



## **Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras**

Monografia Para a Obtenção do Grau de Licenciatura em Geologia Marinha

### **Estado de conservação e simulação de cenários futuros nos ecossistemas costeiros da Ilha de Benguerra – Arquipélago de Bazaruto**



**Autor:**

Besson Vitorino Cumbe

**Quelimane, Setembro de 2025**



**Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras**

Monografia para a Obtenção do Grau de Licenciatura em Geologia Marinha

**Estado de conservação e simulação de cenários futuros nos ecossistemas  
costeiros da Ilha de Benguerra – Arquipélago de Bazaruto**

**Autor:**

Besson Vitorino Cumbe

(Besson Vitorino Cumbe)

**Co-Supervisor:**

H Machaieie

(Prof. Doutor Hélder A. Machaieie)

**Supervisora:**

Adelina A. Langa

(Mestre Adelina A. Langa)

**Co-Supervisor:**

Rogério

(Prof. Doutor Rogério P. Manzolli)

**Presidente de Júri:**

Stélio Mangué

(Licenciado Stélio Safo Mangué)

**Avaliador:**

Manuel Pedro Tomo Simbe

(Mestre Manuel Pedro Tomo Simbe)

### **Dedicatória**

Dedico este trabalho, com todo o amor do meu coração, à minha querida e adorável mãe, Graça Ernesto Berine, que é o alicerce da minha vida. A ela devo os ensinamentos que me moldaram, o amor incondicional que me fortaleceu em cada desafio, a vida que me foi dada e o apoio incansável em todos os momentos, mesmo naqueles em que eu próprio duvidei de mim. À minha segunda mãe, irmã Alzira Ernesto Berine, dedico igualmente este esforço, pois foi a sua força, o seu apoio moral e o seu amor infinito que me ampararam nas horas mais difíceis. Este trabalho é, acima de tudo, um reflexo do amor e da esperança que recebi de vocês, e carrega em cada página a presença e a inspiração das duas mulheres mais importantes da minha vida.

## Agradecimentos

A **Deus** dedico toda honra e gloria pelo Dom da vida e pelo favor dele na minha vida por me conceder força e sabedoria para cumprir meu propósito.

Aos meus pais, Vitorino Paipe Cumbe e Graça Ernesto Berine, por todo o amor, apoio incondicional e sacrifícios feitos ao longo da minha vida. À minha Irmã Alzira Ernesto Berine Agradeço-lhe profundamente por acreditar em mim, por me amparar nos dias difíceis e por me ensinar, através do seu exemplo de dedicação e coragem, que nunca devemos desistir dos nossos sonhos, aos meus irmãos que pelo número não da para escrever os nomes o meu muito obrigado por tudo, vocês foram e continuam a ser o meu alicerce, a minha inspiração e a minha maior motivação.

Agradeço profundamente aos meus orientadores, a Mestre Adelina Langa, ao Professor Doutor Hélder A. Machaieie e ao Professor Doutor Rogério P. Manzolli, pela confiança depositada em mim, pela orientação sábia e dedicada, pela paciência em cada etapa deste percurso e pelas valiosas contribuições científicas e humanas que enriqueceram este trabalho e que levaram a essa concretização.

À Universidade Eduardo Mondlane, em particular à Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras (ESCMC), pela oportunidade e por tornar real o desejo da aquisição do grau de licenciatura. Ao corpo docente, pela dedicação e pelo compromisso com a formação académica, expresso um especial agradecimento ao Mestre Banito Magestade pelos anos de monitorando, agradeço ao Professor Doutor Fialho Nehama, Dr. Stélio Mangué, MSc Carlota Alves, Humberto Mabota, Mestre Noca Furaca e Mestre Nélio Sitóe.

Agradecer aos meus colegas do curso, agradecer a família que a ESCMC me deu (Wilder, Zarco Alfredo, Marta, Nildo, Castelo, Valério, André, Delso, Luís, Salmo, João Pacule e aos demais).

Pelas risadas, pelas batalhas, pela irmandade e amizade e por se tornarem mais que família, agradeço-vos, Emmyllen Burrine, Naima Orlando, Cármen Jaime, Joel Jonito, Clermenio Bernardo, Erca Banze, Vânia Januário, Arsénio Alito, Oliveira Armando, Dario Zunguze.

### **Declaração de honra**

Eu, Besson Vitorino Cumbe declaro por minha honra que esta monografia nunca foi apresentada para obtenção de qualquer grau académico e que ela constitui o resultado do meu labor individual. Cada ideia trazida de outros trabalhos foi devidamente citada e referenciada. Esta monografia é apresentada na sequência do cumprimento dos requisitos para obtenção do grau de Licenciatura em Geologia Marinha, na Universidade Eduardo Mondlane.

**Quelimane, Setembro de 2025**

Besson Vitorino Cumbe

**(Besson Vitorino Cumbe)**

*“Ainda que eu andasse pelo vale da sombra da morte, não temerei mal algum, porque tu estás comigo”*

*Salmo 23:4*

## Resumo

A Ilha de Benguerra, situada no Arquipélago de Bazaruto, é reconhecida pela sua importância ecológica e socioeconômica, albergando ecossistemas costeiros frágeis e de elevada biodiversidade. Contudo, nas últimas décadas, a ilha tem sido pressionada por processos naturais e antrópicos que afetam o equilíbrio de seus ecossistemas, com destaque para a expansão da urbanização, a degradação de dunas e bancos sedimentares (bancos arenosos e bancos submersos), bem como as alterações associadas à subida do nível do mar. O presente estudo teve como objetivo avaliar o estado de conservação da ilha entre 1990 e 2024 e simular cenários futuros de transformação costeira até 2100. Para tal, foram utilizadas imagens de satélite Landsat 5-TM e Landsat 8/9 OLI\_TIRS (1990 a 2024), dados de vento das componentes U e V (ERA5), dados de nível do mar (INoM e APDRC) e levantamentos de campo com GPS para classificação supervisionada da cobertura do solo. A simulação de cenários futuros foi conduzida com o modelo Sea Level Affecting Marshes Model (SLAMM) versão 6.7, integrando DEM SRTM (30 m), slope, categorias NWI e séries de elevação do mar (SSP1, SSP2 e SSP5). Os resultados demonstraram que a ilha apresenta um processo de degradação progressiva: entre 1990 e 2024 houve aumento expressivo do solo exposto, retração da vegetação densa e desaparecimento do banco arenoso no setor sul, reduzindo a resiliência costeira. A análise das secções revelou maior vulnerabilidade no Norte da Ilha (Secção A), onde dunas foram fragmentadas e a invasão oceânica do Lago Nhanombe foi projetada para 2100 sob SSP5, enquanto o Sul da Ilha (Secção B) mostrou resiliência relativa, apesar da submersão parcial de planícies costeiras. As simulações confirmam que, mesmo sob cenários otimistas, ocorrerá retração significativa de dunas e zonas húmidas, intensificando-se em SSP2 e culminando, no SSP5, em submersão generalizada e perda quase total da faixa costeira. De forma geral a Ilha de Benguerra encontra-se em estado de conservação comprometido, com elevada vulnerabilidade frente à elevação do nível do mar e a pressão antrópica exercida sobre os ecossistemas. Os resultados apresentados neste trabalho reforçam a necessidade de implementação de estratégias urgentes de gestão costeira, como proteção e restauração de dunas, controle da urbanização e conservação de lagoas interiores, além de monitoramento contínuo e estudos comparativos regionais.

**Palavras-chave:** Ilha de Benguerra; estado de conservação; erosão costeira; SLAMM; cenários SSP.

## Abstract

Benguerra Island, located in the Bazaruto Archipelago, is recognised for its ecological and socio-economic importance, hosting fragile coastal ecosystems with high biodiversity. However, in recent decades, the island has been under pressure from natural and anthropogenic processes that affect the balance of its ecosystems, particularly the expansion of urbanisation, the degradation of dunes and sedimentary banks (sandbanks and submerged banks), as well as changes associated with sea-level rise. The present study aimed to assess the conservation status of the island between 1990 and 2024 and to simulate future scenarios of coastal transformation up to 2100. To this end, Landsat 5-TM and Landsat 8/9 OLI\_TIRS satellite images (1990 to 2024), wind data from the U and V components (ERA5), sea-level data (INoM and APDRC), and field surveys with GPS for supervised land-cover classification were used. The simulation of future scenarios was carried out with the Sea Level Affecting Marshes Model (SLAMM) version 6.7, integrating SRTM DEM (30 m), slope, NWI categories, and sea-level rise series (SSP1, SSP2 and SSP5). The results showed that the island is undergoing a progressive degradation process: between 1990 and 2024 there was a marked increase in exposed soil, a retreat of dense vegetation, and the disappearance of the sandbank in the southern sector, reducing coastal resilience. The sectional analysis revealed greater vulnerability in the northern part of the island (Section A), where dunes were fragmented and ocean intrusion into Lake Nhanombe was projected for 2100 under SSP5, while the southern part of the island (Section B) showed relative resilience, despite the partial submersion of coastal plains. The simulations confirmed that, even under optimistic scenarios, there will be a significant retreat of dunes and wetlands, which will intensify under SSP2 and culminate, under SSP5, in widespread submersion and the near-total loss of the coastal strip. Overall, Benguerra Island is in a compromised state of conservation, with high vulnerability to sea-level rise and the anthropogenic pressure exerted on its ecosystems. The results presented in this study reinforce the urgent need to implement coastal management strategies, such as dune protection and restoration, urbanisation control, and the conservation of inland lagoons, in addition to continuous monitoring and regional comparative studies.

**Keywords:** Benguerra Island; conservation status; coastal erosion; SLAMM; SSP scenarios.

**Símbolos, Abreviaturas e Unidades**

<b>Sigla / Símbolo</b>	<b>Significado</b>	<b>Unidade / Observação</b>
<b>NDVI</b>	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada	Adimensional
<b>NDWI</b>	Índice de Diferença Normalizada da Água	Adimensional
<b>DEM</b>	Modelo Digital de Elevação	metros (m)
<b>SRTM</b>	Shuttle Radar Topography Mission	Dados altimétricos (30 m)
<b>SLAMM</b>	Sea Level Affecting Marshes Model	Modelo de simulação costeira
<b>SSP</b>	Shared Socioeconomic Pathways - Caminhos Socioeconômicos Compartilhados	Cenários globais do IPCC
<b>APDRC</b>	Asia-Pacific Data-Research Center	Centro de dados climáticos e oceânicos
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change	Painel da ONU sobre mudanças climáticas
<b>EGS</b>	Ecosystem Goods and Services	Bens e serviços ecossistêmicos
<b>U, V</b>	zonal (U) e meridional (V) do vento	metros por segundo (m/s)
<b>MTL</b>	Mean Tide Level (nível médio da maré)	metros (m)
<b>GPS</b>	Global Positioning System	Sistema de posicionamento
<b>UTM</b>	Universal Transverse Mercator	Sistema de coordenadas
<b>IV</b>	Infravermelho	Faixa espectral
<b>m</b>	metro	Unidade de comprimento
<b>%</b>	Porcentagem	Proporção
<b>°C</b>	Grau Celsius	Unidade de temperatura

## Índice de Figuras

<b>Figura 1:</b> Arquipélago de Bazaruto .....	7
<b>Figura 2.</b> Evidência a morfologia e a direcção do transporte eólico (seta a vermelho) das dunas da parte central e oeste das ilhas .....	7
<b>Figura 3:</b> Relevo formado pelas dunas activas que contactam com o oceano Índico .....	7
<b>Figura 4:</b> Ilustracao da Ilha de Benguerra. <b>Fonte:</b> <a href="https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b1/ISS059-E-92404_-_View_of_Mozambique">https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b1/ISS059-E-92404_-_View_of_Mozambique</a> .....	8
<b>Figura 5:</b> Representação da circulação global dos ventos, com a indicação dos giros de baixa e alta pressão e das células convectivas. <b>Fonte:</b> <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/File:Earth_Global_Circulation_-_en.svg">https://en.wikipedia.org/wiki/File:Earth_Global_Circulation_-_en.svg</a> .....	9
<b>Figura 6:</b> Ilustração do referencial do nível medio do mar (NMM).....	10
<b>Figura 7:</b> Ilustração das dunas em regiões costeiras .....	13
<b>Figura 8:</b> Ilustração das mudanças climáticas no globo terrestre .....	14
<b>Figura 9:</b> Estrutura básica do SLAMM baseada na versão 6.7. <b>Fonte;</b> Warren (2016). .....	17
<b>Figura 10:</b> Localização e Descrição da Área de Estudo. Fonte: Adaptado pelo Autor.....	18
<b>Figura 11:</b> Imagem da Geologia Local da Ilha de Benguerra. Fonte: Adaptado pelo Autor. ....	20
<b>Figura 12:</b> NWI Categories (Esquerda) e Dike File (Direita). ....	30
<b>Figura 13:</b> Ilustração do DEM (Esquerda) e Slope (Direita).....	30
<b>Figura 14:</b> Mapas do Uso e Cobertura do Solo na Ilha de Benguerra (1990-2024).....	34
<b>Figura 15:</b> Gráfico da variação das classes de uso e cobertura do solo (1990-2024).....	35
<b>Figura 16:</b> Ilustração da variação das principais áreas de conservação na Ilha de Benguerra (1990 a 2024). 37	
<b>Figura 17:</b> Mapas do Estado de Conservação da Ilha de Benguerra ao longo do tempo. ....	38
<b>Figura 18:</b> Mapas do Estado de Conservação da Secção A (Norte). ....	40
<b>Figura 19:</b> Mapas do Estado de Conservação na Secção B (Sul da Ilha).....	40
<b>Figura 20:</b> Ilustração da porção da água em 1990 (esquerda), 2020 (centro) e 2024 (Direita). ....	41
<b>Figura 21:</b> Mapas de Locais de Incidência da Erosão e Deposição entre 1990-2000, 1990-2024 e 2020-2024. ....	42
<b>Figura 22:</b> Mapas de Incidência da Erosão e Deposição na Secção A (Norte da Ilha).....	44
<b>Figura 23:</b> Mapas de Locais de Incidência da Erosão e Deposição na Secção B (Sul da Ilha).....	44
<b>Figura 24:</b> Altura Significativa da Onda na Ilha de Benguerra (1990-2024) .....	45
<b>Figura 25:</b> Series temporais da velocidade do vento na Ilha de Benguerra (1990-2024) .....	45
<b>Figura 26:</b> Distribuição dos Habitats na Ilha de Benguerra usando os cenários SSP1 (Topo) e SSP2(Fundo) até 2100. ....	47
<b>Figura 27:</b> Distribuição dos Habitats na Ilha de Benguerra usando o cenário SSP5 até 2100.....	48
<b>Figura 28</b> Projecção dos diferentes cenários do aumento do nível do mar (IPCC, 2021) e áreas de mudanças do modelo para 2030. ....	48
<b>Figura 29:</b> Mudança das classes do SLAMM para 2050 e 2100.....	49

<b>Figura 30:</b> Evolução da Secção B (Sul) sob o Cenário SSP1. ....	<b>Figura 31:</b> Evolução da Secção A (Norte) sob o Cenário SSP1 .....51
<b>Figura 32:</b> Evolução da Secção B (Sul) sob o Cenário SSP2. ....	<b>Figura 33:</b> Evolução da Secção A (Norte) sob o Cenário SSP2. ....51
<b>Figura 34:</b> Evolução da Secção A (Norte) sob o Cenário SSP5. ....52	
<b>Figura 35:</b> Evolução da Secção B (Sul) sob o Cenário SSP5. ....52	

### Índice de Tabelas

<b>Tabela 1:</b> Características dos sensores que foram usados para a aquisição das imagens ao longo dos 34 anos. Fonte: Adaptado (Pacule, 2023). ....23
<b>Tabela 2:</b> Ranking de classificação do Índice kappa (k) .....27
<b>Tabela 3:</b> Ilustração do Índice Kappa para o ano de 2024 referente ao ano com dados de campo. ....32

**Índice**

Dedicatória .....	ii
Agradecimentos.....	ii
Declaração de honra .....	iii
Resumo.....	iv
Abstract .....	v
Símbolos, Abreviaturas e Unidades .....	vi
Índice de Figuras .....	vii
Índice de Tabelas .....	viii
I. CAPÍTULO I.....	1
1. Introdução.....	1
1.1. Problematização .....	3
1.2. Justificativa.....	4
1.3. Objectivos.....	5
1.3.1. Objectivo Geral .....	5
1.3.2. Objectivos específicos.....	5
II. CAPÍTULO II .....	6
2. Conservação de ecossistemas costeiros.....	6
2.1. Sistemas de Ilhas em Moçambique .....	6
2.1.1. Arquipélago de Bazaruto.....	6
2.1.2. Geomorfologia do Arquipélago de Bazaruto .....	7
2.1.3. Ilha de Benguerra .....	8
2.2. Regime de ventos .....	9
2.3. Nível Médio do mar .....	10
2.4. Forçantes Humanas – uso e cobertura de solo .....	11
2.4.1. Uso de solo.....	12
2.5. Dunas Costeiras.....	12
2.5.1. Geomorfologia das Dunas Costeiras em Moçambique .....	12

2.5.2.	Impactos humanos e naturais sobre as Dunas .....	13
2.6.	Mudanças Climáticas .....	13
2.7.	Simulação e Projecção de Cenários Futuros .....	14
2.7.1.	Modelos de Simulação e Projecção de Cenários Futuros .....	16
2.7.1.1.	Sea Level Afecting Marshel Model (SLAMM) .....	16
III.	CAPÍTULO .....	18
3.	Metodologia .....	18
3.1.	Localização e Descrição da área de estudo .....	18
3.2.	Aspectos Climáticos representativos da Ilha de Benguerra .....	19
3.3.	Geomorfologia .....	19
3.4.	Geologia Local da Ilha de Benguerra.....	19
3.5.	Aspectos Oceanográficos .....	20
3.5.1.	Ondas e Marés .....	20
3.6.	Materiais e Métodos .....	21
3.7.	Descrição Dos Dados .....	21
3.8.	Aquisição dos Dados.....	21
3.8.1.	Velocidade do vento (Componentes U e V) e Altura Significativa da Onda .....	21
3.8.2.	Dados de Campo .....	21
3.8.3.	Dados do Nível do Mar .....	22
3.8.4.	Imagens de Satélite.....	22
3.9.	Processamento das Imagens de Satélite .....	23
3.9.1.	Cálculo de Índices .....	24
NDVI.....	.....	24
NDWI .....	.....	24
3.10.	Uso Clássico e cobertura do solo (Dinâmica) .....	25
3.11.	Incidência da Erosão e Deposição.....	25
3.12.	Estado de Conservação.....	26

3.13.	Classificação Supervisionada .....	26
3.15.	Simulação de Cenários Futuros .....	28
3.15.1.	Conjunto de Dados e pré-processamento .....	28
3.16.	Visualização do quatro conjunto de Dados usados no SLAMM.....	30
3.17.	Procedimentos de modelagem.....	31
IV.	CAPÍTULO .....	32
4.	Resultados .....	32
4.1.	Uso Clássico e cobertura do solo (Dinâmica) .....	32
4.2.	Estado de Conservação da Ilha de Benguerra .....	36
4.2.1.	Monitoramento e Evolução da Secção A (Norte) e Secção B (Sul) da Ilha .....	39
4.3.	Erosão e Deposição na Ilha de Benguerra.....	41
4.3.1.	Monitoramento da Erosão nas Secções A (Norte da Ilha) e B (Sul da Ilha) .....	43
4.4.	Altura Significativa da Onda e Regime dos Ventos na Ilha de Benguerra.....	45
4.5.	Simulação de Cenários Futuros na Ilha de Benguerra .....	46
4.5.1.	Avaliação das Secções A (Norte) e B (Sul) face aos cenários.....	50
V.	CAPÍTULO .....	53
5.	Discussão.....	53
5.1.	Uso Clássico e Cobertura do solo (Dinâmica) .....	53
5.2.	Estado De Conservação da Ilha de Benguerra .....	54
5.3.	Simulação de Cenários Futuros.....	55
5.2.	Destaque e Pontos pertinentes .....	57
VI.	CAPÍTULO .....	58
6.	Conclusões .....	58
6.1.	Limitações e Recomendações .....	60
7.	Referências Bibliográficas .....	61

## I. CAPÍTULO I

### 1. Introdução

As mudanças climáticas têm o potencial de afectar tanto os processos oceânicos quanto os padrões atmosféricos. O século XXI tem demonstrado até agora uma clara tendência de aumento da temperatura tanto atmosférica como oceânica (IPCC, 2020). Estas mudanças representam sérias ameaças para milhões de pessoas que vivem junto à costa (Fernandino et al., 2018).

Muitas das regiões costeiras estão em risco não apenas pelos perigos gerados pelas mudanças climáticas, mas também pelas ações antrópicas (Brezolin, 2011). As actuais tendências de ocupação humana e os frequentes eventos extremos associados às mudanças climáticas, principalmente, nos territórios costeiros introduzem um conjunto de pressões que podem afetar de forma direta a dinâmica da costa e indiretamente a fauna e a flora costeira (Martins, 2018). Estes agentes antrópicos e climáticos atuam sobre factores geoclimáticos ou biológicos que influenciam a estabilidade costeira (Lewis et al., 2020). Consequentemente, a capacidade que os ambientes costeiros têm de se recuperar, ou seja, sua resiliência a eventos extremos é reduzida, aumentando a sensibilidade da faixa costeira e, consequentemente, aumentando as áreas de risco.

Moçambique é um país costeiro, com uma extensa linha de costa de aproximadamente 2.770 Km de comprimento e com sua plataforma continental abrangendo uma área de pelo menos 104 Km<sup>2</sup> na costa oriental de África entre as latitudes 10°20'S e 26°50'S (Hogwane, 2007).

Apresenta inúmeras ilhas costeiras, sendo a Ilha de Benguerra uma das zonas turísticas e de conservação mais importantes do Arquipélago de Bazaruto no distrito de Vilankulo, na província de Inhambane. É rica em biodiversidade, com uma abundância de espécies marinhas raras de grande valor ecológico e económico. A região tem uma diversidade de habitats extremamente sensíveis como praias, dunas costeiras, estuários, lagoas e recifes de coral. Entretanto, esta zona costeira tem sido devastada por catástrofes naturais relacionadas com a ocorrência de fenómenos climáticos extremos, e a crescente ocupação populacional da zona costeira devido às principais actividades económicas e de subsistência. Weatherdon et al., (2016) e colaboradores afirmam que mudanças nos fatores ambientais e antropogénicos principalmente em zonas costeiras, tornam os ecossistemas costeiros dinâmicos e susceptíveis a riscos por degradação contínua quer seja devido à subida do nível do mar, devastação da vegetação, inundações e infra-estruturas que causam situações instáveis. Desta forma, o cenário atual aponta para a necessidade de execução de um plano eficaz de planeamento que permita minimizar os conflitos entre o desenvolvimento económico e a preservação dos ecossistemas marinhos (Proisy et al., 2003).

Reconhecer os problemas causados pela degradação e destruição do meio ambiente e identificar as causas sociais dos danos ambientais são essenciais para a conscientização da população (Furaca et al., 2021), mas este é apenas o ponto de partida para a gestão eficaz dos ecossistemas costeiros. O monitoramento contínuo destas áreas pode auxiliar na compreensão da distribuição espacial e temporal dos riscos de mudança nos ecossistemas costeiros, predizendo sua tendência de desenvolvimento, facilitando assim, a tomada de decisões mitigadoras e adaptadoras por parte dos gestores costeiros (Ferreira, 2019).

Neste contexto, a presente proposta de pesquisa visa avaliar a estabilidade da costa de Benguerra nos últimos 34 anos, a fim de identificar o estado actual de conservação e a influência relativa dos fatores ambientais e antropogénicos. Além disso, serão feitas projeções de mudanças futuras dos ecossistemas costeiros, considerando o efeito das forças ambientais e antropogénicas.

Ao final deste estudo, a identificação de áreas suscetíveis à erosão e à inundação permitirá a proposição de medidas concretas de mitigação e adaptação, orientadas para minimizar os impactos da degradação dos ecossistemas costeiros e, simultaneamente, promover a sua resiliência. Tais medidas visam não apenas melhorar o estado de conservação da Ilha de Benguerra, mas também garantir a sustentabilidade da economia azul, assegurando que os benefícios associados ao uso responsável dos recursos marinhos e costeiros possam ser usufruídos de forma equitativa por todas as partes interessadas desde comunidades locais até gestores ambientais e operadores turísticos.

