



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E
TECNOLOGIA DA GEOINFORMAÇÃO

FERNANDO AMORIM ALBUQUERQUE

**SENSORIAMENTO REMOTO UTILIZADO PARA DETECTAR OS IMPACTOS DA
VARIAÇÃO DA LINHA DE COSTA E A SUA RELAÇÃO COM O ESTOQUE DE
CARBONO EM MANGUEZAIS TROPICAIS DE MACROMARÉ**

Recife
2023

FERNANDO AMORIM ALBUQUERQUE

**SENSORIAMENTO REMOTO UTILIZADO PARA DETECTAR OS IMPACTOS DA
VARIAÇÃO DA LINHA DE COSTA E A SUA RELAÇÃO COM O ESTOQUE DE
CARBONO EM MANGUEZAIS TROPICAIS DE MACROMARÉ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação.

Área de concentração: Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Gomes de Oliveira Sousa.

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Cotovicz Junior

Recife

2023

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Albuquerque, Fernando Amorim.

Sensoriamento remoto utilizado para detectar os impactos da variação da linha de costa e a sua relação com o estoque de carbono em manguezais tropicais de marcomaré / Fernando Amorim Albuquerque. - Recife, 2023.

50f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2023.

Orientação: Paulo Henrique Gomes de Oliveira Sousa.

Coorientação: Luiz Carlos Cotovicz Junior.

1. Manguezal; 2. Erosão Costeira; 3. Estoque de Carbono; 4. Sensoriamento Remoto; 5. Taxa de variação de linha de costa. I. Sousa, Dr. Paulo Henrique Gomes de Oliveira. II. Junior, Dr. Luiz Carlos Cotovicz. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

CDD 526.1

FERNANDO AMORIM ALBUQUERQUE

**“SENSORIAMENTO REMOTO UTILIZADO PARA DETECTAR OS IMPACTOS DA
VARIAÇÃO DA LINHA DE COSTA E A SUA RELAÇÃO COM O ESTOQUE DE
CARBONO EM MANGUEZAIS TROPICAIS DE MACROMARÉ”.**

Dissertação apresentada à Universidade
Federal de Pernambuco como parte dos
requisitos para obtenção do título de mestre em
Ciências Geodésicas e Tecnologias da
Geoinformação.

Aprovada em: 13/12/2023

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente
PAULO HENRIQUE GOMES DE OLIVEIRA SOUSA
Data: 28/06/2024 12:02:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Paulo Henrique Gomes de Oliveira Sousa (Orientador)
Universidade Federal do Ceará



Documento assinado digitalmente
RODRIGO MIKOSZ GONCALVES
Data: 05/07/2024 17:53:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rodrigo Mikosz Gonçalves (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco



Documento assinado digitalmente
NILS EDVIN ASP NETO
Data: 04/07/2024 21:53:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Nils Edvin Asp Neto (Examinador Externo)
Universidade Federal do Pará

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação de mestrado não poderia chegar a bom porto sem o precioso apoio de várias pessoas.

A Deus, em primeiro lugar, pois sem Ele esta jornada não seria cumprida. Aos meus orientadores, Professor Doutor Paulo Henrique Gomes de Oliveira Sousa e Luiz Doutor Carlos Cotovicz Junior, por toda a paciência, empenho e sentido prático com que sempre me orientaram neste trabalho do mestrado. Muito obrigada por me ter corrigido quando necessário sem nunca me desmotivar.

Desejo igualmente agradecer a todos os meus colegas e amigos, especialmente a Jessica da Silva Nascimento Guimarães, Rafaela Araújo, Hianka Rosa, Valeska Rodrigues, Samuel Vitor, Karina de Magalhães, Janaina Rocha e Flavio Felix, cujo apoio e amizade estiveram presentes em todos os momentos.

Por último, quero agradecer à minha família pelo apoio incondicional que me deram, especialmente aos meus pais e meus irmãos Tiago Amorim e Fernanda Regina pelas revisões incansáveis ao longo da elaboração deste trabalho.

RESUMO

A zona costeira está sob constante ação dos processos costeiros, o que lhe garante uma alta complexidade nos fluxos hidrodinâmicos que, por consequência, modificam as morfologias das regiões litorâneas. Este trabalho tem por objetivo analisar os estudos relacionados à análise do comportamento da erosão costeira em ambientes de macromaré, além de buscar entender como esses eventos influenciam no processo de degradação de ecossistemas de manguezais e, particularmente no estoque de carbono. Por apresentar, ao longo dos anos, intensos processos erosivos em sua costa e, também, por possuir grandes ecossistemas de manguezais, foi definida a península de Ajuruteua, localizada no município de Bragança, PA, Brasil, como área de estudo desta dissertação. Para a coleta de dados, foram utilizadas as imagens multiespectrais temporais da série *Landsat 5 -TM* e *Landsat 8 – OLI*, dos anos de 2005, 2015 e 2022, e a ferramenta CASSIE - Coastal Analyst System from Space Imagery Engine, utilizada para o cálculo de variação da linha de costa e com auxílio do Sistema de Informações Geográficas QGIS® para criação dos mapas de uso e ocupação. O método deste trabalho consiste na análise das variações das linha de costa, destacando-se, durante a observação desses elementos, os ativos processos de erosão e progradação de toda a área de Ajuruteua, evidenciando, principalmente, os trechos de maior exposição aos processos costeiros (ondas, correntes, marés e ventos), como, por exemplo, as zonas próximas à canais de maré, estuários, áreas de ocupação urbana com grande intensidade erosiva, destacando-se as regiões próximas das praias de Ajuruteua e da praia do Pilão, as quais apresentam uma taxa de variação média da linha de costa de -4,7 m/ano e um recuo médio de 81,8 m, entre o período analisado (2005-2022). Em Ajuruteua, é possível perceber que a progradação ocorre entres áreas mais internas (Baía do Caeté e a Baía do Taperaçu) e menos expostas às ações de ondas e marés; outro fator importante é a presença das barreiras naturais presentes nesses trechos, fazendo com que aconteça uma redução da perda de sedimentos e, conseqüentemente, ocorra a diminuição da retração da maré, tendo uma variação média da linha de costa de 7,6 m/ano e um avanço de médio de 154,7 m. A península apresentou ao longo dos 17 anos uma perda de manguezal de 105,84 hectares, ocasionando um perda potencial de estoque total de carbono de aproximadamente 54.082 Mg C, grande parte das áreas presentes

nas proximidades a praia de pilão e praia de Ajuruteua. Tais resultados evidenciam que o avanço da erosão costeira pode ocasionar perdas significativas dos estoques de carbono dos ecossistemas de manguezais, com emissões potenciais significativos de CO₂ para a atmosfera.

Palavras-chave: Manguezal; Erosão Costeira; Estoque de Carbono; Sensoriamento Remoto. Taxa de variação de linha de costa.

ABSTRACT

The coastal zone is under constant action of coastal processes, which ensure high complexity in hydrodynamic flows which, consequently, modify the morphologies of coastal regions. This objective of this dissertation is to analyze the studies related to coastal erosion behavior in environments of macrotides. Additionally, understanding how these events influence the process of degradation of mangrove ecosystems and, particularly in the stock of carbon. Ajuruteua peninsula, located in the municipality of Bragança, PA, Brazil, was chosen due to its long-term coastal erosion and large mangrove ecosystems. The methods consist of remote sensing evaluation. For data collection, images were used temporal multispectral images from the Landsat 5 -TM and Landsat 8 – OLI series, from the years 2005, 2015 and 2022; and the CASSIE tool - Coastal Analyst System from Space Imagery Engine, used to calculate the variation of the coastline and with assistance of the QGIS® Geographic Information System to create use maps and evaluate the occupation. These tools were used to analyze variations in the coastline, highlighting, during the observation of these elements, the active processes of erosion and progradation of the entire Ajuruteua area, mainly showing stretches most exposed to coastal processes (waves, currents, tides and winds), such as, areas close to tidal channels, estuaries, areas of urban occupation with great erosive intensity, highlighting the regions close to the beaches of Ajuruteua and Pilão beach, which have a average variation of the coastline of 4.7 m/year^{-1} and an average retreat of 81.8 m, between the period analyzed (2005-2022). In Ajuruteua, it is possible to see that the progradation occurs between internal areas (Baia do Caeté and Baia do Taperaçu) and less exposed to wave and tidal actions. Another important factor is the presence of the natural barriers present in these stretches, causing a reduction in sediment loss and, consequently, a reduction in tide retraction, with an average shoreline variation of 7.6 m/year and an average advance of 154.7 m. Over the past 17 years, the peninsula has presented a loss of mangroves of 105.84 hectares, causing a potential loss of stock total carbon of approximately 54,082 Mg C, much of the areas present Nearby are Pilão beach and Ajuruteua beach. Such results show that the advance of coastal erosion can cause significant losses of stocks of

carbon from mangrove ecosystems, with significant potential emissions of CO₂ into the atmosphere.

Keywords: Mangrove; Coastal Erosion; Carbon Stock; Remote sensing; Rate of change of the coastline.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área de estudo, (a) indica o estado do Pará, localizado na região norte do Brasil; (b) Identificação do Município de Bragança no estado do Pará; (c) recorte da área de estudo	15
Figura 2 - Comportamento dos ventos e correntes na península de Ajuruteua	17
Figura 3 - Danos ocasionados pela maré alta em 2015 (I, II) e em 2017 (III, IV) na praia de Ajuruteua, acervo da COMPDEC e Meiguins	18
Figura 4 - Localização de trechos de ecossistemas na península de Ajuruteua. Região de manguezal (I), Praia do Pilão (II) e Praia de Ajuruteua (III e IV).....	19
Figura 5 - Fluxograma	22
Figura 6 - Fluxograma das operações no processamento no CASSIE	23
Figura 7 - Trechos Litorâneos da área de estudo.....	31
Figura 8 - Mapa dos transectos gerados pelo CASSIE indicando o comportamento da alteração da linha de costa.....	32
Figura 9 - Gráficos da variação linear dos intervalos anuais, aplicando o método EPR	33
Figura 10 - Comportamento de regressão linear da variação da linha de costa (LRR) na península de Ajuruteua	34
Figura 11 - Comportamento da alteração da variação da linha de costa (NSM) na península de Ajuruteua	35
Figura 12 – Classificação supervisionada de uso e cobertura da zona costeira da península de Ajuruteua de 2005, 2015 e 2022.....	36
Figura 13 – Quantificação das classes de uso e cobertura do litoral da península de Ajuruteua.....	37
Figura 14 – Comportamento temporal da redução de manguezal na região norte da península de Ajuruteua.	38
Figura 15 - Comportamento do estoque de carbono total e de sedimentos entre os anos de 2005 a 2022 em Ajuruteua	41
Figura 16 - Comportamento do estoque de carbono em vegetação acima e baixo do solo entre os anos de 2005 a 2022 em Ajuruteua	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Principais fontes de dados utilizadas.....	20
Tabela 2 - Classificação da alteração da linha de costa em função do LRR.....	26
Tabela 3 - Classes utilizadas para o processo de classificação supervisionado das imagens de satélite da área de estudo.....	27
Tabela 4 - Matriz de confusão de validação da classificação supervisionada da imagem 2005.....	39
Tabela 5 - Matriz de confusão de validação da classificação supervisionada da imagem 2015.....	39
Tabela 6 - Matriz de confusão de validação da classificação supervisionada da imagem 2022.....	39
Tabela 7- Dados do índice Kappa e Exatidão Global das classificações supervisionadas	40

LISTA DE ABREVIações

CDR	<i>Carbon Dioxide Removal</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
CASSIE	<i>Coastal Analyst System from Space Imagery Engine</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NWDI	<i>Normalized difference water index</i>
TM	<i>Thematic Mapper</i>
OLI	<i>Operational Land Imager</i>
SCE	<i>Shoreline Change Envelope</i>
NSM	<i>Net Shoreline Movement</i>
EPR	<i>End Point Rate</i>
CSV	<i>Comma separated values</i>
LRR	<i>Linear Regression Rate</i>
IPCC	<i>IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL.....	14
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICOS	14
3	ÁREA DE ESTUDO	15
3.1	DADOS CLIMÁTICOS	16
3.2	VENTOS.....	16
3.3	COMPORTAMENTO DAS CORRENTES	16
3.4	PROCESSO DE OCUPAÇÃO DE AJURUTEUA	17
3.5	COBERTURA VEGETAL.....	19
4	MATERIAIS E MÉTODOS	20
4.1	MATERIAIS	20
4.2	MÉTODOS	21
4.2.1	Processamento das linhas de costa - CASSIE	22
4.2.2	Processamento e classificação das áreas de mangue através de imagens de satélite 26	
4.2.3	Estimativas de ganhos e perdas dos estoques de carbono em áreas de manguezal	29
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
5.1	ANÁLISE DA LINHA DE COSTA	30
5.1.1	Análise do <i>EPR</i> e transectos	31
5.1.2	Linear regression rate (<i>LRR</i>).....	33
5.1.3	Net shoreline movement (<i>NSM</i>)	34
5.1.4	Considerações sobre o CASSIE	35
5.2	ANÁLISE DAS ÁREAS DE MANGUEZAL – ZONA COSTEIRA	36
5.2.1	Validação da classificação supervisionada	38
5.2.2	Comportamento do estoque de carbono sobre a região costeira.....	41
6	CONCLUSÕES.....	42
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

O comportamento de elementos geomorfológicos presente na compreensão do processo de formação e estruturação da linha de costa está ligado a um conjunto de causas, que podem ser desde fatores climáticos, como a elevação do nível dos mares, o balanço sedimentar, movimentos tectônicos, até a ação do homem, principalmente, através dos processos de ocupação urbana irregular em áreas litorâneas e desmatamento da flora. Entender e analisar o comportamento desse ambiente pode auxiliar no processo de atenuação dos impactos diretos e indiretos existentes nos biomas complexos e únicos presentes nessas regiões costeiras (LEATHERMAN, 2018).

Entre os ambientes costeiros, os manguezais são reconhecidos por apresentarem formas únicas de vegetação e por estarem presentes em diversos países e regiões do planeta, concentrando principalmente em regiões tropicais e subtropicais (SOUZA, 2018; YIRGA 2020). Esses ecossistemas apresentam uma diversidade de vegetação e de fauna que proporcionam diversos benefícios para vida humana, e, também, para os demais ecossistemas interligados a eles. Entre as principais atividades que beneficiam a vida, destaca-se os processos relacionados às atividades sociais, ecológicas e econômicas, como a manutenção da biodiversidade marinha e terrestre, barreira de proteção do litoral (atenuando o processo de erosão costeira e estabilidade da costa), além do sequestro e armazenamento de carbono nos solos, sedimentos e biomassa (JAMALUDDIN, 2021).

Os manguezais estão entre os ecossistemas com maior poder de sequestro e armazenamento de carbono, por área, no mundo sendo superiores se comparados com a Floresta Amazônica, por exemplo (Donato et al., 2011). Estimativas médias globais do estoque total de carbono em manguezais geralmente excedem 400 MgC ha⁻¹ (Donato et al., 2011; Rovai et al., 2022; Beloto et al., 2023), valor bem superior ao armazenamento encontrado em florestas boreais, temperadas e tropicais se comprarmos a mesma área. Devido a essa grande capacidade de sequestrar e armazenar carbono a longo prazo (centenas a milhares de anos), na biomassa e nos solos, ecossistemas de manguezais são também chamados de ecossistemas de “carbono azul”, juntamente com outros ecossistemas marinhos vegetados como marismas e angiospermas marinhas (Nellemann et al., 2012). O solo do mangue é rico em matéria orgânica, uma vez que é formado por uma camada subóxica ou muitas

vezes anóxica de espessura variável e submersa pelas marés, contendo ainda atividades de decomposição aeróbica e anaeróbica e alta concentração de carbono (ALCÂNTARA, 2002).

