ao longo de 33 anos (1990 a 2023).
- b) Classificar os ambientes e uso e cobertura do solo para o território de Jubim.
- c) Desenvolver um índice de vulnerabilidade costeira quanto à erosão, derivado das proposições do IPCC.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste Capítulo procedeu-se a uma revisão de estudos prévios já realizados nesta área de conhecimento, com ênfase em linha de costa, vulnerabilidade à erosão, índice de vulnerabilidade, risco e perigo.

3.1 LINHA DE COSTA

A linha de costa (LC) é definida como a linha de contato entre o continente e a superfície da água, onde ocorre o alcance máximo da maré. Entretanto, a definição da posição da LC é complexa devido aos diferentes indicadores que podem ser utilizados como base, levando em consideração a área e o objetivo do estudo. De acordo com Toure *et al.* (2019), sete tipos de indicadores podem ser empregados: linhas de referência geomorfológicas (dunas, falésias e orla protegida); limites de vegetação (permanente); níveis de maré instantâneos e limites de molhamento (linhas de maré alta ou baixa, linhas de maré na areia ou linha de deixa); dados de marés (nível médio do mar, linha d'água média da nascente); linhas de referências virtuais (linha costeira extrída da distinção de cor e luz em imagens); contorno de praia (largura da praia) e linhas de tempestade (linha de penetração de onda de tempestade).

A definição da posição da LC também é complexa por conta de estar em constante mudança em função da dinâmica natural e a ação antrópica (Santos 2021). A dinâmica natural está relacionada com a resposta à ação de ondas, maré, deriva litorânea, vento e pluviosidade, que contribuem para modelar as feições presentes na LC ao longo do tempo (França & Sousa Filho 2003). Dessa forma, a posição da LC se modifica espaço-temporalmente e é utilizada como indicador de mudanças morfológicas. O recuo da LC em direção ao continente, ao longo de anos ou décadas, reflete um período de processo erosivo. Enquanto que, seu deslocamento em direção ao corpo aquático (mar, rio, baía), representa uma fase de processo acrecional. E, em períodos que há ausência de registros de deslocamento da LC, sugere estabilidade morfológica (França & Sousa Filho 2003, Baral *et al.* 2018).

Para fins de gerenciamento costeiro, é necessário a detecção e monitoramento dos indicadores da LC em uma escala temporal, devido sua importância econômica e social, especialmente quando as áreas costeiras são as mais prejudicadas com as mudanças climáticas. A precisão desses indicadores depende da qualidade do material, das condições de trabalho e da experiência do operador (Toure *et al.* 2019). Portanto, essa precisão pode variar de um operador para outro e, mesmo para o mesmo operador, diversos resultados são possíveis dependendo das condições de trabalho. Uma boa forma de monitorar esses indicadores é o uso de sensoriamento remoto por satélite. Existe uma ampla gama de satélites cujos produtos podem

ser utilizados com sucesso na ciência costeira, especialmente para a detecção da linha de costa por meio de técnicas de processamento de imagens automatizadas ou semi-automatizadas.

A utilização de sensoriamento remoto para verificar as mudanças da LC ao longo do tempo são eficientes para análises de longo período. Além disso, a utilização de geotecnologias e imagens de satélite para o monitoramento das mudanças na linha de costa proporciona mapeamento de alta precisão, boa relação custo-benefício e minimização de erros manuais (Santos *et al.* 2021, Toure *et al.* 2019).

As transformações na linha de costa são influenciadas por processos de erosão e/ou acreção, que mantêm as zonas costeiras em constante modificação, seja em curto, médio ou longo prazo. As mudanças de curto prazo correspondem a variações cíclicas que ocorrem em intervalos de dias a um ano, associadas principalmente à sazonalidade. Em contrapartida, as alterações de médio a longo prazo são caracterizadas como mudanças progressivas, refletindo tendências acumulativas que se estendem por períodos de dezenas a milhares de anos (França 2003, França & Souza Filho 2003).

3.2 VULNERABILIDADE COSTEIRA

A vulnerabilidade representa um conjunto de características que indicam maior fragilidade em relação à incidência de um fenômeno de alta energia ou de potencial destrutivo (Mazzer *et al.* 2008). Para o caso da erosão costeira, esta vulnerabilidade pode ser identificada por uma série de parâmetros naturais e antrópicos que inclui a avaliação da evolução costeira de um dado local. De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Ipcc 2013), é fundamental avaliar o nível de vulnerabilidade costeira para localizar áreas sujeitas a desastres naturais, como a erosão e inundação.

Metodologias para avaliação da vulnerabilidade costeira, considerando riscos e impactos, têm sido desenvolvidas e aplicadas no Brasil e no exterior em ambiente SIG, adaptando-se às realidades locais. Segundo Mallmann (2016), essas metodologias diferem principalmente quanto ao nível de detalhe (escalas) e pela abordagem quantitativa, qualitativa ou semiquantitativa.

No Brasil, Souza & Suguio (2003) propuseram uma metodologia pioneira para classificação do risco à erosão, com base em dez indicadores erosivos, como presença de vegetação soterrada, escarpas erosivas, concentrações de minerais pesados e destruição de estruturas artificiais. Para a Região dos Lagos Fluminenses, Lins-de-Barros (2005) desenvolveu uma metodologia voltada à avaliação da vulnerabilidade e riscos de inundação costeira,

considerando impactos sociais no presente e projeções futuras.

França *et al.* (2022), criaram uma lista de indicadores com parâmetros físicos/geológicos, biológicos e antropogênicos utilizados em três setores distintos da costa paraense (Continental Estuarino, Insular Estuarino e Costa Atlântica do Salgado Paraense), visando investigar o grau de vulnerabilidade à erosão e acumulação sedimentar, e grau de estabilidade costeira.

A nível global, uma importante metodologia foi originalmente desenvolvida para a costa leste dos Estados Unidos e amplamente aplicada em outros países devido à sua eficiência na identificação da vulnerabilidade de diferentes tipos de praias. O Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC), proposto por Thieler & Hammar-Klose (1999) para o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), utiliza uma escala linear de 1 (menos vulnerável) a 5 (mais vulnerável) para integrar variáveis ambientais relacionadas à vulnerabilidade costeira, combinando dados qualitativos e quantitativos devidamente georreferenciados. Este índice se constitui em uma ferramenta para avaliar a sensibilidade costeira a processos erosivos. Esta metodologia trata-se de uma técnica que faz uso de seis variáveis (Abuoda & Woodroffe 2006), são elas: variação da linha de costa, a geomorfologia, a declividade da costa; a variação da maré, altura significativa de ondas e cenários de elevação do nível do mar.

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo integra a zona costeira do município de Salvaterra-PA (margem leste da Ilha do Marajó), no trecho da desembocadura dos canais/igarapés do Tapariaçu e Curuanã (latitude entre $0^{\circ}47'24.09''S$ e $0^{\circ}50'54.31''S$; longitude $48^{\circ}31'12.42''O$ e $48^{\circ}34'16.24''O$), abrangendo aproximadamente 45 km^2 (Figura 2). Souza Filho e França (2006) caracterizam esta região como pertencente à região do estuário do rio Pará, compreendida pela Baía do Marajó, sob regime de meso a macromarés, que alcançam valores máximos de 4,1 a 5,6 m, entre as ilhas de Mosqueiro e dos Guarás (DHN, 2023). Em relação à capital do Estado, a distância é de aproximadamente 80 km, e o acesso dá-se por via rodo-fluvial.

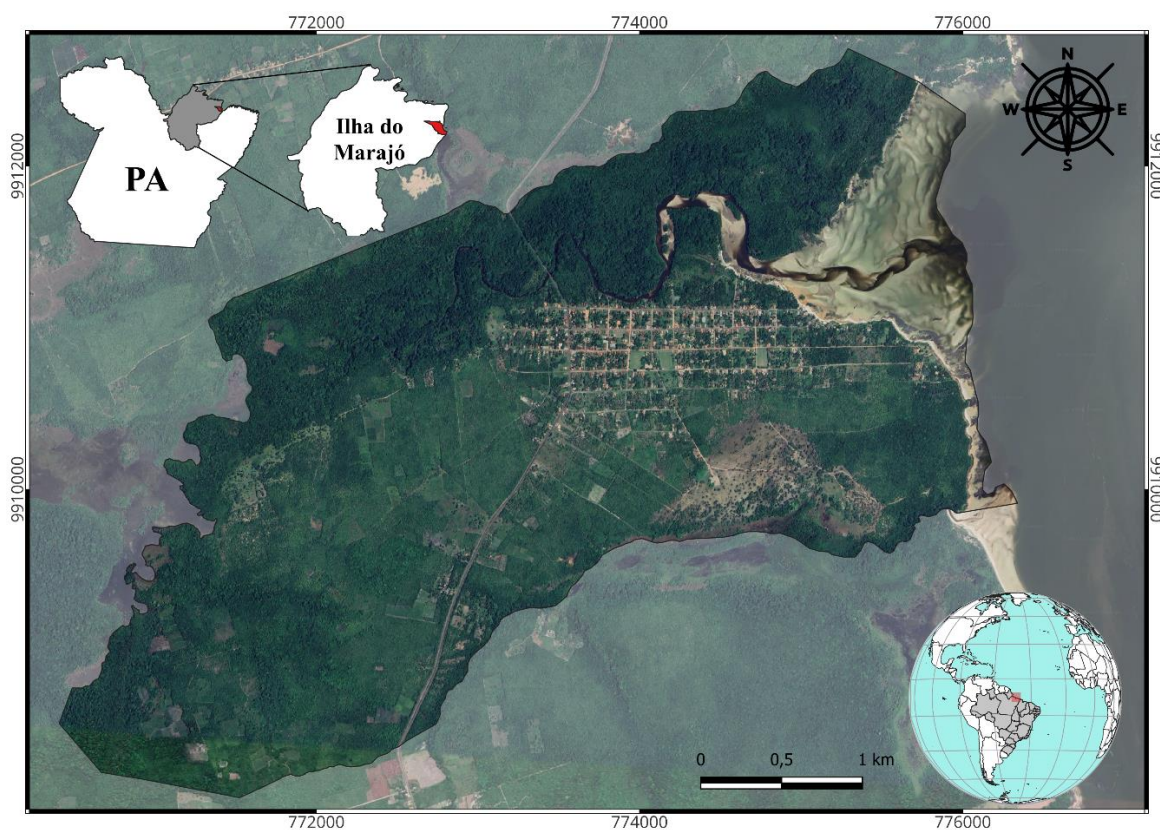


Figura 2 - Mapa de localização da comunidade de Jubim. Fonte: Autor.

4.2 GEOMORFOLOGIA

Os processos responsáveis pela formação das paisagens na área de estudo estão associados a eventos de natureza regional, como movimentos crustais de soerguimento, subsidência e falhamentos, bem como às variações relativas do nível do mar, caracterizadas por regressões e transgressões marinhas, ocorridas durante o Cenozóico Superior (do Mioceno ao Holoceno). Além disso, destaca-se a influência da hidrodinâmica costeira atual, resultante da ação das marés e das ondas da baía de Marajó (França 2003).

A região de estudo é segmentada em três subunidades morfológicas: planalto costeiro, planície lamosa de intermaré e delta de maré vazante (Souza Filho & França 2006). O planalto costeiro é caracterizado por apresentar superfície de baixos platôs, cujas cotas topográficas variam de 5 a 20 m acima do nível do mar (Ab'Saber 1967), formando um relevo suave e aplainado (Figura 3).

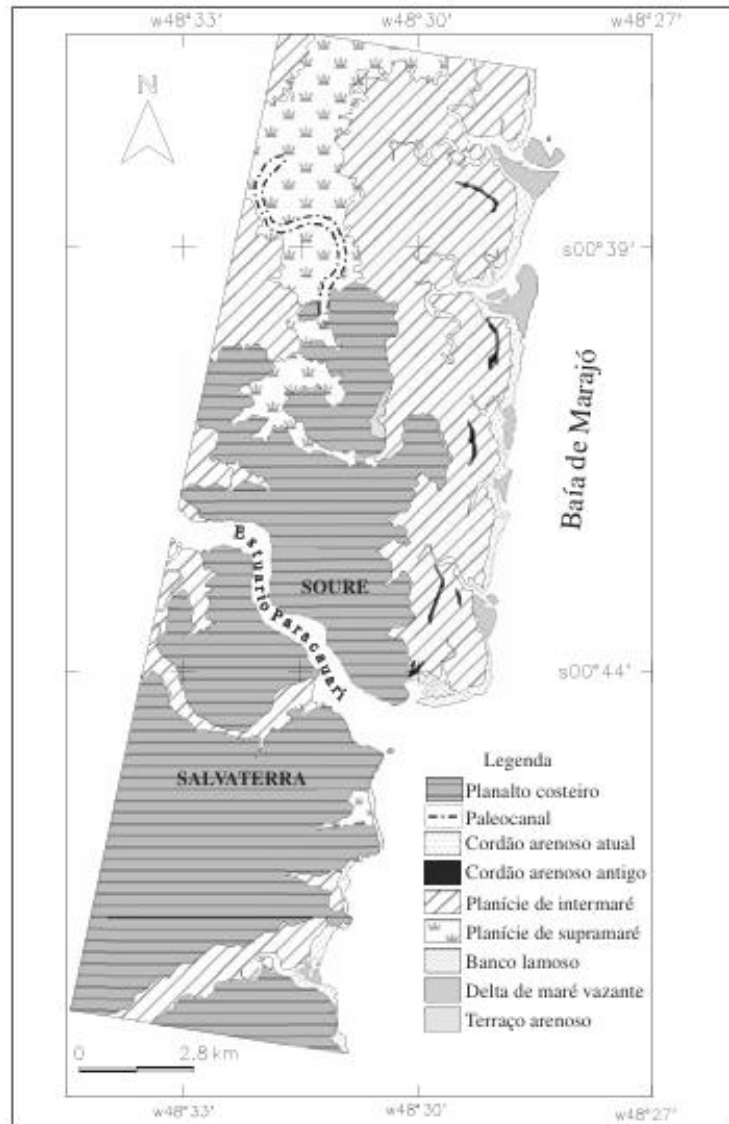


Figura 3 - Mapa morfológico da zona costeira dos municípios de Soure e Salvaterra (margem leste da Ilha de Marajó-PA).

A planície de maré é uma unidade morfológica que se desenvolve ao longo de estuários ou em costas abertas com baixo declive, recortadas e dominadas por maré, apresentando geometria alongada e paralela à linha de costa (Reineck & Singh 1980). Em Salvaterra, as planícies de intermaré ocupam o interior de paleovales escavados no planalto costeiro, seguindo até o limite de influência das marés. As principais drenagens são representadas pelos canais

Guajará e Jubim (Souza Filho & França 2006), e a cobertura vegetal é representada por florestas de mangue.

Nas desembocaduras dos canais de maré, ocorrem a formação de deltas de maré vazante. Esta morfologia é caracterizada pela presença de bancos arenosos de foz de canal, que ficam expostos na maré baixa, o qual induzem a formação de dois ou mais braços rasos do canal principal. A sedimentação predominantemente arenosa pode originar grandes bancos que se estendem em direção do mar ou baía.

4.2 OCEANOGRAFIA

A hidrografia da região é caracterizada por uma rede de drenagem formada por vários canais recentes, furos, lagos e igarapés, marcando um complexo em evolução, com destaque para os rios Jubim e Curuanã, e os igarapés do Júlio e Tapariaçu. Segundo Barboza *et al.* (2012), o movimento das águas atua como um elemento definidor da paisagem local, onde se destacam as várzeas e os igapós. Nestas regiões, a variação diária do nível da maré pode ultrapassar quatro metros (Dhn 2023). A hidrografia e a dinâmica das marés têm grande importância para a economia da comunidade devido aos aspectos como: a) meio de transporte e comunicação entre a grande maioria das cidades e vilas; e b) potencial pesqueiro e extrativista.

A Ilha do Marajó é influenciada por mesomarés semidurnas, com amplitude variando de 2,5 a 3,7 m (Prestes *et al.* 2017). As correntes de maré alcançam velocidades de 1,64 m/s durante a maré enchente e período de baixa descarga fluvial, sendo que a propagação da onda de maré é do tipo mista (Rosário 2016).

4.2 CLIMATOLOGIA

O principal fenômeno responsável por influenciar o clima da região é a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), um sistema sinótico que se manifesta nas proximidades da linha do Equador, onde ocorrem múltiplas interações entre a atmosfera e o oceano. Esses processos, associados a sistemas convectivos gerados localmente, promovem variações sazonais, modificam a direção dos ventos e afetam significativamente a temperatura das regiões Norte e Nordeste do Brasil (Carvalho & Oyama 2013, Matos & Cohen 2016).

O clima na margem leste da Ilha do Marajó é quente e úmido (Clima Equatorial Amazônico) (Köppen 1948). A umidade relativa do ar é alta durante o ano todo, mantendo-se acima dos 80% e temperatura média de 27° C (Lima *et al.* 2005). A velocidade média do vento é 6,2 m/s, com precipitação média de 2500 mm/ano, e as chuvas são persistentes, registrando-se em praticamente todos os dias no período de janeiro a junho. Devido a maior influência da

Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) entre os meses de dezembro a maio, este período é classificado como “estação chuvosa”, localmente chamado de “inverno amazônico”, com os maiores índices entre fevereiro e abril. Os meses de junho a novembro compreendem a “estação menos chuvosa ou seca”, com menores índices pluviométricos entre setembro e novembro (Lima *et al.* 2005).

5 METODOLOGIA

5.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi conduzida com o propósito de reunir informações pertinentes para fundamentar os objetivos estabelecidos nesta dissertação de mestrado e aprofundar o entendimento sobre a área de estudo. Foram consultados artigos científicos, dissertações e teses que abordavam temas relacionados a aspectos essenciais a serem explorados (IVC, LC, erosão costeira, mudanças climáticas) e que contemplavam as características da área de estudo, como clima, geomorfologia, cobertura vegetal e hidrodinâmica.

Outro aspecto relevante consistiu na análise de estudos que empregaram a extensão *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) em diferentes locais do litoral brasileiro e em outras partes do mundo. Essa investigação visa compreender como essa ferramenta tem sido aplicada e identificar resultados significativos que possam contribuir para a discussão desta dissertação de mestrado.

5.2 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

De um modo geral, a análise do IVC e da posição da LC (taxas de erosão e acreção sedimentar) nesta dissertação tem como base o uso de sensoriamento remoto, e seguiu os passos descrito no fluxograma abaixo (Figura 4).

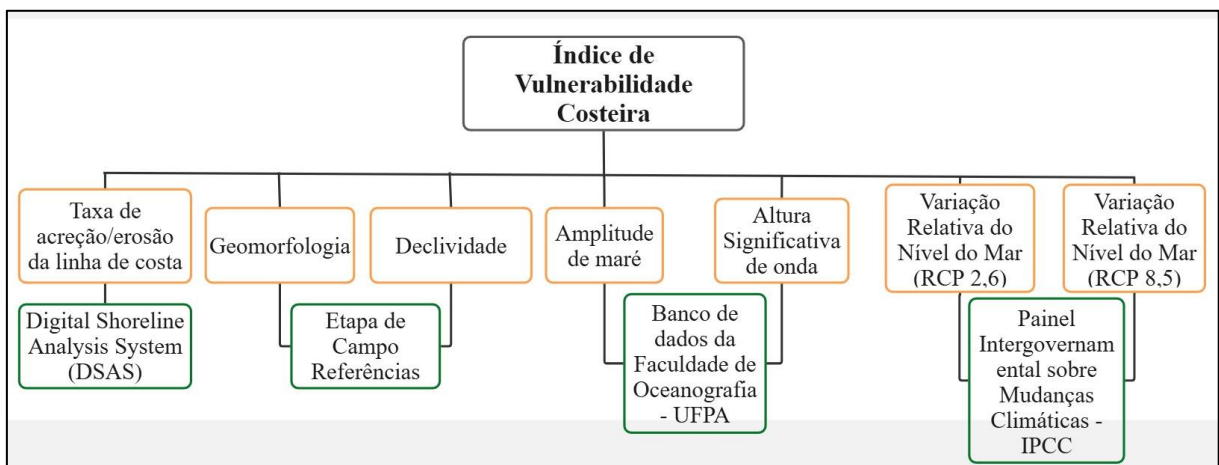


Figura 4 - Organograma do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) considerando duas projeções de elevação do nível médio do mar. Seleção de coloração verde: materiais e métodos; seleção de coloração amarela: variáveis físicas e dinâmicas; seleção de coloração preta: resultados. Organização: autor.

Foram adquiridas imagens de satélite de média resolução LANDSAT 5 TM do ano de 1990, LANDSAT 7 ETM+ de 2002, e LANDSAT 8 OLI/TIRS de 2013 e 2023, com resolução espacial de 30m, através do site da USGS (*United States Geological Survey*) (Tabela 1). A seleção das imagens para essa região apresenta algumas limitações, uma vez que, durante a

estação chuvosa, a cobertura de nuvens na área de estudo pode atingir até 90%. Portanto, os anos das imagens foram escolhidos com base na menor porcentagem de nuvens presentes (variando de 0 a 30%), visando proporcionar uma melhor visualização da LC.

Tabela 1 - Apresentação dos anos das imagens de satélite, o modelo e suas respectivas bandas.

Ano	Satélite	Sensor	Resolução espacial	Bandas	Data adquirida	Eventos extremos
1990	Landsat -5	TM	30m	3,4	09/05	El Niño
2002	Landsat -7	ETM+	30m	3,4	07/09	El Niño
2013	Landsat-8	OLI/TIRS	30m	4,5,8	18/07	S/ocorrência
2023	Landsat-8	OLI/TIRS	30m	4,5,8	23/07	La Niña

Fonte: Adaptado de USGS (2024).

Inicialmente, foi realizada a composição do NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) das imagens e aplicada a reprojeção das coordenadas para o sistema SIRGAS2000/UTM Zona 22S. Em seguida, a linha de costa (LC) foi vetorizada por meio da interpretação visual das imagens, considerando o limite entre a vegetação e a água. Todos esses procedimentos foram executados no programa ArcMap 10.5, do software ArcGIS.

Após a vetorização das linhas de costa correspondentes aos anos de 1990, 2002, 2013 e 2023, os vetores foram sobrepostos para possibilitar a aplicação da ferramenta DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*). Esse processo permitiu a obtenção de dados quantitativos relacionados às medições lineares e às taxas de variação da linha de costa, bem como a geração de produtos cartográficos. Foram empregados os parâmetros NSM e EPR do DSAS, descritos na Tabela 2 e Figura 5, por se adequarem a análise necessária da mudança da posição da LC, tendo como resultados as variações em metros nos 33 anos de análise (NSM) e taxas médias de variação por ano (EPR).

As fases do ENOS (El Niño-Oscilação Sul) são fenômenos climáticos que influenciam principalmente o volume de precipitação na região. Durante os anos analisados, foram identificados dois eventos de El Niño (EN), um evento de La Niña (LN) e um período sem ocorrência de eventos significativos. Os episódios de El Niño foram registrados em 1990 e 2002, com intensidades alta e moderada, respectivamente. Em 2023, foi observado um evento de La Niña de intensidade moderada, enquanto em 2013 não houve registro de nenhum dos fenômenos. A intensidade desses eventos pode afetar o balanço sedimentar da região em curtos períodos, dependendo de sua magnitude (Cptec/Inpe, 2024; Fernandez & Muehe 2006; Kayano

et al. 2016).

Tabela 2 - Parâmetros quantitativos disponíveis no DSAS.

Parâmetros do DSAS	Descrição
NSM (<i>Net Shoreline Movement</i>)	Mostra a distância (m) entre as LC's mais recentes e mais antigas (NSM+ leva em consideração a imprecisão da linha).
EPR (<i>End Point Rate</i>)	Determina a taxa de variação da costa por simples razão de distância (m) por tempo das datas das linhas pela distância referida.

Fonte: Adaptado de Conti & Rodrigues (2011).