## 1.1. Problematização

Nos últimos 10 anos, a Ilha de Benguerra registou um aumento significativo da ocupação populacional de até 60% (Estatísticas, 2019). Esse aumento da urbanização é chocante se tomarmos em consideração que o aumento da actividade turística acarreta em um aumento da ocupação populacional que resulta em construção de estâncias turísticas na zona das dunas costeiras e crescente dependência das comunidades locais dos recursos costeiros - pesca artesanal. Somado a esta pressão pelo uso dos espaços ambientais, esta região tem sido devastada por catástrofes naturais relacionadas com a ocorrência de fenómenos climáticos extremos como ciclones e tempestades tropicais, em especial o ciclone Idai em 2019 (Matos e Trotsuk, 2020). A combinação destes factores tanto naturais quanto antrópicos, tornam o ecossistema costeiro de Benguerra susceptível a riscos por degradação contínua, devido à subida do nível do mar, erosão, inundações, devastação da vegetação, e infraestruturas que causam situações de instabilidade (Weatherdon et al., 2016).

Entre os principais impactos ambientais enfrentados pela ilha estão a erosão costeira, a supressão da vegetação nativa, inundações e a construção de infraestruturas em áreas ecologicamente sensíveis, que contribuem para a instabilidade do solo e a perda de habitats críticos. A subida do nível do mar e a erosão acelerada ameaçam não apenas a biodiversidade local, mas também a segurança e a subsistência das comunidades que dependem dos recursos naturais para alimentação e manutenção da economia local.

Contudo, o actual estado de conservação da região ainda não é conhecido e os impactos de cada um destes factores que afectam a estabilidade do litoral de Benguerra não foram quantificados.

### **Perguntas de Pesquisa:**

“Quais são as principais factores/causas que provocam alterações nos ecossistemas costeiros da Ilha de Benguerra, nos últimos 30 anos?”

“Como a urbanização, os eventos extremos e a elevação do nível do mar tem alterado o estado de conservação dos ecossistemas da ilha de Benguerra – Arquipélago de Bazaruto?”

## 1.2. Justificativa

A avaliação da evolução do estado de conservação durante um período específico de tempo é crucial para estimar a capacidade de resiliência do ambiente e garantir uma gestão eficaz da conservação dos recursos naturais (Ferreira, 2019). Estudos de monitoramento das mudanças no uso e cobertura de solo nas zonas costeiras, melhoram a compreensão de como os seres humanos interagem com o ambiente, o que resulta numa base científica para lidar com questões relacionadas com a sustentabilidade, vulnerabilidade e resiliência dos ecossistemas marinhos e os seus benefícios para a biodiversidade e os seres humanos (Lewis et al., 2020). Este estudo visa a aprofundar o conhecimento sobre a história evolutiva de curto prazo da ilha de Benguerra, o seu estado atual de conservação e projetar futuras mudanças. Consequentemente, as projeções futuras de cenários das mudanças das variáveis ambientais e de uso e cobertura de solo que serão geradas neste estudo poderão ser utilizados por gestores costeiros, investigadores, planeadores e administradores públicos para concepção de intervenções apropriadas para uma melhor utilização e gestão sustentável dos recursos naturais, ecossistemas marinhos, tanto a curto quanto a medio prazo e contribuirá para uma melhor compreensão de como as comunidades costeiras locais têm impactado nas mudanças no estado de conservação da Ilha de Benguerra e as mudanças climáticas a nível local, regional e global.

### **1.3.Objectivos**

#### **1.3.1. Objectivo Geral**

- ✚ Estudar o estado de conservação da Ilha de Benguerra e simular cenários futuros de transformação dos seus ecossistemas costeiros frente à elevação do nível do mar.

#### **1.3.2. Objectivos específicos**

- ✚ Analisar a dinâmica do uso e cobertura do solo e do estado de conservação da Ilha de Benguerra entre 1990 e 2024, identificando padrões de regeneração e degradação dos ecossistemas;
- ✚ Avaliar os processos de erosão, deposição e perda de feições costeiras (dunas, bancos sedimentares e lagoas), relacionando-os às pressões antrópicas e fatores naturais;
- ✚ Projetar cenários futuros da elevação do nível do mar sobre a Ilha de Benguerra até 2100, utilizando o modelo SLAMM.

## II. CAPÍTULO II

### 2. Conservação de ecossistemas costeiros

As alterações climáticas e os previsíveis impactos sobre os recursos naturais do planeta centralizam muito das actuais preocupações ambientais. Neste sentido, as zonas costeiras, onde centenas de milhões de pessoas habitam e desenvolvem as suas actividades, são especialmente sensíveis às perturbações negativas (Duarte, Romeiras e Bandeira, 2012).

O reconhecimento da necessidade de proteção das zonas costeiras, identificadas a mais de 50 anos, levou ao estabelecimento de parques e reservas naturais marinhas nas regiões do mundo e em particular de Moçambique (Duarte, Romeiras e Bandeira, 2012). Relativamente ao Oceano Índico Ocidental, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) classificou os ecossistemas costeiros formados por ervas marinha, os recifes e os mangais entre os habitats mais complexos e importantes na África Ocidental, onde se inclui nomeadamente o Quênia, Tanzânia, África do Sul e Moçambique. De entre vários ecossistemas encontrados nessa região, prevalece as ilhas como ecossistemas únicos por suportar uma grande variedade de espécies e actividades (UNEP/Nairobi Convention Secretariat, 2009).

#### 2.1. Sistemas de Ilhas em Moçambique

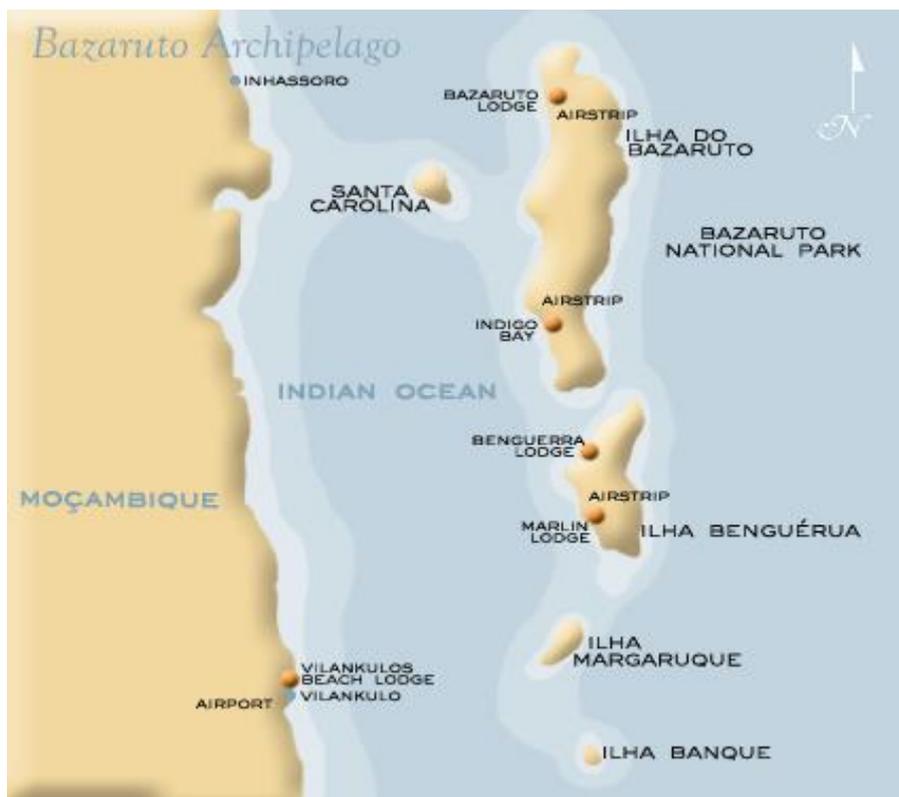
Em Moçambique as ilhas são sistemas que pela sua especificidade foram definidas como áreas de conservação onde são necessárias políticas bem claras sobre o seu uso e preservação (Allaby, 1997).

Todas as ilhas no país apresentam muitas semelhanças e problemas em comum com os de certas áreas continentais, mas ao tempo, elas representam um caso específico em termos de planificação de processos e desenvolvimento sustentável devido as características peculiares dos seus recursos naturais, economia e culturas (DNAC, 2002).

##### 2.1.1. Arquipélago de Bazaruto

O arquipélago de Bazaruto foi criado como parque nacional em 1971 pelo diploma legislativo 46/71 de 25 de Maio, com objectivo de conservar espécies vegetais e faunísticas em geral e particularmente as espécies marinhas de estimado valor ecológico. O Arquipélago de Bazaruto é um sistema complexo de cinco Ilhas: Bangué, Magaruque, Benguerra, Bazaruto e Santa Carolina, sendo a ilha de Bazaruto a maior de todas (Valoi, 2004).

Esse Arquipélago localiza-se a Norte da província de Inhambane entre os distritos de Vilankulo e Inhassoro e possui uma área total de aproximadamente 1.368 Km<sup>2</sup> e as suas ilhas são essencialmente compostas por areias quartzosas não consolidados, contendo pequenas quantidades de carbonato derivados dos esqueletos dos organismos marinhos (WWF, 1994).



**Figura 1:** Arquipélago de Bazaruto

**Fonte:** <https://www.thesafaricompany.co.za/images/Map%20of%20Bazaruto.gif>

### 2.1.2. Geomorfologia do Arquipélago de Bazaruto

O arquipélago é caracterizado pela existência de um imponente relevo dunar costeiro em todas as suas ilhas e ao longo de toda a sua margem oriental, chegando a atingir uma altura de 107 m a sul da Ponta Chilola na ilha de Bazaruto. Com exceção do seu extremo norte, onde as areias estão fixas por vegetação, este cordão dunar encontra-se activo (figura 3).

As partes central e ocidental das ilhas são, por seu lado, caracterizadas por relevos com orientação SSE-NNW, que correspondem aos braços de grandes dunas parabólicas (dunas em forma de U, com braços compridos) (figura 2). A uma escala menor, estes relevos formam uma superfície inclinada para SSE, indicando a existência de um sistema dunar transgressivo, em rampa (subindo do lado do mar para o continente). O relevo é, em geral, mais baixo que o do cordão dunar oriental e as dunas estão fixas por vegetação (figuras 2 e 3). Os interdunares destas dunas parabólicas (as zonas mais baixas localizadas no interior dos braços das dunas) são frequentemente preenchidos por pântanos e lagoas em consequência da intersecção do nível freático com a superfície do relevo (figura 2). As zonas aplanadas que, apesar da sua menor expressão, têm grande importância para as ilhas pois, além

de serem bons locais para pasto e cultivo funcionam como depósito natural de água para recarga dos aquíferos.



**Figura 2:** Relevo formado pelas dunas activas que contactam com o oceano Índico

**Fonte:** Cooper & Pilkey (2002).



**Figura 3.** Evidência a morfologia e a direcção do transporte eólico (seta a vermelho) das dunas da parte central e oeste das ilhas. **Fonte:** Cooper & Pilkey (2002).

### 2.1.3. Ilha de Benguerra

A Ilha de Benguerra, localizada no sul de Moçambique, é a segunda maior ilha do Arquipélago de Bazaruto, situando-se a cerca de 14 km da costa de Vilankulo, na província de Inhambane. Com uma área aproximada de 55 km<sup>2</sup> (cerca de 11 km de comprimento por 5,5 km de largura), a ilha é parte integrante do Parque Nacional do Arquipélago de Bazaruto, uma área marinha protegida criada para conservar a rica biodiversidade da região (MICOA, 2010).

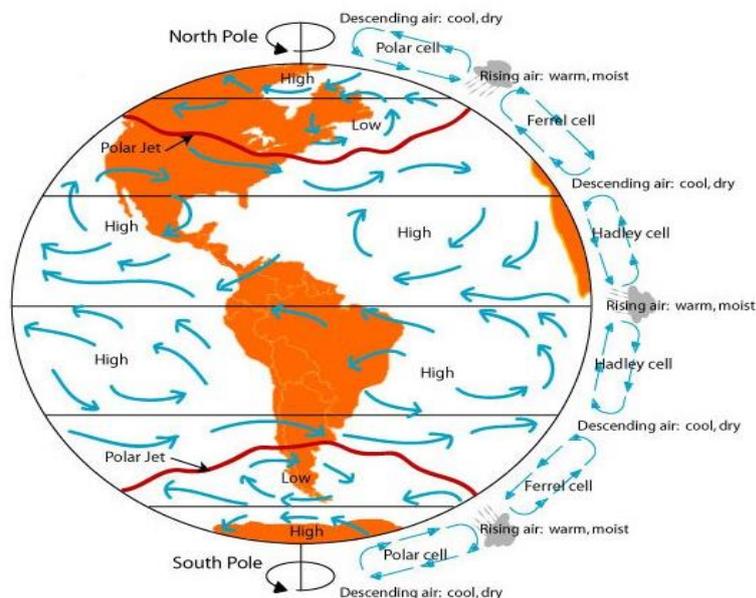


**Figura 4:** Ilustração da Ilha de Benguerra.

**Fonte:** [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b1/ISS059-E-92404\\_-\\_View\\_of\\_Mozambique](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b1/ISS059-E-92404_-_View_of_Mozambique)

## 2.2.Regime de ventos

Segundo Fernandino et al. (2018), projeta-se que o regime de ventos poderá apresentar tanto intensificação quanto enfraquecimento em diferentes sistemas costeiros, como dunas frontais, zonas húmidas, lagoas interiores e bancos arenosos, sob cenários futuros de mudanças climáticas. Essas variações refletem a forte variabilidade espaço-temporal dos processos atmosféricos globais, que estão diretamente associados à circulação geral da atmosfera, composta pelas células de Hadley, Ferrel e Polar (Figura 5). Nessas células, o ar quente e húmido ascende nas zonas equatoriais, enquanto o ar frio e seco desce em latitudes médias e polares, estabelecendo padrões de ventos predominantes que modulam a dinâmica costeira. Variações significativas na intensidade dos ventos implicam mudanças substanciais no clima de ondas, já que as ondas de vento se formam pela transferência de impulso da atmosfera para a superfície oceânica (Fernandino et al., 2018). Uma vez geradas, essas ondas não apenas controlam a redistribuição sedimentar local, mas também atuam como vetores de energia, responsáveis pela circulação de calor e momento entre a atmosfera e o oceano. Ondas alteradas — resultantes da intensificação ou enfraquecimento dos ventos — podem propagar-se por longas distâncias através das bacias oceânicas, modificando o regime de ondas em regiões distantes da sua origem inicial, o que afeta diretamente a resiliência costeira e acelera processos erosivos (McInnes et al., 2011; Fernandino et al., 2018).



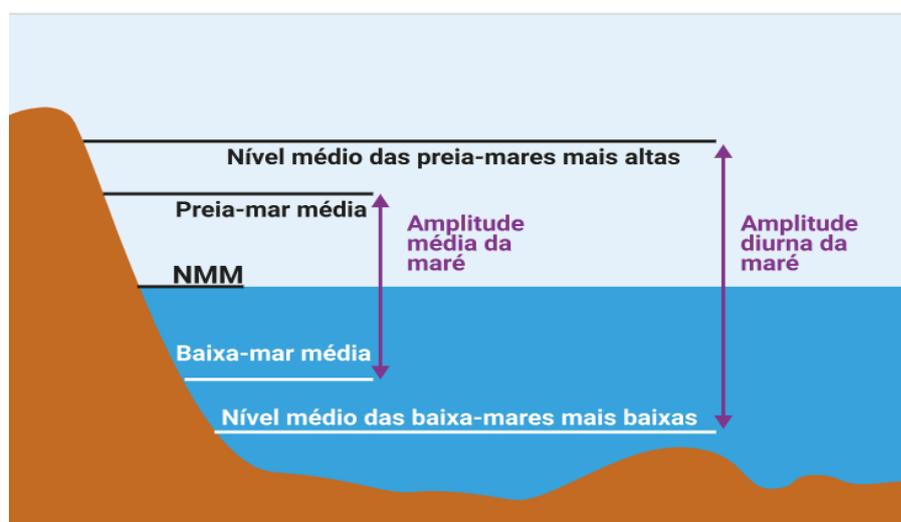
**Figura 5:** Representação da circulação global dos ventos, com a indicação dos giros de baixa e alta pressão e das células convectivas.

**Fonte:** [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Earth\\_Global\\_Circulation\\_-\\_en.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Earth_Global_Circulation_-_en.svg)

Fernandino et al., (2018) defende que a intensidade do vento não é o único parâmetro de vento que pode mudar em cenários climáticos futuros. Como descrito por McInnes et al., (2011), no caso de uma intensificação de uma componente direcional específica do vento (ou seja, componente norte no Hemisfério Norte), o ângulo de incidência deste sistema eólico variará (ou seja, rotação no sentido horário, seguindo o Efeito Coriolis). Além disso, estes autores afirmam também que as alterações na direcção dos ventos são particularmente preocupantes nas regiões costeiras onde o vento influencia os agentes hidrodinâmicos. Desta forma, as marés meteorológicas, as ondas e a ocorrência e intensidade dos eventos de tempestade, por exemplo, podem estar sujeitas a alterações sob estas condições.

### 2.3. Nível Médio do mar

O nível médio do mar é considerado um indicador importante das alterações climáticas, uma vez que reflete as alterações em várias partes do sistema climático (McInnes et al., 2011). Sinais de subida do nível do mar já podem ser observados e fazem-se sentir em várias regiões do planeta levando a uma série de perdas para a biota costeira e para a população humana (Macamo et al., 2015). Várias comunidades são evacuadas das zonas costeiras baixas que apresentam suscetibilidade a riscos como consequência da subida do nível do mar. No entanto, é importante notar que as taxas de subida do nível do mar projetadas a nível local, regional apresentam variações significativas em relação às calculadas à escala global (Fernandino et al., 2018). Ainda os mesmos autores afirmam que os valores da variação média do nível do mar são encontrados em locais offshore.



**Figura 6:** Ilustração do referencial do nível médio do mar (NMM)

**Fonte:** [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Earth\\_NMM\\_-\\_en.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Earth_NMM_-_en.svg)

Carson et al., 2016; Fernandino et al., 2018, afirmam que pequenas ilhas oceânicas, como as da região do Pacífico Central, estão sujeitas a maiores modificações. Estudos relataram que durante os últimos 70 anos, cinco ilhas do Pacífico desapareceram devido à subida do nível do mar e outras seis ilhas estão a sofrer uma erosão costeira severa. Segundo estes mesmos autores, o desaparecimento das ilhas foi o resultado do efeito combinado da subida do nível do mar, da subsidência tectónica e da incidência das ondas, forçando o efeito combinado e sinérgico destas variáveis.

Por outro lado, (McInnes et al., 2011) demonstraram que o impulso humano é o factor dominante para explicar a magnitude das variações do nível do mar, enquanto a maior parte da variabilidade dos modelos é causada por forçantes naturais. Para além de alterar a concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico, a humanidade pode também aumentar a vulnerabilidade à subida do nível do mar localmente através de actividades humanas como a urbanização desordenada em zonas costeiras, a extração de água subterrânea, a supressão e vegetação nativa (exemplo mangais), e a construção de infraestruturas costeiras rígidas (como muros de contenção e portos) alteram a dinâmica sedimentar e reduzem a resiliência natural das zonas litorais frente à subida do nível do mar (NICHOLLS et al., 2007).

O nível do mar também pode ser influenciado localmente pelas ondas. A variação temporária do nível do mar causada pelas ondas é conhecida como *setup* das ondas, que corresponde à elevação do nível médio da água na zona costeira devido à dissipação da energia das ondas à medida que se aproximam da costa (Short e Masselink, 1999). Em regiões insulares e costeiras baixas, a interação entre o *setup* das ondas e a maré astronômica pode aumentar significativamente a altura da água durante eventos extremos, como tempestades ou ciclones tropicais, levando a inundações costeiras temporárias, erosão intensa e intrusão salina (STOCKDON et al., 2006).

Andrefouët et al., (2018) afirmam que a subida do nível do mar tem um papel nas zonas costeiras, uma vez que contribui significativamente para o aumento do nível médio do mar durante eventos extremos e subsequentes inundações costeiras. Além disso, em cenários de subida do nível do mar, espera-se que o aumento do nível médio do mar aumente e intensifique a frequência e a magnitude de inundações costeiras, mesmo na ausência de tempestades severas. Isso ocorre porque níveis mais elevados de base significam que eventos de maré e ondas que antes não causavam alagamentos passarão a ultrapassar as linhas de costa com maior regularidade (IPCC, 2019).

#### **2.4. Forçantes Humanas – uso e cobertura de solo**

Mudanças na estrutura natural dos recursos é um processo complexo que é influenciado pelas interações conjuntas entre factores ambientais e factores sociais a diferentes escalas espaciais e temporais (Chilagane, 2018). De acordo com (Munthali, 2020) os cientistas sociais e gestores do solo caracterizam a cobertura do solo mais em geral para envolver os objectivos sociais e económicos da

terra. Por outro lado, os cientistas naturais classificam o termo uso do solo colocando ênfase nos diferentes aspectos úteis das actividades humanas sobre a terra, tais como a agricultura, a silvicultura e as construções feitas pelo homem.

#### 2.4.1. Uso de solo

O uso do solo significa arranjos de actividades e insumos que as pessoas empreendem num determinado tipo de cobertura de terra para a produzir, alterar ou manter. O termo uso da terra é utilizado para descrever usos humanos da terra, incluindo acções que modificam ou convertem a cobertura da terra de um tipo para outro. Exemplos incluem categorias tais como reservas florestais, assentamentos (por exemplo, assentamentos urbanos e rurais), agricultura (campos irrigados e alimentados pela chuva), parques nacionais, e transportes e outras infra-estruturas (Chilagane, 2018).

### 2.5. Dunas Costeiras

Dunas costeiras são formações de areia que se desenvolvem ao longo das áreas litorâneas, devido à ação do vento, da água e de outros processos naturais. Elas são uma característica comum em muitas praias e regiões costeiras em todo o mundo e desempenham um papel importante no ecossistema costeiro.

#### 2.5.1. Geomorfologia das Dunas Costeiras em Moçambique

As dunas costeiras estão agrupadas em dois grandes grupos que estão inseridos na figura 7:

- ✚ **Dunas interiores (secundárias)** – são de origem antiga que apresentam uma cor vermelha e/ou amarelada na maioria dos casos (Momade e Achimo, 2003);
- ✚ **Dunas costeiras exteriores (primárias)** - que ocorrem como um cordão costeiro contínuo e estreito, expostas directamente para a praia, isto é, adjacentes à costa excepto na foz dos rios Limpopo e Incomáti (Momade e Achimo, 2003; Hatton, 1995). Atrás destas dunas ocorrem por vezes depressões que formam lagoas costeiras e dunas adjacentes (Hatton, 1995).

As dunas são formadas por areias antigas e recentes, transportadas pelo vento durante as últimas regressões (Kalk, 1995; Momade e Achimo, 2003). Grande parte destas areias já sofreram alterações hidromórficas, sendo por isso compostas por sedimentos Quaternários recentes não consolidados (na sua maioria areia) nas dunas e planícies, encontrando-se misturados com solos de maior textura (aluviões) na foz dos grandes rios (Tinley, 1971; Hatton, 1995).



*Figura 7: Ilustração das dunas em regiões costeiras*

*Fonte:* [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTVkKtr6BDiOhzNRbp0\\_kQ5JqJHOoOR6yh-Gwes](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTVkKtr6BDiOhzNRbp0_kQ5JqJHOoOR6yh-Gwes)

### **2.5.2. Impactos humanos e naturais sobre as Dunas**

As dunas costeiras são consideradas como um sistema naturalmente vulnerável, dependentes da manutenção do balanço dinâmico das praias e em constante alteração devido aos processos de erosão, de acreção e sucessão biótica (Tinley, 1971).

A adicionar, existe ainda uma combinação de factores humanos no nosso país que as tornam ainda mais vulneráveis. Tais como a falta de planeamento e coordenação para a gestão do desenvolvimento costeiro, o uso limitado das medidas da avaliação de impacto ambiental na tomada de decisões sobre potenciais investimentos, existência de recursos humanos limitados, a aplicação inadequada da legislatura vigente e a falta de incentivos para a conservação do ambiente costeiro. As várias actividades humanas, muitas delas associadas ao turismo costeiro que põem em causa este ecossistema frágil, são nomeadamente:

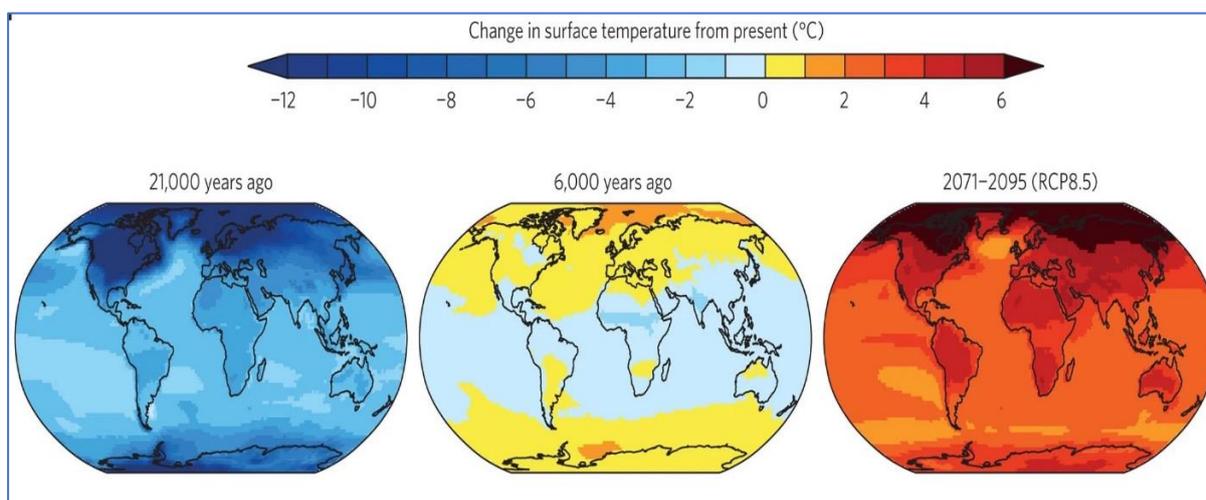
- ✚ Poluição, Uso tradicional e Desenvolvimento Costeiro.