Baseado nessa relevância no processo de captura e armazenamento de carbono, os manguezais têm alta capacidade no sequestro do dióxido de carbono (CO₂) atmosférico pois a maior parte do carbono sequestrado e estocado em manguezais é proveniente da produção primária líquida desses ecossistemas (Bouillon et al. 2008). Portanto, as florestas de mangue provavelmente desempenham um papel importante no processo de mitigação das mudanças climáticas e ambientais, processo ainda pouco conhecido. A preservação e ampliação de ecossistemas de manguezais tem sido pensadas como uma das estratégias oceânicas naturais (*"nature-based solutions"* or *"ocean-based solution"*) da remoção de CO₂ da atmosfera (*"carbon dioxide removal"*, CDR) (Lezaum, 2021).

O ambiente costeiro é dinâmico e se caracteriza por ser uma zona de transição entre o sistema terrestre e o marinho, além de apresentar uma complexidade geológica e ecológica únicas nos aspectos físicos e químicos de sua formação (KANWAL, 2019). Ao longo dos anos, essas regiões vêm passando por severas alterações, as quais são decorrentes, principalmente, dos processos de efeito erosivo, cuja existência intensifica-se progressivamente em trechos localizados em zonas costeiras exploradas por atividades humanas (LI, 2021).

O uso inadequado do solo, a expansão de cidades, atividades de aquicultura, desmatamento das margens de rios e estuários, em suma, as atividades antrópicas são uma das principais causas da perda de manguezais no século XX. Esse ambiente é sensível às variações climáticas, tornando-se um outro fator negativo face às mudanças climáticas. Ademais, surge a erosão costeira como um terceiro aspecto gerador de impacto negativo sobre o processo de degradação dos mangues, sendo responsável por, aproximadamente, 27% da redução dos manguezais em todo o planeta desde o ano 2000 (SAMANTA, 2021). A erosão costeira pode acarretar em emissões significativas de CO₂ para a atmosfera em larga escala, particularmente no Brasil, que apresenta a segunda maior área do mundo coberta por manguezais, e o segundo maior estoque de carbono global da ordem de 3.78 PgC ou 8.5% do estoque global (Atwood et al., 2017; Rovai et al., 2022).

Conforme ADEBISI (2021), a elevação do nível do mar é geralmente assumida e amplamente descrita como um dos principais fatores dos processos de erosão

costeira, cuja visibilidade é possível notar a partir das análises do comportamento da linha de costa, definida como uma intersecção entre o espaço marinho e o sistema costeiro móvel, tornando-se uma das características mais dinâmica das costas. As costas arenosas são passíveis de avanços e recuos em diversas escalas no tempo e no espaço, esse processo está presentes em diversas partes e ambientes costeiros do mundo, como na Malásia, presente na ilha de Teluk Nipah; em Portugal, na costa da Caparica e na praia de Espinho (DUARTE, 2016); nas costas do Atlântico e do Golfo dos EUA (LEATHERMAN, 2018); Nas praias de Cancun, México (ESCUDEIRO, 2018), entre outras.

As zonas costeiras no território brasileiro sofrem influência direta de fatores socioeconômicos (invasão a áreas de preservação ambiental, falta de saneamento básico, infraestrutura e habitação). Essa conjectura acarreta intensas perdas de recursos naturais, gerando impacto econômico e ambiental tanto para a população quanto para os ecossistemas interligados à morfologia costeira (DE GOUVEIA, 2009). Segundo MUEHE (2005), ao comparar quantitativamente os processos de erosão e os processos de progradação, é possível afirmar que a maior parte dos estudos relacionados às linhas de costa no Brasil indica a maior concorrência de processos erosivos, apresentando, aproximadamente, os seguintes percentuais: 40% as praias, 20% em falésias e sedimentares e 15% nas desembocaduras fluviais.

O monitoramento da linha costeira é de suma importância para o gerenciamento e planejamento de estudos sobre a região costeira, tendo em mente a necessidade de compreender os impactos e as consequências ocasionados pelas mudanças climáticas. Ao estudar o comportamento da linha de costa, é possível identificar aspectos que podem caracterizar e auxiliar na detecção de áreas de vulnerabilidade costeira e criar modelos de previsão de linha costeira (ALMEIDA, 2021).

Segundo Da Silva (2020), A utilização de geotecnologias e associada ao uso das imagens de satélites, vem sendo uma grande ferramenta para compressão de ambientes costeiros, pelo possibilidade de entender as modificações nos processos presentes nestes ecossistemas ao longo do tempo.

Estudos relacionados à etapa de monitoramento das áreas costeiras são necessárias para o entendimento da dinâmica espacial e geomorfológica das regiões de manguezal, tendo a utilização dos dados de sensoriamento remoto como um dos principais mecanismos de desenvolvimento dos estudos sobre as regiões costeiras.

No entanto, o mapeamento dessas áreas continua sendo um grande desafio, haja vista a dificuldade de mapear regiões que apresentam uma grande variação dinâmica, tornando-se praticamente indispensáveis ferramentas que compreendam o desenvolvimento desses processos ao longo do tempo (DA SILVA, 2012).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o processo de erosão costeira e a sua relação com o processo de degradação do manguezal na região litorânea na península de Ajuruteua (Bragança - PA).

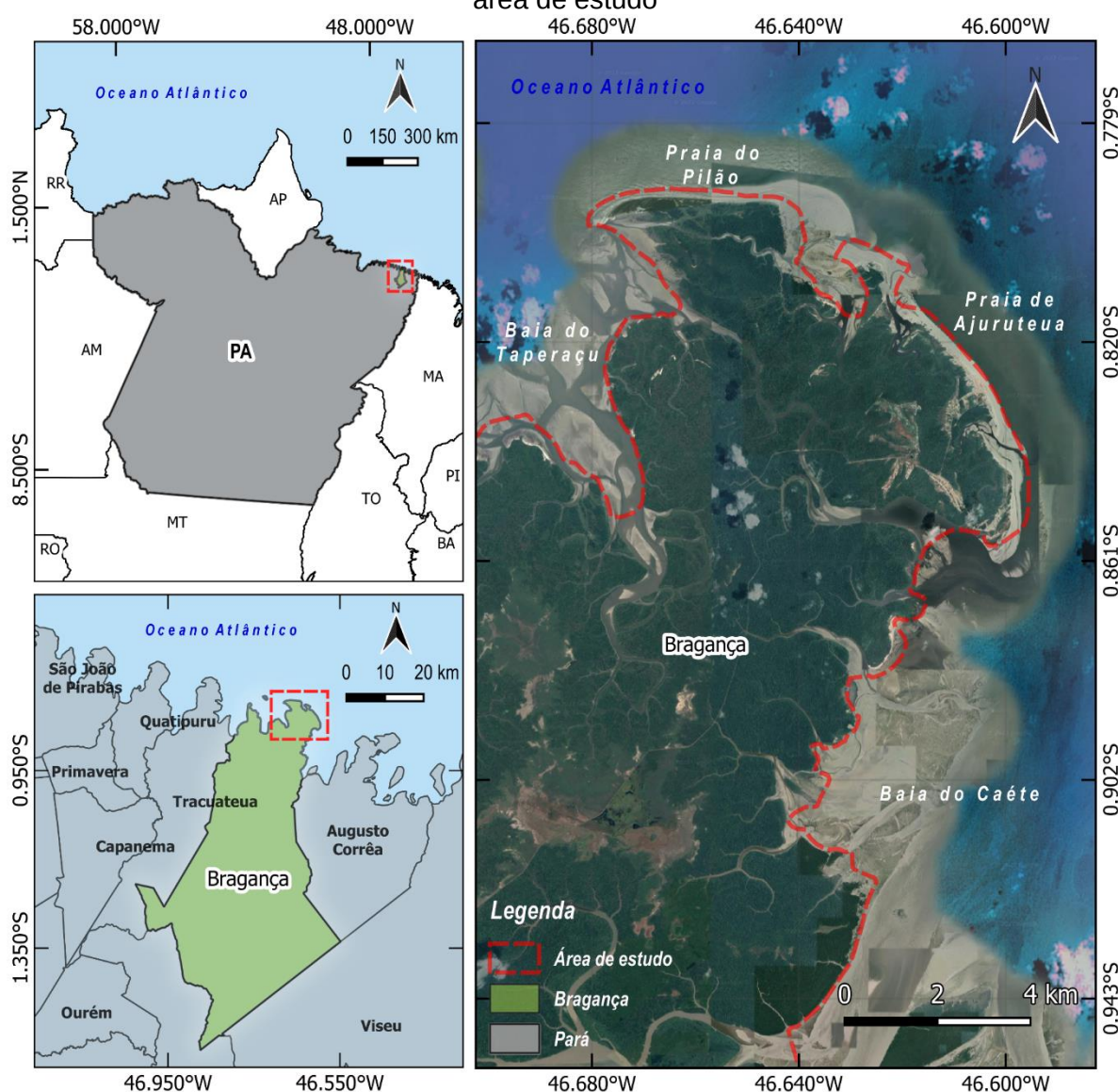
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Avaliar os impactos e a influência dos ciclos de marés nas regiões de mangue no litoral de Ajuruteua utilizando o software CASSIE e imagens de satélite;
- Estimar as perdas das áreas de manguezal relacionadas com recuo da linha de costa ao longo de 17 anos através de imagens de satélite *Landsat*.
- Quantificar a perda do estoque de carbono relacionados com a perda da área de manguezal devido ao processo de erosão costeira.
- Quantificar processos adicionais, como mudanças no uso e ocupação dos solos, que possam contribuir com perdas adicionais das áreas nativas de manguezais.

3 ÁREA DE ESTUDO

Com uma população de 113.227 habitantes (IBGE, 2010), o Município de Bragança está localizado na Mesorregião Nordeste Paraense, contido na Microrregião Bragantina. A figura 1 apresenta o município, na qual é delimitado ao norte pelo Oceano Atlântico, ao sul pelos municípios de Santa Luzia do Pará e Viseu, ao leste pelos municípios de Augusto e Viseu e ao oeste pela cidade de Tracuateua (SOUZA, 2021).

Figura 1 – Localização da área de estudo, (a) indica o estado do Pará, localizado na região norte do Brasil; (b) Identificação do Município de Bragança no estado do Pará; (c) recorte da área de estudo



Fonte: Autores (2023).

O Município de Bragança, no Estado do Pará, possui em seu território uma grande faixa costeira, onde encontra-se a Península de Ajuruteua. A península está contida na planície costeira bragantina, que apresenta, aproximadamente, 40 km de linha costa, estendendo-se da Ponta do Maiaú até a foz do rio Caeté (Figura 1). A planície faz parte da bacia Bragança-Viseu, a qual apresenta processos de transformações ambientais dinâmicos em fluxos temporais de curtos e longos períodos (MONTEIRO, 2009).

3.1 DADOS CLIMÁTICOS

Com clima equatorial (quente e úmido), a península de Ajuruteua é caracterizada por intensas estações chuvosas entre os meses de dezembro e maio, e outra estação seca, nos demais meses do ano. O comportamento pluviométrico da região varia entre uma média anual de 2.500 a 3.000 mm/ano, enquanto a umidade relativa do ar oscila entre 80 e 91%. A temperatura média anual é de 25,7°C, variando durante o ano entre 20,4°C a 32,8°C (DA SILVA, 2021).

3.2 VENTOS

Os ventos alísios de NE são predominantes e chegam a velocidades médias de 7,9 m/s durante os meses de dezembro e maio. Durante os meses de junho e novembro, predominam os ventos E (Leste) e SE (Sudeste), com intensidades moderadas. Figura 2, mostra o comportamento das ondas, na qual apresenta uma tipologia deslizante, usualmente contendo mais de uma zona de arrebentação distantes da praia, diminuindo progressivamente sua energia, o que lhes confere características construtivas (SANTOS, 2019).

3.3 COMPORTAMENTO DAS CORRENTES

O comportamento das correntes dominantes na área de Ajuruteua são definidas pelas correntes de maré e pelas correntes litorâneas geradas como resultado das ações oriundas das ondas a costa, as quais são induzidas pelo comportamento de macromarés semidiurnas, variando as alturas entre 4 e 6 metros durante os períodos equinociais de sizígia. Esse ambiente também sofre forte influência no transporte de sedimentos da área litorânea, tendo como principal agente as ações das correntes de

maré de direção noroeste e sudeste, alcançando a velocidade máxima de 0,6 m/s (FONSECA, 2015).



Fonte: Adaptado de Fonseca (2015).

3.4 PROCESSO DE OCUPAÇÃO DE AJURUTEUA

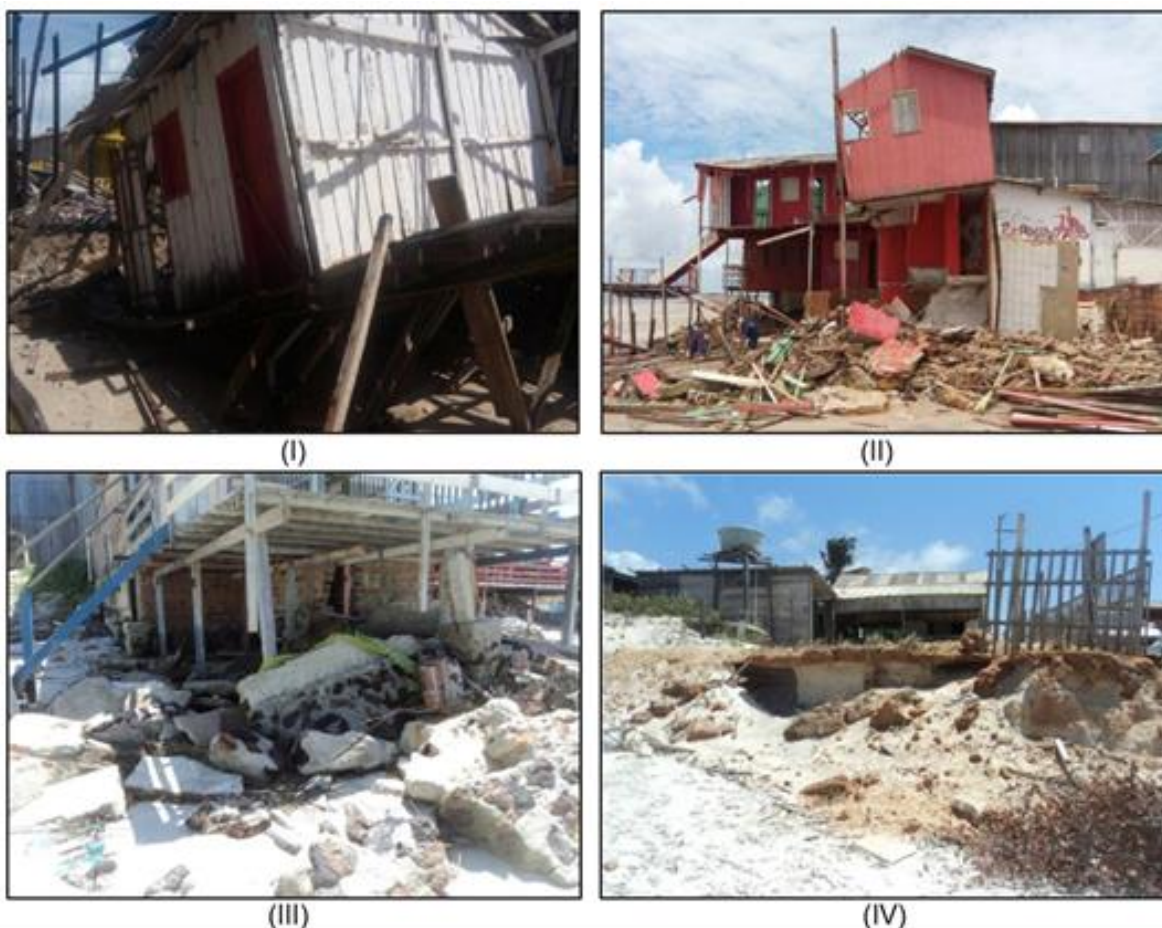
O processo de ocupação da área costeira de Ajuruteua acontece através da ocupação desordenada na região da praia de Ajuruteua e na vila dos pescadores. A praia de Ajuruteua apresenta uma extensão de área plana de aproximadamente 2,5 km de extensão, uma largura média de 200 a 400 m e uma suave inclinação em direção ao mar (OLIVEIRA, 2018).