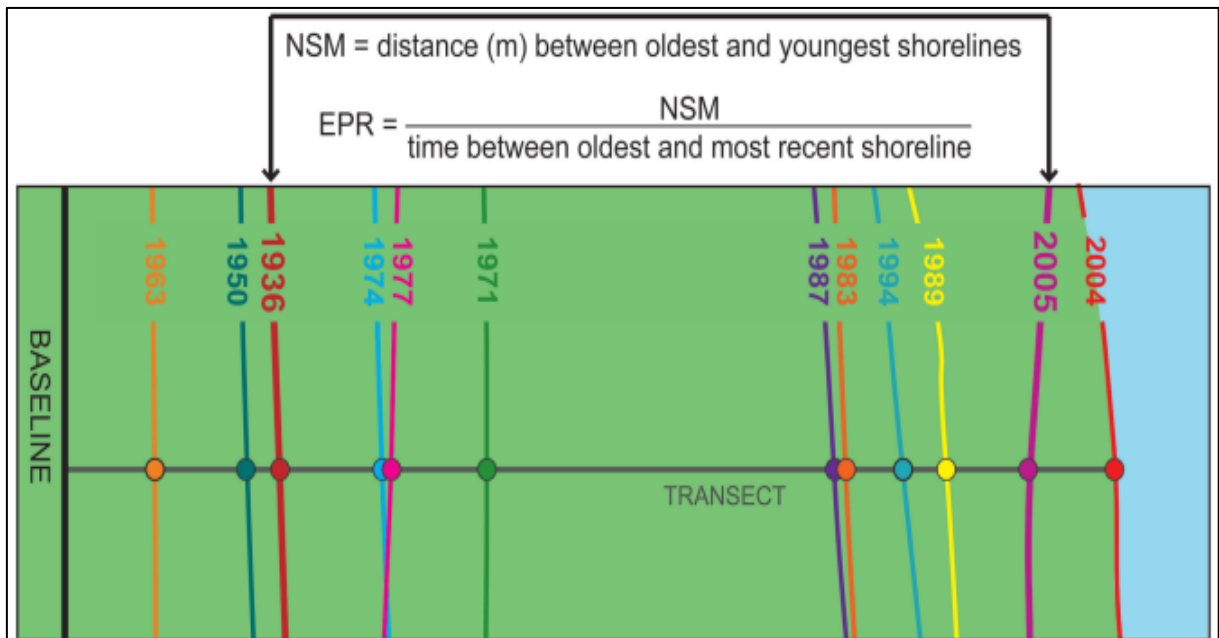


Figura 5 - Representação da relação entre as estatísticas de variação da linha de costa: Net Shoreline Movement (NSM) e End Point Rate (EPR). O NSM corresponde à distância, medida ao longo do transecto em metros (m), entre a linha de costa mais antiga (1936, indicada em vermelho) e a mais recente (2005, indicada em magenta). Já o EPR é calculado dividindo-se a distância NSM pelo intervalo de tempo entre essas duas linhas costeiras (1936 e 2005), que, neste exemplo, corresponde a 69 anos. Fonte: Himmelstoss *et al.* (2018).

Com a metodologia definida e aplicada, foi possível reunir e analisar os dados necessários para o desenvolvimento dos estudos que compõem esta dissertação. A seguir, apresentam-se os dois artigos científicos produzidos a partir da investigação, com abordagem necessária e com recorte específico do objeto de estudo. O primeiro artigo trata da dinâmica da linha de costa, com foco na identificação de áreas de erosão e suas respectivas taxas. Já o segundo artigo dedica-se à análise da vulnerabilidade costeira, considerando aspectos físicos e climáticos. Ambos os textos foram elaborados de forma a garantir coerência com os objetivos

da pesquisa e, juntos, contribuem para uma compreensão integrada da dinâmica costeira da área estudada.

6 ARTIGO 1 “EVOLUÇÃO DA LINHA DE COSTA EM VILA TRADICIONAL DA AMAZÔNIA: JUBIM, ILHA DO MARAJÓ, PARÁ”

Este primeiro artigo foi submetido para a revista RBGF – Revista Brasileira de Geografia Física

RESUMO

A linha de costa (LC), que delimita o contato entre oceano e continente, é um marcador essencial para entender a dinâmica dos ambientes costeiros, refletindo a influência de processos naturais, como ondas, marés correntes, ventos, tempestades; e de ações antrópicas, como ocupação humana e obras costeiras. A análise multiespectral e multitemporal da LC permite identificar tendências erosivas e deposicionais, essenciais para a gestão da zona costeira. Na ilha do Marajó, especificamente na comunidade costeira de Jubim, município de Salvaterra, os processos naturais estuarinos predominam na modificação da LC. Dessa maneira, realizou-se uma avaliação multitemporal (33 anos) da variação da LC nesta comunidade tradicional através do uso de imagens de satélite Landsat e da ferramenta *Digital Shoreline Analysis System*. A área de estudo foi limitada em três setores (Norte: praia do Salazar, Central: praia das Meninas e Sul: praias da Baleia e do Curuanã). De 1990 a 2023, o recuo médio linear obtido para toda área de estudo foi de -35,24 m, enquanto o avanço médio linear foi de 15,10 m, indicando o predomínio da erosão costeira. As taxas mais elevadas de variação foram registradas entre os anos de 1990 e 2002. As áreas afetadas por processos erosivos se concentraram principalmente no Setor Norte, área de menor gradiente topográfico, cujo recuo da vegetação de manguezal na LC e a sobreposição da praia do Salazar sobre esse ecossistema é observado. Em contrapartida, os setores Central e Sul demonstraram melhor estabilidade, devido as falésias na LC, que permitem menor avanço da erosão costeira.

Palavras-chave: Análise Multitemporal, Erosão Costeira, Praia Estuarina, Geoprocessamento.

ABSTRACT

The shoreline, which marks the boundary between the ocean and the continent, is an essential indicator for understanding coastal dynamics, reflecting the influence of natural processes such as waves, tides, currents, winds, and storms, as well as anthropogenic activities like human occupation and coastal structures. Multispectral and multitemporal analysis of the shoreline allows for the identification of erosional and depositional trends, which are crucial for coastal zone management. On Marajó Island, specifically in the coastal community of Jubim, located in the municipality of Salvaterra, estuarine natural processes predominantly drive changes in the shoreline. A multitemporal assessment (33 years) of shoreline variation in this traditional community was conducted using Landsat satellite images and the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) tool. The study area was divided into three sectors (North: Salazar Beach, Central: Meninas Beach, and South: Baleia and Curuanã Beaches). From 1990 to 2023, the average linear retreat for the entire study area was -35.24 m, while the average linear advance was 15.10 m, indicating a predominance of coastal erosion. The highest rates of variation were recorded between 1990 and 2002. Erosional processes were mainly concentrated in the North Sector, an area with a lower topographic gradient, where mangrove vegetation retreat along the LC and the overlapping of Salazar Beach onto this ecosystem were observed. In contrast, the Central and South Sectors demonstrated greater stability, attributed to cliffs along the LC, which reduce the extent of coastal erosion.

Keywords: Multitemporal Analysis, Coastal Erosion, Estuarine Beach, Geoprocessing

INTRODUÇÃO

A Zona Costeira (ZC) é classificada como um espaço geográfico delimitado pela interação entre oceano e o continente, que está sob efeitos dos processos físicos marítimos, continentais e atmosféricos (Souza e Andrade, 2024), engloba diferentes ecossistemas e unidades geomorfológicas, além de seus recursos renováveis ou não (Brasil, 1988). A linha de contato oceano-continente, é definida como Linha de Costa (LC), onde ocorre o alcance máximo da maré. Há diversos critérios que definem a posição da LC, como a faixa de contato água/continente, linha de vegetação litorânea e a linha de deixa (Moore, 2000).

Sua posição, que varia tanto no espaço quanto no tempo, faz da LC um importante indicador geomorfológico da dinâmica no ambiente costeiro (Ding et al., 2019), devido aos processos oceânicos (ondas, marés, correntes), continentais (descarga fluvial, movimentos neotectônicos), meteorológicos (ventos, tempestades, precipitações) e antrópicos (destruição de ecossistemas costeiros, obras costeiras) que atuam nesta zona, modelando o relevo local (Baía e Ranieri, 2023). O deslocamento da LC em direção ao continente ou ilha, reflete processos erosivos (Baral et al., 2018). Por outro lado, seu movimento em direção ao mar/baía/estuário, representa avanço ou acreção.

Por meio do sensoriamento remoto, as taxas de avanço e recuo da LC constituem uma importante ferramenta para a determinação das tendências erosivas ou deposicionais de setores costeiros. Meneses e Almeida (2012) destacaram que o uso desta ferramenta fornece dados confiáveis sobre objetos físicos e sobre o ambiente natural por meio do processo de registro, medição, e interpretação de imagens e representações digitais dos padrões de energia derivados dos sistemas sensores sem contato físico (Colwell, 1997).

Entre os métodos científicos disponíveis para a observação e interpretação da dinâmica da LC, o mais preciso é a análise multiespectral e multitemporal, que se baseia na aquisição de múltiplas imagens de uma área específica, em diferentes bandas espectrais e períodos. Essa abordagem possibilita o monitoramento contínuo de fenômenos ao longo do tempo, permitindo uma compreensão mais aprofundada dos processos que influenciam o ambiente e sua significância (Jensen, 2019; Colwell, 1997; Chu et al., 2006). Dentre os exemplos de recursos que se utilizam do sensoriamento remoto e geoprocessamento, está o Digital Shoreline Analysis System – DSAS (Thieler et al., 2009), desenvolvido pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), que é uma ferramenta de acesso livre que funciona como extensão dentro do SIG ArcGIS. Ele permite calcular estatisticamente as taxas de variação da LC de uma série

temporal usando transectos perpendiculares a um determinado trecho estudado.

O DSAS tem sido aplicado em diversas áreas do mundo para rastrear e quantificar mudanças na LC, como em Portugal (Gonçalves et al., 2019), na Índia (Shenbagaraj et al., 2021), Itália (Minervino Amodio et al., 2022) e Egito (Abd-Elhamid et al., 2022, 2025). No Brasil, destacando o Estado do Pará, pesquisas recentes sobre as alterações na morfologia de alguns setores costeiros revelaram o comportamento da LC ao longo do tempo (Baía et al., 2021; Henriques, 2022), apontando que, especialmente nas regiões de desembocaduras de estuários, ocorre acreção sedimentar. No entanto, essas áreas também podem ser impactadas por processos erosivos, principalmente resultantes da ação das correntes de maré, quando o aporte sedimentar não é suficiente. O acompanhamento da evolução da LC é essencial para uma gestão adequada da zona costeira, especialmente aquelas cujas especificidades ambientais originam uma alta dinâmica (Matos et al., 2022), tal como a região da foz do rio Amazonas, onde se localiza a Ilha do Marajó.

Estudos precisam ser desenvolvidos na Ilha do Marajó, dada sua grande importância internacional, sendo a maior ilha fluviomarina do mundo (Lisboa, 2012). Ela apresenta alta biodiversidade e está bastante vulnerável às mudanças climáticas atuais, assim como muitos locais da Amazônia, cuja zona costeira desempenha um papel fundamental ao abrigar atividades econômicas e ambientais essenciais para o desenvolvimento da região, como a ostreicultura, a reprodução de espécies, e as práticas tradicionais de pesca (Chagas et al., 2019).

Henriques et al. (2024) demonstraram que a costa oriental da Ilha do Marajó apresenta diversos setores sujeitos à erosão, em grande parte decorrente da elevação do nível do mar e de processos oceanográficos. Nessa região, encontram-se diferentes comunidades tradicionais que habitam as margens da Baía do Marajó. Assim, a avaliação detalhada da dinâmica e modificações na LC em escala reduzida se torna indispensável para o gerenciamento destas comunidades.

Desta forma, o objetivo deste estudo foi compreender a evolução da LC na comunidade de Jubim, localizada na costa oriental da Ilha do Marajó, Amazônia. Buscou-se identificar locais com erosão, estabilidade ou acreção costeira através de uma análise multitemporal de imagens de satélite para um período de 33 anos (1990 a 2023). Por se tratar de uma comunidade tradicional, rural, com baixa densidade demográfica, majoritariamente os processos oceanográficos impactam a costa em comparação às atividades antrópicas. Sendo assim, partiu-se da hipótese de que trechos com maior exposição à atuação dos agentes físicos (maré, ondas

e correntes), como praias arenosas em áreas de planície, apresentariam maior mobilidade da LC (principalmente erosão costeira), do que as praias em áreas de falésia e plataforma de abrasão. Estas tenderiam a uma maior estabilidade.

MATERIAIS E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

A Vila de Jubim integra a zona costeira do município de Salvaterra-PA (margem leste da Ilha do Marajó), no trecho da desembocadura dos igarapés do Tapariaçu e Curuanã (latitude entre $0^{\circ}47'24.09''S$ e $0^{\circ}50'54.31''S$; longitude $48^{\circ}31'12.42''O$ e $48^{\circ}34'16.24''O$), que desaguam na Baía do Marajó, especificamente no estuário do Rio Pará. A área abrange aproximadamente 45 km^2 (Figura 6) e está distante cerca de 80 km da capital do Estado, Belém, cujo acesso ocorre por via rodofluvial.

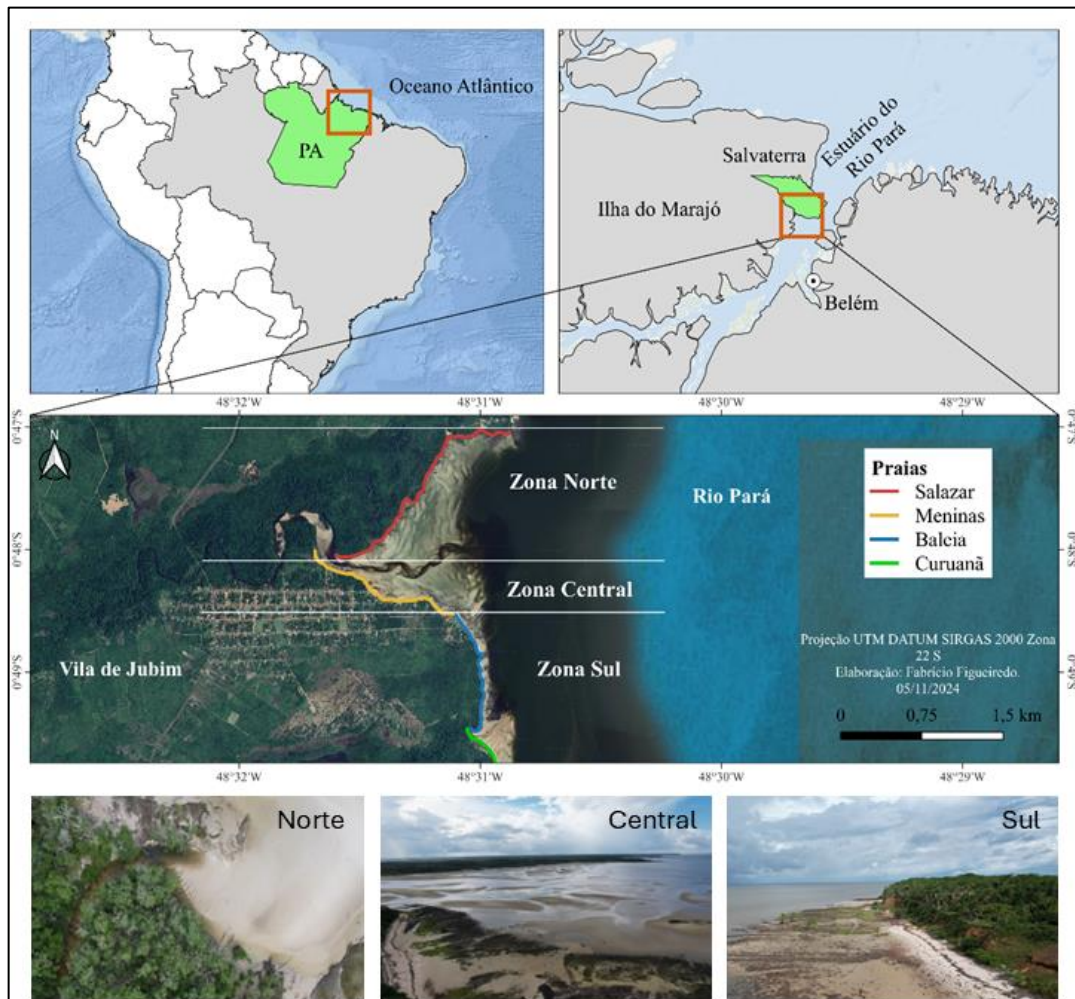


Figura 6 - Localização da área de estudo (Vila de Jubim e adjacências), com destaque para as praias onde foi realizada a pesquisa. Fonte: Autor.

A Ilha do Marajó, maior ilha do arquipélago na foz do rio Amazonas, apresenta 50.000 km^2 (El-Robrini et al., 2018). A ilha apresenta uma paisagem fluvial-estuarina

multidimensional, representando uma área muito suscetível às mudanças climáticas na Amazônia (Vousdoukas et al., 2020; Henriques, 2022). Enquanto a população da Ilha do Marajó depende tradicionalmente dos serviços ecossistêmicos para sustentar a sua vida, as projeções climáticas para a ilha indicam que a maior parte dela, em área de planície, poderá ser inundada nas próximas décadas (Henriques, 2022).

A região da margem leste da ilha é segmentada em subunidades morfológicas: planalto costeiro, planície de intermaré e delta de maré vazante (Souza Filho e França, 2006), as últimas sobre área de planície costeira. O planalto costeiro é caracterizado por apresentar superfície de baixos platôs, cujas cotas topográficas variam de 5 a 20 m acima do nível do mar (Ab'Saber, 1967), formando um relevo suave e aplainado.

A planície de intermaré é uma unidade morfológica que se desenvolve ao longo de estuários ou em costas abertas com baixo declive, recortadas e dominadas por maré, apresentando geometria alongada e paralela à linha de costa (Reineck e Singh 1980). Uma das principais drenagens da margem oriental da ilha é representada pelo canal do Jubim, cuja cobertura vegetal é dominada por florestas de mangue.

Na margem leste da ilha de Marajó, os canais de maré apresentam orientação SW-NE, conseqüentemente induzindo correntes de maré que fluem na direção 45° (vazante) e 225° (enchente) (El-Robrini et al., 2024).

Nas desembocaduras dos canais de maré da Ilha do Marajó, ocorrem a formação de deltas de maré vazante. Esta morfologia é caracterizada pela presença de bancos arenosos de foz de canal, que ficam expostos na maré baixa, o qual induzem a formação de dois ou mais braços rasos do canal principal (Souza Filho e França, 2006).

A Ilha do Marajó é influenciada por mesomares semidurnas, com amplitude variando de 2,5 a 3,7 m (Prestes et al., 2017). As correntes de maré alcançam velocidades de 1,64 m/s durante a maré enchente e período de baixa descarga fluvial, sendo que a propagação da onda de maré é do tipo mista (Rosário, 2016).

O clima na margem leste da Ilha do Marajó é quente e úmido (Clima Equatorial Amazônico) (Köppen, 1948). A umidade relativa do ar é alta durante o ano todo, mantendo-se acima dos 80% e temperatura média de 27°C (Lima et al., 2005). A velocidade média do vento é 6,2 m/s, e a precipitação média de 2500 mm/ano.

O ciclo sazonal das chuvas na costa amazônica é marcado fortemente pelo movimento migratório latitudinal da ZCIT, definido como o máximo em precipitação tropical ou como um

cinturão tropical de nuvens convectivas, e sua posição média varia sazonalmente de 9°N a 2°N no Oceano Atlântico Equatorial (Utida et al., 2019).

Devido a maior influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) entre os meses de dezembro a maio, classifica-se o período como “estação chuvosa”, com os maiores índices entre fevereiro e abril. Os meses de junho a novembro compreendem a “estação menos chuvosa ou seca”, com menores índices pluviométricos entre setembro e novembro (Lima et al., 2005).

PROCESSOS METODOLÓGICOS

O processo metodológico (Figura 7) abrangeu a obtenção de imagens gratuitas disponibilizadas por plataformas públicas, o uso de infraestrutura técnica apropriada, o processamento dos dados utilizando ferramentas de geoprocessamento e, por fim, a análise dos resultados obtidos. A aplicação de técnicas de geoprocessamento é fundamental para a execução e sucesso do estudo, tornando indispensáveis as etapas de laboratório e processamento de dados para a compreensão da dinâmica da área de estudo.

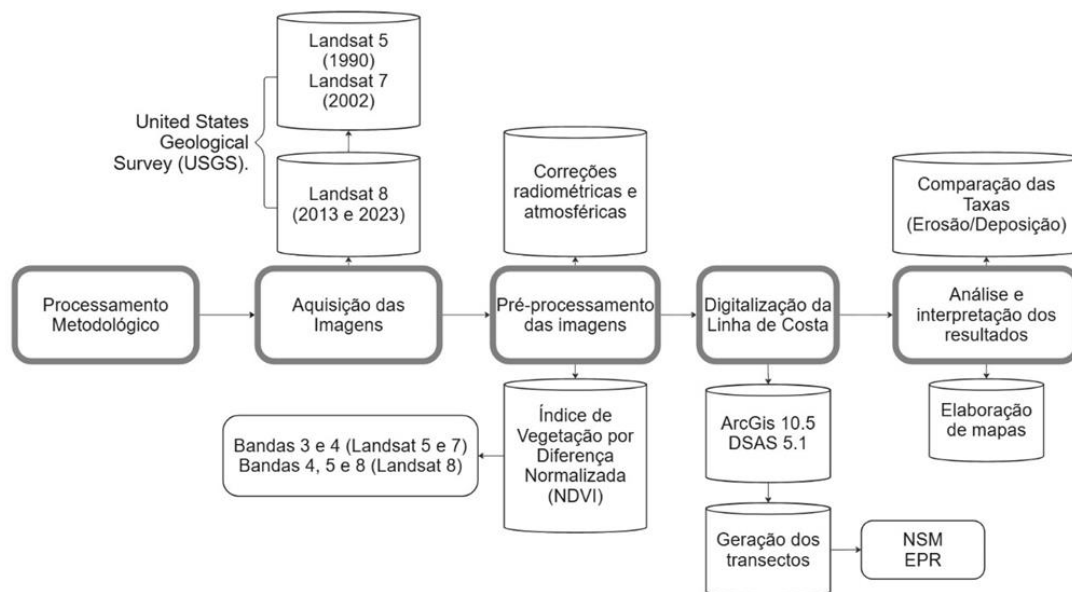


Figura 7 - Fluxograma da metodologia aplicada. Organização: Autor.

AQUISIÇÃO E PRÉ-PROCESSAMENTOS DAS IMAGENS

Para a análise da variação da LC foram utilizadas imagens de média resolução (Tabela 3) dos satélites Landsat 5 TM de 1990, Landsat 7 ETM+ de 2002, com resolução espacial de 30 m, e Landsat 8 OLI/TIRS de 2013 e 2023, com resolução espacial aprimorada para 15 m após a aplicação da ferramenta pan-sharpening (fusão da banda pancromática). Todas as imagens foram obtidas por meio do portal USGS, disponível no site EarthExplorer, no endereço

eletrônico: <https://earthexplorer.usgs.gov>.

Tabela 3 - Apresentação dos anos das imagens de satélite, o modelo e suas respectivas bandas. Adaptado de USGS (2024).

Data de Aquisição	Satélite	Sensor	Bandas	Resolução Espacial	Condição da Maré
09/05/1990	Landsat 5	TM	3, 4	30m	Vazante
07/09/2002	Landsat 7	ETM+	3, 4	30m	Vazante
18/07/2013	Landsat 8	OLI/TIRS	4, 5, 8	30/15m (pan)	Vazante
23/07/2023	Landsat 8	OLI/TIRS	4, 5, 8	30/15m (pan)	Vazante

Inicialmente, realizou-se correções radiométricas e atmosféricas semiautomáticas, utilizando as ferramentas disponíveis no software ArcGIS 10.5, o que permite minimizar efeitos atmosféricos e garantir a consistência entre diferentes cenas. A área de estudo foi recortada e convertida para o sistema de coordenadas UTM e zona 22 S, assegurando a análise na escala e localização corretas.