### **2.6. Mudanças Climáticas**

As mudanças climáticas estão ocorrendo desde os primórdios da existência humana na Terra, como destaca Barcellos et al., (2009). Para estes autores o clima da Terra esteve, desde sempre, sujeito a mudanças, produzidos por ciclos longos ou curtos, que estão registados na história da Humanidade. Entretanto, apenas nas últimas cinco décadas esta questão começou a merecer uma atenção especial e cada vez maior (Santos, 2007).

Segundo o IPCC (2001), mudanças climáticas refere-se à variação estatisticamente significativa tanto na média quanto na variabilidade do clima, persistindo por período extenso (> décadas). Esta mudança climática pode ser devido a processos naturais internos ou forçantes externos, ou mudanças antropogênicas persistentes na composição da atmosfera ou do uso do solo que culmina com áreas com temperaturas superficiais elevadas (Figura 8).

De acordo com Silva et al. (2019), as mudanças climáticas têm impactos significativos nos ecossistemas marinhos e costeiros, afetando a quantidade e qualidade da água disponível. O aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, como ciclones, secas e inundações, tem sido observado em diversas regiões do mundo, incluindo áreas de conservação natural como as ilhas. Esses eventos extremos podem levar à devastação e desaparecimento dos ecossistemas, comprometendo não apenas o abastecimento humano, mas também a agricultura, a indústria e os ecossistemas aquáticos.



**Figura 8:** Ilustração das mudanças climáticas no globo terrestre

Fonte: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcS6mOr6C5jKptsBZbomc->

## 2.7. Simulação e Projecção de Cenários Futuros

Os ecossistemas costeiros albergam alguns dos habitats mais dinâmicos e produtivos do mundo (Costanza et al., 2014), incluindo: tapetes de ervas marinhas, mangais, recifes de corais, pântanos salgados, praias arenosas e dunas. Esses ambientes desempenham funções ecológicas cruciais, como o sequestro de carbono, a proteção costeira contra erosão e inundações, a purificação da água e a provisão de habitats para numerosas espécies marinhas e costeiras (Barbier et al. 2011). Cada um desses habitats oferece uma combinação única de benefícios nas amplas categorias de bens e serviços ecossistêmicos (EGS) conforme estabelecido pela Avaliação Ecossistêmica do Milênio (MEA, 2005). Tais categorias incluem: serviços de abastecimento (como alimentos, materiais e recursos genéticos),

serviços regulação (como controle da erosão, sequestro de carbono, regulação climática e da qualidade da água) e serviços de suporte (como ciclagem de nutrientes, formação do solo e manutenção da biodiversidade) (MEA, 2005; Costanza et al., 2014).

À medida que as alterações ambientais se propagam através destes ecossistemas, a prestação de importantes EGS também pode ser afectada. As mudanças podem resultar de impactos naturais ou antropogénicos e assumir uma infinidade de formatos e formas, incluindo: subida do nível do mar, poluição, espécies invasoras, tempestades e práticas de pesca prejudiciais. As alterações nos ecossistemas podem ser o produto de uma multiplicidade de factores, e ocorrer em diferentes escalas espaço-temporais afectando todos os tipos de EGS. A integração dessas variáveis dinâmicas representa um desafio ao EGS. No entanto, a quantidade de modelos e ferramentas que preveem explicitamente mudanças no EGS com base em alterações nas variáveis de entrada constituem uma proporção menor de todos os modelos aplicados em ecossistemas costeiros e estuarinos. Parte desta disparidade pode dever-se ao desenvolvimento relativamente recente no âmbito do conceito de bens e serviços ecossistêmicos (EGS) como uma estrutura operacional para avaliação ambiental e tomada de decisão. Apenas a partir da Avaliação Ecossistêmica do Milênio (MEA, 2005) é que os EGS foram sistematicamente classificados em categorias que consideram os múltiplos benefícios que os ecossistemas prestam à sociedade, além dos valores puramente econômicos ou de uso direto (Daily et al., 2009).

Ainda há lacunas significativas no reconhecimento, mensuração e integração dos serviços ecossistêmicos nos processos de gestão ambiental, especialmente em regiões insulares e costeiras. Isso contribui para disparidades na proteção de ecossistemas-chave como dunas, mangais e zonas húmidas, cuja importância funcional muitas vezes não é totalmente incorporada em políticas públicas (Pascual et al., 2017)

O desenvolvimento de modelos para aplicação em ecossistemas costeiros e estuarinos pode ser um desafio dada a sua natureza dinâmica e a multiplicidade de potenciais insumos e resultados; no entanto, os modelos fornecem ferramentas valiosas que podem ser usadas para muitos propósitos, como visualizar a distribuição de espécies, avaliar fluxos químicos, explicar relações habitat espécie ou identificar padrões espaciais de alteração dos ecossistemas, como a alteração de cobertura do solo. A utilidade dos modelos aumenta substancialmente para os gestores de recursos quando as mudanças ambientais podem ser simuladas dentro destas ferramentas para prever mudanças no EGS.

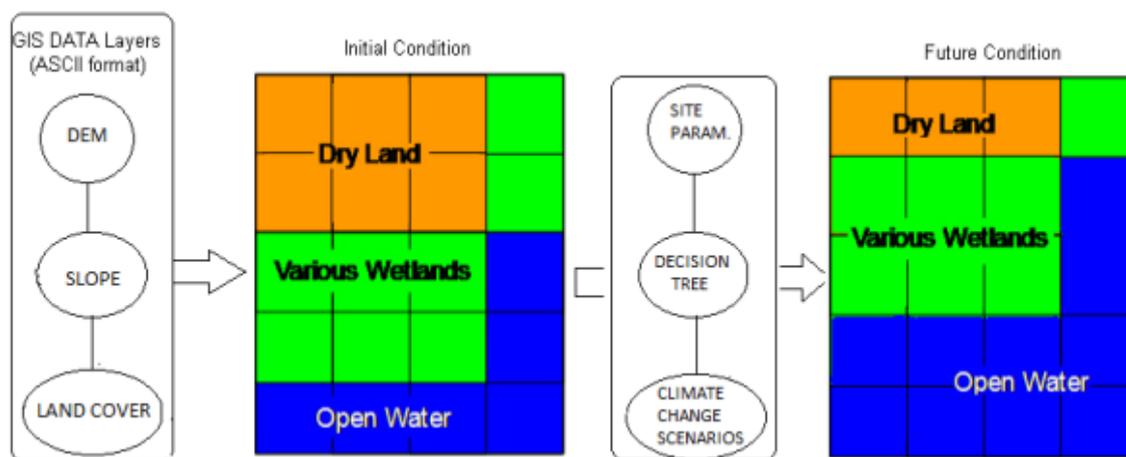
### 2.7.1. Modelos de Simulação e Projecção de Cenários Futuros

Para a Simulação e Projecção de cenários futuros usam-se modelos com escalas espaciais que variam de local a regional (por exemplo costa), pois são os que têm maior probabilidade de fornecer informações úteis na tomada de decisões de gestão de recursos (Turner et. al.2016). Esses modelos também variam muito em seu resultado final ou ponto final. Assim sendo, para a Simulação e Projecção de cenários futuros, se usam vários modelos, a destacar o Modelo XBeach, o Land Use and Land Change Model, ARIES SUITE, Sea Level Afecting Marshel Model (SLAMM) entre outros.

#### 2.7.1.1.Sea Level Afecting Marshel Model (SLAMM)

O Sea Level Affecting Marshes Model (SLAMM) é atualmente uma das ferramentas mais utilizadas para avaliar os impactos da elevação do nível do mar em ecossistemas costeiros. O modelo foi desenvolvido inicialmente na década de 1980 (Park et al. 1986) e continuamente aprimorado pela Warren Pinnacle Consulting, Inc., baseia-se em um sistema de árvore de decisão (Figura 9), no qual diferentes classes de uso e cobertura do solo são convertidas em função das mudanças no regime de inundação e da elevação relativa ao nível médio do mar (Clough et al., 2016). Dessa forma, o SLAMM simula os principais processos envolvidos nas transformações de áreas húmidas e modificações da linha costeira durante o aumento do nível do mar a longo prazo. Os pântanos de maré estão entre os ecossistemas mais suscetíveis às mudanças climáticas, especialmente ao aumento acelerado do nível do mar (SLR). O SLAMM funciona da seguinte maneira:

- Utiliza uma árvore de decisão flexível e complexa, incorporando relações geométricas e qualitativas para representar as transições entre diferentes classes costeiras;
- Cada local é dividido em células de área igual, e cada classe de cobertura do solo dentro de uma célula é simulada separadamente;
- O SLAMM é flexível quanto ao tamanho das células; as larguras geralmente variam de 5 a 30 metros, dependendo do tamanho do local e da disponibilidade dos dados de entrada (Warren, 2016).



**Figura 9:** Estrutura básica do SLAMM baseada na versão 6.7. **Fonte;** Warren (2016).

### Processos Principais Modelados no SLAMM

Para projetar o destino da distribuição dos habitats sob diferentes cenários de aumento do nível do mar, o SLAMM modela seis processos principais:

- **Inundação:** Submersão de áreas devido à elevação do nível do mar
- **Acreção:** Acúmulo de sedimento
- **Erosão:** Perda de terra causada pela ação da água
- **Sobreposição (Overwash):** Redistribuição de sedimentos por tempestades
- **Saturação:** Alterações no conteúdo de água do solo
- **Salinidade:** Variações na concentração de sal que afetam os tipos de habitat;

## III. CAPÍTULO

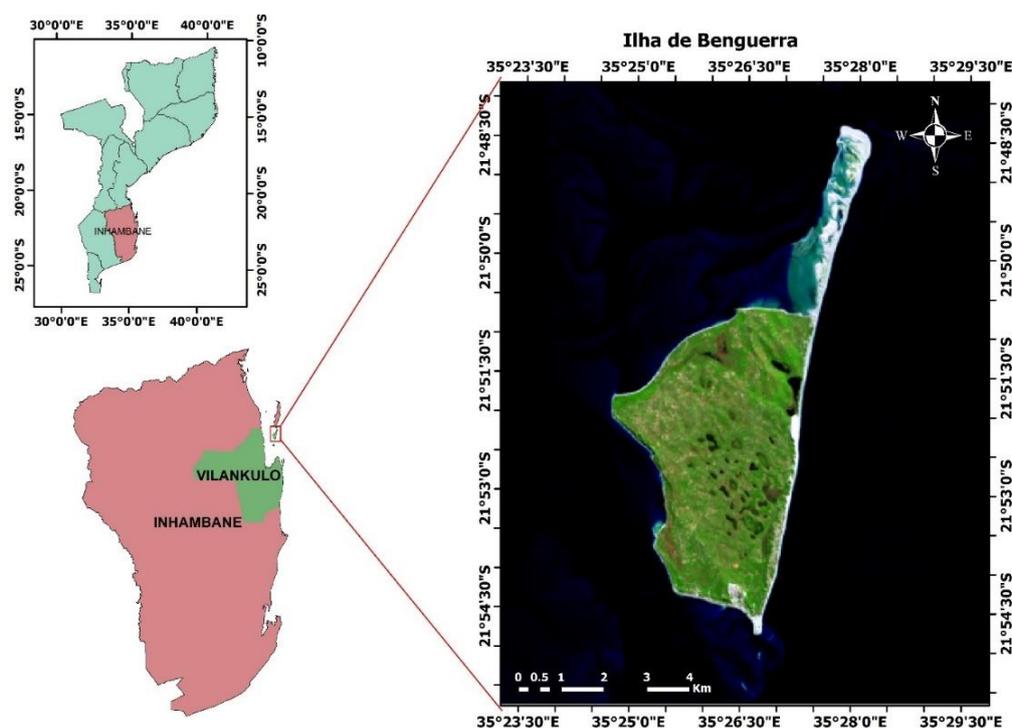
## 3. Metodologia

## 3.1. Localização e Descrição da área de estudo

A Ilha de Benguerra (Figura 10) está localizada no oceano Índico e situa-se entre  $21^{\circ}51'59''$ S de latitude e  $35^{\circ}26'24''$ E de longitude em Moçambique, sendo a segunda maior ilha do Arquipélago do Bazaruto em um conjunto de ilhas costeiras inseridas no Parque Nacional do Arquipélago do Bazaruto (PNAB). Geologicamente, a origem da Ilha de Benguerra está associada à formação de ilhas barreira ao longo da costa moçambicana, com base em processos eólicos, sedimentares e variações do nível do mar ocorridas no final do Pleistoceno e início do Holoceno e acredita-se que Benguerra tenha se separado do continente africano há milhares de anos, como resultado de processos sedimentares, variações do nível do mar e dinâmica de correntes costeiras, que contribuíram para o isolamento progressivo dessas formações insulares (ARMITAGE et al., 2006).

A ilha de Benguerra faz parte das cinco (5) ilhas que compõem o Arquipélago de Bazaruto: Bazaruto, Benguerra, Magaruque, Banque (Shell Island) e Santa Carolina (Paradise Island), na província de Inhambane nos distritos de Vilankulo e Inhassoro. A ilha tem aproximadamente  $55 \text{ Km}^2$  (11 km de comprimento e 5,5 km de largura) e fica a 14 km da costa de Vilankulo (Briggs, 2011).

Segundo o (Society, 2013), a Ilha de Benguerra compreende floresta, savanas, lagos de água doce e ecossistemas de zonas húmidas que sustentam uma diversificada fauna e flora, tendo sido declarada como Parque Nacional em 1971 e possui cerca de 2000 habitantes.



**Figura 10:** Localização e Descrição da Área de Estudo. Fonte: Adaptado pelo Autor.

### **3.2.Aspectos Climáticos representativos da Ilha de Benguerra**

Segundo o MICOA (2012), a Ilha de Benguerra apresenta os mesmos padrões dos processos ambientais e climáticos que ocorrem na costa do Distrito de Vilankulo, e a variação da temperatura, precipitação e ventos estão na mesma grandeza de ocorrência. A ilha de Benguerra apresenta uma estação seca que prevalece de Maio a Outubro e a temperaturas são mais amenas, geralmente variando entre 20°C e 25°C e durante esse período o clima é mais seco e fresco, com médias mensais de precipitação entre 30 mm (Agosto) e 56 mm (junho). De Novembro a Abril a ilha experimenta uma estação chuvosa que é marcada por temperaturas mais altas e maior humidade, com medias que variam entre 25°C e 30°C, sendo que as chuvas são mais intensas e frequentes, ocorrendo um valor de precipitação equivalente a cerca de 74% do valor total anual da precipitação, sendo o mês de Fevereiro o mês mais chuvoso com precipitação média mensal de cerca de 136 mm, podendo ocorrer tempestades tropicais e ciclones, especialmente nos meses de Janeiro e Fevereiro (MICOA, 2012).

Ao longo do ano a temperatura da água ao redor da ilha de Benguerra é relativamente constante, variando entre 24°C e 30°C. No sistema de ventos predominam os ventos de Sudeste e Sul durante a primeira metade do ano e ventos do Norte e Nordeste na segunda metade do ano intercalando com um período com ventos do Sudoeste e uma média anual de velocidade dos ventos de 6,4 m/s.

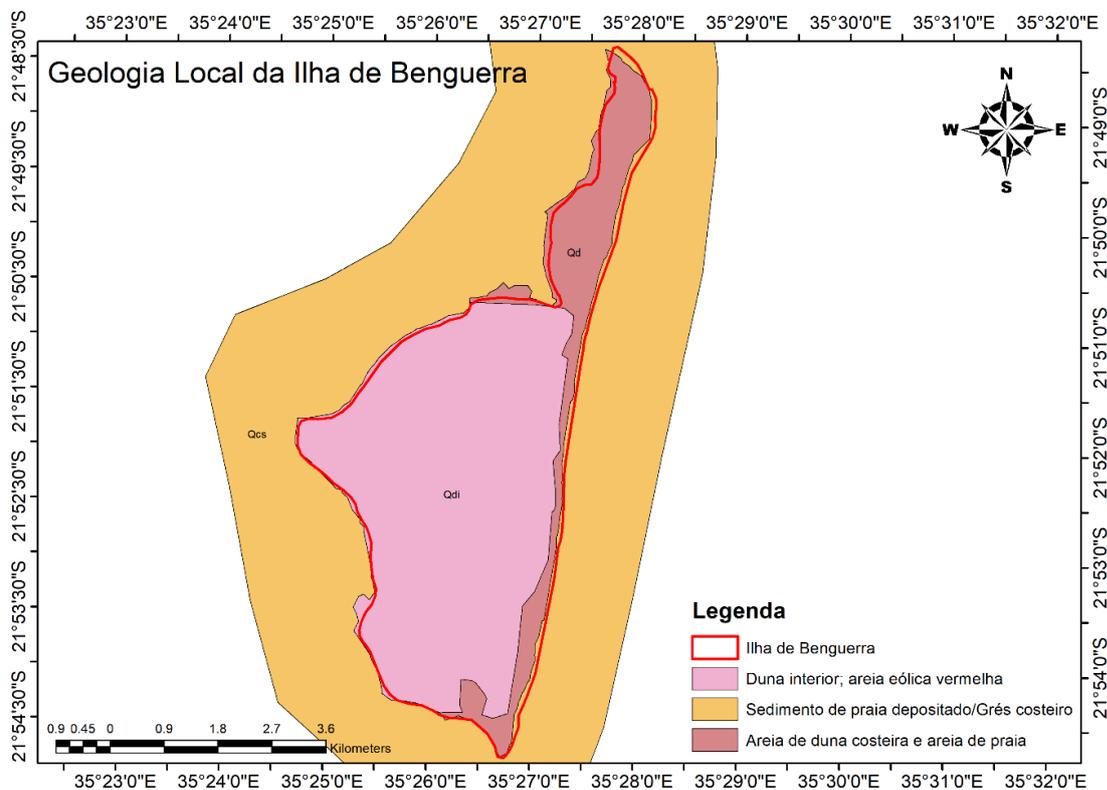
### **3.3.Geomorfologia**

A ilha de Benguerra apresenta uma geomorfologia diversificada devido aos seus processos de formação. A ilha é composta fundamentalmente de areias de quartzo não consolidadas, contendo uma pequena porção de carbonatos derivados do esqueleto de organismos marinhos. Há predominância de dunas parabólicas de areia ao longo da ilha atingindo uns 120 metros com ancoradouros naturais, sendo algumas moveis e outras fixas, podendo atingir alturas consideráveis de dezenas de metros que são formadas pela acção dos ventos que transportam a areia das praias para o interior da ilha. Verifica-se ao longo da extensão da ilha de Benguerra areia de duna costeira e areia de praia que compõem as dunas interiores e areia eólica vermelha. A topografia da ilha é relativamente plana, com algumas elevações suaves formadas por dunas de areia e praias arenosas, não se verificando montanhas ou colinas significativas na ilha. A ilha de Benguerra no seu limite Norte e Oeste, possui um afloramento de grés costeiros de elevada coerência (MICOA, 2012).

### **3.4.Geologia Local da Ilha de Benguerra**

A geologia superficial da Ilha de Benguerra é composta predominantemente por formações sedimentares quaternárias, caracterizadas por processos eólicos e marinhos. As unidades geológicas

principais incluem dunas interiores de areia eólica vermelha (Qdi), que ocupam a maior parte da área central da ilha, indicando antigas formações dunares estabilizadas. Ao longo das margens, encontram-se depósitos de grés costeiro (Qcs), associados a antigos terraços marinhos. As zonas mais externas são compostas por depósitos recentes de areia de praia e dunas costeiras móveis (Qd), fortemente influenciadas por processos atuais de erosão e sedimentação litorânea.



**Figura 11:** Imagem da Geologia Local da Ilha de Benguerra. Fonte: Adaptado pelo Autor.

### 3.5. Aspectos Oceanográficos

#### 3.5.1. Ondas e Marés

A ilha de Benguerra possui o mesmo padrão de ondas e marés de todo o Arquipélago de Bazaruto, sendo que a distribuição média das marés vivas é de aproximadamente 3 metros durante as marés vivas normais, aumentando para aproximadamente 4,4 metros durante as marés vivas.

A ondulação dominante provém da direcção Este-Sudeste a Sul durante 84% do tempo, com alturas médias de 0,5 metros a 2 metros e a direcção Nordeste a Este durante 14% do tempo, com uma altura de 0,5 metros a 2 metros. Ondas mais altas de 2,5 metros vem de uma direcção Sudeste durante 1% do tempo e atingem até 6,5 metros (Sistema Internacional de Reanálise de Ondas Oceânicas, Oceanweather 2006). A ilha de Benguerra é influenciada pela corrente de Moçambique, uma corrente quente que flui para o sul ao longo da costa leste de Costa. As correntes locais ao redor da ilha são influenciadas pela topografia submarina, ventos predominantes e marés.

### 3.6. Materiais e Métodos

Para a execução deste estudo foram utilizados computadores de alto desempenho capazes de processar grandes volumes de dados, com apoio dos softwares ArcGIS 10.8, Matlab R2018a, Python e SLAMM 6.7. No trabalho de campo, recorreu-se a Sistemas de Informação Geográfica (SIG), em especial a aplicação GPS Essentials, para a marcação de pontos inerentes aos diferentes alvos encontrados no campo a destacar a urbanização, vegetação e corpos hídricos e por fim a validação de pontos de referência ao longo da Ilha de Benguerra.

### 3.7. Descrição Dos Dados

Para a realização deste estudo foram utilizados dados referentes a um período de 34 anos (1990–2024), de modo a permitir uma reconstrução abrangente da dinâmica e do estado de conservação da Ilha de Benguerra em diferentes estágios de evolução. Os parâmetros analisados incluíram o uso e cobertura do solo, o regime dos ventos e os indicadores de conservação ambiental. No caso da cobertura do solo e do estado de conservação, foram utilizadas imagens de satélite referentes ao período de 1990 a 2024, seleccionadas em intervalos regulares de 10 anos (1990, 2000, 2010, 2020 e 2024). Essa periodicidade possibilitou avaliar a evolução temporal da vegetação, das dunas, das zonas húmidas e dos corpos de água interiores, permitindo identificar ciclos de regeneração, degradação e alterações estruturais nos ecossistemas da ilha e para o regime dos ventos foram adquiridos dados das componentes U e V de 1990 a 2024 sem nenhum intervalo.

### 3.8. Aquisição dos Dados

#### 3.8.1. Velocidade do vento (Componentes U e V) e Altura Significativa da Onda

Os dados da velocidade do vento foram adquiridos através da agência APDRC (Asia-Pacific Data-Research-Center) nas componentes U e V através do site (<http://apdrc.soest.hawaii.edu/las/v6/dataset?catitem=16438>) no E CMWF ERA5 global 0.25° x 0.25° reanalysis, ERA5 é a reanálise de quinta geração do ECMWF para o clima e condições meteorológicas globais nas últimas 4 a 7 décadas. Os dados das componentes U e V do vento para esse estudo foram de um período de 34 anos decorrentes dos anos 1990 a 2024, referentes a médias anuais de cada ano de estudo.

#### 3.8.2. Dados de Campo

O trabalho de campo foi conduzido em duas fases:

- **Marcação de pontos:** identificação de áreas com diferentes tipos de vegetação (vegetação densa e arbustiva) e diferentes usos do solo (zonas húmidas, dunas, áreas urbanizadas e corpos hídricos).

- **Classificação de alvos:** distinção entre tipos de vegetação, áreas expostas e diferentes graus de urbanização para o devido agrupamento em estágios de degradação e conservação. Todos os dados foram sistematizados em ambiente SIG para integração com imagens de satélite e análises subsequentes.

### 3.8.3. Dados do Nível do Mar

Os dados do nível do mar utilizados neste estudo foram obtidos junto do Instituto Oceanográfico de Moçambique (INoM), responsável pelo monitoramento através de marégrafos. Contudo, a instituição não mantém atualizações regulares e contínuas, sendo que os registos disponíveis abrangem apenas até o ano 2000. Para suprir essa lacuna temporal e garantir a continuidade da série histórica, foram incorporados dados de satélite disponibilizados pelo Asia-Pacific Data-Research-Center (APDRC), cobrindo o período subsequente (2001–2024).