A praia vem sofrendo um progressivo recuo na linha de costa em decorrência dos processos erosivos característicos da região e por ações antrópicas, gerando danos perceptíveis em relação ao aumento dos fenômenos erosivos. Os danos

causados vão desde a destruição da zona de dunas, onde estão localizados grande parte das habitações, conforme mostra a Figura 3 referentes aos anos 2005 e 2017, até os danos e remoção de estruturas naturais de proteção costeira (RODRIGUES, 2018). Conforme CPRM (2015), pesquisas indicam que ações erosivas vêm crescendo ao longo dos anos na praia de Ajuruteua, apresentando, entre os anos de 2007 e 2014, um recuo médio de 25 m.

Segundo FONSECA (2015), fatores como as construções desordenadas, os processos de destruição de vegetações e aterramento de mangues e dunas, são responsáveis por agravar a intensidade dos processos de erosão e degradação na praia de Ajuruteua. Por isso, com o transcorrer do tempo, a tendência de acontecer a destruição de estruturas residenciais, comerciais e vias de acesso, fazendo com que os moradores da região construam novas residências cada vez mais distantes da costa; analogamente, esse novo processo de habitação pode acarretar problemas de degradação e de poluição nos ecossistemas próximos a faixa praial (mangues, estuários).

Figura 3 - Danos ocasionados pela maré alta em 2015 (I, II) e em 2017 (III, IV) na praia de Ajuruteua, acervo da COMPDEC e Meiguins

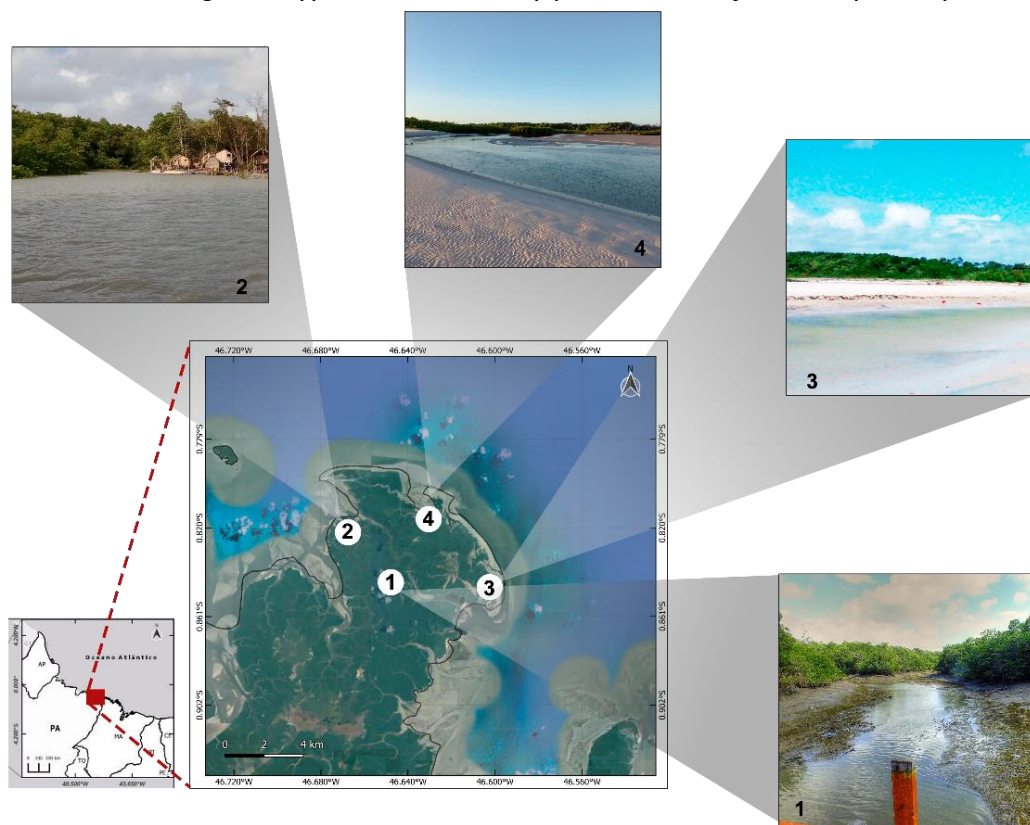


Fonte: RODRIGUES (2018).

3.5 COBERTURA VEGETAL

A Figura 4 demonstra a cobertura da vegetação da região é caracterizada por densos bosques de mangue e grande diversidade de ambientes sedimentares, como, por exemplo, as planícies de marés, os pântanos salinos, os estuários, os campos de dunas, entre outros). Os manguezais bragantinos são formados através da transição da água do mar para o oceano, configurando-se como sistema específico, típico de regiões tropicais e subtropicais, as quais possuem como característica básica a composição de solos negro, lodoso e profundo (ALVES, 2018).

Figura 4 - Localização de trechos de ecossistemas na península de Ajuruteua. Região de manguezal (I), Praia do Pilão (II) e Praia de Ajuruteua (III e IV).



Fonte: Google Earth (2023).

O município de Bragança-PA compreende uma área de manguezal de aproximadamente 120 km², mas essas medidas são alteradas constantemente com redução progressiva da área de manguezal por causa dos desmatamentos que estão ligados ao processo de urbanização desordenado e a ampliação das malhas

rodoviárias entre o centro urbano do município e a região costeira de Ajuruteua (GOMES, 2017).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados são as imagens digitais gratuitas geradas pelo sensor *Thematic Mapper* – TM do satélite *Landsat 5*, no ano 2005, e pelo sensor *Operational Land Imager* – OLI do satélite *Landsat 8* para os anos de 2015 e 2022. As bandas espectrais utilizadas no processamento foram as bandas do vermelho, verde e infravermelho próximo, uma vez que essas são utilizadas para a detecção da linha de costa. Ademais, foi utilizada a ferramenta web de código aberto para mapeamento e análise automático da linha costeira: imagens de satélite (CASSIE – *Coastal Analyst System from Space Imagery Engine*) e o software livre QGIS, versão 3.16.15.

Os satélites *Landsat 5* e *8* contêm dados com resolução espacial de 30m em todas as bandas, exceto a banda termal com 120 m no *Landsat 5* e 100 m no *Landsat 8*, ambos apresentam com uma resolução temporal de 16 dias. O sensor TM apresenta uma resolução radiométrica de 8 bits e o sensor OLI de 16 bits (LIU, 2015; CHAGAS, 2018; PENHA, 2018).

As imagens de satélite abrangem toda a área de estudo da península de Ajuruteua, referentes aos anos de 2005, 2015 e 2022; tais imagens foram obtidas em datas que apresentaram poucas ou nenhuma interferência de nuvens e em períodos de aquisição que apresentaram maré alta, com o objetivo de reduzir as interferências na análise do recuo ou avanço da linha de costa em relação a grandes disparidades do nível de maré entre as imagens em estudo. A tabela a seguir contém um resumo dos materiais aplicados à pesquisa.

Tabela 1– Principais fontes de dados utilizadas

Satélite	Sensor	Hora	Data	Resolução Espacial	Nível Maré (m)	Média da Maré (m)	
						Maré Alta	Maré Baixa
Landsat-5	TM	13:04:50	2005-07-30	30m	3,34	3,90	1,00
Landsat-8	OLI	13:17:50	2015-12-17	30m	3,50	4,30	1,15
Landsat-8	OLI	13:17:00	2022-08-06	30m	3,70	5,60	2,65

Fonte: Autores (2023).

A aquisição dos dados de amplitude de maré de Ajuruteua foram obtidos por meio do software livre WXTide32. O programa possui um banco de dados de estações maregráficas em todo o mundo, exibindo os nomes das estações, coordenadas, previsões de maré e corrente nos de 1970 a 2037 (www.wxtide32.com). Para este trabalho foi utilizado os dados do Fundeadouro de Salinópolis devido ao fato de Bragança não existir um fundeadouro para a obtenção dos dados de maré. A partir da data e da hora de aquisição das imagens de satélite em estudo, dos anos de 2005, 2015 e 2022, identificou-se que a hora e a altura de maré encontrada em Ajuruteua corresponde à altura em Salinópolis com o atraso de 40 minutos.

Após a identificação das imagens adequadas para o estudo, ocorreu a etapa de elaboração das linhas de costa, a qual foi executada pela ferramenta CASSIE (www.cassiengine.org), sendo, em seguida, extraídos os resultados referentes à linha de costa. Tais etapas são descritas no item 4.2 MÉTODOS.

Para os estudos relacionados à etapa de classificação e metrificação das áreas de mangues na península de Ajuruteua, foram utilizadas as mesmas imagens do estudo de detecção e análises da linha de costa executada no CASSIE, juntamente com o uso do software livre Qgis versão 3.16.15 para confecção dos mapas de uso e ocupação do solo, em conjunto aos plugins *Semi-Automatic Classification* e AcATAMA, utilizados para o processo de classificação das classes do mapa e acurácia da classificação supervisionada .

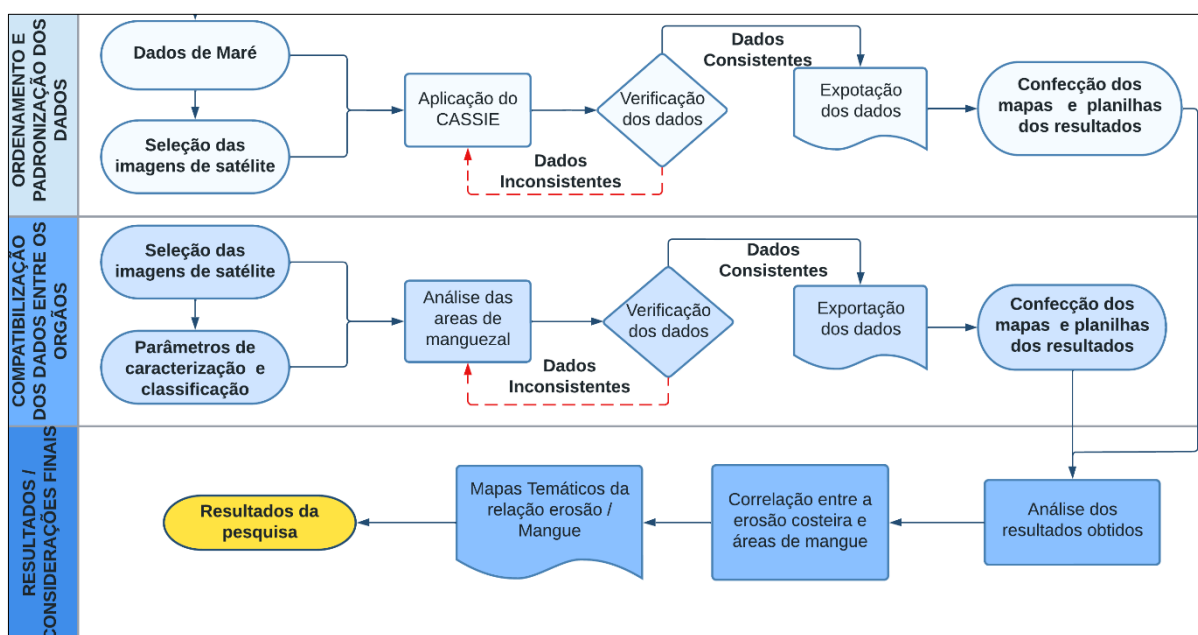
4.2 MÉTODOS

A Figura 5 apresenta a estruturação deste trabalho, inicia-se com processo de identificação do comportamento erosivo da área de estudo e quais regiões estão contidas no processo erosivo, utilizando a ferramenta CASSIE - *Coastal Analyst System from Space Imagery Engine* e o software QGIS. Os processos desenvolvidos na ferramenta CASSIE utilizaram o NDWI (*Normalized difference water index*), o algoritmo de OTSU para as identificações das linhas de costa, por meio das imagens de satélite da série *Landsat*, referentes aos anos de 2005, 2015 e 2022 (KLEIN, 2022;ALMEIDA, 2021;LOTT, 2021; CONCATTO, 2018).

A partir desses resultados e análises de erosão, inicia-se o estudo sobre o comportamento de espacialização das áreas de manguezal na península de Ajuruteua e quais áreas apresentam uma correlação com o comportamento erosivo e os

principais agentes ligados a esse processo. Essa etapa foi desenvolvida através de imagens de satélite (série *Landsat*) e através dos estudos ligados à relação espaço-temporal da formação dos mangues. Para o processo de variabilidade dos mangues no intervalo temporal de 2005 a 2022, foi aplicado o processo de classificação supervisionada para análises quantitativas das áreas de manguê presentes na península de Ajuruteua.

Figura 5 - Fluxograma



Fonte: Autores (2023).

4.2.1 Processamento das linhas de costa - CASSIE

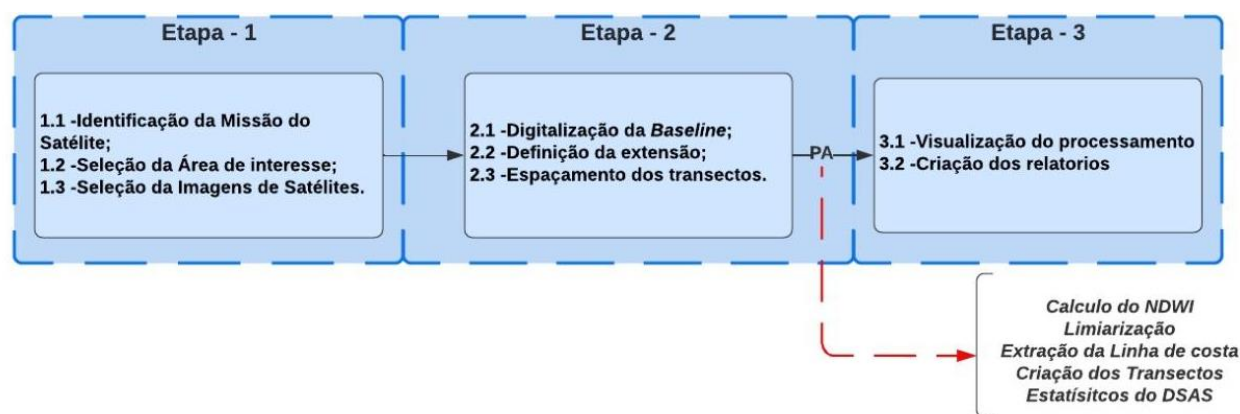
A Figura 5 apresenta as etapas metodológicas elaboradas para a identificação do processo de variabilidade da linha de costa, sendo o estágio inicial o processo de coleta dos dados de entrada (dados de maré, os satélites e imagens adequadas para o estudo), descritos no item 4.1 *Materiais*. Por conseguinte, inicia-se o processamento das imagens, a qual foi desenvolvida através da ferramenta livre CASSIE. (KLEIN, 2022; ALMEIDA, 2021; LOTT, 2021; CONCATTO, 2018).

A ferramenta CASSIE é um sistema web de visualização e análise de dados geoespaciais, sendo um sistema de análise costeira que utiliza mecanismo de imagens de satélite multiespectrais disponíveis pela plataforma *Google Earth Engine*. De forma automatizada, a ferramenta é capaz de digitalizar a posição da linha de costa

em imagens de satélites e, analogamente, produzir dados estatísticos provenientes das linhas de costas extraídas das imagens (ALMEIDA, 2021).

O processamento na ferramenta acontece através de um conjunto de operações sequenciais, sendo uma parte dessas operações executadas de forma automatizada e outra parte executada pelo próprio usuário, como mostra a Figura 6.

Figura 6 - Fluxograma das operações no processamento no CASSIE



Fonte: Autores (2023).

Etapa – 1. Análise prévia da área de interesse

Essa etapa consiste, inicialmente, na seleção da missão do satélite aplicado neste estudo, disponível na ferramenta (missão *Landsat*); em seguida, acontece a seleção da área de interesse, que, neste caso, corresponde à península de Ajuruteua, localizada no município de Bragança-PA.

