



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

JOSÉ CHARRIERE GOMES PEREIRA

**CARACTERIZAÇÃO DA VULNERABILIDADE À EROSÃO COSTEIRA COM O
USO DE GEOTECNOLOGIAS E GEOINDICADORES NAS PRAIAS DO
MUNICÍPIO DE LUCENA (PB), BRASIL**

João Pessoa - PB

2025

JOSÉ CHARRIERE GOMES PEREIRA

**CARACTERIZAÇÃO DA VULNERABILIDADE À EROSÃO COSTEIRA COM O
USO DE GEOTECNOLOGIAS E GEOINDICADORES NAS PRAIAS DO
MUNICÍPIO DE LUCENA (PB), BRASIL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Geografia.

Orientadora: Profa. Dr^a Christianne Maria da Silva Moura

Coorientador: Prof. Dr. Saulo Roberto de Oliveira Vital

João Pessoa – PB

2025

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

P436c Pereira, José Charriere Gomes.

Caracterização da vulnerabilidade à erosão costeira com o uso de geotecnologias e geoindicadores nas praias do município de Lucena (PB), Brasil / José Charriere Gomes Pereira. - João Pessoa, 2025.

80 f. : il.

Orientação: Christianne Maria da Silva Moura.

Coorientação: Saulo Roberto de Oliveira Vital.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CCEN.

1. Erosão costeira - Lucena-PB. 2. Erosão costeira - Vulnerabilidade. 3. Geotecnologias. 4. Geoindicadores. I. Moura, Christianne Maria da Silva. II. Vital, Saulo Roberto de Oliveira. III. Título.

UFPB/BC

CDU 627.222.21(043)



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Ciências Exatas e da Natureza
Programa de Pós-Graduação em Geografia

ATA DA SESSÃO PÚBLICA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DO ALUNO JOSE CHARRIERE GOMES PEREIRA, CANDIDATO AO TÍTULO DE MESTRE EM GEOGRAFIA, NA ÁREA DE TERRITÓRIO, TRABALHO E AMBIENTE.

Aos 27 (vinte e sete) dias do mês de Fevereiro de 2025 (dois mil e vinte e quatro), às 09:00 (nove) horas, na plataforma Google Meet, reuniram-se, em caráter de solenidade pública, os membros da comissão designada para avaliar **José Charriere Gomes Pereira**, candidato ao grau de mestre em Geografia, na área de **Território, Trabalho e Ambiente**. Foram componentes da banca examinadora os professores Christianne Maria da Silva (orientadora) – Doutora em Geociências; Eduardo Rodrigues Viana de Lima (examinador interno) – Doutor em Geografia; e Josue Pereira da Silva (examinador externo) – Doutor em Geociências; sendo os dois primeiros integrantes do corpo docente da UFPB, e o terceiro, da UFCG. Dando início aos trabalhos, a Presidente da banca, Prof.^a Christianne Maria da Silva, após declarar os objetivos da reunião, apresentou o candidato **José Charriere Gomes Pereira**, a quem concedeu a palavra para que defendesse, oral e sucintamente, sobre o tema apresentado, intitulado: “**CARACTERIZAÇÃO DA VULNERABILIDADE À EROÇÃO COSTEIRA COM O USO DE GEOTECNOLOGIAS E GEOINDICADORES NAS PRAIAS DO MUNICÍPIO DE LUCENA (PB), BRASIL**”. Após discorrer sobre o referido tema, o candidato foi arguido pelos examinadores, na forma regimental. Ato contínuo, passou a comissão em caráter secreto, a proceder à avaliação e julgamento do trabalho, concluindo por atribuir-lhe o conceito **Aprovado**. Face à aprovação, declarou o Presidente achar-se o avaliado legalmente habilitada a receber o Grau de mestre em Geografia, cabendo à Universidade Federal da Paraíba, providências, como de direito, à expedição do Diploma a que o mesmo fez jus. Nada mais havendo a tratar, foi lavrada a Ata, que segue assinada e aprovada pela Comissão Examinadora.

Documento assinado digitalmente



CHRISTIANNE MARIA DA SILVA MOURA
Data: 27/02/2025 11:24:53-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Christianne Maria da Silva
Orientadora

Documento assinado digitalmente



EDUARDO RODRIGUES VIANA DE LIMA
Data: 28/02/2025 12:03:22-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Eduardo Rodrigues Viana de Lima
Examinador interno

Documento assinado digitalmente



JOSUE PEREIRA DA SILVA
Data: 10/03/2025 15:35:49-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Josue Pereira da Silva
Examinador externo

AGRADECIMENTOS

A construção deste trabalho representa não apenas um marco acadêmico, mas também um reflexo do apoio, incentivo e dedicação de pessoas fundamentais ao longo dessa jornada.

Agradeço, em especial, à minha mãe, Malene Gomes Pereira, em memória, cuja força e ensinamentos permanecem como inspiração em cada etapa da minha trajetória. Sua presença, ainda que ausente fisicamente, se mantém viva em minhas conquistas.

À minha família, pelo amor incondicional, paciência e apoio inestimável nos momentos de dificuldade e superação.

À minha orientadora, pelo conhecimento compartilhado, pela paciência e pela confiança depositada em meu trabalho, cujo suporte foi essencial para que esta pesquisa se tornasse realidade.

Aos meus amigos, por estarem ao meu lado nos momentos de desafio e celebração, oferecendo apoio, incentivo e palavras de encorajamento sempre que necessário.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta conquista, minha mais profunda gratidão.

RESUMO

A erosão costeira é um fenômeno dinâmico que afeta diretamente a estabilidade das zonas litorâneas, podendo ser intensificado por fatores naturais e antrópicos. Neste estudo, buscou-se caracterizar a vulnerabilidade à erosão costeira das praias do município de Lucena (PB), Brasil, utilizando geotecnologias e geoindicadores. Para isso, foram aplicadas metodologias de análise da variação da linha de costa por meio da ferramenta CASSIE (*Coastal Analysis System via Satellite Imagery Engine*), combinadas com a identificação de geoindicadores específicos, como morfologia da praia, presença de dunas, exposição às ondas, vegetação costeira e impermeabilidade do solo. Os dados foram coletados em campo e integrados a imagens de sensoriamento remoto para a obtenção de um índice de vulnerabilidade costeira.

Os resultados indicam variações significativas na linha de costa ao longo das últimas décadas, evidenciando setores com tendências à erosão intensa e áreas que apresentam relativa estabilidade sedimentar. A integração de geotecnologias com geoindicadores permitiu a identificação de padrões espaciais da vulnerabilidade, fornecendo subsídios para o planejamento costeiro e a gestão ambiental do município. Conclui-se que a metodologia adotada se mostrou eficiente na avaliação da vulnerabilidade costeira, sendo uma ferramenta essencial para a tomada de decisões em políticas públicas voltadas à mitigação dos impactos da erosão e à preservação dos ecossistemas litorâneos.

Palavras-chave: erosão costeira, vulnerabilidade, geotecnologias, geoindicadores, Lucena-PB.

ABSTRACT

Coastal erosion is a dynamic phenomenon that directly affects the stability of coastal zones and can be intensified by natural and anthropogenic factors. This study aimed to characterize the vulnerability to coastal erosion in the beaches of Lucena (PB), Brazil, using geotechnologies and geoindicators. To achieve this, methodologies for analyzing shoreline variation were applied through the CASSIE (Coastal Analysis System via Satellite Imagery Engine) tool, combined with the identification of specific geoindicators such as beach morphology, dune presence, wave exposure, coastal vegetation, and soil impermeability. Field data were collected and integrated with remote sensing images to obtain a coastal vulnerability index.

The results indicate significant shoreline variations over the past decades, highlighting sectors with trends toward intense erosion and areas with relative sedimentary stability. The integration of geotechnologies with geoindicators enabled the identification of spatial patterns of vulnerability, providing support for coastal planning and environmental management in the municipality. It is concluded that the adopted methodology proved to be efficient in assessing coastal vulnerability, serving as an essential tool for decision-making in public policies aimed at mitigating the impacts of erosion and preserving coastal ecosystems.

Keywords: coastal erosion, vulnerability, geotechnologies, geoindicators, Lucena-PB.

LISTA DE SIGLAS

CASSIE – Coastal Analysis via Satellite Imagery Engine

CPRM – Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais

GEE — Google Earth Engine

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MMA – Ministério do Meio Ambiente

SIG – Sistema de Informações Geográficas

WOS — Web of Science

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

SUDEMA – Superintendência de Administração do Meio Ambiente

NDWI – Índice de Diferença Normalizada da Água

LRR – Linear Regression Rate (Taxa de Regressão Linear)

SCE – Shoreline Change Envelope (Envoltório de Mudança da Linha Costeira)

NSM – Net Shoreline Movement (Movimento Líquido da Linha Costeira)

EPR – End Point Rate (Taxa de Mudança do Ponto Final)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de Localização do Município de Lucena – PB

Figura 2 - Mapa Geomorfológico do Município de Lucena-PB

Figura 3 - Visualização de Rede por países

Figura 4 - Quantidade de publicações por ano (mundo).

Figura 5 - Comparativo e Publicações: Brasil x Mundo.

Figura 8 - Fluxograma do Levantamento Bibliométrico.

Figura 9 - Estrutura para obtenção do IVC das praias do Município de Lucena-PB.

Figura 10 - Exemplo de geoindicadores para definir o grau de erosão.

Figura 11 - Vista inicial da plataforma CASSIE.

Figura 12 - Imagens de satélite disponíveis no GEE que podem ser usadas no CASSIE.

Figura 13 - Imagens utilizadas no CASSIE.

Figura 15 - Mapa dos Pontos de Coleta dos Geoindicadores de Erosão Costeira.

Figura 23 - VII- Presença de Estruturas Costeiras, gabiões construídos na proximidade dos pontos 01 e 02.

Figura 24 - Presença dos geoindicadores VII- Estruturas Costeiras e VIII — Impermeabilidade do Solo Indicadores de Erosão Costeira nas proximidades dos pontos 1 e 2.

Figura 25 - Mapa Setorial II do Município de Lucena-PB.

Figura 28 - Bancos de areia - Praia de Ponta de Lucena-PB.

Figura 29 - Mapa Setorial IV do Município de Lucena-PB.

Figura 30 - Imagens referentes aos pontos 24; 26 e 28: Presença de Campos de Dunas e Vegetação Rasteira.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de erosão costeira proposta por Esteves e Finkl (1998).

Tabela 2 - Geoindicadores e sua classificação para avaliação da vulnerabilidade costeira.

Tabela 3 - Classificação do índice de vulnerabilidade costeira em: alta, moderada e baixa com seus respectivos valores.

Tabela 4 - Coordenadas geográficas dos pontos de coleta.

Tabela 5 - Classificação da variação da linha de costa conforme metodologia proposta por Esteves e Finkl (1998).

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	10
1.1 Caracterização da área de estudo.....	13
2 OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo Geral.....	17
2.2 Objetivos Específicos.....	17
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
3.1 Erosão Costeira ou Erosão Marinha e vulnerabilidade	18
3.2 Vulnerabilidade e Risco Costeiro	25
3.3 Geotecnologias.....	26
3.4 Geoindicadores.....	33
3.5 Linha de Costa	36
4 PROCEDIMENTO METODOLOGICOS	38
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
5.1 Variação da Linha de Costa	54
5.2 Índice de Vulnerabilidade à Erosão Costeira	59
5.2.1 Setor I.....	62
5.2.2 Setor II.....	66
5.2.3 Setor III	68
5.2.4 Setor IV.....	71
CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
REFERÊNCIAS.....	78

INTRODUÇÃO

As praias são ambientes dinâmicos, sensíveis e expostos a constantes mudanças provocadas pela variação dos níveis de energia, que oscilam em diferentes escalas temporais e espaciais. Por sua vez, a erosão costeira é um fenômeno natural que resulta da interação de forças como ondas e marés, que constantemente moldam a linha de costa, especialmente em áreas com sedimentos.

Embora a erosão seja um processo natural, ela pode ser intensificada pelas ações humanas. Em escala global, fatores como o aumento do nível do mar agravam o problema, enquanto, em escala local, a urbanização desordenada compromete a estabilidade das praias e aumenta a vulnerabilidade das áreas costeiras. Além disso, intervenções antrópicas ao longo da linha de costa, bem como a construção de barragens que prejudicam o transporte de sedimentos do continente para o mar, também são intensificadores desse processo.

Diversos estudos sobre a dinâmica costeira confirmam que a erosão é um problema global, observável em diferentes regiões ao redor do mundo (Lins-de-Barros, 2005). Nesse contexto, de acordo com Luijendijk et al. (2018), 24% das praias arenosas do mundo estão sendo erodidas a uma taxa superior a 0,5 m/ano, enquanto 28% estão acumulando sedimentos e 48% permanecem estáveis. Essas mudanças são significativamente influenciadas pela elevação global do nível do mar, impactando diretamente a dinâmica costeira (Alvarez-Cuesta et al., 2021).

Além dos processos que atuam em grande escala, as áreas litorâneas apresentam uma dinâmica natural que, muitas vezes, é acentuada por atividades humanas. Como resultado dessa dinâmica, diversas regiões costeiras enfrentam um padrão generalizado de avanço e recuo da linha de costa, com impactos preocupantes a médio e longo prazo (Coelho et al., 2006).

No Brasil, a zona costeira é considerada patrimônio nacional e é protegida pela Constituição Federal de 1988. Com uma extensa faixa litorânea de aproximadamente 8.500 quilômetros, que abrange 17 estados, desempenha um papel relevante na esfera econômica e social do país. Segundo o Censo Demográfico de 2010, 26,58% da população brasileira reside em municípios costeiros.

Diante dessa relevância, o Brasil enfrenta desafios significativos relacionados à erosão costeira, pois esse processo não apenas compromete a integridade ambiental das praias, mas também afeta a infraestrutura urbana, a economia local e

a qualidade de vida dos habitantes.

Nesse contexto, a avaliação da vulnerabilidade à erosão costeira tem se mostrado uma ferramenta essencial para identificar e mitigar os impactos socioeconômicos em cidades litorâneas. No entanto, a escassez de dados de monitoramento de longo prazo na zona costeira, especialmente no Brasil, representa um grande desafio. Segundo Ribeiro et al. (2013), os esforços nesse sentido têm sido conduzidos, em sua maioria, por pesquisadores com interesses predominantemente científicos.

Esse cenário também é observado na Paraíba, estado localizado na Região Nordeste brasileira, onde os desafios da erosão costeira se manifestam com diferentes intensidades ao longo do litoral. O turismo, uma das principais atividades econômicas do estado, está diretamente ligado à preservação de suas praias, que também desempenham um papel fundamental na subsistência por meio da pesca. No município de Lucena-PB, em especial, essa dinâmica é bastante evidente.

Neves (2003, apud Araújo, 2023) defende que os processos erosivos na zona costeira da Paraíba estão relacionados a três fatores principais: o balanço negativo de sedimentos, a concentração da energia das ondas devido à refração em feições submersas e a ocupação desordenada. A autora também observa que a construção de estruturas de contenção pode agravar a erosão. Somado a isso, a falta de dados e de monitoramento ambiental a longo prazo dificulta a identificação precisa das causas da erosão costeira no Brasil, levando, frequentemente, a especulações, em vez de abordagens científicas sólidas.

O litoral da Paraíba compreende aproximadamente 140 km de linha de costa. Ao longo dessa área estão 68 praias, distribuídas de norte a sul, localizadas nos seguintes municípios defrontantes com o mar: Mataraca, Baía da Traição, Marcação, Rio Tinto, Lucena, Cabedelo, João Pessoa, Conde e Pitimbu. No setor costeiro norte desse estado, além do município de Lucena, que será objeto deste estudo, fazem parte os municípios de Mataraca, Rio Tinto, Baía da Traição e Marcação.

Como apontado por Dominguez et al. (2016), o estado da Paraíba é caracterizado por uma tendência de longo prazo para erosão costeira. Essa tendência é corroborada pela quase ausência de terraços marinhos do Holoceno e do Pleistoceno ao longo da zona costeira, o que se destaca como a principal evidência desse fenômeno de erosão de longo prazo. Nesse contexto, é relevante ressaltar que

cerca de 24% da população do estado da Paraíba reside em nove municípios costeiros que têm contato direto com o mar. No entanto, até o momento, não foi realizado o mapeamento, monitoramento ou classificação dos indicadores de erosão costeira ao longo das suas linhas de costa, como observado por Moura e Pereira (2020).

Por sua vez, em pesquisa desenvolvida a partir do edital PIBIC (2021/2022), fazendo uso da ferramenta Aquamonitor para analisar a Taxa de Mobilidade da Linha de Costa do Litoral Norte do Estado da Paraíba — Brasil, que compreende os municípios de Mataraca, Baía da Traição, Marcação, Rio Tinto e Lucena, foram identificados, a partir dos 111 transectos praias, que 39,63% das localidades analisadas estão em acreção, 45,94% estão estáveis e cerca de 14,4% foram classificadas com recuo de linha de costa acima de -0,5 m/ano. Destas, 8,1% foram consideradas com tendência à erosão, 3,6% à erosão intensa, 1,8% à erosão severa e 0,9% à erosão extrema.

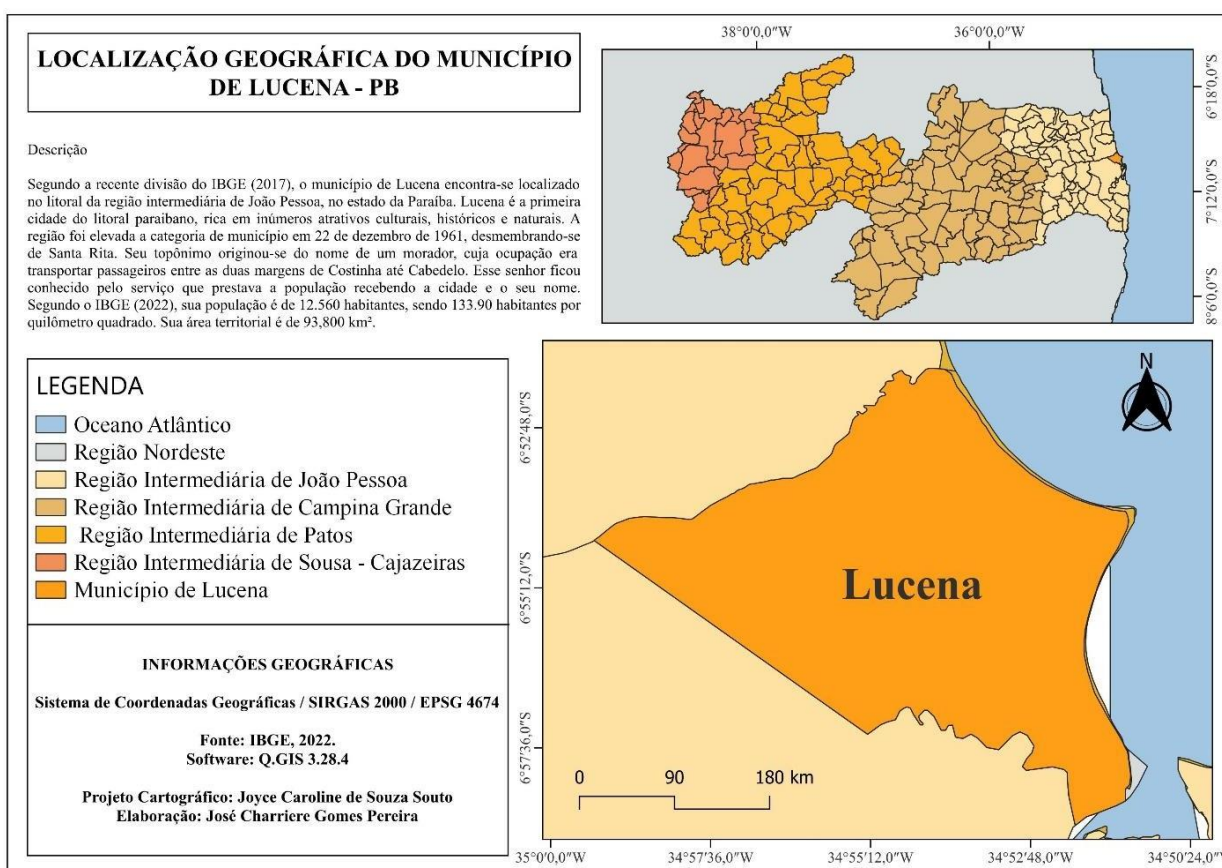
Dentre os municípios analisados, Lucena-PB, objeto deste estudo, apresentou o segundo maior índice de erosão costeira, sendo antecedido pela Baía da Traição. Nesse município, já foram realizados diversos estudos relevantes, como os de Moura e Pereira (2020) e Araújo (2023), que contribuíram significativamente para a compreensão dos processos erosivos na região. Em contraste, no município de Lucena ainda há uma ausência de estudos aprofundados sobre esse tema, o que reforça a importância de investigações específicas nessa área.

Desse modo, diante da diversidade de problemas decorrentes da erosão costeira ao longo do litoral paraibano e mediante pesquisas incipientes apontarem evidências erosivas no local, surge a necessidade de conduzir estudos específicos no município de Lucena-PB. Observa-se que várias praias do município são particularmente vulneráveis aos processos erosivos. Além disso, nota-se que as construções na planície costeira, como residências e gabiões, podem estar provocando uma mudança significativa na dinâmica sedimentar, contribuindo, assim, para a intensificação do processo de erosão.

1.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Lucena é um município brasileiro do estado da Paraíba, localizado na Região Geográfica Intermediária e Imediata de João Pessoa. Sua porção leste é banhada pelo Oceano Atlântico, e o município apresenta cerca de 15 km de linha de costa (Figura 1). Seus limites territoriais são: ao norte, com o município de Rio Tinto; a leste, com o Oceano Atlântico; ao sul, com o município de Cabedelo; e a oeste, com o município de Santa Rita. Suas coordenadas no sistema UTM são: 294.382E / 9.229.469N, na Zona 25S.

Figura 1: Mapa de Localização geográfica do Município de Lucena-PB



Fonte: Pereira, 2024.

Nessa região, as atividades econômicas predominantes são a pesca, comércio, agricultura, pecuária, turismo e, segundo dados do IBGE, o índice de desenvolvimento humano municipal (IDHM) é de 0,583 (IBGE, 2022).

Dentre as atividades exercidas no município, o turismo de veraneio é fortalecido, pois, Lucena está situada na região metropolitana de João Pessoa, possui

24 km² de planície costeira e extensão de 15 km de praia. Além disso, a costa do município apresenta como atrativos as suas regiões de estuários, falésias e água do mar quente (Fernandes, 2011).