As bandas de comprimento de onda visível e infravermelho próximo dos satélites Landsat foram empregadas para a identificação de superfícies de terra e água ao longo da LC. As faixas de comprimento de onda no espectro infravermelho são particularmente eficazes para diferenciar elementos aquáticos e terrestres, dado que a energia do infravermelho médio é intensamente absorvida pela água, enquanto a vegetação, a areia e outras características costeiras apresentam alta refletância nessa faixa espectral (Alesheikh et al., 2007). Assim, nesta pesquisa, foi possível aplicar o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), que se mostrou mais eficiente do que outros métodos, oferecendo maior precisão técnica para a detecção da LC (Mishra et al., 2019).

DIGITALIZAÇÃO DA LINHA DE COSTA (LC)

Métodos semiautomáticos foram utilizados para identificação da LC e digitalização delas na área de estudo para cada ano estipulado (Santos et al., 2021). Assim, todas as LC's delineadas para diferentes anos (1990, 2002, 2013 e 2023) foram sobrepostas e usadas para realizar a análise de mudança entre elas (Figura 3). Por meio da extensão Digital Shoreline Analysis System (DSAS) executada no software ArcGis 10.5, as LC's foram digitalizadas e calculados parâmetros estatísticos propostos por Thieler et al. (2009). Foram utilizados os parâmetros Net Shoreline Movement (NSM) e End Point Rate (EPR). O primeiro parâmetro se refere ao deslocamento líquido da LC, definido como a distância entre a posição da linha de

costa mais antiga e a mais recente ao longo de cada transecto analisado. O segundo parâmetro é determinado pela razão entre a distância do deslocamento da LC e o intervalo de tempo decorrido entre as datas das LC's mais antiga e mais recente (Conti e Rodrigues, 2011).

Para avaliar a variação espaço-temporal nas posições das LC, foi desenhada uma linha de base hipotética, paralela à linha costeira, localizada na zona offshore. A partir dessa linha de base, foram gerados transectos perpendiculares, igualmente espaçados a intervalos de 1 m. As estatísticas das taxas de mudança (NSM e EPR) foram obtidas pelas interseções entre esses transectos e a LC.

Conforme descrito por Maiti e Bhattacharya (2009), valores positivos nas taxas de mudança indicam deslocamento da LC em direção ao mar (ou estuário), caracterizando deposição ou acreção costeira. Em contrapartida, valores negativos representam deslocamento em direção ao continente, refletindo processos de erosão.

RESULTADOS

Os resultados obtidos a partir da análise da variabilidade multitemporal da LC (Figura 8) estão apresentados na Tabela 4. Observa-se que as taxas positivas (>0) do parâmetro EPR indicam deslocamento da linha de costa em direção ao estuário do Rio Pará, caracterizando valores associados à acreção ou avanço costeiro. Por outro lado, as taxas negativas (<0) refletem um deslocamento em direção ao continente/ilha, representando a ação erosiva ou recuo costeiro. Valores entre -15 a 15 m no parâmetro NSM indicam estabilidade costeira, adotado como intervalo de confiança, visto que as imagens de satélite utilizadas apresentam resolução espacial de 15 m após o fusinamento com a banda panconromática.

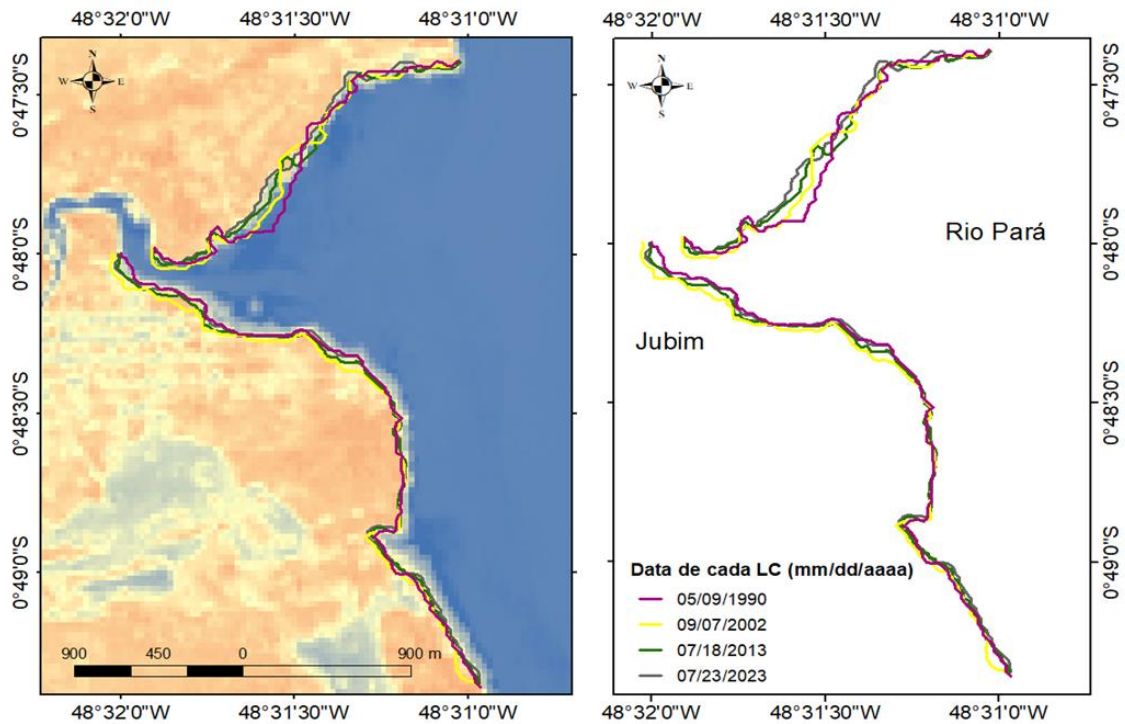


Figura 8 - Posição das linhas de costa para cada ano analisado. Fonte: Autor, 2024.

Para facilitar a análise, a zona costeira de Jubim e adjacências foi segmentada em três setores (Figura 9): a) Setor Norte (Praia do Salazar, na divisa da Vila de Jubim e Passagem Grande); b) Setor Central (Praia das Meninas); e c) Setor Sul (Praia da Baleia e norte da Praia do Curuanã). Assim, os Setores Central e Sul exibem um processo predominantemente de acreção/estabilidade, com destaque para o Sul, onde o número de transectos com características erosivas e acrecionais foi praticamente equivalente, totalizando 942 e 973, respectivamente.

Tabela 4 - Taxas de mudança da LCLinha de costa usando os métodos EPR (m/ano) e NSM (m) para todo o período analisado (1990 – 2023).

Estatística descritiva	Setor Norte	Setor Central	Setor Sul
Número total de <i>transectos</i>	2449	1491	1915
Deslocamento médio (m)	-27,35	-22,06	2,31
Número total de <i>transectos</i> com erosão	1344	1368	942
Número total de <i>transectos</i> com acreção	1105	123	973
% do número total de <i>transectos</i> onde a erosão foi registrada	54,88	91,75	49,19
% do número total de <i>transectos</i> onde a acreção foi registrada	45,12	8,25	50,81

Mudança média da LC (m/ano)	-0,82	-0,66	9,1
Máximo valor de erosão (m/ano)	-5,05	-2,69	-3,61
Média das taxas de erosão (m/ano)	-1,99	-0,74	-0,21
Máximo valor de acreção (m/ano)	1,96	0,38	1,13
Média das taxas de acreção (m/ano)	0,59	0,14	0,34

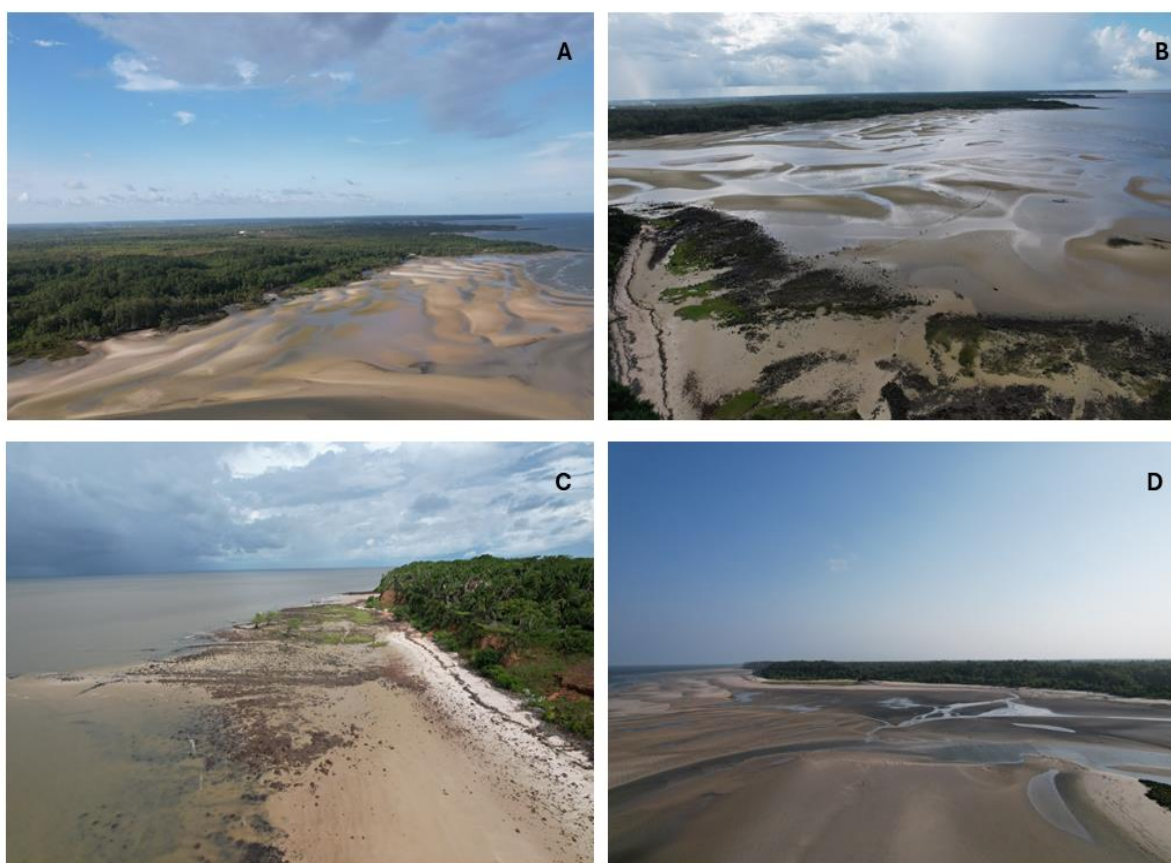


Figura 9 - Costa de Jubim e adjacências (Salvaterra/PA). A) Praia do Salazar, divisa Jubim-Passagem Grande (Setor Norte). B) Praia das Meninas (Setor Central). C) Praia da Baleia e D) Curuanã (Setor Sul). Fonte: Autor, 2024.

O litoral de Jubim apresenta um predomínio de erosão da LC, especialmente no Setor Norte. Os valores obtidos para o período de 1990 a 2023 nos parâmetros NSM e EPR (Tabela 4) demonstraram principalmente resultados negativos, indicando um recuo da LC ao longo de todo o período analisado, o que reforça a tendência erosiva.

No Setor Norte, com um total de 2449 transectos analisados, as taxas de NSM indicaram um deslocamento médio da LC de -27,35 m, com uma taxa de recuo de -1,99 m/ano e uma taxa de avanço de 0,59 m/ano. No Setor Central, baseado em 1491 transectos, o deslocamento médio

registrado foi de -22,06 m, com uma taxa de recuo de -0,74 m/ano e de avanço de 0,14 m/ano. Por fim, no Setor Sul, a análise de 1915 transectos revelou um deslocamento médio da LC de 2,31 m, com taxas de recuo e avanço de -0,21 m/ano e 0,34 m/ano, respectivamente.

O recuo total da LC na área de estudo corresponde a 62,41% dos transectos analisados, com deslocamento máximo de -167,7 m no Setor Norte. Em consonância, dos 2201 transectos que indicaram acreção costeira (37,59%), o maior avanço da LC também foi verificado no Setor Norte, cujo deslocamento foi de até 65,11 m. Portanto, observou-se que a maior mobilidade na posição da LC ocorreu no Setor Norte, atribuído à morfologia costeira local de baixo gradiente topográfico.

O seguimento praiado do Setor Norte (praia do Salazar), que se estende por 2,63 km (Tabela 5), apresentou recuo médio da LC, entre 1990 e 2002, de -3,01 m/ano, indicando uma tendência exclusivamente erosiva. Já para os períodos de 2002-2013 e 2013-2023, a taxa média de variação foi maior, sendo de -10,07 m/ano e -18,72 m/ano, respectivamente (Tabela 6).

Tabela 5 - Características da LC nos setores Norte, Central e Sul. Elaborado pelo autor.

Setor	Extensão (km)	Orientação	Sistemas associados
Norte	2,63	NE - SW	Manguezal, estuário, delta de maré
Centro	1,74	W - L	Estuário, delta de maré, falésias
Sul	2,31	N - S	Falésias, plataformas de abrasão, canal de maré

Tabela 6 - Dados gerais da evolução da LC expressos em taxas anuais e em recuo ou avanço linear ao longo dos transectos (μ - valores médios; Min.- valores mínimos e Max.- valores máximos; valores positivos indicam deposição e negativos erosão).

			Setor		
			Setor Norte	Central	Setor Sul
		Nº de transectos	2449	1491	1915
Taxa de variação (m/ano)	1990-2002	μ	-0,24	-4,16	-0,84
		Mín.	-10,25	-8,63	-5,53
		Máx.	8,95	0	1,83
	2002-2013	μ	-0,99	2,22	1,3
		Mín.	-6,2	-0,13	-2,73

		Máx.	8,61	5,53	11,43
		μ	-1,87	1,91	0,7
	2013-2023	Mín.	-6,21	-2,75	-14,26
		Máx.	5,72	5,12	3,42
Recuo (-) e avanço (+) da LC (m)	1990-2002	μ	-3,01	-51,33	-10,41
	2002-2013	μ	-10,7	24,15	14,09
	2013-2023	μ	-18,72	19,16	7

O Setor Central, correspondente à Praia das Meninas, com extensão de 1,74 km, apresentou predomínio da erosão no período de 1990 a 2002, com recuo linear médio de -51,33 m (Tabela 6). Em contrapartida, nos períodos subsequentes, verificou-se um predomínio de processos acrecionais, com avanços lineares médios de 24,15 m e 19,16 m, nos intervalos de 2002 a 2013 e 2013 a 2023, respectivamente (Tabela 6).

Semelhança ocorreu no Setor Sul, onde a tendência erosiva foi observada apenas entre 1990 e 2002, com um recuo linear médio de -10,41 m. Nos períodos posteriores, destacaram-se os processos de acreção, com avanços lineares médios de 14,09 m e 7,00 m para os intervalos de 2002 a 2013 e 2013 a 2023, respectivamente (Tabela 6).

Os resultados apontam que, em uma escala temporal de médio prazo (anos de 1990 a 2023), houve predomínio do recuo da LC, atribuído principalmente ao Setor Norte (Figura 10 e 11), cujo indicativo de erosão costeira abrangeram 91,75% dos transectos analisados no setor.

Nos Setores Central e Sul, verificou-se tendência mais próxima à estabilidade costeira, caracterizada pelo balanço entre os valores de avanço e recuo da LC. No Setor Central, 54,88% dos transectos indicaram erosão e 45,12% acreção costeira. Já no Setor Sul, 49,19% dos transectos apresentaram comportamento erosivo e 50,81% acreção da LC.

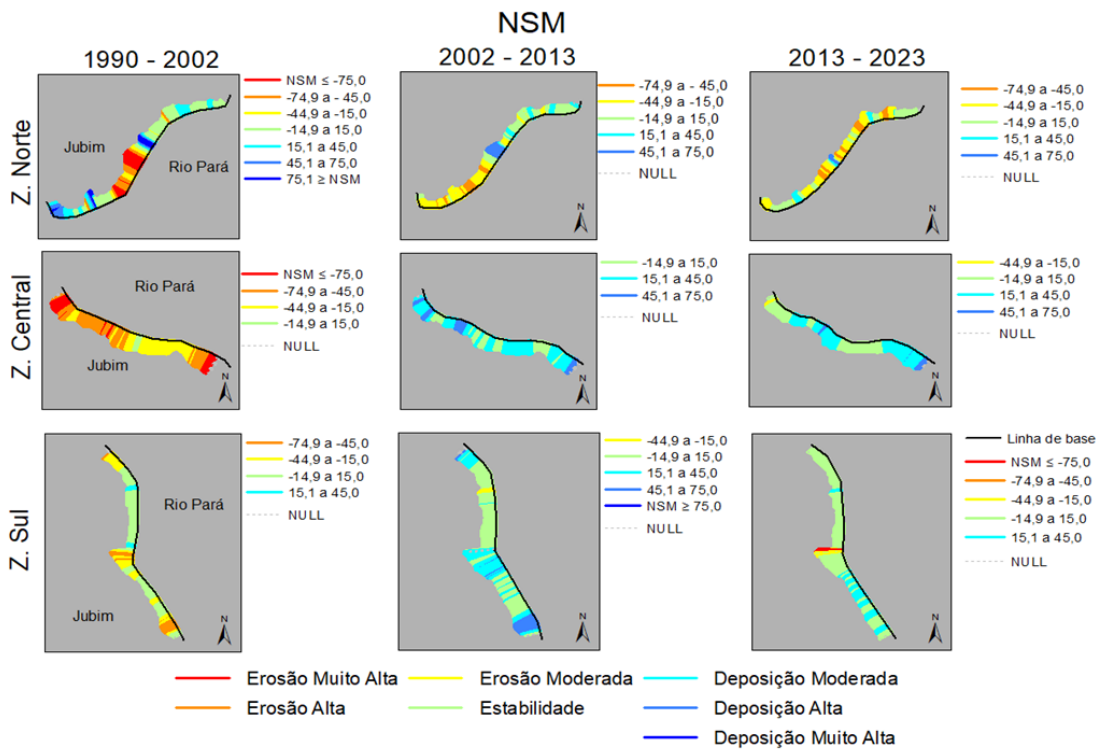


Figura 10 - Valoração do deslocamento da linha de costa (m) pelo parâmetro NSM nos setores norte, central e sul da área de estudo; e qualificação do processo costeiro (erosão, estabilidade e deposição/acrecção).

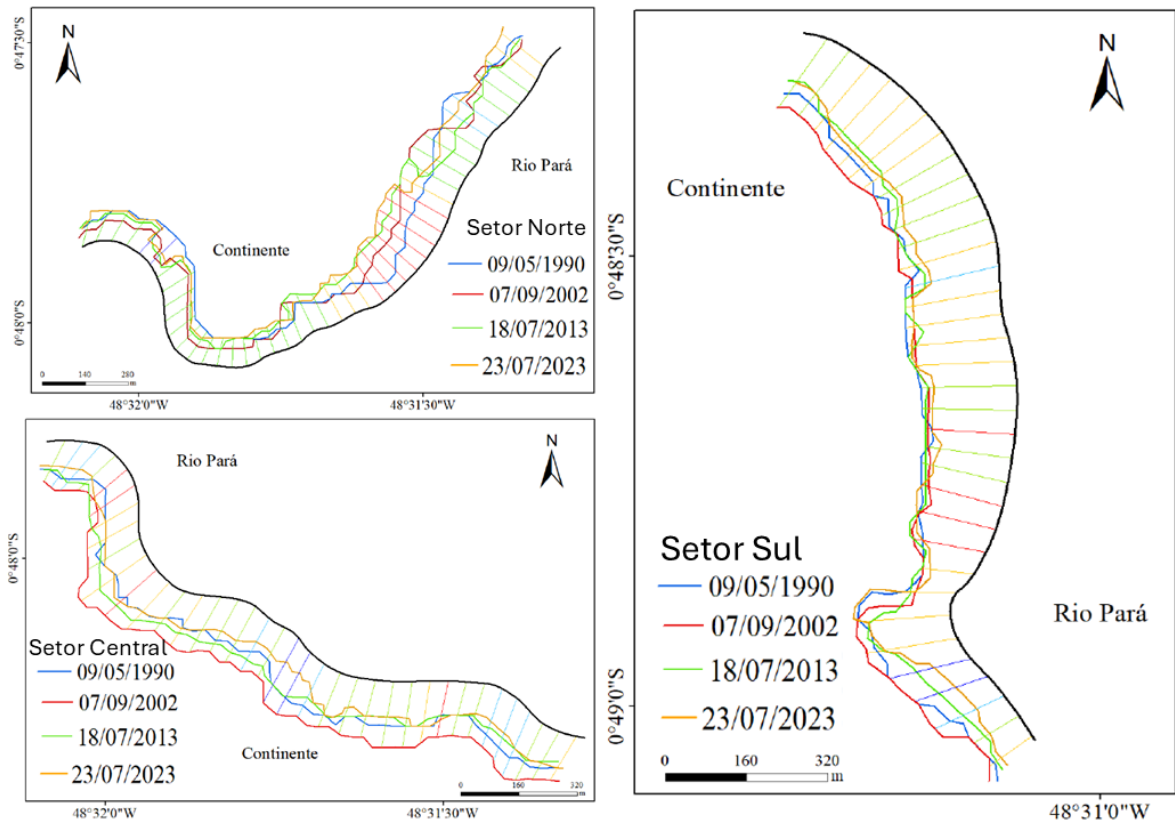


Figura 11 - Variação da LC por setor da Vila de Jubim e adjacências.

DISCUSSÃO

A utilização do sensoriamento remoto, em conjunto com as ferramentas DSAS, demonstrou ser uma abordagem eficaz para a análise das transformações geomorfológicas em ambientes costeiros. Apesar de limitações, como a resolução média das imagens de satélite e a ocorrência de períodos com elevada cobertura de nuvens na área imageada, essa metodologia tem sido aplicada em zonas costeiras de diversos países, possibilitando a identificação precisa de áreas sujeitas a processos de erosão e acreção, além de permitir a análise da evolução da linha de costa em uma escala temporal ampliada (Apostolopoulos e Nikolakopoulos, 2021).

Constatou-se diferentes comportamentos da LC ao longo dos setores analisados em decorrências da variabilidade morfoestrutural da paisagem local. Os fatores responsáveis pela gênese das paisagens da área de estudo estão relacionados a eventos de caráter regional, tais como as movimentações crustais de soerguimento, subsidência, falhamento e as flutuações relativas do nível do mar (regressão e transgressão marinha), que ocorreram durante o Cenozóico Superior (do Mioceno ao Holoceno), e à hidrodinâmica costeira atual, sob a ação das marés e ondas da baía de Marajó (França, 2003).

A alta variabilidade da posição da LC observada no Setor Norte, com elevada erosão costeira, ocorre principalmente pela combinação de agentes oceanográficos e da morfologia costeira plana da praia do Salazar e seu pós-praia. Este setor está inserido na unidade geomorfológica denominada de Planície de Intermaré (Souza Filho e França, 2006), lamosa e arenosa, na qual os ecossistemas se formam ao longo de costas de declive suave, dominadas por maré, tal como a maior parte da costa amazônica, sendo bastante susceptíveis à elevação do nível do mar.

Segundo Voudoukas et al. (2020), o nível médio do mar no último século aumentou muito. Nos últimos 25 anos houve uma tendência de intensa erosão costeira em todo o mundo, afetando a foz do rio Amazonas, onde se situa a Ilha do Marajó. Estima-se que uma elevação de 2 m no nível do mar provocaria inundações em 28% da área da Ilha de Marajó. Se a elevação do nível do mar atingir 6 m, 36% da ilha poderá ser inundada (INPE, 2016).