Após o processo de identificação da área de estudo, o programa solicita ao usuário a especificação do intervalo temporal, a definição do percentual limite de nuvens e as imagens que serão utilizadas para o processamento das linhas de costa, as quais estão descritas no item 4.1 MATERIAIS.

Etapa – 2. Processamento e definição da baseline e transectos

Para o processamento e construção das linhas de costa, foi feita a identificação da linha de base, sendo digitalizada (manualmente) ao lado da terra e servindo de ponto de referência para a elaboração e definição dos transectos calculados no CASSIE. Esses procedimentos são baseados no método de distância da linha de base (LEATHERMAN e CLOW, 1983; THIELER et al., 1994). Em seguida, foi feita a definição dos parâmetros de espaçamento e extensão dos transectos, juntamente

com o coeficiente de limiarização. Para o presente estudo foram aplicadas as seguintes especificações: (i) espaçamento de 100 m entre os transectos; (ii) extensão dos transectos de 1.800 m; e (iii) a Limiarização de -1 (Multinível).

O processamento automático de detecção da linha de costa consiste na aplicação do Índice de Diferença Normalizada de Água (MCFEETERS,1996) e a limiarização nas imagens pré-selecionadas, utilizando o valor sugerido ou o limiar calculado pelo algoritmo Otsu (OTSU,1979).

a) Normalized difference water index

Assim como o *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*), o *NDWI* está entre os parâmetros mais utilizados em estudos ambientais aplicados na utilização de índices radiométricos. O método proposto por Mcfeeters (1996) avalia a resposta espectral dos canais Infravermelho próximo e o verde, permitindo assim: (i) elevar ao máximo a reflectância da água em relação ao comprimento da onda verde; (ii) diminuir a baixa reflectância dos corpos de água no infravermelho próximo; (iii) realçar o contraste entre água e cobertura vegetal através do infravermelho próximo (AUGUSTO et al., 2022). O *NDWI* é obtido mediante as bandas do verde e do infravermelho próximo, conforme a Eq.(3) para o *Landsat 5* e a Eq.(4) para o *Landsat 8* (RODRIGUES et al., 2017; AUGUSTO et al., 2022; REBOUÇAS, 2019):

$$NDWI = (b2 - b4)/(b2 + b4) \quad (3)$$

$$NDWI = (b3 - b5)/(b3 + b5) \quad (4)$$

onde: b2 corresponde à reflectância da banda 2 (infravermelho próximo) e b4 à banda 4 (banda verde) para o *Landsat 5* e para o *Landsat 8* as bandas b3 (infravermelho próximo) e banda b5 (banda verde). Segundo REBOUÇAS (2019), os índices variam entre valores positivos ($NDWI > 0$), indicando superfícies de água (corpos d'água), e valores negativos ($NDWI < 0$), indicando superfícies de solo exposto ou sem vegetação

b) Limiarização

A aplicação do limiar pelo algoritmo Otsu utiliza uma técnica de segmentação da imagem que visa buscar um limiar que vai maximizar a diferença entre as classes na imagem (CHANG *et al.*,2022; HE *et al.*,2020).

Nesse processo, um histograma bimodal caracteriza a estrutura de classes, onde a água apresenta coloração clara e a terra coloração escura; no entanto, foi detectado que, em ambientes estuarinos, existe a presença de faixas entre a terra e a água (sedimentos lamacentos ou sedimentos de granulometria fina), levando à má identificação das linhas de costa. Diante dessa problemática, foi desenvolvido o algoritmo Otsu de limiarização multinível, caracterizando as três classes: água, terra e faixa terra-água.

Ao identificar os níveis de valores do *NDWI*, os menores valores presentes nesta faixa terra-água são classificados na classe terra e os maiores valores do *NDWI* são identificados como água (LIAO *et al.*,2001; ALMEIDA *et al.*,2021). Neste trabalho foi aplicado o algoritmo de limiarização multinível pelo fato da região ser composta por estuários e apresentar ambientes de manguezais em grande parte do território.

c) Processamento da Linha de costa

Após a limiarização, as imagens são vetorizadas para obter as linhas de costa e, em seguida, ocorre a remoção de ruídos (pequenos polígonos que não pertencem à linha de costa) e a suavização através de um filtro gaussiano 1D, para obtenção da linha de costa gradual.

O CASSIE disponibiliza os dados estatísticos da Análise Digital de Linhas de Costas (DSAS) em forma de tabelas para exportação, onde são calculados os seguintes métodos para medir a linha de costa:

- **Shoreline Change Envelope (SCE)**: Descreve a distância entre os extremos das linhas de costa (Linha de costa mais distante e a mais próxima da linha de base no intervalo de cada transecto), expressando o deslocamento total da costa, sem levar em consideração as datas das linhas de costa;

- **Net Shoreline Movement (NSM)**: Identifica a distância relacionada entre as linhas de costas mais antigas e as mais novas de cada transecto contido ao longo da linha de base (baseline), podendo assumir valores negativos (recoo do litoral - processo erosivo) ou positivos (avanço do litoral - progradação).

▪ **End Point Rate (EPR):** Mostra a taxa de variação da costa em função da relação distância-tempo das datas da linha de costa mais recente e mais velha, isto é, a medida da extensão, em metros, entre as duas linhas, dividido pelo intervalo de tempo das duas linhas de costa;

▪ **Linear Regression Rate (LRR):** Determina uma regressão linear da taxa de variação entre a primeira e última linha de costa, em metros por ano.

▪ **Erosion Classification:** A partir dos resultados do *Linear Regression Rate*, aplica-se o processo de classificação por erosão da linha de costa, proposto por Esteves e Fink (1998), como mostra a Tabela 2Tabela 1.

Tabela 2 - Classificação da alteração da linha de costa em função do *LRR*

Cor	Condição da alteração da linha de costa	LRR - <i>Linear Regression Rate</i>
	Acresção	> 0,5 m/ano
	Estável	-0,5 a 0,5 m/ano
	Erosão	-1 a -0,5 m/ano
	Erosão crítica	< -1 m/ano

Fonte: Adaptado de ALMEIDA *et al* (2021).

Ao final do processamento, permitindo que o usuário visualize a evolução da região em estudo, são inseridas no mapa as linhas de costas derivadas, os transectos e a linha de base.

Os resultados dos cálculos e das geometrias da linha de costa são gerados no formato CSV e *shapefile*, vinculando os dados para cada transecto gerado ao longo da linha de base. Para o estudo, as tabelas foram exportadas para o *software* Excel, versão 2019, no qual foram criados os gráficos e tabelas quantitativas das variáveis, *NSM*, *EPR* e *LRR*. Por sua vez, os dados geométricos foram tratados e estruturados no *software* QGIS, versão 3.16.15.

4.2.2 Processamento e classificação das áreas de mangue através de imagens de satélite

O processamento digital das imagens foi dividido em três etapas: pré-processamento, processamento e pós-processamento. Na etapa de pré-

processamento, houve o recorte da área de estudo (península de Ajuruteua), tendo como critério de seleção a menor quantidade de nuvens e ruídos.

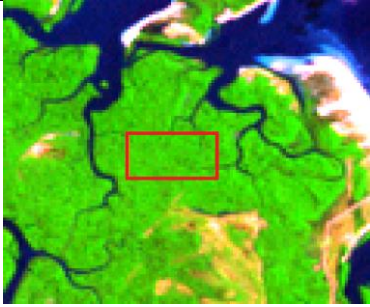
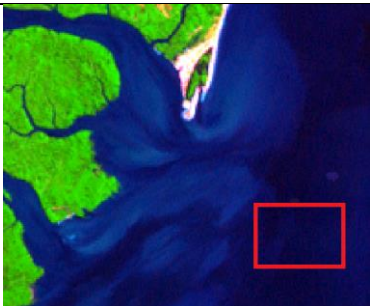
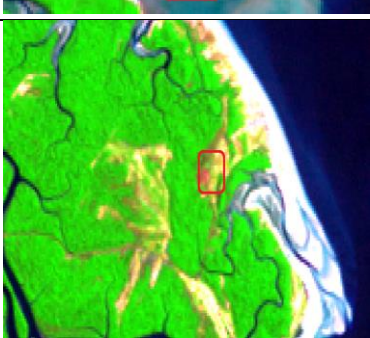
No processamento, por sua vez, com o objetivo de extrair o máximo de informações possíveis e de melhor qualidade, realizou-se uma série de combinações de bandas, cores e contrastes, além do levantamento e análise dos principais estudos científicos que aplicaram de combinações de bandas em ambientes similares ou na área de estudo (NASCIMENTO, 2013; DA SILVA, 2019; COUGO, 2019; SILVA, 2009; LEAO, 2019). As bandas espectrais utilizadas no trabalho, para a imagem do *Landsat* 5 foram R7, G4 e B3 e para as imagens referentes ao satélite *Landsat* 8, foram as bandas R6, G5 e B4 (infravermelho). Essas combinações de bandas auxiliam na melhor identificação dos principais usos e cobertura de zonas costeiras da área da península de Ajuruteua (manguezais, vegetação rasteira, corpos d'água, solo exposto, área urbanizada, areia, etc.).

No processamento, uma chave de interpretação foi construída para dar suporte à etapa de fotointerpretação e, posteriormente, à etapa de classificação supervisionada em função da área da imagem recortada. Nesse tipo de classificação, o usuário identifica as classes e o algoritmo, anteriormente treinado, agrega os pixels. Para esse serviço, foi aplicado o método de máximo verossimilhança; em seguida, as classes são geradas através da análise de agrupamento. Por fim, é gerado um arquivo *shapefile* a partir da classificação da imagem, por meio do plugin *Semi-Automatic Classification* no Qgis.

Por meio dos estudos científicos (SOUZA FILHO, 1996; DA SILVA, 2019; NASCIMENTO, 2013; SOUZA, 2019), utilizando imagens dos satélites *Landsat* 5 e 8 de estudos similares ao desenvolvido neste projeto, foram analisadas e adequadas as classes em função das características espaciais dos ambientes de Ajuruteua para a criação de classes. Conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Classes utilizadas para o processo de classificação supervisionado das imagens de satélite da área de estudo

Classe	Descrição	Imagem
--------	-----------	--------

Manguezal	Nesta classe foram atribuídas as áreas de ecossistema manguezal, formado por sedimentos lamosos colonizados, principalmente, por <i>Rhizophora L.</i> e <i>Avicenia L.</i> , além de <i>Laguncularia L.</i> e <i>Spartina L.</i> associados. (SOUZA FILHO, 1996; DA SILVA, 2019; NASCIMENTO, 2013; SOUZA, 2019)	
Águas estuarinas	Nesta classe consistem nas áreas caracterizadas por corpos d'água possíveis de observação, tais como: rios, lagos e oceano. (SOUZA FILHO, 1996; DA SILVA, 2019; NASCIMENTO, 2013; SOUZA, 2019)	
Areia seca - Dunas	Nesta classe foram incluídas as praias, planícies arenosas e dunas. (SOUZA FILHO, 1996; DA SILVA, 2019; NASCIMENTO, 2013; SOUZA, 2019)	
Areia Úmida - Bancos de Areia	Nesta classe foram incluídas áreas caracterizadas por regiões de transição entre o oceano e a praia, além de bancos de areia submersos.	
Solo Exposto - Vegetação Herbácea	Nesta classe foram incluídas áreas que depois de terem sofrido intervenção na sua vegetação original, está em processo de regeneração incluídos os pântanos salinos, além de áreas de solo sem cobertura vegetal e áreas construídas (SOUZA FILHO, 1996; DA SILVA, 2019; NASCIMENTO, 2013; SOUZA, 2019).	

Fonte: Autores (2023).

Na etapa seguinte, foram utilizadas e analisadas as imagens de estudos científicos (NASCIMENTO JR, 2013), as imagens do *Google Earth* e do *ICMBio* para auxiliar a identificação dos principais vetores de todas as classes pré-estabelecidas da área de estudo a partir da análise visual dos alvos.

A fase de validação do processo de classificação supervisionado foi executada por meio da geração de 400 pontos aleatórios distribuídos na área de estudo. Para a composição da matriz de confusão, em função das análises de estudos científicos e da interpretação visual das imagens de satélite da área de estudo, foi utilizado o plugin AcATAMA (ASSUNÇÃO, 2022; LLANO, 2019), onde cada ponto criado para a validação foi classificado em uma das 5 classes de uso pré-definidas (Tabela 3).

Para a Geração da matriz de confusão foram utilizados os pontos gerados aleatoriamente, identificados através de interpretação visual, associando os pontos aleatórios com as classes de uso e cobertura do solo obtidas na classificação.

No que tange a avaliação dos índices de acurácia, foi possível realizar o cruzamento das informações de todas as classes classificadas e as classes nas imagens de referência. Os dados obtidos foram tabulados em matrizes de confusão, as quais serviram para efetuar a avaliação de desempenho através do índice Kappa (Landis & Koch 1977), Exatidão global (Hellden et al., 1980), sendo a exatidão global calculada a partir da divisão da soma dos valores da diagonal principal da matriz, que representa o número de elementos classificados corretamente (Hellden et al., 1980).

O resultado da estatística Kappa normalmente é comparado aos valores propostos por Landis & Koch (1977), a fim de indicar a qualidade do mapa temático.

Para o processo de variabilidade do manguezal no intervalo temporal de 2005 a 2022, foi aplicado o processo de quantificação das áreas das classes presentes na etapa de classificação supervisionada presentes na faixa costeira da península de Ajuruteua.

4.2.3 Estimativas de ganhos e perdas dos estoques de carbono em áreas de manguezal

Depois de quantificada a área de manguezal que foi perdida devido ao processo de erosão costeira, o próximo passo foi o cálculo das emissões de carbono relacionados com esse processo. Foi feito um levantamento sobre dados e trabalhos envolvendo os estoques de carbono para a região de estudo (Matos et al., 2020; Kauffman et al., 2018). Foram utilizados dados da literatura de manguezais amazônicos, disponibilizados no trabalho de Kauffman et al. (2018) e Beloto et al. (2023). Esses trabalhos contêm informações sobre estoques médio de carbono considerando a totalidade dos compartimentos dos manguezais, ou seja, estoque

total, assim como estoques de carbono em compartimentos específicos, como solos e biomassa vegetal (acima e abaixo do solo).

