



Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras

Monografia para obtenção do grau de Licenciatura em Geologia Marinha

**Estudo da dinâmica da linha de costa na região de Mecúfi-Cabo Delgado utilizando o sistema digital de análise da linha de costa (DSAS)**



**Autor:**

Neusio Marcelo Miguel Niquice

Quelimane, Julho 2025



Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras

Monografia para obtenção do grau de Licenciatura em Geologia Marinha

**Estudo da dinâmica da linha de costa na região de Mecúfi-Cabo Delgado utilizando o sistema digital de análise da linha de costa (DSAS)**

**Autor:**

*Neusio Marcelo Miguel Niquice*

---

(Neusio Marcelo Miguel Niquice)

**Supervisor:**

*H Machaieie*

(Prof. Doutor Hélder Arlindo Machaieie)

**Mesa de Júri**

*Stelio Mangue*

(Lic. Stelio Mangue)

**Avaliador**

*Oldim Lodes A. Chuquelane Vilanculo*

(Lic. Oldim Lodes A. Chuquelane Vilanculo)

Quelimane, Julho 2025

## DEDICATORIA

Dedico este trabalho, com todo o amor e gratidão, à minha querida mãe Nilza José Laice e ao meu amado pai Miguel Alfredo Niquice, que são o alicerce da minha vida, o meu motor e a minha fonte inesgotável de força. Cada passo que dou carrega o reflexo dos seus ensinamentos, do seu amor incondicional e do seu sacrifício silencioso. A Deus, dedico toda a honra e glória, pois tem sido meu refúgio, meu guia fiel em todos os momentos, nos dias de luz e nos dias de sombra. Sem Ele, nada disso seria possível. Aos meus irmãos Fernando, Alice, Helsa, Mariana, Miguel, Wilton, Lúcia e Juvenália e Junilde, meu eterno agradecimento pelo carinho, pelas palavras de incentivo e por cada gesto de apoio. Em cada um de vocês encontrei um pedaço de abrigo e motivação. À minha querida avó Alice, que com suas orações incansáveis tem sido um pilar em minha jornada, e à minha avó Vitória, cujos ensinamentos e amor escoam no meu coração, deixo minha profunda reverência. e em especial, dedico este trabalho a toda a minha família, meus amigos em especial Lúcia da Gloria, Jesualdo Chirruque, que representam para mim um porto seguro, um lar de afectos e valores. Esta conquista é também de vocês. Obrigado por nunca desistirem de mim.

*"O conhecimento é a única força capaz de transformar a dúvida em descoberta, e cada desafio superado é um passo rumo à evolução da mente e do espírito."*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus Todo poderoso, por me conceder saúde, força e sabedoria ao longo desta jornada académica.

Expresso a minha profunda gratidão aos meus pais, Miguel Niquice e Nilza Laice, pelo amor incondicional, apoio constante e por serem a base da minha formação. Estendo este agradecimento a toda a minha família, cujo encorajamento foi essencial nos momentos mais desafiantes.

Ao meu orientador, Professor Hélder Machaieie, deixo um agradecimento especial pelo suporte técnico, científico e pela orientação ao longo deste trabalho. Reconheço igualmente o contributo valioso dos docentes Dr. Stélio Mangué, Dra. Adelina, Dra. Carlota, Dr. Banito, entre outros professores que, com dedicação e partilha de conhecimento, enriqueceram a minha formação o meu sincero muito obrigado a todos vós.

À Turma de Geologia Marinha do ano de 2021, o meu apreço por todo o companheirismo e momentos partilhados. Um agradecimento especial aos colegas Stélio de Jesus, Stélio Tomé, Mateus Monforte, Yurica, Rosendo, Evander, Érica, Victor, Evodio, Mateus Buduia, Jeremias e Luís por fazerem parte desta caminhada com amizade e apoio.

Aos meus amigos-irmãos Adelino, Agira, Michel, Charles Tovele, Viegas e Jú Balate, agradeço pelo incentivo, pela amizade genuína e pelo apoio prestado em todas as fases deste processo. Por fim, agradeço a todos aqueles que, de forma directa ou indirecta, contribuíram para a concretização deste trabalho. A todos, o meu muito obrigado!

## DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu Neusio Marcelo Miguel Niquice declaro sob minha honra, que este trabalho intitulado ” *Estudo da dinâmica da linha de costa na região de Mecúfi-Cabo Delgado utilizando o sistema digital de análise da linha de costa (DSAS)* ” é da minha autoria tendo contado com a supervisão do Prof. Doutor Hélder Arlindo Machaieie e nunca foi apresentada para obtenção de qualquer grau e que ela constitui o resultado do meu labor individual. Esta monografia é apresentada em cumprimento parcial dos requisitos de obtenção do grau de licenciatura em Geologia Marinha, da Universidade Eduardo Mondlane.

Autor

*Neusio Marcelo Miguel Niquice*

-----  
Quelimane, Julho de 2025

## Resumo

O presente estudo analisa a variação da linha de costa na região de Mecúfi, Cabo Delgado, com o objectivo de compreender os padrões de erosão e acreção nas últimas décadas. A metodologia adoptada baseou-se na utilização do sistema DSAS (Digital Shoreline Analysis System) versão 4.3 para calcular as taxas de mudança da linha de costa, com base em imagens Landsat (TM, ETM+ e OLI). As linhas de costa foram extraídas a partir do índice NDWI (Índice Normalizado de Diferença da Água), que permitiu realçar corpos hídricos e melhorar a separação entre terra e mar. Foram aplicadas métricas como a taxa de mudança linear (EPR) e a regressão linear (LRR) para estimar a dinâmica da linha de costa. Paralelamente, foram analisadas variáveis ambientais, como a precipitação extrema, ventos, a altura significativa das ondas (utilizando o percentil 99) e o nível médio do mar, com dados provenientes das plataformas Copernicus e APDRC. A análise do uso e ocupação do solo foi realizada por meio de classificação de Máxima Verosimilhança (Maximum Likelihood), no software ArcGIS 10.5. Os resultados indicam que no período de 1994 a 2024 a região de Mecúfi apresentou uma taxa média de recuo da linha de costa de  $-0,39$  m/ano, com deslocamentos que chegaram a 12,09 metros. Contudo, a análise sectorial revelou que o Sector 3 foi o mais afectado pela erosão, apresentando os maiores índices de recuo da linha de costa em comparação com os Sectores 1 e 2. De forma geral, o recuo da linha de costa na região de Mecúfi resultou da combinação dos factores como os eventos extremos de precipitação, ventos intensos, altura significativa das ondas e o aumento de solos expostos, os quais favoreceram directamente a instabilidade e a mobilização dos sedimentos costeiros.

**Palavras-chaves:** Variação da linha costa, DSAS, Erosão e Deposição, Uso e ocupação do solo.

## Abstract

The present study analyzes shoreline variation in the Mecúfi region, Cabo Delgado, with the aim of understanding the patterns of erosion and accretion over recent decades. The adopted methodology was based on the use of the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.3 to calculate shoreline change rates using Landsat images (TM, ETM+, and OLI). Shorelines were extracted using the Normalized Difference Water Index (NDWI), which allowed for the enhancement of water bodies and improved land-sea separation. Metrics such as the End Point Rate (EPR) and Linear Regression Rate (LRR) were applied to estimate shoreline dynamics. In parallel, environmental variables such as extreme precipitation, winds, significant wave height (using the 99th percentile), and mean sea level were analyzed based on data from the Copernicus and APDRC platforms. Land use and land cover analysis was conducted through Maximum Likelihood classification in ArcGIS 10.5. The results indicate that between 1994 and 2024, the Mecúfi region experienced an average shoreline retreat rate of -0.39 m/year, with displacements reaching up to 12.09 meters. However, the sectoral analysis revealed that Sector 3 was the most affected by erosion, showing the highest rates of shoreline retreat compared to Sectors 1 and 2. Overall, the shoreline retreat in the Mecúfi region resulted from the combination of factors such as extreme precipitation events, strong winds, significant wave heights, and the increased exposure of bare soils, all of which directly contributed to coastal sediment instability and mobilization.

**Keywords:** Coastline variation, DSAS, Erosion and Deposition, Land use and occupation.

## Lista de abreviaturas

Abreviatura	Significado
➤ USGS	United States Geological Survey
➤ DSAS	Digital Shoreline Analysis System
➤ LRR	Linear Regression Rate
➤ EPR	End Point Rate
➤ NSM	Net Shoreline Movement
➤ mm	milímetro
➤ m	Metro
➤ OLI	Operational Land Imager
➤ TM	Thematic Mapper
➤ NDWI	Normalized Difference Water Index
➤ 2D	Duas dimensões
➤ $V_T$	Velocidade total
➤ MICOA	Ministério para a Coordenação da Acção Ambiental

**Lista de figuras**

Figura 1: Ilustração das principais componentes de uma praia. Fonte: (Muehe, 1998) .....	7
Figura 2: Representação esquemática do funcionamento do DSAS (Digital Shoreline Analysis System) Fonte: (Himmelstoss, et al, 2018) .....	8
Figura 3: Localização geográfica do distrito de Mecúfi .....	9
Figura 4: Figura ilustrativa de solos do distrito de Mecufi. ....	10
Figura 5: Ilustração do mapa hidrológico da região de Mecúfi destacando os principais rios que atravessam o distrito.....	11
Figura 6: Resumo da técnica usada para a análise da linha de costa na região de Mecufi. ....	14
Figura 7: Variação espacial da linha de costa de no intervalo de 1994 a 1997. ....	17
Figura 8: Variação espacial da linha de costa de no intervalo de 1997 a 1999. ....	18
Figura 9: Variação espacial da linha de costa de no intervalo de 1999 a 2002. ....	19
Figura 10: Variação espacial da linha de costa de no intervalo de 2002 a 2004. ....	20
Figura 11: Variação espacial da linha de costa de no intervalo de 2004 a 2009. ....	21
Figura 12: Variação espacial da linha de costa de no intervalo de 2009 a 2010. ....	22
Figura 13: Variação espacial da linha de costa de no intervalo de 2010 a 2011. ....	23
Figura 14: Variação espacial da linha de costa de no intervalo de 2011 a 2013 .....	24
Figura 15: Variação espacial da linha de costa de no intervalo de 2013 a 2016 .....	25
Figura 16: Variação espacial da linha de costa de no intervalo de 2016 a 2019 .....	26
Figura 17: Variação espacial da linha de costa de no intervalo de 2019 2023 .....	27
Figura 18: Variação espacial da linha de costa de no intervalo de 2023 2024 .....	28
Figura 19: Posição temporal da linha de costa em relação à linha de base (1994 a 2024) .....	28
Figura 20: Variação espacial da linha de costa de no intervalo de 1994 2024 .....	29
Figura 21: Frequência do (NSM) e da Taxa de Recuo da Linha de Costa (LRR) no período de 1994 a 2024.....	30
Figura 22: Variação espacial do uso e ocupação do solo de 2013-2024.....	31
Figura 23: Gráfico da variação do uso e ocupação do solo. ....	32
Figura 24: Frequência de chuvas extremas e chuvas máximas diárias na região de Mecúfi 1994 a 2024 .....	33
Figura 25: Frequência de ventos extremos e ventos máximos diários na região de Mecúfi 1994 a 2024 .....	34
Figura 26: Frequência de eventos de ondas extrema e ondas máximas diárias na região de Mecúfi 1994 a 2024.....	34
Figura 27: Variação do nível médio do mar no período de 1999 a 2021. (Matsinhe, 2024) .....	35

**Lista de Tabelas**

Tabela 1: ilustração dos materias usados para esta pesquisa .....11

Tabela 2: informações básicas das imagens usadas neste trabalho.....12

Tabela 3: Percentis utilizados para a identificação de eventos extremos de precipitação, vento e altura significativa das ondas .....16

## ÍNDICE

CAPITULO I-PARTE INTRODUTÓRIA .....	1
1.1. Introdução.....	1
1.2. Problematização .....	2
1.3. Justificativa.....	2
1.4. Objectivos.....	3
1.4.1. Objectivo Geral .....	3
1.4.2. Objectivos Específicos .....	3
CAPITULO II-FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	4
2.1. Linha de Costa.....	4
2.2. Erosão Costeira.....	4
2.3. Agentes de Erosão .....	4
2.3.1. Precipitação .....	4
2.3.2. Processos hidrodinâmicos costeiros.....	5
2.3.3. Vento.....	6
2.3.4. Temperatura .....	6
2.4. Sedimentação.....	6
2.5. Morfodinamica Praial.....	7
2.6. Tecnologias aplicadas a análise da linha de costa .....	7
2.6.1. Digital Shoreline Analysis System (DSAS).....	7
2.7. Uso e ocupação do solo .....	8
CAPITULO III-METODOLOGIA .....	9
3.1. Área de estudo .....	9
3.2. Tipologia de solos .....	9
3.3. Hidrologia.....	10
3.4. Materiais.....	11
3.5. Métodos .....	12
3.5.1. Linha de Costa .....	12

a) Aquisição das imagens .....	12
b) Pré-processamento das imagens .....	12
c) Processamento das imagens .....	13
3.5.2. Uso e ocupação do solo.....	15
3.5.3. Parâmetros oceanográficos e atmosféricos .....	15
CAPITULO IV- RESULTADOS .....	17
4.1. Linha de costa.....	17
4.1.1. Determinação do movimento líquido da linha de costa na região de Mecufi 1994-2024.	17
4.1.2. Determinação do recuo e avanço da linha de costa na região de Mecufi de 1994-2024 ..	29
4.2. Uso e ocupação do solo na Região de Mecúfi (1994-2024).....	30
4.3. Caracterização de forçantes oceanográficos e atmosféricos (Eventos extremos) .....	32
CAPITULO V - DISCUSSÃO .....	36
5.1. Discussão.....	36
CAPITULO VI-CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	40
6.1. Conclusão .....	40
6.2. Recomendações .....	40
□ Ampliação da extensão da área de estudo e inclusão da análise da direcção dos ventos.....	40
7. Referencias Bibliográficas .....	41
8. Anexos .....	44

## CAPITULO I-PARTE INTRODUTÓRIA

### 1.1. Introdução

Em escala global, as zonas costeiras destacam-se como as áreas mais densamente povoadas, devido às condições climáticas e meteorológicas favoráveis, à disponibilidade de recursos hídricos, e ao seu potencial para o desenvolvimento de actividades como agricultura, pesca, transporte marítimo, defesa, lazer, entre outras (Sufiante, 2018), além disso a zona costeira possui uma importância estratégica singular, integrando dimensões económicas, ecológicas e socioculturais de grande relevância. (Tischer & Polette, 2015). No entanto as zonas costeiras encontram-se entre os ambientes mais dinâmicos do planeta, enfrentando o avanço e o recuo da linha de costa, o que resulta em mudanças constantes de sua posição ao longo de diferentes escalas de tempo (Marino & Freire, 2013). Contudo a linha de costa é um componente geomorfológico de grande dinâmica espacial, resultado das respostas a processos costeiros de diversas magnitudes e frequências, (Chauque, 2017).

“As causas da erosão costeira operam em escalas temporais e espaciais distintas” (Bulhões, 2020, p.3). No entanto os ventos, marés e agitação marinha são os principais agentes erosivos. Porém existem outras causas que estão na origem de processos erosivos recentes que segundo Dias (1993) são a elevação do nível médio da superfície oceânica, diminuição da quantidade de sedimentos fornecidos ao litoral, degradação antropogénica das estruturas naturais, alterações induzidas pelas obras pesadas de engenharia costeira, nomeadamente as que são implantadas para defender o litoral.

A elevação do nível médio global do mar relaciona-se com a variabilidade climatológica natural da Terra e com as perturbações induzidas pelas actividades humanas, principalmente devido à expansão térmica do oceano, causado pelo aumento do volume de água induzido pelo aumento da temperatura atmosférica. A diminuição da quantidade de sedimentos pode ser explicada pelas muitas actividades humanas em zonas ribeirinhas ou no interior, das quais se destacam as barragens, as dragagens e a extracção de inertes. A destruição das estruturas naturais deve-se à degradação antropogénica das formas costeiras naturais resultantes induzidas pela sua ocupação com construções (Mendes & Pinho, 2008)

A preocupação com a zona costeira cresce cada vez mais por se tratar de uma área naturalmente frágil que vem sofrendo muita pressão por parte de vários sectores da sociedade que ocupam desordenadamente este espaço sem se preocupar com a conservação da natureza (Nunes, 2011). É pertinente e necessário discutir a variação de linha da costa porque essa abordagem mantém relações de dependência com fenómenos e factores geográficos, isto é, são aspectos que devem ser analisados

em conjunto, pois para que haja alteração ou não da linha de costa, depende da temperatura, precipitação, declive, clima, demografia, entre outros (Massangaie, 2019).

Diante a presente pesquisa, o estudo tem como objectivo Analisar a variação da linha de costa na região de Mecúfi, Cabo Delgado 1994 a 2024, utilizando técnicas de análise geoespacial para entender as dinâmicas costeiras e os processos erosivos e sedimentares que influenciam essa área.

## **1.2. Problematização**

Actualmente, a erosão costeira é reconhecida como um fenómeno de dimensão global (Sousa, 2021). Desse modo, a erosão costeira, a perda gradual de terras e linhas costeiras devido a processos naturais e actividades humanas, é um fenómeno complexo influenciado por uma combinação de factores naturais e antropogênicos (Bloven, 2024).

Na região de Mecúfi, Massangaie (2019) realizou um estudo de monitoramento da linha de costa no período de 2003 a 2018 com base em medições manuais em dois pontos específicos por meio do qual identificou processos erosivos em determinados trechos do litoral. Apesar de ser um esforço relevante, a abordagem apresenta limitações por serem poucos dados para concluir de forma genérica a ocorrência da erosão na região. Pois um grande número de transectos virtuais melhora a precisão na estimativa da variação da linha de costa (Mentaschil, et al., 2018). Nesse sentido, ferramentas como o DSAS (Digital Shoreline Analysis System) apresentam-se como alternativas metodológicas mais eficazes, ao possibilitarem a geração de séries espaciais detalhadas, com alta resolução e consistência (Himmelstoss, et al., 2018). Adicionalmente, a análise das forçantes hidro-oceanográficas não deve restringir somatórios e médias anuais de parâmetros como a precipitação, as ondas, correntes conforme apontado no trabalho de Massangaie (2019). Pois esta análise tende a suavizar as variações mais relevantes, não permitindo uma identificação precisa dos períodos de maior impacto na dinâmica litorânea. Vários estudos apontam que os eventos extremos são mais eficazes para explicar alterações significativas na linha de costa, dado o seu elevado potencial erosivo (Vitousek, et al., 2017; Wahl, et al., 2017). Pelo que surge a seguinte questão:

De que forma a ampliação do número de transectos e a inclusão de eventos extremos contribuem para uma avaliação mais precisa da variação da linha de costa na região de Mecúfi?

## **1.3. Justificativa**

O estudo da variação da linha de costa na região de Mecúfi é importante para compreender as mudanças que têm ocorrido ao longo do tempo neste território. Através da análise dos processos de

erosão e deposição de sedimentos, bem como da influência das actividades humanas, será possível identificar os principais factores que afectam a zona costeira. Este conhecimento é essencial para apoiar o planeamento e a gestão sustentável da costa, ajudando a proteger as comunidades locais e os recursos naturais. Além disso, o estudo pretende contribuir para a produção científica, trazendo informações úteis para outros investigadores e para as autoridades responsáveis pelo ordenamento do território.

## **1.4.Objectivos**

### **1.4.1. Objectivo Geral**

Analisar a variação da linha de costa na região de Mecúfi, Cabo Delgado de 1994-2024, utilizando técnicas de análise geoespacial para entender as dinâmicas costeiras e os processos erosivos e sedimentares que influenciam essa área.

### **1.4.2. Objectivos Específicos**

- Delimitar a linha de costa na região de Mecúfi;
- Quantificar as taxas de erosão e acreção na linha de costa da região de Mecúfi;
- Identificar as mudanças ocorridas no uso e cobertura do solo entre os anos 1994-2024;
- Relacionar a variação da linha de costa com a variação dos parâmetros hidroceanográficos e atmosféricos, como precipitação, nível médio do mar e a intensidade dos ventos e altura significativa da onda, que influenciam a dinâmica costeira.

## CAPITULO II-FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Linha de Costa

A linha de costa pode ser descrita como uma fronteira física que delimita o ambiente marinho do ambiente terrestre (Chauque, 2017). Mendonça (2005) sugere que os indicadores da linha de costa sejam avaliados com base em dois tipos principais sendo, as estruturas físicas que funcionam como barreiras à movimentação da água, incluindo penhascos rochosos, falésias, dunas, arenitos de praia, bermas e muros de protecção; e as marcas associadas ao nível da água, como a linha de vegetação, detritos deixados pela maré, linha de água e o registo da maré mais alta.

As mudanças de posição da linha de costa são complexas, envolvendo diversos processos relacionados à elevação do nível do mar (em escalas de curto e longo prazo), ao balanço de sedimentos, e aos movimentos tectónicos, reológicos e antrópicos (Chauque, 2017). De entre vários factores que influenciam as variações da linha da costa, destaca-se a acção das ondas incidentes como o principal agente, a estas associam-se variabilidades espaciais e temporais das marés, correntes, granulometria dos sedimentos e aporte fluvial (Samuel, 2017). Para Nunes (2011) as ondas, marés e correntes são as forcas mais importantes que actuam na morfogénese litorânea.