A elevação do nível do mar e a erosão costeira exercem impactos significativos tanto ambientais quanto socioeconômicos, especialmente em sistemas costeiros vulneráveis, como os de Jubim, compostos por manguezais e praias arenosas. Esses habitats desempenham funções essenciais, atuando como barreiras naturais contra tempestades. Contudo, a retração desses ecossistemas, mesmo que de forma natural, acarreta uma expressiva redução da

biodiversidade e aumenta ainda mais a vulnerabilidade da costa a eventos extremos, comprometendo a resiliência dos ecossistemas locais (Freitas et al., 2020).

Além disso, a redução dos manguezais afeta diretamente as comunidades locais, tal como a tradicional vila do Jubim, que depende do extrativismo de recursos naturais para suas atividades de subsistência. Assim, a perda de áreas com as de mangue intensifica os impactos negativos tanto sobre as populações humanas, quanto as espécies que utilizam esses habitats para a manutenção de seus ciclos biológicos (Ankrah et al., 2023; Souza et al., 2018).

Estudos prévios documentaram processos erosivos tanto nos manguezais, como nos cordões arenosos atuais da margem leste da Ilha do Marajó, que são limitados no pós-praia pela formação de terraços lamosos (França e Souza Filho, 2003; Souza Filho e França, 2006; França et al., 2012; Henriques, 2022; Sousa e Ranieri, 2023; Menezes et al., 2024). Há presença de queda de árvores adultas e deslocamento dos cordões praias sobre os depósitos lamosos, resultando no recuo da LC (Figura 12).



Figura 12 - Tombamento e recuo do manguezal na LC e avanço do cordão arenoso sobre ele na praia do Salazar, divisa da Vila de Jubim e Vila da Passagem Grande.

Entre 1986 e 2001, foi identificado um recuo linear máximo de 344 m, com uma taxa média de 22 m/ano para a margem leste da Ilha do Marajó (França e Souza Filho, 2003). Menezes et al. (2024) identificaram recuo médio de 98,92 m (3,09 m/ano) entre 1985 a 2017 especificamente no setor costeiro de Soure, ao norte da área de estudo. Esses processos podem ser atribuídos à posição geográfica no estuário inferior do Rio Pará, onde as praias estuarinas sofrem forte influência das correntes de maré, das variações na descarga fluvial e dos níveis de deposição sedimentar ao longo das margens (Sousa e Ranieri, 2023).

As marés semidiurnas, com máximo de 4,3 m de amplitude durante a preamar (Rosário et al., 2016), e as correntes geradas por elas, têm a capacidade de alterar constantemente a morfologia das praias estuarinas e causam grande movimentação de sedimentos. Outro fator a considerar é que a LC na margem leste da Ilha do Marajó está exposta a ventos alísios que adentram a região com velocidades de 2 m/s a 7 m/s (INMET 2022), contribuindo para maior erosão, por gerar ondas locais, que intensificam a hidrodinâmica da região.

No Setor Central, devido às forças hidrodinâmicas oriundas do Estuário do Rio Pará (efeito “molhe hidráulico”), os sedimentos transportados pela corrente de maré na foz do canal do Jubim, ficam aprisionados na sua desembocadura promovendo a formação de um delta de vazante (Figura 13).



Figura 13 - Delta de vazante formado na desembocadura do Canal do Jubim com o estuário do Rio Pará, devido ao efeito de “molhe hidráulico” do rio.

Entre os anos de 2002 e 2023, observa-se uma tendência de acreção neste setor, atribuída em grande parte a essa dinâmica sedimentar local. No entanto, no período de 1990 a 2002, ocorreram intensos processos erosivos na mesma área, possivelmente associados ao evento El Niño que perpetuou por quase toda essa década, em escala moderada a muito forte, a exemplo de sua mais alta intensidade, impactando o clima global, especialmente entre 1997 e 1998 (INPE, 2016). Em 1998, as anomalias de precipitação em setores da região amazônica foram predominantemente negativas, de até -100 mm (Souza et al., 2022).

Resultados semelhantes foram obtidos por Barros et al. (2024) ao analisarem a variação da LC de três praias amazônicas, onde observaram a influência do El Niño na redistribuição dos sedimentos. Ambrizzi et al. (2004) relatou que o ENSO (El Niño Oscilação Sul) é um

grande influenciador nos padrões de precipitação sobre a América do Sul. Esse fenômeno climático é caracterizado pela redução da pluviosidade na região Norte do Brasil.

A redução de chuvas causa diminuição na descarga fluvial e no aporte de sedimentos fluvio-estuarinos, prevalecendo os processos erosivos sobre os deposicionais, visto que as correntes de maré geradas por fatores oceanográficos continuam intensas no estuário. Sendo assim, a diminuição do fluxo fluvial, em contrapartida ao fluxo oceânico, compromete a reposição sedimentar nas praias estuarinas, aumentando, conseqüentemente, a suscetibilidade à erosão e o recuo da LC.

No Setor Sul, verificou-se uma variação limitada na posição da LC ao longo do período analisado, o que pode ser atribuído à morfologia costeira característica dessa região. De acordo com Souza Filho e França (2006), este setor está inserido em uma unidade geomorfológica denominada Planalto Costeiro, caracterizada por terreno com pequenas elevações (escarpas arenosas baixas e falésias).

Essa unidade apresenta um relevo aplainado, representativo das terras firmes da Amazônia Brasileira (Ab'Saber, 1967), e é composta por sedimentos do Grupo Barreiras/Pós-Barreiras. Apesar da presença de falésias ativas em alguns trechos (Figura 14), que são indicativos de processos erosivos, essas formações geomorfológicas conferem maior estabilidade à LC em comparação as outras áreas, onde a ação das ondas e das inundações provocadas por grandes preamares de sizígia tende a intensificar os processos erosivos na zona costeira (Novaes et al., 2024).



Figura 14 - Falésias ativas e formação de plataforma de abrasão de ondas no Setor Sul da costa

de Jubim.

As falésias, mais resistentes à erosão, protegem a borda do litoral, minimizando o desgaste provocado pelas ondas e protegendo o continente da erosão acelerada (Maia, 2022). Além disso, as áreas de arenito mais duras são ainda mais fortes à erosão e projetam-se para o mar, formando promontórios expostos e plataformas de abrasão. A erosão nas falésias ocorre apenas quando a força de ataque das ondas ultrapassa a força de resistência das rochas formadoras de escarpa arenosa (Sunamura, 2019).

CONCLUSÃO

Este artigo mostrou a evolução da LC de uma vila costeira na Ilha do Marajó, Amazônia, as tendências erosivas e acrecionais observadas ao longo de 33 anos (1990 a 2023) nas praias estuarinas da vila de Jubim, limitadas por manguezais e falésias na LC.

A hipótese desta pesquisa era de que trechos com maior exposição aos agentes físicos (maré, ondas e correntes), como em áreas de planície, apresentariam maior mobilidade da LC do que trechos em áreas de falésia e plataforma de abrasão. Tal hipótese foi confirmada, visto que o Setor Norte de Jubim, localizado sobre a planície costeira e limitado por manguezal na LC, obteve as maiores taxas de recuo costeiro, enquanto nos Setores Central e Sul, a presença de escarpas arenosas baixas e falésias ativas na LC tem propiciado uma mobilidade menor da LC, portanto uma melhor estabilidade costeira.

Embora a vila costeira de Jubim esteja numa região com densidade populacional baixa, tendo processos costeiros (erosão e deposição) mais afetados por fatores naturais do que antrópicos, uma grande parcela da comunidade é extrativista e depende dos recursos ambientais nas suas atividades cotidianas, sejam elas a pesca, a navegabilidade, a catação do caranguejo, ou mesmo o lazer desempenhado nos ecossistemas costeiros.

Sendo assim, estudos de variação da LC são essenciais para o gerenciamento costeiro tanto no meio urbano, como no meio rural, onde comunidades tradicionais dependem do equilíbrio ambiental. O monitoramento da LC na Amazônia Oriental auxilia na preservação de ecossistemas e na elaboração de estratégias que promovam o uso sustentável dos recursos naturais frente às mudanças climáticas e alterações costeiras.

REFERÊNCIAS

Ab'Saber, A.N. (1967). Problemas geomorfológicos da Amazônia Brasileira. Dossiê Amazônia Brasileira I. *Estudos Avançados*, 19(53) In H. Lent (Org.), *Atas do Simpósio sobre a Biota Amazônica* (Vol.1, pp. 35-67). Geociências. Conselho Nacional de Pesquisas. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142005000100002>

- Abd-Elhamid, H.F., Abdelfattah, M., Zelenáková, M., Kabeel, A.E., Gharbia, J.S.S., & Mahdy, M. (2025). Monitoring coastal changes in Port Said, Egypt using multi-temporal satellite imagery and GIS-DSAS. *Modeling Earth Systems and Environment*, 11:56. <https://doi.org/10.1007/s40808-024-02266-y>
- Abd-Elhamid, H.F., Zelenáková, M., & Mahdy, M. (2022). Assessing the impact of climate change and sea level rise on the shoreline of Alexandria city - recreation area. *Proc Public Recreat Landsc Prot Environ Hand Hand*, Brno, Czech Repub. <https://doi.org/10.11118/978-80-7509-831-3-0045>
- Alesheikh, A.A., & Ghorbanali, A., Nouri. (2007) Coastline change detection using remote sensing. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 4(1), 61–66.
- Ambrizzi, T., De Souza, E.B., & Pulwarty, R.S. (2004). The Hadley and Walker Regional Circulations and Associated ENSO Impacts on South American Seasonal Rainfall. In H.F. Diaz, R.S. Bradley (Org), *The Hadley Circulation: Present, Past and Future*. Advances in Global Change Research (Vol. 21, pp. 203-225). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2944-8_8
- Ankrah, J., Monteiro, A., & Madureira, H. (2023). Shoreline Change and Coastal Erosion in West Africa: A Systematic Review of Research Progress and Policy Recommendation. *Geosciences*, 13(2), 59. <https://doi.org/10.3390/geosciences13020059>
- Apostolopoulos, D., & Nikolakopoulos, K. (2021). A review and meta-analysis of remote sensing data, GIS methods, materials and indices used for monitoring the coastline evolution over the last twenty years. *European Journal of Remote Sensing*, v. 54, n. 1, p. 240–265.
- Baía, L.B., & Ranieri, L.A. (2023) Utilização de dados de sensores remotos para o monitoramento da linha de costa da Ilha de Algodão/Maiandeuá, Litoral Amazônico. *Revista Geográfica Acadêmica*, 17(2), 33-51.
- Baía, L.B., Ranieri, L.A., & Rosário, R.P. (2021) Análise multitemporal da variação da linha de costa em praias estuarinas de macromaré na Amazônia Oriental. *Geociências*, 40(1), 231-244.
- Baral, R., Samal, R.N., & Mishra, S.K. (2018). Shoreline Change Analysis at Chilika Lagoon Coast, India Using Digital Shoreline Analysis System. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, v. 46(3). <https://doi.org/10.1007/s12524-018-0818-7>.
- Barros, V.H.C. de, Menezes, R.A.A., Paula, E.M.S. de, & Veloso, G.A. (2024). Alterações recentes da linha costeira na região do Salgado Paraense (Amazônia Oriental, Brasil). *Geografia e Interdisciplinaridade*. v. 6, n. 2. <https://doi.org/10.46551/rvg2675239520242382416>
- Brasil. (1988). Decreto-lei nº 5.300, de 7 de dezembro de 2004. Regulamenta a Lei nº 7.661, de 16 de maio de 1988, que institui o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro - PNGC, dispõe sobre regras de uso e ocupação da zona costeira e estabelece critérios de gestão da orla marítima, e dá outras providências. Ministério do Meio Ambiente. Características e limites da Zona Costeira e Espaço Marinho. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5300.htm
- Chagas, R.A. das, Silva, R.E.O. da, Passos, T.A.F. dos, De Assis, A.S. de, Abreu, V.S. de, Santos, W.C.R. dos, Barros, M.R.F., & Herrmann, M. (2019). Análise biomorfométrica da

- ostra-do-mangue cultivada no litoral amazônico. *Scientia Plena*, 15(10), 1-13. <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2019.107401>
- Chu, Z.X., Sun X.G., Zhai, S.K., & Xu, K.H. (2006). Changing pattern of accretion/erosion of the modern Yellow River (Huanghe) subaerial delta, China: Based on remote sensing images. *Marine Geology*, 227(1-2), 13-30. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2005.11.013>
- Colwell, R.N. (1997). History and Place of Photographic Interpretation. In W.R., Phillipson (Org.), *Manual of Photographic Interpretation* (2 ed., p. 33-48). Ed. Bethesda, ASPRS.
- DHN. Diretoria de Hidrografia e Navegação. (2023). Tábua das Marés. Marinha do Brasil. <http://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>.
- Ding, X.S., Shan, X.J., Chen, Y.L., Jin, X.S., & Muhammed, F.R. (2019). Dynamics of shoreline and land reclamation from 1985 to 2015 in the Bohai Sea, China. *Journal of Geographical Sciences*, 29, 2031-2046. <https://doi.org/10.1007/s11442-019-1703-1>
- El-Robrini, M., Ranieri, L. A., Silva, P. V. M., Alves, M.A.M.S., Guerreiro, J.S., Oliveira, R.R.S., Silva, M.S.F., Amora, P.B.C., El-Robrini, M.H.S., & Fenzl, N. (2018). Pará, In D. Muehe (Org.), *Panorama da Erosão Costeira no Brasil* (Vol. 2, pp. 65-166). Ministério do Meio Ambiente. https://gaigerco.furg.br/images/Arquivos-PDF/Livro_panorama_erosao_costeira.pdf
- El-Robrini, M., Silva, P.V.M., Guereiro, J.S., & Ranieri, L.A. (2024). Seasonal and macrotidal influence on the morphodynamics of estuarine beaches (Marajó island - Eastern amazon - Brazil). *Quaternary and Environmental Geosciences*, 15. <https://doi.org/10.5380/qeg.v15i0.94228>
- França, C.F., & Souza Filho, P.W.M. (2003). Análise das mudanças morfológicas costeiras de médio período na margem leste da Ilha de Marajó (PA) em imagem Landsat. *Revista Brasileira de Geociências*, 33, 127-136. <https://doi.org/10.25249/0375-3687536.200333S2127136>
- França, M.C., Francisquini, M.I., Cohen, M.C.L., Pessenda, L.C.R., Rosseti, D.F., Guimarães, J.T.F., & Smith, C.B. (2012) The last mangroves of Marajó Island – Eastern Amazon: Impact of climate and/or relative sea-level changes. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 187, 50-65. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2012.08.007>
- Freitas, A., Achete, F., & Vinzón, S. B. (2020). Characterization of the Coastal Environment as a Baseline for Alternative Tourism Segments Development in Salinópolis, Pará. *World*, 1(3), 227-238. <https://doi.org/10.3390/world1030017>
- Gonçalves, G., Santos, S., Duarte, D., & Gomes, J. (2019). Monitoring Local shoreline changes by integrating UASs, airborne LiDAR, his torical images and orthophotos. *GISTAM*. <https://doi.org/10.5220/0007744101260134>
- Henriques, R.J. (2022). Geoambientes, gearqueologia e cenários de mudanças climáticas na Ilha do Marajó, Amazônia brasileira. [Tese de doutorado, Universidade Federal do Pará]. Repositório Digital da UFMG. <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/53904>
- Henriques, R.J., Oliveira, F.S., Schaefer, C.E.G.R., Lopes, P.R.C., Senra, E.O., Lourenço, V.R., & Francelino, M.R. (2024). Impacts of anthropocene sea-level rise on people, environments, and archaeological sites in Marajó Island, Brazilian Amazonia. *Journal of South American Earth Sciences*, 136, 104836. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.104836>

- INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. (2022). *Normais climatológicas do Brasil 1961-2020*. <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>.
- INPE. Instituto nacional de pesquisas espaciais. (2016). *Aquecimento global pode reduzir Ilha de Marajó*. http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?%20Cod_Noticia=607#:~:text=Com%20%20metros%20de%20eleva%C3%A7%C3%A3o,da%20ilha%20pode%20ser%20inundada.
- Jensen, J.R. (2009). *Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres* (2 ed). Parêntese.
- Köppen, W. (1948). *Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra*. Fondo de Cultura Econômica.
- Lima, A.M.M., Oliveira, L.L., Fontinhas, R.L., & Lima, R.J.S. (2005). Ilha do Marajó: Revisão histórica, hidroclimatológica, bacias hidrográficas e proposta de gestão. *Holos Environment*, 5(1), 65–80. <https://doi.org/10.14295/holos.v5i1.331>
- Lisboa, P.L.B. (2012). *A terra dos Aruã: uma história ecológica do arquipélago do Marajó* (1 ed.). Museu Paraense Emílio Goeldi.
- Maia, R.P. (2022). *Falésias: origem, evolução, risco*. [Recurso eletrônico]. Imprensa Universitária, Universidade Federal do Ceará. <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/69688>.
- Maiti, S., & and Bhattacharya, A. (2009) Shoreline Change Analysis and Its Application to Prediction: A Remote Sensing and Statistics Based Approach. *Marine Geology*, 257, 11-23. <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2008.10.006>
- Matos, M.F.A. de, Amaro, V.E., Scudelari, A.C., & Rosado, S.B. (2022). Estimativas das alterações de longo prazo na linha de praia do Litoral Oriental do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 23, n. 1. <https://doi.org/10.20502/rbg.v23i1.1953>
- Meneses, P.R., & Almeida, T. (2012). *Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto*. UnB-CNPq.
- Menezes, R.A.A, Guimarães, D.K.M., & El-robrini, M. (2024). Variations of the coastline in a medium period (1985-2017) of a tropical island: the case of Soure (Marajó - Pará/Brazil). *Boletim Paulista de Geografia*, 1(112), 51–76. <https://doi.org/10.61636/bpg.v1i112.3300>
- Minervino Amodio, A., Di Paola, G., & Roskopf C.M. (2022). Monitoring coastal vulnerability by using DEMs based on UAV spatial data. *ISPRS Int J Geo-Information* 11:155.
- Mishra, M., Chand, P., Pattnaik, N., Kattel, D.B., Panda, G.K., Mohanti, M., Baruah, U.D., Chandniha, S.K., Achary, S., & Mohanty, T. (2019). Response of long- to Short- term changes of the Puri Coastline of Odisha (India) to natural and anthropogenic factors: a remote sensing and statistical assessment. *Environmental Earth Sciences*, 78(338), 1-23. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8336-7>
- Moore, L.J. (2000) Shoreline mapping techniques. *Journal of Coastal Research*, 16(1), 111-124.

- Novaes, G. de O., Lobo, F. C., & Ranieri, L.A. (2024). Geoindicadores de vulnerabilidade à erosão e risco costeiro em praias estuarinas da costa amazônica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 25(2). <https://doi.org/10.20502/rbgeomorfologia.v25i2.2461>
- Prestes, Y.O., Silva, A.C., Rollnic, M., & Rosário, R.P. (2017). The M2 and M4 tides in the Pará river estuary. *Tropical Oceanography*, 45(1): 26-37. <https://doi.org/10.5914/tropocean.v45i1.15198>
- Ranieri, L.A., & El-Robrini, M. (2015). Evolução da linha de costa de Salinópolis, Nordeste do Pará, Brasil. *Pesquisa em Geociências*, 42(3), 207-226. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.78121>
- Reineck, H. E., & Singh, I. B. (1980). *Depositional Sedimentary Environments*. Springer-Verlag.
- Rodríguez, J.J., & Windevoxhell, N.J. (1998). Análisis Regional de la Situación de la Zona Marina Costera Centroamericana. [Recurso eletrônico]. Banco Inter-Americano de Desenvolvimento BID. <http://dx.doi.org/10.18235/0010211>
- Rosário, R.P. (2016). *Análise de processos oceanográficos no estuário do rio Pará* [Tese de doutorado, Universidade Federal do Pará]. Repositório Digital da UFPA. <https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/8876>
- Rosário, R.P.; Borba, T.A.C.; Santos, A.S., & Rollnic, M. (2016). Variability of Salinity in Pará River Estuary: 2D Analysis with Flexible Mesh Model. *Journal of Coastal Research*, [S.I.], n. 75(10075), p. 128-132. <https://doi.org/10.2112/SI75-026.1>
- Santos, C.A.G., Nascimento, T.V.M. do, Silva, R.M. da, & Misha, M. (2021). Analysis of long- and short-term shoreline change dynamics: A study case of João Pessoa city in Brazil. *Science of the Total Environment*, v. 769(8). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144889>
- Shenbagaraj, N., Senthil Kumar, K., Rasheed A.M., Leostalin, J., & Naresh Kumar, M. (2021) Mapping and electronic publishing of shoreline changes using UAV remote sensing and GIS. *J Indian Soc Remote Sens* 49:1769–1777
- Sousa, M.B.P., & Ranieri, L.A. (2023) Morfodinâmica de praias estuarinas da costa leste da Ilha do Marajó, Amazônia Oriental. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 24(3). <https://doi.org/10.20502/rbg.v24i3.2350>
- Souza Filho, P.W.M., & França, C.F. (2006). Compartimentação morfológica da margem leste da Ilha do Marajó: Zona costeira dos municípios de Soure e Salvaterra – Estado do Pará. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 7(1), 33-42.
- Souza, C.A., Duarte, L.F.A., João, M.C.A., Pinheiro, & M.A.A. (2018). Biodiversidade e conservação dos manguezais: importância bioecológica e econômica. In M.A.A. Pinheiro & A.C.B. Talamoni (Org.). *Educação Ambiental sobre Manguezais* (Vol.1, pp. 16-56). UNESP.SP. https://www.crusta.com.br/biblio/04.Cap%C3%ADtulos/20-educacao_ambiental_manguezais_cap01_biodiversidade_conservacao.pdf
- Souza, E.M.S., & Andrade, M.M.N. (2024). Dinâmica da linha de costa na Zona Costeira Amazônica: estudo de caso na ilha de Atalaia (Salinópolis, PA). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 17(4), 2911-2929. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.4.p2911-2929>

- Souza, S.A.S. de, Querino, C.A.S., Ferreira, N.C., Moura, M.A.L., Biudes, M. S., Machado, N.G., Vogt, R.H.M., Querino, J.K.A.S., & Rohleder, L.A.S. (2022). Spatiotemporal variability of precipitation and surface temperature in the southern mesoregion of Amazonas, Brazil, during the occurrence of ENSO. *Ciência e Natura*, 44, e48. <https://doi.org/10.5902/2179460X65690>
- Sunamura, T. (2019). Cliffs, Erosion Rates. In C.W. Finkl & C. Makowski (Orgs.) *Encyclopedia of Coastal Science* (pp. 398-403). Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93806-6_71
- Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., & Ergul, A. (2009). *The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 5.1: An ArcGIS Extension for Calculating Shoreline Change*. Geological Survey: Reston, VI, USA. Open File Report 2008-1278.
- Utida, G., Cruz, F.W., Etourneau, J., Bouloubassi, J., Schefuß, E., Vuille, M., Novello, V.F., Prado, L.F., Sifeddine, A., Klein, V., Zular, A., Viana, J.C.C., & Turcq, B. (2019). Tropical South Atlantic influence on Northeastern Brazil precipitation and ITCZ displacement during the past 2300 years. *Scientific Reports*, 9, 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38003-6>.
- Vousdoukas, M.I., Ranasinghe, R., Mentaschi, L., Plomaritis, T.A., Athanasiou, P., Luijendijk, A., & Feyen, L. (2020). Sandy coastlines under threat of erosion. *Nature Climate Change*, 10, 260-263. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0697-0>.