Foi utilizada uma razão estequiométrica $\text{CO}_2:\text{C}$ de 3.67 ($\text{CO}_2:\text{C} = 44/12 = 3.67$) para converter átomos de carbono em moléculas de CO_2 (Kauffman et al., 2015). Dessa forma, foi calculada uma emissão potencial de CO_2 equivalente ($\text{CO}_{2\text{eq}}$), que foi computada levando em consideração a área perdida de manguezal, e o estoque de carbono transformado em emissão potencial, através da seguinte fórmula:

(3)

$$ECO_{2\text{eq}} = AM_{\text{perdida}} \times ECCO_{2\text{eq}}$$

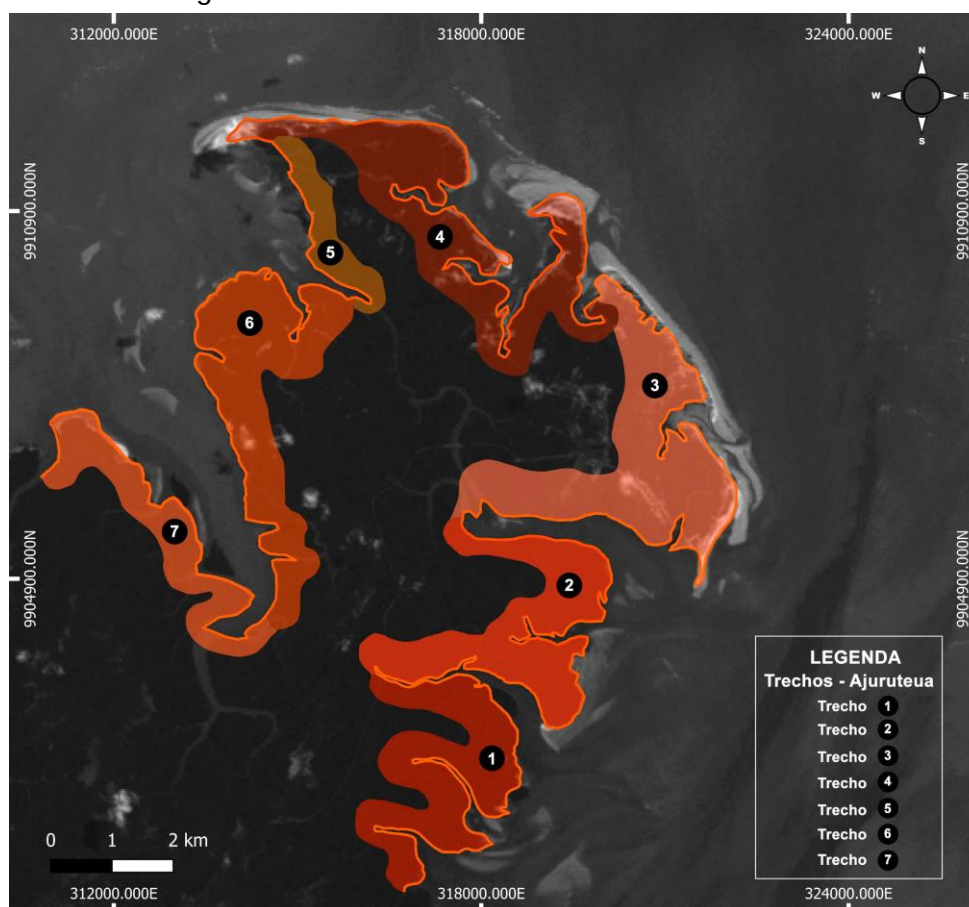
Onde $ECO_{2\text{eq}}$ representa a emissão potencial de CO_2 relacionado com a perda da área de mangue; AM_{perdida} representa a área de manguezal perdida devido ao recuo da linha costeira em intervalo de tempo específico; $ECCO_{2\text{eq}}$ representa o estoque de carbono perdido, transformado em emissão de CO_2 equivalente. Nessa abordagem assumimos que todo o estoque de carbono (na biomassa e nos sedimentos) foi emitida como CO_2 para a atmosfera e na biomassa de manguezais.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISE DA LINHA DE COSTA

A Figura 7 contém o detalhamento dos 7 trechos do litoral costeiro da península de Ajuruteua desenvolvida neste estudo. Esse processo foi utilizado para melhor aplicação da ferramenta CASSIE e visualização do comportamento das alterações costeiras ao longo dos anos (2005 a 2022), este fracionamento se fez necessário devido a península apresentar uma grande extensão litorânea e ambientes estuarinos que poderiam dificultar as análises e criação da linha costeiras pela ferramenta CASSIE, segundo os dados descritos por ALMEIDA, 2021.

Figura 7 - Trechos Litorâneos da área de estudo



Fonte: Autores (2023).

Diante da análise dos resultados obtidos de variações das linhas de costa no período de 17 anos, foram identificados intensos processos de deslocamentos por avanço e/ou progradação costeira. Tais processos estão relacionados aos fenômenos antrópicos e aos comportamentos climáticos, elementos importantes para nuances sobre a linha de costa, aspectos presentes em estudos (SANTOS, 2019; DA SILVA BRAGA, 2007; BRASIL, 2018).

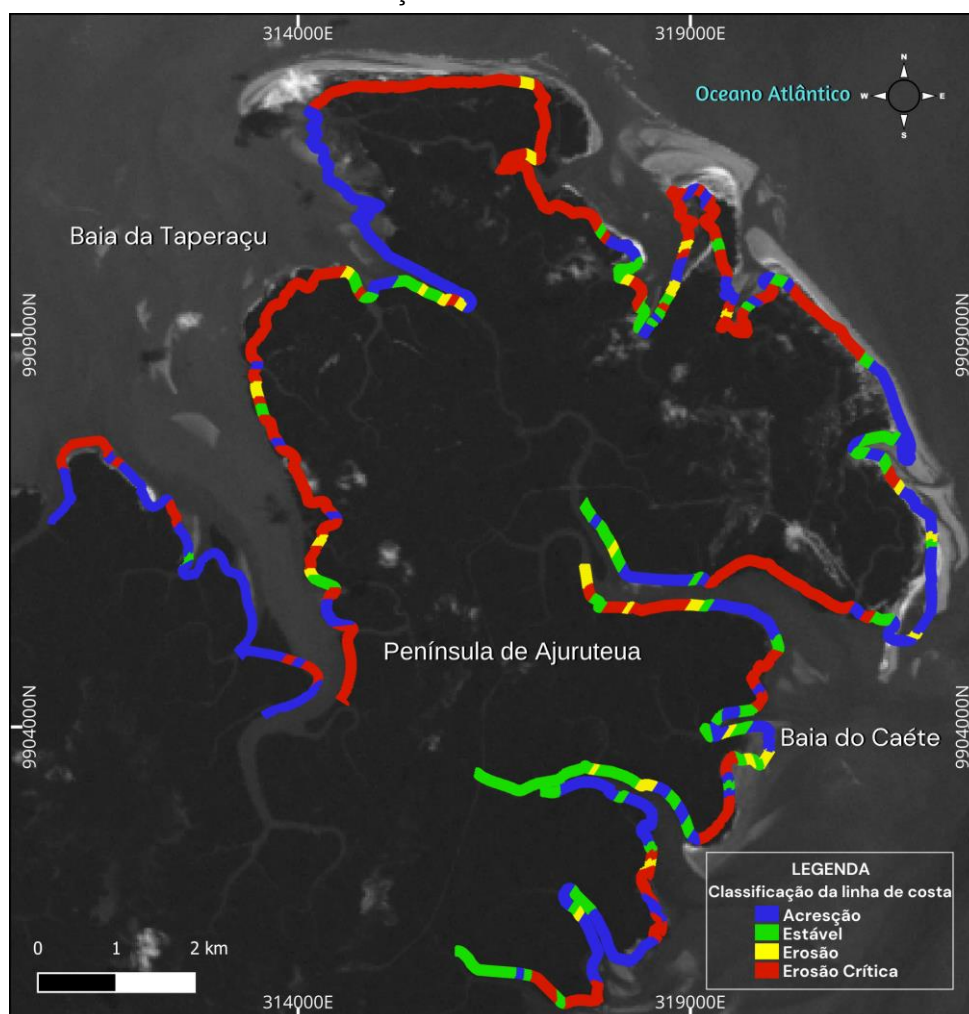
Foram desenvolvidos estudos estatísticos, *NSM* e *LRR*, sobre todos os trechos da área de estudo, juntamente com a análise do comportamento do *EPR* para os dois intervalos temporais (2005-2015 e 2015-2022) em toda a costa.

5.1.1 Análise do *EPR* e transectos

O comportamento dos transectos na região de Ajuruteua (Figura 8), evidencia uma maior quantidade de transectos do tipo erosão crítica (238 transectos), seguido de acreção (205 transectos), erosão (39 transectos) e estável (134 transectos). Intensos processos erosivos foram verificados em praticamente em toda a península,

tendo uma concentração em regiões norte e noroeste. A linha de costa nesse setor sofre processos erosivos provenientes da exposição às ondas, marés e correntes, no entanto, por causa de interferências antrópicas, como ocupações irregulares diretamente sobre a linha de costa e ocupações sobre áreas de mangue e dunas, presentes nas praias de Ajuruteua e Pilão, o trecho supracitado sofre, de forma indireta, uma intensa interferência.

Figura 8 - Mapa dos transectos gerados pelo CASSIE indicando o comportamento da alteração da linha de costa



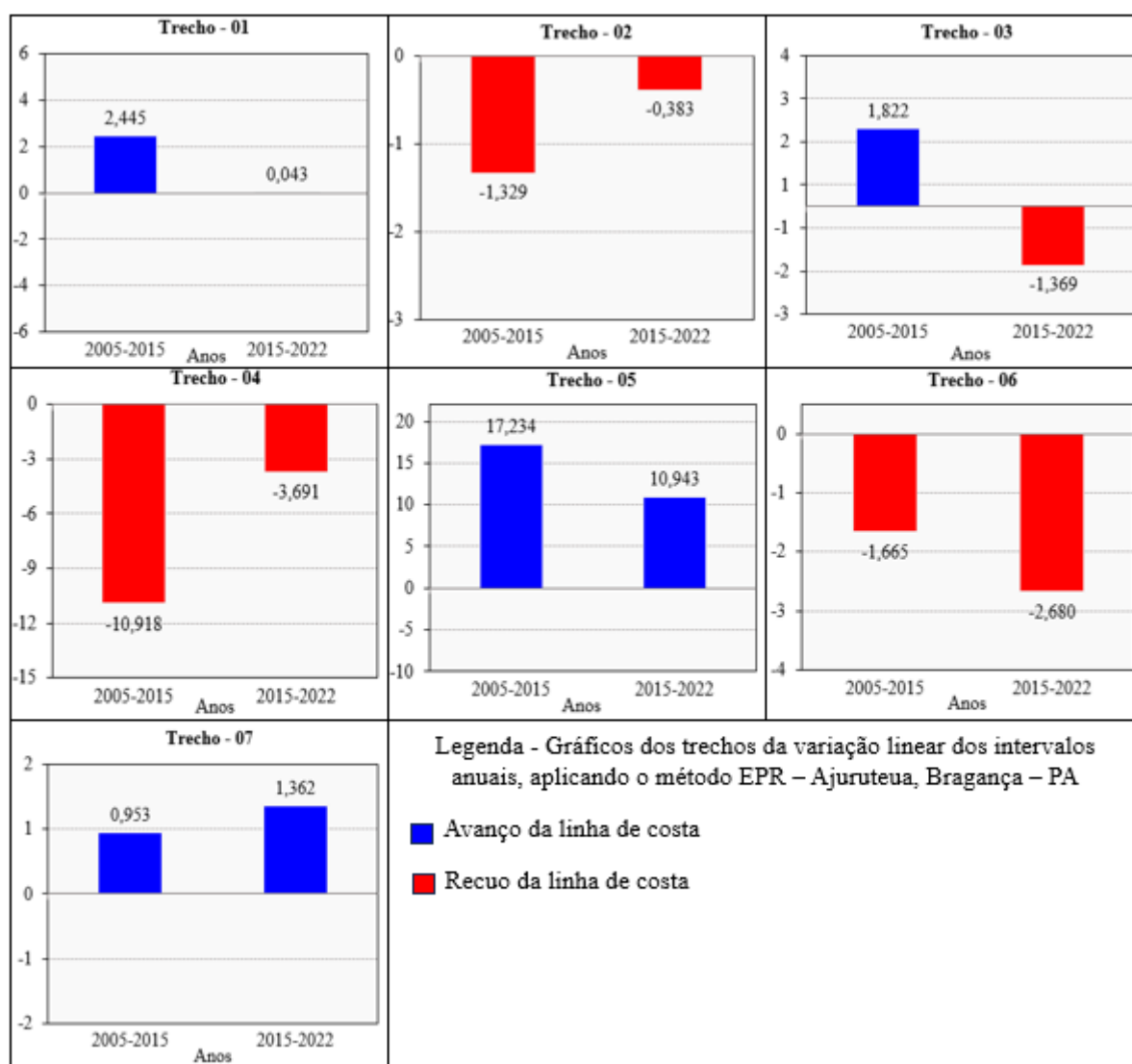
Fonte: Autores (2023).

Contudo, houve significativos processos de recuo e avanço da linha de costas, nas partes mais externas e centrais em regiões sudeste e sudoeste. O avanço da linha de costa, presente nessas regiões, ocorre devido ao fato delas serem zonas próximas às margens estuarina e canais de maré, acarretando um balanço de deposição e remoção de sedimentos ao longo das margens dos estuários e canais. Outra explicação para o processo de progradação dessa área é o baixo nível de interferência antrópica e a conservação das vegetações de naturais.

Ao analisar o comportamento da variação média linear da linha costeira, os resultados mostraram início de recuo no período de 2005 até 2015, nos trechos 02, 04 e 06 com uma taxa anual em média de recuo 4,6 m e de progradação nos trechos 01, 03, 05 e 07, alcançado um valor médio de 5,6 m por ano.

Porém, nos anos seguintes, houve um processo de progradação considerável nos trechos 05 e 07 chegando em média a 6,8 m por ano e no intervalo nos trechos 02, 03, 04 e 06, entre 2015 a 2022, houve recuo da taxa de variação chegando ao valor médio 0,6 m por ano, como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Gráficos da variação linear dos intervalos anuais, aplicando o método EPR

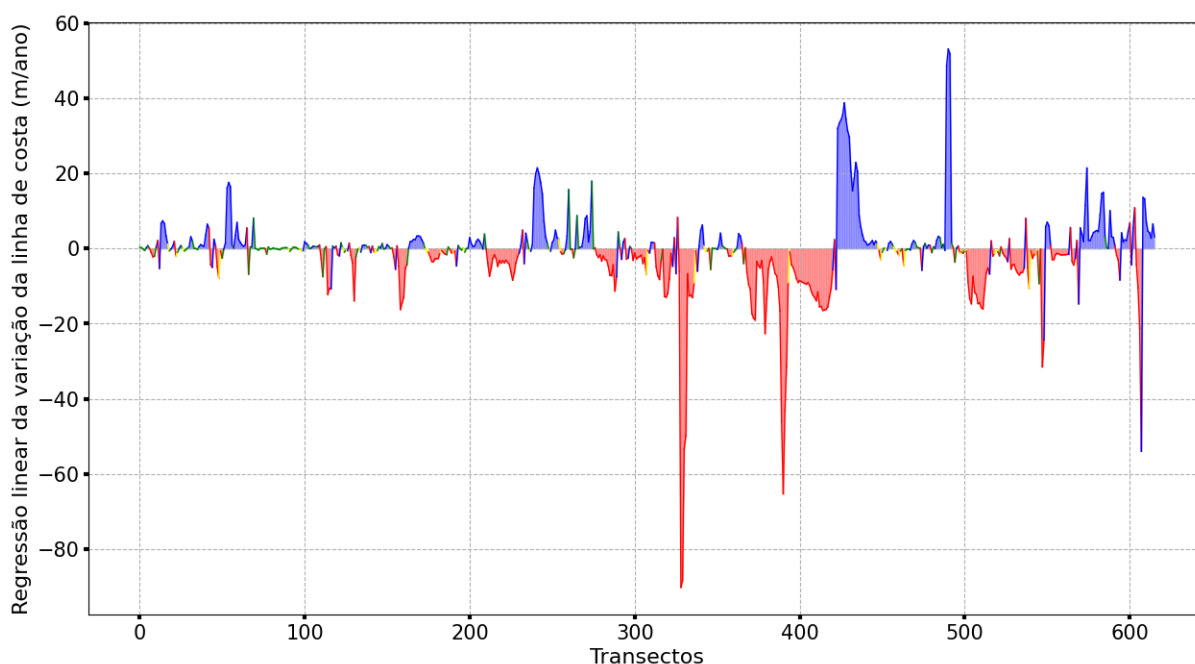


Fonte: Autores (2023).

5.1.2 Linear regression rate (LRR)

Ao analisar os resultados estatísticos de toda a área de estudo, aplicando o método LRR (Figura 10), identificou-se que a linha de costa na península de Ajuruteua, apresentou uma taxa de regressão linear média de -1,2 m/ano, demonstrando um caráter de recuo da linha de costa nessa região, principalmente nos trechos 04 e 06 e de avanço particularmente nos trechos 05 e 07. Assumindo, nos transectos 328 (-90,2 m/ano) e nos transectos 490 (53,1 m/ano), os valores extremos registrados nesta variável.