Ao longo de seus 15 quilômetros de costa, Lucena abriga um conjunto diversificado de praias, incluindo Costinha, Fagundes, Gameleira, Ponta de Lucena, Lucena, Camaçari e Bonsucesso. Um ponto de destaque é a influência exercida pela foz do Rio Paraíba, que desemboca na praia de Costinha. Essa interação entre o rio e o mar não apenas aumenta a biodiversidade da área, mas também cria um estuário de significativa importância ambiental.

Segundo a Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais (CPRM), do Serviço Geológico do Brasil (BRASIL, 2005), o município de Lucena, está inserido na unidade geoambiental dos Tabuleiros Costeiros (figura 2). Essa unidade acompanha o litoral de todo o Nordeste, apresenta altitude média de 50 a 100 metros.

Figura 2: Mapa geomorfológico de Lucena-PB



Fonte: Bezerra, 2020

Os tabuleiros, representados pelas rochas da Formação Barreiras, correspondem a uma porção mais elevada do terreno, suavemente inclinados, com topos geralmente planos e basculados para leste, em resultado da ação de eventos

tectônicos, e moldados pelos agentes exógenos que esculpiram a Formação Barreiras (PEREIRA e CUNHA, 2015).

De acordo com Rossetti et al. (2013), estes baixos planaltos foram resultado de amplos arqueamentos e de uma sucessão de pediplanos escalonados para o interior, subordinados ao paleoclima, cuja estrutura tipo graben-horst controlou sua morfologia. Reativações de zonas de cisalhamento do embasamento, com direção E-W e NE-SW, a partir do EoCretáceo, atingiram os sedimentos da Formação Barreiras, formando escarpas de falha que foram, depois, preenchidas por terraços aluviais, dunas arenosas, detritos coluviais, solo e vegetação, e que serviram como delimitadoras do leito dos rios, enquanto as porções soerguidas foram dissecadas

Segundo Neves (2008), os sedimentos Barreiras se constituem na última rocha sedimentar terciária do Nordeste do Brasil formada na história da abertura do Atlântico, representada pela sequência sedimentar ao longo de mais de 4.000 km do litoral.

Por sua vez, a planície costeira é resultante da variação do nível eustático do mar, datada do Quaternário, resultado de condições paleoclimáticas e de fatores hidrodinâmicos costeiros, a exemplo do vento, marés, ondas e correntes marítimas, ocorrentes a partir do Pleistoceno.

Este sistema está representado por terraços marinhos pleistocênicos e holocênicos, depósitos fluviolagunares, depósitos de mangues em pântanos, depósitos eólicos, recifes de corais, areias praias e arenitos praias. Foi influenciada pelas variações relativas do nível do mar durante este período, em episódios de regressão e transgressão marinha e pelo espaço cedido para ser preenchido, após a reativação de falhas no Neógeno e Quaternário, com a subsidência do terreno no Mioceno (ROSSETTI et al. 2013).

O clima da região segundo a classificação de Köeppen é do tipo Tropical úmido AS', com chuvas de outono e com verão seco, temperaturas variando de 25 a 28°C. O período chuvoso começa no outono tendo início em fevereiro e término em outubro. A precipitação média anual é de 1.700mm. A vegetação é predominantemente do tipo Floresta Subperenifólia, com partes de Floresta Subcaducifólia e Cerrado/Floresta. O município de Lucena encontra-se inserido nos domínios da bacia hidrográfica do Rio

Miriri, e todos os rios possuem regime de fluxo perene, e o padrão da drenagem é tipo dendrítico (FERNANDES, 2006)

A vegetação é predominantemente do tipo Floresta Subperenifólia, com partes de Floresta Subcaducifólia e Cerrado/ Floresta. Os solos dessa unidade geoambiental são representados pelos Latossolos e Podzólicos nos topos de chapadas e topos residuais; pelos Podzólicos com Fregipan, Podzólicos Plínticos e Podzóis nas pequenas depressões nos tabuleiros; pelos Podzólicos Concrecionários em áreas dissecadas e encostas e Gleissolos e Solos Aluviais nas áreas de várzeas.

2 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GERAL

Caracterizar a vulnerabilidade à erosão costeira das praias de Lucena a partir do uso de geotecnologias e geoindicadores

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar o levantamento sistemático da literatura (bibliometria) dos termos erosão costeira ou erosão marinha e vulnerabilidade costeira nos últimos 50 anos;

Identificar as taxas de mobilidade da linha de costa a partir de dados de sensoriamento remoto;

Caracterizar a linha de costa com base nos geoindicadores de erosão costeira, a partir de observações visuais *in loco*;

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Erosão Costeira ou Erosão Matinha e Vulnerabilidade

A palavra 'erosão' origina-se do termo latino '*erodere*', que significa corroer ou desgastar (Oliveira et al., 2017). Conforme Corrêa (2022), a erosão pode ser descrita como o processo de desgaste de rochas e solos, causado pelo intemperismo químico ou pela ação mecânica de agentes naturais, como a água, o vento e as correntes marítimas.

Conforme o Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP, 2022), o balanço sedimentar refere-se à variação entre o ganho e a perda de sedimentos em uma praia. Com base nessa definição, a erosão costeira pode ser entendida como o processo de remoção e transporte de sedimentos, ocorrendo quando a quantidade de sedimentos removidos excede a ordem, o que resulta no recuo da linha costeira como consequência.

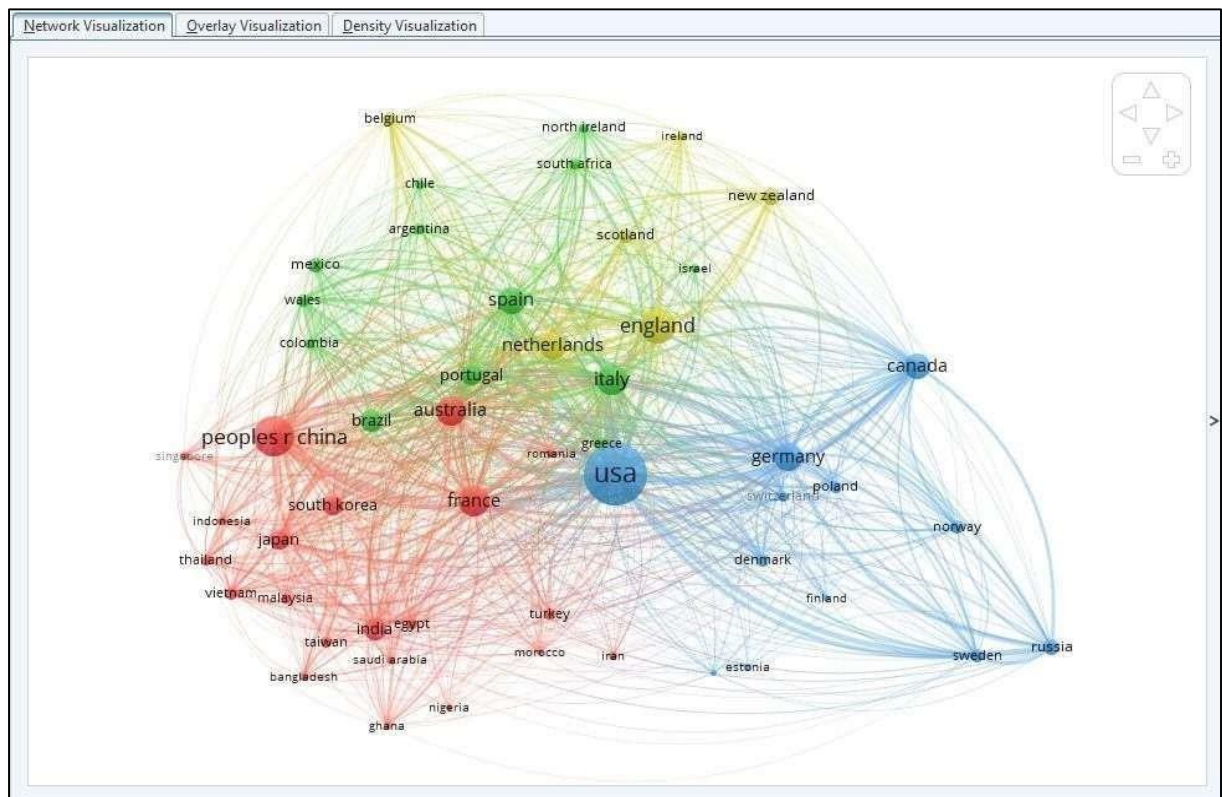
Para uma melhor compreensão da discussão deste tema, foi realizada uma análise de publicações na base de dados Web of Science, abrangendo o período de 50 anos (1973 a 2023). Essa pesquisa revelou um total de 17.890 publicações relacionadas aos termos “*erosão costeira*” ou “*erosão marinha*” e “*vulnerabilidade costeira*”, abrangendo diversas áreas do conhecimento. Após refinamento com base no tipo de documento e nas áreas de maior relevância, foram selecionados 11.791 trabalhos, dos quais 470 abordam, de forma direta ou indireta, o território brasileiro.

As pesquisas abrangem 163 países, com maior representatividade nos Estados Unidos, China, Inglaterra, França e Itália, entre outros. O Brasil aparece na 12ª posição do ranking, contabilizando 419 registros. Vale ressaltar que o número de registros na base de dados Web of Science não corresponde exatamente à quantidade de estudos, pois um único trabalho pode incluir autores vinculados a instituições de diferentes países.

Ao visualizar essas informações por meio da rede de coocorrências, gerada no software VOSviewer (Figura 3), percebe-se que os Estados Unidos (EUA) ocupam o nó central mais proeminente da rede, evidenciando sua posição de destaque na produção científica. Essa centralidade revela a longa tradição dos EUA como líderes em pesquisa científica, incluindo estudos sobre erosão. Além disso, o extenso território norte-americano, banhado por dois oceanos, contribui para a ampla abrangência de

pesquisas relacionadas a essa temática.

Figura 3 - Visualização de Rede por países

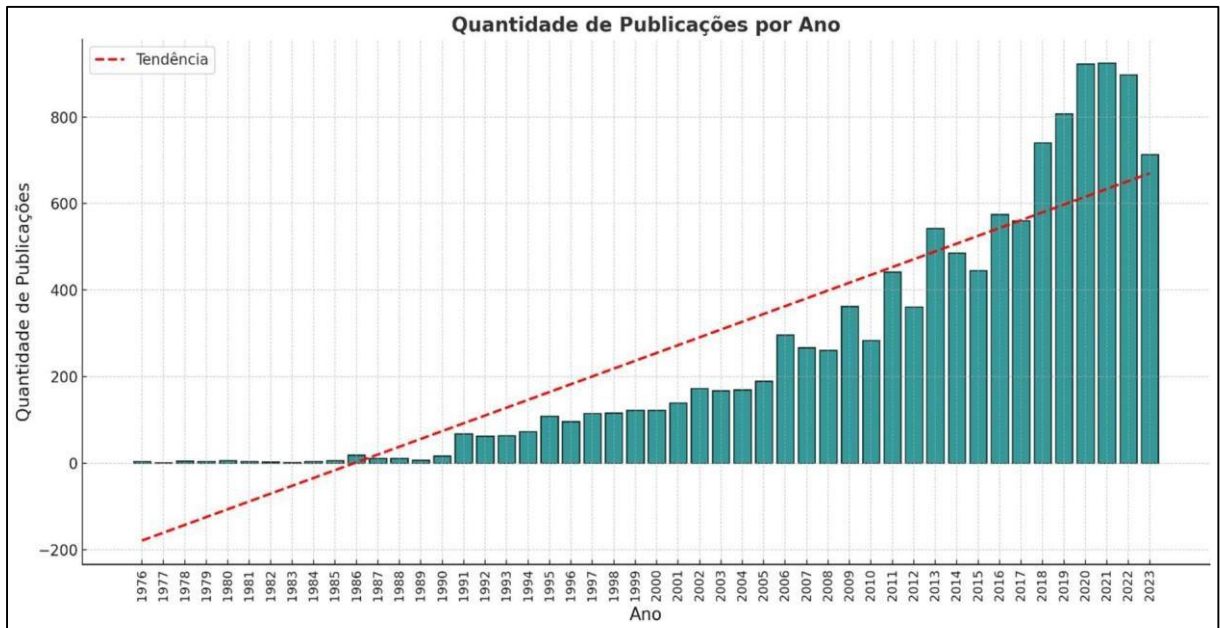


Fonte: VOSviewer. 2024

A presença do Brasil nesse grupo, representada pela cor verde, sugere que o país possui um volume significativo de publicações e citações em estudos sobre erosão costeira, além de colaborar frequentemente com esses países. Apesar de o Brasil não ocupar uma posição tão central quanto nações como os Estados Unidos ou a China, sua participação na rede evidencia uma contribuição relevante para os estudos relacionados à erosão costeira e à vulnerabilidade.

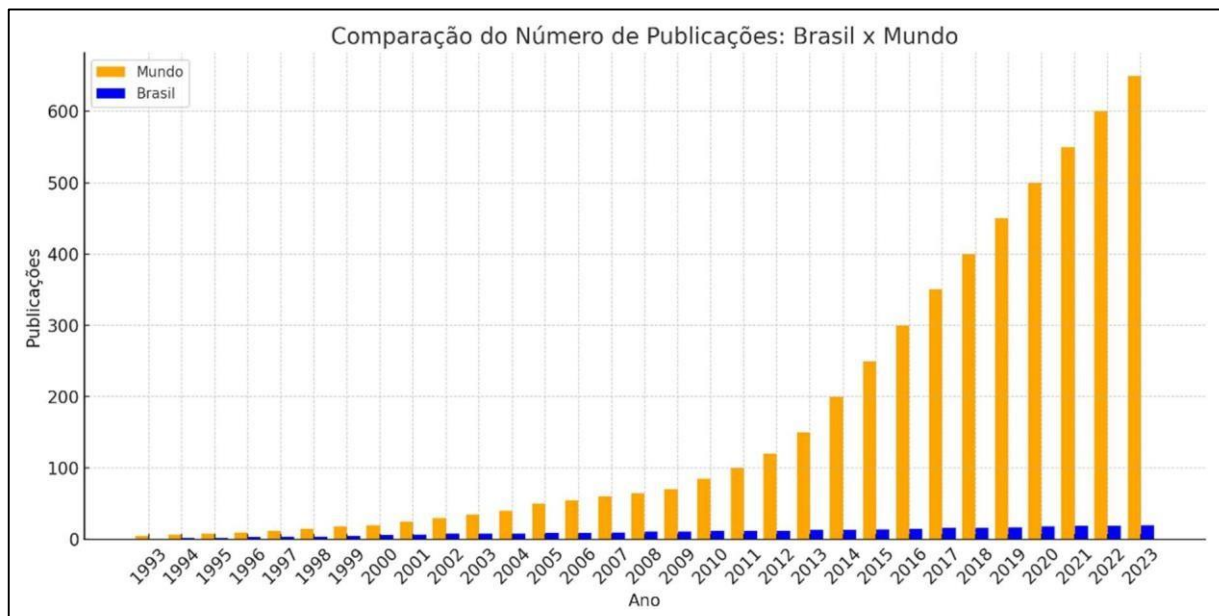
Nesse cenário, foi realizado um levantamento das publicações ao longo dos anos, aplicando os filtros específicos e indicados no fluxograma deste estudo, com a finalidade de destacar a importância do tema em contextos nacionais e internacionais, conforme ilustrado na (figura 4).

Esse gráfico demonstra que o tema tem sido abordado desde 1976, e de forma mais relevante a partir de 1990. Passando por aumento expressivo nas últimas décadas, especialmente entre 2013 e 2023. Observa-se uma crescente relevância dessa discussão ao longo dos anos.

Figura 4 - Quantidade de publicações por ano (mundo).

Fonte: Pereira,2024.

Ao comparar as publicações do Brasil com as internacionais nos últimos 30 anos, nota-se que essa tendência de crescimento é consistente, conforme ilustrado na (figura 5).

Figura 5 - Comparativo e Publicações: Brasil x Mundo

Fonte: Pereira,2024.

A análise das publicações, ordenadas por dados de indexação, revela que o artigo mais antigo do portfólio é de Field et al. (1976), categorizado na área de geologia pela *Web of Science (WoS)*. Este estudo investiga a geologia e estratigrafia da plataforma continental ao norte da Flórida, EUA, utilizando perfis de reflexão sísmica que alcançam até 152 metros de profundidade abaixo do fundo do mar. O trabalho

identifica seis unidades de reflexão e refletores regionais, associando esses a dados estratigráficos.

O artigo mais recente encontrado foi "Holoceno até a evolução no futuro próximo da costa sul de Molise (Adriático Central, Itália) sob a influência de controles naturais e antropogênicos", de Di Paola et al. (2023), classificado na área de Geografia Física pela WOS. A pesquisa examina as alterações geomorfológicas e os fatores naturais e humanos que afetam a dinâmica das zonas costeiras, com ênfase na região sul da costa de Molise, localizada no Adriático, na Itália.

A erosão costeira e o desenvolvimento urbano ameaçam a nidificação da tartaruga marinha. Implicações para a gestão de praias arenosas" (COSTA et al., 2023); registrado no WOS sob Ciências Ambientais, Ecologia, e Biologia Marinha e de Água Doce, esse estudo explora os critérios de seleção de locais de nidificação por tartarugas marinhas ao longo de 62 km de praias no sudeste do Brasil, com especial atenção ao impacto da erosão costeira.

O terceiro estudo, intitulado 'Evolução espaço-temporal da acumulação de conchas costeiras na Península Villarino, San Antonio Este, Argentina' (SCHENK et al., 2023), classificado na área de Geologia pela WOS, investiga a evolução no tempo e no espaço das acumulações de conchas. Utilizando imagens de satélite de diferentes épocas, o estudo mapeia os limites das praias de conchas e das áreas próximas.

Assim, observa-se que a erosão costeira é um tema abordado por diversas áreas do conhecimento, como geologia, ciências ambientais, geografia física, entre outras, conforme ilustrado na (figura 6).

Exemplos dessa diversidade estão pautados nos estudos citados anteriormente que incluem o estudo da geologia e estratigrafia da plataforma continental do norte da Flórida por Field et al. (1976), o mapeamento geomorfológico da costa sul de Molise por Di Paola et al. (2023), a caracterização do fundo do mar na Ilha da Trindade por Garcia et al. (2023), a análise dos padrões de nidificação das tartarugas marinhas no sudeste do Brasil por Costa et al. (2023), e a investigação da evolução espaço-temporal das acumulações de conchas na Península Villarino por Schenk et al. (2023). Cada estudo, embora aborde a erosão costeira, examina aspectos distintos, demonstrando a abrangência e a importância interdisciplinar desse tema (figura 7).

termos centrais, como "*erosion*" e "*coastal erosion*", indicam os tópicos principais abordados nas pesquisas. Outros termos importantes incluem "*evolution*", "*dynamics*" e "*management*", destacando a evolução das feições costeiras, as dinâmicas envolvidas e gerenciamento necessário.

Além disso, palavras-chave como "*sea-level rise*", "*vulnerability*", e "*transport*" apontam para a preocupação com a elevação do nível do mar, a vulnerabilidade das áreas costeiras e o transporte de sedimentos. A presença de "*sediment transport*" e "*sediment*" evidencia o interesse na dinâmica dos sedimentos, enquanto "*remote sensing*" e "*model*" indicam o uso de tecnologias e modelagem para estudar esses fenômenos.

Com o intuito de estabelecer um recorte que permita maior precisão no levantamento bibliométrico, foi conduzido uma pesquisa na Web of Science para analisar como o tema é abordado em trabalhos relacionados ao território brasileiro, seja de forma direta ou indireta. Nesse contexto, artigos e revisões de artigos foram classificados conforme a relevância atribuída pela plataforma, que organiza os registros em ordem decrescente com base na frequência dos termos de pesquisa encontrados em cada documento, posicionando os mais relevantes no topo da lista.

A classificação da relevância dos registros considera diversos campos, incluindo título, resumo, palavras-chave e Keywords Plus (exclusivo da coleção principal da *Web of Science* e do *Current Contents Connect*). Entre esses, os campos de título e palavras-chave recebe um peso maior em comparação aos campos de resumo e *Keywords Plus*.

Deste modo, verificou-se que, dentro dos critérios de busca adotados, o trabalho de maior relevância é intitulado "*The Fortaleza (NE Brazil) waterfront: Port versus coastal management*" (MAIA et al., 1998). O estudo aborda os conflitos costeiros resultantes da implementação de um porto ao longo da costa de Fortaleza-CE, durante o século passado.

Segundo o autor, o desenvolvimento do porto em Fortaleza priorizou os benefícios econômicos associados ao comércio, mas isso levou a problemas de assoreamento e erosão, que afetaram a qualidade das praias e, conseqüentemente, o potencial turístico da região. O estudo destaca, ainda, que as decisões sobre o uso da costa foram tomadas sem uma visão integrada, resultando em uma gestão costeira setorial que não considerou diversas inteirações que ocorrem nesse ambiente. O autor destaca ainda:

A interação entre o porto e a dinâmica litorânea existente alterou o caminho natural dos sedimentos ao longo da costa, e grandes quantidades de sedimentos foram direcionadas para águas profundas a partir da ponta do quebra-mar, formando um banco de areia linear paralelo à linha costeira a uma profundidade de cerca de 10 m. (MAIA et al., 1998, p. 8)

Nessa mesma perspectiva, outro trabalho que se destaca é o “*The coastal erosion risk zoning and, the Sao Paulo State plan for coastal management*” (DE GOUVEIA SOUZA; SUGUIO, 2003) esse trabalho aborda a erosão costeira no estado de São Paulo. Os estudos realizados identificaram onze tipos de indicadores de processos erosivos costeiros nas principais praias do estado, permitindo uma classificação de vulnerabilidade que aponta 42% das praias arenosas em situação de vulnerabilidade muito alto e alta.

A maioria dessas áreas são não urbanizadas e necessitam de proteção ambiental. A pesquisa também sugere que os processos naturais desempenham um papel importante na erosão, acentuados por ações humanas. Lins de Barros (2005), p. 56) faz um comentário sobre esse trabalho:

O trabalho elaborado por Souza e Suguio (2003) sobre o zoneamento de risco à erosão costeira no estado de São Paulo baseia-se no conceito de vulnerabilidade apresentado pelo IPCC, considerando também os mesmos conceitos de resistência e resiliência. Foram considerados pelos autores 10 indicadores diretos de marcas erosivas nas praias, como a destruição de mangues e da vegetação de restinga adjacentes à praia e a exposição de matéria orgânica de origem lagunar ou depósitos de mangue na superfície da face da praia. Foi considerado ainda um indicador de evolução da linha de costa nas últimas quatro décadas. Este último foi avaliado a partir de evidências de decréscimo da largura da praia. Finalmente, a forma de classificação do risco foi baseada no número de indicadores e na sua distribuição espacial ao longo da praia (número de indicadores / área - %) (LINS DE BARROS, 2005, p. 56).