### 2.2. Erosão Costeira

A erosão costeira resulta da contribuição de diversos processos e factores que frequentemente actuam em conjunto sendo os mais óbvios as tempestades costeiras e as ondas associadas, as correntes fortes, o vento, a gravidade, o material em que as arribas são talhadas e as características morfotexturais das praias. A variação do nível médio do mar a curto, a médio ou longo prazo, bem como a alteração da morfologia (paisagem) costeira causada pela acção do homem, por exemplo através da construção de esporões ou de defesas aderentes, são importantes factores responsáveis pela erosão costeira (Borges et al, 2009)

### 2.3. Agentes de Erosão

#### 2.3.1. Precipitação

A erosão hídrica é provocada pela acção da chuva sobre a superfície terrestre, e esta relacionada com o grau de erosividade das precipitações. No entanto, diversos outros factores influenciam o processo e a intensidade da perda de solo (Wischmeier & Smith, 1978). Entre eles, destaca-se a cobertura vegetal, cuja presença, altura, densidade e variação ao longo do tempo desempenham um papel fundamental na resistência dos terrenos à acção erosiva das chuvas (Roose, 1994). A água é o agente que, isoladamente pode actuar tanto como desagregadora quanto como transportadora de partículas do solo

(Silva, 1995). As gotas devido a sua energia cinética causam um impacto no solo compactando o mesmo e ao mesmo tempo faz saltar partículas do solo que se desagregam e estas partículas ao voltarem para a superfície do solo encontram uma película de água a qual começa a transportar as mesmas (Ferrarrezi, 2009).

### **2.3.2. Processos hidrodinâmicos costeiros**

Os principais parâmetros oceânicos que influenciam directamente a modelagem e a dinâmica da linha de costa são, marés correntes ondas, nível médio do mar.

Segundo Sufiante (2018) as marés são as maiores ondas conhecidas e são mais perceptíveis nas regiões costeiras, onde o nível do mar sobe e desce regularmente duas vezes ao dia. Elas podem ser descritas como movimentos verticais regulares das massas de água, causados principalmente pela força gravitacional, que depende da massa e da distância entre os corpos. Além disso, a força centrífuga, gerada pela rotação da Terra, também contribui para o fenómeno das marés.

As marés podem se somar às ondas, intensificando a erosão costeira e causando danos a propriedades. Tempestades fortes que ocorrem perto da costa durante uma maré de sizígia podem gerar marés de ressaca, caracterizadas por ondas de maré alta que podem cobrir completamente a praia e colidir com as falésias (Silva, 2019).

As ondas formadas pelo vento são uma das principais fontes de energia responsáveis pelas transformações nas praias. Quando as ondas quebram, dependendo da inclinação da praia, parte dessa energia pode retornar ao mar (com menor reflexão em praias de inclinação suave), mas a maior parte é dissipada. Uma fracção dessa energia é usada para quebrar rochas e minerais em partículas menores, enquanto a maior parte é direccionada para mover sedimentos e elevar a altura da praia, aumentando assim sua energia potencial (Sufiante, 2018).

As ondas e correntes estão profundamente conectadas na dinâmica costeira e oceânica, desempenhando funções essenciais no transporte de sedimentos, na erosão e na formação das praias. Quando as ondas chegam à costa, elas interagem com o fundo do mar, perdendo energia e mudando sua direcção. Esse processo pode gerar correntes, como as correntes de deriva litorânea e correntes de retorno (rip currents), (Sufiante, 2018).

Correntes de deriva litorânea, são correntes costeiras que fluem paralelamente à linha de costa. Elas são geradas principalmente pela acção das ondas que atingem a praia em um ângulo, causando o transporte de água e sedimentos ao longo da costa. Essas correntes desempenham um papel

fundamental no movimento e redistribuição de sedimentos, como areia, contribuindo para a erosão e a deposição em diferentes áreas da linha de costa. As correntes longitudinais são fundamentais para a evolução da linha de costa, pois são responsáveis por transportar grandes quantidades de sedimentos ao longo da costa (Amorim, 2019).

As correntes de retorno são correntes intensas e estreitas que fluem em direcção ao mar, formadas perto da costa e se estendendo através da zona de arrebentação. Elas se formam quando a água acumulada pelas ondas na zona costeira retorna ao oceano, atravessando a zona de arrebentação. Essas correntes podem se estender por longas distâncias e são conhecidas por sua intensidade e velocidade (Galvão, 2018).

Amorim (2019) aponta que quando as ondas atingem a praia em ângulos baixos (perpendiculares à costa), o padrão de circulação predominante são as correntes de retorno (rip currents). Já em ângulos maiores de incidência, o padrão dominante passa a ser as correntes longitudinais, conhecidas por sua elevada capacidade de transportar sedimentos ao longo da zona costeira.

### **2.3.3. Vento**

A erosão eólica, ocasionada pelos ventos, ocorre em geral em regiões planas, de pouca chuva, onde a vegetação natural é escassa e sopram ventos fortes (Ferrarrezi, 2009). A velocidade do vento e a quantidade de material em suspensão determinam sua capacidade de transportar grandes volumes de solo, sendo capaz até de desagregar rochas por meio de acções abrasivas (Silva, 1995).

### **2.3.4. Temperatura**

A variação de temperatura desempenha um papel importante na erosão geológica. Quando ocorrem mudanças rápidas de temperatura, os efeitos são intensos, mas restritos às camadas superficiais das rochas. Já as variações mais lentas entre o verão e o inverno provocam efeitos menos intensos, mas que alcançam profundidades consideráveis (Silva, 1995).

## **2.4. Sedimentação**

A sedimentação ocorre quando o agente de transporte perde competência, ou seja, quando a força exercida sobre as partículas torna-se menor que a inércia das mesmas, levando à deposição. Essa perda de competência pode ser causada por diversos factores, como a redução do gradiente, a diminuição do volume ou da velocidade do fluxo, ou ainda pelo aumento da quantidade de sedimentos transportados, (Felix & Filho, 2020). Portanto Silva (2006), Aponta que a fonte do material e os processos de deposição afectam a distribuição de tamanho dos grãos em sedimentos praias sendo que o material mais grosso esta associado com zonas de maior energia de onda.

## 2.5. Morfodinâmica Praial

A morfodinâmica praial estuda as características morfológicas e hidrodinâmicas das praias, analisando como o movimento do fluido, dos sedimentos e a evolução da morfologia interagem. As praias são formadas por depósitos de sedimentos acumulados pela acção de diversos agentes físicos, como ondas e marés, que fazem com que esses sedimentos se ajustem às condições do ambiente. O sistema praial é dividido em duas partes: a pós-praia e a antepraia, conforme ilustrado na figura 1. A pós-praia é composta pela berma, enquanto a antepraia é subdividida em três partes: a antepraia superior, que inclui a zona de surfe; a antepraia média, que se estende até a profundidade de fechamento; e a antepraia inferior, que tem aproximadamente o dobro do comprimento da antepraia média (Mansur, 2016).

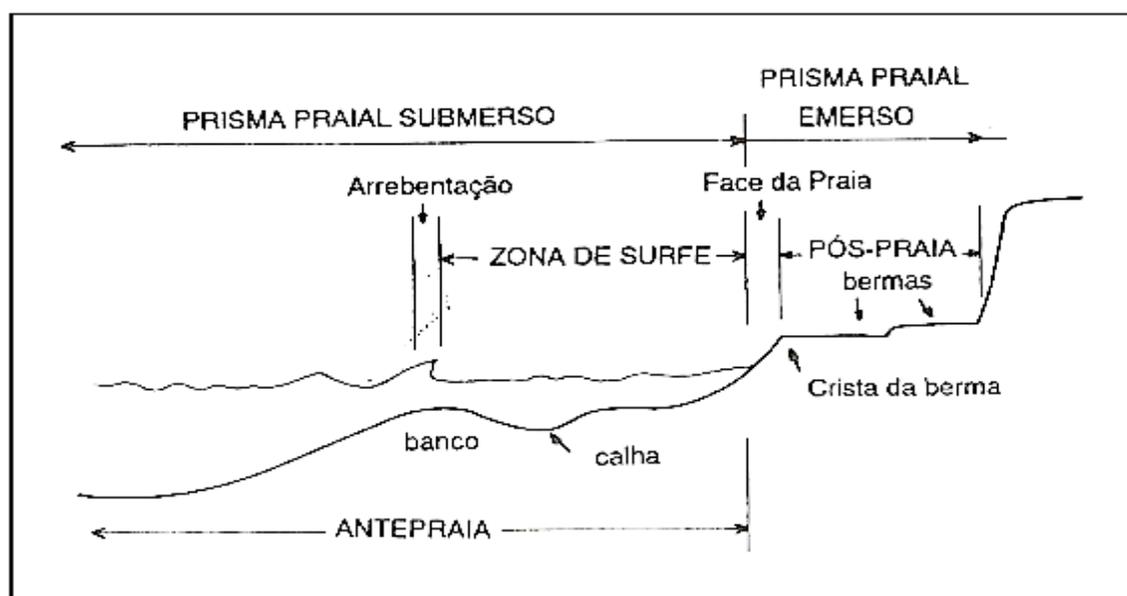


Figura 1: Ilustração das principais componentes de uma praia. Fonte: (Muehe, 1998).

## 2.6. Tecnologias aplicadas a análise da linha de costa

### 2.6.1. Digital Shoreline Analysis System (DSAS)

O DSAS é uma ferramenta que permite fazer uma análise cartográfica quantitativa das taxas de alteração costeira (recoo ou avanço). Estas taxas são importante para a compreensão da tendência da dinâmica da costa e o seu comportamento ao longo dos anos, permitindo assim, uma boa planificação e gestão dos ambientes costeiros (Marove, 2017). O DSAS utiliza-se de vários métodos estatísticos para realizar o cálculo da variação das taxas de recoo e avanço da linha de costa. Os métodos se baseiam nas diferenças entre as posições da linha de costa ao longo do tempo. As taxas relatadas são expressadas em metros de mudança ao longo dos transects por ano (Marino & Freire, 2013).

O processo inicia-se com a criação de uma linha de base (baseline), que deve ser traçada de forma paralela à linha de costa mais antiga. A partir dessa linha de base, o DSAS gera automaticamente transectos perpendiculares a intervalos regulares, que atravessam todas as linhas de costa inseridas no projecto. Esses transectos funcionam como linhas de medição ao longo das quais são calculadas as distâncias entre as posições da linha de costa em diferentes períodos (Himmelstoss, et al, 2018).

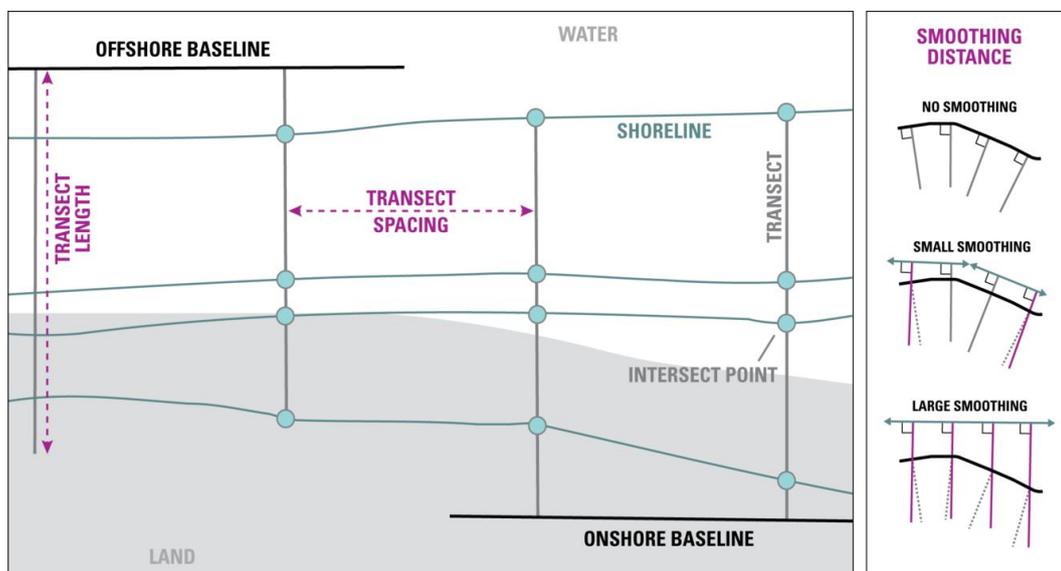


Figura 2: Representação esquemática do funcionamento do DSAS (Digital Shoreline Analysis System)  
Fonte: (Himmelstoss, et al., 2018).

## 2.7. Uso e ocupação do solo

O uso e ocupação do solo refere-se à forma como a terra é utilizada e transformada pelas actividades humanas, bem como a distribuição dessas actividades em um determinado território. A cobertura vegetal desempenha um papel fundamental na protecção do solo contra a erosão, actuando de várias formas. Primeiramente, ela oferece uma barreira directa ao impacto das gotas de chuva, ajudando a dispersar a água ao interceptá-la e evaporá-la antes que chegue ao solo. Além disso, as raízes das plantas, ao se decomporem, criam pequenos canais no solo, facilitando a infiltração da água. A vegetação também contribui para a melhoria da estrutura do solo por meio da adição de matéria orgânica, o que aumenta sua capacidade de retenção de água. Por fim, a presença da vegetação reduz a velocidade de escoamento da água da chuva, aumentando o atrito na superfície e diminuindo a intensidade da enxurrada (Silva, 1995). Para se obter informações a respeito da cobertura da área de forma rápida, confiável e económica, utiliza-se as técnicas de sensoriamento remoto como principal ferramenta para auxiliar no mapeamento, identificação e monitoramento das feições terrestres (Morais, 2015).

## CAPITULO III-METODOLOGIA

## 3.1. Área de estudo

Mecúfi é um distrito situado na província de Cabo Delgado, em Moçambique, com coordenadas de 13° 20' 29" de latitude Sul e 40° 32' 49" de longitude Este, (figura 3). Ao norte, limita-se com o município de Pemba e o distrito de Pemba Metuge; a oeste, faz divisão com o distrito de Ancuabe; ao sul e sudoeste, confronta-se com o Distrito de Ancuabe, a sul e sudoeste com o Distrito de Chiúre e a leste com o Oceano Índico. O sector 3 corresponde a área urbanizada, o Sector 1 e 2 não urbanizadas.

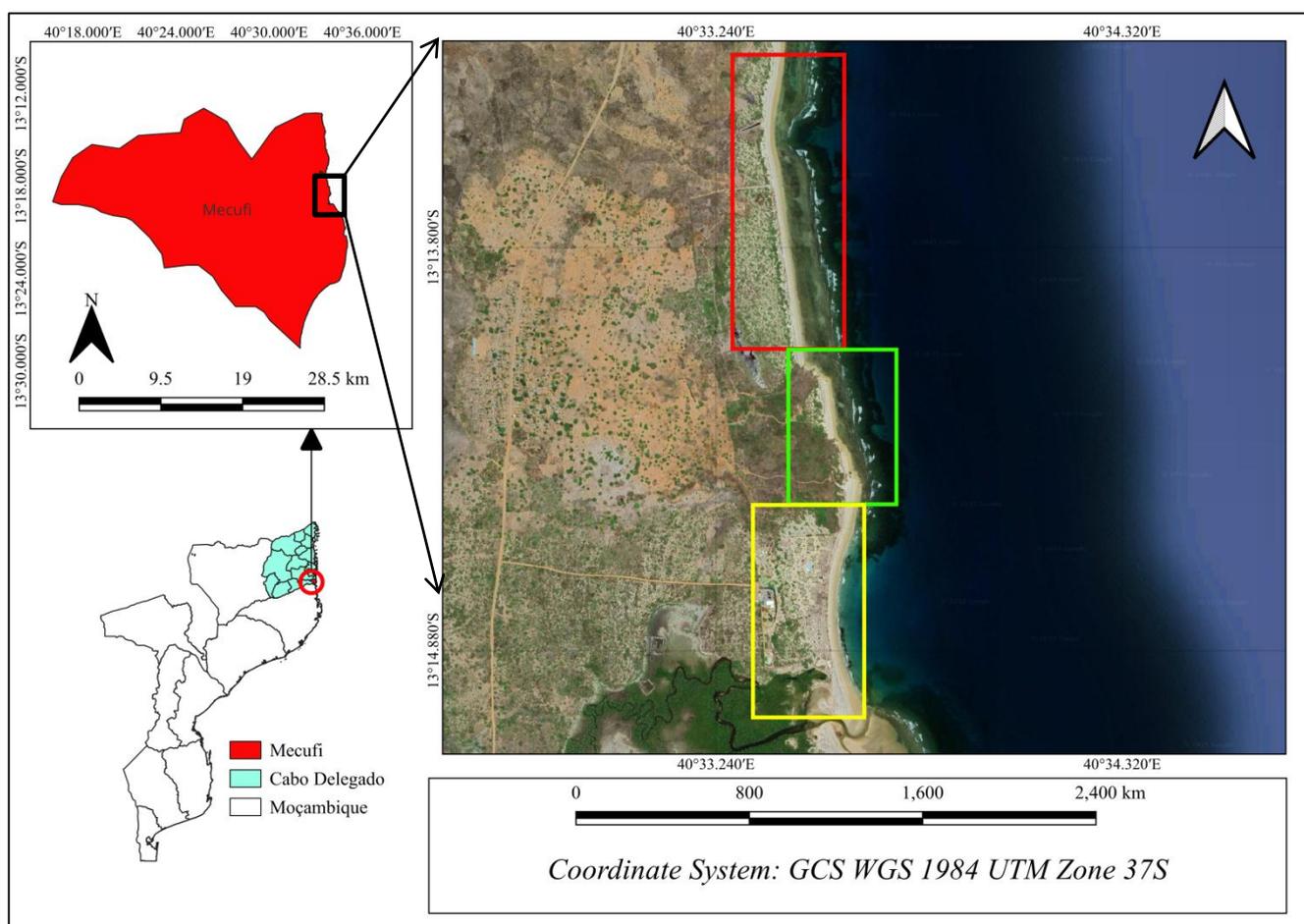


Figura 3: Localização geográfica do distrito de Mecúfi.

## 3.2. Tipologia de solos

No Distrito de Mecúfi, predominam solos rasos sobre rocha não calcária, cobrindo cerca de 55% da área total, seguidos por solos arenosos de tonalidade castanho-acinzentada, que ocupam aproximadamente 20% do território. Na região costeira, ao norte do distrito, os solos são predominantemente originados de grés vermelhos, os quais podem ter uma excelente fertilidade. Ao sul, encontram-se solos de dunas costeiras e solos arenosos não classificados, com baixa fertilidade.

Solos aluvionares, com alta fertilidade, ocorrem ao longo dos principais rios. Além disso, no interior do distrito, há solos com boa a moderada aptidão, como os solos argilosos castanho-cinzentos, frequentemente associados a solos arenosos castanhos-acinzentados (MICOA, 2012).

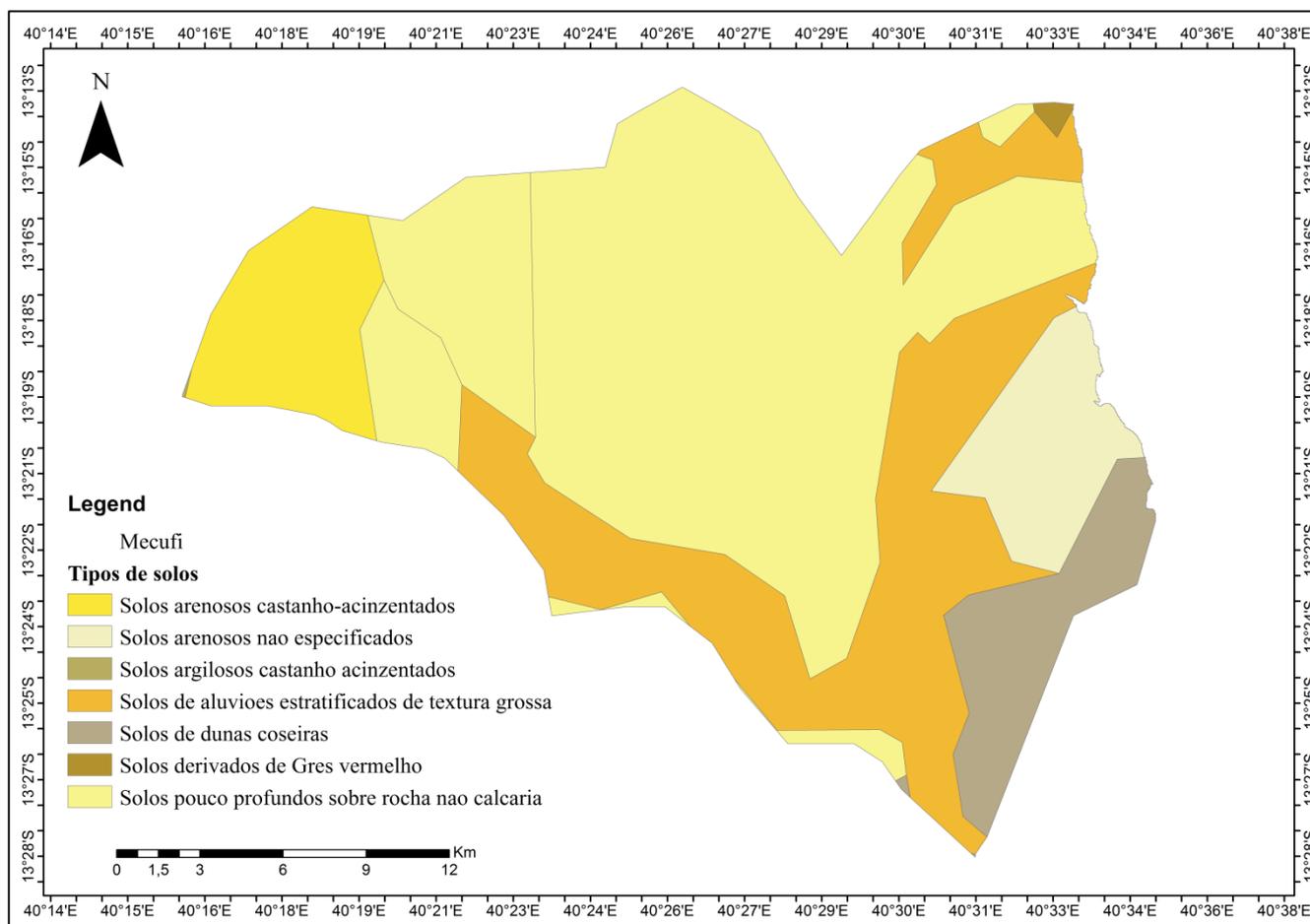


Figura 4: Figura ilustrativa de solos do distrito de Mecúfi.