Para a simulação de cenários futuros na Ilha de Benguerra, observou-se cenários do IPCC, onde se destacou-se a importância de simular o estado dos ecossistemas nos cenários otimista, moderado e pessimista da elevação do nível do mar segundo o IPCC (2021).

### 3.8.4. Imagens de Satélite

Existem considerações acerca da resolução espacial e temporal que devem ser realizadas para certas aplicações (Jansen, 2009). De acordo com o Jansen (2009), em estudos que envolvam mudanças na cobertura terrestre, é necessário utilizar sensores cuja resolução espacial varie entre 0.5 até 50 metros e uma série temporal de anos até décadas.

As imagens foram adquiridas no portal da NASA (National Aeronautics and Space Administration), na plataforma USGS através portal oficial (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Compreenderam Imagens de 34 anos nas quais, para os anos de 1990, 2000 e 2010 foram adquiridas uma imagem para cada ano, referentes aos períodos de verão e inverno no instrumento Landsat 5 TM C1 Level 1, e para as imagens equivalentes ao ano de 2020 e 2024 foram escolhidas imagens do sensor *OLI\_TIRS*, do Landsat 8/9 *CI Level 1*, com uma resolução temporal de 16 dias e com uma resolução espacial 30 metros conforme a tabela 1 abaixo.

A seleção das imagens foi feita olhando alguns critérios: baixa cobertura de nuvens para não interferir na identificação de alvos, mesmo ciclo de mare (maré morta).

**Tabela 1:** Características dos sensores que foram usados para a aquisição das imagens ao longo dos 34 anos. Fonte: Adaptado (Pacule, 2023).

<i>Satélite/Sensor</i>	<i>Número da banda</i>	<i>Comprimento de onda</i>	<i>Região do Espectro</i>	<i>Resolução Espacial</i>	<i>Resolução Temporal</i>
<b>Landsat 5 TM</b>	1	0,45-0,52	Azul	30 m	16 Dias
	2	0,52-0,60	Verde	30 m	
	3	0,63-0,69	Vermelho	30 m	
	4	0,76-0,90	IV/Próximo	30 m	
	5	1,55-1,75	IV/Médio	30 m	
	6	10,4-12,5	IV/Termal	120 m	
	7	2,08-2,35	IV/Distante	30 m	
<b>Landsat 8/9 Oli_ TRIS</b>	1	0,43-0,45	Aerossol	30 m	
	2	0,45-0,51	Azul	30 m	
	3	0,53-0,59	Verde	30 m	
	4	0,64-0,67	Vermelho	30 m	
	5	0,85-0,88	IV/Próximo	30 m	
	6	1,57-1,65	IV/Médio	30 m	
	7	2,11-2,29	IV/Distante	30 m	
	8	Pancromática	PC	15 m	
	9	Cirrus	CR	30 m	
	10	TIRS 1	IV/1	30 m	
	11	TIRS 2	IV/2	30 m	

### 3.9. Processamento das Imagens de Satélite

O processamento de imagens foi feito no software ArcGIS na versão 10.8 que é um software de alto nível que permite fazer combinações computacionais de cálculo numéricos e mapas.

Para o processamento das imagens de satélites se observarão duas fases distintas e importantes, a primeira engloba o Pré-processamento que consistira na conversão de números digitais (DN) para valores de Reflectância. A segunda fase é a mais pratica designada de fase de processamento, envolvendo o cálculo dos índices, combinação de bandas e classificação das imagens para o uso e cobertura do solo e estado de conservação. O processamento de imagens incluiu a análise dos padrões de erosão e deposição, classificação da água com base nas suas características ópticas.

A análise de uso e cobertura do solo foi feita por meio de classificação supervisionada pois serão coletados dados no âmbito da saída de campo, pois, este método requer a coleta de dados para selecionar classes de cobertura da terra através de digitalização visual com auxílio do usuário.

A classificação supervisionada utiliza amostras para identificar alvos com base em suas características espectrais e de Reflectância, como vegetação, corpos de água e áreas urbana, e classificação supervisionada é amplamente empregada devido à sua definição e precisão (Pacule, 2023).

### 3.9.1. Cálculo de Índices

As imagens de satélites podem ser usadas para calcular índices a partir da combinação de bandas que identificam cada índice. Os cálculos desses índices destacam um alvo específico que está presente na imagem enquanto simultaneamente outros alvos são ofuscados de forma parcial para que não degradem os efeitos na imagem. Como referido acima, esses índices se baseiam na combinação de bandas em cada índice, havendo assim diferença entre as bandas usadas em diferentes índices. Para os efeitos do estudo se usarão índices que melhor destacarão os alvos a destacar: NDVI, NDWI e BSI.

#### NDVI

O Índice De Vegetação Por Diferença Normalizada (NDVI), utiliza as bandas que utilizam valores de Reflectância nos comprimentos de onda do vermelho e infravermelho próximo para medir a densidade da vegetação e seu estado de actividade e favorecem a visualização de diferenças entre respostas espectrais para a vegetação. Segundo Barbosa, De Carvalho e Camacho et al., (2017), os resultados variam de -1 a +1 por pixel, de modo que quanto mais próximo do +1 maior a densidade da vegetação e quanto mais próximo do -1 maior indício de presença de rochas e solo descoberto. Para o seu cálculo usa-se a seguinte fórmula:

$$NDVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)} \quad \text{Equação (4)}$$

#### NDWI

O Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI), utiliza as bandas do verde e infravermelho próximo para fazer a detecção e a análise de corpos de água. Segundo Pereira e Morais (2015), os valores de NDWI variam entre -1 e +1, assim para valores próximos de 1 tem-se áreas com presença de água e para NDWI próximos de -1 não ocorre a presença de água na superfície do terreno. Para o seu cálculo usa-se a seguinte fórmula:

$$NDWI = \frac{(GREEN-NIR)}{(GREEN+NIR)} \quad \text{Equação (5)}$$

## BSI

O Índice do Solo (BSI), é usado para identificar áreas de solo exposto, através das combinações das bandas do infravermelho próximo (NIR), vermelho, azul e infravermelho curto (SWIR). O BSI tem valores que variam entre 0 e 200, de tal forma que quanto mais próximo a 200, menor será a vegetação, ou seja, mais nu será o solo. Quanto maior for a exposição do solo, maior será o valor do pixel (Rikimaru, 2002). Para o seu cálculo usa-se a seguinte fórmula:

$$BSI = \frac{((RED+SWIR)-(NIR+BLUE))}{((RED+SWIR)+(NIR+BLUE))} \quad \text{Equação (6)}$$

### 3.10. Uso Clássico e cobertura do solo (Dinâmica)

Para o mapeamento e análise do uso e cobertura do solo na Ilha de Benguerra foram seleccionadas imagens de satélite referentes aos anos de 1990, 2000, 2010, 2020 e 2024. As imagens foram classificadas em cinco (5) classes: vegetação densa, vegetação arbustiva a, solo exposto e áreas construídas, água do mar e águas rasas/bancos submersos. As imagens classificadas foram de índices combinados (NDVI, BSI, NDWI) que permitiram distinguir os diferentes alvos que eram do interesse. Após a classificação por índices usou-se a técnica de classificação supervisionada com vista a identificar com clareza a distinção entre os alvos através da escolha com auxílio ao Google Earth e Maps com a vantagem da maior acurácia.

### 3.11. Incidência da Erosão e Deposição

Esse processo de verificação da Erosão e da Deposição na Ilha foi feito através da intersecção e sobreposição das imagens, vendo as áreas anteriormente ocupadas pelo corpo de água que deixaram de o ser (indicando deposição) e, inversamente, as áreas que passaram a ser ocupadas pela água (indicando erosão). Devido ao deslocamento das imagens foram simplesmente observadas a erosão para os anos 1990-2020, 1990-2024 e 2020-2024 através de duas fórmulas da deposição e erosão respetivamente abaixo:

$$Dp = A1 - A\alpha \quad \text{e} \quad Er = A2 - A\alpha \quad \text{Equação (7 e 8)}$$

Onde: **Dp** é a deposição, **Er** é a erosão, **A $\alpha$**  é a área da intersecção entre os dois períodos, **A1** é área do período anterior e **A2** é área do período posterior.

### 3.12. Estado de Conservação

A avaliação do estado de conservação da Ilha de Benguerra foi realizada com base em imagens de satélite Landsat (1990, 2000, 2010, 2020 e 2024), complementadas por dados de campo de 2024 para calibração e validação das classes. A abordagem metodológica seguiu a lógica da classificação supervisionada, que permitiu diferenciar alvos ambientais a partir da assinatura espectral, com auxílio do algoritmo Support Vector Machine (SVM), reconhecido pela sua elevada precisão em contextos costeiros e insulares (Mountrakis et al., 2011). Para este estudo, a ilha foi classificada em 10 classes ambientais e antrópicas, representativas das principais feições geomorfológicas e ecológicas que compõem o sistema insular: **urbanização, vegetação densa, vegetação arbustiva, dunas cobertas, dunas expostas, bancos submersos, água cristalina, zonas húmidas, lagoas e lagos e água do mar**. O processo de classificação foi validado por meio da matriz de confusão e cálculo do **Índice Kappa ( $\kappa$ )**, utilizando amostras independentes e imagens de alta resolução do Google Earth conforme os critérios de Landis e Koch (1977).

### 3.13. Classificação Supervisionada

A classificação foi fundamental para a identificação efetiva e direta dos diferentes alvos existentes ao longo da ilha. Identificando a extensão dos corpos de água, diferenças na densidade vegetativa, ocupação do solo, agrupamento das zonas húmidas, dunas e outros componentes da ilha. A classificação supervisionada foi imperiosa na diferenciação de diferentes classes para o monitoramento da evolução e conservação da ilha da ilha. A classificação supervisionada consiste em um processo no qual o algoritmo de classificação é treinado com amostras previamente conhecidas (amostras de treinamento) em seguida é determinada a assinatura espectral dos pixels dentro da área de treino para encontrar uma correspondência próxima entre os diferentes alvos.

A classificação supervisionada foi realizada por meio do algoritmo **Support Vector Machine (SVM)**, uma técnica amplamente reconhecida pela sua elevada eficácia na separação de classes com limites não lineares, principalmente em dados de alta dimensionalidade, como os provenientes de sensores multiespectrais. O SVM atua buscando o hiperplano ótimo que melhor separa as classes no espaço de características, maximizando a margem entre os vetores de suporte. Para o treinamento do classificador, foram definidos conjuntos representativos de amostras para cada classe de interesse, com base em conhecimento de campo e interpretação de composição colorida das bandas espectrais. A formulação matemática do classificador linear SVM é expressa como:

$$f(x) = \text{sign}(w \cdot x + b) \text{ Equação (9)}$$

Onde:

- $x$  é o vetor de entrada (características espectrais);
- $w$  é o vetor de pesos;
- $b$  é o viés;
- $e$  a função *sign* determina a classe.

### 3.14. Processo de Validação da classificação

#### Avaliação da Acurácia

A avaliação da acurácia da classificação foi realizada com base em uma **matriz de confusão**, construída a partir da comparação entre os pixels classificados pelo modelo SVM e as amostras de validação independentes, previamente coletadas e não utilizadas durante o treinamento. Esta matriz permite quantificar a concordância entre os dados classificados e os dados reais de referência de imagens do Google Earth e Google Maps. A técnica consistiu no lançamento de 200 pontos na imagem classificada como na imagem de referência/real, para verificar se os pontos que correspondem a uma dada classe são equivalentes com os alvos na imagem de referência e a partir da matriz calculou-se o Índice Kappa ( $k$ ).

#### Índice Kappa ( $k$ )

O **Índice kappa ( $k$ )** mede o grau de concordância entre a classificação e a referência, descontando os acertos que ocorreriam ao acaso. Segundo Landis e Koch (1977), as faixas de interpretação mais comuns, expressas em percentagens (%), conforme a tabela abaixo:

**Tabela 2:** Ranking de classificação do Índice kappa ( $k$ )

<b>Índice Kappa (<math>k</math>)</b>	<b>Percentual</b>	<b>Interpretação da Concordância</b>
$\kappa < 0$	< 0%	Pior que o acaso (discordância)
$0.00 \leq \kappa \leq 0.20$	0% – 20%	Concordância fraca ou insignificante
$0.21 \leq \kappa \leq 0.40$	21% – 40%	Concordância razoável
$0.41 \leq \kappa \leq 0.60$	41% – 60%	Concordância moderada
$0.61 \leq \kappa \leq 0.80$	61% – 80%	Concordância substancial
$0.81 \leq \kappa \leq 1.0$	81% – 100%	Concordância quase perfeita

### 3.15. Simulação de Cenários Futuros

Para simular cenários futuros na ilha de Benguerra para esse estudo foi implementado o Sea Level Affecting Marshes Model (SLAMM) versão 6.7, que simula os impactos da elevação do nível do mar sobre a ilha em diferentes cenários de projeção (SSP1, SSP2 e SSP5 do IPCC) combinando regras de transição dirigidas por cota (em relação ao MTL) com processos de erosão, acreção e conectividade hidrológica. A versão 6.x introduz módulos de incerteza/sensibilidade, análise de elevação integrada e melhorias de interface que agilizam a calibração e auditoria do projeto.

O SLAMM é amplamente reconhecido por sua capacidade de representar mudanças espaciais em ecossistemas costeiros e ambientes insulares, incorporando tanto a dinâmica da linha de costa quanto as interações com elementos interiores, como corpos de água e áreas baixas de terra seca.

#### 3.15.1. Conjunto de Dados e pré-processamento

A implementação do modelo exigiu a integração de diferentes camadas espaciais, cuidadosamente processadas e adaptadas à escala de análise:

##### **Modelo Digital de Elevação (DEM)**

O DEM constituiu a base topográfica do modelo, servindo para definir zonas suscetíveis à inundação progressiva. As cotas foram ajustadas ao datum de referência do SLAMM (MTL = 0), assegurando compatibilidade vertical e correção de possíveis discrepâncias altimétricas e dando unidades em metros. O DEM foi obtido através do USGS Earth Explorer no Shuttle Radar Topography Mission – SRTM (Resolução 30 m) através do site <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

##### **Declividade (Slope)**

O mapa de declividade, derivado do **DEM**, foi utilizado para parametrizar a dinâmica de erosão e a velocidade de transição entre classes de cobertura, permitindo distinguir áreas mais resistentes daquelas mais vulneráveis morfologicamente ao avanço oceânico.

##### **Categorias NWI**

As categorias NWI só podem ser feitas após a classificação supervisionada da ilha para distinguir as diferentes classes e subsequentemente as categorias do National Wetlands Inventory (NWI) equivalente ao ano de 2024 foram convertidas em classes compatíveis com o SLAMM, servindo como condição inicial da cobertura e do uso da terra na ilha e fez-se a análise de Elevação do SLAMM para verificar se as classes ocupam intervalos altimétricos plausíveis.

As principais classes do modelo foram convertidas a partir da classificação supervisionada para categorias equivalentes ao SLAMM, a destacar: **Developed Dry Land, Undeveloped Dry Land, Inland Fresh Marsh, Tidal Fresh Marsh, Tidal Flat, Ocean Beach e Open Ocean.**

### **Estruturas de Protecção (Dike File)**

O Dike file incorpora barreiras antrópicas de protecção costeira, como diques ou aterros, cuja presença pode alterar os padrões de inundação e modificar a vulnerabilidade relativa de diferentes setores da ilha. No entanto, para esse trabalho o dado Dike file usou-se a configuração clássica do raster, onde todos os locais que não apresentam barreiras foram atribuídos valor 0 e a ilha não apresentava nenhuma protecção, constituindo um raster com valores nulos em toda a sua extensão.

### **Séries de Elevação do Nível do Mar (SSPs)**

Para uma abrangência significativa dos resultados no cenário contemporâneo e futuro, foram adotados três cenários de projeção baseados nos **Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)**, que constam nas feitas para 2100 em todas as regiões do mundo conforme descritos pelo (IPCC, 2021):

- **SSP1 (otimista):** +0,48 m até 2100;
- **SSP2 (intermediário):** +0,61 m até 2100;
- **SSP5 (pessimista):** +0,83 m até 2100.

### 3.16. Visualização do quatro conjunto de Dados usados no SLAMM

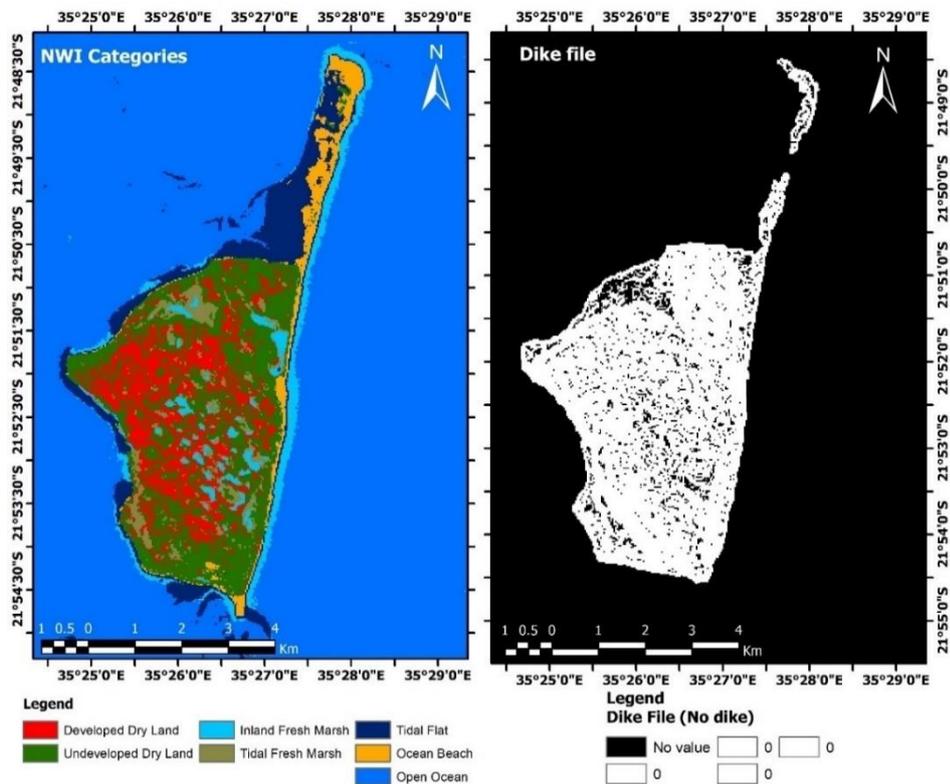


Figura 12: NWI Categories (Esquerda) e Dike File (Direita).

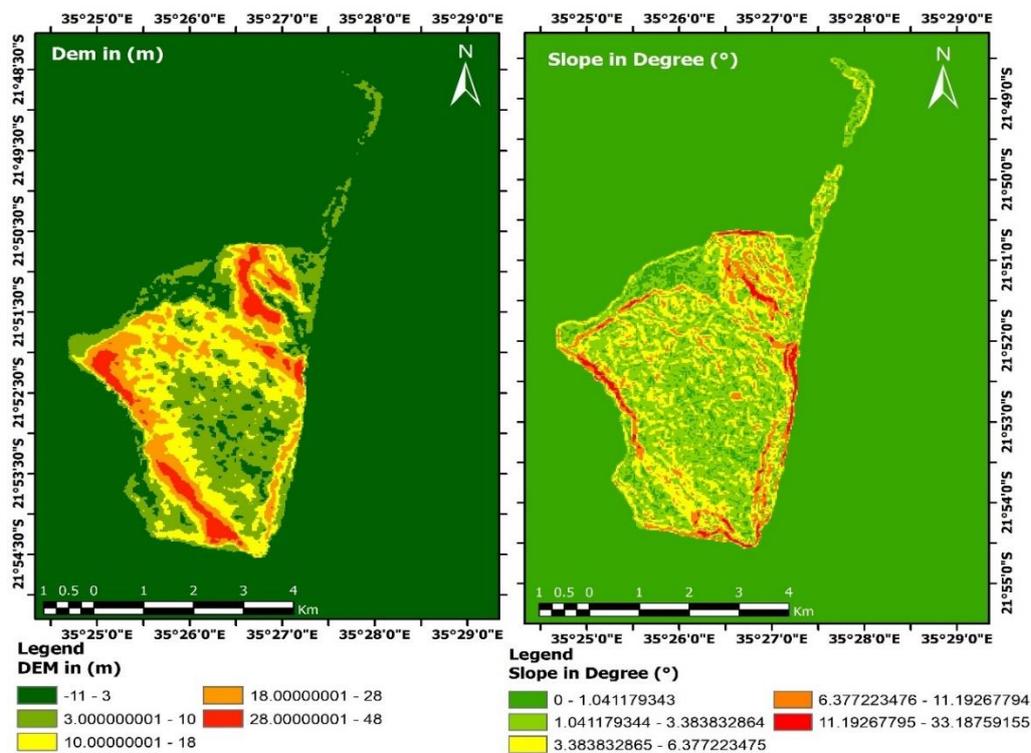


Figura 13: Ilustração do DEM (Esquerda) e Slope (Direita).

### **3.17. Procedimentos de modelagem**

#### **Preparação e harmonização dos dados**

Os insumos espaciais foram projectados para o WGS 1984 e reprojectados para UTM Zone 36S para a melhor coerência da apropriação de cada valor das células correspondentes aos pixels, corrigidos e harmonizados em termos de extensão e resolução para o mesmo número de linhas e colunas. O DEM e o Slope foram integrados às classes NWI para compor a condição inicial do modelo. O Dike file foi associado a cada cenário de simulação.

#### **Parametrização do modelo**

O SLAMM foi configurado para os horizontes de 2030, 2050 e 2100, de acordo com os cenários de elevação do nível do mar. Os parâmetros de erosão e acreção não foram colocados pois a área não apresenta nenhum valor claro e por outra via, o modelo não se limita por esse facto, pois, o módulo de conectividade foi ativado para simular a interação entre áreas interiores baixas e o oceano, como a área de estudo apresenta lagos interiores e depressões costeiras atrás de dunas, foi necessário garantir que o modelo apenas considerasse inundadas as células efetivamente conectadas ao oceano.

#### **Análise de incerteza**

Reconhecendo as limitações inerentes a modelos de simulação espacial, foi conduzida uma análise de incerteza baseada na sensibilidade do modelo a variações nos insumos principais. Testaram-se cenários alternativos de resolução do DEM, pequenas variações na taxa de elevação do nível do mar através do uso de diferentes cenários de elevação a simulação e ajustes nos parâmetros de transição de classes. Essa abordagem permitiu identificar quais variáveis exercem maior influência nos resultados, destacando a importância da topografia de alta resolução e da correta parametrização das categorias de uso e cobertura do solo (NWI).

#### **Validação do modelo**

Foi a última fase da modelagem que teve como foco ver até que ponto o modelo é fiável e confiável. Essa fase foi realizada primeiro por uso de diferentes cenários e por meio da comparação da condição inicial modelada com registros de imagens de satélite e dados históricos da ilha. Além disso, aplicou-se a análise de elevação do SLAMM, garantindo que as classes iniciais correspondessem a faixas topográficas plausíveis. Essa etapa assegurou maior consistência interna ao modelo e confiabilidade nos resultados projectados.

## IV. CAPÍTULO

## 4. Resultados

Os resultados do trabalho estão ordenadamente divididos em três subcapítulos, sendo que o primeiro subcapítulo dos resultados do trabalho esta inteiramente ligado aos aspectos do uso e cobertura do solo e da conservação da ilha de Benguerra desde o ano de 1990 a 2024, o segundo subcapítulo esta relacionado a Incidência da Erosão e Deposição e o último subcapítulo relata a simulação de cenários futuros da própria ilha usando o modelo SLAMM em diferentes perspetivas futuras até 2100.

## 4.1. Uso Clássico e cobertura do solo (Dinâmica)

A tabela 2 ilustra as principais classes de uso e cobertura do solo, descritas neste trabalho correspondente aos anos de 1990 a 2024 na ilha de Benguerra. A análise multitemporal do uso e cobertura do solo nos anos estudados mostram claramente as mudanças importantes na distribuição das principais classes verificadas na ilha (Vegetação Densa, Vegetação Arbustiva, Solo Exposto, Água cristalina/Bancos submersos e a Água do mar), bem como na configuração dos lagos interiores. Os resultados referentes ao uso e cobertura do solo foram validados aplicando métodos amplamente usados, o Índice Kappa que foi acima de 90% para todos os anos, com maior destaque para o ano de 2024 que apresentou o maior Índice Kappa e acurácia devido a compilação dos dados de campo.