Desse modo, o objetivo desse levantamento foi analisar estudos relacionados à vulnerabilidade à erosão costeira com o intuito de entender como esse tema é trabalhado de forma quantitativa e qualitativa, e com isso, utilizar uma base teórica consolidada que fornecesse o embasamento necessário para a construção desta pesquisa.

3.2 Vulnerabilidade e Risco costeiro

Existem diversas metodologias para estimar a vulnerabilidade da zona costeira, e uma dificuldade encontrada pela comunidade científica é a definição de uma linguagem padrão para tratar diferentes abordagens metodológicas" (LUNDGREN; JONSSON, 2012, apud MARTINS, 2015)

De acordo com (Menezes et al. 2018) a vulnerabilidade pode ser definida como a susceptibilidade de um sistema, seja ambiental, social ou econômico, a ser impactado negativamente por eventos adversos. No contexto costeiro, ela está diretamente relacionada à capacidade das áreas litorâneas de resistir a fenômenos como a erosão, o aumento do nível do mar e tempestades. A vulnerabilidade é, portanto, uma medida das fragilidades e deficiências dessas áreas diante de riscos naturais e antrópicos, como a urbanização desenfreada e as alterações climáticas.

Nesse sentido, Nguyen et al. (2016) destacam que o conceito de vulnerabilidade é dinâmico. Os autores o descrevem como um conceito amplo, que pode estar relacionado à resiliência, suscetibilidade, adaptabilidade, fragilidade, risco e capacidade, envolvendo aspectos como exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa. A vulnerabilidade é vista como um estado resultante de condições sociais, econômicas e ambientais, incluindo a incapacidade de lidar com pressões externas, como as mudanças climáticas.

Por outro lado, o risco é a probabilidade de que um evento adverso, como uma inundação ou uma tempestade, ocorra e cause danos. O risco é a combinação da probabilidade de ocorrência de um fenômeno e a gravidade de seus impactos, que, no caso de áreas costeiras, envolvem tanto danos ambientais, como a perda de habitat e biodiversidade, quanto danos sociais e econômicos, como a perda de infraestrutura e impacto nas populações locais (Boak & Turner, 2005).

Embora vulnerabilidade e risco sejam conceitos distintos, eles estão diretamente interligados, pois a vulnerabilidade de uma região influencia diretamente seu nível de risco. Quanto maior a vulnerabilidade de uma área, maior o risco de que ela seja severamente impactada por eventos como tempestades ou aumento do nível do mar. Da mesma forma, a exposição a esses eventos é um fator determinante para a vulnerabilidade, já que regiões mais expostas a tais riscos terão uma capacidade mais limitada de adaptação e resistência

A ONU define vulnerabilidade como as condições influenciadas por fatores ou processos físicos, sociais, econômicos e ambientais, que aumentam a suscetibilidade de uma comunidade aos impactos de eventos perigosos. Além disso, o termo risco, segundo a mesma fonte, é conceituado como a probabilidade de consequências prejudiciais ou perdas, tais como mortes, ferimentos, danos à propriedade, meios de subsistência, interrupção da atividade econômica ou danos ao meio ambiente, resultantes das interações entre ameaças naturais ou induzidas pelo homem e condições vulneráveis.

Em estudos sobre risco ambiental e mudanças climáticas, o termo "vulnerabilidade" emergiu como uma palavra-chave significativa. Todavia, sua crescente popularidade pode ser atribuída, em parte, à sua natureza amplamente abrangente, o que o torna um conceito difuso (Kuhlicke et al., 2011).

De acordo com Cutter (2011), vulnerabilidade refere-se ao potencial de perda e engloba as condições que colocam pessoas e lugares em risco diante de uma ameaça. Além disso, considera as condições relacionadas à capacidade da população, infraestrutura ou sistemas físicos para responder ou se recuperar quando confrontados com ameaças.

Lins-de-Barros (2011), seguindo essa mesma abordagem, define vulnerabilidade como a medida da exposição ao impacto de um perigo específico e a capacidade de absorver e se recuperar desses impactos.

No tocante à vulnerabilidade costeira, French (1997) destaca que essas zonas apresentam grande fragilidade e sensibilidade às intervenções antrópicas, decorrentes da complexidade dos ambientes resultantes da interação entre terra e mar. Nesse contexto, Reis (2008) define a vulnerabilidade à erosão costeira como a probabilidade de uma determinada área ser suscetível a danos decorrentes da ação de agentes naturais ou humanos. Essa vulnerabilidade pode ser avaliada com base na estabilidade e nas características da praia, resultando na classificação em setores (ou células) com diferentes níveis de tendência à erosão, a partir da seleção de determinados parâmetros (variáveis).

De acordo com Souza (2005), a vulnerabilidade não pode ser examinada apenas sob uma perspectiva natural ou exclusivamente sob uma perspectiva humana. Portanto, a análise da vulnerabilidade deve considerar a síntese ou a integração das

interações socioambientais que estão espacialmente distribuídas em uma determinada área. Sob esse mesmo olhar, Lins-de- Barros (2010), entende que as questões enfrentadas nas áreas costeiras requerem a integração das diversas dimensões envolvidas no assunto, adotando uma abordagem sistêmica e holística. Nesse contexto, a abordagem multidisciplinar e integrada confere ao geógrafo um papel fundamental nas avaliações de vulnerabilidade, especialmente devido à sua habilidade no uso de ferramentas de SIG e na realização de análises espaciais abrangentes.

Desse modo, nota-se que no campo das geociências, três conceitos principais orientam as avaliações de vulnerabilidade: (1) Vulnerabilidade Física, que está diretamente associada à suscetibilidade do ambiente a processos adversos; (2) Vulnerabilidade Social, que se refere à capacidade da sociedade ou dos indivíduos de lidar com ou se adaptar a um perigo; e (3) Vulnerabilidade Social e Física, que resulta da combinação da suscetibilidade e da sensibilidade do ambiente a um risco específico, influenciada pelo contexto social (MULER, 2003, apud Lins-de-Barros 2010). Essa mesma autora também comenta que:

A vulnerabilidade física pode ser avaliada segundo diversos métodos que incluem indicadores de diferentes naturezas (hidrológico, geomorfológico, climatológico, geológico e outros). A escolha dos indicadores com os quais se pretende trabalhar está relacionada aos objetivos da pesquisa, assim como a interpretação do conceito de vulnerabilidade e outros conceitos correlacionados." (LINS DE BARROS, 2005, p. 56).

Segundo Ribeiro et al. (2013), uma avaliação da vulnerabilidade à erosão costeira envolve uma análise de indicadores específicos, como largura da praia, posição da linha de costa, presença de estruturas de engenharia continental e taxas de ocupação humana. Ou seja, a vulnerabilidade à erosão costeira foca especificamente na predisposição de uma costa a processos erosivos que resultam na perda de sedimentos e recuo da linha de costa.

Em contrapartida, a vulnerabilidade costeira engloba múltiplos fatores físicos, socioeconômicos e ambientais que podem afetar as áreas costeiras.

3.3 Geotecnologias

As geotecnologias representam um conjunto de ferramentas essenciais para o estudo, análise e gestão do espaço geográfico, especialmente no contexto das mudanças globais e da crescente necessidade de monitoramento ambiental. Segundo Zaidan (2017), as geotecnologias representam um conjunto de ferramentas tecnológicas que possibilitam a coleta, armazenamento, edição, processamento e disponibilização de dados geograficamente referenciados.

Geotecnologias são indispensáveis no gerenciamento de dados espaciais, permitindo a modelagem e análise de sistemas dinâmicos, essenciais para planejamento e políticas públicas." (CÂMARA et al., 2001). O uso de geotecnologias tornou-se central para compreender e gerir fenômenos espaciais em escalas locais e globais (SOUZA, 2023).

Para entender as inter-relações dos fenômenos que causam mudanças ambientais, com o uso de geotecnologias como Sistemas de Informação Geográfica (SIG), Cartografia Digital, Sistema Global de Posicionamento por Satélites (GPS) e Sensoriamento Remoto, é necessário mais do que o domínio técnico. Souza (2018) destaca que o olhar científico sobre os resultados é o principal elo entre o uso dessas técnicas e a realidade da área analisada. Essa visão é reforçada em estudos mais recentes de (SOUZA, 2023).

O sensoriamento remoto tem se mostrado, em trabalhos recentes, fundamental para a análise de mudanças ambientais, especialmente em regiões costeiras, onde os processos naturais e antrópicos interagem de maneira complexa. Essa técnica, que permite a coleta de dados à distância, é amplamente utilizada em estudos de vulnerabilidade costeira para compreender as dinâmicas do ambiente.

De acordo com Jensen (2009), o sensoriamento remoto baseia-se na captação e interpretação da energia refletida ou emitida pela superfície terrestre, sendo fundamental para analisar a interação entre o ambiente costeiro e as atividades humanas. Lillesand, Kiefer e Chipman (2015) complementam ao destacar que as imagens de satélite são cruciais para avaliar alterações na linha de costa e identificar áreas mais vulneráveis a processos como erosão e inundações.

Para Sabins (1997), o sensoriamento remoto tem revolucionado os estudos costeiros, fornecendo dados essenciais para mapear mudanças na configuração do litoral. Esse autor aponta que a resolução temporal e espacial aprimorada dos sensores permite identificar tendências de longo prazo, como o recuo da linha de costa devido ao aumento do nível do mar.

Estudos como o de Boak e Turner (2005) destacam que o sensoriamento remoto, por meio de imagens de satélite de alta resolução, tem sido fundamental para mapear alterações na linha de costa e identificar áreas mais vulneráveis a processos como erosão e inundações. Essa abordagem tem se mostrado eficaz na avaliação da vulnerabilidade costeira, permitindo a identificação de áreas suscetíveis a riscos e a elaboração de estratégias de mitigação mais precisas.

Boak e Turner (2005) destacam a importância do monitoramento preciso da vulnerabilidade costeira, enfatizando a necessidade de identificar com exatidão as alterações topográficas e sedimentares. Nesse contexto, tecnologias baseadas em imagens multiespectrais têm se consolidado como ferramentas indispensáveis, ao fornecer dados tridimensionais detalhados sobre a topografia e sua evolução.

Seguindo essa abordagem, Almeida et al. (2021) desenvolveram o sistema CASSIE (*Coastal Analyst System From Space Imagery Engine*), que exemplifica os avanços tecnológicos recentes na análise costeira. Essa ferramenta utiliza algoritmos avançados para detectar mudanças na linha de costa, integrando dados espaciais e temporais.

Conforme Almeida et al. (2021) descrevem, o CASSIE é uma ferramenta de código aberto projetada para realizar o mapeamento e a análise automatizados das linhas costeiras usando imagens de satélite. Sua versão oficial foi lançada em 2019, sendo compatível com computadores, smartphones e tablets, e desenvolvida em JavaScript, aproveitando a API do Google Earth Engine (GEE). Ele pode ser utilizado em qualquer área costeira onde exista a interface entre a água e a terra, utilizando imagens de satélite Landsat e Sentinel-2 disponíveis gratuitamente no GEE.

Conforme os autores, esta ferramenta utiliza a detecção automática de linhas costeiras por meio do Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI), associado ao algoritmo de segmentação de imagem de Otsu. Com uma interface intuitiva e elevado nível de automação, o CASSIE se apresenta como uma solução versátil,

adequada para auxiliar diversos estudos e aplicações relacionadas à dinâmica da linha marítima.

As linhas de costa identificadas em uma série temporal de imagens de satélite são analisadas estatisticamente para cada transecto (Almeida et al., 2021) Desse modo, ao concluir o processamento das imagens de satélite, são fornecidos dados estatísticos sobre a taxa de variação da linha de costa, a localização dos transectos e o período da série temporal comprovada (Almeida et al., 2021).

Além disso, a ferramenta CASSIE disponibiliza, para cada transecto analisado, os valores da taxa de regressão linear (Linear Regression Rate - LRR), coeficiente de visualização, Shoreline Change Envelope (SCE), Net Shoreline Movement (NSM), End Point Rate (EPR), bem como a classificação e tendência da variação da linha de costa. Conforme detalhado na tabela.

Tabela 1 - Detalhamento das Funcionalidades do CASSIE

Campos	Descrição
ID	Identificador do transecto
Coordenadas do início e fim de um transecto	Latitude e longitude
Data inicial e final	Série histórica de imagens de satélite
Inclinação	R ² com valores próximos de 1, os valores X e Y são relacionados e não há variância residual. R ² com valores próximos de 0, os valores X e Y não são relacionados.
Linear Regression Rate -LRR	Taxa de variação da linha de costa (em metros/ano) baseado na inclinação da linha de regressão linear
Shoreline Change Envelope -SCE	Distância máxima em metros entre todas as linhas de costa que intersectam um determinado transecto.

Net Shoreline Movement -NSM	Distância (em metros) entre a linha de costa Net Shoreline Movement - NSM mais antiga e a mais nova para cada transecto.
End Point Rate -EPR	Taxa de variação da linha de costa (metros/ano) calculada pela divisão da distância entre as linhas de costa mais antiga e mais recente pelo tempo.
Classificação da variação da linha de costa com base na taxa de regressão linear -LRR (Almeida et al., 2021).	Acreção (Accreted) >0,5 m/ano. Estabilidade (Stable) -0,5 a 0,5 m/ano Erosão (Eroded) -1 a -0,5 m/ano Erosão crítica (Critically eroded) < -1 m/ano.
Exportação dos dados	CSV-valores separados por vírgula; JSON JavaScript Object Notation; SHP -ESRI shapefile

Fonte: Pereira (2024).

3.4 Geoinformadores

Os geoinformadores são instrumentos essenciais para a avaliação da vulnerabilidade física, pois, por sua natureza, são baseados em características intrínsecas e naturais do ambiente, refletindo respostas sensíveis a transformações ambientais. Segundo Berger e Iams (1996), os geoinformadores são definidos como medidas de processos e fenômenos geológicos que acontecem na superfície da Terra ou em suas proximidades, e que estão sujeitos a alterações significativas para a compreensão das mudanças ambientais ao longo de períodos de até 100 anos ou menos.

Nessa perspectiva, a utilização de geoinformadores para a análise de mudanças ambientais tem se mostrado uma abordagem eficaz, especialmente em contextos de vulnerabilidade ambiental. Geoinformadores são ferramentas que permitem quantificar e interpretar processos geológicos e geomorfológicos em escalas temporais relativamente curtas, oferecendo subsídios para a compreensão de cenários atuais e a projeção de possíveis transformações ambientais.

No cenário costeiro, a aplicação dos geoinformadores se torna ainda mais relevante devido à alta dinâmica desses ambientes e à sua sensibilidade a mudanças naturais e antrópicas. Estudos como os de Bush et al. (1999) e Lima e Amaral (2015) destacam a utilidade dos geoinformadores para mapear vulnerabilidades, especialmente em regiões onde faltam registros históricos detalhados. Desse modo, a capacidade de fornecer uma análise rápida e integrada dos riscos costeiros é facilitando a tomada de decisões.

Segundo o IBGE (2008), citado por Reis et al. (2017, p.179), os indicadores são instrumentos compostos por uma ou mais variáveis que, quando associadas de várias maneiras, proporcionam uma compreensão mais abrangente dos fenômenos aos quais se referem. Além disso, são indispensáveis para orientar a ação e subsidiar o acompanhamento e a avaliação do progresso em direção ao desenvolvimento sustentável, um processo em constante evolução. A formulação de indicadores também é um processo em constante desenvolvimento e adaptação

De acordo com Berger (1997), os geoinformadores consistem em medidas superficiais ou próximas à superfície de fenômenos e processos geológicos, os quais podem demonstrar variações significativas em um período de 100 anos ou menos,

forneendo assim dados relevantes para avaliações ambientais. O mesmo autor também destaca que os geoindicadores descrevem eventos catastróficos ou graduais, colaboram na determinação do que está acontecendo no ambiente, fornecendo indicativos do que a administração pode fazer para combater esses processos.

Berger (1997) salienta, ainda, que os geoindicadores devem contribuir na resposta a quatro questões básicas: O que está acontecendo no ambiente? (condições e tendências); por que está acontecendo? (causas, humanas e/ou naturais); por que é importante? (efeitos ecológicos, econômicos e na saúde); O que se pode fazer acerca disso? (implicações no planejamento e nas políticas).

Neimanis e Kerr (1996) caracterizam indicadores ambientais como medidas que captam ou sintetizam elementos do estado do ambiente e a interação entre as atividades humanas e os recursos naturais.

Berger (1997), por sua vez, destaca ainda que os geoindicadores fundamentam-se em princípios e metodologias estabelecidos, sendo aplicáveis para identificar alterações em uma variedade de ambientes, incluindo, mas não se limitando a ambientes fluviais, costeiros, desérticos, montanhosos e glaciares. Seu propósito primordial é fornecer suporte no estágio inicial de investigações, frequentemente demandando a combinação de diversos indicadores simultaneamente. A relação inicial de geoindicadores deve ser constantemente revisada e refinada, conforme necessário, visando satisfazer às expectativas levantadas e às demandas emergentes.

Sob essa mesma perspectiva, Oliveira et al. (2017) sustentam que os geoindicadores representam medidas dos processos geológicos e fenômenos ocorrentes na superfície terrestre, os quais oferecem subsídios para a avaliação ambiental.

Segundo Rudorff (2005), os geoindicadores apresentam-se como uma alternativa viável para a investigação dos perigos costeiros. De acordo com Bush et al. (1999), conforme citado por Rudorff (2005), os geoindicadores têm o potencial de servir como base para a avaliação imediata de riscos costeiros em áreas carentes de dados históricos adequados. Eles proporcionam um conjunto de técnicas, tanto qualitativas quanto quantitativas, para a rápida identificação de riscos potenciais.

Perinotto et al. (2012), ao analisar o estado erosional das praias de Santa Catarina, destaca que a aplicação dos indicadores escolhidos para essa área de estudo, demonstrou ser eficaz para obter uma visão abrangente do estado de erosão das praias catarinenses. Esse método possibilitou a rápida comparação de uma grande quantidade de dados, a partir de um levantamento realizado com custos relativamente baixos. No entanto, tanto a seleção dos indicadores quanto a atribuição de pesos a eles têm um caráter subjetivo, sendo necessário ajustá-los conforme as características e realidades específicas das diferentes regiões analisadas.

No estudo sobre a vulnerabilidade costeira em Pernambuco, Mallmann (2008) destaca que foi possível atribuir diferentes graus de vulnerabilidade às praias analisadas. Além disso, foi exequível identificar os principais conjuntos de fatores que contribuem para essa vulnerabilidade em cada uma das praias analisadas.

O emprego de geoindicadores representa uma alternativa viável para realizar avaliações do potencial de risco de desastres naturais em regiões costeiras. Estes indicadores fornecem tendências que contribuem para a compreensão dos processos em curso ao longo da costa, o que possibilita a identificação de indícios dos perigos aos quais a região está sujeita. Martins et al., (2016); Reis (2019); Moura e Pereira (2020);

Compactuando desse mesmo entendimento, Novaes (2024) destaca que os indicadores ambientais investigados para obtenção do Índice de Vulnerabilidade Costeira se mostraram válidos para adquirir informações sobre as áreas sujeitas aos processos erosivos. O mesmo autor considera que se trata de abordagem eficaz para auxiliar no planejamento urbano e no monitoramento dos impactos causados pela erosão costeira em praias estuarinas delimitadas por falésias é selecionar os geoindicadores mais relevantes para o estudo. Além disso, esses indicadores podem ser ajustados de acordo com os objetivos específicos da pesquisa ou com as particularidades da área que serão aplicadas. Menezes (2018) ao fazer uso dessa metodologia destaca que:

O presente método demonstrou ser de simples aplicabilidade e capaz de ser adaptado para áreas que possuem menores acervos de dados pretéritos ou ambientes passíveis de ausência de dados temporais em relação a avaliação da vulnerabilidade à erosão costeira, sendo essa uma vantagem da metodologia proposta (MENEZES p.32).

3.5 Linha de Costa

A definição e o entendimento da linha de costa têm se comportado de uma maneira central em estudos costeiros devido à sua importância para a compreensão da dinâmica das zonas costeiras e para o gerenciamento adequado dessas áreas. Diferentes perspectivas e definições têm sido propostas por diversos autores ao longo do tempo, refletindo a complexidade e a variedade de processos que influenciam esse ambiente.

Bird (1970) define linha de costa (coastline) como uma zona entre a margem da água no nível da maré baixa e o limite em direção a terra sobre a ação das ondas. Já a linha de praia (shoreline), é estritamente a margem da água que migra de acordo com as marés.

Por outro lado, Muehe (1995) e Thurman (1994) concentram-se na definição da linha de praia, que é a margem da água que migra de acordo com as marés e oscilações do nível do mar. Muehe (1995) especificamente define a linha de praia como o limite da rampa de "*swash*" no intervalo de tempo de observação, destacando a variação da linha de praia de acordo com a altura da maré.

Diniz (2002) amplia a discussão ao definir a linha de costa como a linha que separa o continente do oceano, reconhecendo sua constante mutabilidade devido a fenômenos naturais e processos antrópicos. Ele descreve dois fenômenos principais associados à linha de costa: progradação, que ocorre quando a linha de costa avança em direção ao oceano, aumentando a área continental; e erosão, que ocorre quando a linha de costa recua continente adentro, diminuindo a área continental.

Reis (2008), define como uma linha que se encontra inserida na região litorânea, numa faixa submetida a uma dinâmica complexa, onde interage, conjuntamente ou de forma isolada, muitos processos de origem continental e marinha. Ela pode ser associada à existência de feições praiais como linha de falésias ou linha de vegetação, podendo estar, muitas vezes, estabilizada pela intervenção humana.

Para definir a linha de costa o CASSIE aplica um algoritmo de detecção automática da linha de costa às imagens pré-processadas, que é realizado utilizando o Índice de Água de Diferença Normalizada (NDWI):

$$NDWI = \frac{(NIR - GREEN)}{(NIR + GREEN)}$$

O NIR e o GREEN incluem ao reflexo do pixel SR nas faixas do infravermelho médio e do verde, respectivamente. Quando a imagem resultante do NDWI apresenta um histograma bimodal bem definido, no qual as classes de terra e água são claramente separadas, o corpo d'água e a terra são classificados com base no algoritmo de limiarização de duas classes propostas por Otsu (1979).