### 3.3. Hidrologia

Os principais rios do distrito de Mecúfi de primeira ordem que desaguam no oceano e atravessam o distrito incluem: Rio Megaruma, Rio Metava, Rio Metori, Rio Miézi e Rio Nanha. Além disso, os rios de segunda ordem, que desaguam em um rio de primeira ordem, são o Rio Umbire e o Rio Niúge. A maioria desses rios apresenta um regime sazonal, o que significa que apresenta fluxo de água durante a estação chuvosa (MICOA, 2012).

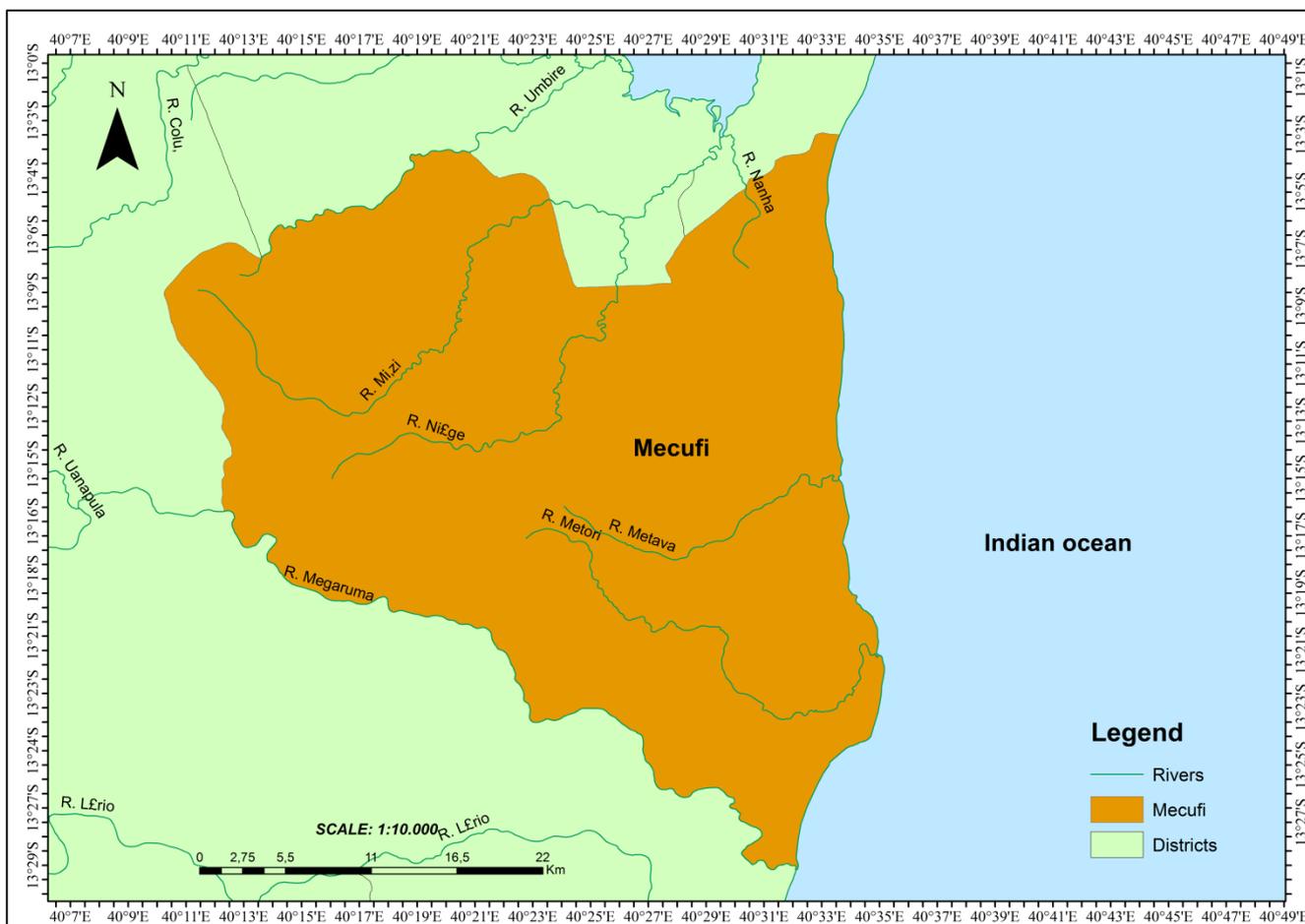


Figura 5: Ilustração do mapa hidrológico da região de Mecúfi destacando os principais rios que atravessam o distrito.

### 3.4. Materiais

Materials	Software	Ferramentas
Computador	ArcGis 10.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ DSAS</li> <li>➤ Image Classification</li> </ul>
	Matlab 2013 Ra	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Gráfico (de barra 2D)</li> <li>➤ Gráfico (Timeserie 2D)</li> </ul>
	Excel 2010	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Gráfico (Timeserie 2D)</li> <li>➤ Grafico de barra</li> </ul>

Tabela 1: ilustração dos materiais usados para esta pesquisa.

### 3.5. Métodos

#### 3.5.1. Linha de Costa

##### a) Aquisição das imagens

Para monitorar a variação da linha de costa na região de Mecúfi, foi necessariamente o cadastro na plataforma online do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). As principais fontes utilizadas neste estudo foram imagens de satélite de média e alta resolução, provenientes dos sensores Landsat 5 TM, Landsat 7 TM e Landsat 8/9 OLI. As imagens foram obtidas por meio do site <https://earthexplorer.usgs.gov/>, abrangendo um período de 31 anos, entre 1994 a 2024. A selecção das imagens considerou factores como o ciclo das marés (adquiridos no FES Tide Model <https://www.aviso.altimetry.fr/>), a disponibilidade dos dados e a interferência causada pela cobertura de nuvens. Por esses critérios, foram escolhidos as que constam na tabela 2, Foram também seleccionadas duas imagens de maré viva por estarem na fase transição para maré morta.

Data	Sensor	Hora de captura	Fase da mare
1994/08/27	Landsat 5TM	06:38:41 (AM)	Maré viva (Preamar)
1997/04/29	Landsat 5TM	06:49:28 (AM)	Maré morta (Preamar)
1999/06/22	Landsat 5TM	06:59:33 (AM)	Mare morta (Preamar)
2002/05/05	Landsat 7TM	07:10:30 (AM)	Mare morta (Preamar)
2004/08/06	Landsat 5TM	07:04:25 (AM)	Maré viva (Preamar)
2009/05/16	Landsat 5TM	07:09:25 (AM)	Maré morta (Preamar)
2010/04/17	Landsat 5 TM	07:12:32 (AM)	Maré morta (Preamar)
2011/04/12	Landsat 7TM	07:15:16 (AM)	Mare morta (Preamar)
2013/05/03	Landsat 7TM	07:17:33 (AM)	Maré morta (Preamar)
2016/05/11	Landsat 7 TM	07:24:03 (AM)	Maré morta (Preamar)
2019/09/01	Landsat OLI 8	07:21:51 (AM)	Maré morta (Preamar)
2021/10/24	Landsat OLI 8	07:22:05 (AM)	Maré morta (Preamar)
2023/10/22	Landsat OLI 9	07:21:54 (AM)	Maré morta (Preamar)
2024/12/19	Landsat OLI 8	07:21:40 (AM)	Maré morta (Preamar)

Tabela 2: informações básicas das imagens usadas neste trabalho.

##### b) Pré-processamento das imagens

Após a obtenção das imagens de satélite, cada uma foi processada no software ArcGis, versão 10.5, escolhido por sua versatilidade e compatibilidade com os formatos de dados Geoespaciais utilizados.

Antes da extracção da linha de costa, foram aplicadas correcções fundamentais para garantir a qualidade e a precisão dos dados. Primeiramente, realizou-se a correcção atmosférica e, em seguida, a correcção geométrica das imagens. Posteriormente, foi feito o recorte da Área de Interesse (AOI), restringindo a análise à zona costeira de Mecúfi. Para minimizar os efeitos das variações do nível do mar nas diferentes datas de aquisição das imagens, foi utilizada a tábua de marés, priorizando imagens obtidas durante o período de vazante da maré viva, o que favorece a identificação precisa da linha de separação entre os ambientes terrestre e marinho.

### c) **Processamento das imagens**

Com as imagens já corrigidas, procedeu-se à extracção da linha de costa. Essa etapa envolveu o cálculo do índice de água normalizado NDWI (Normalized Difference Water Index), que melhora a distinção entre as superfícies de água e terra, facilitando a segmentação da linha costeira. A partir do resultado do NDWI, foi realizada a vectorização manual da linha de costa, adoptando como critério a zona de transição entre a parte seca e a parte húmida do solo na região entre-marés. A equação abaixo foi usada para calcular o Índice de Água por Diferença Normalizada NDWI que foi utilizado para analisar corpos de água, empregando as bandas de infravermelho próximo e verde em imagens de sensoriamento remoto.

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

As linhas de costa vectorizadas foram então salvas no formato shapefile para permitir a sobreposição e comparação entre os diferentes anos. Para quantificar a dinâmica da linha de costa ao longo dos 31 anos analisados, foram utilizadas métricas específicas no software DSAS (Digital Shoreline Analysis System), como o Net Shoreline Movement (NSM) para o cálculo da variação espacial da linha, Linear Regression Rate (LRR) e a End Point Rate (EPR) para a determinação das taxas de erosão e deposição ao longo do tempo.

Para o cálculo das taxas de variação da linha de costa, foi necessário também a criação de uma linha de base posicionada em terra (onshore), a uma distância de 20 metros em relação à linha de costa do primeiro ano analisado. Embora muitos estudos utilizem a primeira linha de costa como baseline (yang, et al., 2024; Kale, et al, 2019) essa abordagem não é adequada em contextos onde a posição da linha de costa não esta totalmente recuada em relação as linhas subsequentes (Thieler et al., 2010) Portanto essa limitação obrigou a criação da linha de base igualmente feito nos trabalhos de Nwilo et al., (2020) e Addo, (2009). Para tal, recorreu-se à ferramenta Buffer, que permitiu replicar os contornos da linha de costa do primeiro ano da série temporal, deslocando-os 20 metros para o interior da terra, de forma a manter as mesmas características geométricas da linha original. Esta linha de base

serviu exclusivamente como apoio técnico para a geração ortogonal dos transectos. No caso da tendência linear da linha de costa (Figura 19) de modo a garantir a precisão na análise da variação da linha de costa, e considerando que a baseline correspondia a uma réplica deslocada da primeira linha, tornou-se necessário, após os cálculos, subtrair os 20 metros previamente adicionados. Esta correção foi essencial para assegurar que as distâncias obtidas reflectissem de forma rigorosa a real variação da linha de costa ao longo do tempo, retomando, assim, a lógica da utilização da linha de costa inicial como referência.

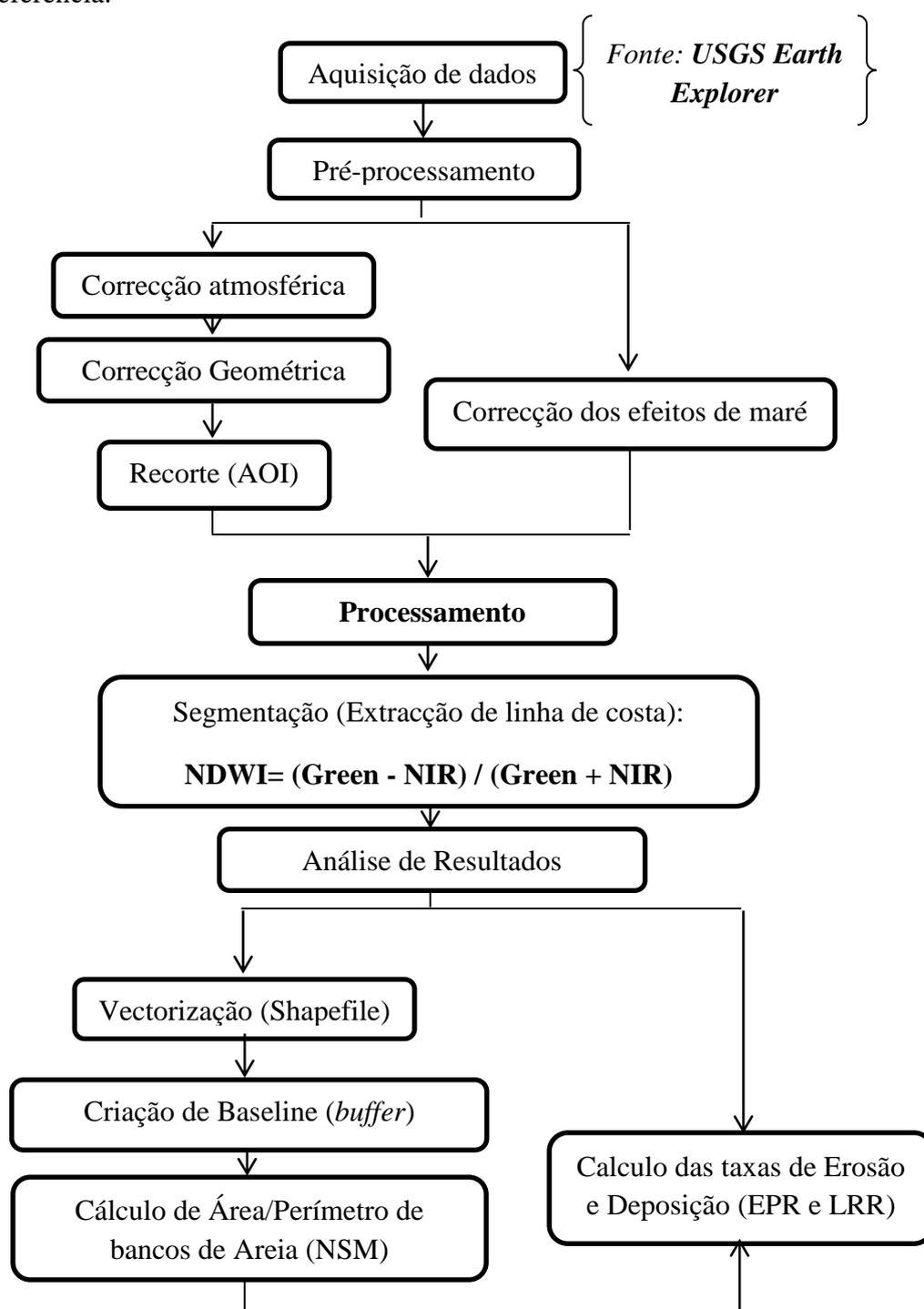


Figura 6: Resumo da técnica usada para a análise da linha de costa na região de Mecúfi.

NSM = A distancia (m) entre a linha de costa mais antiga e mais nova

$$EPR = \frac{NSM}{\text{O tempo entre a mais antiga e a mais recente linha de costa}}$$

### 3.5.2. Uso e ocupação do solo

Para o mapeamento e análise do uso e ocupação do solo na região costeira de Mecúfi, foram seleccionadas imagens de satélite referentes aos anos de 1994, 2003, 2013 e 2024. As imagens utilizadas foram as mesmas empregadas no estudo da variação da linha de costa, provenientes dos sensores Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ e Landsat 8 OLI. Essas imagens apresentam resolução espacial de 30 metros, adequada para distinguir diferentes tipos de cobertura da superfície terrestre, como áreas urbanizadas, vegetação natural, corpos hídricos, solos expostos e bancos submersos. A análise foi realizada por meio da classificação digital das imagens, utilizando o algoritmo de classificação de máxima verossimilhança (Maximum Likelihood Classification), disponível na ferramenta Image Classification do software ArcGIS 10.5. Este método baseia-se em princípios estatísticos, considerando tanto a média quanto a variância das assinaturas espectrais das classes, de modo a estimar a probabilidade de um pixel pertencer a uma determinada categoria.

Para auxiliar na definição das categorias temáticas, foi realizado um levantamento prévio da área de estudo, que incluiu a composição colorida das bandas espectrais das imagens (como combinações 5-4-3 para Landsat 8 e 4-3-2 para Landsat 5 e 7), com o objectivo de realçar as diferenças entre os diversos tipos de cobertura do solo. Foi utilizada também a plataforma Google Earth como ferramenta complementar para a interpretação visual e validação inicial das classes de uso e ocupação. Esse recurso permitiu uma melhor familiarização com as características da paisagem local, contribuindo para uma delimitação mais precisa das categorias. Com base nesse conhecimento prévio, foi definido o número de classes a serem extraídas, resultando em cinco categorias principais: água, águas rasas/bancos submersos, vegetação densa, vegetação arbustiva, e solos expostos.

### 3.5.3. Parâmetros oceanográficos e atmosféricos

Para monitorar o nível médio do mar, precipitação e altura significativa da onda, foram usados dados temporais disponíveis na plataforma Marine Copernicus, acessível pelo hiperligação <https://marine.copernicus.eu/>. Os dados de ventos foram adquiridos na plataforma APDRC com a seguinte hiperligação <https://apdrc.soest.hawaii.edu/> referentes à velocidade do vento que foram representados em termos de suas componentes de velocidade ( $u$  e  $v$ ), correspondendo às componentes

verticais e horizontal, respectivamente, a fim de determinar a velocidade total ( $V_T$ ), foi necessário calcular o módulo das duas componentes da velocidade utilizando a seguinte fórmula:

$$V_T = \sqrt{u^2 + v^2}$$

Para a análise das forçantes oceanográficas e atmosféricas na região de estudo, foram identificados os eventos extremos associados à precipitação, ventos e à altura significativa das ondas. No caso da precipitação, foi realizada uma filtragem inicial, desconsiderando todos os registos inferiores a 1 mm por dia, por se tratar de eventos de fraca relevância hidrológica. Esta triagem permitiu refinar a selecção dos dados e concentrar a análise nos eventos de chuva mais expressivos, que de facto têm capacidade de gerar impacto sobre os processos erosivos e sedimentares da zona costeira.

A identificação desses eventos foi realizada com base no cálculo de percentis (99°), uma técnica estatística que permite isolar os valores mais elevados de uma série temporal, representando condições meteorológicas e oceanográficas anómalas. De acordo com (Sousa & Lucena, 2023) o uso de índices baseados em percentis, permite uma análise robusta e comparável dos extremos ao longo do tempo e entre diferentes regiões. Esta abordagem é amplamente utilizada em estudos costeiros (Costa, et al., 2021; Pereira, et al., 2020) por permitir uma caracterização quantitativa de episódios de intensidade extrema, os quais têm maior potencial de impactar a dinâmica da linha de costa.

Variável	Percentil	Unidade (SI)
Precipitação	48.32	mm
Ventos	7.94	m/s
Ondas	2.40	m

Tabela 3: Percentis utilizados para a identificação de eventos extremos de precipitação, vento e altura significativa das ondas.

E por fim foram extraídos os valores máximos diários anuais de cada variável (precipitação, ventos e ondas), o que possibilitou uma comparação directa com os padrões de variação da linha de costa observados ao longo do tempo.

## CAPITULO IV- RESULTADOS

## 4.1. Linha de costa

A aplicação da ferramenta DSAS resultou na geração de um total de 213 transectos, lançados perpendicularmente à linha de costa ao longo de toda a extensão de 3.20 km da praia de Mecúfi. As variações observadas nos transectos reflectem deslocamentos da linha de costa, podendo ser negativas ou positivas. As variações negativas indicam recuo da linha de costa, associado a processos erosivos, enquanto as variações positivas representam avanço da linha de costa, caracterizando processos de deposição.

## 4.1.1. Determinação do movimento líquido da linha de costa na região de Mecúfi 1994-2024.

A figura 7 refere-se ao intervalo temporal de 1994 a 1997. Os valores dos parâmetros NPR e NSM demonstram predominância de deposição ao longo da maior parte do trecho analisado da praia de Mecúfi, com uma taxa média de avanço da linha de costa de aproximadamente 4.3 m/ano. Nesse período, a linha de costa apresentou um deslocamento médio de 11.7 metros em direcção ao mar, caracterizando deposição. Os sectores 1 e 3 concentraram as maiores taxas de acreção, destacando-se o sector 3, onde foi registado o valor máximo de deposição, atingindo 57.25 metros em determinados trechos. Por outro lado, no sector 2, observou-se uma dinâmica mista, com ocorrência de erosão leve em algumas áreas, alcançando um recuo máximo de 21.03 metros ao passo que outras áreas do mesmo sector apresentaram deposição com valores de até 33.85 metros.