*Tabela 3: Ilustração do Índice Kappa para o ano de 2024 referente ao ano com dados de campo.*

Class name	Dense Vegetation	Shrub Vegetation	Exposed Soil	Water Sediments	Water	Total	U_Accuracy	Kappa
Dense Vegetation	38	2	0	0	0	40	0.98	0
Shrub Vegetation	2	38	0	0	0	40	0.98	0
Exposed Soil	0	0	37	3	0	40	0.9375	0
Water Sediments	0	0	3	37	0	40	0.9375	0
water	0	0	0	0	40	40	1	0
Total	40	40	40	40	40	200	0	0
P_Accuracy	0.98	0.98	0.9375	0.9375	1	0	0.96	0
Kappa	0	0	0	0	0	0	0	0.9778

As figuras 14 e 15, mostram os mapas referentes ao uso e cobertura do solo e as suas respectivas áreas no intervalo de tempo de 1990, 2000, 2010, 2020 e 2024 na Ilha de Benguerra. Para o ano de 1990 e

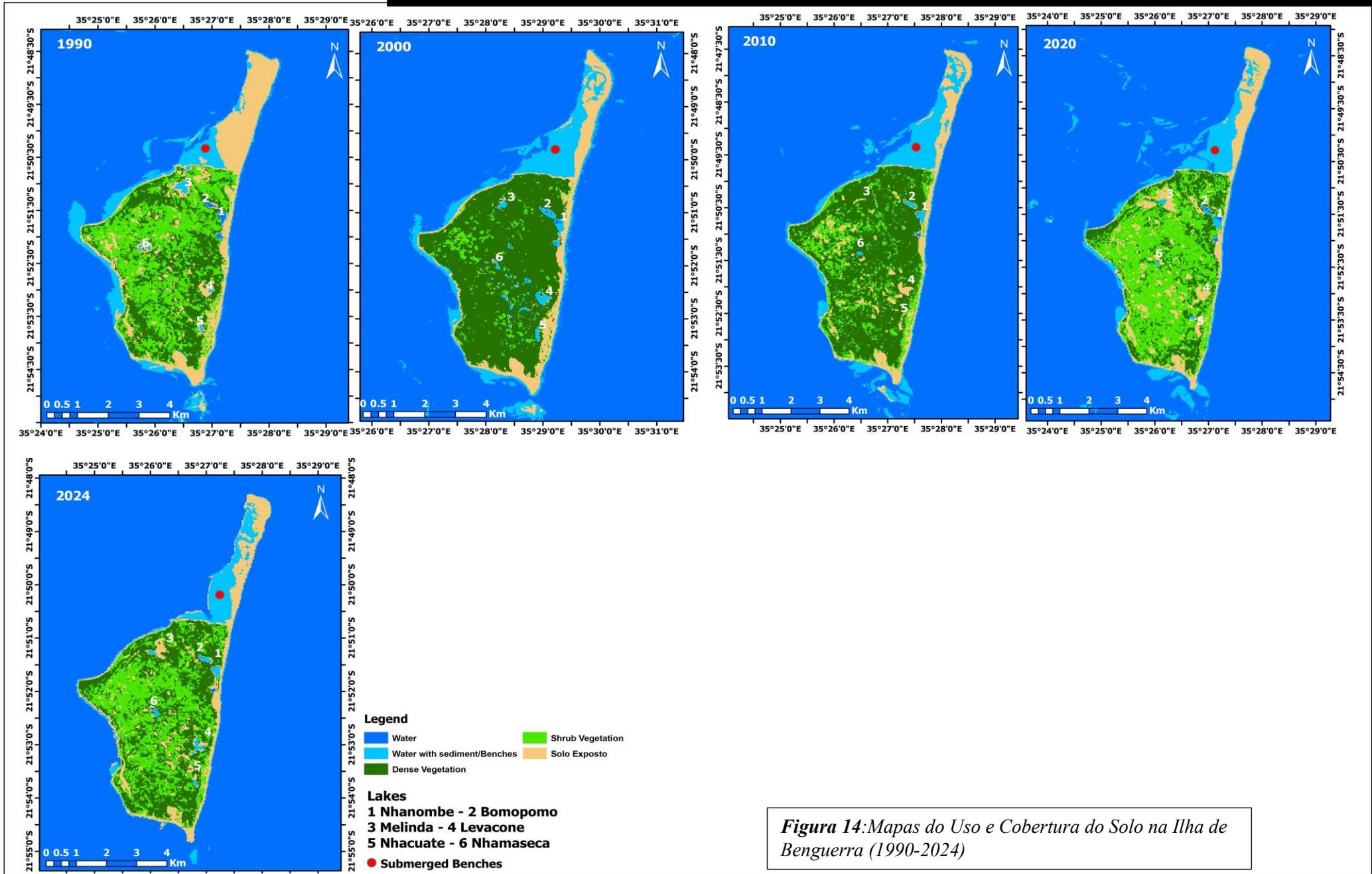
possível visualizar a predominância da vegetação arbustiva que ocupava uma área de  $9,9 \text{ Km}^2$  (39,8%), a vegetação densa que ocupava cerca de  $7,5 \text{ Km}^2$  (28,2%) ambos ocupando praticamente todo o interior da ilha, enquanto o solo exposto com  $8,03 \text{ Km}^2$  (32,1%) se concentrava nas faixas costeiras e nas dunas maioritariamente, mostrando uma baixa presença do solo exposto no interior da ilha e na região Oeste da mesma.

Para o ano de 2000, observa-se uma expansão significativa da vegetação densa na região sul e central da ilha para cerca de  $10,3 \text{ Km}^2$  (54,6%), indicando um processo de regeneração natural, culminando com a diminuição da vegetação arbustiva que desapareceu mais que a metade ocupando 16,9% ( $3,6 \text{ Km}^2$ ) da área e nesse período as zonas expostas reduziram consideravelmente para  $4,2 \text{ Km}^2$  (28,5%), ficando restritas as zonas costeiras e nas regiões de lagoas.

Para o ano de 2010, observa-se que a vegetação densa ainda se manteve em patamar elevado (45,6%) equivalente a  $9,4 \text{ Km}^2$ , embora inferior a 2000, enquanto a arbustiva apresentou discreto crescimento  $3,9 \text{ Km}^2$  (23,2%), e o solo exposto teve um ligeiro aumento para 31,1% ( $5,6 \text{ Km}^2$ ) principalmente na região Central e Este da Ilha.

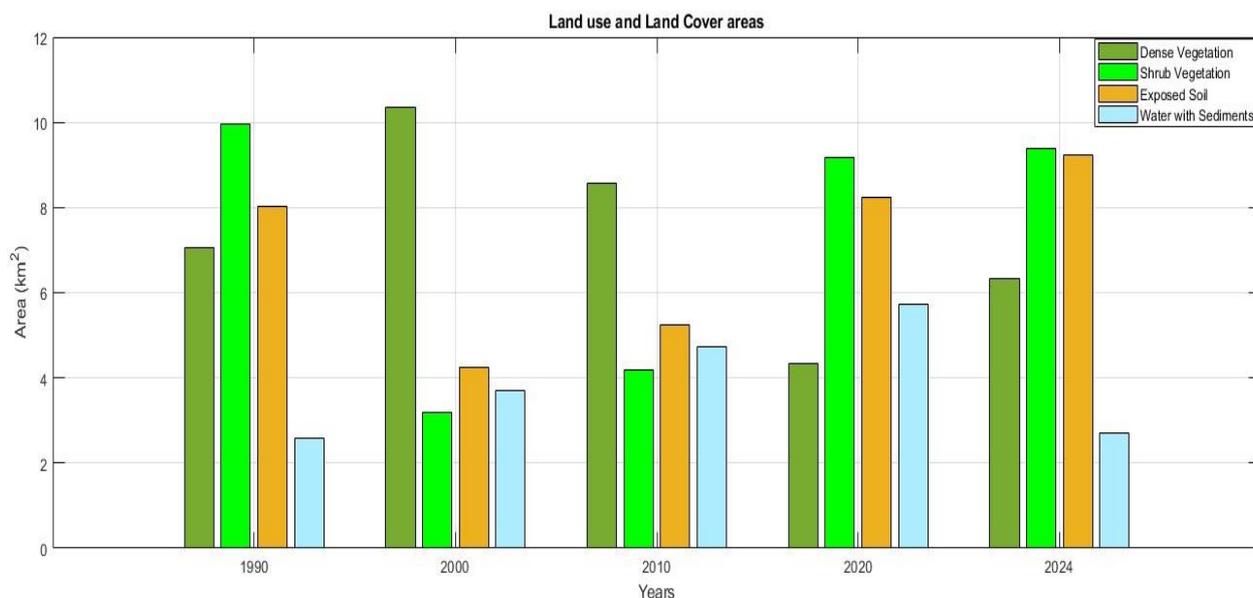
Para o ano de 2020, ocorreu uma mudança marcante na estrutura: a vegetação densa sofreu uma retração significativa, representando para apenas  $4,01 \text{ Km}^2$  19,9% (enquanto a vegetação arbustiva alcançou seu pico relativo  $9,95 \text{ Km}^2$  (42,2%) e o solo exposto também cresceu expressivamente  $8,01 \text{ Km}^2$  (37,9%). Essa configuração indica um processo de degradação ou substituição de áreas mais densamente vegetadas por formações arbustivas e solo descoberto pelas habitações.

E por último, em 2024 nota-se uma recuperação parcial da vegetação densa para  $6,2 \text{ Km}^2$  (24,4%) do conjunto, enquanto a vegetação arbustiva manteve valores elevados  $8,9 \text{ Km}^2$  (36,6%) e o solo exposto continuou em patamar próximo ao máximo da série  $9,6 \text{ Km}^2$  (39,0%). Esse cenário aponta para uma instabilidade na dinâmica da cobertura, marcada por oscilações entre degradação e processos de regeneração parcial. O ponto vermelho em todos os mapas ilustra um banco submerso que se encontra nessa região, que sob o ponto de vista de extensão vai sendo modificado, e desde o ano de 1990 a sua extensão vai aumentando até 2020 e em 2024 apresenta uma ligeira diminuição.



*Figura 14: Mapas do Uso e Cobertura do Solo na Ilha de Benguerra (1990-2024)*

A figura 15 mostra as variações das classes do uso e cobertura do solo na Ilha de Benguerra nos últimos 34 anos. Nota-se claramente que as classes foram variando significativamente como descrito acima nos mapas de uso e cobertura do solo. Em 1990 a área da vegetação arbustiva era a maior de todas e seguida do solo exposto com aproximadamente  $8,03 \text{ Km}^2$  e a menos expressiva era a água com sedimentos com  $2,3 \text{ Km}^2$ . a área exposta e a vegetação diminuíram em 2010 e voltaram ao auge em 2024 com mais de  $9,7 \text{ Km}^2$  e  $9,5 \text{ Km}^2$  respectivamente. A vegetação densa teve um comportamento oposto, aumentou em 2000 para mais e  $10,2 \text{ Km}^2$  e diminuiu em 2024 para  $6,3 \text{ Km}^2$ .



**Figura 16:** Gráfico da variação das classes de uso e cobertura do solo (1990-2024).

#### 4.2. Estado de Conservação da Ilha de Benguerra

O estado de conservação indica as condições ambientais da área, mostrando se os seus ecossistemas permanecem preservados ou se foram alterados e degradados ao longo do tempo.

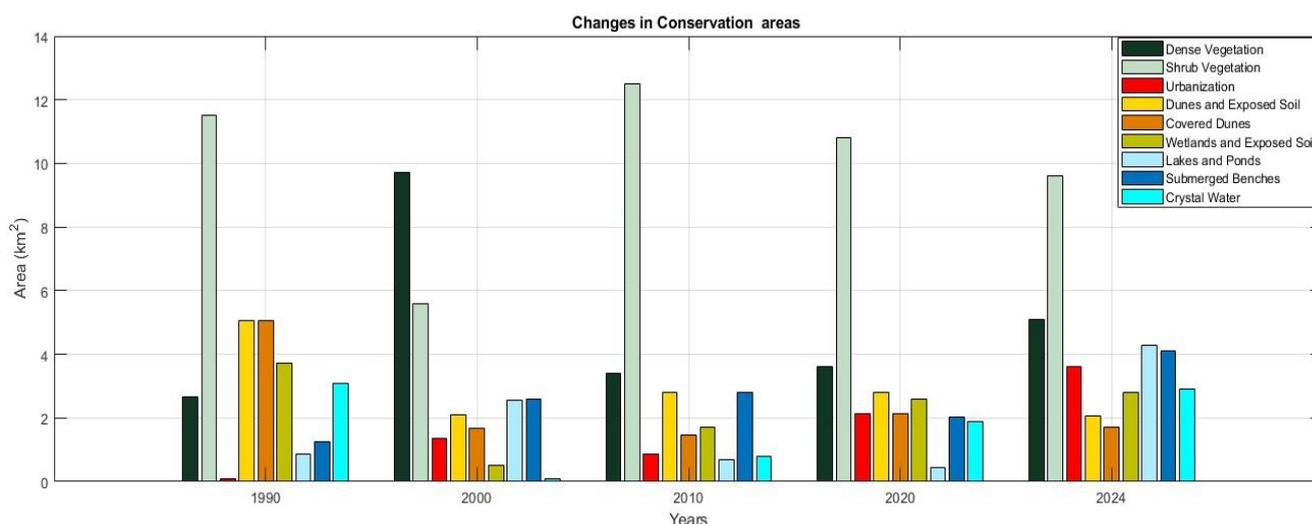
A figura 17, ilustra os mapas do estado de conservação da ilha de Benguerra nos últimos 34 anos detalhadamente. A caracterização do estado de conservação da Ilha de Benguerra evidenciou a presença de dez classes distintas: vegetação densa, vegetação arbustiva, dunas e solo exposto, bancos submersos, zonas húmidas, lagoas, urbanização, zonas húmidas e solo exposto, água cristalina e a água do mar.

Em 1990, a paisagem da Ilha de Benguerra era dominada maioritariamente por vegetação arbustiva que preenchia mais da metade do interior da ilha e a vegetação densa se concentrava simplesmente na região Leste da ilha, a urbanização era quase inexistente com apenas uma pequena concentração no lado Oeste da Ilha, os lagos da região apresentavam-se bem definidos e estáveis, reforçando o equilíbrio hídrico e alimentando parte das zonas húmidas que eram expressivas e distribuídas em diferentes pontos da ilha garantindo a manutenção da biodiversidade local. Na região sul evidenciava-se um banco de areia bem consolidado que servia como uma barreira para atenuação de ondas e eventos extremos, na região Norte verifica-se um banco submerso que se estende até a Oeste da Ilha juntamente com as águas cristalinas e as dunas cobertas e expostas estavam intactas em toda a extensão da Ilha, desempenhando assim a sua função de barreira natural. No ano de 2000, observa-se o início da pressão sobre os ecossistemas com o aumento expressivo da urbanização em 10 anos, a vegetação arbustiva diminuiu significativamente decorrente do aumento do solo exposto e da vegetação densa que sofreu um processo de recuperação natural mantendo a ilha em um bom estado, nota-se claramente o aumento de lagoas e a extensão dos lagos aumentou significativamente, fazendo com que haja diminuição das áreas húmidas. Em 2010, a degradação dos lagos é notória, com o processo de ressecagem do lago Nhacuate e Lago Levacone, totalmente e parcialmente (80 %) respectivamente, transformados em zonas húmidas, e a degradação das dunas da região Norte foi mais evidente. Por outro lado, em 2020, há um aumento considerável da urbanização em toda a ilha até em locais de dunas, culminando com o processo contínuo da degradação dos lagos que as extensões foram diminuídas (Lago Melinda (3)). Por último, o ano de 2024, a urbanização expandiu-se por toda a ilha, incluindo regiões de dunas, provocando maior exposição do solo e degradação dessas formações. Por outro lado, houve recuperação parcial da vegetação densa, das zonas húmidas e reaparecimento das águas cristalinas.

Nota-se claramente que o banco submerso na região Norte da Ilha mantém-se presente até o ano de 2024, embora a sua extensão tenha sido modificada devido à acção dos agentes hidrodinâmicos, que

claramente tem afectado muito essa região de diversas formas, de tal maneira que parte considerável da duna frontal que esta ligada a esse banco submerso ao ser fragmento e inundado pelas marés acaba se tornando parte do mesmo banco submerso, como pode se verificar que na extremidade da duna parte da duna mostra-se em forma de banco submerso.

A figura 16 mostra claramente em questões expressivas e numerarias como cada classe aumentou e diminuiu ao longo dos últimos 34 anos como descrito na figura 21. Em 1990 a vegetação densa ocupava uma área de apenas  $2,4 \text{ Km}^2$  e a vegetação arbustiva como a maior classe apresentava  $11,8 \text{ Km}^2$  e as áreas restantes apresentavam valores abaixo de  $5 \text{ Km}^2$ . No ano 2000 a vegetação densa aumentou para mais de  $9,8 \text{ Km}^2$  e a vegetação arbustiva diminuiu para  $5,8 \text{ Km}^2$  e as restantes classes com valores inferiores a  $4 \text{ Km}^2$ . Nos anos seguintes ocorreu o processo de regeneração e degradação, sendo que no último ano analisado a vegetação densa ocupava apenas  $5 \text{ Km}^2$  e a vegetação arbustiva estava em alta por volta de  $9 \text{ Km}^2$ .



**Figura 17:** Ilustração da variação das principais áreas de conservação na Ilha de Benguerra (1990 a 2024).

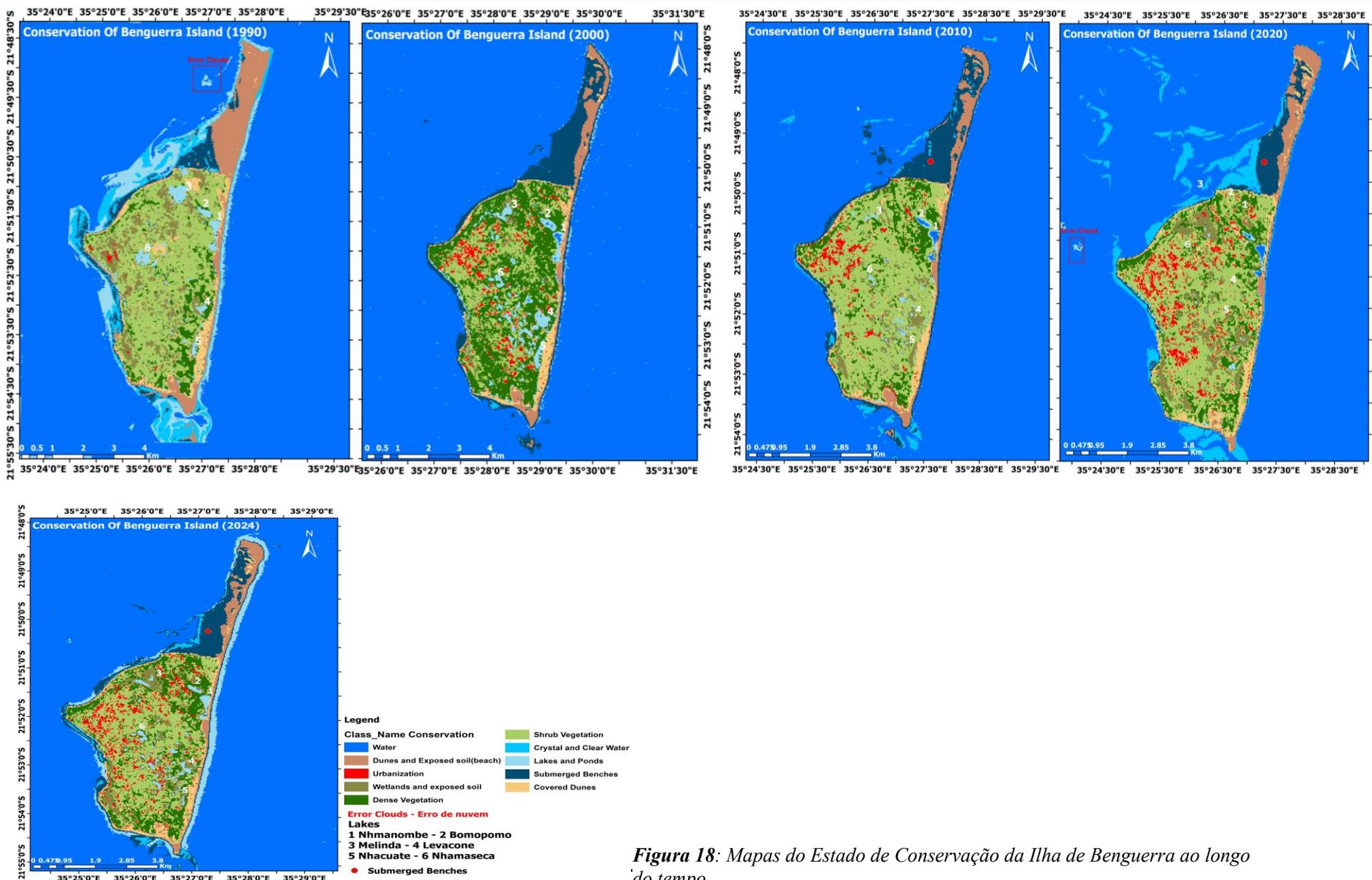


Figura 18: Mapas do Estado de Conservação da Ilha de Benguerra ao longo do tempo.

#### 4.2.1. Monitoramento e Evolução da Secção A (Norte) e Secção B (Sul) da Ilha

A avaliação das secções permite mostrar com clareza como essas áreas mais vulneráveis e activas foram sendo modificadas e conservadas ao longo desses 34 anos.

##### **Secção A (Norte da Ilha)**

A análise minuciosa dos mapas dessas regiões na figura 18, mostrou claramente que essas regiões estão em grande risco devido ao alto nível de degradação nas últimas 3 décadas. Em 1990 a secção era configurada principalmente por dunas activas que cobriam toda a extensão e um complô de águas cristalinas ao redor de bancos submersos que estão localizados pelo círculo vermelho com uma extensão na região Oeste, e na região costeira não havia nenhuma urbanização a vista, pois nesse período a ilha era pouco habitada. O cenário muda completamente após 10 anos, em 2000 a extensão do banco submerso aumentou mais de três vezes o seu tamanho e a duna exposta foi reduzida 1/3 do seu tamanho e ficou parte dela submersa, evidenciado assim uma degradação parcial da duna e diminuindo assim o seu estado natural de conservação. No mesmo ano verifica-se a formação de Dunas cobertas na extremidade leste e há indícios da urbanização na zona costeira que intensifica o processo de degradação das dunas juntamente com processos naturais. Em 2010 o processo de degradação continuou evidente e a extremidade da ilha foi fragmentada e erodida na região Leste que se nota uma formação de dois bancos submersos no interior da duna e as dunas cobertas foram destruídas devido à acção das ondas ou dos ventos. Entre 2020 e 2024 os processos de degradação da região continuaram sendo que em 2024 partes da duna que antes foram desprendidas desapareceram completamente e as águas cristalinas voltaram a ressurgir, assim como a urbanização aumentou significativamente.

##### **Secção B (Sul da Ilha)**

Na extremidade Sul da Ilha na figura 19, os processos dinâmicos actuaram de forma significativa e modificaram o estado natural da ilha de forma extrema. Em 1990 a região mostra claramente um banco de areia que serve como barreira para eventos extremos, a duna activa se apresentava com extensão significativa e as águas cristalinas se viam ao redor da ilha e assim como a vegetação arbustiva e densa. No ano de 2000 a situação da secção começa a mudar, a água cristalina desaparece em grande escala, a vegetação densa e a urbanização aumenta e um problema começa a surgir, o banco de areia fragmenta e parte do banco fica submerso diminuindo assim o seu papel de barreira. Em 2010 a duna frontal é modificada e diminuída drasticamente mostrando indícios de erosão e degradação, e o banco de areia se desloca e começa a desaparecer devido aos efeitos da dinâmica natural e da urbanização. Por fim, nos últimos 5 anos mostra-se claramente o desaparecimento do banco de areia que provavelmente tenha sofrido devido à acção das ondas ou dos ventos ou da

população e a alteração do formato da duna insular. Há aumento das águas cristalinas e dos bancos submersos principalmente no ano de 2024.