Figura 10 - Comportamento de regressão linear da variação da linha de costa (LRR) na península de Ajuruteua



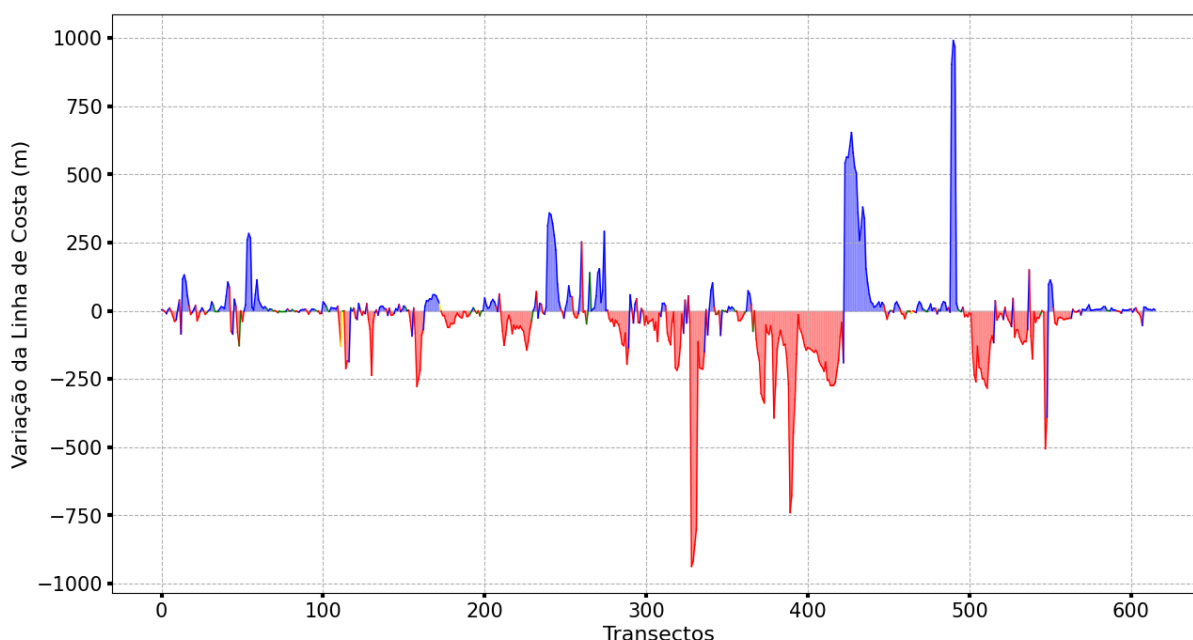
Fonte: Autores (2023).

5.1.3 Net shoreline movement (*NSM*)

Constata-se, avaliando os valores das taxas de variação linear encontrados nos últimos 17 anos através do método *NSM* (Figura 11), uma variação média de avanço de -18,5 m, destacando-se os trechos 04 e 06 com as maiores taxas de progressão da linha de costas. Atribuindo o maior valor no transecto 491 (991,4 m) e o menor no transecto 329 (-937,3 m) em toda a península analisada.

O avanço da linha de costa, presente nessa região, ocorre devido ao fato delas serem zonas próximas às margens de estuários e canais de maré. Outra explicação para o processo de progradação desse trecho é o baixo nível de interferência antrópico e a conservação das vegetações de naturais.

Figura 11 - Comportamento da alteração da variação da linha de costa (NSM) na península de Ajuruteua



Fonte: Autores (2023).

5.1.4 Considerações sobre o CASSIE

De maneira geral, é possível afirmar que a ferramenta é intuitiva, de fácil operação e eficiente do ponto de vista técnico, além de consistente em relação aos produtos e etapas de execução.

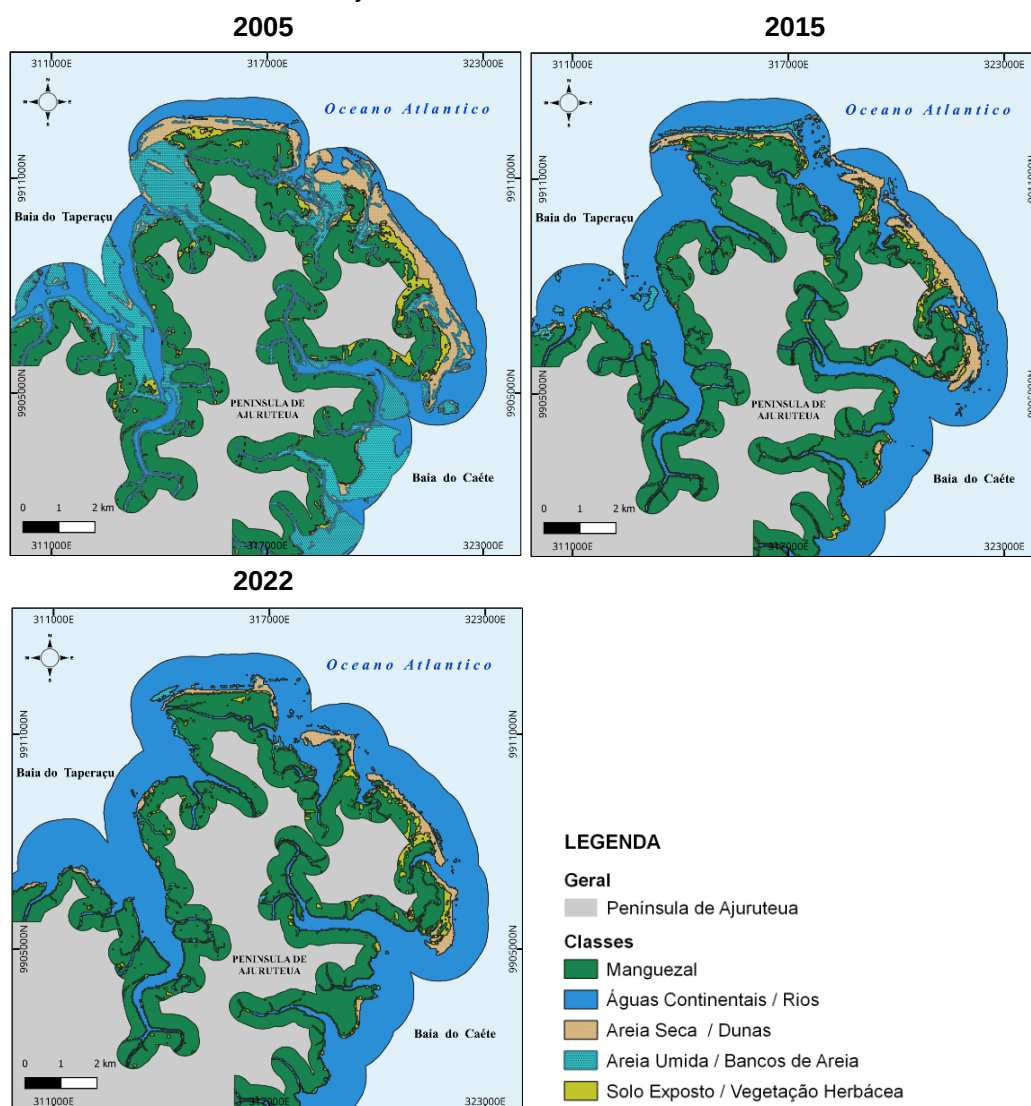
Aprofundando a análise, verifica-se, apesar da ferramenta apresentar funções que auxiliam as melhores seleções das imagens de satélites para utilização da ferramenta, a necessidade de adição de campo para identificação do comportamento dos níveis de marés presentes nas imagens, uma vez que esses níveis de maré são os principais elementos para harmonizar e reduzir as distorções decorrentes de grandes disparidades de amplitude de maré e o impacto que essa variável pode gerar nos estudos de linha de costas em ambiente de macromaré.

Segundo Almeida (2021), a questão relacionada aos ambientes de macromaré podem ser contornados com a coleta manual de imagens com situações de maré similares. Com a escolha das imagens utilizadas neste documento, a ferramenta apresentou uma resposta satisfatória em comparação a estudos presentes na península de Ajuruteua (MONTEIRO, 2009; SANTOS, 2019; SOUZA, 2021; FONSECA, 2015) em relação às mesmas variáveis (NSM, EPR e LRR) e comportamento de avanço e recuo da linha de costa.

5.2 ANÁLISE DAS ÁREAS DE MANGUEZAL – ZONA COSTEIRA

Ao analisar as cinco classes aplicadas no uso e cobertura da zona costeira na península de Ajuruteua (Manguezal; Águas estuarinas; Areia seca / dunas; Areia úmida / bancos de areia; Solo exposto / vegetação herbácea), utilizando as características de identificação e elaboração de referenciais teóricos de estudos ocorridos em Ajuruteua e ambientes similares, conforme a Tabela 3, foram geradas as classificações da zona costeiras com uma extensão total da área de estudo correspondente a 8.642,06 hectares, conforme a Figura 12.

Figura 12 – Classificação supervisionada de uso e cobertura da zona costeira da península de Ajuruteua de 2005, 2015 e 2022



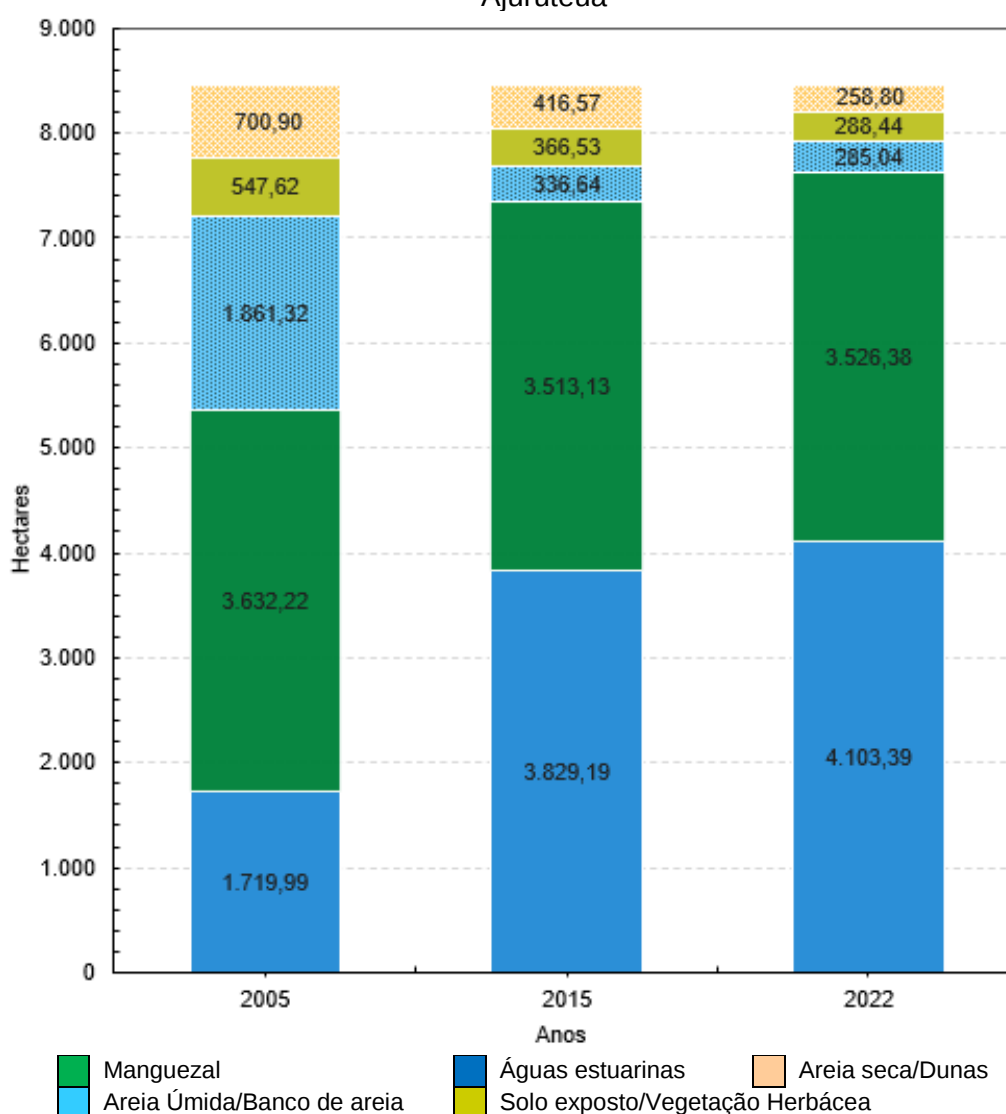
Fonte: Autores (2023).

Através dos dados obtidos por meio do uso e cobertura da área de estudo (Figura 13), foi possível identificar uma redução considerável das áreas de manguezal em

aproximadamente de 3.632,22 ha para 3.513,13 ha, entre os anos de 2005 a 2015. Entre os anos de 2015 a 2022 houve uma tendencia inversa, com leve ganho de mangue, com os valores de 3.513,13 ha para 3.526,38 ha. No entanto, constou-se uma perda liquida de 105,84 hectares.

Em compensação, houve um aumento das classes com a presença de água (Águas estuarinas e Areia úmida), totalizando um aumento de 807,44 ha e uma ocupação de grande parte das antigas regiões ocupadas pelo manguezais por essas classes.

Figura 13 – Quantificação das classes de uso e cobertura do litoral da península de Ajuruteua



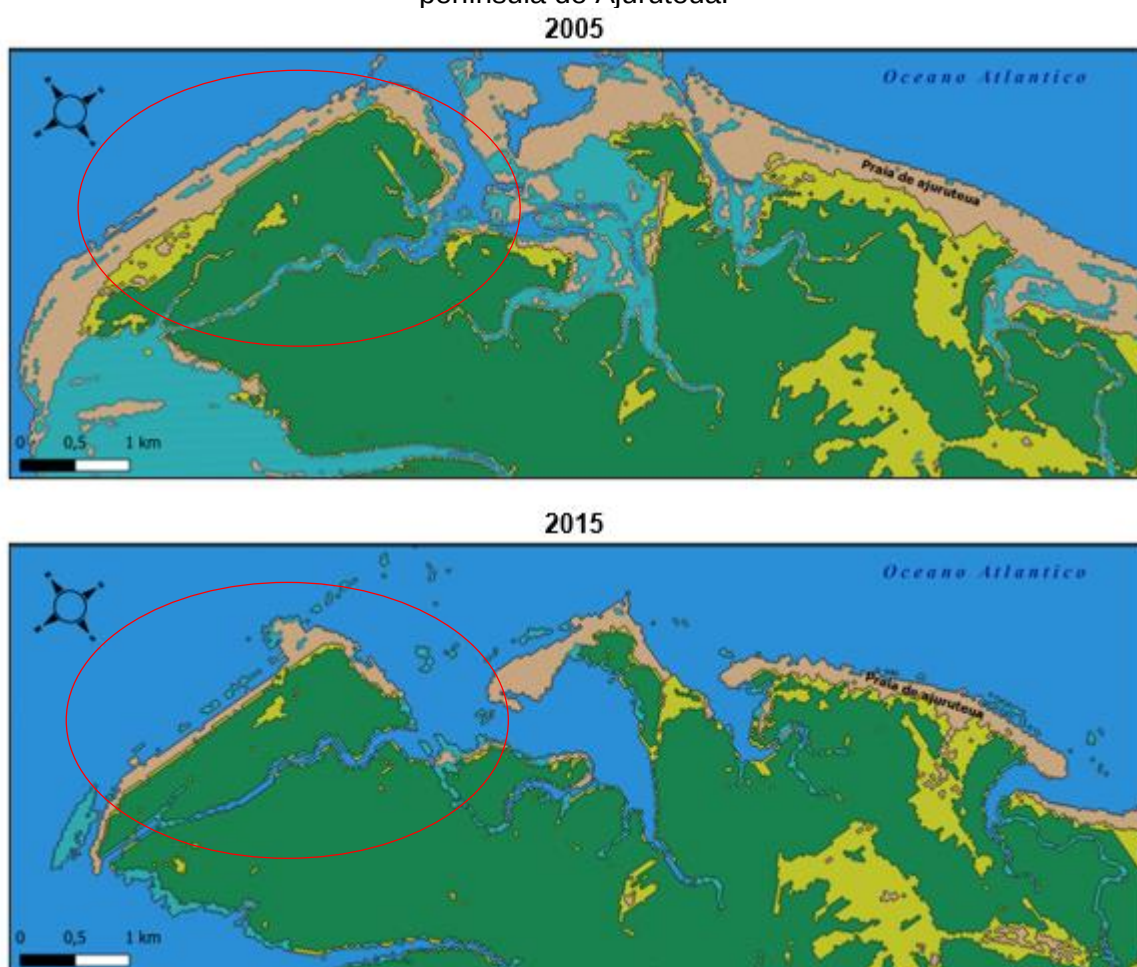
Fonte: Autores (2023).