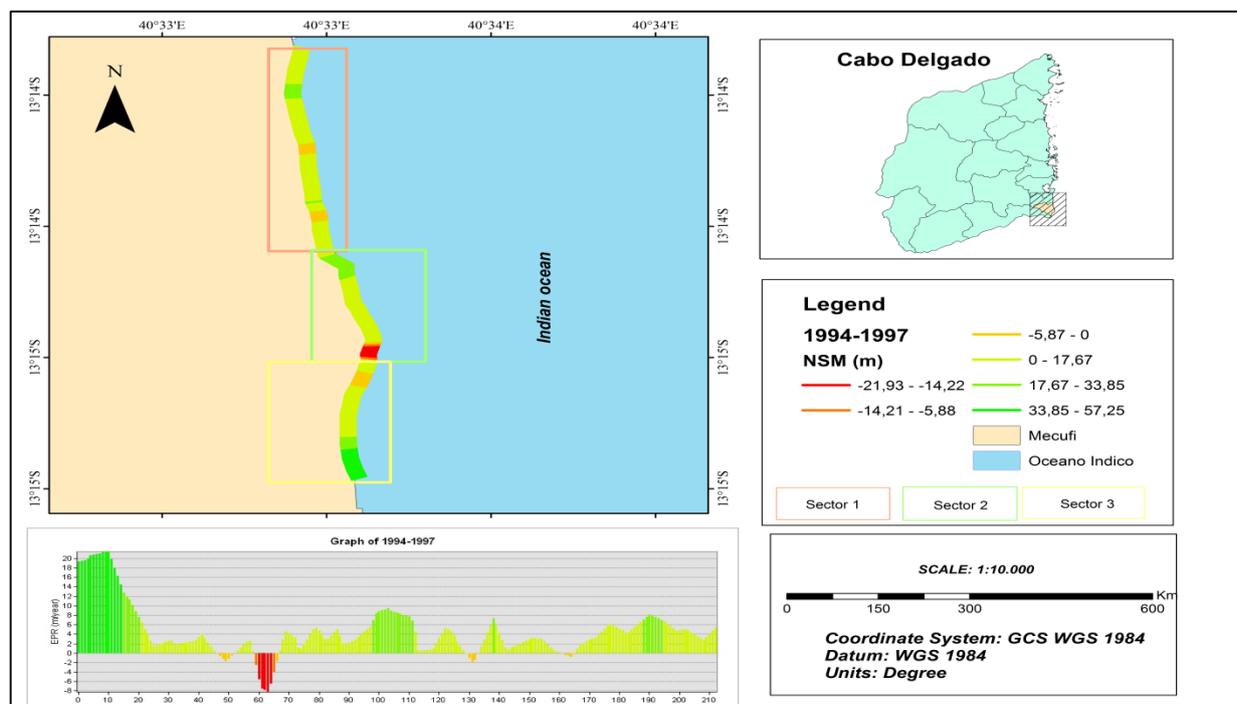


Figura 7: Variação espacial da linha de costa de no intervalo de 1994 a 1997.

O período compreendido entre 1997 e 1999 (figura 8) foi marcado pela ocorrência de erosão em quase todo o trecho que atingiu uma média de -3.03 m/ano que correspondente a uma distancia média de 6.5 metros indicando uma tendência geral de erosão na região, o sector 3 teve maiores índices de erosão que supera todos os sectores tendo atingindo uma distância máxima de 21.93 metros em contrapartida a deposição atingiu uma distancia máxima de 10.04 metros no sector 3, em algum trecho do sector 2 verifica se uma deposição máxima que supera todos os sectores analisados que atingiu uma distancia máxima de 21.14 metros e uma erosão que varia de 23.09 metros a 14.29 metros e o sector 1 apresentou os menores valores tanto de erosão quanto de deposição ao longo do período.

A erosão máxima observada nesse sector foi de 14.20 metros, enquanto a deposição máxima foi de 10.04 m.

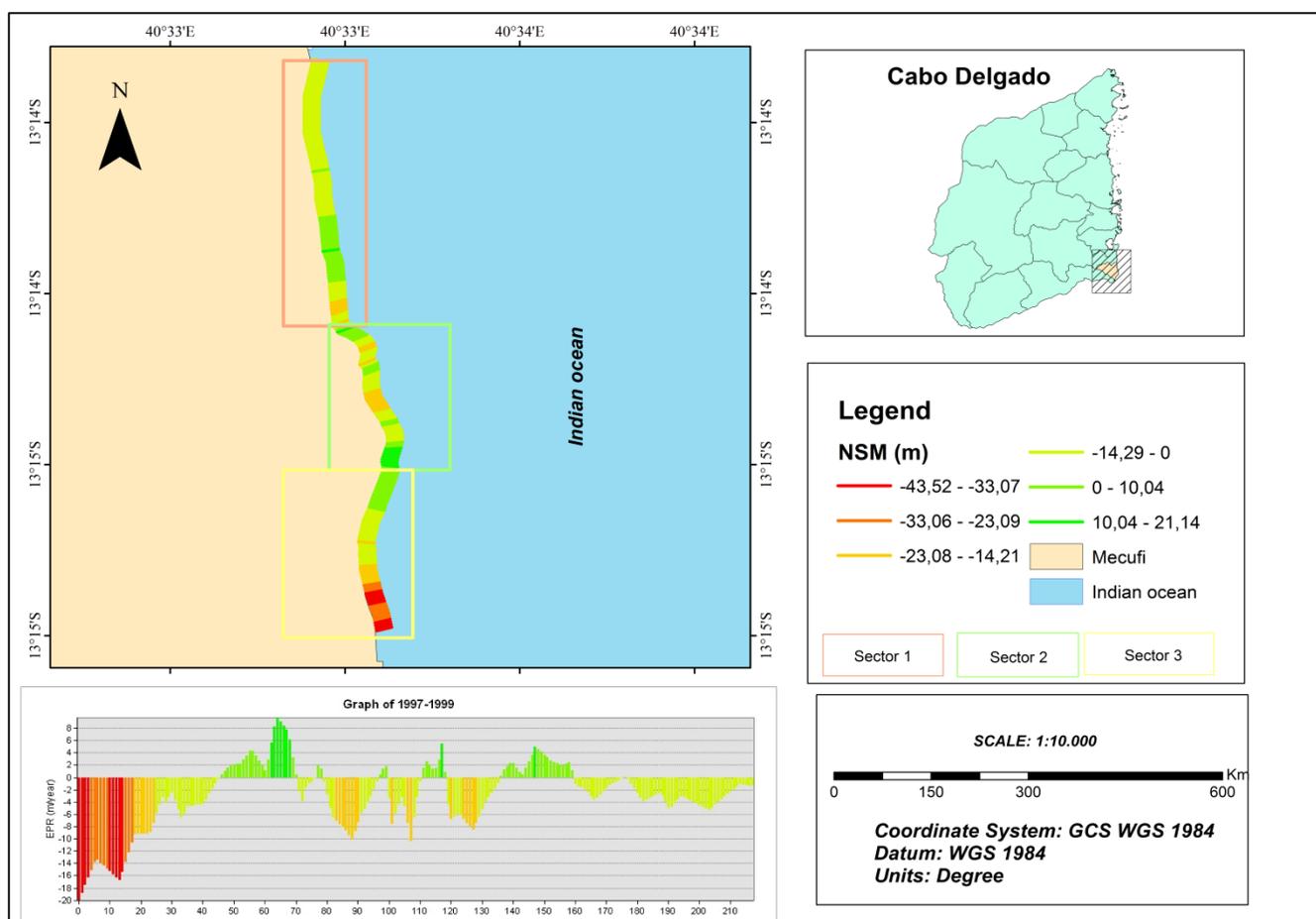


Figura 8: Variação espacial da linha de costa de no intervalo de 1997 a 1999.

A figura 9, correspondente ao intervalo de 1999 a 2002, revela que todo o trecho analisado abrangendo os sectores (1, 2 e 3) foi caracterizado por uma predominância de processos erosivos. A taxa média de recuo da linha de costa durante esse período foi de aproximadamente -7.5 m/ano, o que representa um recuo médio acumulado de 21.8 metros. A erosão intensificou mais no sector 3 e 2, o valor máximo da

erosão em toda região foi verificado no sector 2 um valor de 48.20 metros, apesar de muita ocorrência de erosão na região em alguns pontos do sector1 e 3 apontam uma deposição leve que atingem uma distância de 2.60 metros, ainda no sector 3 verificou-se uma distância máxima erodida de 42.44 metros o sector 1 a erosão atingiu uma distância máxima erodida de 36.44 metros.

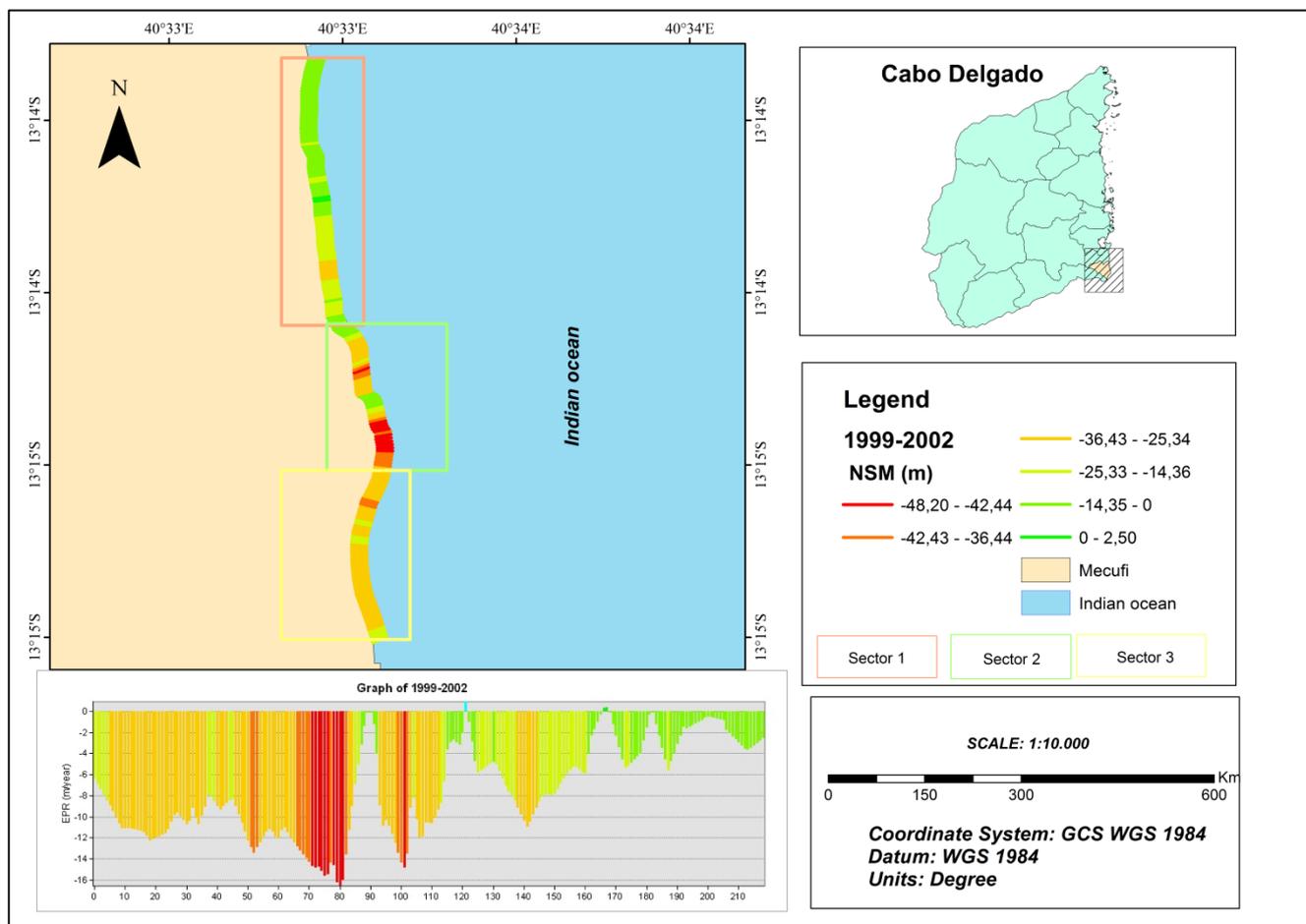


Figura 9: Variação espacial da linha de costa de no intervalo de 1999 a 2002.

A figura 10, correspondente ao intervalo de 2002 a 2004, evidencia uma predominância de processos deposicionais ao longo de quase toda a faixa litorânea analisada. A região, abrangendo os sectores (1, 2 e 3), apresentou uma taxa média de avanço da linha de costa de 7.03 m/ano, o que corresponde a um deslocamento médio de 15.9 metros em direcção ao mar.

A análise sectorial mostra que o sector 3 registou a maior taxa de deposição, com um valor máximo de 41 metros, não sendo verificados indícios de erosão nesse sector durante o período analisado. No sector 2, observou-se também uma deposição significativa, embora tenha sido identificado um pequeno trecho com erosão, com recuo máximo de 3.71 metros, O sector 1 apresentou uma redução na intensidade da deposição em comparação com os sectores 2 e 3. Ainda assim, manteve uma tendência

deposicional, embora com ocorrências pontuais de erosão, as quais atingiram igualmente um recuo máximo de 3.71 metros.

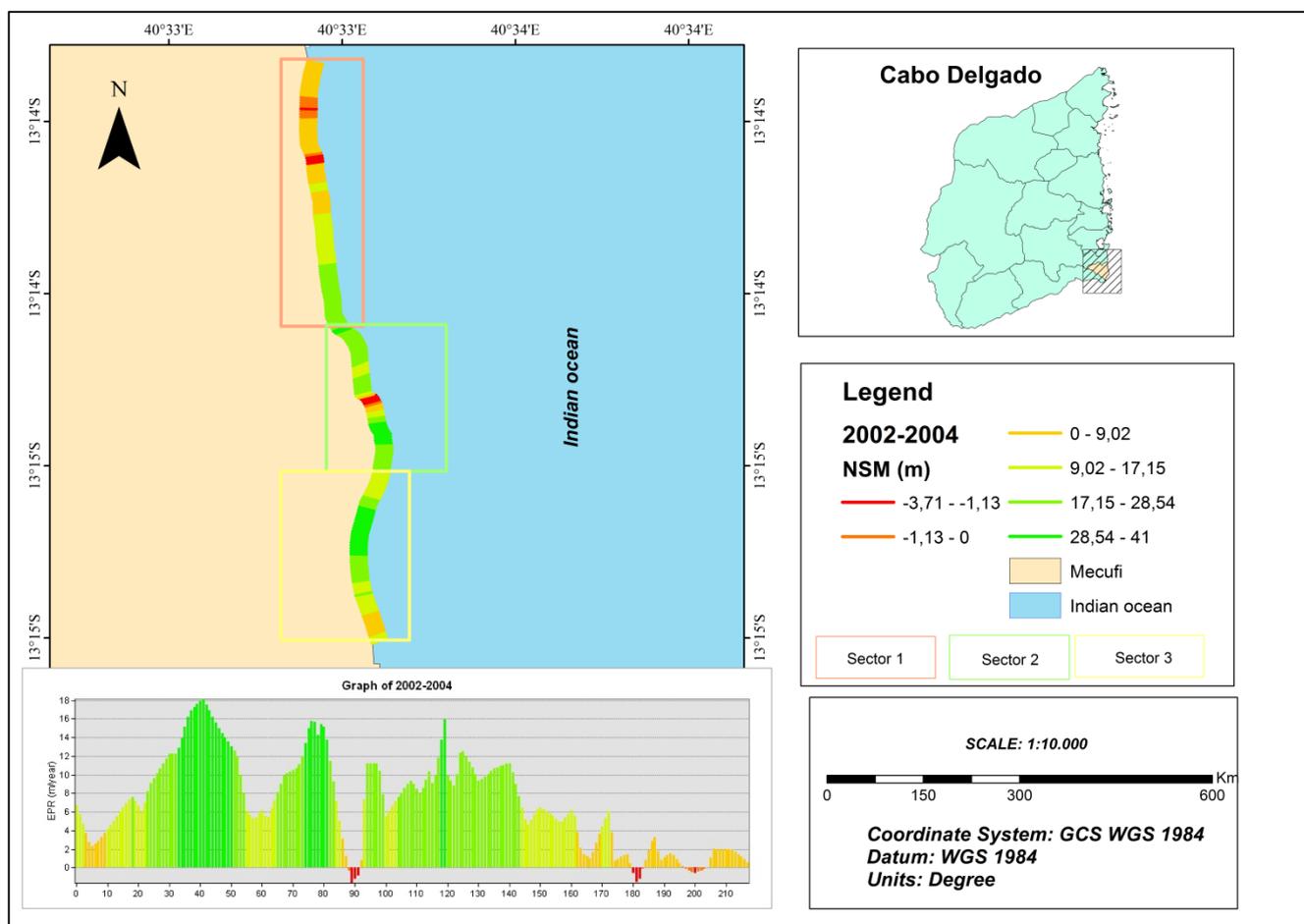


Figura 10: Variação espacial da linha de costa de no intervalo de 2002 a 2004.

A figura 11 refere-se ao intervalo temporal de 2004 a 2009, neste período verificou-se uma predominância de processos deposicionais ao longo da linha de costa da região de Mecúfi. Neste intervalo, a região toda abrangendo todos os sectores, apresentou uma taxa média de avanço da linha de costa de aproximadamente 1.9 metros por ano, o que corresponde a uma distância média acumulada de deposição de 9.05 metros em direcção ao mar, indicando uma tendência de acréscimo sedimentar.

A análise sectorial revela que o sector 3 se destacou como a zona com maior estabilidade deposicional, não tendo sido registados quaisquer indícios de erosão durante este período. Este sector foi completamente dominado por processos de deposição, tendo-se observado uma distância máxima de avanço da linha de costa de 39.75 metros, representando o valor mais elevado de deposição verificado neste intervalo. Nos sectores 1 e 2, embora a deposição tenha continuado a manifestar-se, observou-se uma redução na sua intensidade quando comparada com o sector 3.

Em ambos os sectores, surgiram pequenas áreas pontuais com ocorrência de erosão, sendo o sector 2 o mais afectado por esse fenómeno. Neste sector, a distância máxima de recuo da linha de costa atingiu os 11.07 metros, indicando zonas de instabilidade localizadas que contrastam com a tendência geral de deposição observada na região.

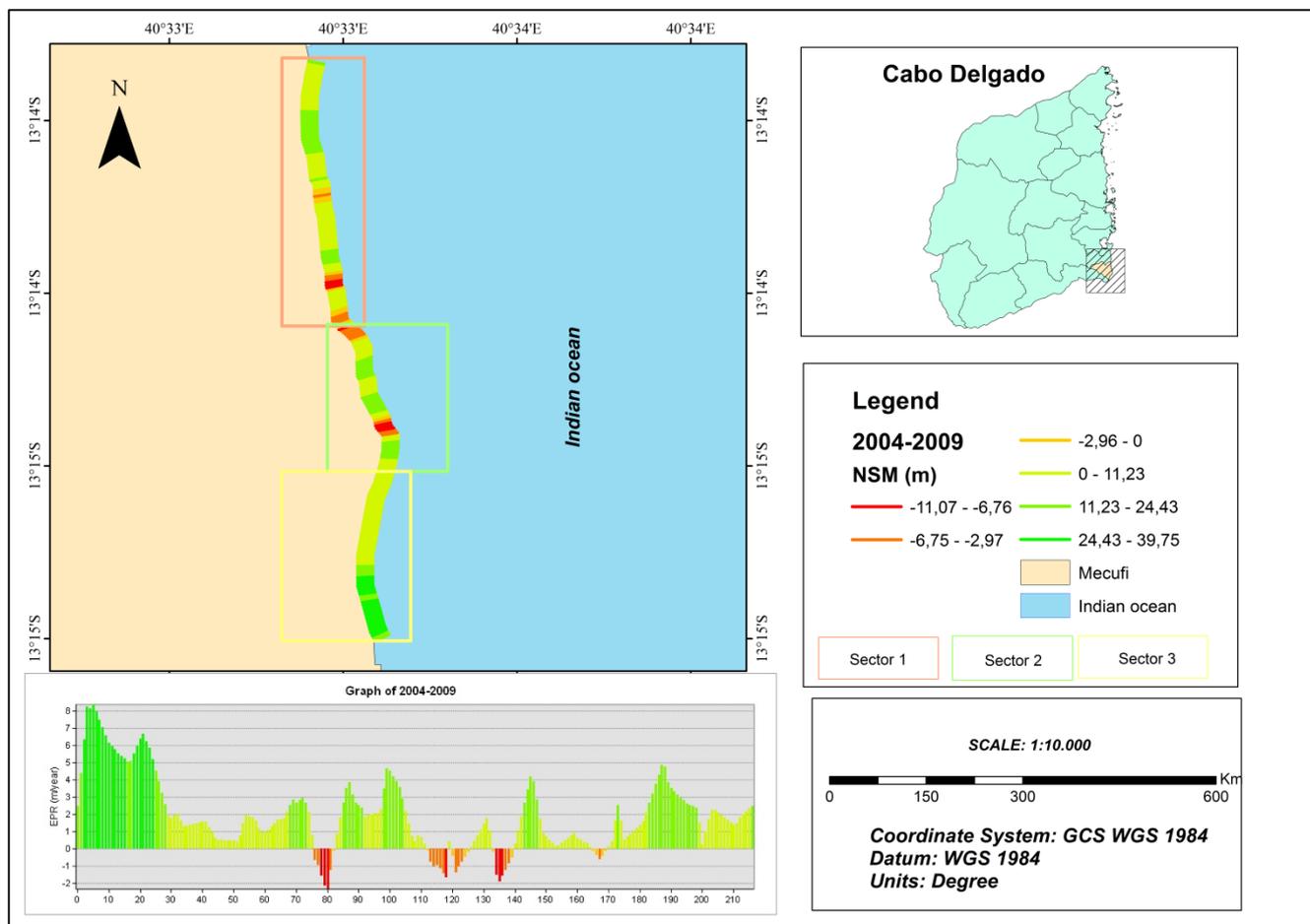


Figura 11: Variação espacial da linha de costa de no intervalo de 2004 a 2009.

A figura 12 referente ao intervalo de 2009 a 2010, período dominado maioritariamente por processos erosivos. A região analisada apresentou uma taxa média de recuo da linha de costa de  $-0.49$  m/ano, o que corresponde a uma distância média erodida de 0.49 metros.

No sector 1, verificou-se erosão ao longo de quase toda a extensão, com apenas pequenas áreas isoladas de deposição. O sector 2 registou a maior intensidade de erosão, com uma distância máxima erodida de 28.98 metros, superando os sectores 1 e 3. Apesar disso, este sector também apresentou áreas com deposição significativa, com um valor máximo de 27.39 metros depositados. O sector 3 foi marcado por uma predominância de deposição em quase toda a sua extensão, atingindo igualmente um valor máximo de 27.39 metros de avanço da linha de costa.