4 - PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos aplicados nessa pesquisa foram elaborados na tentativa de alcançar o objetivo geral, que consiste em analisar a vulnerabilidade à erosão costeira das praias de Lucena a partir de geotecnologias e geoindicadores. Desse modo, inicialmente foi feito um levantamento sistemático da literatura (bibliometria), por meio da base de dados da web of Science, como também, informações e dados secundários que complementarão a pesquisa (como cartas, shapefiles, pesquisas amostrais etc.) encontrados em sites de órgãos governamentais, como Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Superintendência de Administração do Meio Ambiente (SUDEMA).

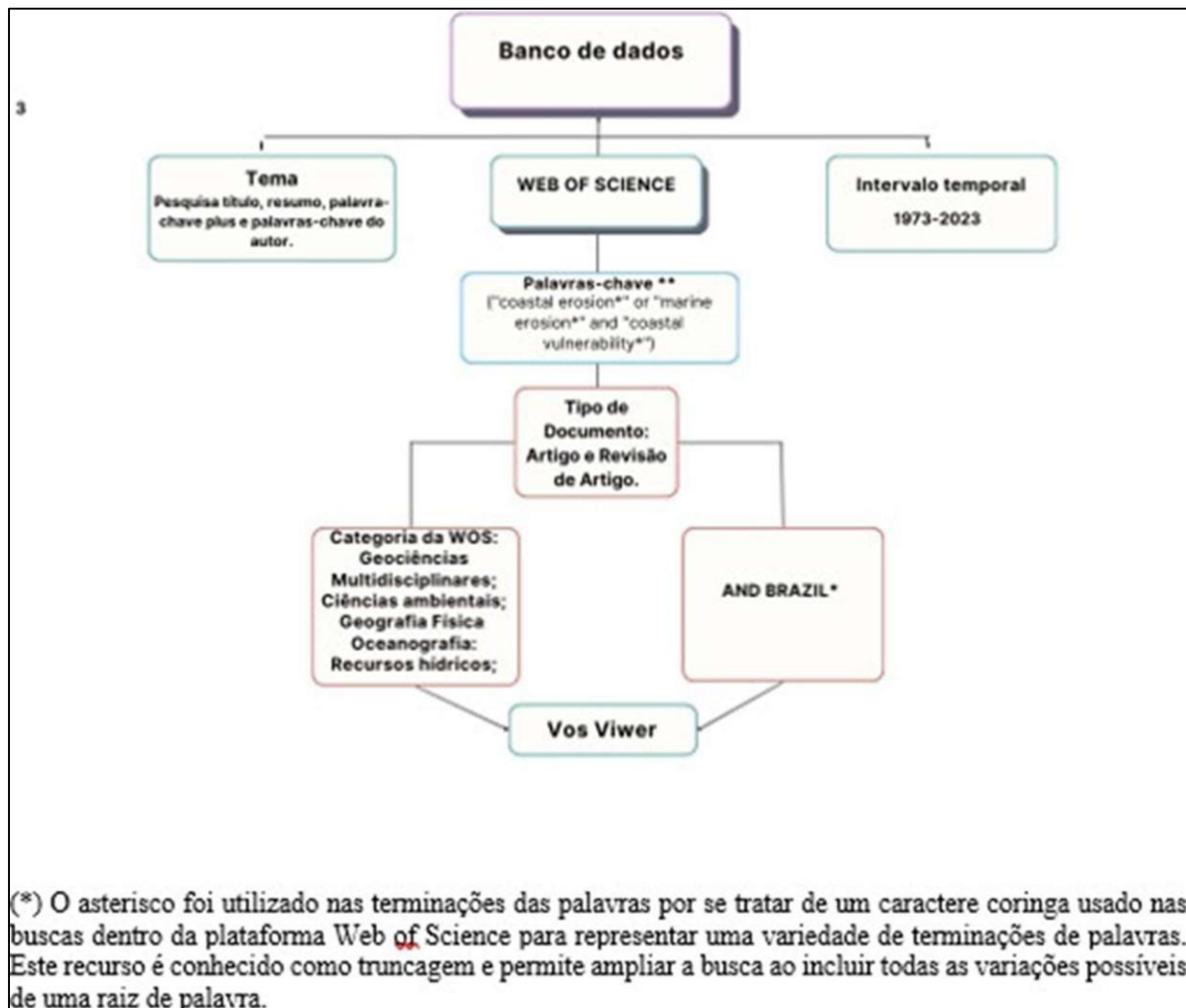
No tocante a análise bibliométrica realizada neste estudo utilizou-se como base a obtenção de informações provenientes do banco de dados *Web of Science Core Collection (WoS)* da *Clarivate Analytics*, de acordo com os parâmetros apontados no fluxograma (figura 8). Pois, trata-se de uma base com repositório abrangente e grandes conjuntos de dados bibliográficos. Amaral et al. (2004) aponta a utilidade da bibliometria na pesquisa científica, especialmente em como ela pode gerar novos indicadores a partir da análise de quantitativas e qualitativas.

Esses bancos de dados consistem em compilações digitais que reúnem registros de produção acadêmica, fornecem informações sobre publicações, autores e instituições. amplamente reconhecido de recursos de informações acadêmicas, internacionalmente respeitado por sua confiabilidade. Sendo frequentemente empregado em uma variedade de disciplinas, incluindo as ciências naturais, engenharia, ciências sociais, artes e humanidades.

Além do levantamento já percorrido ao longo desse trabalho sobre o uso da (WOS), optou-se em realizar a análise de densidade das palavras-chave através do VOSviewer. Este software, desenvolvido em linguagem Java, utiliza o método VOS (Visualização e similaridade) para construir mapas que representam redes de dados bibliométricos. Ele nos define e ligações na rede, onde objetos mais próximos indicam maior similaridade, enquanto os menos próximos têm pouca ou nenhuma similaridade

(MOREIRA; GUIMARÃES; TSUNODA, 2020) Esses objetos são agrupados em clusters, que são conjuntos de itens com características semelhantes.

Figura 8- Fluxograma do Levantamento Bibliométrico



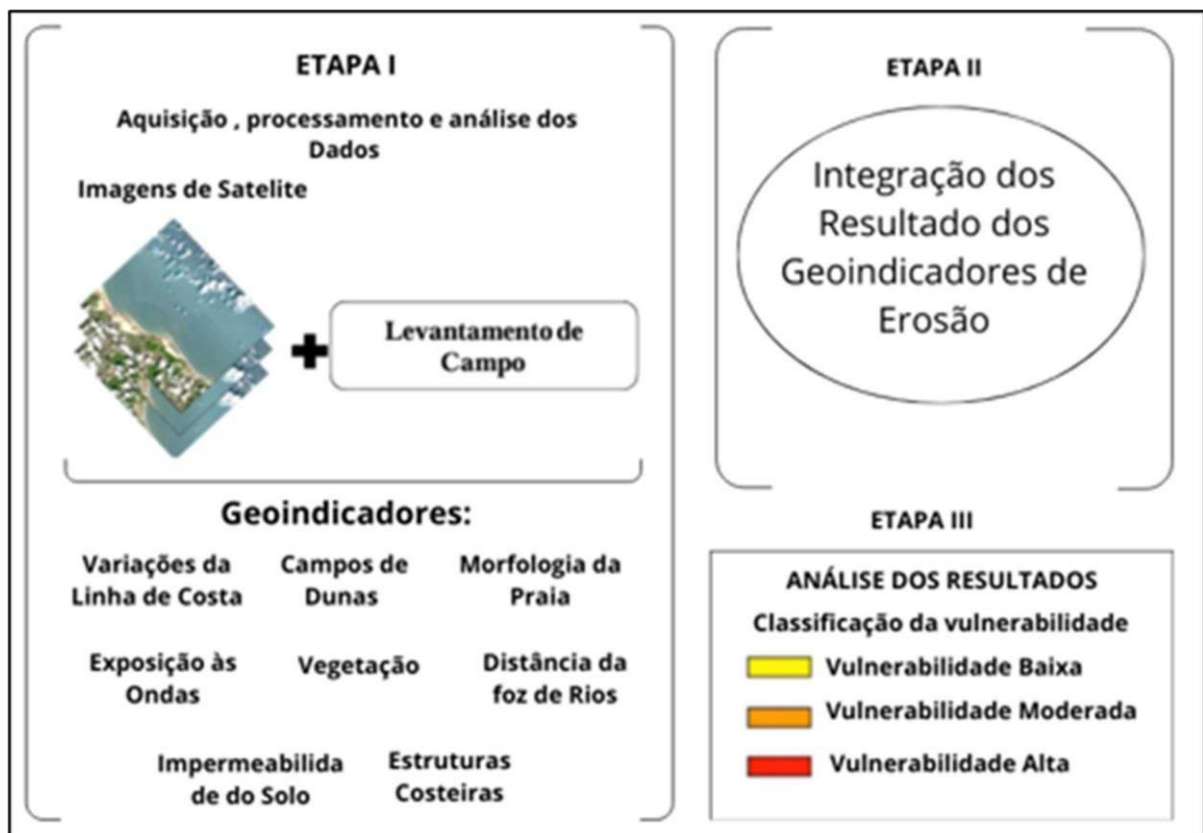
Fonte: Pereira, 2024.

Adicionalmente, realizou-se uma análise de imagens de satélite em ambiente SIG, utilizando a ferramenta CASSIE (*Coastal Analyst System From Space Imagery Engine*). Paralelamente, foi conduzido um levantamento em campo para coleta de geoindicadores de vulnerabilidade à erosão costeira, com o objetivo de identificar o grau de vulnerabilidade das áreas analisadas. Esses procedimentos estão sintetizados no fluxograma (figura 9) e serão detalhados posteriormente.

Para definir o grau de vulnerabilidade utilizou-se uma adaptação das metodologias propostas por Menezes et al. (2018); Bush et al. (1999); Souza et al. (2011) e Araujo (2023). Nesse sentido, foram adotados os seguintes geoindicadores:

I morfologia da praia, II posição da linha de costa, III campos de dunas, IV exposição às ondas, V distância da foz de rios, VI vegetação, VII estruturas costeiras, VII impermeabilidade do solo. Exemplificados na (figura 10). No tocante a realização do campo, ele ocorreu nos dias 09, 10, 11 e 12 de novembro de 2024 em condições de maré vazante, semelhantes as condições usadas na obtenção da variação de linha de costa.

Figura 9- Estrutura para obtenção do IVC das praias do Município de Lucena-PB. A etapa 1 mostra aquisição de dados por meio de imagens de satélite e o levantamento de campo para identificação de indicadores de erosão, etapa 2 mostra a integração dos resultados e cálculo do IVC e 3 a análise dos resultados e classificação de acordo com o grau de vulnerabilidade a erosão da região.



Fonte: Pereira, 2024.

Figura 10 - Exemplo de geoindicadores para definir o grau de erosão; I - Morfologia de Praia (Praia de Camaçari); III - Campos de dunas (Praia de Fagundes); IV - Exposição às ondas (Praia de Ponta de Lucena); VI - Vegetação (Praia de Fagundes); VII - Estrutura Costeira (Praia de Costinha); VIII - Impermeabilidade do solo (Praia de Costinha).



Fonte: Pereira, 2024

I) Morfologia da praia:

Menezes et al. (2018) e Ribeiro et al. (2013) destacam que a análise da largura da praia e a sua inclinação são fundamentais para a previsão de eventos de erosão.

Conforme observado por Martins (2015), com base em Mazzer, Dillenburg e Souza (2008), praias amplas e bem desenvolvidas tendem a ser mais estáveis. Por sua vez, praias as quais a morfologia foi alterada por construções sobre o perfil apresentam redução no espaço para dissipação da energia das ondas, tornando

essas estruturas, principalmente aquelas localizadas sobre dunas, mais vulneráveis a danos.

Nessa pesquisa a coleta desse geoindicador correu da seguinte forma: inicialmente, as medidas de largura de praia foram identificadas usando a régua da ferramenta *Google Earth*. A partir disso, foi identificada a praia com maior largura que apresentou uma extensão de aproximada de 100 metros. Essa abordagem permitiu a coleta preliminar de dados espaciais com base em imagens de satélite, fornecendo um panorama inicial da largura das praias analisadas. Com base nesse dado, os intervalos foram definidos para uma classificação nominal em três categorias: Praia Estreita, Praia Estável e Praia Larga.

Praia Estreita (0 a ~33 metros): 1/3 do intervalo total;

Praia Estável (~33 a ~67 metros): 1/3 do intervalo total;

Praia Larga (~67 a 100 metros): 1/3 do intervalo total;

Neste estudo, na tentativa de mitigar as variações decorrentes das variações de marés, foram realizadas coletas em campo para determinar a largura da praia sob condições de maré vazante, o mesmo critério usando para analisar as variações de linha de costa entre os anos de 1993 e 2023.

II) posição da linha de costa:

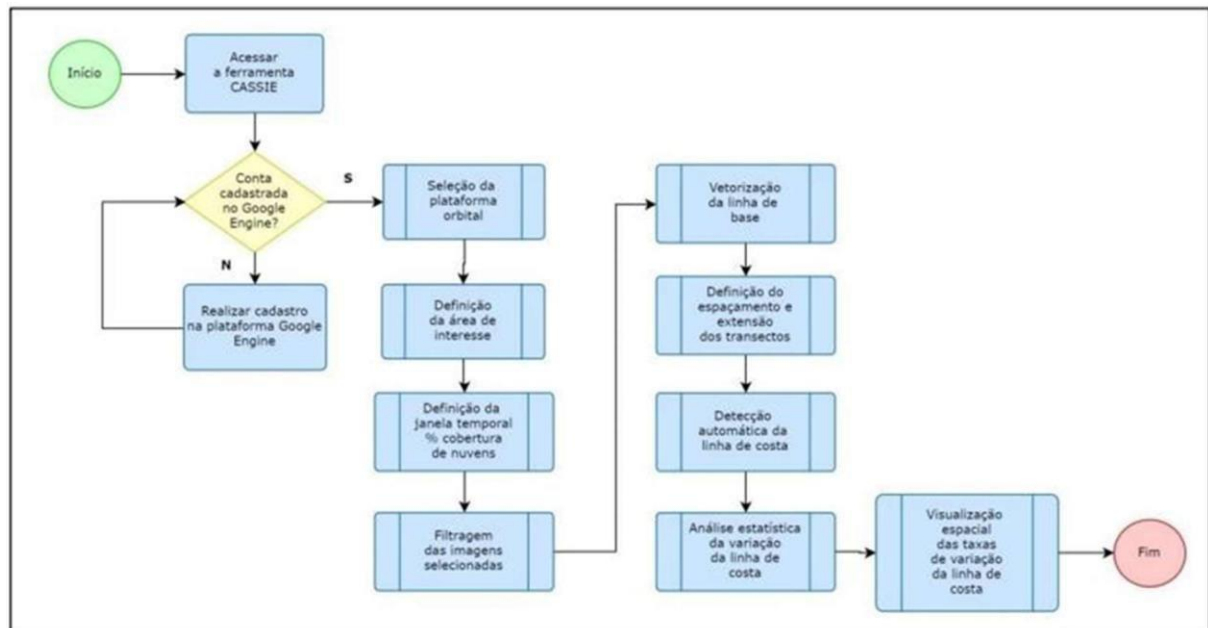
Dolan et al. (1980) e Boak e Turner (2005) apontam que o monitoramento da posição da linha de costa permite identificar tendências de recuo ou avanço litorâneo, fornecendo dados essenciais para a compreensão da vulnerabilidade costeira. Nesse sentido, costas que apresentam recuo acelerado indicam áreas com alta suscetibilidade à erosão, enquanto regiões onde a linha de costa avança podem estar associadas a processos de sedimentação ativa ou intervenção antrópica, como projetos de engordamento de praias.

O monitoramento da linha costeira tem se mostrado, em diversos estudos, uma importante ferramenta para acompanhar essas variações ao longo dos anos. A avaliação quantitativa das tendências da linha de costa, que podem passar por erosão e/ou acresção, é considerada um indicador crucial da vulnerabilidade costeira a riscos naturais e um dos parâmetros mais importantes usados para determinar índices de

vulnerabilidade costeira (McLaughlin e Cooper, 2010; Hzami et al., 2021; Almeida 2021).

Para a análise das mudanças na linha de costa, foi empregada a ferramenta Coastal Analyst System from Space Imagery Engine (CASSIE), especificamente o módulo de Análise de Linha de Costa. Este módulo, uma ferramenta web de código aberto, realiza automaticamente a análise da variação da linha de costa em regiões específicas. A metodologia baseia-se no uso de imagens capturadas pelos satélites das séries LANDSAT e SENTINEL-2, processadas por meio da plataforma Google Earth Engine (ALMEIDA et al., 2021). Um fluxograma das diferentes etapas envolvidas para o funcionamento da ferramenta e-C.A.S.S.I. E é resumido na (figura 10).

Figura 10- Fluxograma da utilização da ferramenta CASSIE

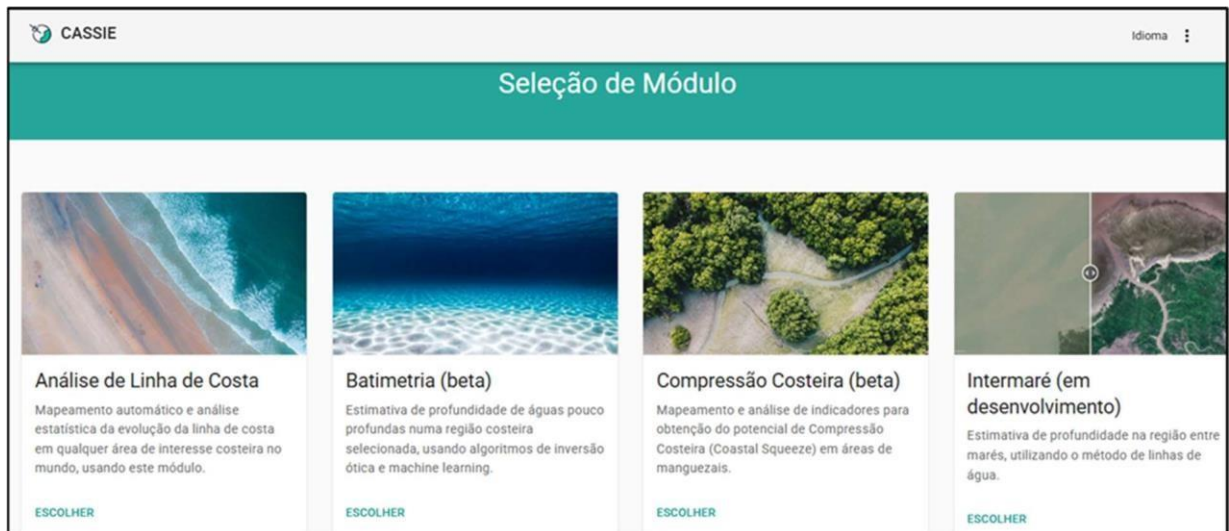


Fonte: Pereira, 2024

Os parâmetros adotados nessa pesquisa, serão detalhados a seguir:

O CASSIE oferece módulos de análise de linha de costa, batimetria (beta) e compressão costeira (beta) e Intermaré (em desenvolvimento), conforme é possível verificar na (figura 11). Esse trabalho fará uso do primeiro módulo que é intitulado de análise de linha de costa.

Figura 11 - Vista inicial da plataforma CASSIE.



Fonte: Cassie, 2024

Ao selecionar a opção de análise de linha de costa, o usuário é direcionado para a página de aquisição de imagens. Nessa etapa, é possível escolher entre os satélites Sentinel-2 ou Landsat (figura 12). Nessa pesquisa, foram utilizadas imagens da missão de satélite Landsat 5 e Landsat 8. Que apresentar uma resolução ótica de 30 metros, encontra-se em atividade de 1984 até a atualidade e disponibiliza um ciclo de captura de 15 dias.

Figura 12 - Imagens de satélite disponíveis no GEE que podem ser usadas no CASSIE

Missão	Produtos	Cobertura (anos)	Tempo de revisão (dias)	Resolução de pixel (m)
Landsat 5 (TM)	SR	1984 – 2013	15	30
Landsat 7 (ETM +)	SR	Presente de 1999	15	30
Landsat 8 (OLI)	SR	2013-presente	15	30
Sentinela 2 (MSI)	TOA	Presente de 2015	5	10

Fonte: (ALMEIDA et al., 2021).

Após a escolha do satélite que será utilizado, o usuário pode delimitar a área de interesse, neste caso, o município de Lucena-PB.

Realizada essa delimitação, ficará disponível o período de análise desejado, sendo possível ajustar filtros para o percentual máximo de cobertura por nuvens. No

entanto, embora o CASSIE permita a aplicação de filtros para selecionar imagens com base em um percentual específico de cobertura por nuvens, sua precisão na classificação de imagens quanto à presença de nuvens é limitada. É possível encontrar imagens classificadas com 0,0% de cobertura de nuvens que, na prática, apresentam nuvens suficientes para comprometer os resultados da análise. Apesar dessa limitação, o sistema oferece ao usuário a possibilidade de revisar e selecionar manualmente as imagens mais adequadas para a análise na etapa seguinte. Nesse contexto, foi realizado um filtro das imagens de acordo com os parâmetros apontados a seguir.

Após realizar uma análise comparativa entre os valores apontados na tabua de marés e as imagens com um baixo percentual de nuvens, foram escolhidas três imagens de diferentes períodos (agosto/1993, agosto/2001 e janeiro/2023), todas correspondendo a condições de maré semelhantes (maré vazante) e abrangendo uma cobertura temporal de três décadas, conforme demonstrado na (figura 13). Essa seleção permite maior consistência nos dados para o mapeamento da linha de costa. As três imagens selecionadas foram: LT05-22/08/1993, às 11 horas e 51 minutos; LT05-12/08/2021, às 12 horas e 09 minutos e a LT08-13/01/2023 às 12 horas e 29 minutos.