7 ARTIGO 2 “AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À EROSÃO COSTEIRA EM UMA COMUNIDADE TRADICIONAL AMAZÔNICA”

Este primeiro artigo foi submetido para a revista *Quaternary and Environmental Geosciences*

RESUMO

As zonas costeiras estão ameaçadas pelas mudanças climáticas, intensificadas por ações antrópicas. Áreas de até 10 metros acima do nível do mar poderão ser impactadas, a exemplo da margem leste da Ilha do Marajó, foz do Rio Amazonas, que apresenta recuo da linha de costa devido à elevação do mar. Objetiva-se avaliar as condições de vulnerabilidade à erosão costeira no litoral de uma comunidade tradicional da Amazônia, conforme duas projeções de elevação do nível médio do mar (elevações de 4,0 mm/ano e 15,0 mm/ano até 2100). Utilizou-se o Índice de Vulnerabilidade Costeira – IVC, proposto pelo USGS – United States Geological Survey, com intuito de classificar áreas suscetíveis à erosão. Resultados obtidos sugerem que 30,3% da linha de costa da comunidade rural de Jubim aponta vulnerabilidade moderada e 27,3% do segmento aponta vulnerabilidade alta. Além disso, áreas destinadas à agricultura estão sob risco, uma vez que parte delas está localizada próxima ao segmento norte, a região mais vulnerável à erosão costeira. O mapa do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) elaborado para a área de estudo demonstrou-se uma ferramenta eficaz para subsidiar a tomada de decisões na gestão costeira, diante do atual cenário de mudanças climáticas e processos erosivos no litoral amazônico.

Palavras-chave: Variação do Nível do Mar; Zona Costeira Amazônica; Alterações climáticas; Erosão Costeira.

ABSTRACT

Coastal zones are threatened by climate change, intensified by anthropogenic actions. Areas up to 10 meters above sea level may be impacted, as exemplified by the eastern margin of Marajó Island, at the mouth of the Amazon River, which shows coastline retreat due to sea level rise. This study aims to assess the vulnerability conditions to coastal erosion along the coastline of a traditional Amazonian community, based on two sea level rise projections (increases of 4.0 mm/year and 15.0 mm/year until 2100). The Coastal Vulnerability Index (CVI), proposed by the USGS – United States Geological Survey, was used to classify areas susceptible to erosion. The results suggest that 30.3% of the coastline of the rural community of Jubim indicates moderate vulnerability, while 27.3% of the segment shows high vulnerability. Furthermore, agricultural areas are at risk, as some of them are located near the northern segment, the most vulnerable region to coastal erosion. The Coastal Vulnerability Index (CVI) map developed for the study area proved to be an effective tool to support decision-making in coastal management, considering the current scenario of climate change and erosive processes along the Amazonian coast.

Keywords: Sea Level Rise; Amazonian Coastal Zone; Climate change; Coastal Erosion.

INTRODUÇÃO

As zonas costeiras são um sistema natural importante para toda sociedade, hospedando uma ampla variedade de atividades sociais, econômicas e ecológicas (Nguyen et al. 2016). Além disso, representa uma interface dinâmica entre o ambiente terrestre, marinho e atmosférico, caracterizada por processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem em escalas temporais de curto, médio e longo prazo (Souza & Andrade 2024). Essa região é influenciada por fatores naturais, como variações na linha de costa, ação das marés, correntes litorâneas e eventos extremos, além de pressões antrópicas decorrentes da ocupação humana e das atividades socioeconômicas (Brand et al. 2020). Nesse sentido, a zona costeira é amplamente reconhecida como uma área exposta a intenso estresse ambiental, resultante tanto da exploração intensiva de seus recursos naturais quanto do uso desordenado do território. Além disso, essa região desempenha um papel fundamental na proteção dos continentes, atenuando os efeitos de forças oceanográficas, meteorológicas e fluviais (Ranieri & El-Robrini 2016). Essas forças desencadeiam processos dinâmicos de erosão e deposição sedimentar, influenciando de forma contínua a morfologia, a estabilidade da paisagem costeira, e o nível de vulnerabilidade à resultantes positivas e negativas a qual está sujeita.

O Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) é definido como uma ferramenta de análise que quantifica o grau de exposição de um determinado segmento litorâneo às dinâmicas naturais, considerando a interação entre variáveis climáticas, oceanográficas e geomorfológicas, bem como a capacidade desse sistema costeiro de responder a impactos adversos (Dal Cin & Simeoni 1994). A aplicação desse índice tem como objetivo avaliar a probabilidade de ocorrência de modificações físicas e ambientais ao longo da linha de costa (Gornitz 1991). Além disso, o IVC possibilita a identificação de áreas suscetíveis a impactos decorrentes da elevação do nível médio do mar (NMM). Dessa forma, constitui-se como um instrumento estratégico para apoiar gestores no planejamento de medidas e na tomada de decisões voltadas à proteção dos ambientes costeiros (Dwarakish et al. 2009). No cenário atual das mudanças climáticas globais, a elevação do NMM representa uma consequência direta do aumento das emissões antrópicas de gases de efeito estufa, especialmente após a Primeira Revolução Industrial (IPCC 2013, NOAA 2017) e, atualmente, intensificado principalmente pelo derretimento das áreas congeladas da Groelândia (BOX et al. 2022).

A elevação do NMM resulta, sobretudo, da expansão térmica dos oceanos e do derretimento de calotas polares, processos documentados na literatura científica (Nicholls et al. 2014, IPCC 2013). Nesse contexto, as projeções do Painel Intergovernamental sobre Mudanças

Climáticas – Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) indicam um aumento da temperatura global de até 4,8 °C até o ano de 2100, sendo estimada uma elevação média de 3,7 °C no período de 2081 a 2100 no cenário mais crítico. Esse aumento térmico influencia diretamente a elevação do nível dos oceanos, para a qual se projeta um acréscimo médio de 0,29 a 0,59 m, podendo alcançar valores acima 1 m (Oppenheimer et al. 2022). Diante das diversas projeções relacionadas à elevação do NMM, torna-se evidente que localidades, modos de subsistência e ecossistemas costeiros estão sob ameaça. Segundo o IPCC (2019), estima-se que, até 2050, aproximadamente um bilhão de pessoas habitarão áreas costeiras de baixa altitude, ou seja, regiões situadas a menos de 10 metros acima do nível atual do mar. Além disso, de acordo com as Nações Unidas (2017), cerca de 40% da população mundial já reside em uma faixa litorânea de até 100 km, o que ressalta a vulnerabilidade dessas áreas frente às mudanças ambientais em curso.

Dada sua complexidade e vulnerabilidade, a zona costeira tem sido amplamente estudada com o objetivo de compreender os impactos das mudanças ambientais e fornecer subsídios para estratégias de gestão sustentável. Nesse contexto, destacam-se os estudos realizados pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos – United States Geological Survey (USGS, 2021) e por outros autores (Gornitz et al. 1991, 1994, Pendleton et al. 2004, 2010), que aplicaram o método do IVC. Essa abordagem metodológica também foi aplicada em diversas regiões do mundo, sendo ajustada conforme as especificidades de cada local, incluindo pesquisas realizadas na Espanha (Koroglu et al. 2019), Marrocos (Muzirafuti 2025), Índia (Bharadwaz et al. 2025) e Costa do Marfim (Tano et al. 2016). No Brasil, o método foi aplicado com adaptações em diversos estados, como Rio de Janeiro, por Muehe et al. (2011) e Osilieri, Seoane & Dias (2020), Ceará, por Barros et al. (2024), Pará, por Braga et al. (2019) e Ranieri e El-Robrini (2016); entre outros.

O estudo da vulnerabilidade costeira pode ser utilizado para identificar as áreas urbanas com ocupação humana suscetíveis aos impactos da erosão, por meio da correlação com análises de uso e ocupação do solo. Esse mapeamento é uma ferramenta crucial para entender a distribuição das práticas humanas nas áreas costeiras e como essas ações podem interagir com a vulnerabilidade ambiental local. A relação entre vulnerabilidade costeira e uso e ocupação do solo é crucial para o planejamento e gestão sustentável das zonas costeiras, uma vez que o uso inadequado do solo pode exacerbar os impactos de eventos climáticos extremos, enquanto a ocupação indevida pode agravar os processos de degradação ambiental.

A aplicação do método do IVC em áreas rurais também é válida, embora a densidade

demográfica nessas áreas seja menor, pois muitas comunidades costeiras dependem fortemente da relação terra-mar nas suas atividades de subsistência, a exemplo da Vila de Jubim, situada na costa oriental da Ilha do Marajó, Brasil. A presente pesquisa justifica-se pela erosão costeira que afeta parte desse trecho litorâneo, resultante da elevação do nível do mar e de processos oceanográficos, tal como ocorre nas áreas adjacentes que compõem a porção oriental da Ilha (Henriques et al. 2024). O estudo tem como objetivo avaliar a vulnerabilidade costeira de Jubim, identificando áreas suscetíveis à erosão com base em parâmetros físicos e dinâmicos, conforme a metodologia do IVC. Para tal, foram empregadas observações e coleta de dados in situ, e técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento em Sistema de Informação Geográfica (SIG), viabilizando a elaboração de mapas temáticos e a definição de um índice de vulnerabilidade à erosão costeira.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O arquipélago do Marajó, o maior arquipélago fluviomarinho do mundo, situa-se na costa amazônica brasileira. Limita-se ao norte com o Oceano Atlântico, ao sul com o rio Pará, a oeste com o rio Amazonas e a leste com a Baía do Marajó. A área de estudo compreende a porção leste da Ilha do Marajó (Figura 15), especificamente no litoral de uma comunidade tradicional chamada Jubim, distrito do município de Salvaterra-PA. O uso territorial de Jubim se estende para áreas adjacentes, abrangendo um segmento costeiro de aproximadamente 4,7 km de extensão, situada entre as latitudes 0°47'26"S e 0°49'8"S e as longitudes 48°31'5"O e 48°31'4"O.

Na região leste da Ilha do Marajó, o clima é tropical úmido de monção (Am), segundo a classificação Koppen, com temperatura média anual de 27 °C e pluviosidade anual de 3.000 mm. A estação chuvosa compreende os meses de dezembro a maio, e a estação com menos chuva compreende junho a novembro (LIMA et al. 2005).

Os processos que formaram as paisagens da área de estudo estão relacionados a eventos regionais, como soerguimento crustal, subsidência, falhamentos e variações relativas do nível do mar (regressões e transgressões) ocorridos durante o Cenozóico Superior (Mioceno ao Holoceno). Além disso, a hidrodinâmica costeira atual, influenciada por marés e ondas na baía do Marajó, também exerce influência (França & Souza Filho 2003). A região de estudo é segmentada em três subunidades morfológicas: planalto costeiro, planície de intermaré e delta de maré vazante (França & Souza Filho 2006). O planalto costeiro é formado por sedimentos terciários e quaternários do Grupo Barreiras/Pós-Barreiras, originando falésias de até 6 m de altura. Apresenta relevo suave e aplainado, com altitudes variando entre 5 e 20 m acima do

nível do mar (Ab'Saber 1967).

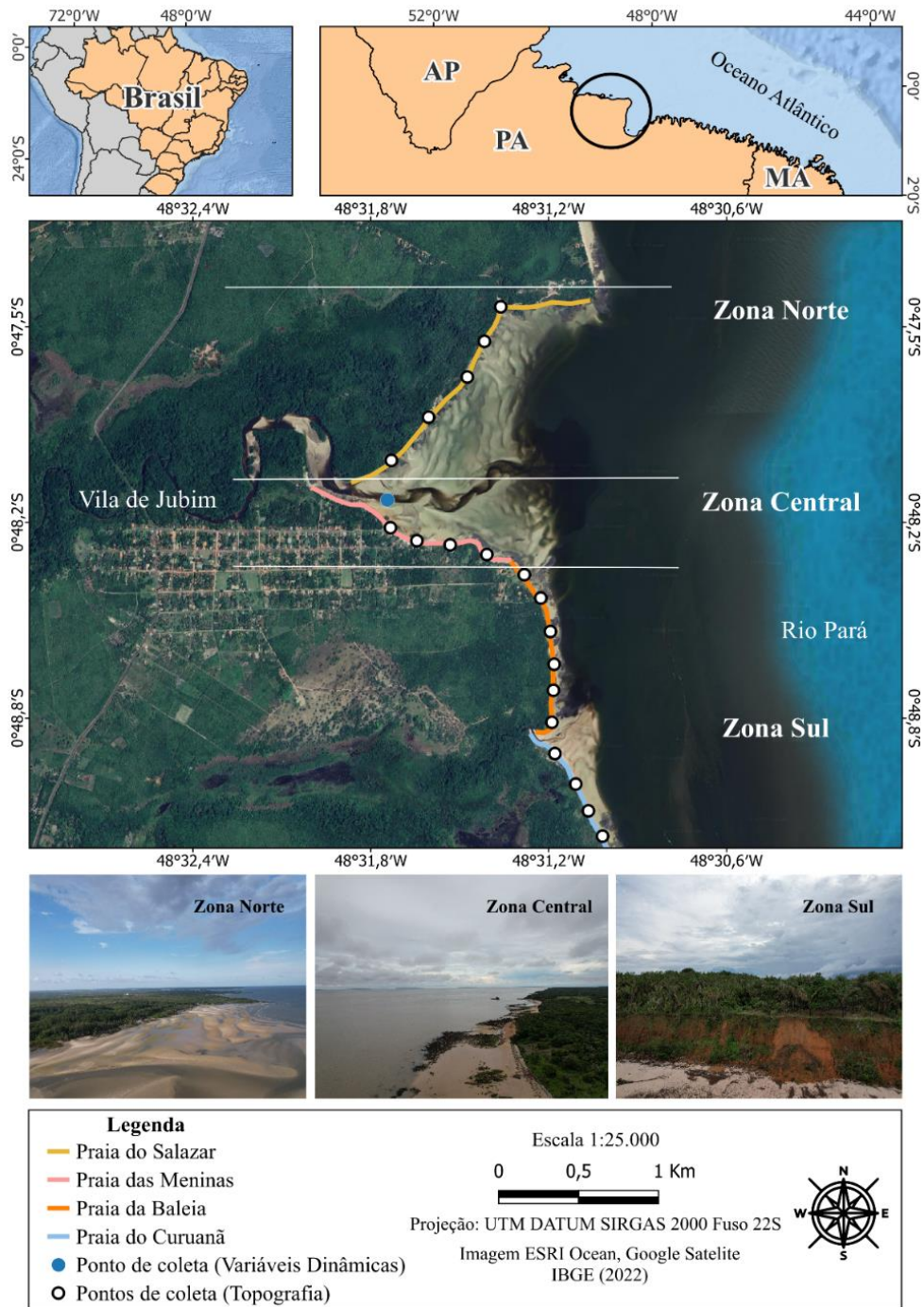


Figura 15: Mapa de localização da área de estudo, segmento costeiro da comunidade de Jubim, Costa Amazônica - Estado do Pará.

Em Salvaterra, as planícies de intermaré, principalmente lamosa, ocupam o interior de paleovales escavados no planalto costeiro, seguindo até o limite de influência das marés. As principais drenagens são representadas pelos canais Guajará e Jubim, e a cobertura vegetal é representada por florestas de mangue. Nas desembocaduras dos canais de maré, ocorrem a formação de deltas de maré vazante. Esta morfologia é caracterizada pela presença de bancos

arenosos de foz de canal, que ficam expostos na maré baixa (França & Souza Filho 2006).

A hidrografia da região é caracterizada por uma rede de drenagem formada por vários canais recentes, lagos e igarapés. Segundo Barboza et al. (2012), o movimento das águas atua como um elemento definidor da paisagem local, onde se destacam as várzeas e os igapós. A hidrografia e a dinâmica das marés têm grande importância para a economia da comunidade devido aos aspectos como: a) meio de transporte e comunicação entre a grande maioria das cidades e vilas; e b) potencial pesqueiro e extrativista. A região é dominada por meso a macromarés semidiurnas com amplitudes que variam de 2 a 5 m (El-Robrini et al. 2018).

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia da pesquisa abrangeu a coleta de dados in situ (análises observacionais, medições com equipamento de aerofotogrametria e instrumentação oceanográfica), bem como técnicas de geoprocessamento para análise de variação da linha de costa por meio de imagens de satélite. Parâmetros necessários para compor o dado final deste estudo, o Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC).

O IVC é uma metodologia para avaliar os impactos da erosão costeira através de grupos de variáveis, que englobam aspectos físicos e dinâmicos referentes a um segmento de linha de costa (Thieler & Hammar-Klose 1999). As variáveis físicas utilizadas nesta pesquisa englobam aspectos relacionados à geomorfologia, à declividade do terreno e às taxas de erosão e/ou acreção da linha de costa. Por outro lado, as variáveis dinâmicas compreendem a amplitude da maré, a altura significativa das ondas (H_s) e a variação do nível médio do mar (NMM). O peso destas variáveis é expresso numericamente por meio de cinco classes: (1) muito baixa; (2) baixa; (3) moderada; (4) alta e (5) muito alta, onde o menor valor indica menor vulnerabilidade, enquanto o maior valor representa a condição mais crítica. Este estudo analisa o IVC considerando duas projeções de elevação do NMM, conforme diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) quanto ao “Caminho Representativo de Concentração” – Representative Concentration Pathway (RCP) 2.6 e 8.5 adotado no Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC.

O valor de cada RCP se refere ao incremento da força radiativa na atmosfera em W/m^2 estimado para o final de 2100 comparado com o período pré-industrial (Van Vuuren et al. 2011), e considerando o balanço de radiação (razão entre a quantidade de radiação que entra e sai da Terra), de acordo com as concentrações de gases de efeito estufa, aerossóis e tipos de cobertura terrestre. No RCP 2.6, o forçamento radiativo atinge o pico em aproximadamente 3 W/m^2 antes de 2100 e depois declina para 2,6 W/m^2 em 2100. Cenário desenvolvido pela

equipe de modelagem IMAGE da Agência de Avaliação Ambiental dos Países Baixos (Van Vuuren et al. 2007). No RCP 8.5, o forçamento radiativo atinge 8,5 W/m² até 2100 e continua a aumentar por algum tempo. Cenário desenvolvido pela equipe de modelagem MESSAGE e pelo Quadro de Avaliação Integrada do Instituto Internacional de Análise de Sistemas Aplicados (IIASA) (Riahi et al. 2007).

AQUISIÇÃO DE DADOS

Em 22 a 25/03/2024, 15/04/2023 e 06 a 10/06/2024 foram realizadas visitas in loco na Vila de Jubim, visando coleta de dados oceanográficos e geomorfológicos. Durante as três campanhas de campo foram avaliadas as distintas feições geomorfológicas na linha de costa, delimitando-as com um par de receptores GNSS (Global Navigation Satellite System – Sistema de Navegação Global via Satélite), a fim de se obter o posicionamento geográfico delas.

Os parâmetros oceanográficos foram coletados em abril de 2023. O equipamento utilizado foi o sensor OBS (Optical Backscatter Sensors), modelo Infinity-turbi ATU75W-USB da JFE-Advantech, fundeado após a linha de maré baixa da praia das Meninas (Figura 1). Este ponto de medição foi usado como réplica para as demais praias estuarinas estudadas, visto que todas apresentam similaridade (baixo domínio de ondas/pequenas ondulações). O equipamento utilizado foi configurado para registrar cinco medições a cada segundo, ou 5 hertz (Hz), abrangendo assim registros de altura de onda e de maré, durante o período de 13 horas (próximo de 1 ciclo de maré).

Em março de 2024, na zona de intermaré (entremarés) das praias, que vai da linha de preamar (limite superior) a linha de baixa-mar (limite inferior), foram medidas cotas topográficas em ambos os limites em 19 locais equidistantes (200 metros) ao longo das praias (Figura 1). Utilizou-se o equipamento Estação Total para a aquisição da cota topográfica nesses locais, para posterior obtenção da declividade praial. Em junho de 2024 foram realizados sobrevoos com o drone DJI Mavic Air 2S para obtenção do ortomosaico e Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo, incluindo toda a Vila de Jubim.

O par de receptores GNSS foi utilizado em paralelo aos sobrevoos a fim de se obter pontos de controle com coordenadas geográficas precisas ao longo das praias imageadas, para posterior correção das coordenadas obtidas com o drone. Tais processos foram realizados posteriormente no software Agisoft Metashape 2.0.0, e fornecem uma visão geral da geomorfologia local, uso e ocupação do solo. Por meio de Sensoriamento Remoto foi possível avaliar a mudança na linha de costa do litoral de Jubim do ano de 1990 a 2023. Foram utilizadas imagens dos sensores TM e OLI/TIRS, adquiridas pelos satélites Landsat 5 e 8,

respectivamente. As bandas multiespectrais possuem resolução espacial de 30 metros, enquanto a banda pancromática apresenta resolução de 15 metros no Landsat 8 OLI/TIRS. As imagens foram adquiridas através do portal do Serviço Geológico dos Estados Unidos – United States Geological Survey (USGS), acessível no endereço eletrônico: <https://earthexplorer.usgs.gov> (Tabela 7).

As bandas do espectro visível e do infravermelho próximo dos satélites Landsat foram utilizadas para a identificação de superfícies terrestres e corpos d'água ao longo da linha de costa. As faixas do espectro infravermelho são particularmente eficazes na diferenciação entre ambientes aquáticos e terrestres, pois a energia do infravermelho médio é fortemente absorvida pela água, enquanto a vegetação, a areia e outros elementos costeiros apresentam alta refletância nessa região espectral (Alesheikh et al. 2007). Dessa forma, nesta pesquisa, foi possível aplicar o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), que demonstrou maior eficiência em comparação a outros métodos, proporcionando maior precisão técnica na detecção da linha de costa (Mishra et al. 2019).

Tabela 7: Especificações das imagens de sensoriamento remoto, constando informações sobre data de aquisição, sensores, satélites, resolução espacial e estado da maré.

Data de Aquisição	Satélite	Sensor	Bandas	Resolução Espacial	Maré
09/05/1990	Landsat 5	TM	3, 4	30m	Vazante
23/07/2023	Landsat 8	OLI/TIRS	4, 5, 8	30m (15m)	Vazante

DECLIVIDADE (°); GEROMORFOLOGIA; USO E OCUPAÇÃO DO SOLO; TAXA DE EROSAO/ACREÇÃO DA LINHA DE COSTA

Utilizou-se cálculo trigonométrico para analisar a declividade (β) da face praial a partir da Eq. 1:

$$\text{Tg}\beta = (\text{HLMA} - \text{HLMB}) / (\text{DLMA} - \text{DLMB}) \quad (1)$$

Sendo que: HLMA representa a altura marcada na Linha de Maré Alta; HLMB: Altura marcada na Linha de Maré Baixa; DLMA: Distância marcada na Linha de Maré Alta; e DLMB: Distância marcada na Linha de Maré Baixa.

A variável geomorfologia foi pesquisada por referências bibliográficas, como o mapa morfológico da costa leste da Ilha do Marajó, elaborado por França & Souza Filho (2006) e, pelas observações in loco. As definições atribuídas para cada feição e forma costeira estão de acordo com as nomenclaturas propostas pelo IVC – USGS. O grau de risco relacionado a estas feições e processos oceanográficos é utilizado pelo USGS com similaridade à vulnerabilidade costeira, já presumindo impactos inerentes aos seres vivos, envolve fatores físicos e dinâmicos,

conforme demonstrado na Tabela 8.

Para a confecção do mapa de uso e ocupação do solo, utilizou-se uma imagem do satélite Sentinel , com resolução de 10 m (ano 2024), empregando a ferramenta de Image Classification no software ArcGIS 10.5. A classificação supervisionada é um método amplamente utilizado para a análise e classificação de imagens de satélite, como instruções fornecidas pelo MapBiomas (2024). Esse método permite identificar e categorizar diferentes tipos de cobertura do solo a partir de um conjunto de dados de treinamento, com base em amostras de classe conhecidas.

Tabela 8: Classificação do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) segundo o United States Geological Survey (USGS), considerando seis variáveis que englobam fatores físicos e dinâmicos.