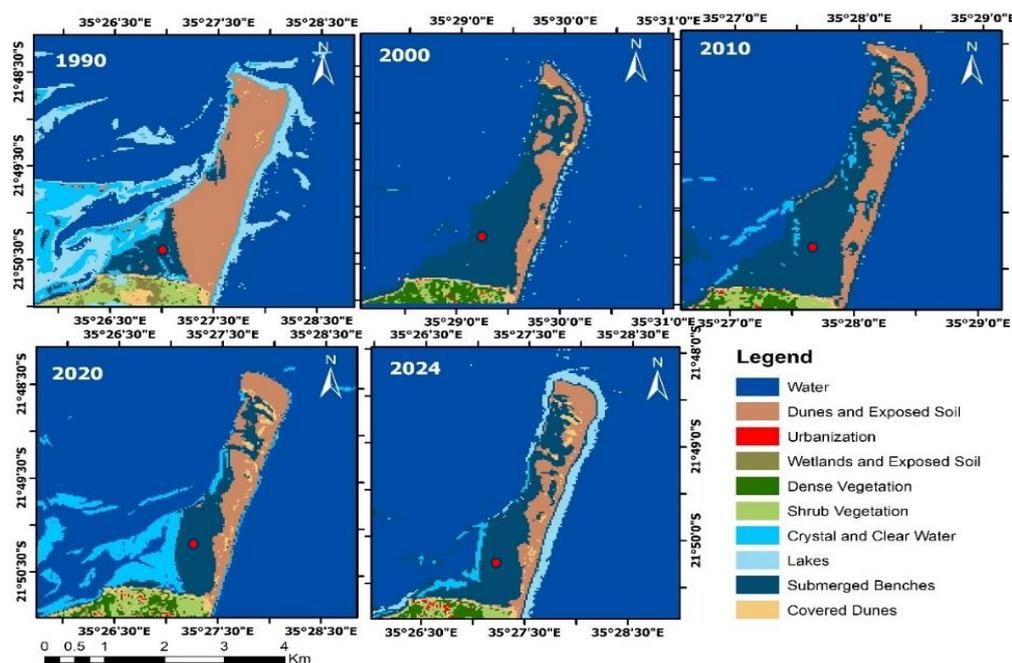


Figura 19: Mapas do Estado de Conservação da Secção A (Norte).

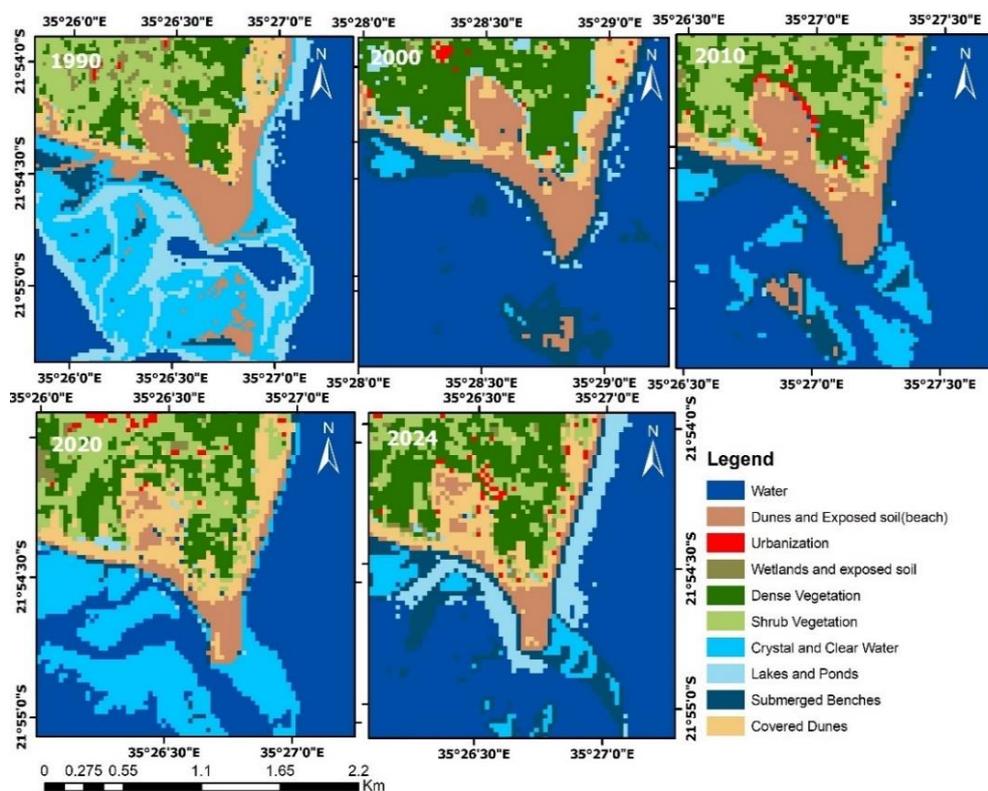


Figura 20: Mapas do Estado de Conservação na Secção B (Sul da Ilha).

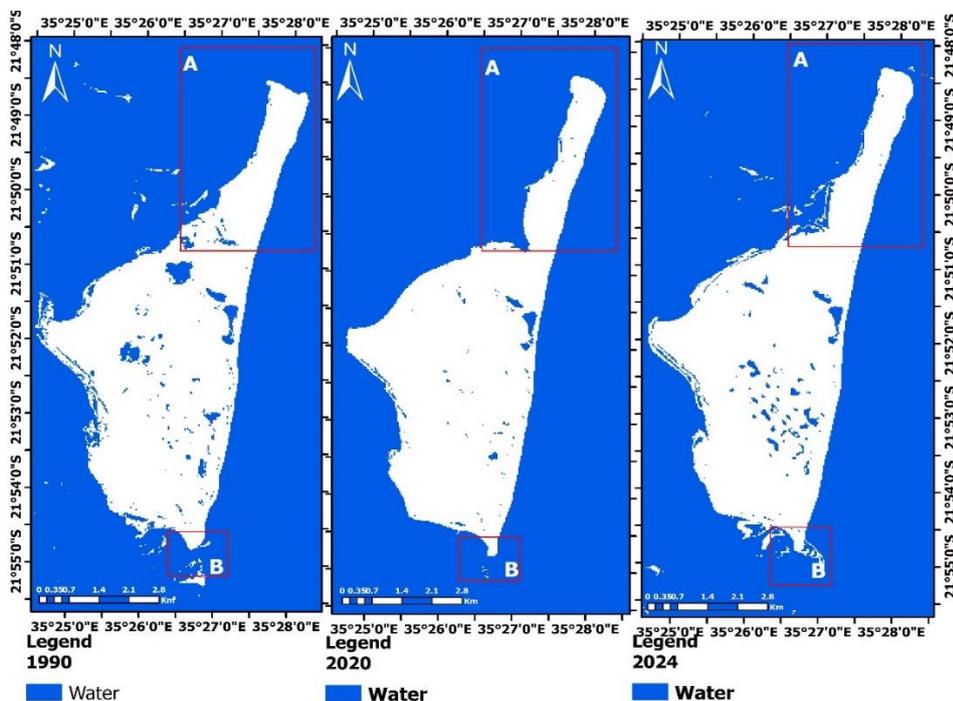
### 4.3. Erosão e Deposição na Ilha de Benguerra

Durante os últimos 34 anos a ilha apresentou diferentes períodos de erosão e deposição, no entanto, devido ao deslocamento da órbita das imagens foi possível verificar a incidência da erosão e deposição entre os anos de 1990-2020, 1990-2024 e 2020-2024.

Os mapas da figura 20, representam a porção total da água que existia nos anos de: 1990, 2020 e 2024, sendo que em 1990 a porção total da água era a mais baixa e era de aproximadamente 189,9  $Km^2$ , no ano de 2020 houve um aumento preferencial da água para 191,6  $Km^2$ , principalmente na região norte da ilha. Em 1990, observa-se uma linha de costa mais estável, com poucas áreas internas alagadas, sobretudo na Secção A (norte da Ilha) e B (sul da Ilha). A configuração demonstra um equilíbrio relativo entre terra e mar, com menor fragmentação da superfície exposta.

Em 2020, nota-se o avanço das áreas de água, principalmente na região A (extremo norte), onde ocorre uma maior intrusão marinha sobre áreas anteriormente emersas. Na região B (sul da Ilha), há evidências de retração da linha de costa, com substituição de superfície terrestre por áreas de inundação, sugerindo um processo ativo de erosão.

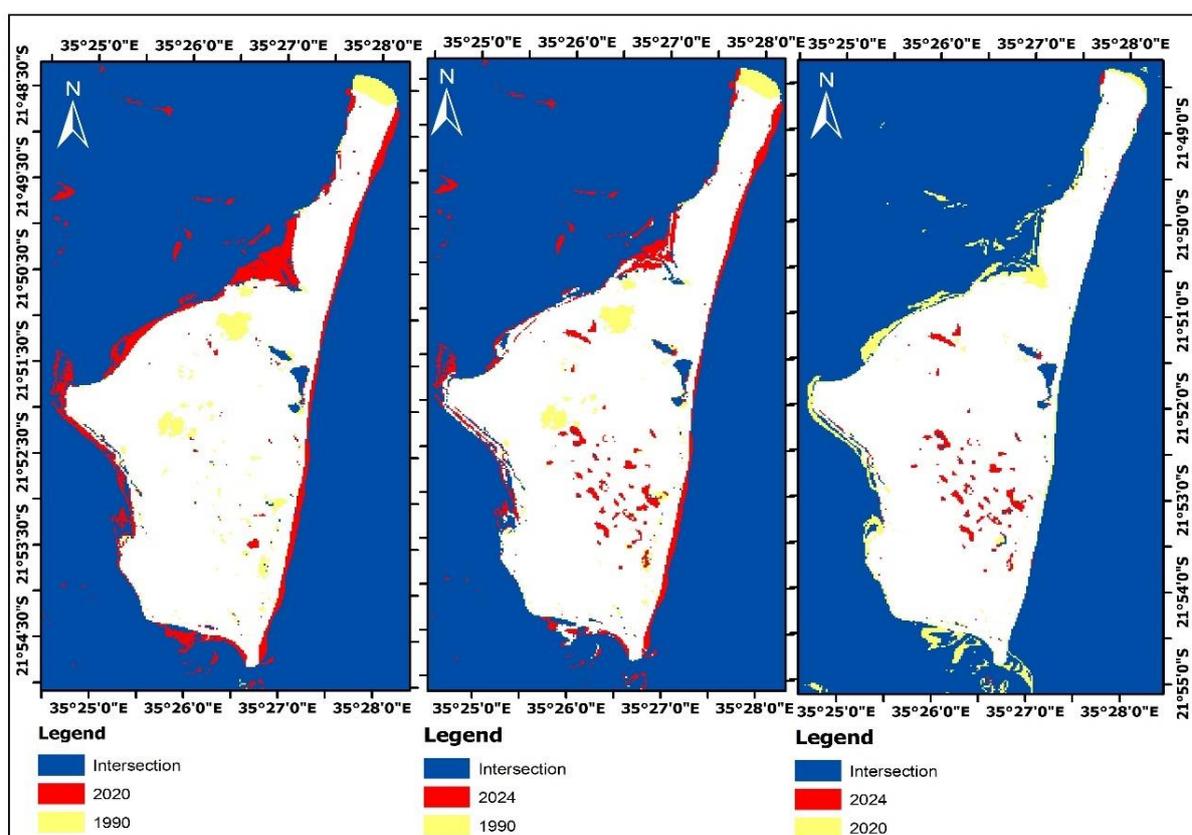
No cenário de 2024, a expansão das áreas submersas se intensifica, com maior fragmentação e surgimento de múltiplas lagoas e canais internos, tanto na região A como na B. Este padrão indica a continuidade dos processos erosivos e deposicionais, resultando numa reorganização da morfologia costeira, com a substituição progressiva de áreas terrestres por corpos hídricos internos.



**Figura 21:** Ilustração da porção da água em 1990 (esquerda), 2020 (centro) e 2024 (Direita).

A Figura 21, ilustra os mapas da erosão e a deposição em toda a ilha durante os últimos 34 anos. As áreas a vermelho representam locais de erosão, as áreas azuis são as regiões inalteradas e as áreas amarelas mostram a deposição. O mapa de 1990 a 2020 revela um processo de erosão contínuo e significativo na secção A (Norte da ilha) e na secção B (Sul da ilha), com maior destaque para as regiões costeiras onde o processo foi muito notório principalmente na faixa Este e Sul. De 1990 a 2024, a tendência de erosão se acentua, com uma expansão das áreas erodidas, especialmente no litoral nordeste e sudeste. O desaparecimento de algumas formações ou faixas de terra ao longo da costa confirma o avanço do mar sobre o território insular. A área central da ilha mostra novas regiões erodidas ao longo dos lagos, o que pode indicar fragilidade no interior da ilha, talvez zonas húmidas ou áreas degradadas pela ação humana. Embora a erosão tenha sido acentuada em toda a extensão da ilha nesse período, ocorreu o processo de deposição na região norte, principalmente na secção A (Norte da Ilha) em particular.

Embora em menor escala, no período mais recente (2020 a 2024), a erosão continua ativa neste intervalo. As áreas que representam a erosão estão mais pontuais, mas ainda concentradas no litoral leste e sul. Isso pode refletir uma redução no ritmo de erosão em certas partes da ilha, mas também mostra que a estabilidade da linha de costa ainda não foi alcançada.



**Figura 22:** Mapas de Locais de Incidência da Erosão e Deposição entre 1990-2000, 1990-2024 e 2020-2024.

#### 4.3.1. Monitoramento da Erosão nas Secções A (Norte da Ilha) e B (Sul da Ilha)

As Figuras 22 e 23 apresentadas ilustram a dinâmica de erosão e deposição na Ilha de Benguerra, destacando duas áreas críticas: a Secção A (Norte da Ilha) na figura 18 e a Secção B (Sul da Ilha) na figura 19. Essas áreas foram selecionadas devido às modificações geomorfológicas expressivas observadas ao longo dos últimos 34 anos, o que justifica o monitoramento detalhado da evolução costeira.

##### **Secção A – Norte da Ilha**

Na região Norte da Ilha (Secção A) na figura 18, observa-se que entre 1990 e 2020 ocorreu uma erosão significativa na porção Leste, resultando na redução da superfície terrestre e no recuo da linha de costa. A erosão também foi registrada no setor Oeste, embora em menor intensidade, evidenciando o avanço do mar. Em contrapartida, verifica-se um processo de deposição na extremidade da ilha, marcado pela expansão de sedimentos (em amarelo).

No intervalo 1990–2024, a erosão intensifica-se sobretudo no setor Leste, com maior avanço do mar sobre o continente. Parte da área anteriormente depositada foi erodida, embora também tenha ocorrido deposição adicional em setores pontuais. No período mais recente (2020–2024), a erosão manteve-se, mas em menor escala, enquanto a deposição tornou-se mais expressiva sobre os bancos submersos do setor Oeste.

##### **Secção B – Sul da Ilha**

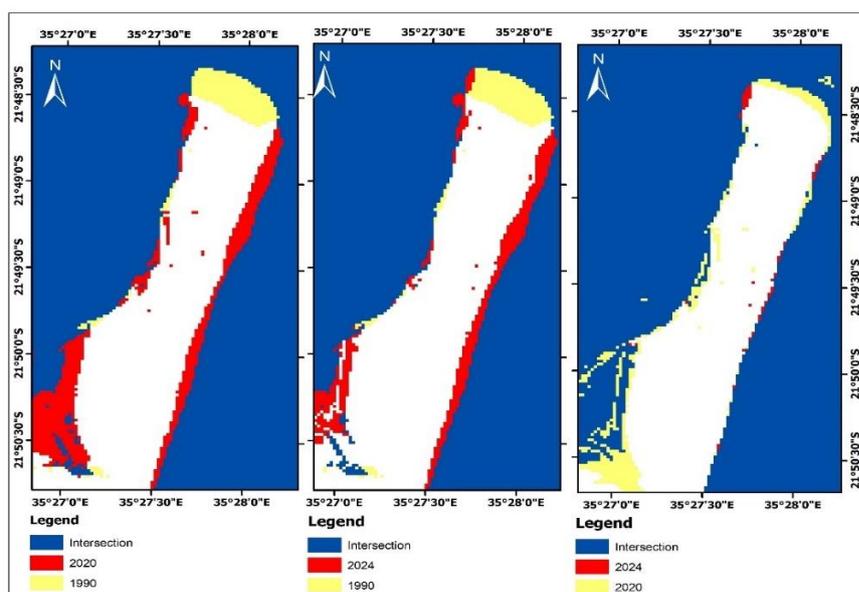
Na Secção B (Sul da Ilha), figura 19, o processo erosivo foi ainda mais marcante. Entre 1990 a 2020, registraram-se níveis elevados de erosão, resultando em alterações significativas no formato da ilha. A duna insular sofreu degradação considerável, tanto no setor Leste quanto no Oeste, modificando a configuração geomorfológica e tornando a extremidade da ilha mais estreita e alongada.

No período 1990 a 2024, a erosão continuou presente, mas com redução na taxa nas extremidades. Contudo, surgiram indícios de erosão interna, sobretudo nas áreas lagunares, onde os lagos e lagoas foram parcialmente afetados. Nesse mesmo intervalo, ocorreu deposição na região central, embora em escala limitada, já que mais de 80% da secção apresenta evidências predominantes de erosão.

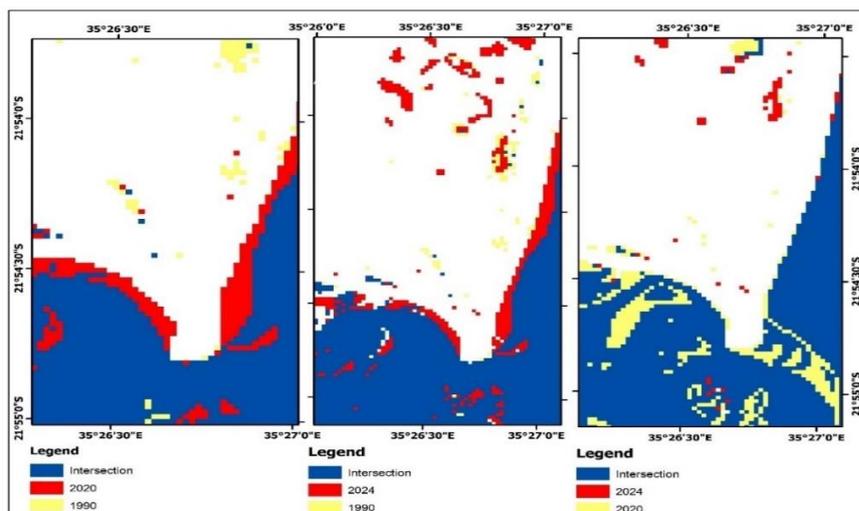
Entre 2020 a 2024, a extremidade Sul mostrou menor intensidade erosiva, mas manteve pontos críticos junto às lagoas e zonas marinhas adjacentes. A deposição tornou-se o processo mais relevante nesse período, com incremento de sedimentos nas lagoas e formação de bancos submersos nas proximidades da ilha.

## Comparação entre Secções

De forma geral, tanto na Secção A (Norte da Ilha) figura 18 quanto na Secção B (Sul da Ilha) figura 19, a erosão foi o processo dominante nos primeiros 30 anos (1990–2020). Estimativas inferem que, na Secção A, a taxa de erosão atingiu cerca de 3 m/ano, reduzindo para aproximadamente 2 m/ano no período 1990 a 2024, e equilibrando-se com a deposição nos últimos 4 anos. Já na Secção B, a erosão média foi de cerca de 4m/ano nas três primeiras décadas, diminuindo ligeiramente até 2,5 m/ano em 2024. Nos anos mais recentes, a deposição passou a ser o processo predominante, superando a erosão e indicando um potencial de estabilização costeira, verificando-se uma deposição total de 2,7 metros.



**Figura 23:** Mapas de Incidência da Erosão e Deposição na Secção A (Norte da Ilha).

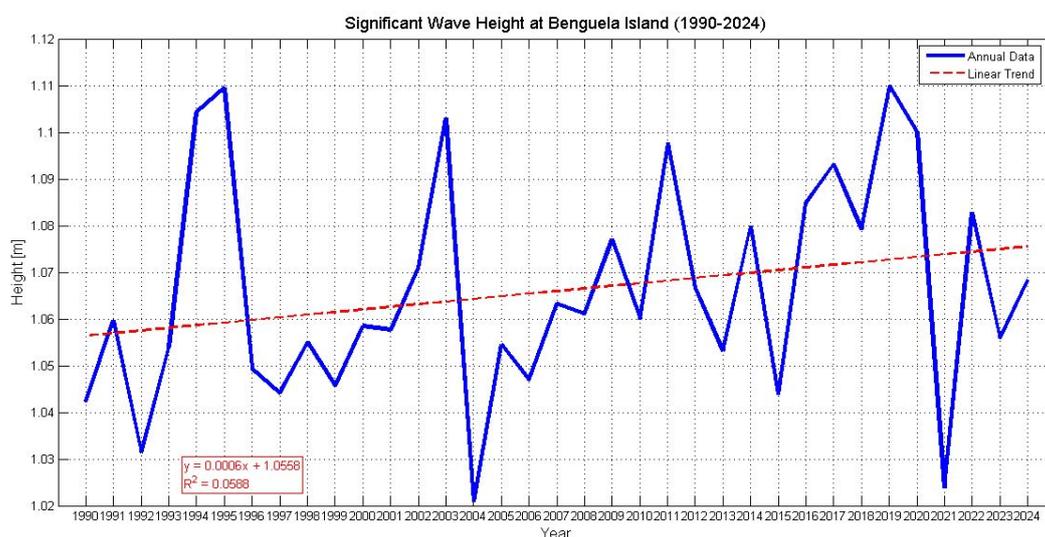


**Figura 24:** Mapas de Locais de Incidência da Erosão e Deposição na Secção B (Sul da Ilha).

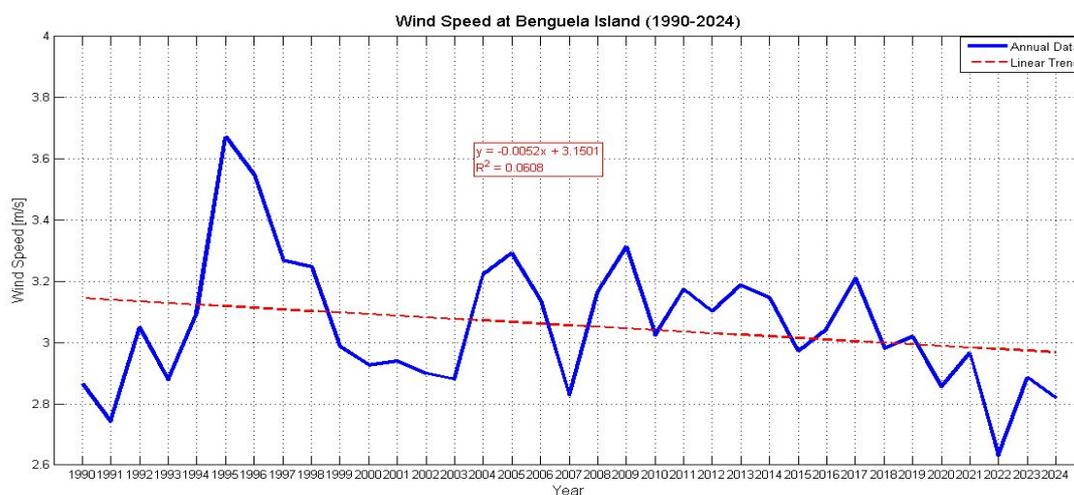
#### 4.4. Altura Significativa da Onda e Regime dos Ventos na Ilha de Benguerra

A figura 24, ilustra a variabilidade da altura significativa da onda na ilha de Benguerra nos últimos 34 anos foi relativamente pouco distinta em anos singulares. Em 1990, a altura significativa da onda era de aproximadamente 1,04 metros de altura, e nos anos subsequentes a altura foi variando em função da energia que as mesmas possuíam, como o esperado, a altura das ondas foi aumentando nos anos seguintes indicando aumento da energia local. Em 2000 a altura era de aproximadamente 1,058 metros, e a tendência da altura era de crescer e no ano do desaparecimento do banco (2020) na secção sul era de 1,10 metros.

A figura 25 apresenta a serie temporal da velocidade do vento na região da Ilha de Benguerra em m/s. A tendência da velocidade dos ventos foi de diminuir ao longo do tempo, em 1990 a velocidade era de 2,83 m/s e em 2000 a velocidade aumentou para 2,90 m/s e nos anos seguintes foi variando tanto que em 2010 aumentou para 3,03 m/s e em 2020 baixou para 2,81 m/s.



**Figura 25:** Altura Significativa da Onda na Ilha de Benguerra (1990-2024)



**Figura 26:** Series temporais da velocidade do vento na Ilha de Benguerra (1990-2024)

#### 4.5. Simulação de Cenários Futuros na Ilha de Benguerra

As simulações realizadas com o modelo SLAMM para a Ilha de Benguerra, considerando os cenários SSP1, SSP2 e SSP5, apontam para transformações significativas nos ecossistemas costeiros em função da elevação do nível do mar ao longo do século XXI. De maneira geral, observa-se um processo contínuo de retração das praias e dunas, conversão de zonas de transição em áreas inundadas e expansão progressiva do oceano sobre o interior insular, revelando elevada vulnerabilidade da ilha frente à subida do nível do mar. O ano de 2024 representa o ano de entrada e geralmente deve estar associado aos resultados para a melhor visibilidade e comparação evidente.

No cenário SSP1- Otimista (Figura 26), que representa uma trajetória mais otimista, as alterações até 2030 são pouco expressivas. Contudo, já em 2050 ocorre a conversão localizada de praias e dunas, e em 2100, sob elevação de aproximadamente 0,48 m, nota-se retração mais acentuada da faixa costeira. Embora porções consideráveis do interior permaneçam preservadas, há perdas significativas de zonas húmidas e praias oceânicas.