Figura 13 - Imagens utilizadas no CASSIE

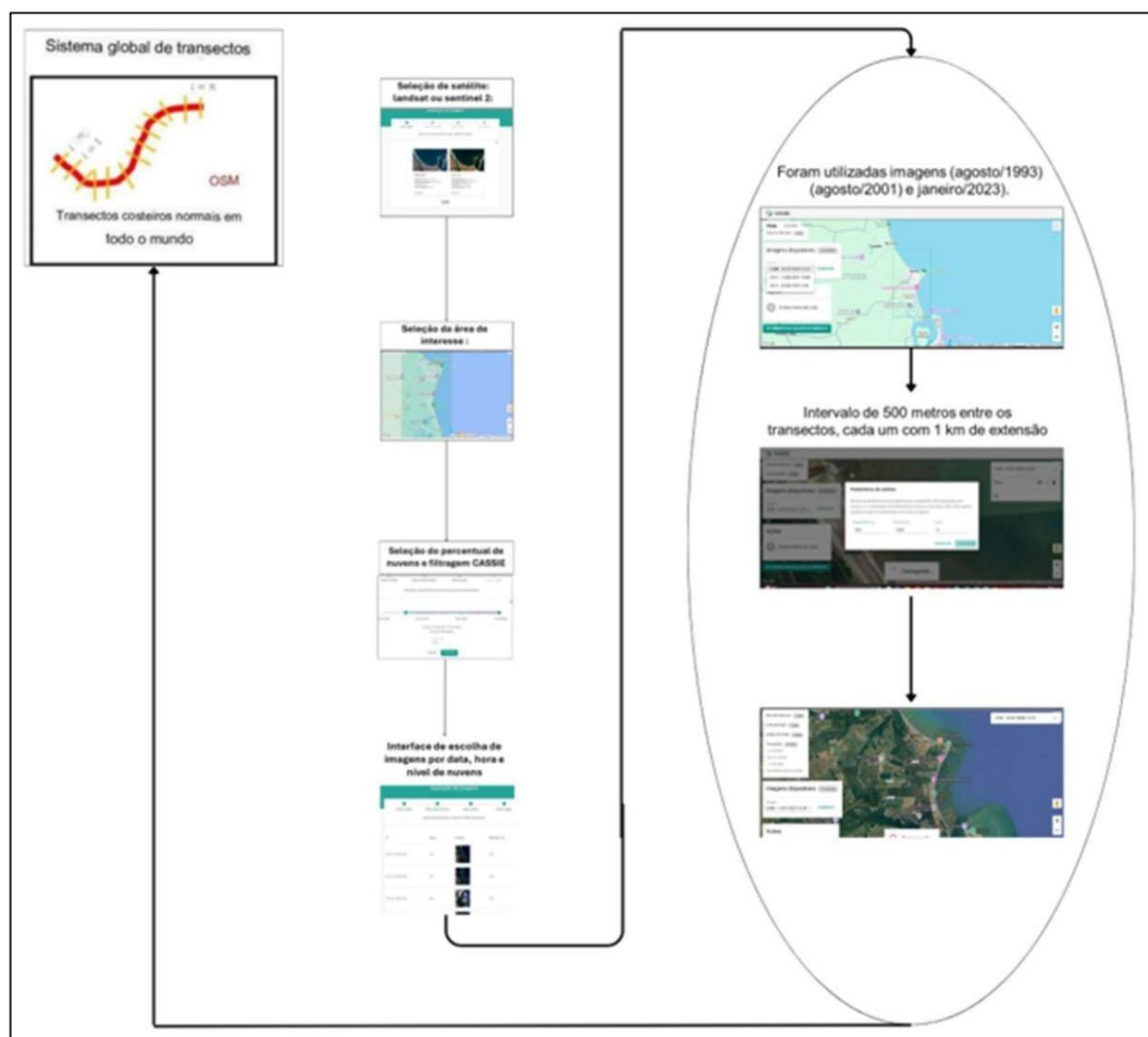
Imagens selecionada no CASSIE	Ano da Imagem	Hora da Imagem	Data da Maré	Horário	Altura (m)
LT05 - 22/08/1993 11:51	22/08/1993	11:51	22/08/1993	01:04	0.3
LT05 - 22/08/1993 11:51	22/08/1993	11:51	22/08/1993	07:30	2.4
LT05 - 22/08/1993 11:51	22/08/1993	11:51	22/08/1993	13:34	0.4
LT05 - 22/08/1993 11:51	22/08/1993	11:51	22/08/1993	19:53	2.3
LT05 - 12/08/2001 12:09	12/08/2001	12:09	12/08/2001	03:13	0.8
LT05 - 12/08/2001 12:09	12/08/2001	12:09	12/08/2001	09:36	1.9
LT05 - 12/08/2001 12:09	12/08/2001	12:09	12/08/2001	15:41	0.8
LT05 - 12/08/2001 12:09	12/08/2001	12:09	12/08/2001	22:09	1.8
LC08 - 13/01/2023 12:29	13/01/2023	12:29	13/04/2023	03:38	0.9
LC08 - 13/01/2023 12:29	13/01/2023	12:29	13/04/2023	10:00	1.9
LC08 - 13/01/2023 12:29	13/01/2023	12:29	13/04/2023	16:41	0.7
LC08 - 13/01/2023 12:29	13/01/2023	12:29	13/04/2023	23:11	1.8

Fonte: Pereira,2024

Após a definição da linha de base, que serve como referência no continente e é paralela à costa, determinam-se a extensão e o espaçamento entre os transectos para a coleta de dados e posterior análise estatística. Neste estudo, estabeleceu-se um intervalo de 500 metros entre os transectos, cada um com 1 quilômetro de extensão.

Ao extrair automaticamente as linhas costeiras das imagens selecionadas, o CASSIE realiza análises estatísticas utilizando a abordagem do DSAS (Digital Shoreline Analysis System). As análises incluem o Envoltório de Mudança na Linha Costeira (SCE), que mede a distância entre a linha costeira mais distante e mais próxima da linha de base em cada transecto; o Movimento Líquido na Linha Costeira (NSM), que representa a distância entre as linhas costeiras mais antigas e mais recentes para cada transecto; a Taxa de Mudança do Ponto Final (EPR), que calcula a taxa de mudança da linha costeira em metros por ano; e a Taxa de Regressão Linear (LRR), que determina a taxa de mudança na linha costeira com base na inclinação da linha de regressão linear (ALMEIDA, et al., 2021). O fluxograma (figura 14) sintetiza os parâmetros adotados nessa pesquisa na plataforma CASSIE.

Figura 14 - Procedimentos adotados no CASSIE nessa pesquisa.



Fonte: Pereira, 2024.

A Taxa de Regressão Linear (LRR) é a taxa de mudança na linha costeira (em metros/ano), a qual será utilizada nessa pesquisa, baseada na inclinação da linha de regressão linear, e calculada ajustando uma linha de regressão de mínimos quadrados a todos os pontos da linha costeira para todos os transectos. Os resultados da LRR são classificados usando o esquema de classificação crônica de erosão da praia proposto por Esteves e Finkl (1998) Através da classificação obtida com a LRR, o CASSIE define a alteração da linha costeira em quatro classes, conforme a (tabela 1).

Tabela 1 - Classificação de erosão costeira proposto por Esteves e Finkl (1998)

Classes de alteração da linha de costa	Status do LRR
Em acreção	> 0.5 m/ano
Estável	- 0,5 to 0.5 m/ano
Erodido	-1 to -0.5 m/ano
Criticamente erodido	< -1 m/ano

Fonte: (ALMEIDA et al., 2021).

III) Campo de dunas:

Atuando como uma barreira natural contra o avançado do mar, quando estão em processo de erosão essas estruturas podem comprometer sua função protetora, desse modo os terrenos costeiros ficam expostos a inundações e impactos diretos de ondas. Desse modo, a presença de dunas juntamente com vegetação indica que o sistema costeiro apresenta uma certa estabilidade, uma vez que a vegetação auxilia na fixação dos sedimentos.

Nesse sentido, Menezes et al. (2018) destacam que as dunas desempenham um papel crucial como barreiras naturais, protegendo a zona costeira contra os impactos de ondas e tempestades. Os autores enfatizam também que as dunas atuam como importantes reservatórios de sedimentos, abastecendo as praias e contribuindo para a manutenção do equilíbrio sedimentar dessas áreas. Esse geoindicador foi analisado in loco, através de pesquisas de campo.

IV) Exposição às ondas:

De acordo com Souza et al. (2011) a variação da linha de costa está diretamente relacionada a ocorrência de ondas, isso é um fator importante nos processos de erosão e deposição.

Nessa perspectiva, à presença de estruturas naturais como corais, bancos de área ou barreira de arenitos desempenham um papel crucial na determinação do grau de exposição ou proteção da linha de costa frente à ação das ondas. Para obtenção desse geoindicador, foram realizadas pesquisas de campo para observações in loco e utilização de imagens de satélite.

V) Distância da foz de rios:

Menezes et al. (2018), destacam que os rios e canais podem passar por mudanças significativas ao longo dos anos, causando mudanças na linha de costa. Os rios e canais operam uma abertura de maneira intermitente, causando mudanças abruptas na linha de costa chegando a provocar inundações ou regressões nas áreas adjacentes a praia. Para realização do levantamento desse geoindicador ocorreu por meio de imagens de satélite e pesquisa de campo.

VI) Vegetação: de acordo com Bush et al. (1999), a presença de cobertura vegetal contribui fixação de sedimentos impedido processos erosivos. Esses autores entendem que a presença de gramas, arbustos, árvores e manguezal nas áreas costeiras, sugerem baixo potencial de erosão. Menezes (2018) destaca que:

Além da vegetação arbustiva nas zonas costeiras, a presença de cobertura vegetal, mesmo que de pequeno porte, como as gramíneas em ambientes residências são importantes nas recargas de aquíferos, estando associados à presença de unidades geológicas permeáveis, como os terraços arenosos marinhos, na zona costeira adjacente a costa. (Menezes, 2018, p. 78)

A identificação desse geoindicador ocorreu por meio de levantamento em campo.

VII) Estruturas Costeira:

Menezes et al. (2018), destaca que apesar das obras de contenção de erosão costeira serem capazes de mitigar uma proteção de curto prazo, ao longo prazo elas podem representar áreas de instabilidade. Este geoindicador foi analisado por meio de pesquisa de campo.

VIII) Impermeabilidade do solo:

Souza et al. (2011), apontam que quanto maior a ocupação humana, maior é a impermeabilidade do solo. Nesse sentido, no levantamento desse geoindicador foi verificado a presença de intervenções humanas próximas a linha de costa: residências, estradas, bares, pousadas, praças e entre outras. Esse levantamento ocorreu por meio de pesquisa de campo.

Os geoindicadores descritos ao longo desse trabalho encontram-se sumarizados na (tabela 2).

Tabela 2 - Geoindicadores de Vulnerabilidade à Erosão Costeira

Índice	Geondicadores	V. Baixa	V. Moderada	V. Alta
	Morfologia da praia	Bom suprimento sedimentar.	Praia estreita	Ausência de praia
	Posição da linha de costa	Acresção	Estável	Erosão
	Campos de Dunas	Grande extensão de campos de dunas.	Dunas de baixas altitudes.	Sem dunas
	Exposição às ondas	Presença de barreiras naturais.	Presença de bancos de areia.	Ondas sem obstáculos naturais
	Distância da foz de Rios	>100m	Entre 50 e 100 m	<50m
	Vegetação	Vegetação Densa	Gramíneas, Arbustos	Ausência de Vegetação
	Estruturas costeira	Ausente	Estruturas de pequeno porte	Muros de contenção ao longo do ambiente praial.
	Impermeabilidade do solo	Ausência de ocupações	Baixo quantitativo de ocupações	Obras de infraestrutura avançadas: assentamentos desenvolvidos, estradas asfaltadas e urbanização elevada.

Fonte: Pereira, 2024.

Para classificar as praias quanto à vulnerabilidade à erosão costeira, a partir dos geoindicadores apresentados anteriormente e sumarizados na (Tabela2), atribuiu-se pesos de modo crescente para cada indicador na seguinte forma: 0 para baixa, 5 para moderada e 10 para alta vulnerabilidade em cada indicador individualmente. Eles serão organizados em planilha constituída com base no modelo da (1) equação proposto por Souza et al. (2013) e trabalhado por Menezes (2018) e Franco (2021).

$$I = \left(\frac{1}{n_v}\right) \cdot \sum_v \left(\frac{1}{n_i}\right) \cdot \sum_i x_i \quad (1)$$

Onde:

I é a média aritmética dos conjuntos de geondicadores (costeiro e continental);

nv é o número de ambientes; costeiro e continental);

ni é o número de indicadores de um ambiente;

xi é a soma dos indicadores.

Em resumo, as variáveis são a média aritmética dos geoindicadores, e **I** (índice) é a média aritmética das variáveis. A vantagem desse índice é a possibilidade de trabalhar em diferentes escalas com base na área de interesse.

Nesse sentido, as variáveis dos geoindicadores que foram sumarizadas na (Tabela 2), foram avaliados de maneira individual conforme citado na supracitada tabela, de acordo com seu grau de vulnerabilidade: baixa, moderada ou alta e serão integralizados de modo a compor o índice de vulnerabilidade da praia, representado na equação pela letra (**I**).

Ou seja, partir do cálculo do índice de vulnerabilidade costeira é obtido o resultado da classificação das praias, que obedecerá aos intervalos descritos na (tabela 3).

Tabela 3 - Classificação do índice de vulnerabilidade costeira em: alta, moderada e baixa com seus respectivos valores. Adaptado de Souza; (2013); Menezes (2018); Fraco (2021);

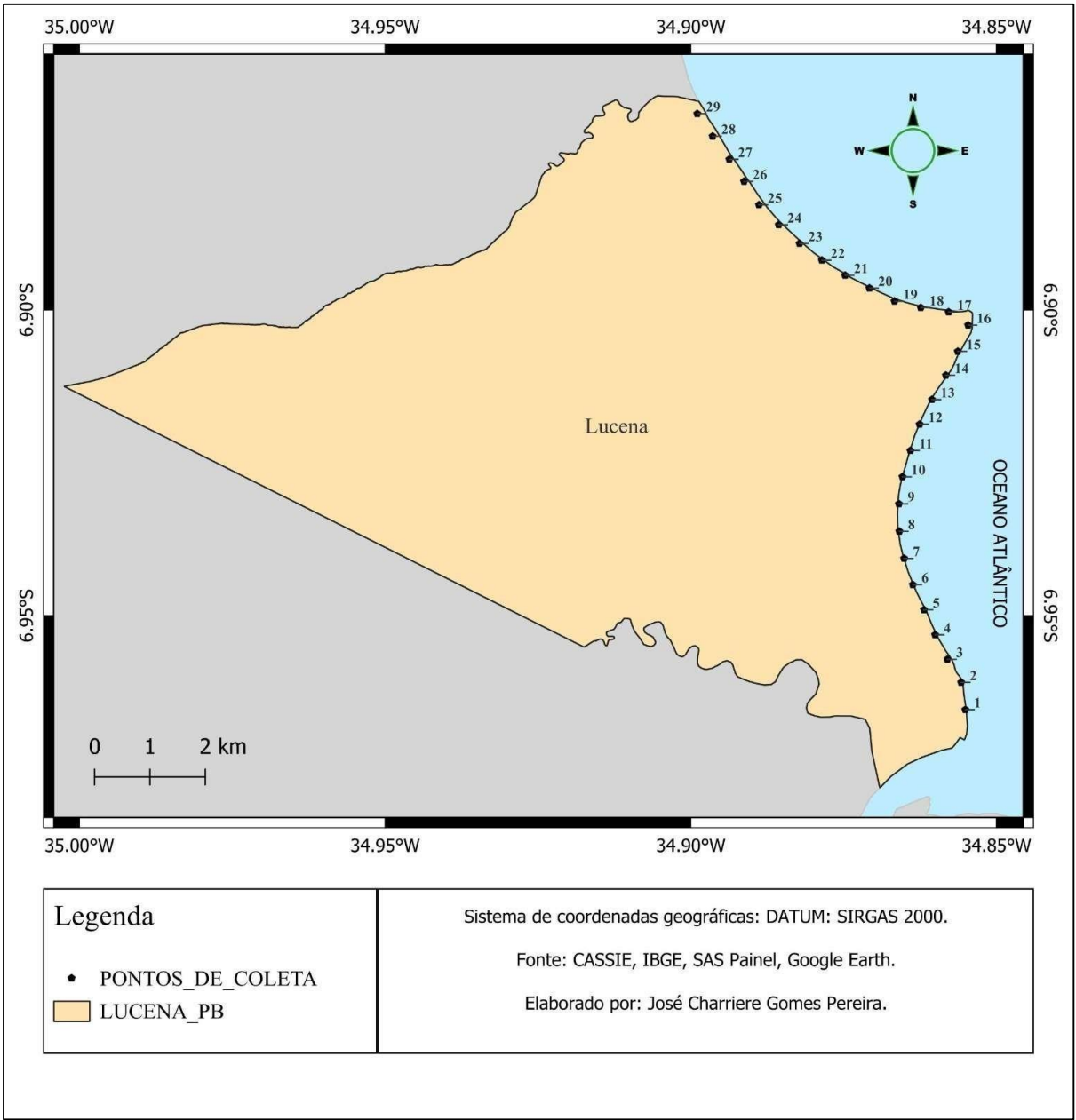
Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC)	
Alto	7 a 10
Moderado	3 a 6,9
Baixo	0 a 3

Fonte: Pereira (2024)

Uma vez que no CASSIE a distância adotada entre os transectos foi de 500 metros, os geoindicadores foram coletados a cada 500 e metros, sendo extrapolados

250 metros para ambos os lados. Desse modo, cada transecto corresponde a um ponto. Diante disso, foram contemplados 29 pontos de coleta, representado na (figura 15) e detalhado na (tabela 4), durante a coleta foram utilizados o Global Positioning System (GPS) e câmera fotográfica e planilha contendo os descritores analisados.

Figura 15 - Mapa dos Pontos de Coleta dos Geoindicadores de Erosão Costeira



Fonte: Pereira, 2024.

Tabela 4 - Coordenadas geográficas dos pontos de coleta

Pontos	Latitude	Longitude
--------	----------	-----------

1	6°57'55.34"S	34°51'18.44"O
2	6°57'39.17"S	34°51'20.94"O
3	6°57'24.84"S	34°51'28.74"O
4	6°57'10.62"S	34°51'36.46"O
5	6°56'56.16"S	34°51'43.39"O
6	6°56'41.40"S	34°51'50.23"O
7	6°56'26.06"S	34°51'55.37"O
8	6°56'10.10"S	34°51'58.06"O
9	6°55'53.87"S	34°51'58.11"O
10	6°55'37.80"S	34°51'55.75"O
11	6°55'22.32"S	34°51'51.08"O
12	6°55'6.91"S	34°51'46.80"O
13	6°54'52.37"S	34°51'39.09"O
14	6°54'39.03"S	34°51'30.01"O
15	6°54'24.48"S	34°51'22.86"O
16	6°54'9.57"S	34°51'16.76"O
17	6°54'1.20"S	34°51'29.40"O
18	6°53'58.39"S	34°51'45.39"O
19	6°53'53.83"S	34°52'0.88"O
20	6°53'47.35"S	34°52'15.63"O
21	6°53'39.41"S	34°52'29.84"O
22	6°53'30.35"S	34°52'43.28"O
23	6°53'20.13"S	34°52'55.88"O
24	6°53'9.24"S	34°53'8.02"O
25	6°52'57.27"S	34°53'19.10"O
26	6°52'43.61"S	34°53'28.20"O
27	6°52'29.90"S	34°53'36.71"O
28	6°52'16.66"S	34°53'46.02"O
29	6°52'6.27"S	34°53'53.05"O

5 . RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise da variação da linha de costa é fundamental para compreender os processos dinâmicos que moldam a interface entre a terra e o mar. Neste estudo, essa análise foi realizada por meio da ferramenta CASSIE (*Coastal Analysis System via Satellite Imagery Engine*), que possibilitou a quantificação dessas variações a partir de imagens de satélite e processamento em nuvem. A eficácia do CASSIE está respaldada por estudos como o de Almeida et al. (2021), que demonstram sua aplicabilidade no monitoramento costeiro.

Inicialmente, os resultados obtidos pelo CASSIE serão apresentados de forma abrangente, considerando toda a extensão do município. Em seguida, essa análise será detalhada por setores específicos, integrando os dados da variação da linha de costa com outros geindicadores que compõem o índice de vulnerabilidade costeira. Esse procedimento permitirá uma avaliação das áreas mais suscetíveis à erosão.

5.1 Variação da Linha de Costa

Para a identificação da variação de linha de costa, conforme descrito nos procedimentos metodológicos, foi realizada uma análise das linhas de costa no período de 1993 a 2023, utilizando imagens do satélite Landsat por meio da plataforma CASSIE.

Com base na metodologia proposta por Esteves e Finkl (1998), a linha de costa foi classificada em quatro categorias: criticamente erodida, erodida, estável ou em acreção. Esses valores foram obtidos ao longo de 15 km de extensão, por meio da geração de 29 transectos com espaçamento regular de 500 metros, os resultados obtidos estão descritos na (tabela 5).

Tabela 5 - Classificação da Variação de Linha de Costa conforme metodologia proposta por Esteves e Finkl (1998)

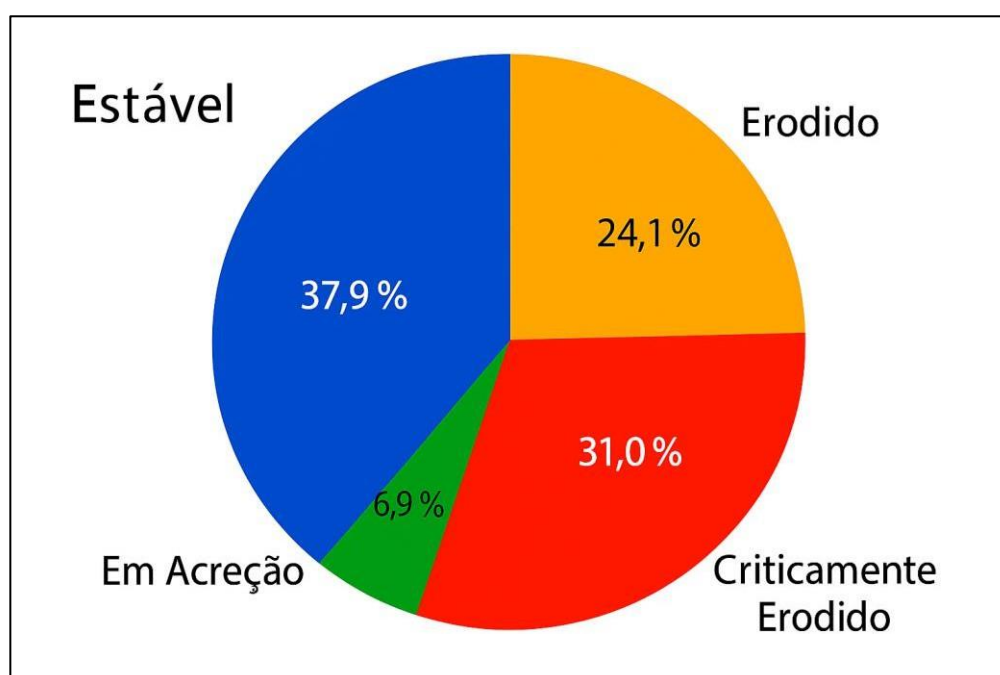
Transectos	LRR	Status de alteração da linha de costa	Parâmetro de Esteves e Finkl (1998)
1	0,4	Estável	-0,5 a 0,5 m/ano
2	0,1	Estável	-0,5 a 0,5 m/ano
3	-1,1	Criticamente Erodido	< -1 m/ano
4	-0,6	Erodido	-1 a -0,5 m/ano
5	-1,4	Criticamente Erodido	< -1 m/ano
6	-2,1	Criticamente Erodido	< -1 m/ano
7	-1,6	Criticamente Erodido	< -1 m/ano
8	-1,1	Criticamente Erodido	< -1 m/ano
G	0,9	Em Acreção	>0,5 m/ano
10	0,5	Estável	-0,5 a 0,5 m/ano
11	0,4	Estável	-0,5 a 0,5 m/ano
12	0,0	Estável	-0,5 a 0,5 m/ano
13	0,1	Estável	-0,5 a 0,5 m/ano
14	0,2	Estável	-0,5 a 0,5 m/ano
15	0,3	Estável	-0,5 a 0,5 m/ano
16	-1,4	Criticamente Erodido	< -1 m/ano
17	0,2	Estável	-0,5 a 0,5 m/ano
18	-0,1	Estável	-0,5 a 0,5 m/ano

1G	0,2	Estável	-0,5 a 0,5 m/ano
20	-0,7	Erodido	-0,5 a 0,5 m/ano
21	-0,7	Erodido	-0,5 a 0,5 m/ano
22	-0,7	Erodido	-1 a -0,5 m/ano
23	-0,9	Erodido	-1 a -0,5 m/ano
24	-1,2	Criticamente Erodido	< -1 m/ano
25	-0,7	Erodido	-1 a -0,5 m/ano
26	-1,1	Criticamente Erodido	-1 a -0,5 m/ano
27	-0,6	Erodido	-1 a -0,5 m/ano
28	-2,4	Criticamente Erodido	-1 a -0,5 m/ano
2G	1,4	Em Acreção	>0,5 m/ano

Fonte: Pereira, 2024.