	Muito Baixo	Baixo	Moderado	Alto	Muito Alto
Grau de Risco	1	2	3	4	5
Geomorfologia	Costão Rochoso; Duna Fixa	Falésias	Planície Costeira; Terraço Marinho	Estuários; Dunas Móveis; Cordões Litorâneos	Praia Arenosa; Escarpas de Praia; Recifes de Corais; Deltas
Declividade (°)	≥ 1,9	1,3 – 1,9	0,9 – 1,3	0,6 – 0,9	< 0,6
Taxa de Erosão/Acreção da LC (m/ano)	≥ 2,0	1,0 – 2,0	-1,0 – +1,0	-1,1 – -2,0	< -2,0
Variação Relativa do Nível do Mar (mm/ano)	< 2,0	2,0 – 3,0	3,0 – 4,0	4,0 – 5,0	> 5,0
Amplitude de Maré (m)	≤ 0,99	1,0 – 1,9	2,0 – 4,0	4,1 – 6,0	≥ 6,1
Altura Significativa de Onda (m)	< 0,55	0,55 – 0,85	0,85 – 1,05	1,05 – 1,25	> 1,25

A análise multitemporal da linha de costa constitui um dos principais indicadores empregados em investigações relacionadas ao risco de erosão costeira (Novak & Lamour 2021). O método adotado para a definição dessas variáveis envolveu a escolha de imagens, o pré-processamento de dados digitais, georreferenciamento, a identificação do posicionamento da linha de costa no período de 1990 a 2023 e a aplicação da ferramenta Digital Shoreline Analysis System (DSAS) no software ArcGIS 10.5, pelo método EPR (End Point Rate) para a determinação das taxas de erosão e acreção (metros/ano), utilizadas no cálculo do IVC. De acordo com a definição apresentada por Maiti & Bhattacharya (2009), índices positivos nas

taxas de variação apontam para o avanço da linha de costa em direção ao oceano ou ao estuário, indicando processos de sedimentação ou acréscimo costeiro. Por outro lado, valores negativos sinalizam o recuo da linha de costa em direção à ilha, evidenciando fenômenos erosivos.

AMPLITUDE DE MARÉ; ALTURA SIGNIFICATIVA DE ONDAS E VARIAÇÃO RELATIVA DO NÍVEL DO MAR (VRNM)

A variável altura significativa de ondas (H_s) foi determinada através da média de 1/3 das alturas mais frequentes registradas em 13 horas. Neste mesmo período pode-se registrar a amplitude de maré da baixa-mar à preamar. As referências utilizadas para a variação do nível do mar foram extraídas das projeções do IPCC, relatório SROCC 2019 (Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, 2019). Neste trabalho utilizaram-se dois cenários, um mais otimista e outro mais pessimista para área de estudo, representada pelo Representative Concentration Pathway - RCP 2.6 com projeção de 4,0 mm/ano de elevação do NMM até 2100 e RCP de 8.5 com projeção de 15,0 mm/ano até 2100.

CÁLCULO DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE COSTEIRA (IVC)

O IVC é quantificado em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), a partir do método smartiline, no qual se baseia em uma representação vetorial da linha de costa, permitindo a atribuição de atributos espaciais e classificações de vulnerabilidade em diferentes segmentos do litoral. Ele facilita a interpretação dos processos costeiros ao integrar dados geoespaciais em uma abordagem sistemática e visualmente intuitiva. Após a divisão dos segmentos, o índice foi determinado com base na Eq. 2

$$IVC = \frac{\sqrt{(a \times b \times c \times d \times e \times f)}}{6} \quad (2)$$

As variáveis consideradas para o cálculo do IVC incluem a característica geomorfológica (a), a inclinação da zona costeira (b), a taxa de variação da linha de costa por erosão ou acreção (c), a amplitude das marés (d), a altura significativa das ondas (H_s) (e) e a variação do nível médio do mar (NMM) (f). Os dados foram processados e examinados para a obtenção dos valores de média, mediana e moda, seguindo o critério adotado para a elaboração do Mapa de IVC, baseado na distribuição percentílica de 25°, 50° e 75°, conforme a metodologia estabelecida por Pendleton et al. (2004). Nesse contexto, valores situados abaixo do 25° percentil são classificados como de baixa vulnerabilidade, aqueles entre os percentis 25° e 50° indicam vulnerabilidade moderada, enquanto os intervalos entre 50° e 75° percentil correspondem a alta vulnerabilidade. Por fim, valores superiores ao 75° percentil são

considerados indicativos de vulnerabilidade muito alta.

RESULTADOS

DECLIVIDADE DA COSTA NA ZONA ENTREMARÉS

A variável física declividade foi classificada em cinco categorias de vulnerabilidade, variando de muito baixa a muito alta, ao longo das quatro praias de Jubim (Tabela 9). Os índices obtidos apresentaram valores entre os graus 1 e 5, conforme a Tabela 8, sendo considerado para o IVC o valor predominante em cada praia.

O segmento norte, correspondente à praia do Salazar, exibiu predominantemente alta a muito alta vulnerabilidade, com valores de declividade entre $0,15^\circ$ e $0,60^\circ$ entre a Linha de Maré Alta (LMA) e a Linha de Maré Baixa (LMB). No segmento central, que abrange a praia das Meninas, a declividade variou entre $0,40^\circ$ e $1,10^\circ$, indicando níveis de vulnerabilidade classificados como moderado a alto. No segmento sul, que compreende as praias da Baleia e do Curuanã, os valores de declividade praias oscilaram entre $0,55^\circ$ e $2,40^\circ$, resultando em níveis de vulnerabilidade que variaram de muito baixo a muito alto em determinados pontos. Os maiores valores de declividade foram observados na praia da Baleia.

Tabela 9 - Localização dos pontos usados para calcular a declividade da face praias, grau e os índices de vulnerabilidade relacionado.

Praia	Ponto	Latitude/Longitude – Fuso 22S		Declividade ($^\circ$)	Índice
		Coordenadas LMA	Coordenadas LMB		
Salazar	P1	9912745/775994	9912472/775715	0,50	5
	P2	9912547/776155	9912289/775896	0,60	4
	P3	9912353/776309	9912114/775988	0,40	5
	P4	9912189/776540	9911938/776109	0,35	5
	P5	9912042/776665	9911675/776228	0,15	5
Meninas	P6	9911108/775069	9911195/774923	1,10	2
	P7	9911293/775467	9911145/775289	0,65	4
	P8	9911192/775540	9910984/775415	0,40	5
	P9	9910924/775674	9910775/775481	0,60	5
Baleia	P10	9910808/775746	9910593/775828	1,25	2
	P11	9910790/775872	9910598/775943	1,55	2
	P12	9910940/776068	9910837/776135	1,65	2
	P13	9911226/776341	9911227/776251	2,40	1
	P14	9910974/776362	9910957/776236	1,15	2
	P15	9910579/776302	9910446/776547	0,60	4
Curuanã	P16	9910791/776324	9910516/776624	0,55	5
	P17	9910800/776560	9910648/776685	1,20	2
	P18	9910928/776788	9910810/776867	1,95	2
	P19	9911045/777017	9910949/777084	1,65	2

VARIAÇÃO DA LINHA DE COSTA

A Figura 16 apresenta os resultados obtidos a partir da análise dos processos de erosão e acreção ao longo do litoral da comunidade de Jubim. A partir da avaliação das taxas de variação da linha de costa, foi possível identificar distintos padrões de comportamento ao longo dos diferentes setores analisados.

No setor norte, os resultados indicam uma tendência predominantemente erosiva, com destaque para a região central da praia do Salazar. Nesse local, foi registrado um recuo expressivo da linha de costa ao longo das últimas três décadas, atingindo um valor máximo de aproximadamente 170 metros. Esse fenômeno resulta em uma taxa média de recuo de 1,99 m por ano, evidenciando a intensidade do processo erosivo nessa área.

No setor central, onde se encontra a praia das Meninas, os dados indicam um comportamento intermediário, com uma tendência à estabilidade, mas com indícios de erosão ao longo de alguns pontos. Para esse trecho da costa, a taxa média de erosão foi estimada em 0,66 m por ano no intervalo compreendido entre 1990 e 2023. Essa variação sugere que, embora o setor não apresente uma erosão tão acentuada quanto a observada na praia do Salazar, ainda há um processo de retração da linha de costa.

Já no setor sul, os padrões de variação da linha de costa mostraram diferenças entre as praias analisadas. Na praia da Baleia, a linha de costa demonstrou uma relativa estabilidade ao longo de toda a extensão, com uma variação média de apenas 0,07 metros por ano. Esse valor indica uma leve tendência à acreção sedimentar, sugerindo que a deposição de sedimentos tem sido suficiente para manter o equilíbrio da linha de costa ao longo do tempo.

Por outro lado, na praia do Curuanã, os dados apontam para um comportamento mais dinâmico da linha de costa, com variações significativas nas taxas de deslocamento ao longo do período de 33 anos. Entre os anos de 1990 e 2023, as taxas de variação oscilaram predominantemente entre 1,0 e 2,0 metros por ano, caracterizando essa área como essencialmente acrecional. Esse padrão indica que a região tem sido favorecida por processos de deposição sedimentar que contribuem para o avanço da linha de costa. Dessa forma, os resultados obtidos demonstram a heterogeneidade dos processos costeiros atuantes ao longo do litoral da comunidade de Jubim. Enquanto algumas áreas apresentam um forte processo erosivo, outras exibem tendências de estabilidade ou acreção.

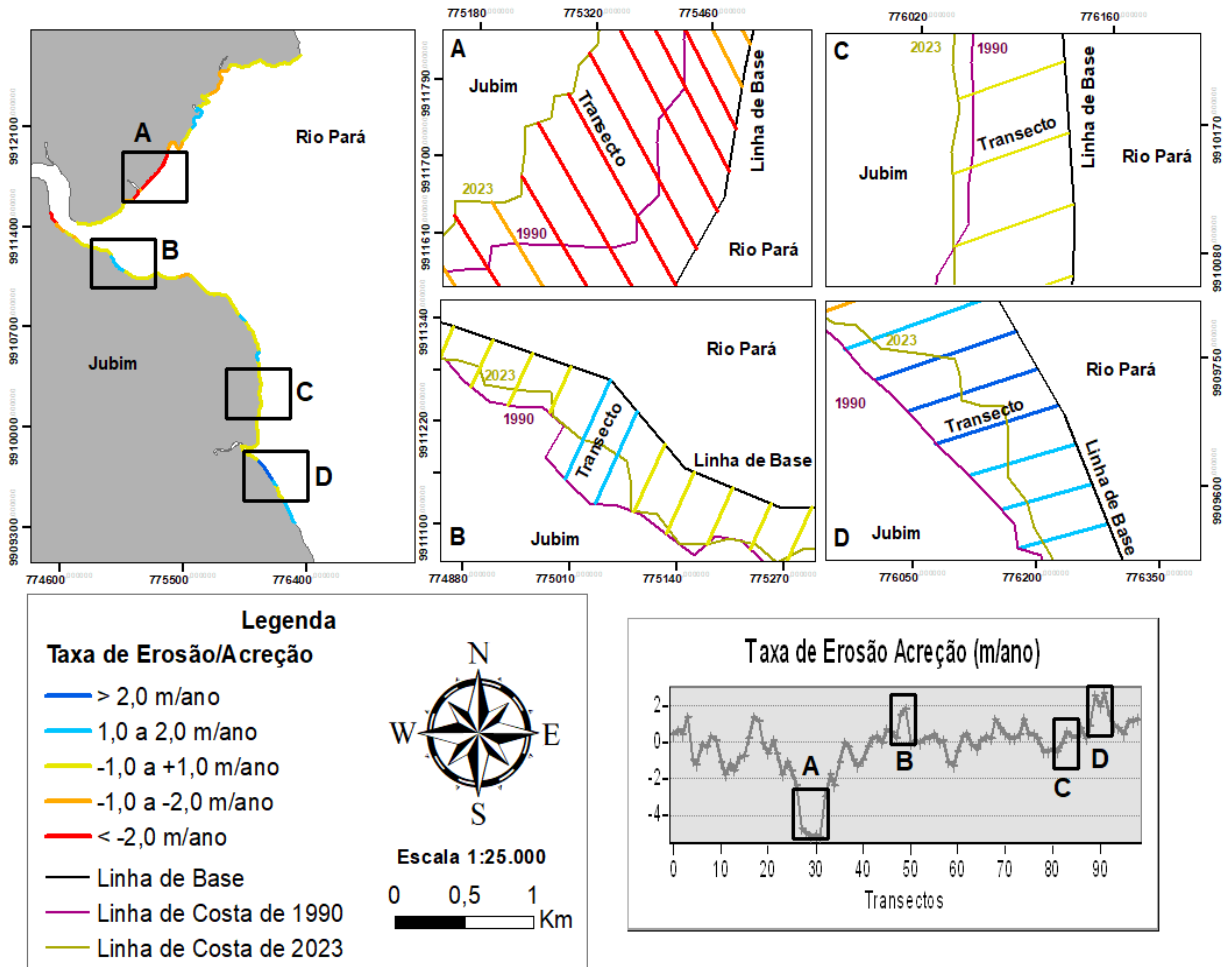


Figura 16: Resultados obtidos através do método DSAS (Digital Shoreline Analysis System). A linha de base foi traçada Offshore, gerando no total 100 transectos espaçados em 50 metros entre a praia do Salazar (A); praia das Meninas (B); praia da Baleia (C); praia do Curuanã (D).

VARIÁVEIS DINÂMICAS

A variação do nível do mar, a amplitude de maré e a altura significativa das ondas foram classificadas nos graus 3 (moderado) a 5 (muito alto) de vulnerabilidade. Conforme os dados do Representative Concentration Pathway (RCP) apresentados pelo IPCC et al. (2019), foram projetados dois cenários de elevação do nível do mar: o menos crítico, correspondente ao RCP 2.6, com uma taxa de aumento de 4,0 mm/ano até 2100, e o mais crítico, referente ao RCP 8.5, com elevação de 15,0 mm/ano até o mesmo período. Esses cenários foram enquadrados nos graus 3 a 5 de vulnerabilidade, respectivamente. A amplitude média de maré foi de 3,10 m, enquanto a altura significativa das ondas atingiu 0,12 m, indicando vulnerabilidade de grau 3 e 1, respectivamente. A Figura 17 apresenta a altura das ondas em centímetro, ao longo do período analisado.

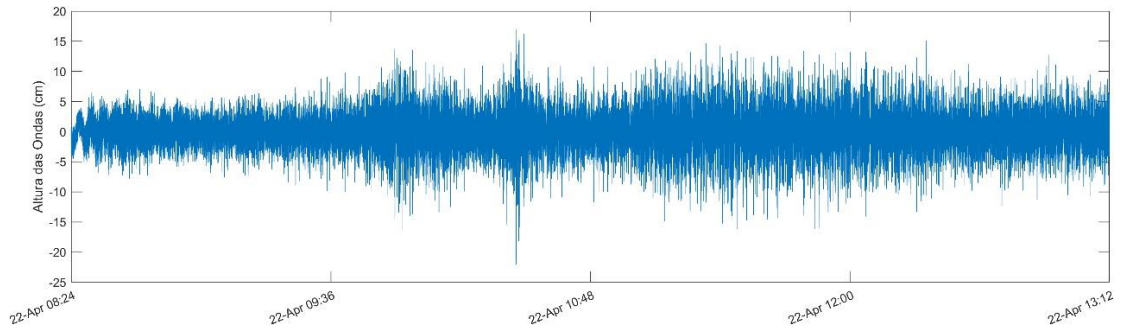


Figura 17: Altura das ondas (cm), durante o período fundeado na praia das Meninas

GEOMORFOLOGIA E USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

A Figura 18 ilustra as principais feições geomorfológicas das áreas costeiras de Jubim. Dentre essas feições, destacam-se o planalto costeiro, caracterizado por baixos platôs com altitudes variando entre 5 e 20 metros acima do nível do mar; a planície de intermaré, que apresenta relevo suavizado e se estende pelo interior de paleovales até o limite da influência das marés; os cordões arenosos atuais, correspondentes às praias; e os deltas de maré vazante, que se distinguem pela presença de dois ou mais canais rasos, separados por bancos arenosos expostos durante a maré baixa. O setor norte, correspondente à praia do Salazar, é caracterizado por uma ampla zona de intermaré areno-lamosa e um baixo gradiente topográfico, enquanto a região de pós-praia é composta por vegetação de mangue

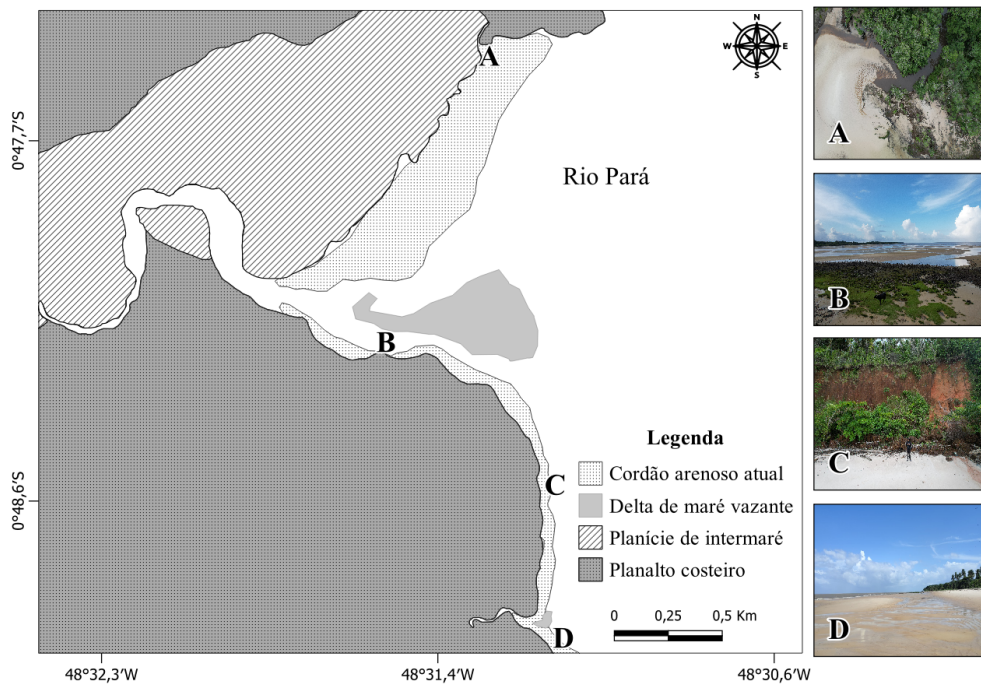


Figura 18: Mapa morfológico da costa de Jubim, indicando as feições costeiras presentes nas praias do Salazar (A), das Meninas (B), da Baleia (C) e do Curuanã (D). Adaptado de França e Souza Filho (2006).

O setor central, correspondente à praia das Meninas, é caracterizado pela presença de cordões arenosos de menor extensão e pela ocorrência de delta de maré vazante. No setor sul, as praias da Baleia e do Curuanã apresentam variação na elevação topográfica ao longo do segmento litorâneo. A praia da Baleia é delimitada por falésias ativas e promontórios esculpidos no planalto costeiro, cujo gradiente topográfico decresce novamente em direção à praia do Curuanã (planície arenosa) (Figura 19).

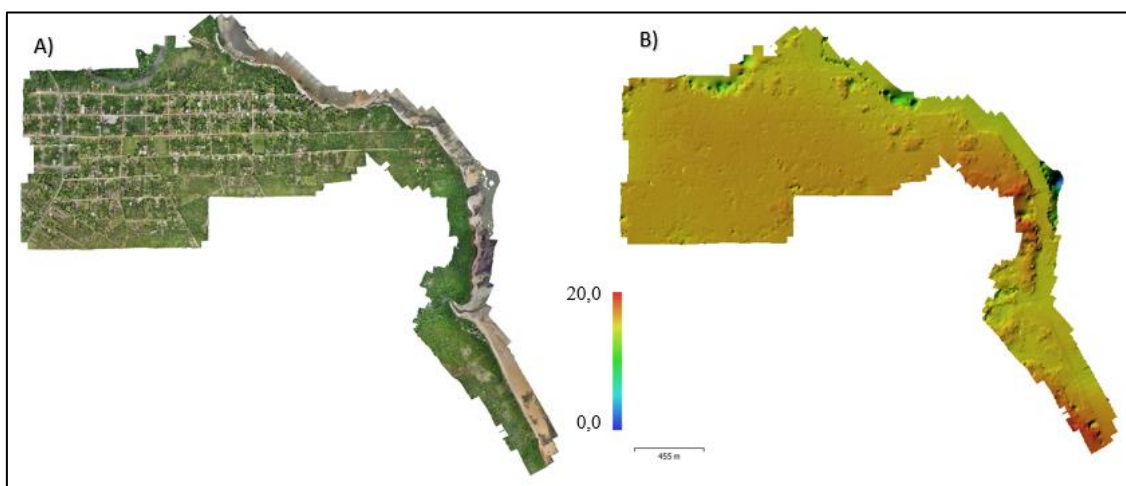


Figura 19: Ortomosaico (A); e o Modelo Digital de Elevação (B) da Vila de Jubim, confeccionados a partir de sobrevoo com drone, com tratamento no software Agisoft Metashape 2.0.0.

Os resultados obtidos a partir do mapa de uso e ocupação do solo revelam a distribuição das diferentes categorias de uso na área de estudo (Figura 20). A análise mostrou que a maior parte do território é dominada por áreas de vegetação nativa (Floresta), que representam aproximadamente 61,59% da região, indicando uma cobertura vegetal significativa, mas com áreas esparsas de degradação, especialmente nas margens de corpos d'água, ao redor da vila (área mais povoada) e ao longo da rodovia. A classe Floresta, é subdividida em manguezal (19,349%), área úmida (0,003%), formação florestal (0,002%) e floresta inundável (42,232%).

A segunda classe mais presente em Jubim representa áreas destinadas à pastagem, com 21,15% do território, que também engloba áreas de agricultura. Nota-se que essas zonas se concentram principalmente no interior do território, todavia há pequenos locais próximos do litoral e ao redor do manguezal destinados à essa atividade econômica. Áreas não vegetadas representam cerca de 8,90% do território.

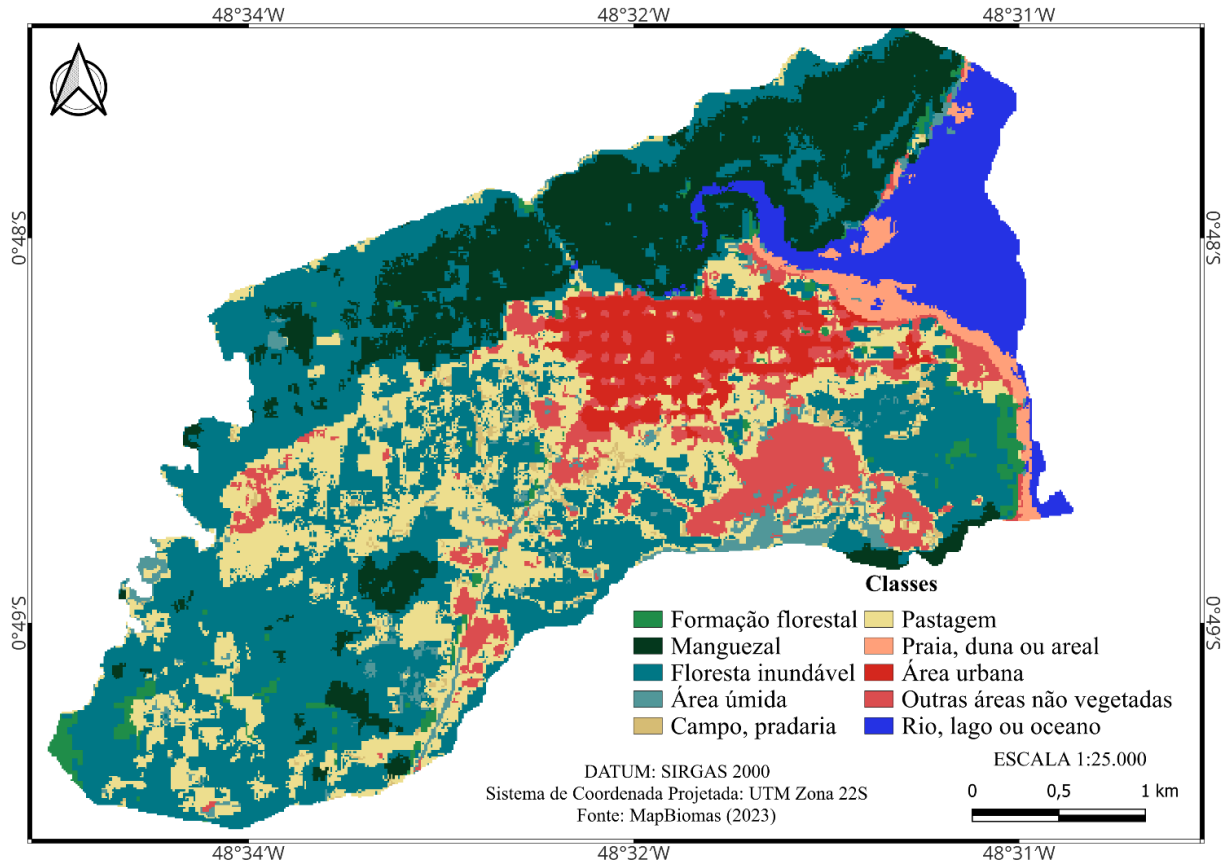


Figura 20: Mapa do uso e ocupação do solo do território de Jubim, de acordo com as diretrizes de elaboração de Mapas do MapBiomias (2024).