O cenário SSP2- Moderado projeta impactos mais intensos e acelerados. Para o 2050, com elevação de cerca de 0,23 m, observa-se perda considerável de bancos e retração das dunas, especialmente no setor norte da ilha. Em 2100, com aumento de 0,61 m, o oceano avança de forma expressiva sobre o território, provocando fragmentação da paisagem costeira e redução drástica dos habitats de transição.

Por sua vez, a figura 27 ilustra o cenário SSP5, de maior pressão climática, apresenta os efeitos mais severos. Em 2050, sob elevação de 0,26 m, já se nota forte expansão das áreas marinhas em direção ao interior e conversão acelerada das zonas húmidas. Até 2100, diante de uma elevação de 0,83 m, ocorre a submersão extensa da faixa costeira, com perda quase total de praias e dunas e a permanência apenas de áreas terrestres reduzidas e descontínuas, verifica-se um ponto crítico: o oceano rompe a barreira costeira e passa a conectar-se ao Lago Nhanombe (1), caracterizando invasão marinha e provável salinização do corpo de água (formação de uma enseada/laguna aberta), com implicações diretas para o regime hídrico e a integridade das zonas húmidas adjacentes.

As figuras 28 e 29 ilustram as áreas para cada ano em diferentes cenários. Fica claro que em todos os cenários ocorreu a diminuição de todas as áreas, sendo que em 2030 para todos os cenários apresentavam valores iguais para todas as classes com exceção do Ocean beach que apresentava valores menores para o SSP5 com menos de 1,5 Km<sup>2</sup>. Em 2050 e 2100 a classe de Developed Dry Land manteve-se intacta e Undeveloped Dry Land só variou em 2100 no cenário pessimista para 10,01 Km<sup>2</sup>. As restantes classes também variaram, Inland Fresh Marsh aumentou simplesmente para o cenário pessimista.

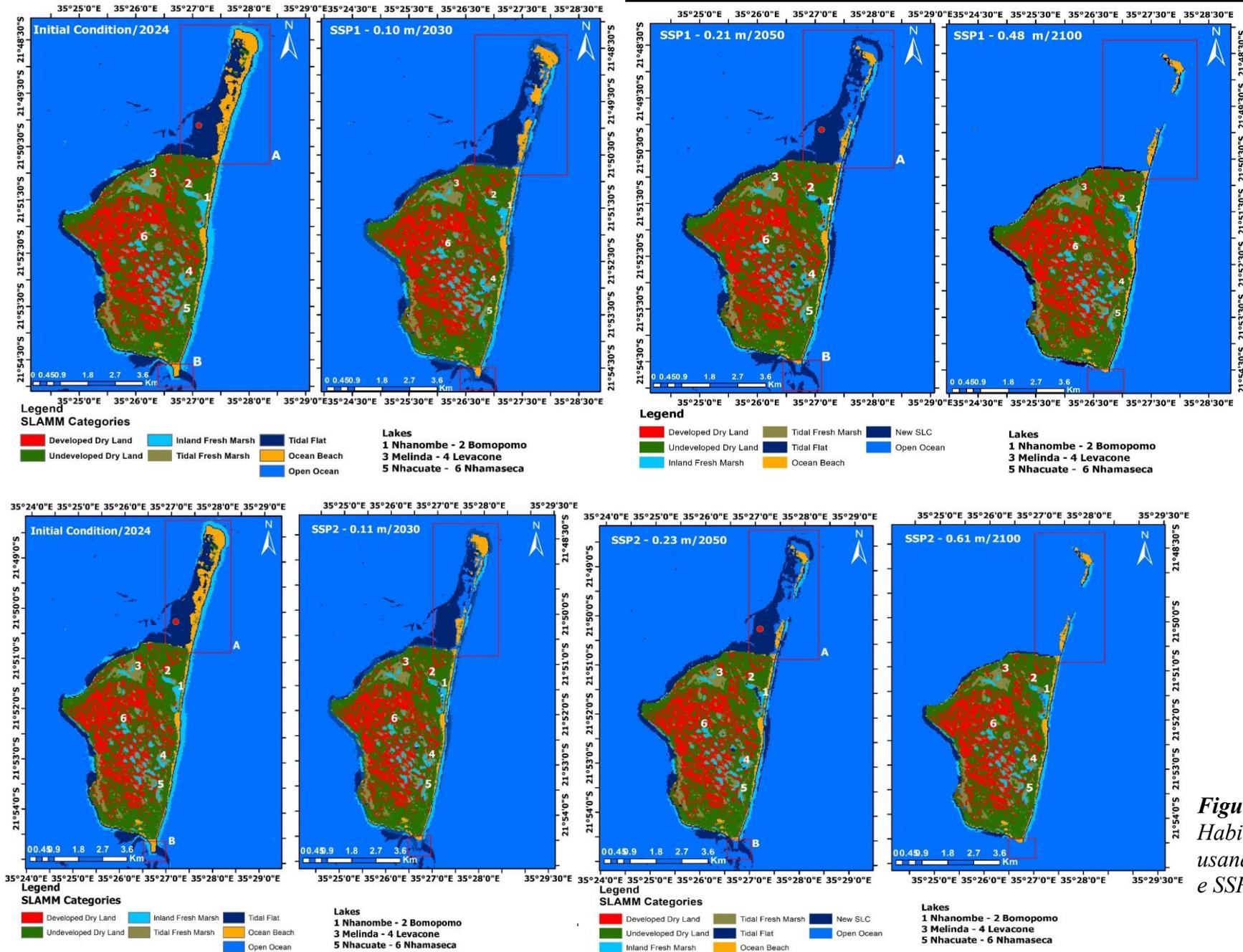


Figura 27: Distribuição dos Habitats na Ilha de Benguerra usando os cenários SSP1 (Topo) e SSP2(Fundo) até 2100.

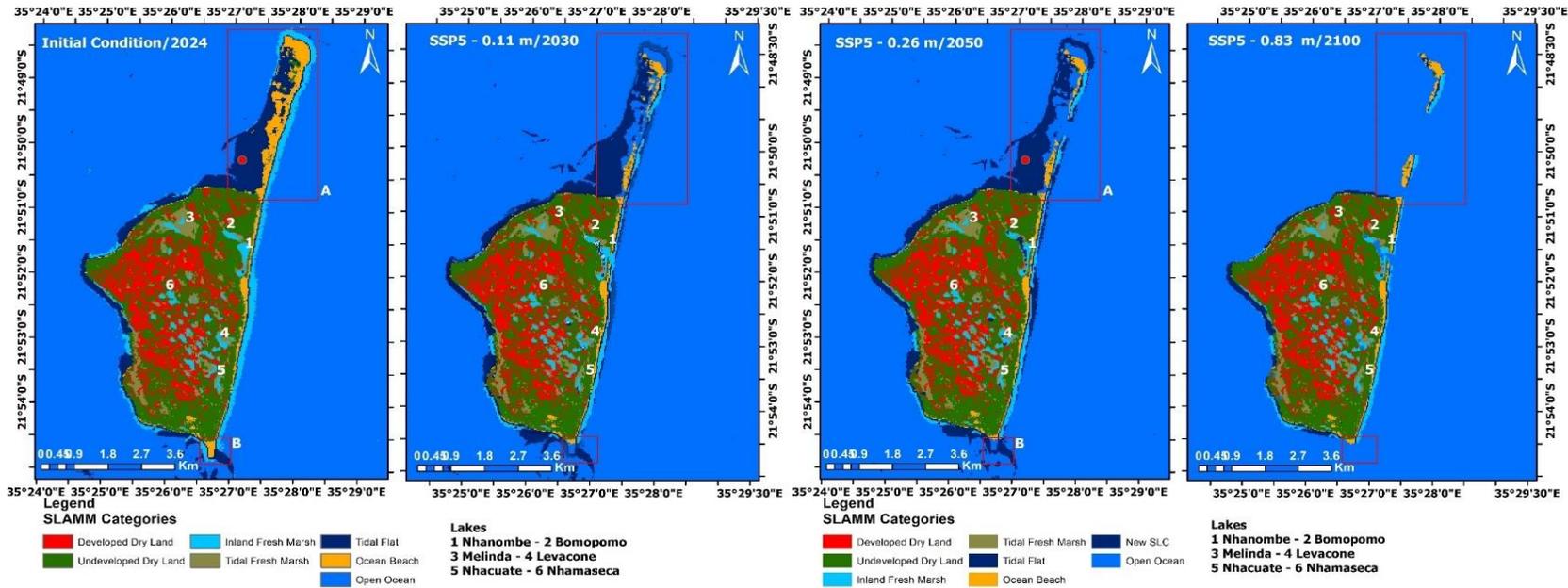


Figura 28: Distribuição dos Habitats na Ilha de Benguerra usando o cenário SSP5 até 2100.

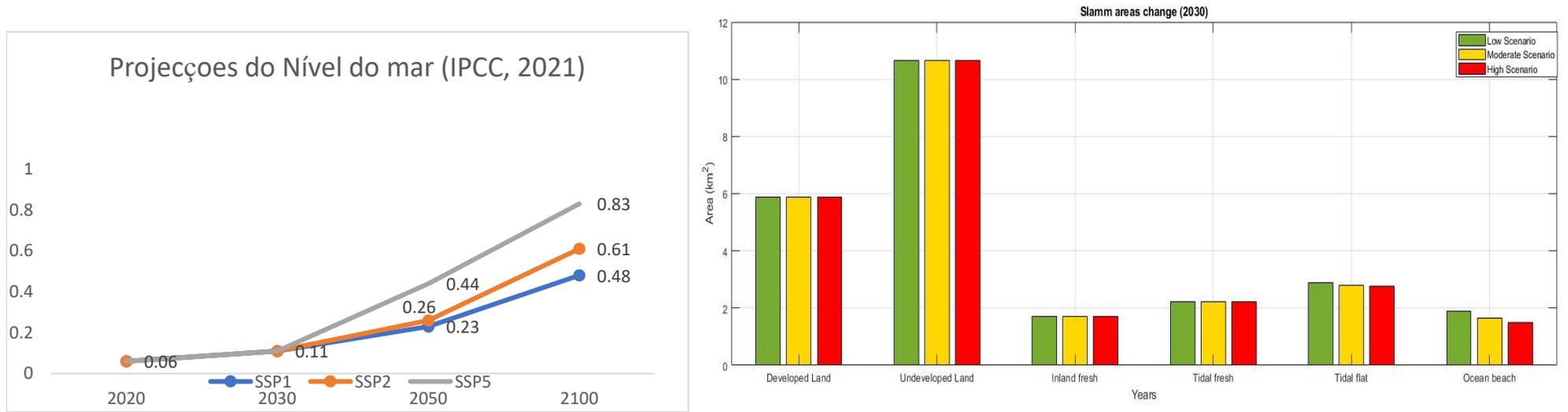


Figura 29 :Projeção dos diferentes cenários do aumento do nível do mar (IPCC, 2021) e áreas de mudanças do modelo para 2030.

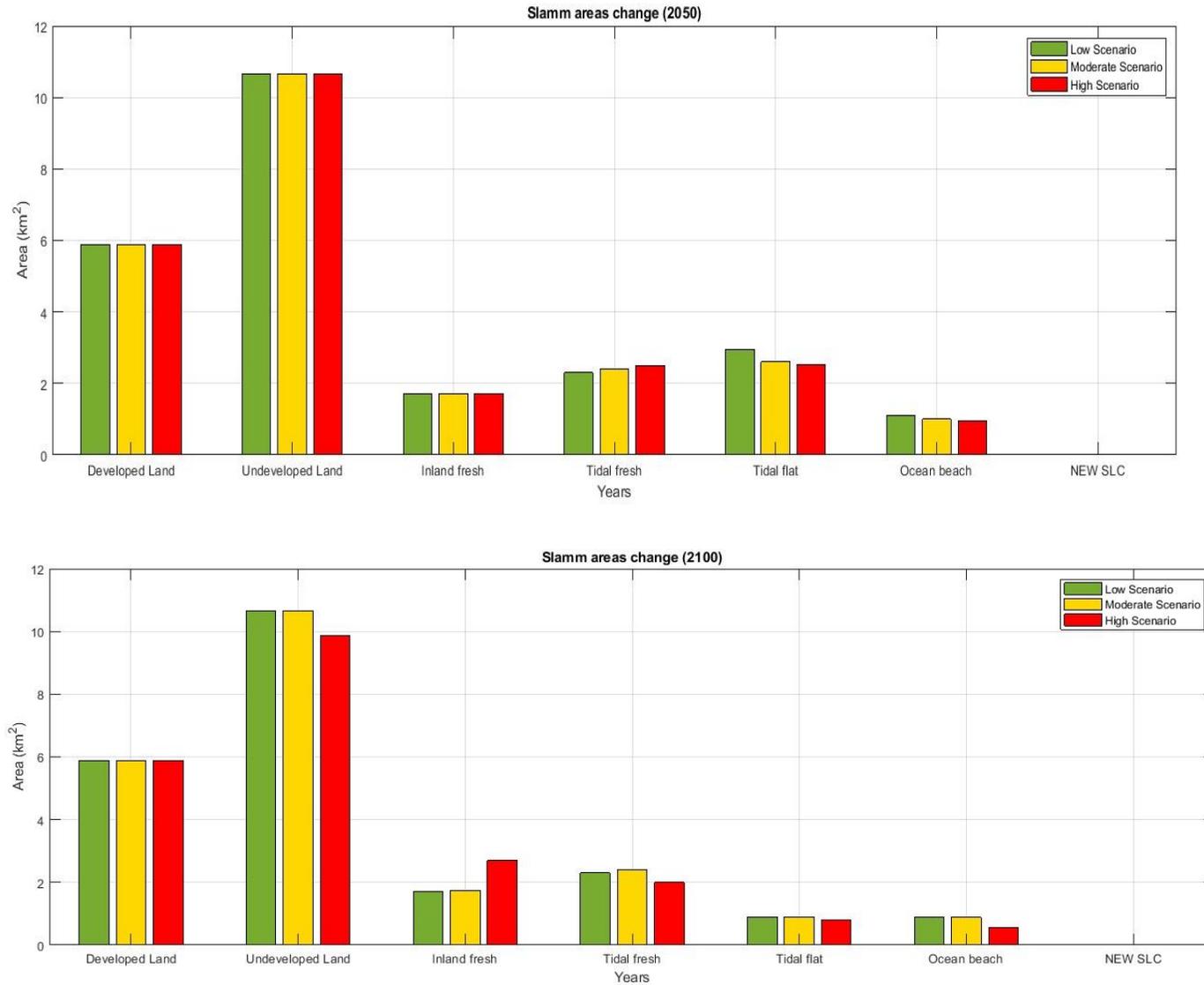


Figura 30: Mudança das classes do SLAMM para 2050 e 2100.

#### 4.5.1. Avaliação das Secções A (Norte) e B (Sul) face aos cenários

##### Secção A (Norte da Ilha)

Na Seção A (Norte) correspondente a figura 30, a configuração inicial (2024) mostra um cordão litorâneo contínuo, caracterizado por uma faixa de praia bem definida e áreas interiores de terra seca não desenvolvida. Ao longo do SSP1, os impactos manifestam-se de forma gradual, com estreitamento da faixa de praia já em 2030, progressiva retração da linha de costa em 2050 e compressão mais acentuada até 2100, embora parte da configuração original ainda se mantenha. No cenário SSP2-figura 32, entretanto, a resposta é mais intensa: em 2030 já se observa erosão visível da linha de costa, que em 2050 se traduz na conversão de áreas baixas em oceano. Em 2100, ocorre a fragmentação do cordão litorâneo, com perda substancial de terras secas. O cenário mais severo, ilustrado na figura 34, SSP5, acelera drasticamente esses processos: em 2030 a praia sofre forte estreitamento, em 2050 boa parte da planície costeira já está submersa, e em 2100 observa-se um colapso quase total do setor, marcado pela invasão oceânica do Lago 1, que passa a funcionar como corpo marinho conectado ao oceano. Esse resultado evidencia a alta vulnerabilidade do Norte, onde o avanço do mar compromete tanto a barreira costeira quanto o ambiente interior.

##### Secção B (Sul)

A configuração inicial (2024) apresenta uma faixa costeira larga e contínua, também dominada por praias oceânicas e extensas áreas interiores de terra seca. A figura 31 ilustra o SSP1 que é o cenário mais optimista indica alterações discretas: em 2030 há apenas leve recuo da linha de costa, em 2050 observa-se compressão da faixa costeira, e em 2100 a erosão se torna mais evidente, embora sem provocar rupturas estruturais. Já na figura 33 que ilustra o cenário SSP2 intensifica as mudanças, com recuo significativo já em 2030, substituição de áreas baixas por oceano em 2050 e, em 2100, a redução drástica da praia, acompanhada de fragmentação da borda costeira. O SSP5 na figura 35, por sua vez, acentua ainda mais a submersão: em 2030 ocorre retração pronunciada, em 2050 parte das planícies costeiras é rapidamente engolida pelo mar, e em 2100 verifica-se submersão generalizada, restando apenas fragmentos isolados de terra seca. Apesar disso, diferentemente do Norte, o Sul não apresenta ruptura abrupta da barreira litorânea nem conexão direta de lagos interiores com o mar, revelando maior resiliência relativa frente à elevação do nível do mar.

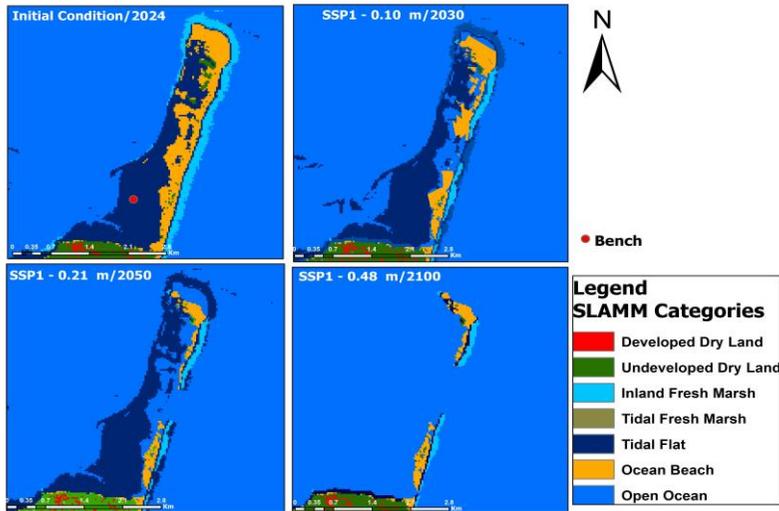


Figura 31: Evolução da Secção B (Sul) sob o Cenário SSP1.

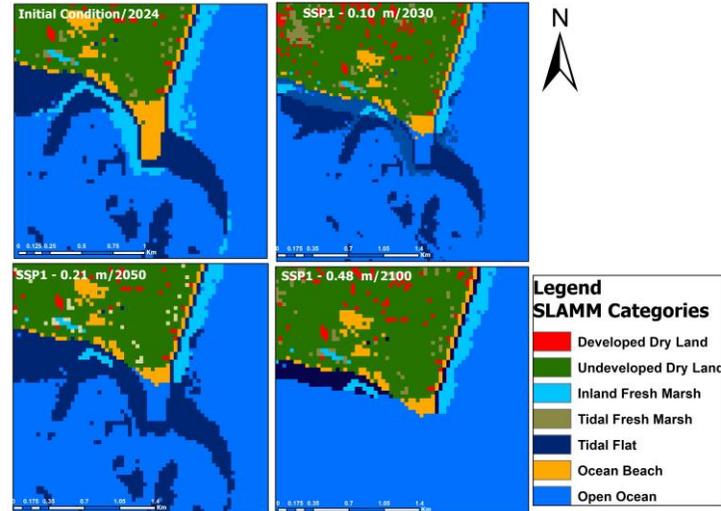


Figura 32: Evolução da Secção A (Norte) sob o Cenário SSP1

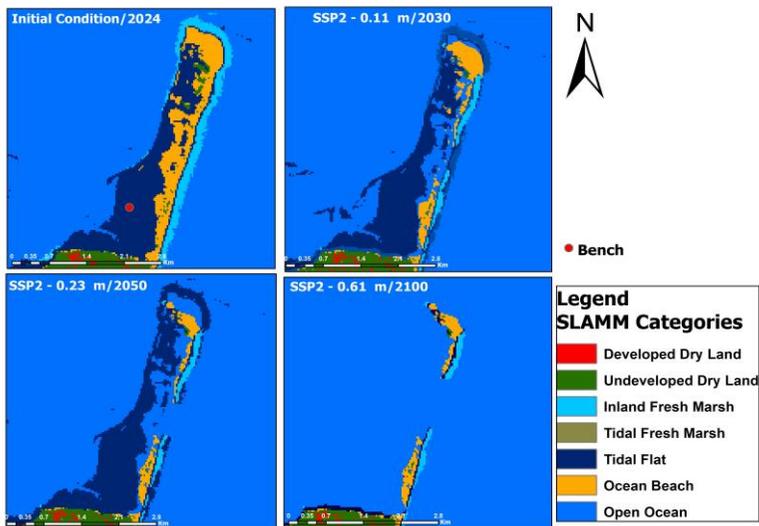


Figura 33: Evolução da Secção B (Sul) sob o Cenário SSP2.

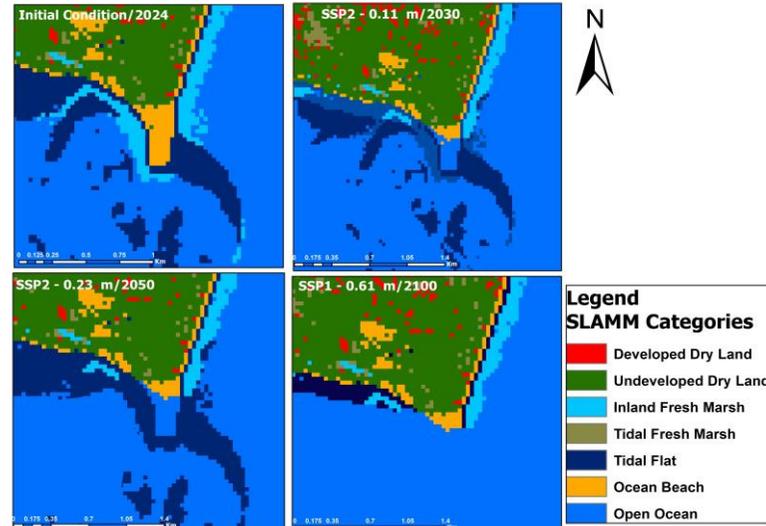


Figura 34: Evolução da Secção A (Norte) sob o Cenário SSP2.

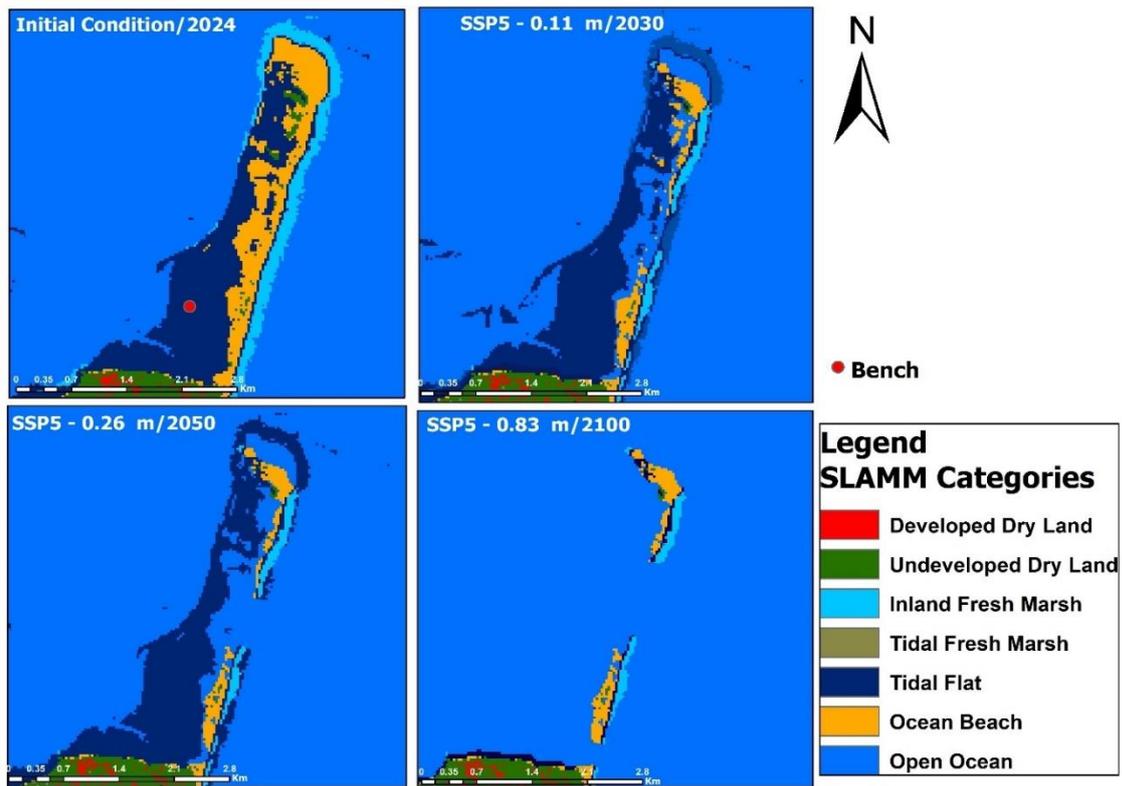


Figura 35: Evolução da Secção A (Norte) sob o Cenário SSP5.