Nas classes restantes também houve um processo de diminuição das áreas entre os anos de 2005, 2015 e 2022, destacando-se, entre elas, a diminuição das

áreas das classes: “Areia seca / Dunas” com uma perda de 442,10 ha e a classe “Solo exposto / Vegetação herbácea” com 196,56 ha.

Essa troca de ocupação dos mangues para as classes Águas estuarinas e Areia úmida / Banco de areia apresentam maior evidência nas regiões próximas à praia de pilão, devido aos processos de ocupação antrópica, e região a noroeste da península que sofre fortes ações da maré acarretando impactos na redução da vegetação natural desta região, como mostra a Figura 14.

Figura 14 – Comportamento temporal da redução de manguezal na região norte da península de Ajuruteua.



Fonte: Autores (2023).

5.2.1 Validação da classificação supervisionada

Com os pontos gerados aleatoriamente sobre a área de estudo pré-estabelecida, utilizando o plugin AcATAMA, no software Qgis, foram analisados 400 pontos e aplicados para validação das classes de uso e cobertura do solo presentes neste estudo, gerando as matrizes de confusão do classificador Maxver, referentes aos anos

de 2005 (Tabela 4), 2015 (Tabela 5) e 2022 (Tabela 6) e, por fim, analisando as correlações entre os pontos e as imagens classificadas e de referência dos mapas ICMBio (MapBiomas Collection) para cada classe temática para a classificação supervisionada gerada.

Tabela 4 - Matriz de confusão de validação da classificação supervisionada da imagem 2005
Matriz de Confusão - 2005

CLASSES	Manguezal	Águas estuarinas	Areia seca / Dunas	Areia úmida / Bancos de areia	Solo exposto / Vegetação herbácea	Total	Precisão do Usuário %
	Qtde	Qtde	Qtde	Qtde	Qtde	Qtde	
Manguezal	149	0	0	1	0	150	99,333
Águas estuarinas	1	129	0	0	0	130	99,231
Areia seca / Dunas	0	5	33	2	0	40	82,500
Areia úmida / Bancos de areia	0	10	1	29	0	40	72,500
Solo exposto / Vegetação herbácea	8	2	1	1	28	40	70,00
Total	158	146	35	33	28	400	-----
Precisão do Produto (%)	96,294	94,034	88,360	93,474	100,000	-----	

Fonte: Autores (2023).

Tabela 5 - Matriz de confusão de validação da classificação supervisionada da imagem 2015
Matriz de Confusão - 2015

CLASSES	Manguezal	Águas estuarinas	Areia seca / Dunas	Areia úmida / Bancos de areia	Solo exposto / Vegetação herbácea	Total	Precisão do Usuário %
	Qtde	Qtde	Qtde	Qtde	Qtde	Qtde	
Manguezal	150	0	0	0	0	150	100,000
Águas estuarinas	0	130	0	0	0	130	100,000
Areia seca / Dunas	3	5	28	3	1	40	70,000
Areia úmida / Bancos de areia	11	6	0	21	2	40	52,500
Solo exposto / Vegetação herbácea	5	0	2	0	33	40	82,500
Total	169	141	30	24	36	400	-----
Precisão do Produto (%)	94,268	97,925	99,676	93,899	21,75	-----	

Fonte: Autores (2023).

Tabela 6 - Matriz de confusão de validação da classificação supervisionada da imagem 2022
Matriz de Confusão - 2022

CLASSES	Manguezal	Águas estuarinas	Areia seca / Dunas	Areia úmida / Bancos de areia	Solo exposto / Vegetação herbácea	Total	Precisão do Usuário %
	Qtde	Qtde	Qtde	Qtde	Qtde	Qtde	
Manguezal	144	5	0	0	0	149	96,644
Águas estuarinas	3	125	0	0	0	130	96,154
Areia seca / Dunas	11	4	23	0	2	40	57,500

Areia úmida / Bancos de areia	1	9	0	30	0	40	75,000
Solo exposto / Vegetação herbácea	7	1	0	0	32	40	80,000
Total	166	144	23	32	34	400	-----
Precisão do Produto (%)	92,964	94,173	100,000	88,840	98,602	-----	

Fonte: Autores (2023).

Ao analisar a matriz de confusão referente a classificação do ano de 2005 (Tabela 4), foi identificado que houve uma maior correspondência com a classe “Areia seca / Dunas” e “Areia úmida / Banco de areia”, contudo, ao analisar a classe “Manguezal”, observa-se que a mesma foi confundida apenas com as classes “Solo Exposto / Vegetação herbácea” e “Águas estuarinas”.

Na tabela 05, referente ao ano de 2015, a classe que obteve maior correspondência foi “Areia seca / Dunas”, enquanto a classe “manguezal” apresentou confusão com “Areia seca / Dunas”, “Areia úmida / Bancos de areia” e Solo exposto / Vegetação herbácea”, já as demais classes não foram confundidas com classe “Manguezal”.

Diante dos resultados obtidos na matriz de confusão do ano de 2022, na classificação supervisionada (Tabela 06) apresenta as classes: “Areia seca / Dunas”; “Areia úmida / Banco de areia” e “Solo Exposto / Vegetação herbácea” com as maiores correspondências, no entanto a classe “Manguezal” teve confusão com todas as demais classes.

Tabela 7- Dados do índice Kappa e Exatidão Global das classificações supervisionadas

Classificação Temática	Exatidão Global (%)	Índice Kappa (%)
Ano - 2005	92,0	88,7
Ano - 2015	90,5	86,5
Ano - 2022	88,5	83,7

Fonte: Autores (2023).

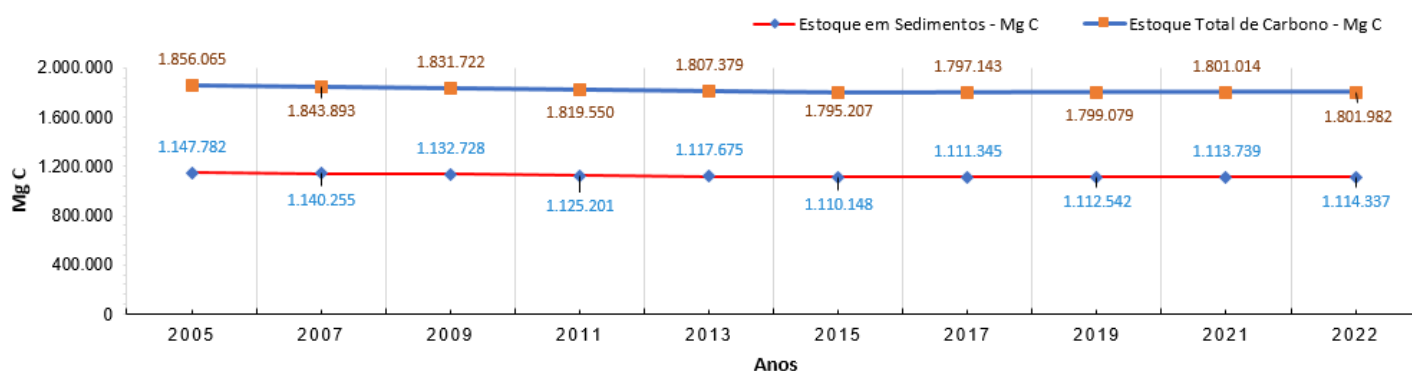
Conforme é possível verificar na Tabela 7, constata-se que o processo de classificação temática obteve um excelente resultado, tendo como justificativa os valores obtidos no coeficiente Kappa e no índice de Exatidão Global em todos os anos estudados, chegando a obterem valores acima de 80% de pontos classificados de forma correta. Por alcançarem valores acima de 0,8, os valores do índice Kappa também apresentaram uma qualidade excelente para todos os anos em estudo, conforme a classificação de Landis & Kach – 1977.

5.2.2 Comportamento do estoque de carbono sobre a região costeira

O processo de análise do estoque de carbono presente na região litorânea da península de Ajuruteua, entre os anos de 2005 a 2022, foi feito por meio da quantificação das áreas de mangue presentes em cada um dos anos das imagens de satélite estudadas neste projeto. Em seguida, foi feita a relação de quantidade de carbono por hectare de manguezal e através da fórmula presente no item 4.2.2 - *Processamento e classificação das áreas de mangue* e das estimativas de estudos similares de estoque em mangues amazônicos e manguezais na região de Ajuruteua (Kauffman et al., 2018; Kauffman et al., 2015; Matos et al., 2020; Beloto et al. 2023). Foi assumido um estoque médio de carbono total nos ecossistemas de manguezal de $511 \pm 63 \text{ Mg C ha}^{-1}$.

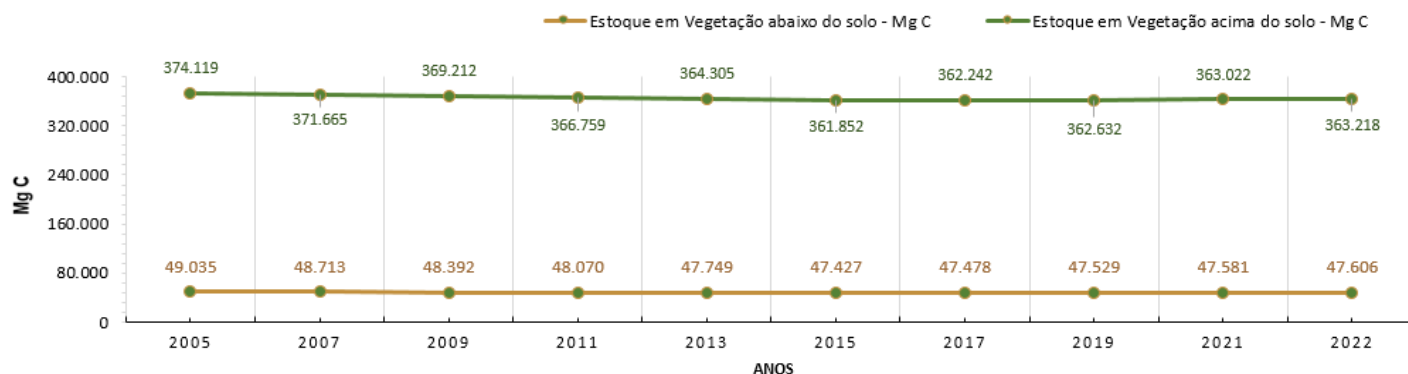
Além disso, também foram utilizados os dados da literatura para investigar os estoques médios de carbono em mangues amazônicos também em compartimentos específico dos manguezais, como estoque de carbono em sedimentos ($316 \pm 82 \text{ Mg C ha}^{-1}$), estoque em vegetação abaixo e acima do solo (respectivamente $103 \pm 54 \text{ Mg C ha}^{-1}$ e $13,5 \pm 5,8 \text{ Mg C ha}^{-1}$). A partir dos dados adquiridos foi gerado os gráficos referentes ao comportamento do estoque de carbono ao longo dos anos de 2005 a 2022, conforme a figura 15 e 16.

Figura 15 - Comportamento do estoque de carbono total e de sedimentos entre os anos de 2005 a 2022 em Ajuruteua



Fonte: Autores (2023).

Figura 16 - Comportamento do estoque de carbono em vegetação acima e baixo do solo entre os anos de 2005 a 2022 em Ajuruteua



Fonte: Autores (2023).

Apesar do pequeno ganho de área de manguezal no período mais recente, entre os anos de 2015 a 2022, ao analisar todo o período dos 17 anos (2005 a 2022) da área litorânea, verificou-se uma redução e, conseqüentemente, uma perda dos estoques de carbono da floresta de manguezal de Ajuruteua. A perda de estoque total do manguezal foi estimada em 54.081,8 Mg C em 17 anos.

As perdas dos estoques nos outros compartimentos foram 45.774 Mg C nos solos, 10.901 Mg C na vegetação acima do solo e 1.429 Mg C na vegetação abaixo do solo e nos sedimentos com 33.444 Mg C. Esses resultados corroboram que a erosão costeira pode atuar como um fator importante atuando sobre a perda de áreas de mangue na região amazônica do Brasil (FRANÇA, 2002; Kauffman et al. (2018); Beloto et al. (2023). Esses resultados também corroboram que processos naturais, além de fatores antropogênicos também vem causando perdas significativas de carbono, com potencial emissão de CO₂ para a atmosfera, referente ao estoque proeminente da vegetação acima e baixo do solo

6 CONCLUSÕES

O comportamento e as oscilações das linhas de costa, presentes na península de Ajuruteua durante o intervalo de 2005 a 2022, apresentou um intenso processo de recuo e progradação das linhas de costa ao longo de todo o período estudado, uma vez que, entre os 616 transectos produzidos neste estudo, a área de interesse apresentou 61% dos transectos entre a classe erosão ou erosão crítica, 33% como acresção e apenas 6% da classe estável. Portanto, de maneira geral, houve predomínio de processos erosivos na região de estudo. Esses processos são comuns e característicos em regiões de macromaré, porém, ao analisar esses dados, foi

identificado, de maneira relevante, a interferência de elementos climáticos e/ou ambientais ocorridos na região em anos específicos, além da interferência humana que prejudica diretamente as áreas ambientes que são essenciais para o processo de estabilidade e proteção das áreas litorâneas de Ajuruteua.

Ao analisar os 7 trechos presentes na península, foi possível identificar que três trechos apresentam uma média de variação de acreção até o ano de 2022. Os trechos foram os trechos 01, 05 e 07, os quais apresentaram uma taxa de variação média de 1,2, 14,1 e 1,2 m/ano, respectivamente. Por estarem em áreas geográfica propensas ao processo deposição sedimentar e baixas ações das marés e ondas para ações erosivas, essas regiões apresentam uma tendência de progradação; outro ponto para essa característica é a conservação de ambientes e vegetações estuarinas, que servem como uma barreira natural, auxiliando no processo de estabilidade e na redução de prováveis impactos erosivos.

Os demais trechos apresentaram características erosivas, destacando-se os trechos 02, 04 e 06, cuja taxa de variação média foi de recuo da linha de costa de - 0,9 m/ano, -7,3 m/ano e -2,2 m/ano, respectivamente. Por causa da disposição geográfica do trecho, no trecho 04 existe um processo erosivo natural: a interferência direta das correntes litorâneas e dos ventos alísios. Ademais, é possível elencar ainda as atividades antrópicas, presentes no trecho e nas proximidades, como outro agente de ação erosiva, tendo em mente que as ocupações irregulares e a devastação dos ecossistemas naturais (mangues e dunas) reduzem a proteção natural das zonas costeiras. Essas ações também estão presentes no trecho 03.

O trecho 03 apresenta um equilíbrio entre o processo erosivo e o processo de acreção da linha de costa. Esse dinamismo acontece por causa da presença de áreas próximas a canais estuarinos e são propensos a uma alteração da zona costeira, tanto para o processo de deposição sedimentar como para remoção de sedimentos.

Ao analisar a relação entre a área litorânea, especificamente o processo de ocupação do manguezal, identifica-se que, em determinadas áreas que passam por processo de recua do linha costeira entre os anos de 2005 a 2022, sofreram reduções de mangue por processo de ocupação antrópica ou por pelo recuo natural da linha de costa e, devido a essa remoção da área de manguezal, acarretou em perdas potenciais significativas do estoque de carbono, tanto pela remoção da vegetação acima e abaixo do solo, como também através da remoção de sedimentos deste

ecossistema. Essas perdas dos estoques de carbono são traduzidas em emissões potenciais de CO₂ para a atmosfera. Nossos resultados, inéditos para manguezais amazônicos, indicam que os processos erosivos podem atuar como fontes adicionais de CO₂ para a atmosfera em regiões costeiras dominadas pelas florestas de manguezais. Esses processos atuantes na Península de Ajuruteua podem significar uma realidade atuantes em muitas outras localidades no Brasil e no mundo. Esse processo deve ser identificado e quantificado, com urgência, tendo em vista a emergência climática contemporânea (IPCC, 2023).