ÍNDICE DE VULNERABILIDADE COSTEIRA – IVC

A Tabela 10 apresenta os índices de vulnerabilidade, bem como as variáveis físicas e dinâmicas utilizadas na Eq. 2, conforme a metodologia proposta pelo USGS. Esses índices são categorizados em cinco níveis, variando de 1 a 5, correspondendo, respectivamente, aos graus de vulnerabilidade: muito baixa, baixa, moderada, alta e muito alta.

Tabela 10: Classificação do Índice de Vulnerabilidade Costeira.

Praia	Geomorfologia	Declividade (°)	Taxa de Erosão/Acreção da LC (m/ano)	Amplitude de Maré (m)	Altura Significativa de Onda (m)	RCP 2,6 (mm/ano)	RCP 8,5 (mm/ano)
Salazar	5	5	4	3	1	3	5
Meninas	4	4	3	3	1	3	5
Baleia	2	3	2	3	1	3	5
Curuanã	5	3	3	3	1	3	5

A Figura 21 apresenta resultados discretizados para cada uma das variáveis físicas e dinâmicas dos segmentos litorâneos de Jubim. Os resultados para a declividade da costa sugerem que o segmento norte, correspondente à praia do Salazar, apresenta maior

vulnerabilidade. Na variável geomorfológica, os setores de maior vulnerabilidade correspondem aos segmentos do norte e a pontos específicos do segmento sul, onde se observa a presença de extensas faixas arenosas e cordões litorâneos. No entanto, em parte do segmento sul, especificamente na praia da Baleia, a vulnerabilidade quanto à geomorfologia costeira é classificada como baixa, devido à presença de falésias ao longo da extensão da praia. No segmento central, caracterizado pela ocorrência de cordões litorâneos, delta e escarpas de praia, a vulnerabilidade geomorfológica é classificada como alta. As taxas médias de variação da linha de costa indicam alto grau de vulnerabilidade na praia do Salazar (setor norte) e um nível moderado nas praias das Meninas (setor central) e Curuanã (setor sul, em pontos específicos). No segmento sul, observa-se um cenário de estabilidade a acreção sedimentar, o que sugere condições de vulnerabilidade entre moderada e muito baixa.

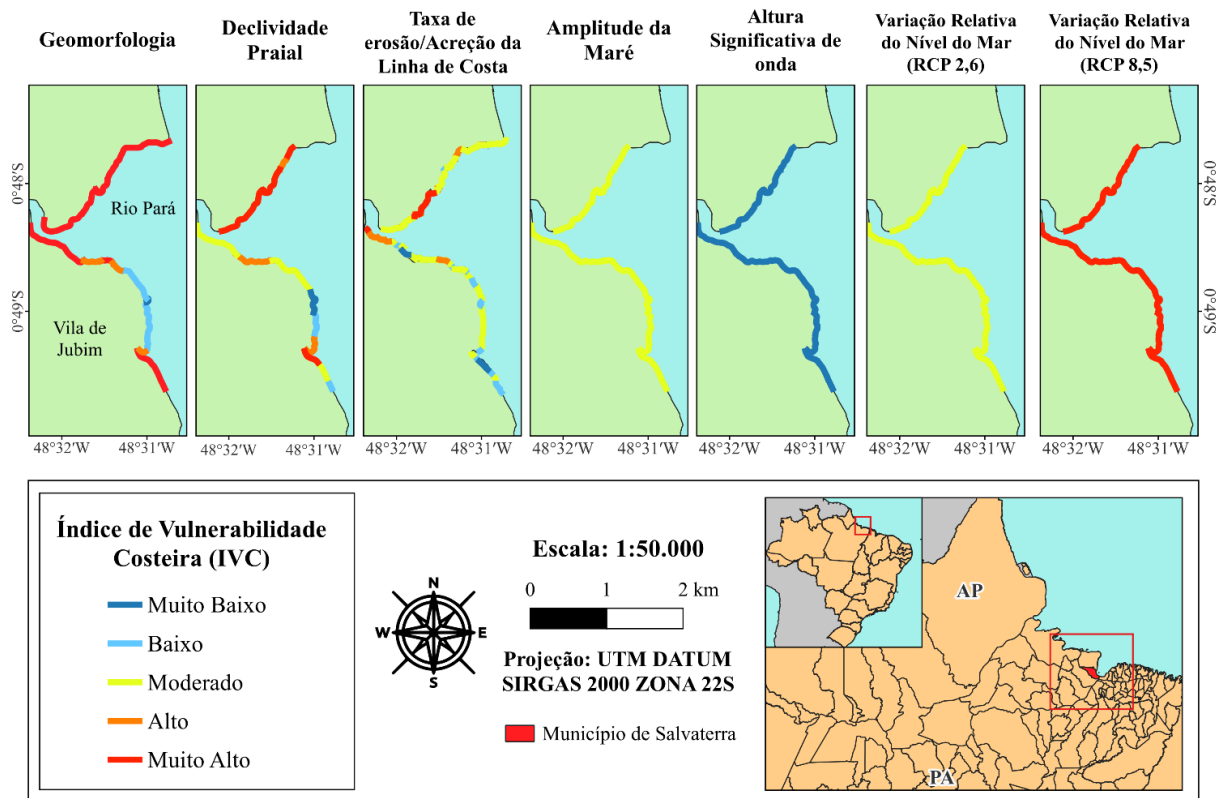


Figura 21: Resultados obtidos para o IVC envolvendo variáveis físicas e dinâmicas estabelecidas pelo USGS.

Com base nas projeções de elevação do nível do mar estabelecidas pelo IPCC, em que o cenário conservador (RCP 2.6) prevê um aumento de 4,0 mm/ano e o cenário mais crítico (RCP 8.5) projeta uma elevação de 15,0 mm/ano até 2100, foi elaborado um mapa do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC). A construção desse mapa considerou a ponderação dos índices de vulnerabilidade das variáveis físicas e dinâmicas analisadas. Os resultados obtidos por meio

da Equação 1 variaram entre 7,34 e 30,61, com valores médios, modais e medianos de 19,92, 23,71 e 18,97, respectivamente. A análise estatística indicou um desvio padrão de 6,17. Os percentis calculados para o Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) foram de 15,00 para o 25° percentil, 18,97 para o 50° percentil e 23,71 para o 75° percentil. Dessa forma, a classificação dos graus de vulnerabilidade foi estabelecida da seguinte maneira: valores inferiores ao 25° percentil correspondem ao grau 1 (baixo), entre o 25° e o 50° percentil ao grau 2 (moderado), entre o 50° e o 75° percentil ao grau 3 (alto) e valores superiores ao 75° percentil ao grau 4 (muito alto) (Figura 22).

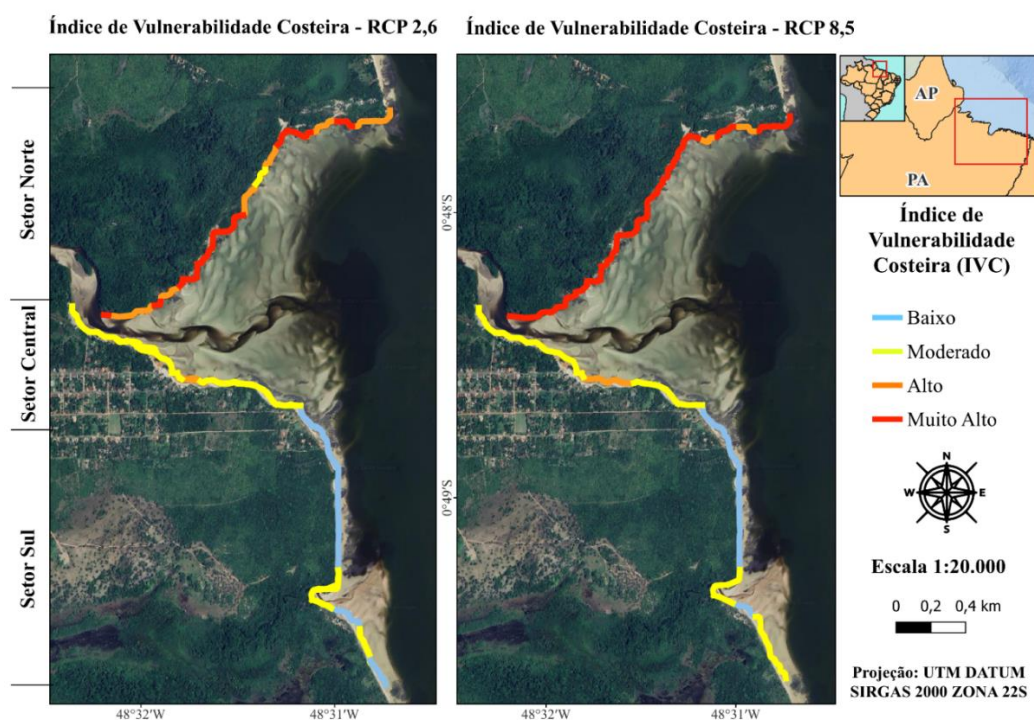


Figura 22: Mapa de Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) do litoral da comunidade de Jubim, utilizando como base dois resultados da Variação do Nível Médio do Mar (NMM): RCP 2,6 (4,0 mm/ano) e RCP 8,5 (15,0 mm/ano).

DISCUSSÃO

Os resultados referentes a cada variável física e dinâmica seguiram integralmente o método do índice de vulnerabilidade costeira proposto por Thieler & Hammar-Klose (1999) e Pendleton et al. (2010). Estudos brasileiros que aplicaram esse método geralmente indicam a necessidade de adaptações locais (Osilieri, Seoane & Dias 2020). No entanto, no presente estudo, os valores das seis variáveis físicas e dinâmicas analisadas na costa da comunidade de Jubim foram quantificados sem modificações, seguindo rigorosamente os critérios do IVC - USGS, visto que são coerentes à zona costeira amazônica.

O mapa de Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) foi elaborado com base nas duas

projeções de elevação do nível médio do mar propostas pelo IPCC e utilizadas nesta pesquisa. Os dados analisados neste estudo indicam que a projeção referente ao RCP 2.6 (cenário otimista de elevação do nível do mar de 4,0 mm/ano até 2100) resultou em um índice moderado de vulnerabilidade costeira ao longo de 28,28% da extensão do litoral estudado, que corresponde a aproximadamente 4,7 km, seguido por 27,30% de áreas classificadas com baixa vulnerabilidade. Por outro lado, a aplicação do RCP 8.5 (cenário crítico de elevação do nível do mar de 15,0 mm/ano até 2100) revelou valores mais expressivos em toda a área analisada. Ao longo da linha de costa, predominou a vulnerabilidade moderada, abrangendo 30,30% da extensão total, com destaque para a praia do Curuanã (setor sul), onde esse nível de vulnerabilidade se intensificou, elevando a classificação de baixa vulnerabilidade observada no cenário otimista para moderada no cenário de elevação crítica do nível médio do mar. Além disso, na praia do Salazar (setor norte), observou-se um aumento na vulnerabilidade, com 27,30% da área classificada como altamente vulnerável.

Assim, a maior vulnerabilidade à erosão costeira foi obtida no setor norte da área de estudo, em decorrência de suas características geológicas. Taxas negativas de variação da linha de costa (erosão) foram observadas neste setor por se tratar de uma praia arenosa (Figura 23a) com baixa inclinação topográfica (menores valores de declividade praial registrados), ou seja, mais susceptível às oscilações do nível d'água. Sharples & Watson (2025) afirmam que processos de recuo da linha de costa em praias arenosas serão cada vez mais frequentes em todo o mundo, como resposta ao aumento relativo do nível do mar.



Figura 23: Linhas de costa e geomorfologia do setor norte representado em (A) praia do Salazar; Setor central representado em (B) praia das Meninas; Setor sul representado em (C) praia da Baleia e em (D) praia do Curuanã.

Embora a praia do Salazar margeie o manguezal, e este contribua para o processo de estabilidade costeira, fornecendo um mecanismo adicional para reter e fixar sedimentos (Allison et al. 2000, Gasparinetti 2018), no setor norte, o manguezal está recuando. Foi observado uma retração de até 170 metros da linha de costa de 1990 a 2023. Essa ampla variação da linha de costa se assemelha aos resultados encontrados por Menezes, Guimarães & El-Robrini (2024) ao longo da costa do município de Soure-PA, município vizinho à Salvaterra, onde situa-se o distrito de Jubim. De acordo com os autores, a hidrodinâmica do rio Pará influencia principalmente processos de erosão e transporte ao longo da margem leste da Ilha do Marajó, cuja maior deposição sedimentar e progradação costeira direciona-se ao extremo norte da ilha.

No setor central de Jubim, a existência do canal que recebe o mesmo nome confere vulnerabilidade alta na região mais interna, devido ao efeito erosivo da descarga fluvial, contudo, em direção à foz, o elevado aporte sedimentar permitiu o desenvolvimento de delta de maré vazante (Figura 23b), cuja deposição sedimentar propicia uma vulnerabilidade moderada à praia das Meninas.

No setor sul, observou-se moderada a baixa vulnerabilidade, relacionada à estabilidade e acreção costeira a qual o setor vem apresentando nas últimas três décadas. Essa característica pode ser explicada não somente por um transporte e deposição sedimentar favorável em direção ao extremo sul, onde estão o canal e a praia do Curuanã (Figura 23c), mas também pela influência da geomorfologia costeira na evolução da linha de costa, uma vez que a presença de falésias confere maior resistência e estabilidade ao segmento litorâneo em comparação às praias desprovidas dessa feição geomorfológica (Novaes, Lobo & Ranieri 2024). Essas falésias se destacam na linha de costa da praia da Baleia – setor sul (Figura 23d), onde extensas plataformas de abrasão de ondas também ocupam a maior parte da zona de intermaré (entremarés).

Desta forma, o segmento sul da área de estudo apresenta baixa a moderada declividade e zona de espraiamento de ondas mais estreita em relação às demais praias. Todas elas apresentam estado morfodinâmico dissipativo, ou seja, praias planas onde a maior parte da energia das ondas é gasta através do processo de quebra na antepraia (Sherman 2019).

A análise do mapa geomorfológico da zona costeira de Jubim (Figura 18) e o Modelo Digital de Elevação (Figura 19b) mostram a vulnerabilidade costeira nos setores norte e central da área estudada, devido à baixa declividade na zona entremarés e as feições morfológicas presentes na linha de costa, feições estas mais suscetíveis à mobilização sedimentar, como os

cordões arenosos e escarpas de praia existentes nestes setores. O aporte sedimentar do rio Pará forma cordões arenosos na forma de praias estuarinas, atuando como principal fonte de sedimentos para o sistema praias local, mas também propiciando intensas correntes originadas pelas meso-macromarés que ocorrem no estuário (Sousa & Ranieri 2023). Isso induz níveis de vulnerabilidade que variam de moderados a altos para esses parâmetros (geomorfologia, declividade e amplitude de maré), em contrapartida ao parâmetro altura de ondas, cuja influência é baixa.

A correlação do mapa de uso e ocupação do solo com a vulnerabilidade costeira revelou que o litoral da área de estudo está ameaçado pela erosão. Esse fenômeno representa impacto às atividades econômicas locais da comunidade de Jubim, que depende dessas áreas para sua subsistência. Impactos como a redução na extração de frutos da vegetação que ocupa a linha de costa, perda de zonas de mangue e redução na extração de crustáceos e moluscos, diminuição de áreas agrícolas, exposição de afloramentos rochosos que dificultam a pesca e navegabilidade, além dos perigos às moradias que ocupam a linha de costa. O avanço da erosão pode levar à perda de terras produtivas, afetando a segurança alimentar, a economia e a estrutura sociocultural da população (Hernani et al. 2002). A proximidade entre áreas agrícolas e pastoris e a zona costeira reforça a necessidade de medidas de gestão territorial que considerem tanto a conservação ambiental quanto a sustentabilidade das atividades econômicas. Estratégias como a implementação de barreiras naturais, recuperação de vegetação nativa e planejamento do uso do solo podem contribuir para minimizar os impactos da erosão e garantir a resiliência da costa frente às mudanças ambientais.

CONCLUSÃO

A aplicação do método do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) na comunidade de Jubim, situada na costa amazônica do estado do Pará, revelou-se eficaz na quantificação dos processos de risco geológico relacionados à elevação do nível do mar, e consequente erosão costeira. A análise da vulnerabilidade costeira na Vila de Jubim, fundamentada na metodologia proposta pelo IPCC, possibilitou uma avaliação detalhada dos fatores que influenciam a dinâmica da linha de costa, contribuindo para a compreensão dos processos erosivos e deposicionais que afetam a região. A aplicação do IVC revelou variações significativas ao longo dos setores analisados, evidenciando áreas mais suscetíveis à erosão e outras relativamente estáveis.

O setor norte, onde se localiza a praia do Salazar, apresentou os maiores índices de vulnerabilidade, devido à elevada taxa de movimentação da linha de costa, à declividade suave

e à predominância de sedimentos arenosos finos, esse conjunto de fatores tornam o ambiente mais propenso a processos erosivos intensos. No setor central, onde há maior ocupação antrópica e infraestrutura, observou-se uma dinâmica mista, com áreas estáveis e outras em erosão moderada. Já o setor sul demonstrou maior estabilidade, com indícios de acreção sedimentar, o que pode estar relacionado à menor energia hidrodinâmica (zona de maior deposição sedimentar ao extremo sul) e à presença de plataformas de abrasão, atuando como amortecedores da energia de ondas.

A análise do uso e ocupação do solo revelou que a maior parte do território é composta por vegetação nativa, havendo também regiões importantes destinadas à agricultura e pastagem, sendo estas últimas identificadas tanto no interior quanto em pequenas áreas próximas ao litoral e ao manguezal. A correlação desses dados com a vulnerabilidade costeira demonstrou que o litoral da área de estudo está sendo impactado por processos erosivos, resultando no recuo da linha de costa e ameaçando as atividades econômicas da comunidade local.

Conclui-se que todas as informações obtidas nesta pesquisa são fundamentais para a continuidade de um monitoramento sistemático e presencial, com o objetivo de ampliar a coleta de dados oceanográficos e geológicos atualizados, bem como a construção de séries temporais históricas. Isso se torna especialmente relevante, considerando que essa região é pouco estudada no contexto dessas áreas do conhecimento, o que dificulta a formulação de projeções mais precisas sobre a evolução costeira. Por fim, a análise da vulnerabilidade costeira em regiões litorâneas rurais, integrada aos processos que influenciam a dinâmica da linha de costa, representa apenas um elemento dentro de um sistema mais amplo e complexo. Portanto, investigações associadas às abordagens interdisciplinares, são essenciais para aprofundar o entendimento sobre os impactos das mudanças climáticas em comunidades extrativistas e, subsidiar estratégias eficazes de gestão e conservação desses ambientes, cuja importância ecológica e econômica merece atenção.

REFERÊNCIAS

- ALESHEIKH, A. A., GHORBANALI, A., NOURI, N. Coastline change detection using remote sensing. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 4(1), p. 61-66, 2007.
- BARROS, E. L., PINHEIRO, L. de S., GUERA, R. G. P., MOURA, F. J. M. de., PAULA, D. P. de., NETO, A. R. X., LEISNER, M. M., MORAIS, J. O. de. Shoreline Change and Coastal Erosion: An Analysis of Long and Short-Term Alterations and Mitigation Strategies on the Coast of Icapuí, Northeast Brazil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, [S. l.], v. 25, n. 4, 2024.
- BHARADWAZ, G. S. V. S. A., PAL, I., MOZUMDER, C., AHMAD, M. M. Assessing

- dynamic coastal vulnerability to climate hazards: A geospatial approach in Kakinada District, Andhra Pradesh, India. *Environmental and Sustainability Indicators*, v. 26, n. 100622, 2025.
- BOX, J.E., HUBBARD, A., BAHR, D.B., COLGAN, W.T., FETTWEIS, X., MANKOFF, K.D., WEHRLE, A., NOEL, B., VAN DEN BROEKE, M.R., WOUTERS, B., BJØRK, A.A., FAUSTO, R.S. Greenland ice sheet climate disequilibrium and committed sea-level rise. *Nature Climate Change*, v. 12, p. 808-813, 2022.
- BRAGA, R. C., PIMENTEL, M. A. S., COELHO, C., SZLAFSZTEIN, C. F., ROLLNIC, M. Vulnerabilidade diante da ação energética do mar: Estudo de caso no município de Salinópolis, Zona Costeira Amazônica, Brasil. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, v. 19, n. 4, p. 245-264, 2019.
- 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.
- DAL CIN, R., SIMENONI, U. A model for determining the Classification, Vulnerability and Risk in the Southern Coastal Zone of the March (Italy). *Journal of Coastal Research*, v. 10, n. 1, p. 18-29, 1994.
- DWARAKISH, G. S., VINAY, S. A., NATESAN, U., ASANO, T., KAKINUMA, T., VENKATARAMANA, K., JAGADEESHA, P., BABITA, M. K. Coastal Vulnerability Assessment of the Future Sea Level in Udupi Coastal Zone of Karnataka State, West Coast of India. *Ocean & Coastal Management*, v. 52, p. 467-478, 2019.
- EL-ROBRINI, M., RANIERI, L.A., SILVA, P.V.M., ALVES, M.A.M.S., GUERREIRO, 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*. Brasília: MMA. p. 65-166, 2018.
- FRANÇA, C. F., SOUZA FILHO, P. W. M. Análise das mudanças morfológicas costeiras de médio período na margem leste da Ilha do Marajó (PA) em imagem LANDSAT. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 33, p. 127-136, 2003.
- FRANÇA, C. F., SOUZA FILHO, P. W. M. Compartimentação morfológica da margem leste da Ilha do Marajó: zona costeira dos municípios de Soure e Salvaterra – Estado do Pará. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Ano 7, n. 1, p. 33-42, 2006.
- GASPARINETTI, P. The values of ecosystem services of Brazilian mangroves, economic instruments for their conservation and the case study of Salgado Paraense. *Conservation Strategy Fund (CSF)*, 2018.
- GORNITZ, V. M. Global coastal hazards from future sea level rise. *Global and Planetary Change*. v. 3, n. 4, p. 379-398, 1991.
- GORNITZ, V. M., DANIELS, R. C., WHITE, T. W., BIRDWELL, K. R. The Development of Coastal Risk Assessment Database: Vulnerability to Sea-Level Rise in the U.S. Southeast. *Journal of Coastal Research*, n. 12, p. 327-338, 1994.
- HENRIQUES, R. J., OLIVEIRA, F. S., SCHAEFER, C. E. G. R., LOPES, P. R. C., SENRA, E. O., LOURENÇO, V. R., FRANCELINO, M. R. Impacts of anthropocene sea-level rise on people, environments, and archaeological sites in Marajó Island, Brazilian Amazonia. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 136, 104836, 2024.
- HERNANI, L. C., FREITAS, P. L., PRUSKI, F. F., DE MARIA, I. C., CASTRO FILHO, C., LANDERS, J. N. A erosão e seu impacto. *Repositório de Informação da Embrapa*, v. 5, p.