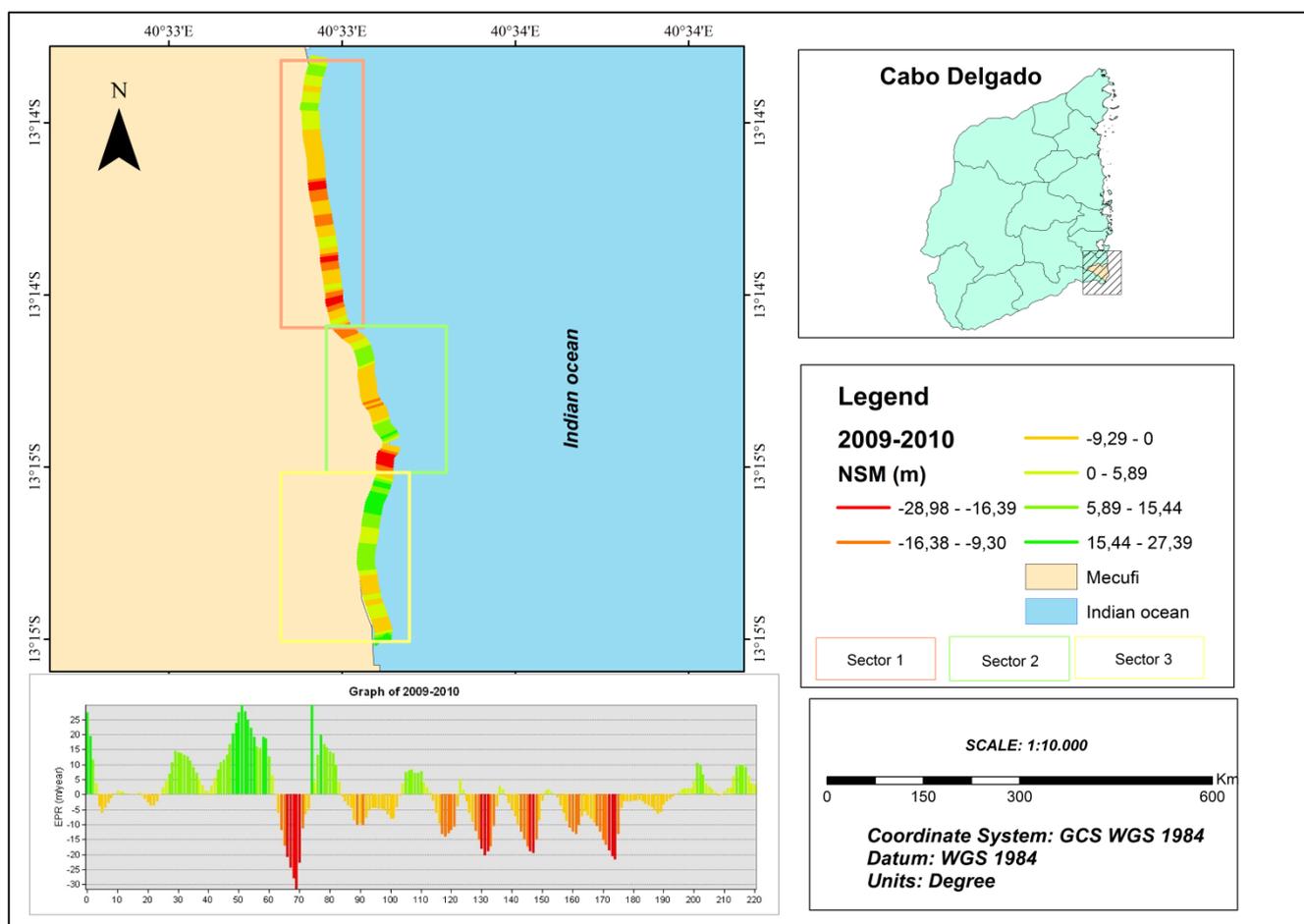


Figura 12: Variação espacial da linha de costa de no intervalo de 2009 a 2010.

A Figura 13, correspondente ao intervalo de 2010 a 2011, caracteriza-se por uma erosão intensa e generalizada ao longo de praticamente toda a extensão da zona costeira de Mecúfi. Durante este período, a linha de costa registou uma taxa média de recuo de -15.73 metros por ano, equivalente a uma distância média erodida de 15.73 metros, o que evidencia uma fase de forte recuo da faixa litorânea.

A análise sectorial confirma que todos os sectores (1, 2 e 3) foram significativamente afectados pelos processos erosivos. O valor máximo de recuo da linha de costa atingiu os -30.24 metros, demonstrando a severidade da erosão neste intervalo.

Nos sectores 1 e 3, não foram identificados quaisquer indícios de deposição, sendo estes totalmente dominados pela erosão. Apenas no sector 2 se verificou uma deposição pontual e de baixa magnitude, com um valor máximo de apenas 2.18 metros de avanço da linha de costa.

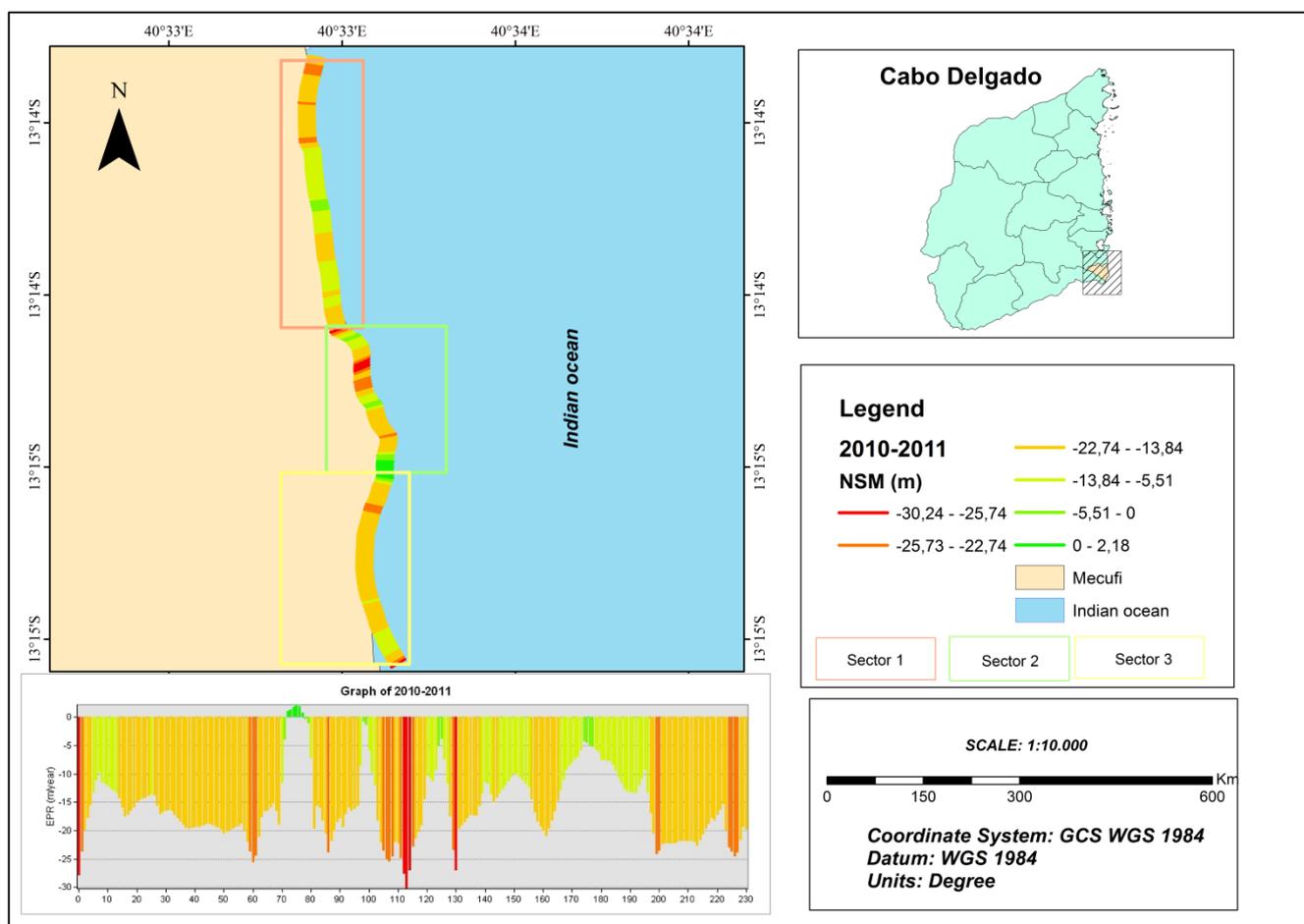


Figura 13: Variação espacial da linha de costa de no intervalo de 2010 a 2011.

A figura 14 apresenta a evolução da linha de costa no intervalo de 2011 a 2013, período que se caracteriza, de forma geral, pela predominância de processos deposicionais ao longo da região de Mecúfi. Neste intervalo, foi registada uma taxa média de avanço da linha de costa de 6.28 metros por ano, o que corresponde a uma distância média acumulada de 13.06 metros, reflectindo uma fase de recuperação e expansão da linha de costa em direcção ao mar.

A análise sectorial mostra que o sector 1 foi o mais dinâmico neste período, registando valores relativamente elevados de deposição, com um valor máximo de 30.47 metros. No entanto, este mesmo sector evidenciou também ocorrências de erosão, embora pontuais, com um recuo máximo da linha de costa de 14.13 metros em determinados trechos. Isto indica uma dinâmica mista neste sector, onde coexistiram processos de deposição e erosão, ainda que a deposição tenha sido dominante. Em contraste, os sectores 2 e 3 não apresentaram indícios significativos de erosão durante este intervalo. Ambos os sectores foram marcados exclusivamente por processos deposicionais, com valores de avanço da linha de costa que variaram entre 10.34 metros e 30.47 metros, confirmando uma tendência positiva no balanço sedimentar ao longo destes sectores.

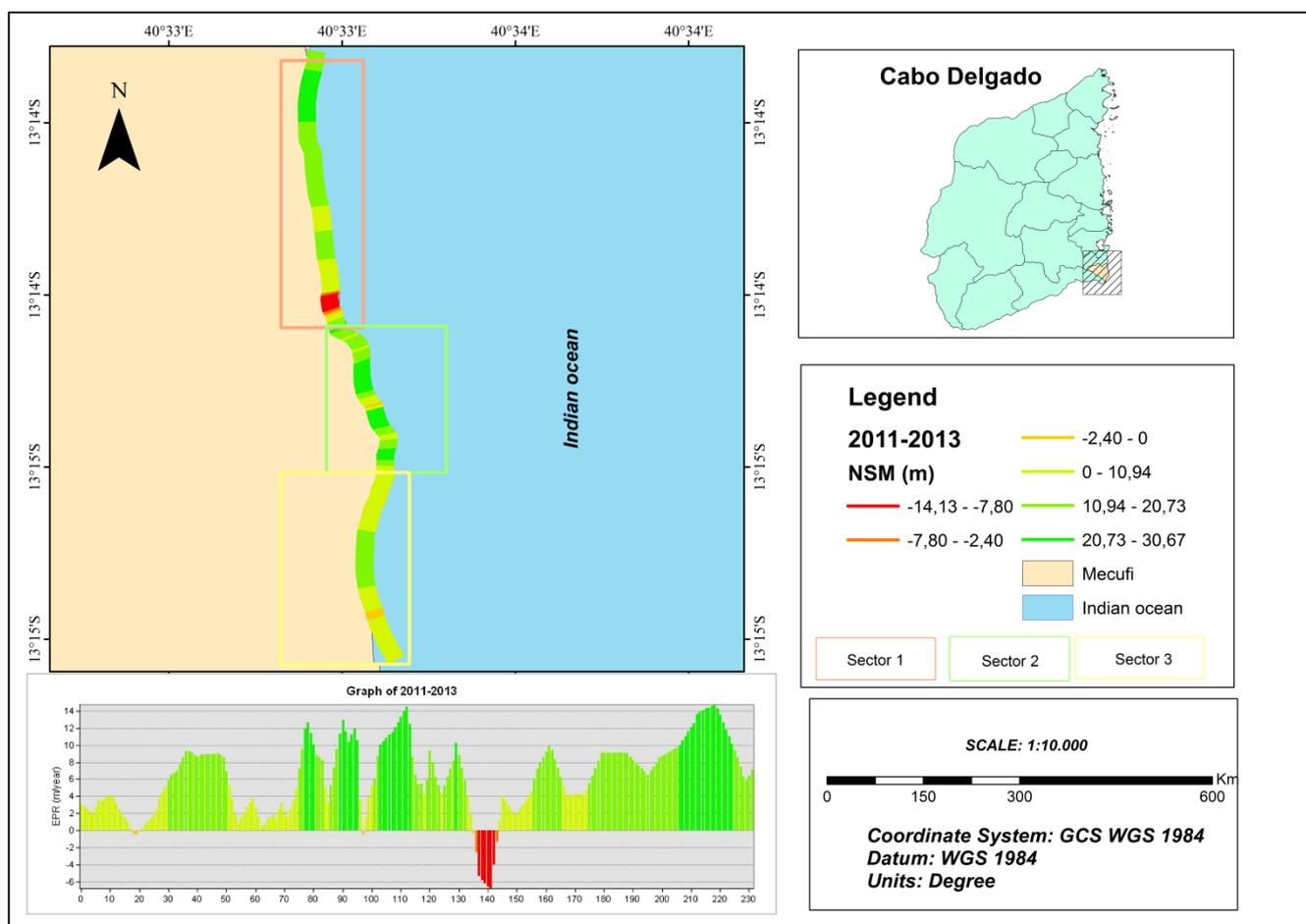


Figura 14: Variação espacial da linha de costa de no intervalo de 2011 a 2013.

A figura 15 refere-se à dinâmica da linha de costa no período de 2013 a 2016, o qual foi amplamente dominado por processos erosivos. A taxa média de erosão observada nesse intervalo foi de aproximadamente -1.2 m/ano, correspondendo a uma distância média erodida de 3.7 metros. A análise sectorial evidencia que o Sector 3 foi o mais afectado, apresentando intensa erosão ao longo de quase toda sua extensão, com valores que chegaram a atingir 29.85 metros. As áreas de deposição nesse sector foram pontuais e limitadas, variando entre 2.0 a 20.98 metros. No Sector 2, os processos erosivos também predominaram, embora com menor intensidade em comparação ao Sector 3. As variações espaciais foram mais suaves e as regiões com deposição foram pouco expressivas. O Sector 1 apresentou uma dinâmica mais mista, com registos significativos tanto de erosão quanto de deposição. Algumas áreas desse sector atingiram valores elevados de deposição, chegando a 40,56 metros, enquanto a erosão variou entre 11.27 metros e 20.03 metros.

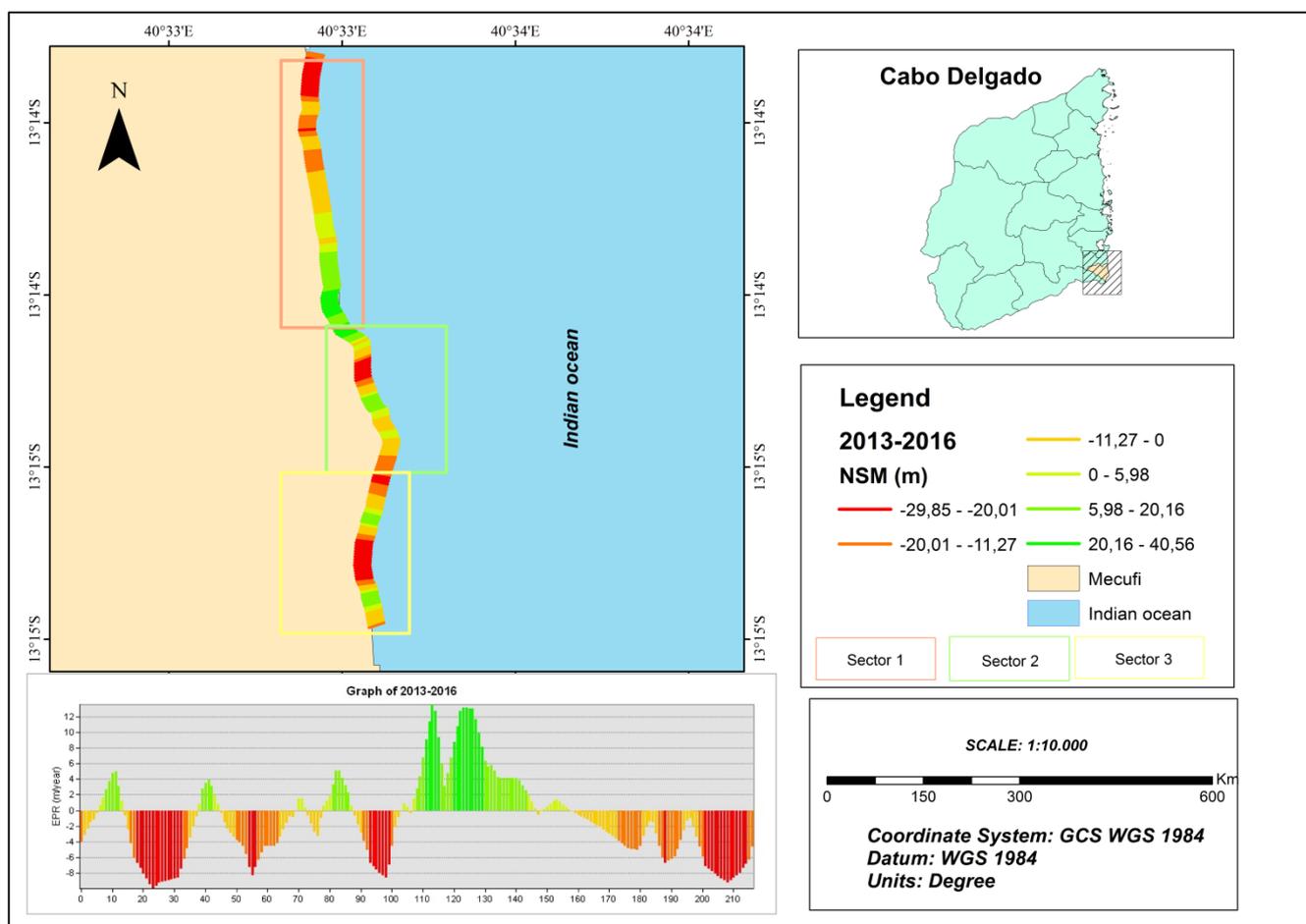


Figura 15: Variação espacial da linha de costa de no intervalo de 2013 a 2016.

O período compreendido entre os anos de 2016 e 2019 (figura 16) foi caracterizado, de modo geral, pela predominância de processos erosivos ao longo da costa de Mecúfi. A taxa média de erosão registada nesse intervalo foi de aproximadamente -2.2 m/ano, o que corresponde a uma distância média erodida de 7.6 metros. A análise sectorial revela que os Sectores 1 e 3 apresentaram áreas pontuais com indícios de deposição leve, cujos valores variaram entre 3.57 metros e 19.68 metros. Em contrapartida, nesses mesmos sectores também foram observados processos erosivos de baixa intensidade, com valores máximos de até 21.34 metros erodidos. Diferentemente dos demais, o Sector 2 apresentou um comportamento marcadamente erosivo ao longo de todo seu trecho, destacando-se pelos valores mais elevados de erosão registados no período. As distâncias erodidas nesse sector variaram entre 21.34 metros e 57.34 metros, superando significativamente os valores observados nos Sectores 1 e 3.

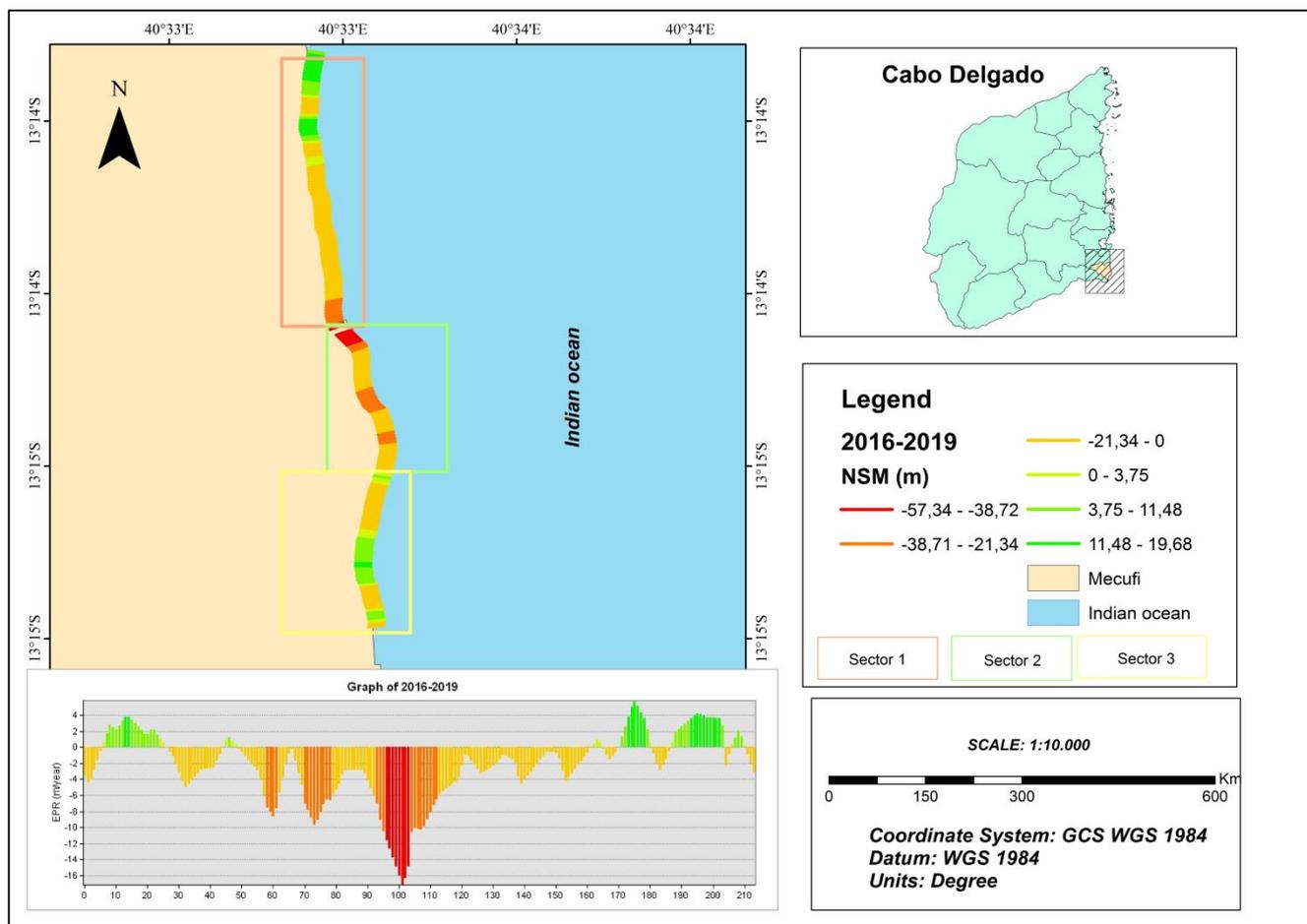


Figura 16: Variação espacial da linha de costa de no intervalo de 2016 a 2019.