REFERÊNCIAS

- ADEBISI, Naheem, Balogun, A. L., Mahdianpari, M., & Min, T. H. Assessing the Impacts of Rising Sea Level on Coastal Morpho-Dynamics with Automated High-Frequency Shoreline Mapping Using Multi-Sensor Optical Satellites. **Remote Sensing**, v. 13, n. 18, p. 3587, 2021.
- ALCÂNTARA, Bianca Delamare Passinho. **Quantificação e caracterização de matéria orgânica em sedimentos de mangue, visando estudo geoquímico (Baía de Inajá, São João de Pirabas NE do Pará)**. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2002.
- ALMEIDA, L. P., de Oliveira, I. E., Lyra, R., Dazzi, R. L. S., Martins, V. G., & da Fontoura Klein, A. H. Coastal Analyst System from Space Imagery Engine (CASSIE): Shoreline management module. **Environmental Modelling & Software**, v. 140, p. 105033, (2021).
- ALVES, Alexandre Brito. PA-458 (estrada Bragança-Ajuruteua): turismo e desenvolvimento de Bragança-PA. **Revista Sociais e Humanas**, v. 31, n. 3, p. 48-65, 2018.
- ASSUNÇÃO, Luis Emanuel Silva. **EVOLUÇÃO DA FRAGMENTAÇÃO DA VEGETAÇÃO NATIVA NO MUNICÍPIO DE CHAPADINHA, MARANHÃO. 2022**. Dissertação, Universidade Federal do Maranhão, Chapadinha, 2002
- ATWOOD, T. B., Connolly, R. M., Almahasheer, H., Carnell, P. E., Duarte, C. M., Ewers Lewis, C. J., & Lovelock, C. E. Global patterns in mangrove soil carbon stocks and losses. **Nature Climate Change**, v. 7, n. 7, p. 523-528, 2017.
- AUGUSTO, R. C., Cruz, C. B. M., da Silva Seabra, V., & Martins, J. S. Delimitação de zona ripária em planícies através do Índice Normalizado de Diferença da Água (NDWI) e série multitemporal Landsat. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 01, p. 234-249, 2022.
- BELOTO, N.; Cotovicz, L. C.; Rodrigues, J. V.; Gmach, M. R.; Zimmer, M.; Helfer, V.; Spares, M.; Bezerra, L. E. 2023. Blue carbon stock heterogeneity in Brazilian mangrove forests: A systematic review. **Marine Pollution Bulletin**, 115694. doi: 10.1016/j.marpolbul.2023.115694
- BOUILLON, S., Borges, A. V., Castañeda-Moya, E., Diele, K., Dittmar, T., Duke, N. C., & Twilley, R. R. Mangrove production and carbon sinks: a revision of global budget estimates. **Global biogeochemical cycles**, v. 22, n. 2, 2008.
- BRASIL, COSTEIRA NO. Panorama da erosão costeira no Brasil. 2018.
- CHAGAS, Mariana Campista. **Comparação da Produtividade Primária Bruta entre os Sensores OLI/TIRS e MODIS. 2018**. 43 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) - Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica - RJ, 2018.

CHANG, M., Li, P., Li, Z., & Wang, H. Mapping Tidal Flats of the Bohai and Yellow Seas Using Time Series Sentinel-2 Images and Google Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 14, n. 8, p. 1789, 2022.

CPRM.(2015). **Reconhecimento de áreas de alto e muito alto risco a movimentos de massa e enchentes: Bragança, Pará**. Produto Cartográfico, Belém: CPRM -Serviço Geológico do Brasil.

CONCATTO, F.; ALMEIDA, L.P.M.; LYRA, R., DAZZI, R.L.S.; KLEIN, A.H.F. e- C.A.S.S.I.E.: Uma ferramenta para análise e mapeamento de regiões costeiras utilizando a plataforma Google Earth Engine. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PRAIAS ARENOSAS (SBPA), 2. & ENCONTRO NACIONAL DE GERENCIAMENTO COSTEIRO (ENCOGERCO)**, 11., 2018, Florianópolis. Anais Florianópolis, 2018.

DA SILVA, JANAÍNA BARBOSA. **Sensoriamento remoto aplicado ao estudo do ecossistema manguezal em Pernambuco. 2019**. Dissertação (Doutorado em Geografia – departamento de ciências geográficas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife , 2019.

DA SILVA RODRIGUES, Hygson et al. Vulnerabilidade econômica: produto da erosão costeira em Ajuruteua-Bragança/PA. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 16, p. e109101623822-e109101623822, 2021.

DA SILVA, JANAÍNA BARBOSA. Sensoriamento remoto aplicado ao estudo do ecossistema manguezal em Pernambuco. 2019.

DA SILVA BRAGA, Francisca de Paula. Morfologia e sedimentologia da praia de macromaré de Ajuruteua, Amazônia, Norte do Brasil. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 60, 2007.

DE GOUVEIA SOUZA, Celia Regina. A erosão costeira e os desafios da gestão costeira no Brasil. **Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management**, v. 9, n. 1, p. 17-37, 2009.

DONATO, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M., & Kanninen, M. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. **Nature geoscience**, v. 4, n. 5, p. 293-297, 2011.

DUARTE DE ALMEIDA, I.; CRAVEIRO, J.; SILVA, João. Erosion perceptions, beliefs and the sustainability of coastal areas: an individual or collective endeavour?. In: **Proceedings of the 22nd International Sustainable Development Research Society Conference ISDRS 2016: Rethinking Sustainability Models and Practices: Challenges for the New and Old World Contexts**. International Sustainable Development Research Society, 2016.

ESCUADERO-CASTILLO, M., Felix-Delgado, A., Silva, R., Mariño-Tapia, I., & Mendoza, E. Beach erosion and loss of protection environmental services in Cancun, Mexico. **Ocean & Coastal Management**, v. 156, p. 183-197, 2018.

FONSECA, Dianne; CONCEIÇÃO, Raimundo Almir Costa da; ASP NETO, Nils Edwin. **Ação emergencial para delimitação de áreas em alto e muito alto risco a enchentes e movimentos de massa: Bragança, Pará.** CPRM, 2015.

FRANÇA, Francyskeila Luana M.; PROST, Maria Thereza Ribeiro C. Áreas alteradas em manguezais: planície costeira bragantina, Pará. **Áreas alteradas em manguezais: planície costeira bragantina, Pará**, 2002.

GOMES, L. F., de Araujo, E. C., da Costa, J. E. A., Braga, C. F., & Fernandes, M. E. B. Replanteio de mudas de espécies arbóreas de mangue em florestas desmatadas na península de Ajuruteua, Bragança-Pará. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 8, n. 2, p. 6-19, 2017.

HE, W., Ye, C., Sun, J., Xiong, J., Wang, J., & Zhou, T. Dynamics and drivers of the alpine timberline on Gongga mountain of Tibetan plateau-adopted from the Otsu method on google earth engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 16, p. 2651, 2020.

IBGE. (2010). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 03.01 (2022).

IPCC, 2023: *Summary for Policymakers. Climate Change 2023: Synthesis report of the ipcc sixth assessment report (AR6)*. Disponível em: https://report.ipcc.ch/ar6syr/pdf/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf

JAMALUDDIN, I., Thaipisutikul, T., Chen, Y. N., Chuang, C. H., & Hu, C. L. MDPRePost-Net: A Spatial-Spectral-Temporal Fully Convolutional Network for Mapping of Mangrove Degradation Affected by Hurricane Irma 2017 Using Sentinel-2 Data. **Remote Sensing**, v. 13, n. 24, p. 5042, 2021.

LOTT, S., Hein, C., Klein, A., Connell, J., de Oliveira, M., Pinto, M., & Galvao, W.. Centennial-scale coastal landform development associated with longshore transport and headland bypassing: Sao Francisco do Sul Island, Brazil. In: **AGU Fall Meeting Abstracts**. 2021. p. EP22A-03.

KANWAL, S., Ding, X., Sajjad, M., & Abbas, S. Three decades of coastal changes in Sindh, Pakistan (1989–2018): a geospatial assessment. **Remote Sensing**, v. 12, n. 1, p. 8, 2019.

KAUFFMAN, J. B., Hernandez Trejo, H., del Carmen Jesus Garcia, M., Heider, C., & Contreras, W. M. Carbon stocks of mangroves and losses arising from their conversion to cattle pastures in the Pantanos de Centla, Mexico. **Wetlands Ecol Manage**.

KAUFFMAN, J. B., BERNARDINO, A.F., FERREIRA, T.O., GIOVANNONI, L.R., GOMES, L.E.O., ROMERO, D.J., JIMENEZ, L.C. & RUIZ, F.. (2018b). Carbon Stocks of Mangroves and Salt Marshes of the Amazon Region, Brazil. **Biology Letters**, 14, no. 9 (2018): 20180208.

KLEIN, A.H.F.; ALMEIDA, L.P.M.; FILIPPI, B.; PINTO, M.W.; GALVÃO, W.F.L.; COSTA, W.L.L.; DALINGHAUS, C.; PRADO, M.F.V. Subida do nível do mar e a

Babitonga: uma abordagem eco-morfodinamica para prever e mitigar impactos. **Relatório Técnico Final** – CNPq, 2022. 363p.

LEATHERMAN, S. P.; CLOW, B. UMD shoreline mapping project. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Society Newsletter**, v. 22, n. 3, p. 5-8, 1983.

LEATHERMAN, Stephen P. Coastal erosion and the United States national flood insurance program. **Ocean & Coastal Management**, v. 156, p. 35-42, 2018.

LEZAUN, Javier. Hugging the shore: tackling marine carbon dioxide removal as a local governance problem. **Frontiers in Climate**, p. 98, 2021.

LI, C., Zhu, L., Dai, Z., & Wu, Z. Study on Spatiotemporal Evolution of the Yellow River Delta Coastline from 1976 to 2020. **Remote Sensing**, v. 13, n. 23, p. 4789, 2021.

LIAO, P. S., Chen, T. S., & Chung, P. C.. A fast algorithm for multilevel thresholding. **J. Inf. Sci. Eng.**, v. 17, n. 5, p. 713-727, 2001.

LIU, William Tse Horng. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Oficina de Textos, 2015.

LLANO, X. C. AcATaMa-QGIS plugin for Accuracy Assessment of Thematic Maps. **AcATaMa**, 2019.

MATOS, C. R. L., BERRÊDO, J. F., MACHADO, W., SANDERS, C. J., METZGER, E., & COHEN, M. C. L. (2020). Carbon and nutrients accumulation in tropical mangrove creeks, Amazon region. **Marine Geology**, 429, 2020. doi:10.1016/j.margeo.2020.106317

MCFEETERS, Stuart K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International journal of remote sensing**, v. 17, n. 7, p. 1425-1432, 1996.

MCLEOD, Elizabeth et al. A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 9, n. 10, p. 552-560, 2011. MONTEIRO, M. C.; PEREIRA, L. C. C.; DE OLIVEIRA, S. M. O. Morphodynamic changes of a macrotidal sand beach in the Brazilian Amazon coast (Ajuruteua-Pará). **Journal of Coastal Research**, p. 103-107, 2009.

MUEHE, Dieter. Aspectos gerais da erosão costeira no Brasil. **Mercator-Revista de Geografia da UFC**, v. 4, n. 7, p. 97-110, 2005.

NASCIMENTO JR, Wilson R. Mapeamento de mudanças no maior cinturão contínuo de mangue amazônico usando classificação baseada em objetos de imagens de satélite multissensor. **Ciência Estuarina, Costeira e de Plataforma**, v. 83-93, 2013.

NELLEMAN, Christian; CORCORAN, Emily (Ed.). **Blue carbon: the role of healthy oceans in binding carbon: a rapid response assessment**. UNEP/Earthprint, 2009.

OLIVEIRA, Ubiraniilson Santos de. Percepção de risco e vulnerabilidade social dos moradores de Ajuruteua. Orientadora: Márcia Aparecida da Silva Pimentel. 2018. 77 f. Dissertação (Mestrado em Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018. **IEEE transactions on systems, man, and cybernetics**, v. 9, n. 1, p. 62-66, 1979.

PENHA, Thales Vaz. **Deteção de áreas queimadas na Amazônia utilizando imagens de média resolução espacial, técnicas de GEOBIA e mineração de dados**. 2018. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto)–Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

REBOUÇAS, I. S., Duarte, C. R., SILVA NETO, C. A., & MIRANDA, M. Aplicação do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) e Água (NDWI) para análise de depósitos argilosos e arenosos no baixo curso do Rio Jaguaribe/CE. **Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos**, p. 183-186, 2019.

RODRIGUES, Hygson da Silva. **Análise de perdas econômicas geradas pela erosão em ambiente praiano: caso da praia de Ajuruteua – Bragança/PA**. 43 f. Dissertação (Mestrado em Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

RODRIGUES, Wendel Barbosa; DE MORAIS, Fernando; PASCHOAL, Leticia Giuliana. Índice de diferença normalizada da água (NDWI) calculado para estações chuvosas e secas na bacia do Córrego Barreiro, Lagoa da Confusão–TO. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, v. 1, p. 254-263, 2017.

ROVAL, A. S., Twilley, R. R., Worthington, T. A., & Riul, P. Brazilian Mangroves: Blue Carbon Hotspots of National and Global Relevance to Natural Climate Solutions. **Frontiers in Forests and Global Change**, p. 217, 2022.

SILVA NETO, C. Â. D., Duarte, C. R., Souto, M. V. S., Freire, E. V., Sousa, W. R. N. D., & Silva, M. T. D. Caracterização dos setores erosivos e deposicionais da linha de costa de Icapuí (CE) com base em produtos de sensoriamento remoto e técnicas de geoprocessamento. *Revista Brasileira de Geografia Física*, [s. l.], v. 13, n. 01, p. 143-155, 2020.

SAMANTA, S., Hazra, S., Mondal, P. P., Chanda, A., Giri, S., French, J. R., & Nicholls, R. J. Assessment and Attribution of Mangrove Forest Changes in the Indian Sundarbans from 2000 to 2020. **Remote Sensing**, v. 13, n. 24, p. 4957, 2021.

SANTOS, Bruna Mykaelle Pereira. **Variabilidade hidroclimática e sua relação com a erosão costeira na Praia de Ajuruteua (Bragança-Pa)**. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Energias Renováveis) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus Belém, PA, 2019.

SOUZA, C. A., Duarte, L. F. A., João, M. C., & Pinheiro, M. A. Biodiversidade e conservação dos manguezais: importância bioecológica e econômica. **Educação Ambiental sobre Manguezais. São Vicente: UNESP, Instituto de Biociências, Câmpus do Litoral Paulista**, p. 16-56, 2018.

SOUZA, A. P. S., Souza, I. S., Olavo, G., Lobão, J. S. B., & São José, R. B. Mapeamento e identificação de vetores responsáveis pela supressão do manguezal na Zona Costeira do Baixo Sul da Bahia, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 07, p. 2503-2521, 2019.

SOUZA, Hyago Elias Nascimento. Desenvolvimento costeiro na Amazônia: problemas socioambientais do litoral Paraense, Brasil. **Natural Resources**, v. 11, n. 1, p. 62-73, 2021.

SUSTENTÁVEIS, Programa Cidades et al. Programa cidades sustentáveis. 2013.

THIELER, E. Robert; DANFORTH, William W. Historical shoreline mapping (I): improving techniques and reducing positioning errors. **Journal of Coastal Research**, p. 549-563, 1994.

YIRGA, Andargachew; ADDISU LEGESSE, Solomon; MEKURIAW, Asnake. Carbon stock and mitigation potentials of Zeghie natural forest for climate change disaster reduction, Blue Nile Basin, Ethiopia. **Earth Systems and Environment**, v. 4, n. 1, p. 27-41, 2020.