O levantamento indicou que 37,9% da área encontra-se em condição estável, representando o maior percentual observado. Em seguida, 31% da área foi classificada como em processo de erosão, 24,1% como erodida e 6,9% em acreção. Desse modo, os resultados revelam uma predominância de áreas classificadas como estáveis (37,9%), o que indica que uma parcela significativa da faixa analisada apresenta baixa variação na posição da linha de costa ao longo do período estudado (Figura 16).

Figura 16- Distribuição Percentual da Variação de Linha de Costa do Município de Lucena-PB.

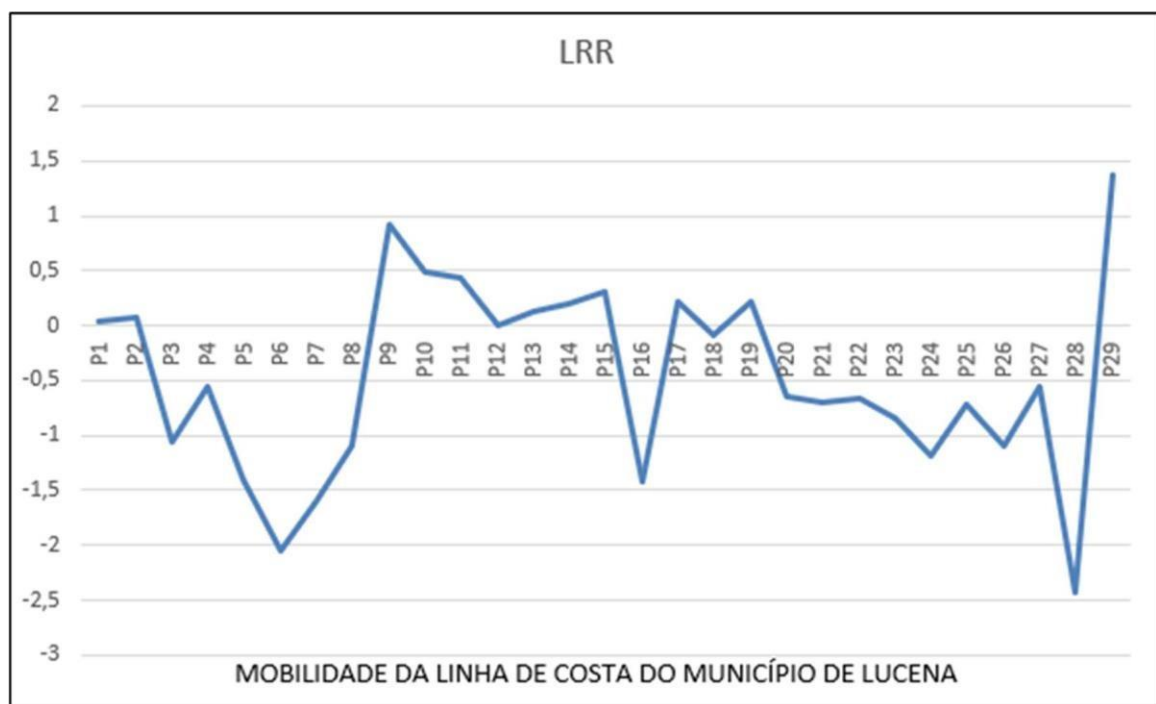


Fonte: Pereira, 2024.

No entanto, a soma das categorias criticamente erodido (31%) e erodido (24,1%) totaliza 55,1%, indicando que mais da metade da área está sujeita a processos erosivos.

Ao fazer uma análise por transectos verifica-se um padrão de atividade erosiva entre os transectos 3 e 8. Posteriormente, há uma interrupção do processo erosivo, que reaparece no ponto 16, seguido de uma nova sequência de transectos indicativos de erosão entre o 20 e 28. Conforme verificado na (figura 17).

Figura 17 - Variação da linha de costa do município de Lucena-PB, 1993 a 2023.



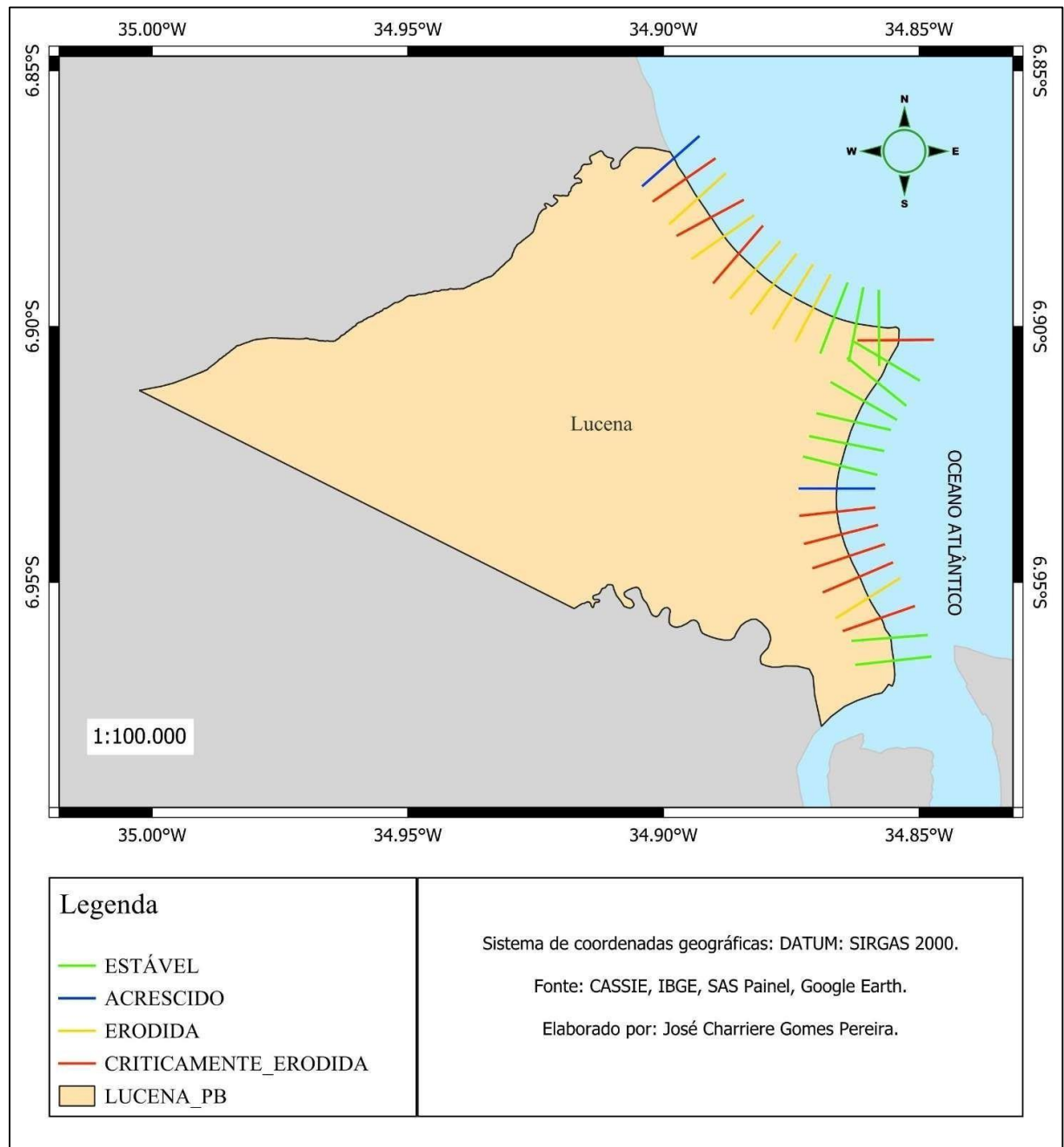
Fonte: Pereira, 2024.

No tocante a esse levantamento, é importante destacar que a dinâmica costeira é marcada pela influência de marés, correntes e processos erosivos que provocam alterações frequentes na configuração da linha de costa, o que torna desafiador capturar imagens que representem com exatidão as condições em um momento específico.

Embora as imagens Landsat sejam adequadas para análises em larga escala, sua utilização em estudos detalhados de áreas menores enfrenta limitações devido à dificuldade de capturar as variações locais com precisão. As imagens Landsat apresentam resolução espacial de aproximadamente 30 metros, o que pode comprometer a precisão na representação de características costeiras.

Para mitigar as limitações referente as variações de mares, conforme apontado nos procedimentos metodológicos, foram selecionadas imagens capturadas em dias e horários coincidentes com a maré baixa (vazante), todavia, essa seleção permite condições semelhantes de marés e não condições iguais. Os resultados obtidos nesse levantamento estão espacializados no mapa abaixo (figura 18).

Figura 18 - Transectos obtidos através do CASSIE no município de Lucena - PB.



Fonte: Pereira, 2024.

No tocante a escala temporal de análise, Cowel e Thom (1994) e Menezes (2018) destacam que a posição da linha de costa sofre constantes alterações, sendo

que estas podem ser intensas ou insignificantes, não possuindo um padrão indicado em escalas temporais. Esses autores destacam que para avaliar este indicador é necessário avaliar as alterações históricas do ambiente praial.

A análise histórica das alterações da linha de costa, conforme descrito nos procedimentos metodológicos, abrange um período de três décadas. Embora tenham sido realizados testes para ampliar esse intervalo temporal na plataforma CASSIE, constatou-se dificuldade em obter imagens que atendessem simultaneamente aos critérios de baixa cobertura de nuvens e condições de maré semelhantes.

O CASSIE, por ser uma ferramenta em desenvolvimento, apresenta algumas limitações, especialmente no filtro automático por percentual de nuvens, o que torna necessária a seleção manual das imagens. Além disso, a instabilidade do sistema aumenta proporcionalmente à ampliação do intervalo temporal e à quantidade de imagens processadas, apresentando à ocorrência de erros de processamento, durante uma tentativa de extensão dessa escala temporal.

Por sua vez, conforme apontado anteriormente, esses dados serão avaliados e discutidos setorialmente e integrados ao demais geoindicadores de erosão costeira.

5.2 Índice de Vulnerabilidade à Erosão Costeira

Como já foi especificado nos procedimentos metodológicos, o grau de vulnerabilidade é construído por meio de inúmeros descritores atrelados às condições como: I morfologia da praia, II posição da linha de costa, III campos de dunas, IV a exposição às ondas, VI distância da foz de rios, VI) a vegetação, VII estruturas costeiras, VIII a impermeabilidade do solo (tabela 3). Sendo a posição de linha de costa uma das variáveis.

Tabela 2 -- Grau de vulnerabilidade através dos Geoindicadores: I Morfologia da praia; II Posição da linha de costa; III Campos de Dunas; IV Exposição às ondas; V Distância da Foz de Rios; VI Vegetação; VII Estruturas Costeiras; VIII Impermeabilidade do Solo.

Pontos	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	Média	Grau de Vulnerabilidade
1	10	0	10	10	10	10	10	10	8,8	Alta
2	10	0	10	10	10	10	10	10	8,8	Alta
3	5	10	5	10	0	5	0	0	4,4	Moderada
4	5	5	5	10	0	5	0	0	3,8	Moderada
5	5	10	5	10	0	5	0	0	4,4	Moderada
6	5	10	5	10	0	5	0	0	4,4	Moderada
7	5	10	5	10	0	5	0	0	4,4	Moderada
8	5	10	5	10	0	5	0	0	4,4	Moderada
9	0	0	5	10	0	5	0	0	2,5	Baixa
10	0	0	5	10	0	5	0	0	2,5	Baixa
11	0	0	5	10	0	5	0	0	2,5	Baixa
12	0	0	5	10	0	5	0	0	2,5	Baixa
13	0	0	5	10	0	5	0	0	2,5	Baixa
14	0	0	5	10	0	5	0	0	2,5	Baixa
15	0	0	5	5	0	5	0	0	1,9	Baixa
16	5	10	5	5	0	5	0	0	3,8	Moderada
17	0	0	5	10	0	5	0	0	2,5	Baixa
18	0	0	5	10	0	5	0	0	2,5	Baixa
19	0	0	5	10	0	5	0	0	2,5	Baixa
20	0	5	5	10	0	5	0	0	3,1	Moderada
21	0	5	5	10	0	5	0	0	3,1	Moderada
22	0	5	5	10	0	5	0	0	3,1	Moderada
23	0	5	5	10	0	5	0	0	3,1	Moderada
24	0	10	5	10	0	5	0	0	3,8	Moderada
25	0	5	5	10	0	5	0	0	3,1	Moderada
26	0	10	5	10	0	5	0	0	3,8	Moderada
27	0	5	5	10	0	5	0	0	3,1	Moderada
28	0	10	5	10	0	5	0	0	3,8	Moderada
29	0	0	0	10	10	0	0	0	2,5	Baixa

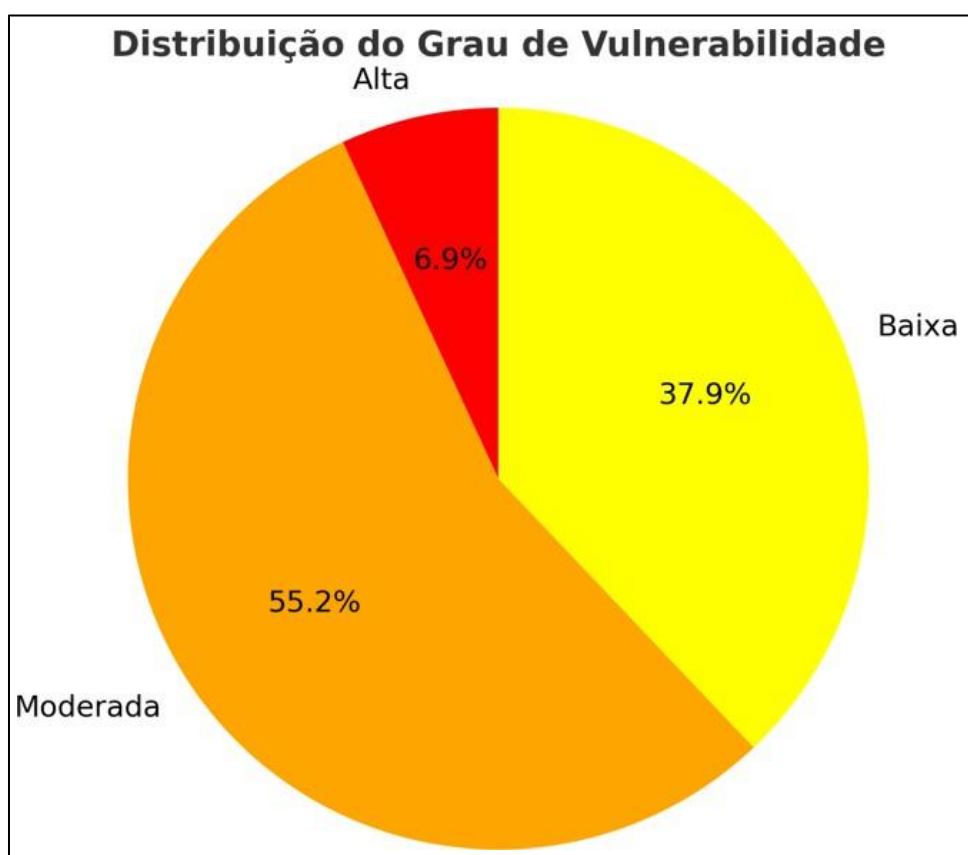
Fonte: Pereira, 2024.

Nesse contexto, e considerando todas as variáveis propostas, os dados coletados em cada ponto da zona costeira do município e foram organizados em uma planilha no ambiente Excel. Cada ponto foi caracterizado de acordo com seu grau de vulnerabilidade à erosão costeira: baixa, moderada e alta.

Nesse sentido, a análise da vulnerabilidade costeira do município de Lucena-PB foi conduzida em duas etapas complementares. Inicialmente, a variação da linha de costa foi avaliada isoladamente por meio da ferramenta CASSIE (Coastal Analysis System via Satellite Imagery Engine), permitindo a identificação de áreas com diferentes padrões de recuo e deposição sedimentar. Essa abordagem revelou que 31% da linha de costa apresenta erosão crítica, 24,1% estão em erosão, 37,9% permanecem estável e 6,9% está em acreção, conforme pudemos ver anteriormente.

No entanto, a variação da linha de costa não é o único fator determinante da vulnerabilidade costeira. Assim, essa variável também foi integrada ao conjunto de geoindicadores, compondo um índice mais abrangente para classificar os diferentes níveis de vulnerabilidade ao longo da costa. Essa abordagem revelou que 55,2% da área apresenta vulnerabilidade moderada, 37,9% baixa vulnerabilidade e 6,9% alta vulnerabilidade, indicando que nem todas as áreas erodidas são, necessariamente, as mais vulneráveis.

Figura 19 - Grau de Vulnerabilidade das Praias de Lucena-PB

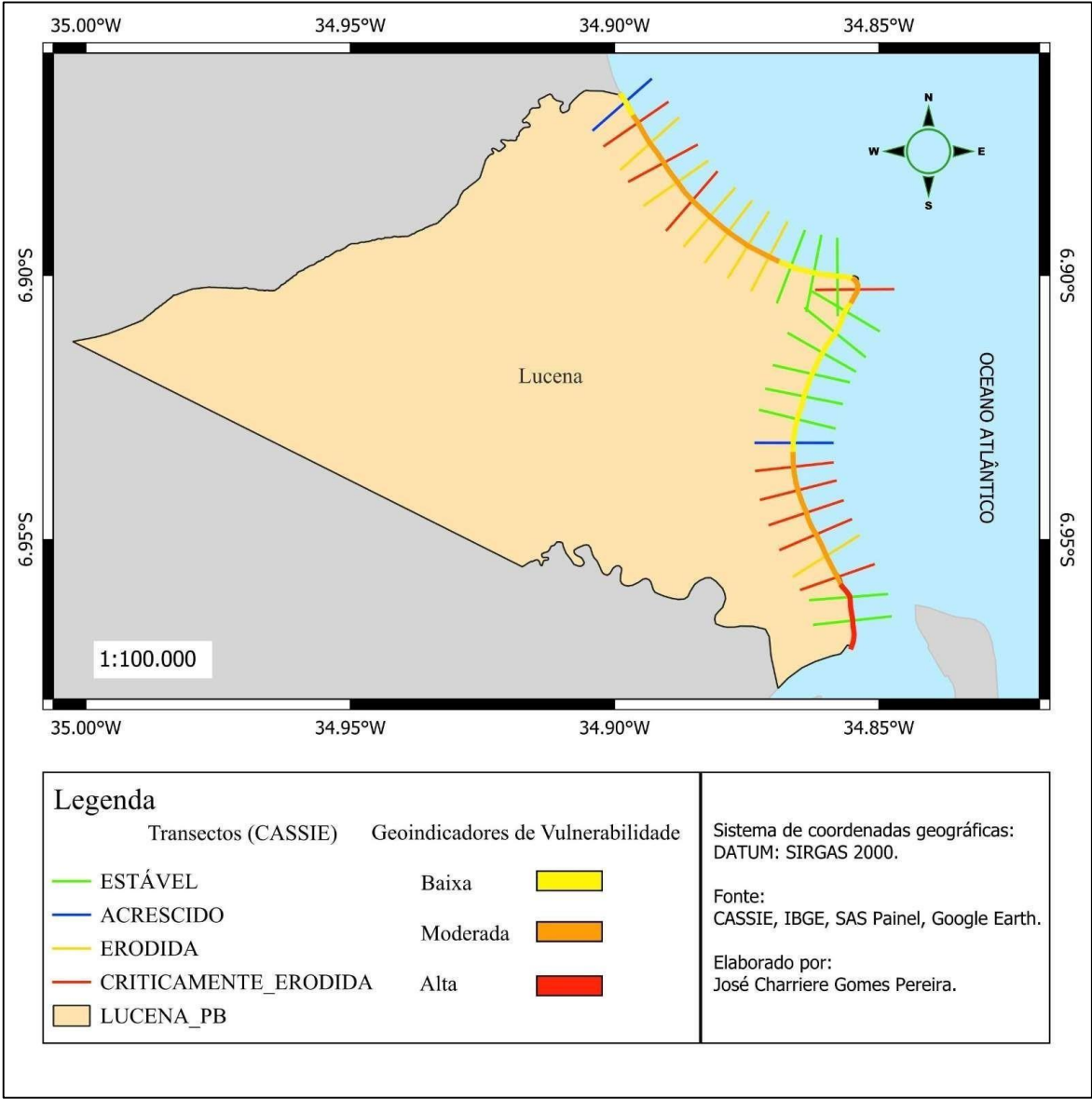


Fonte: Pereira, 2024.

A análise espacial apresentada no mapa (figura 20) reforça essa correlação, mostrando que os setores com vulnerabilidade moderada (laranja) coincidem, em sua maioria, com os trechos criticamente erodidos ou erodidos da linha de costa. Já os

setores de baixa vulnerabilidade apresentam uma distribuição mais dispersa, refletindo, em sua maioria, a estabilidade da linha de costa apontada no CASSIE.