Durante o período de 2019 a 2023, (figura 17) a região costeira de Mecúfi apresentou uma intensificação simultânea dos processos de erosão e deposição, embora com predominância erosiva. A taxa média de deposição observada foi bastante baixa, estimada em 0.07 m/ano, o que corresponde a uma distância média de apenas 0.3 metros de material depositado ao longo do litoral.

A análise sectorial indica que os Sectores 1 e 3 foram os mais afectados pela erosão, com valores variando entre 4.40 metros e 18.16 metros erodidos. No entanto, o Sector 3 também registou áreas de deposição mais significativa, com valores que oscilaram entre 7.87 metros e 16.28 metros. No Sector 1, apesar da predominância da erosão ao longo de quase toda a sua extensão, verificou-se a ocorrência de deposição leve, com um valor máximo de 7.87 metros. O Sector 2, por sua vez, apresentou um padrão distinto, com predominância de deposição em quase todo o trecho, registando valores que variaram entre 7.87 metros e 28.45 metros, superando os demais sectores nesse aspecto. Apesar disso, em um trecho específico do Sector 2, observou-se também a ocorrência de erosão, atingindo aproximadamente 18.16 metros.

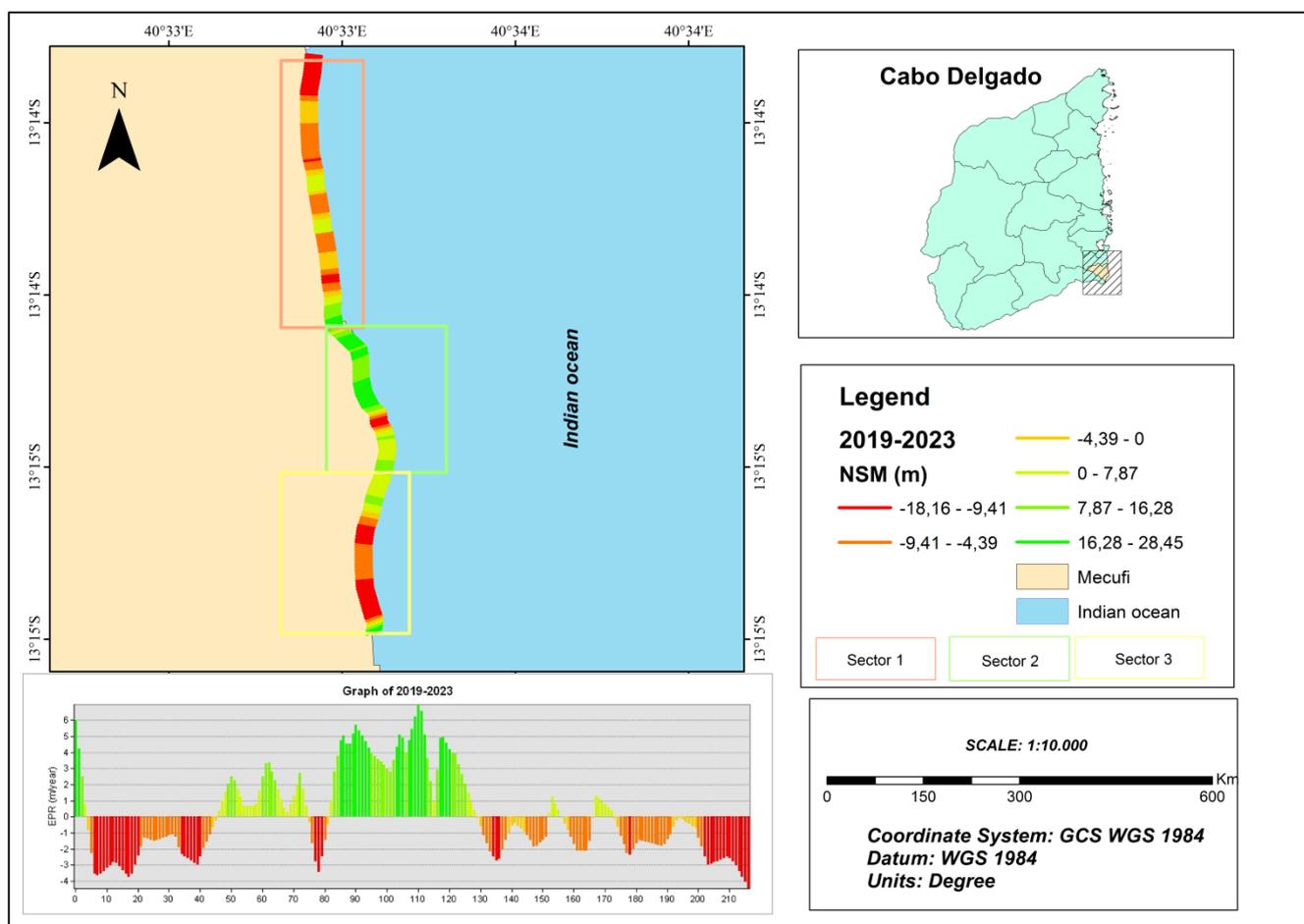


Figura 17: Variação espacial da linha de costa de no intervalo de 2019 2023.

Entre os anos de 2023 e 2024, (figura 18) a região costeira de Mecúfi foi fortemente impactada por processos erosivos intensos, com recuo significativo da linha de costa ao longo de quase todo o trecho analisado. A taxa média de erosão observada no período foi de -8.2 m/ano, o que corresponde a uma distância média erodida de 9.7 metros, evidenciando um avanço contínuo do mar em direção ao continente. A análise sectorial mostra que os Sectores 2 e 3 registaram os valores mais elevados de erosão, com distâncias erodidas variando entre 17.51 metros e 39.04 metros. Apesar da forte erosão, o Sector 3 apresentou pequenas áreas com deposição muito discreta, atingindo um valor máximo de 1.37 metros.

No Sector 1, também predominou a erosão, com valores que oscilaram entre 17.51 metros e 27.77 metros. No entanto, assim como nos demais sectores, ocorreram depósitos pontuais, sendo que os Sectores 1 e 2 apresentaram valores superiores ao Sector 3 em termos de deposição, variando entre 2.12 metros e 3.26 metros.

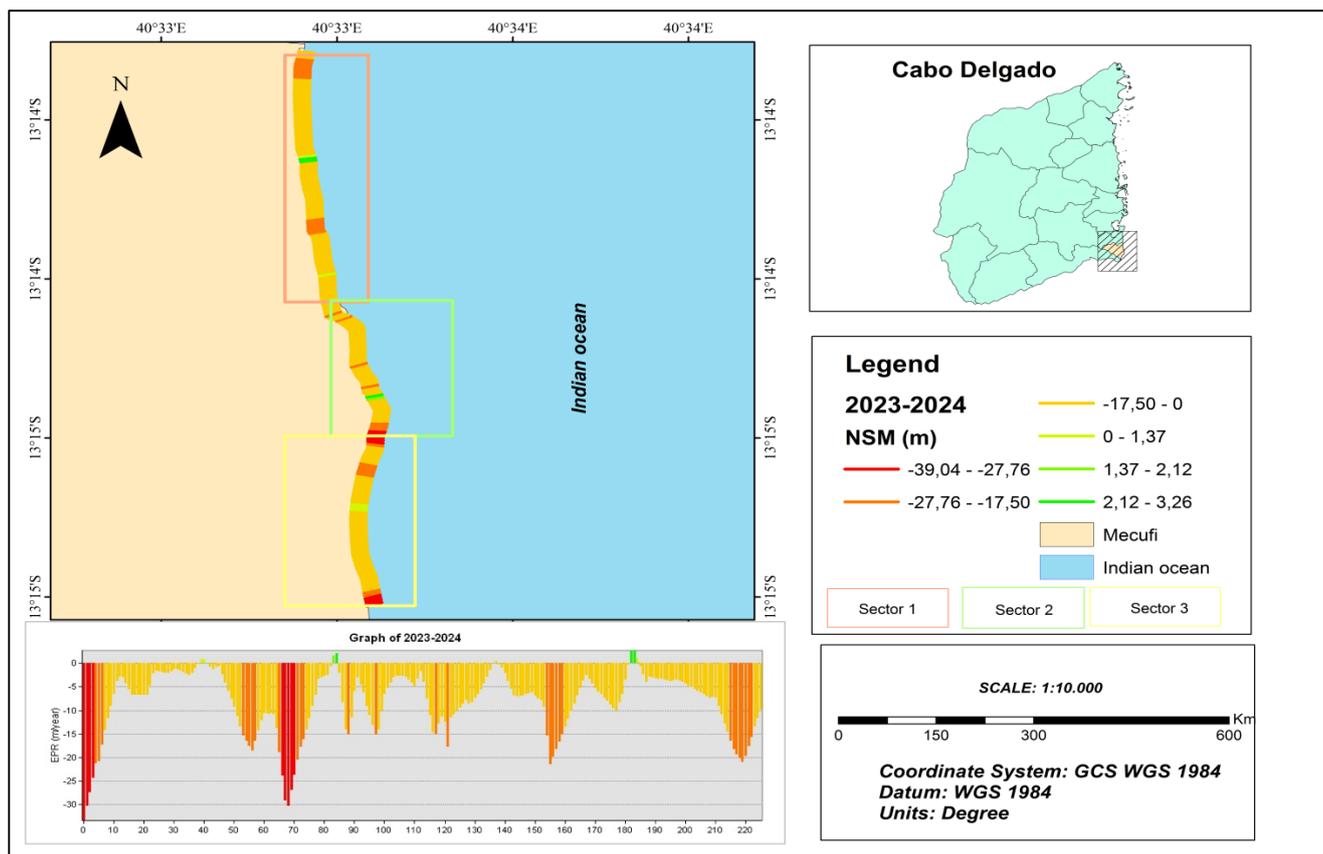


Figura 18: Variação espacial da linha de costa de no intervalo de 2023 2024.

A figura 19 ilustra a tendência linear da posição da linha de costa em (m) em relação a primeira linha da série temporal. Os valores negativos representam o recuo da linha de costa indicando a ocorrência da erosão e os valores positivos indicam o avanço da linha de costa indicando a deposição. De 1994 a 2024 a uma evidente tendência erosiva ocorrendo na região de Mecufi indicando um recuo médio de -1,03 m/ano. 1997 Atingiu uma distância média de 11.46 m indicando maior deposição, de 2009 a 2010 houve uma estabilidade da linha de costa o ano 2002 e 2024 apresentaram valores relativamente baixos correspondes a -16,55 m e -15,88 m indicando uma erosão.

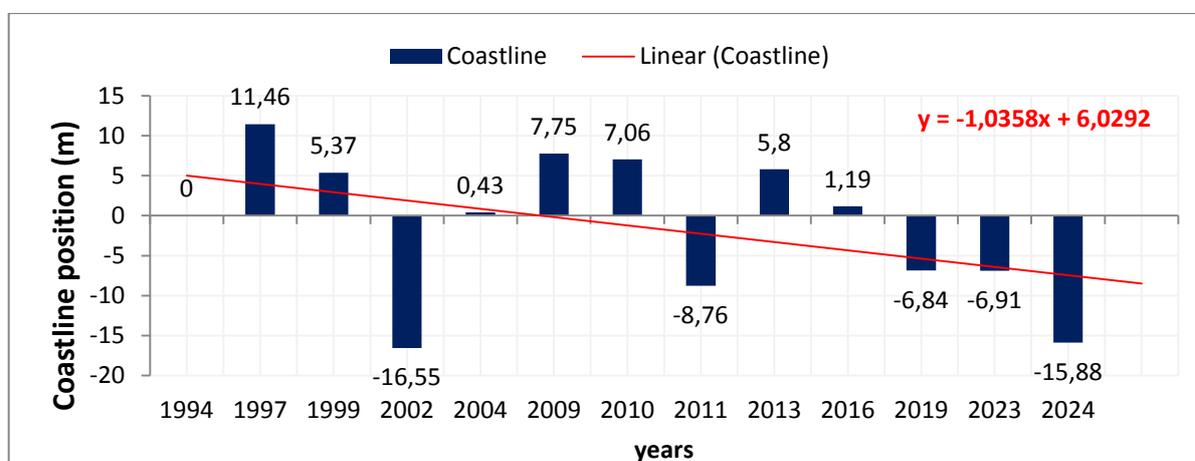


Figura 19: Posição temporal da linha de costa em relação à linha de base (1994 a 2024).

#### 4.1.2. Determinação do recuo e avanço da linha de costa na região de Mecúfi de 1994-2024

Os valores obtidos a partir do parâmetro LRR (figura 20) indicam que, ao longo de um período de 31 anos (1994 a 2024), a linha de costa na região de Mecúfi apresentou em toda a região (sector 1, 2 e 3) um recuo médio da linha de costa a uma taxa de  $-0.39$  m/ano em direcção ao continente. Esse deslocamento corresponde a uma distância média erodida de 12,09 metros evidenciando a predominância de processos erosivos contínuos ao longo do tempo, no geral 88% foi erodida e por outro lado 12% foi de deposição em toda a região. Com base na análise sectorial da linha de costa, observa-se que todos os sectores analisados foram marcados por processos erosivos, embora com intensidades e padrões espaciais distintos. O Sector 3 apresentou erosão leve na porção inicial de sua linha de costa, com valores que variaram entre 0 e 12.62 metros. Apesar da predominância da erosão ao longo do sector, foi identificado um pequeno trecho no Sector 3 com ocorrência de deposição, cujos valores variaram de 0 a 5.91 metros. O Sector 2, de forma geral, não apresenta indícios de deposição em todo o trecho, sendo caracterizado pela ocorrência de muita erosão, com valores que variam de 12.62 a 32.60 metros erodidos. O Sector 1, por sua vez, revelou tanto processos erosivos quanto deposicionais, embora a erosão se destaque como o fenómeno predominante em quase toda a extensão do sector. Os valores de erosão nesse sector oscilaram entre 12.62 e 48.04 metros, enquanto a deposição máxima registada foi de 10.64 metros.

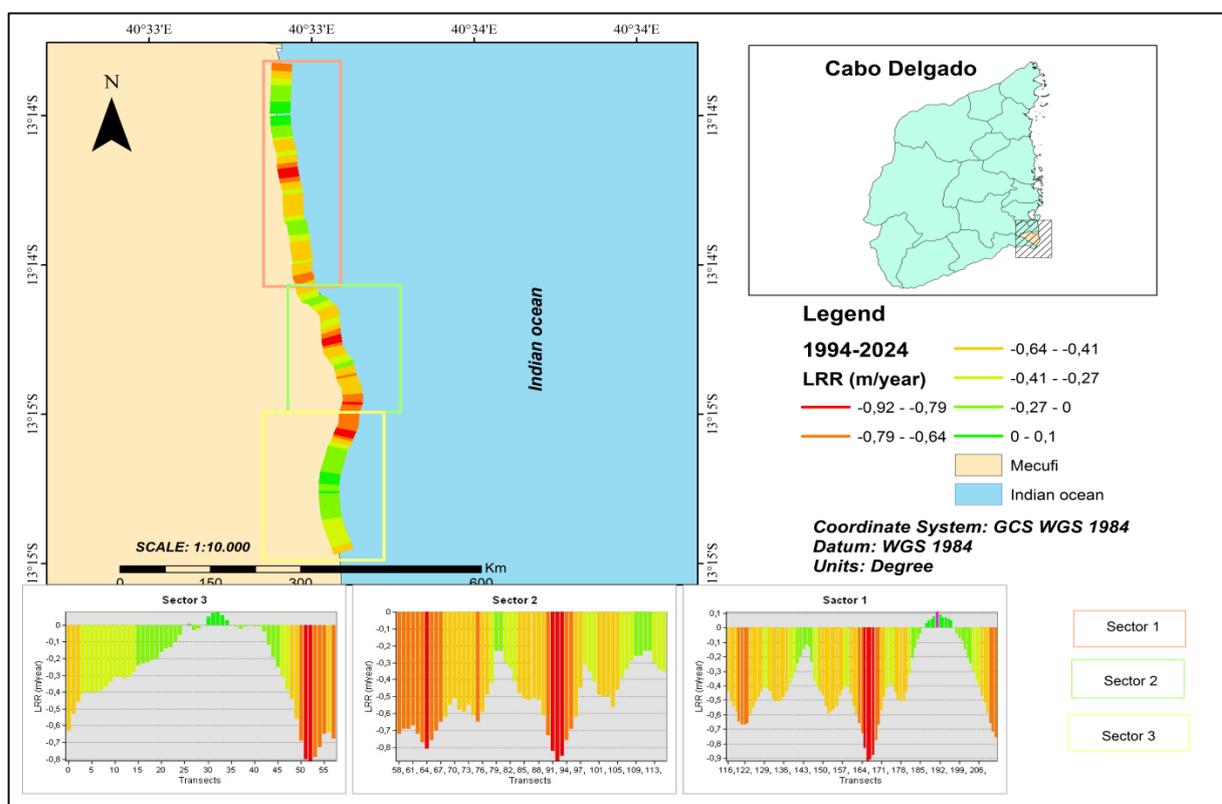


Figura 20: Variação espacial da linha de costa de no intervalo de 1994 2024.

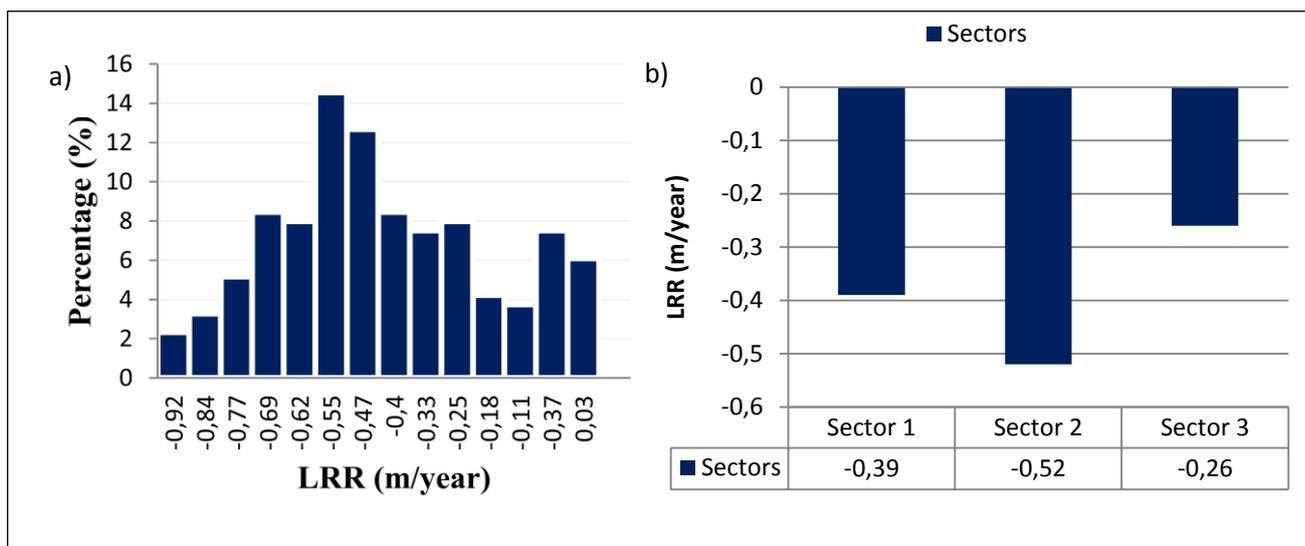


Figura 21: Frequência do (NSM) e da Taxa de Recuo da Linha de Costa (LRR) no período de 1994 a 2024.

A distribuição percentual do LRR (figura 21 a) revela que os valores variam entre -0,92 m/ano e 0,03 m/ano, sendo que a maior percentagem de ocorrência se concentra no intervalo de -0,55 m/ano a -0,47 m/ano, com aproximadamente 14%. Este resultado confirma que, ao longo do período analisado, boa parte da linha de costa sofreu uma regressão média anual significativa. Os menores percentuais ocorrem nos extremos da distribuição, como os intervalos de -0,92 m/ano e 0,03 m/ano, que apresentam ocorrências inferiores a 8%, sugerindo que taxas de recuo muito intensas ou de avanço são raras. A análise sectorial (figura 21 b) revelou que, em média, o Sector 2 apresentou a maior taxa de erosão, atingindo valor médio de até -0,52 m/ano, superando os demais sectores com uma distância de 16,12 m. O Sector 3 foi o menos afectado pela erosão, com uma taxa média de -0,26 m/ano correspondente a um recuo médio 8,06 m. O Sector 1, por sua vez, registou uma taxa média de erosão de -0,39 m/ano, tendo recuado em média uma distância de 12,09 m.