- 47-60, 2002.
- IPCC. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, NY, USA, 2013.
- IPCC. Technical Summary [H.-O. PÖRTNER, D.C. ROBERTS, V. MASSON-DELMOTTE, P. ZHAI, E. POLOCZANSKA, K. MINTENBECK, M. TIGNOR, A. ALEGRÍA, M. NICOLAI, A. OKEM, J. PETZOLD, B. RAMA, N.M. WEYER (eds.)]. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.- O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 39–69, 2019.
- KOROGLU, A., RANASINCHE, R., JIMÉNEZ, J. A., DASTGHEIB, A. Comparasion of Coastal Vulnerability Index Applications for Barcelona Province. *Ocean and Coastal Management*, v. 178, n. 104799, p. 1-14, 2019.
- LIMA, A.M., OLIVEIRA, L.L., FONTINHAS, R.L., LIMA, R.J.S. Ilha do Marajó: Revisão Histórica, Climatológica, Bacias Hidrográficas e Propostas de Gestão. *HOLOS Environment*, v.5 n.1, p. 65, 2005.
- MAITI, S., BHATTACHARYA, A. Shoreline Change Analysis and Its Application to Prediction: A Remote Sensing and Statistics Based Approach. *Marine Geology*, v257, p. 11-23, 2009.
- MAPBIOMAS. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD). MapBiomass General “Handbook”, v. 1, collection 9, 2024.
- MENEZES, R. A. A., GUIMARÃES, D. K. M., EL-ROBRINI, M. Variations of the coastline in a medium period (1985-2017) of a tropical island: the case of Soure (Marajó – Pará/Brazil). *Boletim Paulista de Geografia*, n. 112, 2024.
- MISHRA, M., CHAND, PATTNAIK, N., KATTEL D. B., PANDA, G. K., MOHANTI, M., BARUAH, U. D., CHANDNIHA, S. K., ACHARY, S., MOHANTY, T. Response of long- to Short- term changes of the Puri Coastline of Odisha (India_ to natural and anthropogenic factors: a remote sensing and statistical assessment. *Environmental Earth Sciences*, v. 78, n. 338, p. 1-23, 2019.
- MUEHE, D., FERNANDEZ, G. B., BULHÕES, E. M. R., AZEVEDO, I. F. Avaliação da Vulnerabilidade Física da Orla Costeira em Nível Local, Tomando como Exemplo o Arco Praial entre Rio das Ostras e o Cabo Búzios/RL. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 12, n. 2, p. 45-58, 2011.
- MUZIRAFUTI, A. Assessing Coastal Vulnerability Index in Mediterranean Areas: A Case Study of Casablanca. Preprints, 2025.
- NGUYEN, T. T. X., BONETTI, J., ROGERS, K., WOODROFFE, C. D. Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts: a review of concepts, methodological approaches and vulnerability indices. *Ocean Coast Manag*, v. 123, p. 18–43., 2016.
- NICHOLLS, R. J., HANSON, S. E., LOWE, J. A., WARRICK, R. A., LU, X., LONG, A. J. Sea-level scenarios for evaluating coastal impacts. *WIREs Clim Change* [Online] 5, 2014.
- NOAA. Administração Oceânica e Atmosférica Nacional. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide, 2017.
- NOVAES, G. de O., LOBO, F. C., RANIERI, L. A. Geindicadores de vulnerabilidade à erosão

- e risco costeiro em praias estuarinas da costa amazônica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 25, n. 2, 2024.
- NOVAK, L. P., LAMOUR, M. R. Avaliação do Risco à Erosão Costeira em Praias Urbanizadas do Paraná. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 22, n. 1, p. 163-185, 2021.
- OPPENHEIMER, M., GLAVOVIC, B. C., HINKEL, J., VAN DE WAL, R., MAGNAN, A. K., ABD- ELGAWAD, A., CAI, R., CIFUENTES-JARA, M., DECONTO, R. M., GHOSH, T., HAY, J., ISLA, F., MARZEION, B., MEYSSIGNAC, B., SEBESVARI, Z. 2022. Sea Level rise and implications for low-lying islands, coasts and communities. In: P'ORTNER, H.-O., ROBERTS, D. C., MASSON- DELMOTTE, V., ZHAI, P., TIGNOR, M., POLOCZANSKA, E., MINTENBECK, K., ALEGRÍA, A., NICOLAI, M., OKEM, A., PETZOLD, J., RAMA, B., WEYER, N. M. (Eds.), *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, p. 321–445, 2022.
- OSILIERI, P. P. G., SEOANE, J. C. S., DIAS, F. B. Coastal Vulnerability Index Revisited: A Case Study from Maricá, RJ, Brazil. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 72, n. 1, p. 81-99, 2020.
- PENDLETON, E. A., BARRAS, J. A., WILLIAMS, S. J., TWICHELL, D. C. Coastal vulnerability assessment of the Northern Gulf of Mexico to sea-level rise and coastal change. *Geological Survey Open-File Report*, v. 2010-1146, p. 1-26, 2010.
- PENDLETON, E. A., HAMMAR-KLOSE, E. S., THIELER, E. R., WILLIAMS, S. J. Coastal Vulnerability Assessment of Gulf Islands National Seashore (GUIS) to Sea-Level Rise. *Geological Survey Open-File Report*, v. 03-188, p. 1-18, 2004.
- 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.
- RIAHI, K., GRUBLER, A., NAKICENOVIC, N. Scenarios of long-term socioeconomic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 74, n. 7, p. 887-935, 2007.
- SHARPLES, C., WATSON, C. An abrupt change in long-term shoreline behaviour at Roches Beach, Tasmania: An early response to contemporary climate change-induced sea-level rise? *Marine Geology*, v. 480, 107475, 2025.
- SHERMAN, D.J. Praias Dissipativas. Em: FINKL, C.W., MAKOWSKI, C. (eds) *Enciclopédia de Ciência Costeira*. Série Enciclopédia de Ciências da Terra. Springer, Cham. 2019.
- SOUSA, M.B.P. de, RANIERI, L.A. Morfodinâmica de praias estuarinas da costa leste da Ilha do Marajó, Amazônia Oriental. *Revista Brasileira De Geomorfologia*, 24(3), 2023.
- SOUZA, E. M. S., ANDRADE, M. M. N. Dinâmica da linha de costa na Zona Costeira Amazônica: estudo de caso na ilha de Atalaia (Salinópolis, PA). *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 17, n. 4, p. 2911-2929, 2024.
- SPECIAL REPORT ON THE OCEAN AND CRYOSPHERE IN A CHANGING. Chapter 4: Sea Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities. *IPCC - SR Ocean and Cryosphere (SROCC)*, p. 1-169, 2019.
- TANO, R. A., AMAN, A., KOUADIO, K. Y., TOUALY, E., ALI, K. E., ASSAMOI, P. Assessment of the Ivorian Coastal Vulnerability. *Journal of Coastal Research*, v. 32, n. 6, p. 1495-1503, 2016.

THIELER, E. R., HAMMAR-KLOSE, E. S. National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: Preliminary Results for the U.S. Gulf of Mexico Coast. U.S. Geological Survey Open-File Report, v. 00-179, p. 1-15, 1999.

UNITED NATIONS. Ocean Factsheet Package. Presented at the The Ocean Conference, New York, USA, p. 7, 2017.

VAN VUUREN, D.P., DEN ELZEN, M.G., LUCAS, P.L., EICKHOUT, B., STRENGERS, B.J., VAN RUIJVEN, B., VAN HOUDT, R. Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. *Climatic Change.*, v. 81, n. 2, p 119–159, 2007.

VAN VUUREN, D.P., EDMONDS, J., KAINUMA, M., RIAHI, K., THOMSON, A., HIBBARD, K., HURTT, G.C., KRAM, T., KREY, V., LAMARQUE, J.F., MASUI, T., MEINSHAUSEN, M., NAKICENOVIC, N., SMITH, S.J., ROSE, S.K. The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, [S. 1.], v. 109, n. 1-2, p. 5, 2011.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação avaliou a vulnerabilidade costeira à erosão na comunidade tradicional de Jubim, margem leste da Ilha do Marajó, tendo como análises principais a variação da linha de costa, o mapeamento de ambientes e uso e cobertura de solo na comunidade, e a aplicabilidade de um Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) que relaciona variáveis geomorfológicas e hidrodinâmicas às projeções de elevação do nível do mar propostas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

A hipótese da pesquisa era de que o IVC obtido fosse de moderado a alto na área de estudo, contudo identificou-se no setor sul índices baixos de vulnerabilidade à erosão, embora quase 50% do litoral de Jubim tenha apresentado IVC muito alto.

Esta pesquisa veio somar aos trabalhos realizados na região da Amazônia Atlântica sobre as consequências das mudanças climáticas, seguida da elevação do nível do mar e erosão costeira na zona costeira amazônica, trazendo informações científicas importante tanto para o monitoramento da linha de costa, como o monitoramento de praias da costa leste da Ilha do Marajó.

Sendo assim, as principais considerações obtidas neste estudo são destacadas abaixo:

- A taxa média de variação dos setores Norte, Central e Sul para o período estudado (33 anos) foi de -1,99, -0,66 e 0,07 a 2 m/ano respectivamente, apresentando assim uma tendência à erosão da região norte e estabilidade na região sul.
- As áreas de erosão e acreção identificadas no litoral da comunidade de Jubim mostram como a margem é dinâmica, apresentando setores com altas taxas de erosão e acreção em áreas

pontuais e em sua maior extensão setores com médias taxas de erosão e acreção.

- As áreas que apresentam altas taxas de erosão estão mais expostas às forçantes (correntes, ondas e marés), e onde a declividade da face praial é menor, principalmente no caso da praia do Salazar. As áreas com taxas de acreção são mais abrigadas ou apresentam falésias ativas em sua margem com declividade da face praial um pouco mais acentuada.
- Com todos os dados quantitativos gerados e comparando com estudos já realizados na costa amazônica, podemos compreender como as ações naturais podem modificar a LC de um mesmo estuário de forma distinta, sendo importante detectarmos as áreas mais prejudicadas e quais forçantes mais atuantes, para assim conter ou evitar prejuízos a população local e a perda de áreas de manguezais.
- O método do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) aplicado na comunidade de Jubim, mostrou-se eficaz para avaliar riscos geológicos relacionados à elevação do nível do mar e erosão costeira. A análise do IVC revelou que o setor norte apresenta alta vulnerabilidade devido à movimentação intensa da linha de costa, declividade suave e predominância de sedimentos arenosos finos, tornando-o mais suscetível à erosão. O setor central, caracterizado por maior ocupação antrópica, apresenta áreas estáveis e outras com erosão moderada. Já o setor sul mostrou estabilidade e indícios de acreção sedimentar, provavelmente devido à menor energia hidrodinâmica e à presença de plataformas de abrasão.
- A análise do uso e cobertura do solo revelou que a região é majoritariamente coberta por vegetação nativa, com áreas agrícolas e de pastagem. A erosão costeira pode provocar o recuo da linha de costa, ameaçando as atividades econômicas locais.
- Por fim, sugere-se para trabalhos futuros a utilização de dados hidrodinâmicos mais robustos com uma maior escala temporal e espacial.

REFERÊNCIAS

- Ab'Saber A. N. 1967. Problemas geomorfológicos da Amazônia Brasileira. *In: Simpósio sobre a Biota Amazônica. Atas[...]*. Rio de Janeiro; Conselho Nacional de Pesquisas, Lent H. (ed.). v.1, 35-67.
- Abuoda, P. A. & Woodroffe C. D. 2006. International assessments of the vulnerability of the coastal zone to climate change, including an Australian perspective. *Wollongong, Research Online/University of Wollongong*. Disponível em: <https://ro.uow.edu.au/scipapers>. Acesso em: 15 jan. 2025.
- Alcoforado A. V. C. 2017. *Índice de vulnerabilidade costeira e risco à inundação em cenários de mudanças climáticas no estuário do rio Piranhas-Açu com utilização de imagens de sensores orbitais e de lidar aeroportado*. MS Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 107 p.
- Apostolopoulos D. & Nikolakopoulos K. 2021. A review and meta-analysis of remote sensing data, GIS methods, materials and indices used for monitoring the coastline evolution over the last twenty years. *European Journal of Remote Sensing*, [S. l.], **54** (1):240-265, jan. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/22797254.2021.1904293>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- Baía L. B., Ranieri L. A., Rosário R. P. 2021. Análise multitemporal da variação da linha de costa em praias estuarinas de macromaré na Amazônia oriental. *Geociências*, 40(1): 231-244.
- Baral R., Samal R.N., Mishra S.K. 2018. Shoreline Change Analysis at Chilika Lagoon Coast, India Using Digital Shoreline Analysis System. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, **46**(3):1637-1644.
- Barboza M. J. S., Eid F., Santos M. A. R, Carvalho K. F., Guedes L. P. F., Santos R. A. S., Cruz W. C., Souza E. J. Lima de, Félix O. D. L. 2012. *Relatório Analítico do Território do Marajó*. Grupo de Estudo e Pesquisa Trabalho e Desenvolvimento na Amazônia – GPTD. Programa Incubadora Tecnológica de Cooperativas Populares e Empreendimentos Solidários – PITCPES.
- Box J.E., Hubbard A., Bahr D.B., Colgan W.T., Fettweis X., Mankoff K.D., Wehrle A., Noel B., Van Den Broeke M.R., Wouters B., Bjørk A.A., Fausto R.S. 2022. Greenland ice sheet climate disequilibrium and committed sea-level rise. *Nature Climate Change*, **12**: 808-813.
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente (MMA). 2002. *Projeto Orla: fundamentos para gestão integrada*. Brasília, DF. 78 f.
- Carvalho, M. Â. V. de & Oyama M. D. 2013. Variabilidade da largura e intensidade da Zona de Convergência Intertropical atlântica: aspectos observacionais. *Revista Brasileira de Meteorologia*, [S.l.], **28** (3): 305–316.
- Conti L. A. & Rodrigues M. 2011. Variação da linha de costa na região da ilha dos Guarás – PA através de análise de série temporal de imagens de satélites. *Revista Brasileira de Geografia Física*, [S. l.], **5**: 922–937 CPTEC/INPE. *Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos*. El Niño e La Niña. 2024.
- Dal Cin R. & Simenoni U. 1994. A model for determining the classification, vulnerability and risk in the Southern Coastal Zone of the march (Italy). *Journal of Coastal Research*, **10** (1): 18-29.

- Diretoria de Hidrografia e Navegação-DHN. 2023. *Tábua das marés*. Marinha do Brasil. Disponível em: <http://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>. Acesso em: 3 ago. 2023.
- Dwarakish, G. S., Vinay, S. A., Natesan, U., Asano, T., Kakinuma, T., Venkataramana, K., Jagadeesha, P., Babita, M. K. 2019. Coastal Vulnerability Assessment of the Future Sea Level in Udipi Coastal Zone of Karnataka State, West Coast of India. *Ocean & Coastal Management*. (52): 467-478.
- Fernandez G. B., Muehe, D. 2006. Algumas considerações sobre o efeito do fenômeno El Niño sobre feições costeiras ao longo da costa brasileira. *GEOgraphia*, [S. l.], (8): 15.
- França, C. F. D.; Souza Filho, P. W. M. E. 2003. Análise das mudanças morfológicas costeiras de médio período na margem leste da ilha de Marajó (PA) em imagens Landsat. *Revista Brasileira de Geociências*, [S. l.] 33 (2): 127-136. Disponível em: <http://ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/9877/9166>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- França C. F., Pimentel M. A. S., Araújo, F. A. 2022. Dinâmica Costeira através da análise de Indicadores. Estudos de caso: Ilhas de Mosqueiro, Cotijuba, Marajó e Ajuruteua (Brasil), Beira (Moçambique) e Santiago de Cuba. Ananindeua, PA: Editora Itacaiúnas.
- França, C. *Morfologia e mudanças costeiras da margem leste da Ilha de Marajó (PA)*. 2003. 144 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2003.
- Gornitz, V. Global coastal hazards from future sea level rise. 1990. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology Global and Planetary Change Section*, (89): 379-398.
- Guimaraes, U. S.; Rodrigues, T. W. P.; Lourdes, B. T. G.; Pamplona, V. M. S. 2014. Change detection applied on shorelines in the mouth of Amazon River. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, p. 2146-2149.
- Himmelstoss, E.A.; Henderson, R.E.; Kratzmann, M.G.; Farris, A.S. 2018. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide: U.S. *Geological Survey Open-File Report 2018–1179*, p. 110.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2011. Atlas geográfico das zonas costeiras e oceânicas do Brasil. Rio de Janeiro - RJ: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, p. 176.
- Intituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos-CPTEC. *El Niño e La Niña*. [S.l.], 2024.
- Intergovernmental Painel on Climate Change-IPCC. Summary for policymarkes. *In: Climate Change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Painel on Climate Change*, NY, USA, 2013.
- Intergovernmental Painel on Climate Change-IPCC. 2019. Technical summary. *In: Portner D.C., Roberts V., Masson-Delmotte P., Zhai M., Tignor E., Poloczanska K., Mintenbeck A., Alegría M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.). Po`Rtner H.-O., Roberts D.C., Masson- Delmotte V., Zhai P., Poloczanska E., Mintenbeck K., Tignor M., Alegría A., Nicolai M., Okem A., Petzold J., Rama B., Weyer N.M. (eds.). IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate*. Cambridge, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, p. 39–69. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9781009157964.002>.
- Kayano M. T. *et al* 2016. El Niño e La Niña dos últimos 30 anos: diferentes tipos. *Revista Climanalise*, Edição Comemorativa de 30 anos do Climanalise, [S. l.], 30:7-12.

- Köppen W. 1948. *Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra*. México, Fondo de Cultura Econômica, 478p.
- Lima A. M. M.; Oliveira L. L.; Fontinhas R. L.; Lima R. J. S. 2005. *Ilha do Marajó: Revisão histórica, hidroclimatológica, bacias hidrográficas e proposta de gestão*. Relatório Técnico. Secretaria Executiva de Ciência Tecnologia e Meio Ambiente – Núcleo de Hidrometeorologia (SECTAM/NHM). Belém.
- Lins-De-Barros, F. M. 2005. Áreas Críticas e de Risco Potencial à Erosão Costeira no Município de Maricá. In: *Congresso Da Associação Brasileira De Estudos Do Quaternário*, 10, Guarapari. São Paulo: ABEQUA
- Mallmann, D. L. B. 2016. Análise de risco à erosão costeira de curto-termo para o litoral central de Pernambuco. 158 f. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Pernambuco, 2016.
- Mallmann, D. L. B. 2016. *Análise de risco à erosão costeira de curto-termo para o litoral central de Pernambuco*. 2016. Tese (Doutorado em Oceanografia) - Departamento de Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Marean, C. W.; Bar-Matthews, M.; Bernatchez, J.; Fisher, E.; Goldberg, P.; Herries, A. I. R.; Williams, H. M. 2007. Early human use of marine resources and pigment in South Africa during the Middle Pleistocene. *Nature*, 449 (7164):905-908. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature06204>.
- Matos, A. P., Cohen, J. C. P. 2016. Circulação de brisa fluvial e a banda de precipitação na margem leste da baía de Marajó. *Ciência e Natura*, [S. l.], (38)21p.
- Mazzer A. M., Dillenburg S. R., Souza C. R. G. 2008. Proposta de método para análise de vulnerabilidade à erosão costeira no sudeste da ilha de Santa Catarina, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, **32**(2):278-294.
- Mclaughlin, S.; Cooper, J. A. G. 2010. A multi-scale coastal vulnerability index: a tool for coastal managers. *Environmental Hazards* (**9**3):233-248.
- Mishra, M. *et al.* 2020. The development and research trend of using dsas tool for shoreline change analysis: a scientometric analysis. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, [S. l.], (**14**)1:69–77.
- Moore, L. J. 2000. Shoreline mapping techniques. *Journal of Coastal Research*, **16**(1):111-124.
- NOAA. Administração Oceânica e Atmosférica Nacional. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide, 2017.
- Pará. Secretaria de Estado de Meio Ambiente. Diretoria de Áreas Protegidas. 2014. *Relatório de ações para a construção da política estadual de gerenciamento costeiro do Pará*. Belém, 30f. No prelo. Confira realmente se ainda esta no prelo pois tem um de 2022 na midia
- Pará. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMA/PA). 2020. *Gerenciamento costeiro no estado do Pará: orientações para o ordenamento ambiental*. 30 f. Belém.
- Pereira, L. C. C. J.; Dias, J. A.; Carmo, J. A. C.; Polette, M. 2009. A Zona Costeira Amazônica Brasileira. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, **9**(2):3-7.
- Prestes Y.O.; Silva A.C.; Rollnic M.; Rosário R.P. 2017. The M2 and M4 tides in the Pará river estuary. *Tropical Oceanography*, **45**(1): 26-37.

- Rangel-Buitrago N. & Anfuso, G. 2015. *Risk assessment of storms in coastal zones: case studies from Cartagena (Colombia) and Cadiz (Spain)*. New York-NY, Springer, 63p.
- Ranieri L. A., El-Robrini M. 2015. Evolução da linha de costa de Salinópolis, Nordeste do Pará, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, [S. l.], **42**(3):207-226.
- Reineck H-E.; Singh I. B. 1980. *Depositional Sedimentary Environments*. Springer-Verlag, New York, p. 543.
- Rollnic, M., Costa, M.S., Borba, T.A.C., Carneiro, A.G., Mascarenhas, A.C.C., Prestes, Y.O., Silva, I.O., Santana, L.S., Alves, A., Sabino, C., Cardoso, C.S, Chaves, F.O., Pereira, L.S., Machado, M.R.O., Soares, M.L.G. 2020. “Áreas de Estudo – Aspectos físicos e biológicos”, Capítulo 2. Em: *Projeto Costa Norte – Desenvolvimento de Metodologias para o entendimento de processos costeiros e estuarinos e da vulnerabilidade de florestas de mangue na Margem Equatorial Brasileira*. v.2. Rio de Janeiro (BR).
- Rosário R.P. 2016. *Análise de processos oceanográficos no estuário do rio Pará*. PhD Tesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. 139.
- Santos, C. et al. 2021. Analysis of long- and short-term shoreline change dynamics: A study case of João Pessoa city in Brazil. *Science of The Total Environment*, [S. l.], v. 769. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969720384229>. Acesso em: 10 jan. 2025.
- Souza Filho P.W. M.; França C. F. 2006. Compartimentação morfológica da margem leste da Ilha do Marajó: Zona costeira dos municípios de Soure e Salvaterra – Estado do Pará. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, ano **7**(1): 33-42.
- Souza Filho, P. W. M.; Sales, M. E. C.; Prost, M. T. R. C.; Costa, F. R.; Souza, L. F. M. O. 2005. Zona Costeira Amazônica: o cenário regional e os indicadores bibliométricos em C&T. *Bibliografia da Zona Costeira Amazônica*, Belém-PA: Museu Paraense Emilio Goeldi, Universidade Federal do Pará, Petrobras, p. 401.
- Souza, C. R. G.; Suguio, K. 2003. The coastal erosion risk zoning and the São Paulo Plan for Coastal Management. *Journal of Coastal Research*, **35**: 530-547.
- Szlafsztein, C. 2009. Indefinições e Obstáculos no Gerenciamento da Zona Costeira do Estado do Pará, Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, **2** (9):47-58.
- Thieler, R.; Hammar-Klose, E. 1999. *National Assessment of Coastal Vulnerability to sea-level rise: preliminary results for the U.S. Gulf of Mexico Coast*. Massachusetts: Woods Hole.
- Toure S. et al. 2019. Shoreline detection using optical remote sensing: a review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, [S. l.], **8** (2): 75. <https://doi.org/10.3390/ijgi8020075>.
- Viana D. et al. 2021. *Ciências do mar : dos oceanos do mundo ao Nordeste do Brasil*. 1. ed. Olinda, Via Design Publicações, v. 1, . Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/secirm/sites/www.marinha.mil.br.secirm/files/publicacoes/ppgmar/CienciasdoMarVol1.pdf>.