Figura 20- Mapa de Vulnerabilidade à Erosão Costeira do Município de Lucena - PB.



Fonte: Pereira, 2024.

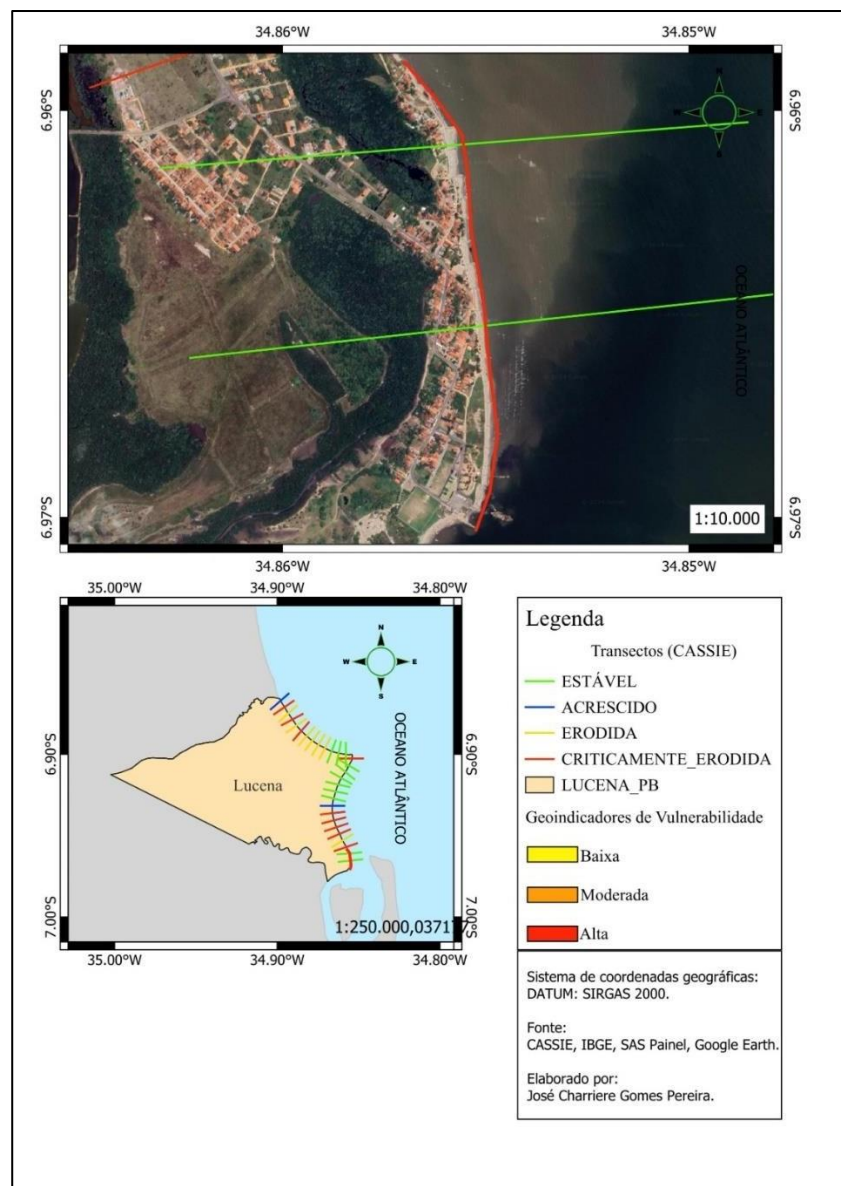
Diante do exposto, visando uma maior clareza na exposição desses resultados foi realizada uma subdivisão por setores (totalizando 4), com o objetivo de trazer um melhor detalhamento da vulnerabilidade costeira presente na extensão do município estudado. Essa setorização ocorreu de acordo com o sequenciamento de semelhança apresentada pelos transectos (analisados sequencialmente no sentido sul/norte) apontados pelo CASSIE. Desse modo, temos a seguinte divisão:

O setor I é a área correspondente aos transectos 1 e 2 (classificados como estáveis). O setor II corresponde aos transectos 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 (classificados preponderantemente como criticamente erodidos). O setor III corresponde aos transectos 10 ao 19 (apontado de forma majoritária como área estável). O setor IV é representado pelos transectos 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28 e 29 (sinalizados como predominantemente erodida).

5.2.1 Setor I:

Localizado no extremo sul do município, compreende os pontos 1 e 2 na (figura 21). O índice de vulnerabilidade nesse setor foi superior a 7, classificando-o como uma zona de alta vulnerabilidade à erosão costeira.

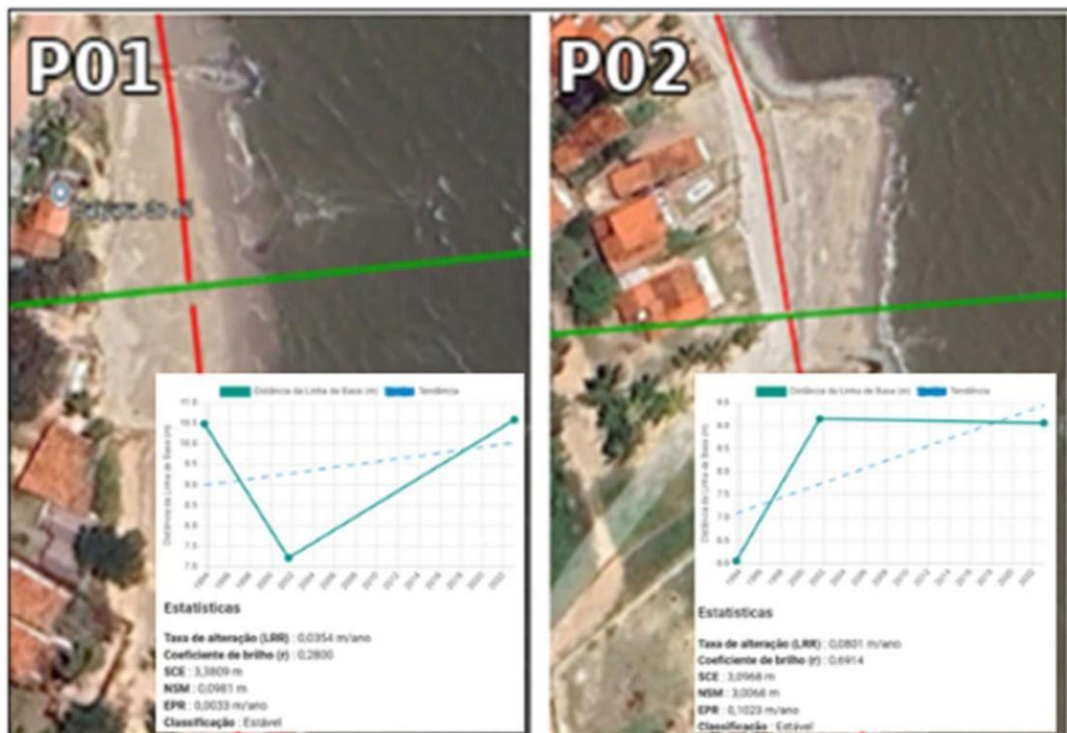
Figura 21 - Setor I: referente aos pontos 1 e 2.



Os geoindicadores que mais contribuíram para essa classificação foram: campos de dunas, proximidade da foz de rios, vegetação, estruturas costeiras e impermeabilidade do solo. Todos esses geoindicadores foram individualmente classificados como de alta vulnerabilidade. No total, dos oito geoindicadores analisados, cinco apresentaram alto grau de vulnerabilidade, um foi classificado como moderado (morfologia de praia) e dois como de baixo grau (posição da linha de costa e exposição às ondas).

Com relação ao geoindicador posição da linha de costa os transectos analisados apresentaram taxas de LRR de 0,0354 m/ano e 0,0801 m/ano, sendo ambos classificados como estáveis. No entanto, essas taxas refletem as alterações antrópicas presentes na área, como evidenciado na (figura 22), que destaca a presença de estruturas costeiras artificiais, como gabiões, construídos ao longo da linha de costa.

Figura 22 - Imagens dos Pontos 01 e 02, Setor I. Presença de alteração antrópicas como a construção de residências e gabiões ao longo da linha de costa.



Fonte: Pereira, 2024.

A presença dessas estruturas artificiais interfere diretamente no transporte de sedimentos, que, ao invés de serem redistribuídos ao longo da costa por correntes ou

ondas, acabam sendo retidos nas proximidades dessas intervenções. Embora essa retenção possa estabilizar temporariamente o trecho onde os gabiões foram construídos, ela tende a intensificar os processos erosivos nas áreas adjacentes (figuras 23).

Figura 23 - VII- Presença de Estruturas Costeira, gabiões construídos na proximidade os pontos 01 e 02.



Fonte: Pereira, 2024.

Os elevados graus de vulnerabilidade observado nos geoindicadores, como campos de dunas e impermeabilidade do solo, estão diretamente relacionados aos impactos da urbanização, a presença de construções próximas à área de preamar que interferem na dinâmica local, esse é o único setor onde foram encontradas obras rígidas de engenharia e construções residenciais e estradas próximas a linha de costa, conforme sinalizado na (figura 24).

Além disso, a expansão urbana reduz a cobertura de vegetação nativa, que atua como uma barreira natural contra os impactos costeiros. Esses impactos são agravados pela localização próxima à desembocadura do Rio Paraíba, que contribui para a complexidade das interações entre os processos fluviais e marinhos, desse modo, o geoindicador proximidade da foz de rios, também é classificado como em alto grau de vulnerabilidade.

Figura 24- Presença dos geoindicadores VII- Estruturas Costeiras e VIII - Impermeabilidade do Solo Indicadores de Erosão Costeira nas proximidades dos pontos 1 e 2.



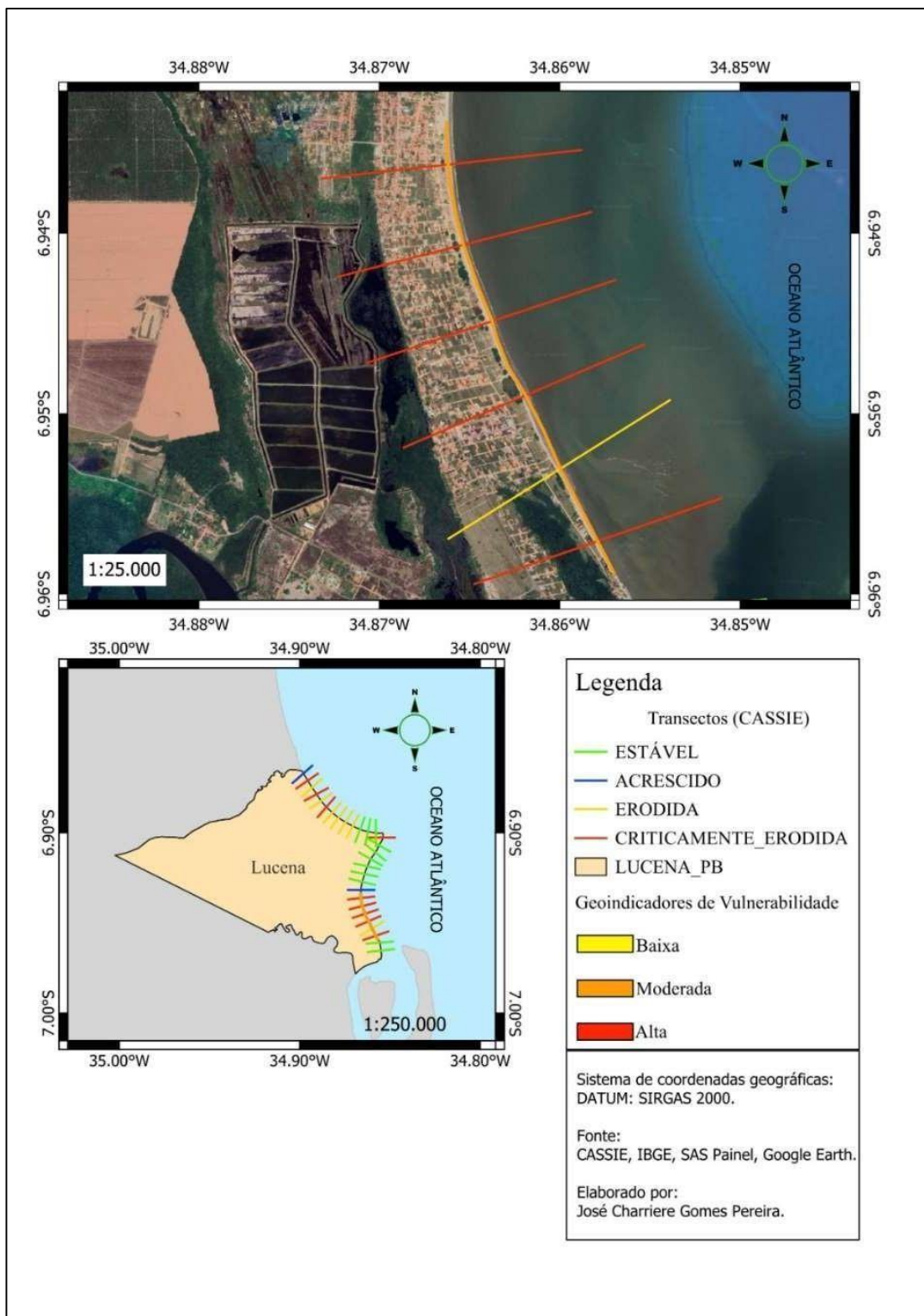
Fonte: Pereira, 2024.

Desse modo, ao analisar unicamente os resultados do CASSIE, observa-se que essa área se encontra-se em um processo de erosão apontado como estável. Todavia, com a metodologia escolhida para o presente estudo, foi possível concluir que o trecho, em sua totalidade, apresenta alta vulnerabilidade à erosão costeira.

5.2.2 Setor II:

Compreende os pontos 3, 4, 5, 6, 7 e 8 e apresenta grau moderado de vulnerabilidade, conforme demonstrado na figura.

Figura 25 - Mapa Setorial II do Município de Lucena-PB



Fonte: Pereira, 2024.

Ao analisar isoladamente cada geoindicador, verifica-se que alguns estão classificados como de baixa vulnerabilidade, entre eles: morfologia da praia, distância da foz dos rios, estruturas costeiras e impermeabilidade do solo.

No tocante a morfologia de praia, todos os pontos apresentaram uma extensão entre 33 metros e 66 metros, medida entre o ponto de menor extensão da maré baixa (linha de baixa-mar) e a de preamar. No tocante à distância da foz de rios, o setor encontra-se em distância superior a 100 metros do Rio Paraíba.

Com relação a estruturas costeiras, diferentemente do setor I, neste trecho não se verifica a presença de estruturas para conter os sedimentos, espigões, logo não há o acúmulo artificial como o observado na área anterior. Nesse sentido, também não foi identificada nenhuma construção rígida de casas ou estradas próximas a linha de costa e sim a presença de uma planície arenosa relativamente ampla nos pós praia, permitindo assim, que o geoindicador impermeabilidade do solo fosse classificado com o grau baixo de erosão.

Os geoindicadores campos de dunas e vegetação apresentaram grau moderado de vulnerabilidade (figura 26), uma vez que a vegetação é formada por gramíneas ou arbustos e as dunas apresentaram baixa altitude.

Figura 26 - Campos de Dunas com a presença de Vegetação - Praia de Fagundes.



Fonte: Pereira, 2024.

Por fim, neste setor, os geoindicadores que apresentaram maior grau de erosão foram exposição as ondas e posição da linha de costa, no tocante a posição de linha de costa, os dados obtidos por meio do Cassie, apontam que, nos transectos analisados (direção sul/norte), o mar avançou para o continente de forma intensa, a análise mostrou os seguintes resultados: transecto 01 (-1,0578 m/ano), transecto 03 (- 1,4052 m/ano), transecto 04 (-2,0494 m/ano), transecto 05 (-1,6059 m/ano) e transecto 06 (-1,0973 m/ano), todos classificados como áreas de erosão crítica. O transecto 02, por sua vez, apresentou uma taxa de alteração de 0,5560 m/ano, sendo classificada como área em processo de erosão. Diante disso, todos os transectos, com exceção do segundo foram ponderados como alto grau de vulnerabilidade.

Desse modo, ao analisar unicamente os resultados do CASSIE, observa-se que aproximadamente 2/3 da área estão submetidos a um processo erosivo de alto grau. Todavia, com a metodologia escolhida para o presente estudo, foi possível concluir que o trecho, em sua totalidade, está em vulnerabilidade moderada no momento. Uma vez que os geoindicadores: morfologia de praia, distância da foz do rio, estruturas costeiras e impermeabilidade do solo foram classificados com grau de vulnerabilidade baixa. Somado a isso, os geoindicadores campos de dunas e vegetação foram classificados com um grau moderado. Resultado, desse modo, em uma classificação erosão moderada.

5.2.3 Setor III:

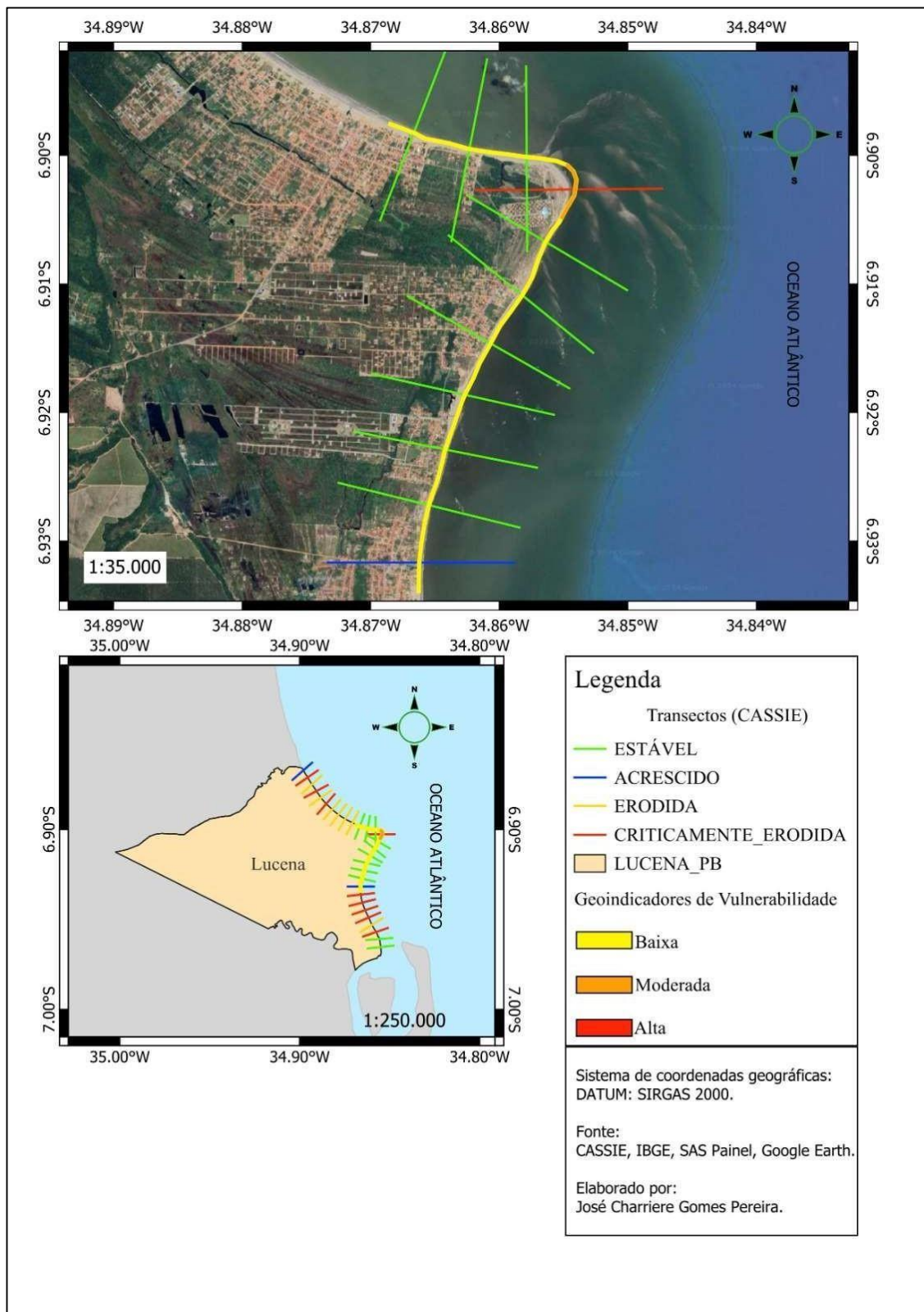
Compreendido entre os pontos 9 a 19, ele apresenta áreas predominantemente com baixa vulnerabilidade, mas verifica-se também a presença de áreas em estado de vulnerabilidade moderada (figura 27).

Nesse setor, os geoindicador que apresentou maior grau de vulnerabilidade foi exposição as ondas. Seguido de campos de dunas e vegetação, ambos classificados com grau moderado. Os demais: morfologia da praia, distância da foz de rios, estruturas costeiras, impermeabilidade do solo foram classificados com baixo grau de vulnerabilidade.

No tocante a variação de linha de costa, o ponto 9 (que corresponde ao transecto 1 direção (sul/norte) no mapa setorial, encontram-se em acreção com uma taxa de alteração (LRR) de 0,9144 m/ano. Já os pontos 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18

e 19 encontram-se em estabilidade. Outro ponto que diverge é o 16 (que corresponde ao transecto 8), o qual o Cassie classifica como criticamente erodido.

Figura 27 - Mapa Setorial III do Município de Lucena-PB.



Fonte: Pereira, 2024.

Com relação aos pontos 15,16,17 e 18 que corresponde a praia de ponta de Lucena, Neves (2003) destaca nesse setor há uma inversão no sentido da deriva litorânea e concentração das ondas de E e SE e presença de recifes, servindo de anteparo, faz crescer bancos arenosos (figura 28). Desse modo, é possível que a variação da linha de costa aponta no ponto 16 (que corresponde ao transecto 8 no mapa setorial – direção sul/norte), seja decorrente das oscilações de posicionamento desses bancos de areia.