#### 4.2. Uso e ocupação do solo na Região de Mecúfi (1994-2024)

As imagens representadas na figura 22 ilustram a variação do uso e ocupação do solo no intervalo de 1994 a 2024. Para esse estudo, foram seleccionados os anos de 1994, 2003, 2013 e 2024 como marcos temporais de análise. Em 1994, observa-se uma predominância de vegetação densa, com poucas áreas rasas e solos expostos. Já em 2003, nota-se uma significativa redução da vegetação densa, com aumento da vegetação arbustiva. Além disso, houve uma expansão das áreas com solo exposto e dos bancos submersos, indicando um processo de transformação da cobertura vegetal e das características do solo ao longo do tempo.

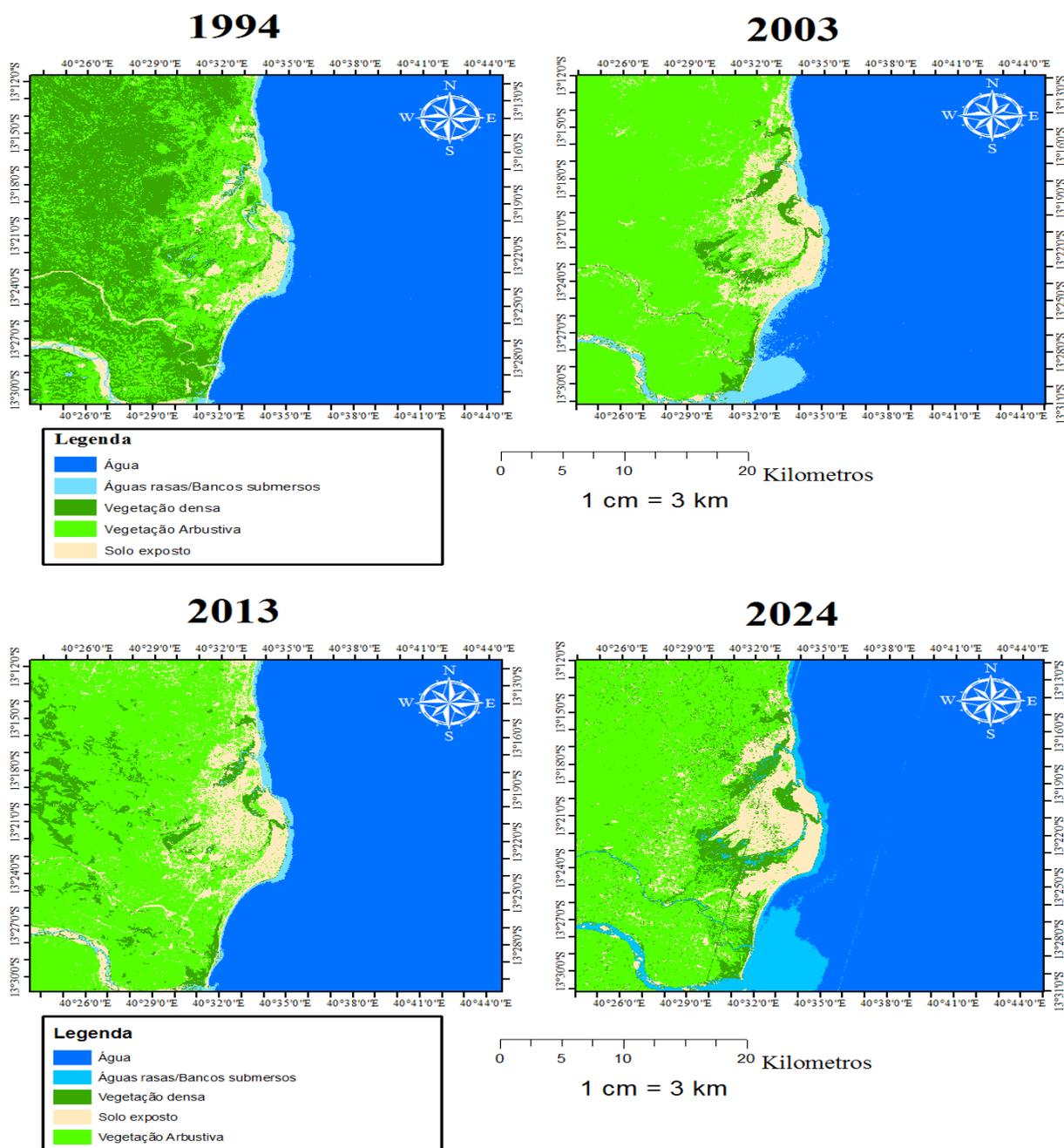


Figura 22: Variação espacial do uso e ocupação do solo de 2013-2024.

Entre 2013 e 2024, observa-se certa recuperação da vegetação em algumas áreas, especialmente na forma de vegetação arbustiva. Apesar disso, o solo exposto ainda mantém uma presença significativa, sugerindo que a região continua sujeita a pressões ambientais. Esse comportamento pode estar relacionado a processos de regeneração natural ou à implementação de medidas de recuperação ambiental.

O gráfico apresentado na (figura 14) mostra a variação da cobertura de solo entre os anos de 1994, 2003, 2013 e 2024, abrangendo cinco classes principais: água, águas rasas, vegetação arbustiva,

vegetação densa e solo exposto (figura 22). Observa-se que a área ocupada por corpos de água se manteve praticamente estável ao longo dos anos, com valores em torno de 10,8 %, o que indica pouca ou nenhuma alteração significativa neste tipo de cobertura. As águas rasas também não apresentaram mudanças expressivas, com variações modestas entre os anos, mantendo-se relativamente constantes. Por outro lado, a vegetação arbustiva sofreu uma redução drástica, passando de 34,8 % em 1994 para apenas 4,1 % em 2003, com uma leve recuperação nos anos seguintes, atingindo 10,1% em 2024. Essa queda acentuada sugere substituição por outros tipos de cobertura, como solo exposto ou vegetação densa. Em contrapartida, a vegetação densa apresentou um aumento expressivo de 37,8 % em 1994 para 65,8 % em 2003, seguido por uma queda para 22,7 % em 2013 e nova elevação em 2024, alcançando 57,7 %. O solo exposto, por sua vez, passou por um crescimento acentuado até 2013, quando atingiu 53,4 %, o que pode indicar um período de intensa desflorestação, urbanização ou outras formas de degradação do solo. No entanto, esse valor diminuiu consideravelmente em 2024, registrando 15,8 %.

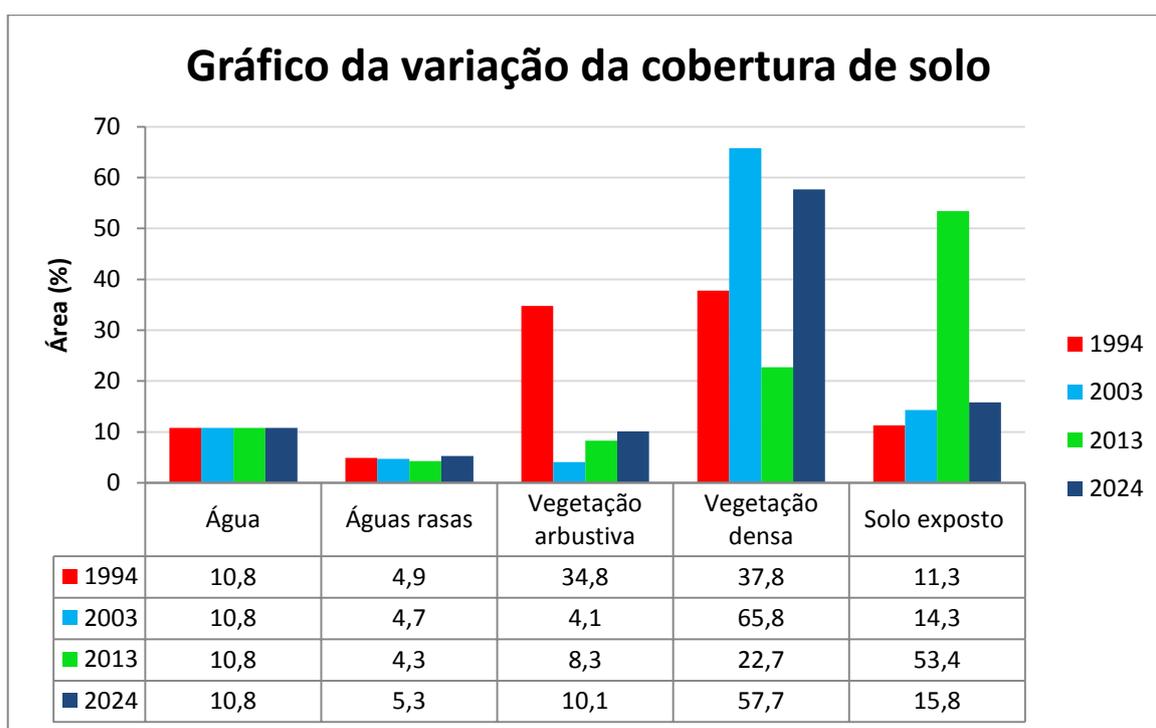


Figura 23: Gráfico da variação do uso e ocupação do solo.

#### 4.3. Caracterização de forçantes oceanográficos e atmosféricos (Eventos extremos)

A figura 24 corresponde a análise da precipitação extrema no período de 1994 a 2024, considerando dois parâmetros principais, a frequência anual de eventos extremos (figura 24 a) e a precipitação máxima diária anual (figura 24 b). Observa-se uma variabilidade significativa na ocorrência de eventos extremos ao longo do período o que indica que o ano de 2004 destacou-se com a maior frequência de

eventos extremos, registrando quatro ocorrências. Outros anos que também apresentaram uma frequência relativamente elevada foram 2008, 2013, 2017 e 2019, com até dois ou três eventos extremos. No que se refere à intensidade das chuvas (figura 24 b), representada pela máxima precipitação diária anual, nota-se que os anos de 2002, 2004, 2012, 2013, 2017, 2019 e 2022 registaram os valores mais elevados, com picos entre aproximadamente 60 mm e 80 mm. Por outro lado, anos como 2000, 2005, 2009 e 2015 apresentaram valores mais baixos, com chuvas máximas iguais ou inferiores a 35 mm. Entre 1994 e 2024, a precipitação apresentou uma tendência crescente ao longo dos anos.

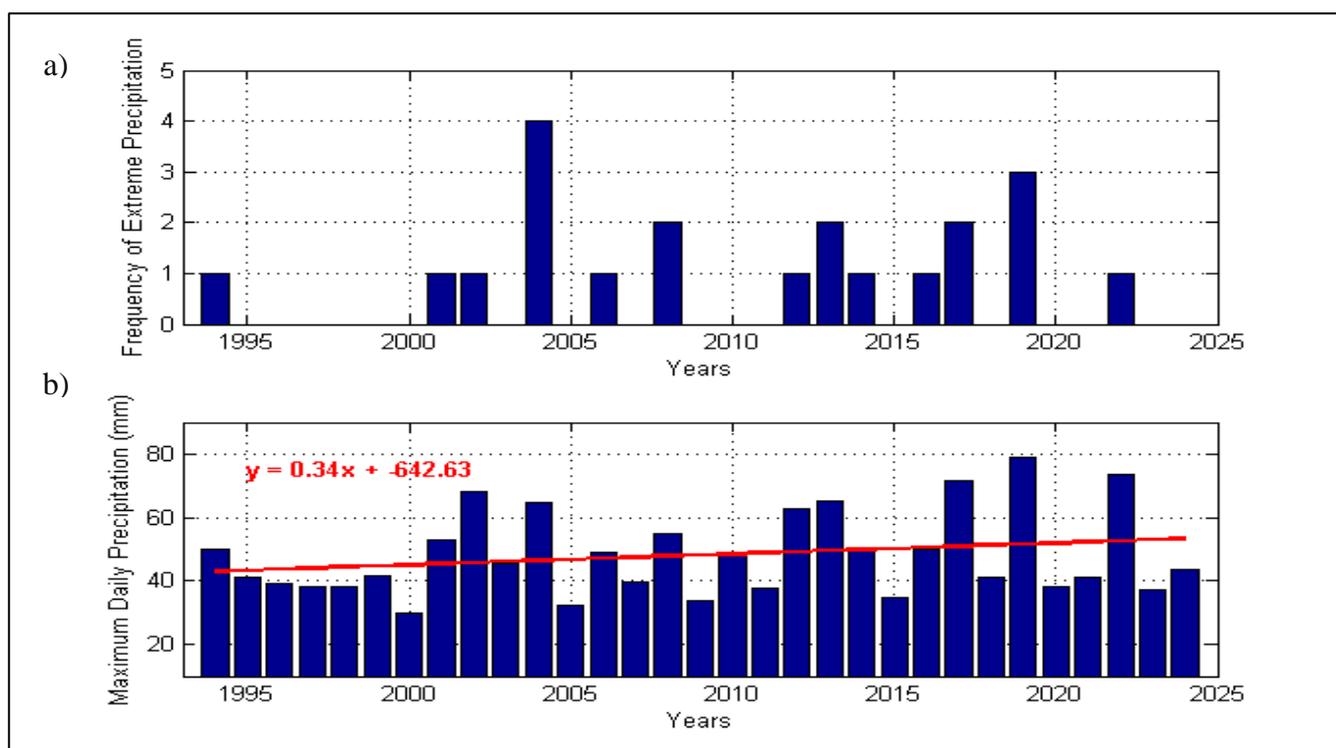


Figura 24: Frequência de chuvas extremas e chuvas máximas diárias na região de Mecúfi 1994 a 2024.

No gráfico abaixo (figura 25 a) observa-se uma variação considerável na frequência de ocorrência de ventos extremos ao longo dos anos. O ano de 1994 apresenta-se como um dos períodos mais críticos, com uma frequência próxima de 15 eventos extremos, sugerindo uma actividade atmosférica particularmente intensa nesse ano. Após este pico inicial, verifica-se uma acentuada diminuição na frequência de eventos extremos entre 1995 a 2010, com valores muito baixos. No entanto, a partir de 2011, nota-se uma tendência de aumento gradual, culminando com um aumento abrupto em 2024, ano em que se registam mais de 20 eventos extremos o valor mais elevado de toda a série temporal. No gráfico inferior (figura 25 b), referente à velocidade máxima diária do vento, observa-se que os valores se mantêm relativamente estáveis ao longo do tempo, oscilando entre aproximadamente 6 m/s a 10 m/s. Nota-se que anos como 1994, 1995, 1997, 2016, 2019 e 2024 apresentam velocidades máximas

particularmente elevadas iguais ou superiores a 10 m/s, o que indica a ocorrência de episódios de vento mais intensos nesses anos.

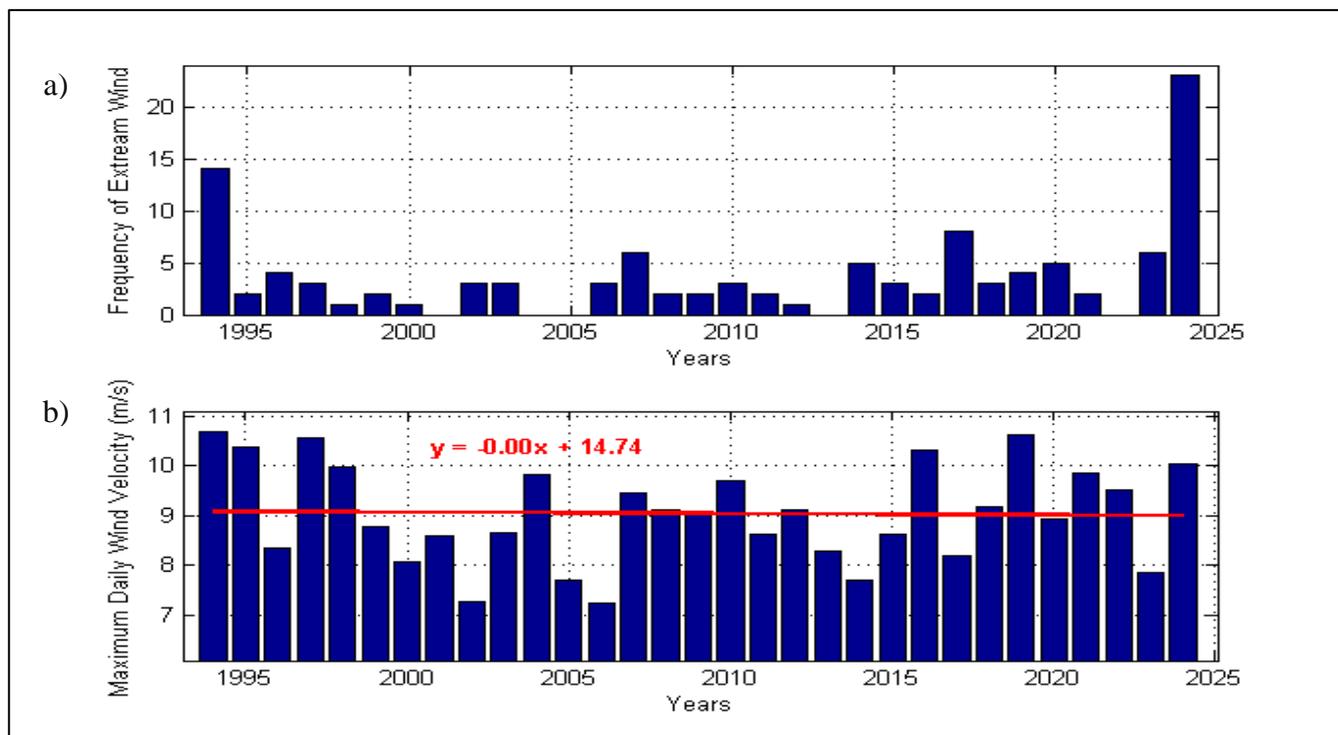


Figura 25: Frequência de ventos extremos e ventos máximos diários na região de Mecúfi 1994 a 2024.

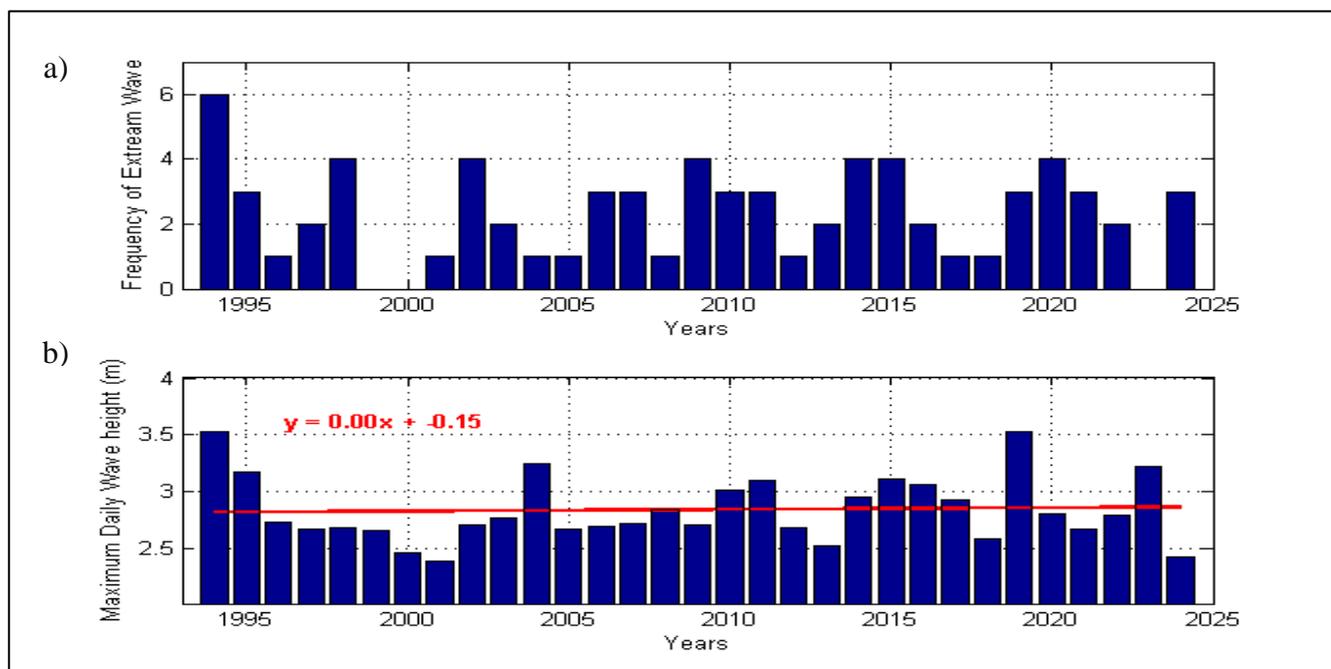


Figura 26: Frequência de eventos de ondas extrema e ondas máximas diárias na região de Mecúfi 1994 a 2024.

O gráfico acima (figura 26 a) referente à altura significativo da onda evidencia a evolução temporal da frequência de eventos extremos de ondulação ao longo dos anos, com destaque para os anos de 1994, 1995, que registaram, respectivamente, 6 ocorrências de eventos extremos. Nos anos subsequentes, até 2005, a frequência manteve-se reduzida, com variações modestas entre 1 a 4 eventos por ano. A partir de 2006, verifica-se um crescimento progressivo na ocorrência de eventos extremos, culminando num aumento expressivo em 2011, ano que registou 8 eventos extremos, o valor mais elevado de toda a série analisada. Entre 2012 e 2020, a frequência apresenta oscilações regulares, situando-se, de forma geral, entre 2 a 6 ocorrências anuais. No entanto, em 2024 verificaram-se 8 eventos extremos. Observa-se que, ao longo de todo o período, as alturas máximas (figura 26 b) variam entre 2,3 m a 3,7 m, evidenciando uma considerável amplitude interanual. Os anos com registos elevados são 1994, 1995, 2004, 2011, 2015, 2016, 2019 e 2023 com alturas que variam de 3 a 3,7 m. O ano de 2019 destaca-se como o mais crítico, com uma altura máxima superior a 3,7 metros. Os valores mantêm-se geralmente acima dos 2.5 metros, com exceções pontuais no ano 2024, onde se observa uma diminuição considerável da altura máxima das ondas.