Figura 28 - Bancos de areia - Praia de Ponta de Lucena-PB

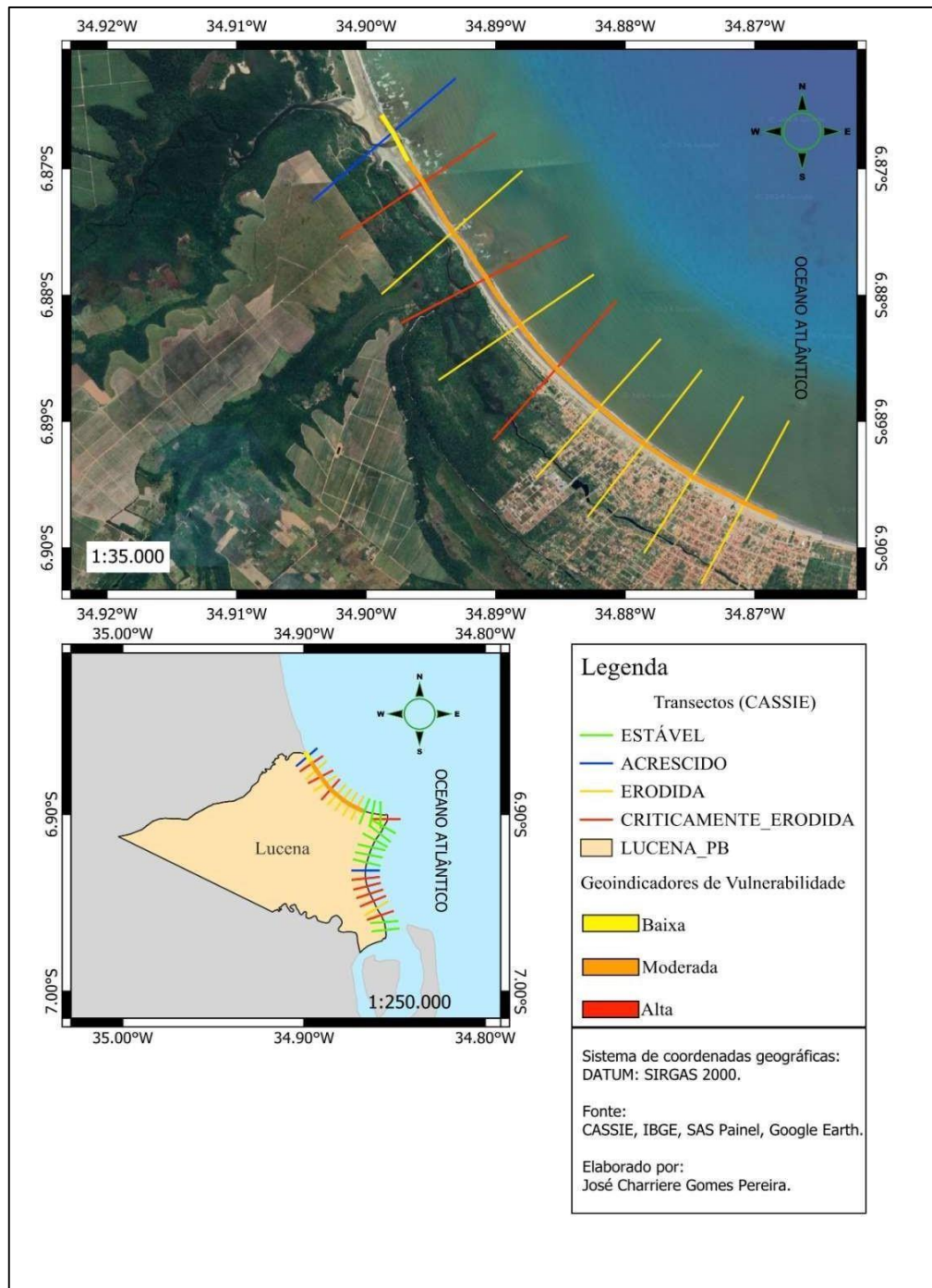


Fonte: Pereira, 2024.

5.2.4 Setor IV:

Entre os pontos 20 a 29 apresentam-se áreas predominantemente com vulnerabilidade moderada, mas verifica-se também a presença de áreas em estado de vulnerabilidade baixa referente o ponto 29 (transecto 10 – direção sul/noite), conforme verificado na (figura 29).

Figura 29 - Mapa Setorial IV do Município de Lucena-PB.



Fonte: Pereira, 2024.

Nesse setor, os geoindicadores que apresentaram maior grau de vulnerabilidade foram exposição a ondas e variação da linha de costa.

No tocante a variação da linha de costa 7/10 dos transectos apontaram erosão, 3/10 erosão crítica e 1/10 acresção. Os dados obtidos por meio do Cassie, demonstram que, nos transectos analisados (direção sul/norte), o mar avançou para o continente de forma acentuada nos pontos 24, 26 e 28. Apresentando, respectivamente, as seguintes variações: LRR -1,2, -1,1 e -2,4.

Esse trecho está localizado em uma área de enseada sem a presença de barreiras naturais ou artificiais que arrefeçam o impacto direto das ondas, desse modo, o geoindicador exposição a ondas foi classificado como de alta vulnerabilidade em todos os pontos observados.

Com relação ao geoindicadores: vegetação e campos de dunas, em todos os pontos analisados foram classificados com grau de vulnerabilidade moderado. Essa classificação deve-se ao fato de que a vegetação predominante na área ser composta, principalmente, por gramíneas situadas em dunas de baixa altitude (figura 30).

Figura 30 - Imagens referente os pontos 24; 26 e 28: Presença de Campos de Dunas e Vegetação Rasteira.



Fonte: Pereira, 2024.

Com relação aos demais geoindicadores: impermeabilidade do solo, morfologia costeira e estruturas costeiras, em todos os pontos analisados, eles receberam baixa classificação de vulnerabilidade.

Nesse sentido, observa-se que, apesar da variação da linha de costa em direção ao continente determinada pelo CASSIE na maioria dos pontos analisados, a integração dos diferentes geoindicadores propostos nessa pesquisa evidencia que a área possui uma resiliência morfológica capaz de atenuar as mudanças ocorridas ao longo do intervalo temporal de 30 anos observados por meio da variação de linha de costa.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo principal caracterizar o grau de vulnerabilidade da linha de costa do município de Lucena, na Paraíba. Para isso, foi aplicada uma metodologia adaptada de Menezes et al. (2018), Bush et al. (1999), Souza et al. (2010) e Souza e Suguio (2003), cujas contribuições metodológicas foram fundamentais para a estruturação do presente trabalho.

O estudo de Souza e Suguio (2003), identificado por meio de levantamento bibliométrico na base *Web of Science*, refere-se ao zoneamento de risco à erosão costeira no estado de São Paulo, tendo como base conceitual o entendimento de vulnerabilidade do IPCC, integrando os conceitos de resistência e resiliência. Os autores consideraram dez indicadores diretos de marcas erosivas em praias, como a destruição de mangues e da vegetação de restinga, além da exposição de matéria orgânica de origem lagunar ou depósitos de mangue na superfície da face da praia. Foi incorporado ainda um indicador de evolução da linha de costa nas últimas quatro décadas, avaliado a partir de evidências de decréscimo da largura das praias. A classificação do risco foi baseada na quantidade de indicadores presentes e na sua distribuição espacial (número de indicadores por área).

Tais fundamentos dialogam diretamente com os objetivos deste estudo, que se estruturou na análise de geoindicadores obtidos tanto em campo quanto em gabinete, com o intuito de identificar padrões de vulnerabilidade ao longo do litoral de Lucena.

A metodologia selecionada demonstrou ser eficiente e adaptável à realidade local, possibilitando a identificação e classificação da vulnerabilidade ao longo de aproximadamente 15 km de litoral em quatro setores distintos. Os resultados revelaram que 6,9% da área apresenta vulnerabilidade alta, 55,2% vulnerabilidade moderada e 37,9% vulnerabilidade baixa. Essa classificação foi possível a partir da análise integrada de oito geoindicadores: morfologia da praia, posição da linha de costa, campos de dunas, exposição às ondas, distância da foz dos rios, vegetação, estruturas costeiras e impermeabilidade do solo.

No que se refere à evolução da linha de costa, utilizou-se a ferramenta CASSIE, que avaliou as mudanças ocorridas entre os anos de 1993 e 2023. Os transectos foram classificados em quatro categorias: acrescida, estável, erodida e criticamente erodida. Para cada um dos 29 pontos amostrados, com espaçamento de 500 metros, foi atribuída uma pontuação média com base nos geoindicadores, classificando-os em três níveis de vulnerabilidade: baixa (média < 3), moderada (3 a 6,9) e alta (> 7).

A análise setorial demonstrou diferenças importantes entre os trechos do litoral

de Lucena. O Setor I, situado na praia de Costinha, destaca-se pela maior vulnerabilidade, resultado da intensa urbanização associada à ausência de campos de dunas e à elevada impermeabilização do solo. O Setor II, embora apresente erosão significativa segundo o CASSIE, foi classificado como de vulnerabilidade moderada pela metodologia adotada, indicando certa resiliência ambiental. Este trecho localiza-se a jusante de obras de engenharia costeira, como gabiões e estruturas portuárias, que possivelmente afetam o transporte sedimentar.

O Setor III apresentou predominância de baixa vulnerabilidade, destacando-se por sua vegetação natural, presença de extensos campos de dunas e reduzida ocupação urbana. A exceção observada no ponto 16 pode estar associada a variações sazonais dos bancos arenosos. Já o Setor IV revelou uma tendência geral de vulnerabilidade moderada à erosão, com predominância de erosão e erosão crítica na maior parte dos transectos. Esse setor inclui as praias de Lucena, Camaçari e Bom Sucesso, cuja ampla faixa de areia e presença de vegetação favorecem a mitigação dos impactos do avanço do mar, apesar da baixa declividade contribuir para a variação da linha de costa.

A partir dessa análise integrada, foi possível identificar áreas prioritárias para ações de conservação e gestão ambiental. Destaca-se, assim, a importância de políticas públicas baseadas em evidências científicas para o manejo adequado da zona costeira.

Apesar da relevância dos resultados obtidos, o presente estudo apresenta limitações. Não foram considerados geoindicadores relacionados a processos hidrodinâmicos, como a energia das ondas, granulometria e perfis de praia, os quais poderiam aprimorar a análise da declividade e da dinâmica costeira. Além disso, a obtenção de imagens de satélite em diferentes condições de maré representa um desafio adicional para estudos futuros.

Recomenda-se, portanto, que pesquisas posteriores incluam esses parâmetros, bem como adotem critérios rigorosos na seleção dos geoindicadores utilizados na composição dos índices de vulnerabilidade. Ressalta-se, ainda, que os indicadores aqui empregados são acessíveis e de baixo custo, o que favorece sua aplicação em outras áreas com características semelhantes.

Em síntese, este trabalho contribui com subsídios relevantes para a gestão costeira municipal e estadual, auxiliando na tomada de decisões quanto à mitigação de impactos erosivos. Mesmo em áreas classificadas como de baixa ou moderada vulnerabilidade, fatores como mudanças climáticas, urbanização desordenada e

eventos extremos podem agravar os processos de erosão, demandando atenção contínua e estratégias preventivas eficazes.

REFERÊNCIA

- ALMEIDA, Luis Pedro et al. Coastal analyst system from space imagery engine (CASSIE): shoreline management module. **Environmental Modelling & Software**, v. 140, p. 105033, 2021.
- ALVAREZ-CUESTA, M.; LOSADA, IJ Modelagem da evolução da linha costeira de longo prazo em áreas costeiras altamente antropizadas. Parte 2: Avaliação da resposta às mudanças climáticas. **Coastal Engineering**, v. 168, p. 103961, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.103961>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383921001162>. Acesso em: 28 jan. 2025.
- ARAÚJO, Diandra Soares de. **Vulnerabilidade à erosão costeira no município de Baía da Traição – Paraíba, Brasil**. 2023. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023.
- BERGER, A. Assessing rapid environmental change using geoindicators. **Environmental Geology**, v. 32, p. 36-44, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1007/s002540050191>.
- BIRD, Eric C. F. **Coastal geomorphology: an introduction**. London: John Wiley & Sons, 1970.
- BOAK, E. H.; TURNER, I. L. Shoreline definition and detection: a review. **Journal of Coastal Research**, v. 21, n. 4, p. 688-703, 2005.
- Boak, E.H. & Turner, I.L. Shoreline definition and detection: a review. **Journal of Coastal Research**, v. 21, n. 4, 2005.
- BOAK, Elizabeth H.; TURNER, Ian L. **Shoreline definition and detection: a review. Journal of coastal research**, v. 21, n. 4, p. 688-703, 2005.
- BRASIL. **Constituição (1988)**. Constituição da República Federativa do Brasil.
- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Censo Demográfico 2010: Características gerais da população, religião e pessoas com deficiência**. Rio de Janeiro: IBGE, 2011.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Programa Nacional para Conservação da Linha de Costa – PROCOSTA** [recurso eletrônico]. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos e Qualidade Ambiental, Departamento de Gestão Ambiental Territorial, 2018. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/publicacoes/gestaoterritorial/>. Acesso em: 10 jan. 2025.
- BUSH, D. M.; NEAL, W.; YOUNG, R; PILKEY, O. Utilization of Geoindicators for Rapid Assessment of Coastal-Hazard Risk and Mitigation. **Ocean and Coastal Management**, Delaware, v. 42. Ed. Elsevier, p. 647-670, 1999.
- CÂMARA, Gilberto; DAVIS, Clodoveu; MONTEIRO, Antônio Miguel Vieira. **Introdução Ciência da Geoinformação**. 2001. Disponível

<http://http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>. Acesso em: 10 maio 2021.

COELHO, C. de; NASCIMENTO, A. P. do; SILVA, A. J. Dinâmica costeira e suas implicações na gestão das zonas costeiras. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 7, n. 2, p.45-56, 2006

CORREA, Iran Carlos Stalliviere. **Metodologia para análise morfoestrutural de áreas continentais e marinhas**. 2022. Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.io.usp.br/index.php/infraestrutura/museu-oceanografico/50-portugues/publicacoes/series-divulgacao/gestao-costeira/823-erosao-costeira.htm>. Acesso em: 11 dez. 2024.

CUTTER, S. L.; BORUFF, B. J.; SHIRLEY, W. L. **Social vulnerability to environmental hazards**. **Social Science Quarterly**, v. 84, n. 2, p. 242-261, 2003.
CUTTER, S.L. **A ciência da vulnerabilidade: modelos, métodos e indicadores**. Revista Crítica de Ciências Sociais [Online]. 2011. DOI: 10.4000/rccs.165.

DE GOUVEIA SOUZA, Celia Regina; SUGUIO, Kenitiro. The coastal erosion risk zoning and the São Paulo State Plan for Coastal Management. **Journal of Coastal Research**, p. 530-547, 2003.

DILLENBURG, S. R.; PATCHINEELAM, S. M.; ADDAD, J. E. **Praias arenosas e erosão costeira**. In: SOUZA, C. R. de G.; SUGUIO, K.; SANTOS, A. M.; OLIVEIRA, P. E. (Org.). Quaternário do Brasil. Ribeirão Preto: Holos Editora, 2005. p. 130-152. ISBN 10:8586699470.

DINIZ, R. F., 2002. **Erosão Costeira ao longo do Litoral Oriental do Rio Grande do Norte: causas, conseqüências e influência nos processos costeiros de uso e ocupação na região costeira**. Tese de Doutorado. Pós-Graduação em Geologia. Universidade Federal da Bahia.

DOLAN, R.; HAYDEN, B. P.; MAY, P.; MAY, S. The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs. **Shore & Beach**, v. 48, p. 22-29, 1980.
DOMINGUEZ, J. M. L.; GUIMARÃES, J. K.; BITTENCOURT, A. C. S. P. Alagoas, Sergipe e Bahia. In: MUEHE, D. (Coord.). **Panorama da erosão costeira no Brasil**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2018. p. 341-432.

FRANCO, Brunno Jansen. **Análise do Índice de Vulnerabilidade Costeira no setor Oeste da Região Metropolitana de Fortaleza**. 2021. 41 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Instituto de Ciências do Mar - LABOMAR, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

FRENCH, P.W., 1997. **Coastal and Estuarine Management**. Routledge. London and New York. 251p.

HZAMI, A. et al. Coastal vulnerability assessment using a multi-criteria approach: Case of the Moroccan Mediterranean coastline. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 40332-40347, 2021.

IBGE. **Perfil dos municípios brasileiros: dados de 2022**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 11 ago. 2024..

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em**

recursos terrestres. Trad. de EPIPHANIO, J. C. N. (Coord.) et al. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598 p.

KUHLICKE, Christian et al. **Perspectives on social capacity building for natural hazards: outlining an emerging field of research and practice in Europe.** *Environmental Science & Policy*, v. 14, n. 7, p. 804-814, 2011.

LILLESAND, Thomas; KIEFER, Ralph W.; CHIPMAN, Jonathan. **Remote sensing and image interpretation.** John Wiley & Sons, 2015

LIMA, E. Q. de; AMARAL, R. F. do. Use of ge indicators in vulnerability mapping for the coastal erosion of a sandy beach. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, Lisboa , v. 15, n. 4, p. 545-557, dez. 2015 . Disponível em. Acesso em 10 de novembro de 2024. <https://doi.org/10.5894/rgci502>.

LINS-DE-BARROS, Flavia Moraes. **Contribuição metodológica para análise local da vulnerabilidade costeira e riscos associados: estudo de caso da Região dos Lagos, Rio de Janeiro.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

LINS-DE-BARROS, Flavia Moraes. **Risco, vulnerabilidade física à erosão costeira e impactos socioeconômicos na orla urbanizada do município de Maricá, Rio de Janeiro.** *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 6, n. 2, 2005.

LUIJENDIJK, A.; HAGOORT, J.; HILL, K.; NEUMEIER, U.; MASTERS, D.; HUTCHISON, N.; DE RUITER, M.; SIMONS, W.; LENGKEEK, J. **The state of the world's beaches.** *Nature Scientific Data*, v. 5, n. 180200, p. 1-15, 2018.

MAIA, Luís P. et al. **The Fortaleza (NE Brazil) waterfront: port versus coastal management.** *Journal of Coastal Research*, p. 1284-1292, 1998.

MARTINS, L. R.; TABAJARA, L. L.; FERREIRA, E. R. Linha de costa: problemas e estudos. Porto Alegre: **Revista Gravel**, n. 2, 2004. p. 40-56.

MCLAUGHLIN, S.; COOPER, J. A. G. A multi-scale coastal vulnerability index: A tool for coastal managers? **Environmental Hazards**, v. 9, n. 3, p. 233-248, 2010.

MOURA, C. M. S.; PEREIRA, J. C. G. Riscos Associados a Erosão Costeira no Estado da Paraíba. In: MOURA, M. O. et al. **Climatologia Geográfica: do local ao regional e dimensões socioambientais.** João Pessoa: Editora UFPB, 2020. p. 351 - 370.

MUEHE, D. **Definição de limites e tipologias da orla sob aspectos morfodinâmicos e evolutivo.** In: Subsídios para um Projeto de Gestão. Projeto Orla – Ministério do Meio Ambiente, Ministério de Planejamento, Orçamento e Gestão. Brasília, Ed. Distrital Gráfica, 2003, p. 13-32.

NEIMANIS, V.; KERR, A. Developing national environmental indicators. In: BERGER, A. R.; IAMS W. J. **Geoindicators: Assessing rapid environmental changes in earth systems.** Balkema, Rotterdam, 1996. Cap 22, p. 369-376.

NEVES, S. M. **Erosão costeira no estudo da Paraíba.** 2003. Tese (Doutorado) -

Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2003.

NGUYEN, Thang TX et al. **Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts: A review of concepts, methodological approaches and vulnerability indices**. *Ocean & Coastal Management*, v. 123, p. 18-43, 2016.

NOVAES, G. de O. .; LOBO, F. C.; RANIERI, L. A. Geoindicadores de vulnerabilidade à erosão e risco costeiro em praias estuarinas da costa amazônica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 25, n. 2, 2024. DOI: 10.20502/rbgeomorfologia.v25i2.2461. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/2461>. Acesso em: 10 fev. 2025.

OLIVEIRA, F. F.; SANTOS, R. E. S.; ARAÚJO, R. C. **Processos erosivos: dinâmica, agentes causadores e fatores condicionantes**. [online], 2017. Disponível em: <https://periodicos.itp.ifsp.edu.br/index.php/ic/article/download/699/928>. Acesso em: 23 maio 2024.

PEREIRA, Luciano; CUNHA, Lúcio. **Patrimônio geomorfológico de João Pessoa, Paraíba: uma visão preliminar**. *Congresso Nacional de Geomorfologia*, v. 7, p. 325-331, 2015.

PERINOTTO, R. et al. Avaliação do estado erosional das praias de Santa Catarina com base na análise de geoindicadores. **Congresso Brasileiro sobre Desastres Naturais**, Rio Claro, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/289527826_Avaliacao_do_estado_erosional_das_praias_de_Santa_Catarina_com_base_na_analise_de_geoindicadores. Acesso em: 06 out. 2024.

REIS, Christianne Maria Moura. **O litoral de João Pessoa (PB), frente ao problema da erosão costeira**. 2008. 131 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

RIBEIRO, J. S., SOUSA, P. H. G. O., VIEIRA, D. R., SIEGLE, E. Evolução da vulnerabilidade à erosão costeira na Praia de Massaguaçu (SP), Brasil. **Revista Da Gestão Costeira Integrada**, São Paulo, v. 13 n. 3 p. 253-265, 2013.

ROSSETTI, D. F.; BEZERRA, F. H.; DOMINGUEZ, J. M. L. **Late Oligocene-Miocene transgressions along the equatorial and eastern margins of Brazil**. *Earth-Science Reviews*, v. 123, p. 87-112, 2013.

RUDORFF, F. DE M. **Geoindicadores e análise espacial na avaliação de suscetibilidade costeira a perigos associados a eventos oceanográficos e meteorológicos extremos**. Dissertação (Desenvolvimento Regional e Urbano). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis -SC. 2005

SABINS, Floyd F. Jr. *Remote sensing: principles and interpretation*. 3rd ed. New York: **W. H. Freeman and Company**, 1997.

SOUZA, C. R. de G.; SOUZA FILHO, P. W. M.; ESTEVES, S. L.; VITAL, H.; SOUZA, Maria Cecilia Silva. Análise das mudanças na linha costeira e do turismo náutico em um Recife costeiro urbano no Nordeste do Brasil. Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba, 2023.

SOUZA, Maria Cecilia Silva. **Análise das mudanças na linha costeira e do turismo náutico em um Recife costeiro urbano no Nordeste do Brasil**. Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba, 2023

THURMAN, H. V. **Essentials of Oceanography**. 7. ed. New York: Macmillan, 1994.
ZAIDAN, R. T. **GEOPROCESSAMENTO CONCEITOS E DEFINIÇÕES**. Revista de Geografia - PPGeo - UFJF, v. 7, n. 2, 28 set. 2017. <https://doi.org/10.1111/13652435.13331>