A figura 27 ilustra a variação da altura do nível médio do mar no intervalo de 1999 a 2021. Os dados indicam um comportamento ascendente ao longo do período analisado, com oscilações anuais que reflectem variações sazonais do sistema oceânico. A análise de tendência revela uma taxa média de aumento de aproximadamente 4.8 mm por ano ( $y = 0.0048x + 0.9234$ ).

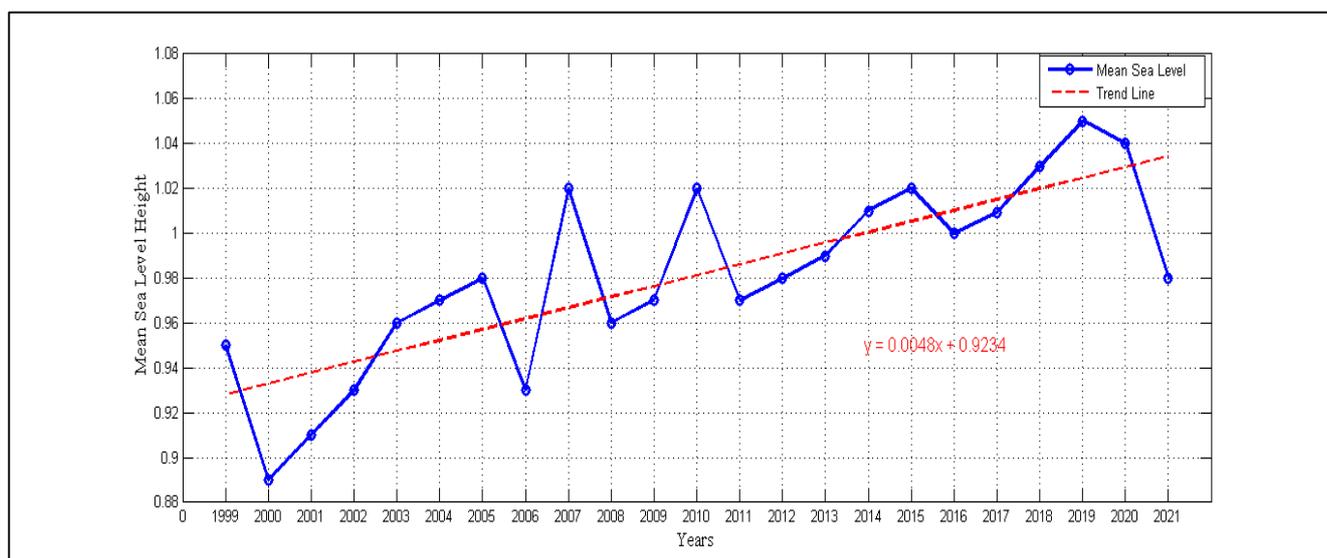


Figura 27: Variação do nível médio do mar no período de 1999 a 2021. (Matsinhe, 2024)

## CAPITULO V - DISCUSSÃO

### 5.1. Discussão

A análise da variação da linha de costa na região de Mecúfi, ao longo de 31 anos (1994 a 2024), revelou, por meio dos parâmetros EPR, NSM e LRR, um cenário predominantemente erosivo. Os resultados obtidos neste estudo confirmam a predominância de processos erosivos na área analisada, as variações sazonais dão mais detalhadas do movimento da linha de costa, que indicam tanto o recuo quanto o avanço da linha de costa ao longo do tempo. As taxas calculadas em intervalos curtos revelam, em média, uma tendência erosiva, a qual também é observada na análise baseada na posição da linha de costa em relação a linha de base, fixado na zona terrestre (conforme ilustrado na Figura 16).

Os períodos com maiores taxas de erosão ocorreram entre 1999 e 2002, e novamente entre 2009 e 2010, onde verificou-se um recuo significativo da linha de costa. A análise sectorial da região estudada, utilizando o parâmetro LRR (figura 17), mostra de forma clara que os sectores 1, 2 e 3 apresentam uma tendência marcante à erosão no intervalo de 1994 a 2024, evidenciando que toda a área é amplamente afectada por processos erosivos, embora a erosão tenha predominado na maior parte da área analisada, os sectores 1 e 3 apresentam, em determinadas regiões, uma deposição leve. Contudo, essa deposição é pouco expressiva e não é suficiente para contrariar a tendência dominante de recuo da linha de costa. A análise final, realizada com base no parâmetro LRR o qual considera todas as linhas de costa para efectuar um único cálculo revelou que, no período de 1994 a 2024, a região de Mecúfi registou uma taxa média anual de erosão de aproximadamente -0.39 m/ano, resultando num recuo total de 12.09 metros da linha de costa. Por outro lado Os resultados do parâmetro LRR apontaram que, na região de Mecúfi, os processos erosivos predominam de forma significativa sobre os deposicionais, com cerca de 80% da linha de costa apresentando tendência de recuo, enquanto apenas 12% evidenciaram avanço, o que demonstra um claro desequilíbrio morfodinâmico favorável à erosão costeira.

Estes resultados estão em concordância com estudos anteriores realizados tanto na área de estudo como em zonas costeiras adjacentes, reforçando a evidência de uma tendência erosiva persistente ao longo das últimas décadas. Em consonância com esses estudos Massangaie, (2019), utilizando imagens orbitais da série Landsat também acordou processos de erosão na da praia de Mecúfi num período de 15 anos compreendido pelo intervalo de 2003-2018 que atingiu um valor -3.4 m/ano no ponto B e -3.9 m/ano no ponto A. Contudo, estes valores elevados poderão estar associados a limitações metodológicas, uma vez que a análise se baseou em apenas dois pontos, correspondentes a transectos desenhados manualmente e orientados perpendicularmente à linha de costa. Para efeito de comparação

em regiões próximas, um estudo realizado por Matsinhe (2024), utilizando o modelo DSAS 4.3 na baía de Pemba, concluiu que a baía sofreu um processo erosivo com uma taxa média anual de aproximadamente 0.5 metros, no período compreendido entre 1991 e 2022.

A variação da linha de costa está directamente relacionada a diversos factores, sendo as características oceanográficas, atmosféricas e a ocorrência de eventos extremos, como tempestades e cheias, os principais responsáveis por essas mudanças (Matsinhe, 2024). Entre os agentes erosivos mais relevantes destacam-se a chuva, responsável pela erosão hídrica, e o vento, que contribui para a erosão eólica. Esse processo tende a se intensificar com o desmatamento, que expõe o solo e facilita a acção desses agentes (Borges et al, 2009). Além disso, o tipo de sedimento presente na região influencia a susceptibilidade à erosão, sendo que, na área de estudo, predomina a presença de solos arenosos, os quais são mais propensos à degradação (MICOA, 2012).

Os resultados deste estudo constataram que na região de Mecúfi, a modificação do uso e ocupação do solo tem sido um fenómeno constante ao longo dos anos, resultando na remoção significativa da cobertura vegetal e expondo grandes áreas a processos erosivos intensos. Esse cenário tem agravado a vulnerabilidade da zona costeira, tornando-a mais susceptível à erosão acelerada e à perda progressiva de sedimentos, a prova disso e a tendência erosiva observada no intervalo de 1994 a 2024 (figura 16). Em 2013, os impactos dessa degradação tornaram-se ainda mais evidentes, com a área de solo desprotegido a aumentar significativamente, passando de 11,3% em 1994 para aproximadamente 53,4% em 2013. Massangaie (2019), no período compreendido entre os anos de 2001 a 2018, também verificou uma ampliação progressiva nas áreas expostas ao longo da zona costeira de Mecúfi. Essa tendência reflecte a crescente vulnerabilidade da região. Como factor explicativo Ferrarrezzi (2009), sustenta também que os processos erosivos estão fortemente condicionados pelas alterações ambientais provocadas pelo uso inadequado do solo, abrangendo práticas como o desmatamento, a expansão da agricultura e a realização de obras urbanas e de infraestrutura. Essas intervenções favorecem a concentração do escoamento superficial, aumentando a intensidade da erosão.

A análise dos dados pluviométricos revelou uma tendência de aumento na intensidade das chuvas ao longo dos anos, com variações interanuais. Verificou-se que os anos mais chuvosos coincidiram com períodos de maior recuo da linha de costa na região de Mecúfi. Isso indica que, além da acção marinha, as chuvas intensas contribuíram para o aumento do escoamento superficial e para o transporte de sedimentos das zonas costeiras, intensificando os processos erosivos. Entre 2002 e 2019, a intensificação da instabilidade costeira esteve ligada ao aumento da frequência e intensidade de eventos extremos de precipitação (70-80 mm), especialmente em 2019 com 3 eventos observados, agravando o recuo médio da linha de costa, que foi de -16,55 m em 2002 e -6,84 m em 2019 (Figura

19). De acordo com Chacanza, et al., (2022), a alta pluviosidade favorece tanto o escoamento superficial quanto o transporte de sedimentos, ampliando os efeitos da erosão, Ressalta ainda que em contextos específicos com chuvas abundantes, alta humidade, temperaturas elevadas e ventos suaves pode ocorrer a progradação da linha de costa, devido à deposição de sedimentos. Contudo, em Mecúfi, as condições do solo degradado limitam essa deposição, tornando mais evidentes os efeitos erosivos.

Adicionalmente, a actuação dos ventos contribui na intensificação dos processos erosivos, Pois observa-se nos primeiros e últimos anos da série temporal analisada, a intensificação dos processos erosivos na região costeira de Mecúfi que estão fortemente associados à ocorrência de eventos extremos de vento e de ondas. Esses dois factores são suficientes para aceleração da erosão costeira, sobretudo em períodos marcados por baixos índices de precipitação. No início da série (1994 a 1999), a forte intensidade dos ventos e das ondas contribuiu, fortemente no desprendimento e o transporte de sedimentos, mesmo na ausência de chuvas abundantes. Este padrão repete-se nos anos mais recentes do intervalo estudado (2019 a 2024), em que, apesar da redução dos volumes de precipitação, a força do vento e das manteve-se elevada, prolongando a pressão erosiva sobre a linha de costa. Este cenário evidencia que, para além da pluviosidade, os factores meteorológicos e oceanográficos como o vento e as ondas modelam as regiões costeiras. Entre 2016 a 2019, com a passagem do ciclone Kenneth que atingiu cerca de 11 m/s correspondente a 39.6 km/h, registou-se um recuo significativo da linha de costa em direcção ao continente, a uma distância de aproximadamente -8 m/s. Este recuo evidencia a intensidade da erosão associada a eventos ciclónicos extremos. Posteriormente, entre 2023 a 2024, com a ocorrência do ciclone Chido que que passou na região de Mecúfi com cerca de 10 m/s correspondente a uma velocidade de 36 km/h e cerca de 19 eventos extremos ocorridos, os processos erosivos voltaram a intensificar, provocando um novo recuo da linha de costa em direcção ao continente, a uma distância de aproximadamente -8 m/s metros.

Segundo a escala de Beaufort, ventos com velocidades superiores a 5 m/s ( $\approx$  18 km/h) já são considerados fortes, capazes de iniciar o transporte eólico de sedimentos (WMO, 2000). Em consonância com Samuel (2017) o vento contribui bastante na dinâmica costeira, influenciando a formação de correntes, a geração de ondas e o transporte de sedimentos, durante as marés baixas, esses sedimentos ficam expostos à acção dos ventos, que, dependendo da sua intensidade, da quantidade de areia disponível e da configuração da linha de costa, podem originar campos de dunas móveis. Guimarães (2005) Também ressalta que em períodos de ventos mais intensos, observa-se maior mobilização de sedimentos, favorecendo processos erosivos e o transporte eólico de areia para o interior, com potencial formação e migração de dunas.

Outro factor determinante na variação da linha de costa é a elevação do nível médio do mar, que intensifica os processos hidrodinâmicos e afecta a dinâmica de erosão e deposição sedimentar (Bird, 2008). Ao longo do período analisado, registou-se uma tendência de subida do nível médio do mar, a qual poderá estar directamente associada ao recuo da linha de costa observada em determinados sectores do litoral de Mecúfi. Portanto este aumento gradual do nível do mar contribui para a intensificação dos processos hidrodinâmicos, elevando a energia das ondas e das correntes costeiras (Matsinhe, 2024).

## CAPITULO VI-CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 6.1. Conclusão

Com base nas análises realizadas a partir das taxas End Point Rate (EPR), Net Shoreline Movement (NSM) e Linear Regression Rate (LRR), conclui-se que a região de Mecúfi tem enfrentado um processo significativo de erosão costeira ao longo das últimas décadas. Os resultados obtidos indicam que, no período de 1994 a 2024, a taxa média de erosão anual foi de -0.39 m/ano. Essa taxa demonstra uma tendência preocupante de recuo da linha de costa, o que significa que, dentro de um período de 31 anos, a linha de costa avançou em direção ao continente cerca de 12.09 m em média. Os resultados demonstraram que o uso de um maior número de transectos permite obter uma representação espacial mais detalhada e fiável da dinâmica costeira, reduzindo as incertezas associadas a métodos com poucos pontos de medição. Esta análise realizada ao longo dos 31 anos evidenciou que as alterações no uso e cobertura do solo, que resultaram na expansão de áreas expostas, contribuíram muito para o recuo da linha de costa na região de Mecúfi, intensificado pela acção de eventos extremos. Entre os factores naturais analisados, a precipitação, a altura das ondas e o nível médio do mar apresentaram tendência crescente ao longo do tempo, reforçando os riscos associados à erosão costeira. Embora os ventos tenham mostrado uma tendência geral decrescente, registaram-se episódios pontuais de elevada intensidade que exerceram um impacto significativo na intensificação da erosão costeira. Dessa forma, conclui-se que a combinação entre pressões antrópicas e variabilidade dos factores climáticos naturais torna a faixa costeira de Mecúfi cada vez mais susceptível à erosão.

### 6.2. Recomendações

- Ampliação da extensão da área de estudo e inclusão da análise da direcção dos ventos.

## 7. Referencias Bibliográficas

- Addo, K. A. (2009). *Detection of coastal erosion hotspots in accra, ghana* . Journal of Sustainable Development in Africa.
- Amorim, V. M. (Outubro de 2019). *Caracterização das correntes longitudinais no arco praias de jacaré (rj)*. p. 64.
- Bird, E. (2008). *Geomorfologia Costeira: Uma Introdução*. 2ª Edição, John Wiley & Sons, Nova York.
- Bloven, N. (2024). *An Integrated Exploration of Coastal Erosion: Natural and Anthropogenic Determinants*.
- Borges et al, P. (Janeiro de 2009). *A erosão costeira como factor condicionante da sustentabilidade*.
- Bulhões, E. (12 de Novembro de 2020). *Erosão costeira e soluções para a defesa do litoral* . p. 35.
- Chacanza, M. S., Almeida, N. M., Freire<sup>1</sup>, G. S., Neto, C. Â., Neto, J. C., & Jalane, O. I. (2022). *Análise da variação da linha de costa no trecho entre as praias de peroba e redonda no município de icapuú-ceará, brasil, a partir de imagens de satélite aplicando o dsas*. 903.
- Chauque, A. (9 de Outubro de 2017). *Estudo da dinâmica da linha de costa na ilha de Xefina*. p. 36.
- Costa, S. A., Bezerra, A. C., Araújo, A. M., Silva, M. F., Cruz, J. F., & Alves, R. M. (2021). *Dinâmica espaço-temporal das anomalias de precipitação em uma região semiárida*. *Revista de Gestão de Água da América Latina*.
- Dias, A. J. (1993). *Estudo de Avaliação da Situação Ambiental e Proposta de Medidas de Salvaguarda para a Faixa Costeira Portuguesa (Geologia Costeira)*, .
- Felix, A., & Filho, N. O. (2020). *Apostila sedimentologia*.
- Ferrarrezi, R. S. (2009). *Uso, Ocupação e Conservação do Solo I*. Campinas.
- Galindo, I. C., & Margolis, E. (1989). *Tolerância de perdas por erosão para solos do estado de Pernambuco*.
- Galvão, D. B. (2018). *dinâmica das correntes de retorno da praia do cupe, litoral sul do estado de pernambuco*.
- Guimarães, L. S. (2005). *Morfodinâmica e Migração das Dunas Eólicas na Reserva Ecológica do Taim, Litoral Sul do RS*. 119.
- Himmelstoss, E. A., Henderson, R. E., Kratzmann, M. G., & Farris, A. S. (2018). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS)*.
- Kale, M. M., Ataol, M., & Tekkanat, İ. S. (2019). *Avaliação de alterações na linha de costa usando um Sistema Digital de Análise de Linha de Costa: um estudo de caso de mudanças no Delta de Yeşilirmak no norte da Turquia de 1953 a 2017*.

- Mansur, M. E. (2016). *alterações morfológicas do perfil praiial de cacimbas utilizando o xbeach. vitória.*
- Marino, M. T., & Freire, G. S. (22 de Outubro de 2013). *Análise da evolução da linha de costa entre as Praias do Futuro e Porto das Dunas, Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), estado do Ceará, Brasil. Journal of Integrated Coastal Zone Management, 17.*
- Marove, C. O. (Outubro de 2017). *digital shoreline analysis system (dsas).*
- Massangaie, D. d. (Setembro de 2019). *estudo da variação da linha de costa na região de mecúfi-cabo delgado.*
- Matsinhe, A. M. (2024). *Estudo Espaço-temporal da Linha de Costa na Baía de Pemba de 1991 a 2022 Usando Imagens de Landsat.*
- Mendes, J. N., & Pinho, J. L. (2008). *Erosão Costeira – Metodologias para a sua Quantificação.* p. 150.
- Mendonça, F. J. (2005). *Posicionamento de alta resolução: adequação e aplicação à morfologia costeira.* . Universidade Federal de Pernambuco.
- Mentashil, L., I.Vousdoukas, M., Peke, J.-F., EvangelosVoukouvalas, & Feyen, L. (2018). Global long-term observations of coastal erosion and accretion.
- MICOA, M. P. (Junho de 2012). *perfil ambiental e mapeamento do uso actual da terra nos distritos da zona costeira de moçambique.* Cabo Delgado.
- Morais, M. L. (2015). *uso e ocupação do solo e sua relação com as características limnológicas da bacia do ribeirão cafezal – londrina/pr.* p. 85.
- Muehe, D. (Janeiro de 1998). *Gemorfologia Costeira.*
- Novo, E. M., & Ponzoni, F. J. (2001). *introdução ao sensoriamento remoto.* 68. são josé dos campos.
- Nunes, L. d. (2011). *Dinamica Costeira entre as praias de Areia preta e do Forte, Natal/RN .* p. 132.
- Nwilo, P. C., Ibe, A. C., Adegoke, J. O., Obiefuna, J. N., & Alademom, A. S. (2020). *Long-term determination of shoreline changes along the coast of Lagos.*
- Pereira, M. D., Moura, M. d., & Lucena, D. B. (2020). *Análise da variabilidade pluviométrica interanual da Zona da Mata Nordeste e a identificação de anos padrão.*
- Roose, E. (1994). *Introduction à la gestion conservative de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols.*
- Samuel, H. M. (2017). *Estudo da dinâmica da linha da costa da praia Nova na cidade da Beira desde 2005 a 2016.* 45.
- Silva, A. S. (Julho de 2019). *Estudo da erosão costeira na ponte de acesso ao bairro de Ivagalane – Quelimane.* p. 41.

- Silva, G. M. (2006). *Orientação da linha de costa e Dinâmica dos sistemas praia e Duna: Praia de Mocambique Florianopolis SC.*
- Silva, J. C. (1996). *Aspectos Ambientais do Litoral de Cidade de Pemba.* Faculdade de Letras - Universidade Eduardo Mondlane, Geografia, Maputo.
- Silva, M. S. (Junho de 1995). *estudos da erosão. petrolina - pe.*
- Sousa, H. C. (2021). *VULNERABILIDADE E RISCO À EROÇÃO COSTEIRA NA ILHA DE MOSQUEIRO/PA E A OCUPAÇÃO HUMANA NA ORLA.*
- Sufiante, N. A. (Agosto de 2018). *Avaliação da erosão costeira da praia de Palane Madal, Provincia da Zambézia.*
- Tischer, V., & Polette, M. (29 de 10 de 2015). *proposta metodológica de estabelecimento de indicadores socioambientais para a zona costeira brasileira.*
- UE. (2006). – *Sedimentos e espaço para a sustentabilidade.*
- Verdum et al, R. (2016). *Métodos e técnicas para o controle da erosão e conservação do solo.* p. 54.
- Vitousek, S., Barnard, P. L., Fletcher, C. H., Frazer, N., Erikson, L., & Storlazzi, C. D. (2017). *Doubling of coastal flooding frequency within decades due to sea-level rise.*
- Wahl, T., Haigh, I. D., Nicholls, R. J., Arns, A., Dangendorf, S., Hinke, J., et al. (2017). *Understanding extreme sea levels for broad-scale coastal impact and adaptation analysis.*
- World Meteorological Organization. (2000). *Wind measurements: Potential wind speed derived from wind speed fluctuations measurements, and the representativity of wind stations (J.P. van der Meulen).* In *Proceedings of the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2000)* (Instruments and Observing Methods Report No. 74, WMO/TD No. 1028, p. 72). Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.
- yang, G., Huang, K., Zhu, L., Sun, W., Chan, C., Meng, X., et al. (2024). *Mudanças espaço-temporais nas costas continentais da China ao longo de 30 anos usando dados de séries temporais do Landsat (1990–2019).*

## 8. Anexos

### Gráficos Representativos das Marés usadas na Seleção das Imagens

A escolha por utilizar imagens correspondentes à maré morta na preamar teve como finalidade reduzir a interferência das oscilações extremas do nível do mar na delimitação da linha de costa. Durante as marés mortas, a diferença entre os níveis de maré alta e maré baixa é significativamente menor, o que proporciona uma condição mais estável e representativa do contacto entre o mar e a terra.