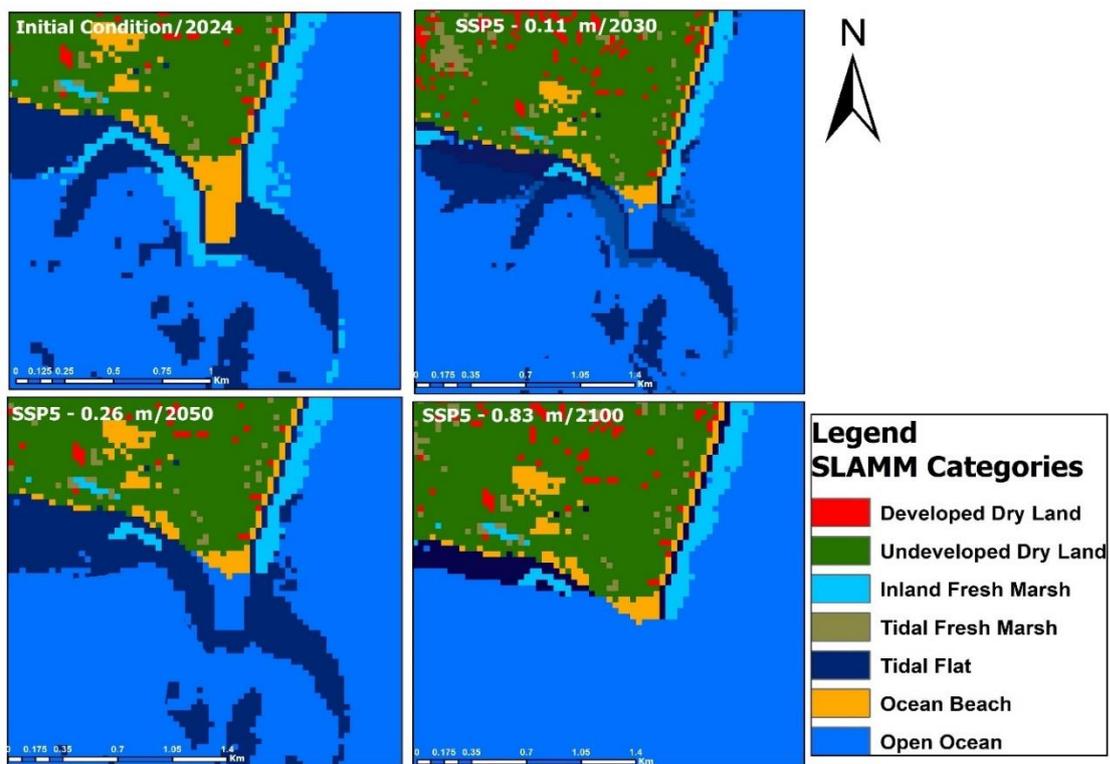


Figura 36: Evolução da Secção B (Sul) sob o Cenário SSP5.

## 5. Discussão

### 5.1. Uso Clássico e Cobertura do solo (Dinâmica)

As análises feitas da dinâmica da cobertura da Ilha de Benguerra nos últimos 34 anos entre 1990 e 2024 revelam um sistema em constante transformação, marcado por ciclos de regeneração parcial e processos de degradação, fortemente condicionados pela interação entre fatores naturais e pressões antrópicas. Na primeira década entre 1990 a 2000 mostrou-se um ciclo de regeneração evidenciado pelo aumento da vegetação densa no ano 2000 mesmo com as variações ambientais, tendência semelhante à registrada por Fatoyinbo (2008), na Ilha da Inhaca, onde a vegetação de mangais saudáveis aumentaram no período de 1991 a 2001, mesmo em meio a pressões ambientais. Posteriormente nas décadas seguintes viu-se um potencial aumento do solo exposto no interior e nas laterais da ilha de Benguerra como resultado do aumento populacional, que causa pressão sobre os recursos. Contudo, a partir de 2010 observou-se retração significativa dessa cobertura para a metade e acompanhada do aumento do solo exposto que passa a cobrir toda a região costeira, regiões centrais e a redor dos lagos. De 2020 a 2024 as áreas expostas aumentaram significativamente na região dando mais evidências dessa degradação, fruto do aumento populacional que ao fazer uso do solo para as suas necessidades e actividades causa degradação da vegetação nativa densa e arbustiva. Este comportamento foi também verificado por Massangale (2019), que ao fazer estudo na zona costeira de Mecúfi entre 2001 e 2018 verificou uma ampliação progressiva nas áreas expostas ao longo da zona costeira de Mecúfi nos últimos anos, aumentando assim a sua vulnerabilidade. O pico de solo exposto registrado em 2020 (37,9%) reforça essa tendência de vulnerabilização, especialmente porque a perda de cobertura vegetal densa compromete a estabilidade das dunas e aumenta a suscetibilidade à erosão. Estudos internacionais apontam consequências semelhantes: em ilhas-barreira da Flórida, Gesch (2009) e Craft et al. (2009), relataram que a substituição de vegetação densa por formações mais abertas acelera processos erosivos e reduz a capacidade de retenção sedimentar. A convergência entre esses resultados sugere que a ilha não apenas sofre com pressões locais, mas também responde a eventos globais semelhantes, como o aumento da energia de ondas e a intensificação de eventos extremos.

A análise da Incidência entre a erosão e a deposição na Ilha de Benguerra mostrou que a incidência da erosão é maior. No primeiro período estudado, entre 1990 a 2020 constatou-se que a ilha perdeu parte considerável das extremidades Sul, Norte, Leste e Oeste, como resultado da pressão dessas regiões pela urbanização e os eventos extremos cada vez mais intensos. (Björnberg e Wahlström, 2012) defendem que apesar dos processos hidrodinâmicos, variações nas taxas de transporte de sedimentos e frequência de eventos de tempestades, a influência antropogénica contribui para um aumento da erosão na linha de costa nas praias. No período posteriormente estudado (1990 a 2024),

mostrou alguma intensidade de erosão ate nas regiões interiores da ilha e arredores dos lagos. Em todos os períodos estudados as secções mostraram um comportamento similar em âmbitos de erosão, na secção A (Norte da Ilha) a erosão foi o factor dominante e a deposição foi simplesmente verificada na extremidade com apenas 2m de deposição em 30 anos. Cenário similar ocorreu na secção B (Sul da Ilha) que ao longo dos 34 anos grande parte da Duna frontal protectora desapareceu significativamente devido a acção dos ventos, acção das ondas e das pressões da região costeira com as construções de hotéis e casas para o turismo. Estudos revelam que as áreas expostas a ondas, marés, ventos e tempestades como ilhas tendem a sofrer erosão por esses processos. Comportamento similar foi verificado por Pacule (2023), que ao estudar a incidência da erosão e deposição na Baía de Maputo entre 1991 e 2022 constatou que a incidência de erosão na baía é maior que a de deposição e a erosão provocada por processos naturais é comumente agravada por ações antropogénicas, o aumento das taxas de erosão é tipicamente observado em áreas influenciadas pela atividade humana, como Costa de Sol, a Península de Macaneta, Inhaca que são pontos turísticos estratégicos (Palalane, et al., 2016).

## **5.2.Estado De Conservação da Ilha de Benguerra**

A análise do estado de conservação da Ilha de Benguerra entre 1990 a 2024 revela um sistema insular em progressiva transformação, marcado pela perda de integridade dos ecossistemas naturais e pela intensificação da pressão antrópica. Em 1990, a ilha apresentava uma configuração próxima ao equilíbrio: a vegetação arbustiva dominava o interior, a vegetação densa mantinha-se estável no setor leste, os lagos exibiam limites bem definidos e os bancos sedimentares (submerso a norte e arenoso a sul) atuavam como barreiras de proteção. Esse quadro inicial é semelhante ao descrito por Pereira e Nascimento (2016) para a Ilha da Inhaca durante o período de 1991, onde a cobertura vegetal e os lagos mantinham-se relativamente estáveis até o início da intensificação do uso humano.

A partir de 2000, observa-se uma transição. A expansão da urbanização passou a pressionar a vegetação natural, ao mesmo tempo em que a vegetação densa apresentava sinais de regeneração. Esse padrão de compensação entre perda arbustiva e recuperação de áreas densas foi também identificado em outros sistemas costeiros, como os mangais de Inhaca (Fatoyinbo, 2008). O aumento da extensão das lagoas até 2000 reforça o papel hidrológico da ilha na manutenção de zonas húmidas, confirmando a importância de pequenos lagos interiores, como documentado por Neukermans e Koedam (2014) em Maputo Bay.

A década de 2010 marca o início da degradação mais evidente: o ressecamento quase completo do lago Nhacuate e a redução drástica do lago Levacone refletem a vulnerabilidade hídrica insular. Fenômenos semelhantes de contração e transformação de lagoas foram observados em sistemas costeiros tropicais, descritos por Alongi (2008), que destacou como a redução da disponibilidade

hídrica e a alteração nos regimes hidrológicos podem comprometer a resiliência ecológica de ecossistemas aquáticos costeiros, resultando em perda de biodiversidade e aumento da fragilidade frente às mudanças climáticas. Adicionalmente, a degradação das dunas no setor norte é consistente com os achados de Armitage et al. (2006) sobre a fragilidade de ilhas-barreira moçambicanas, em que dunas e bancos sofrem reconfiguração acelerada em resposta a variações hidrodinâmicas.

Em 2020, a situação se agravou com a urbanização expandindo-se inclusive sobre dunas vegetadas, reduzindo ainda mais a resiliência do sistema. O desaparecimento do banco arenoso no Sul é particularmente crítico, pois representa a perda de uma barreira natural de dissipação de energia das ondas. A literatura demonstra que bancos arenosos são altamente vulneráveis à ação de ondas e tempestades (Dyer e Huntley, 1999), e seu desaparecimento em Benguerra sugere que a ilha está mais exposta à erosão e à intrusão marinha, apresentando padrões similares aos observados em Macaneta e em ilhas tropicais internacionais (Barbier et al., 2011).

Em 2024, verifica-se uma recuperação parcial da vegetação densa e das zonas húmidas, mas a pressão urbana manteve-se elevada e distribuída por toda a ilha, inclusive sobre dunas cobertas. O banco submerso no Norte persistiu, embora com alterações em sua extensão, confirmando sua resiliência relativa frente à ação hidrodinâmica.

A análise seccional apresentada neste trabalho, mostra de forma minuciosa as transformações geomorfológicas que a Ilha de Benguerra sofreu ao longo dos últimos 34 anos. A Secção A (Norte da Ilha) apresentou perda progressiva de dunas expostas e fragmentação em novos bancos submersos, intensificada pela ação das ondas e pelo crescimento urbano. Para a Secção B (Sul da Ilha) sofreu impactos mais severos, com o desaparecimento completo do banco arenoso devido a ação das ondas e dos ventos e retração das dunas frontais, processos diretamente associados à energia das ondas e à instabilidade sedimentar. Esta comparação evidencia que, embora ambas as secções apresentem degradação, a região sul encontra-se em estado crítico, pois perdeu definitivamente uma de suas principais barreiras naturais.

### **5.3. Simulação de Cenários Futuros**

Este trabalho constitui a primeira aplicação do modelo SLAMM em Moçambique e uma das pioneiras em África, oferecendo um diagnóstico robusto das potenciais respostas da Ilha de Benguerra à subida do nível do mar.

As simulações realizadas com o modelo SLAMM para a Ilha de Benguerra evidenciam um quadro de alta vulnerabilidade costeira frente à elevação do nível do mar, confirmando padrões já reportados em outros contextos insulares e estuarinos. De forma geral, observa-se a retração progressiva das praias e dunas, a conversão de zonas húmidas em áreas inundadas e a expansão do oceano sobre o

interior insular, fenômenos compatíveis com a literatura que descreve os impactos da subida do nível do mar em ecossistemas costeiros tropicais (Alongi, 2008; Barbier et al., 2011).

### **SSP1 – Cenário otimista**

O cenário SSP1, associado a um aumento mais moderado (0,48 m até 2100), indica que as alterações iniciais (até 2030) são pouco expressivas, mas a partir de 2050 já se observa conversão localizada de praias e zonas húmidas. Em 2100, a retração costeira se torna mais evidente, embora parte do interior da ilha permaneça relativamente preservado. Este comportamento está em linha com estudos no Reino Unido (Pylarinou, 2014), que apontaram que sob cenários mais conservadores o SLAMM projeta impactos graduais, mantendo ainda áreas interiores estáveis. Contudo, a redução de zonas húmidas já em 2050 confirma a sensibilidade precoce desses ecossistemas, como também relatado no delta do Mississippi (Warren et al., 2015).

### **SSP2 – Cenário intermediário**

No cenário SSP2, os impactos projetados são mais acelerados e intensos. Em 2050 (0,23 m), há perda significativa de zonas húmidas e retração de dunas, sobretudo na porção norte, confirmando a maior vulnerabilidade de áreas expostas a ondas e correntes. Em 2100 (0,61 m), o avanço oceânico fragmenta a paisagem costeira, provocando forte redução dos habitats de transição. Esse padrão é consistente com resultados obtidos na costa do Benim, onde o SLAMM projetou perda acelerada de ecossistemas costeiros sob elevações intermediárias de nível do mar (Doguenon et al., 2023), e também com projeções no delta do Mekong, que indicaram substituição gradual de pântanos de Melaleuca por áreas inundadas (Dang et al., 2023).

### **SSP5 – Cenário de alta pressão**

O cenário SSP5 projeta os efeitos mais severos, com elevação de 0,83 m até 2100. Em 2050 (0,26 m), nota-se expansão considerável das áreas marinhas e conversão acelerada das zonas húmidas. Em 2100, ocorre submersão generalizada da faixa costeira, perda quase total de praias e dunas e a permanência apenas de áreas terrestres descontínuas. O ponto mais crítico é a invasão marinha sobre o Lago Nhanombe, que passa a conectar-se ao oceano, sugerindo um processo de “marinização” e provável transformação em uma laguna costeira aberta. Fenômenos semelhantes foram modelados para a costa leste dos EUA, onde o SLAMM indicou a conversão de pântanos interiores em lagoas salobras sob cenários extremos de subida do mar (Clough et al., 2016). Essa invasão também reflete a limitação adaptativa de ilhas baixas tropicais, já identificada em sistemas do Pacífico (Albert et al., 2016).

### **Análise diferenciada por secções**

A análise espacial evidencia contrastes marcantes entre o Norte da Ilha (Secção A) e o Sul da Ilha (Secção B). No Norte, a morfologia estreita e os cordões arenosos contínuos tornam a região altamente vulnerável. Sob SSP1, o impacto é gradual, mas nos cenários SSP2 e SSP5 observa-se fragmentação da barreira litorânea e perda substancial de terras secas. No cenário extremo (SSP5/2100), ocorre o colapso quase total do setor norte, com invasão oceânica do Lago Nhanombe, evidenciando a fragilidade estrutural dessa região.

No Sul, a faixa costeira mais larga e elevada confere uma resiliência relativa maior. No SSP1, os impactos até 2100 são limitados. Contudo, sob SSP2 e SSP5, observa-se recuo progressivo da linha de costa e submersão parcial de planícies costeiras. Apesar disso, diferentemente do Norte, não ocorre ruptura abrupta da barreira litorânea nem conexão direta dos lagos interiores com o oceano. Essa assimetria confirma que a morfologia inicial e a topografia local controlam a vulnerabilidade costeira. Setores estreitos e lineares (Norte) são mais suscetíveis a colapsos rápidos, enquanto setores mais largos (Sul) retardam a intrusão marinha. Essa diferenciação confirma que a heterogeneidade geomorfológica exerce papel determinante na resiliência local, em consonância com observações feitas por Kirwan e Megonigal (2013), que destacam a importância da topografia e do balanço sedimentar na resposta dos ecossistemas costeiros.

### **5.2. Destaque e Pontos pertinentes**

Os resultados da Ilha de Benguerra apresentam três pontos de destaque em comparação com a literatura internacional:

- Persistência e instabilidade dos bancos costeiros: enquanto a maioria dos estudos com SLAMM foca em marismas e mangais, aqui evidenciou-se o desaparecimento do banco arenoso sul e a modificação contínua do banco submerso norte, revelando a fragilidade de feições sedimentares em ilhas tropicais, este é um ponto ainda pouco explorado nos estudos globais.
- Transformação de lagos interiores: a invasão do mar sobre o Lago Nhanombe em 2100 configura um resultado singular, pois poucos trabalhos reportaram a integração direta de corpos de água interiores ao oceano. Este achado amplia a discussão sobre a aplicabilidade do SLAMM em ambientes insulares.
- Estabilidade artificial de áreas urbanas: assim como relatado no Mississippi (Warren et al., 2015) e na Espanha (Fernando-Nunez et al., 2019), o modelo manteve áreas classificadas como “terra desenvolvida” estáveis ao longo do tempo, o que reflete uma limitação estrutural do SLAMM, já que não simula pressões antrópicas dinâmicas.

## VI. CAPÍTULO

## 6. Conclusões

O presente estudo permitiu avaliar de forma integrada o estado de conservação da Ilha de Benguerra, a dinâmica de erosão e deposição ao longo dos últimos 34 anos e as potenciais respostas à elevação do nível do mar projetadas pelo modelo SLAMM. Os resultados evidenciam que a ilha de Benguerra se encontra em um processo de degradação progressiva, marcado pela perda de cobertura vegetal nativa, avanço do solo exposto, retração de dunas e instabilidade de bancos sedimentares, tendências que refletem tanto pressões antrópicas locais quanto forçantes ambientais globais.

- ✚ A análise histórica (1990 a 2024) mostrou que, embora tenha havido ciclos de regeneração parcial da vegetação, sobretudo na década de 1990, a expansão urbana e o uso intensivo do solo provocaram perda significativa da vegetação densa e aumento expressivo das áreas expostas, comprometendo a resiliência natural da ilha. Esse estado é agravado pela intensificação da erosão costeira, que se mostrou predominante em relação à deposição em todas as secções, resultando em perda contínua das extremidades norte e sul. A urbanização sobre dunas e áreas sensíveis intensificou este processo, confirmando a relação direta entre atividade humana e aumento da vulnerabilidade costeira.
- ✚ A avaliação do estado de conservação revelou que, em 1990, a ilha apresentava condições relativamente equilibradas, com lagoas estáveis e bancos costeiros atuando como barreiras naturais. No entanto, a partir de 2000, iniciou-se uma trajetória de degradação: ressecamento de lagoas, retração de dunas e urbanização crescente. Em 2020, o desaparecimento do banco arenoso no setor sul marcou um ponto crítico, uma vez que se perdeu uma barreira fundamental contra ondas e tempestades. Em 2024, embora houvesse sinais de recuperação parcial da vegetação e das zonas húmidas, a pressão antrópica manteve-se elevada e contínua, limitando o potencial de regeneração natural.
- ✚ As simulações com o modelo SLAMM confirmaram a alta vulnerabilidade da ilha frente à subida do nível do mar. Sob o cenário otimista (SSP1), os impactos são graduais e permitem alguma preservação das áreas interiores até 2100, ainda que zonas húmidas sejam significativamente afetadas. No cenário intermediário (SSP2), a retração costeira é mais intensa e a fragmentação da paisagem se acentua. O cenário extremo (SSP5) projeta perdas drásticas, incluindo a invasão oceânica do Lago Nhanombe, resultando em sua transformação em uma laguna. Este fenômeno, raramente reportado na literatura para o modelo SLAMM, destaca a singularidade do caso da Ilha de Benguerra e amplia o debate sobre os limites adaptativos de ilhas tropicais.

- ✚ A análise diferenciada da topografia das Secções A e B mostrou vulnerabilidades contrastantes. A Secção A (Norte da Ilha), estreita e linear, revelou-se altamente suscetível ao colapso das dunas e à conexão direta com lagos interiores sob cenários extremos. Para a Secção B (Sul), mais larga e elevada, apresentou maior resiliência relativa, ainda que com recuo acentuado da linha de costa. Essa assimetria confirma que a heterogeneidade geomorfológica é determinante para a resiliência costeira.

### **Medidas de mitigação**

Os resultados deste estudo evidenciam perdas significativas de habitats e feições geomorfológicas resultantes da interação entre pressões ambientais e antrópicas. Assim, recomenda-se a implementação de medidas de mitigação e proteção costeira, incluindo: a preservação e recuperação da vegetação nativa (dunas e zonas húmidas), o ordenamento do uso do solo com restrição à urbanização em áreas vulneráveis, e a adoção de soluções baseadas na natureza, como a restauração de ecossistemas costeiros para aumentar a resiliência frente à erosão e à subida do nível do mar.

### 6.1.Limitações e Recomendações

O presente estudo apresentou as seguintes limitações:

- ✚ O modelo considera áreas classificadas como “terra desenvolvida” como estáveis, não incorporando as pressões crescentes da urbanização ao longo do tempo, o que pode ter levado à subestimação dos impactos antrópicos.

Para os estudos futuros recomenda-se:

- ✚ O uso de dados de maior resolução, como DEMs obtidos por LIDAR ou drones, e o desenvolvimento de levantamentos batimétricos detalhados.

## VII. CAPÍTULO

## 7. Referências Bibliográficas

- ✚ Albert, S., Leon, J. X., Grinham, A. R., Church, J. A., Gibbes, B. R., e Woodroffe, C. D. (2016). Interactions between sea-level rise and wave exposure on reef island dynamics in the Solomon Islands. *Environmental Research Letters*, 11(5), 054011;
- ✚ Almeida, L. R. D.; Amaro, V. E.; Marcelino, A. M. T.; ScudelarI, A. C. 2015. Avaliação do clima de ondas da praia de Ponta Negra (RN, Brasil) através do uso do SMC-Brasil e sua contribuição à gestão costeira;
- ✚ Alongi, D. M. (2008). Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.08.024>;
- ✚ Andrefouët, S., Newman, B., Hicks, C., e Beymer-farris, B. A. (2018). *Marine Science*. 17(2), 856–860.
- ✚ Armitage, S.J.; Botha, G.A.; Duller, G.A.T.; Wintje, Rebêlo, L.P. and Momade, F.J. (2006). The formation and evolution of the barrier islands of Inhaca and Bazaruto, Mozambique. *Geomorphology* 82, 295-308.
- ✚ Barbier, E. B., Hacker, S. D., Kennedy, C., Koch, E. W., Stier, A. C., e Silliman, B. R. (2011). The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, 81(2), 169–193. <https://doi.org/10.1890/10-1510.1> ;
- ✚ Barbosa, A. H. S., Carvalho, R. G., Camacho, R. V. (2017). Aplicação do NDVI para a análise da Distribuição Espacial da Cobertura Vegetal na Região Serrana de Martins e Portalegre – Estado do Rio Grande do Norte. *Revista do Departamento de Geografia*;
- ✚ Bazaruto, A. N. (2021). Thematic Papper: Turtle Nesting Report 2020-21, p. 2.
- ✚ BJÖRNBERG, S., e WAHLSTRÖM, S. (2012). Coastal Erosion in Maputo, Mozambique. Governing processes and mathematical modeling;
- ✚ Bagstad, K. J., Villa, F., Batker, D., Harrison-Cox, J., Voigt, B., e Johnson, G. W. (2014). From theoretical to actual ecosystem services: Mapping beneficiaries and spatial flows in ecosystem service assessments. *Ecology and Society*, 19(2), 64. <https://doi.org/10.5751/ES-06523-190264>;
- ✚ Brezolin, P. T. (2011). Análise Da Variação E Estabilidade Da Linha De Costa Da Praia Da Armação, Florianópolis – Litoral Sul Da Ilha De Santa Catarina.
- ✚ Briggs, P. (2011). *Mozambique* (5° ed.). Chalfont St Peter: Bradt Travel Guides;
- ✚ Carson, M., Köhl, A., Stammer, D., A. Slangen, A. B., Katsman, C. A., W. van de Wal, R. S., Church, J., e White, N. (2016). Coastal sea level changes, observed and projected during the

20th and 21st century. *Climatic Change*, 134(1–2), 269–281. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1520-1>

- ✚ Chang, Y., Hou, K., Li, X., Zhang, Y., e Chen, P. (2018). Review of Land Use and Land Cover Change research progress Review of Land Use and Land Cover Change research progress.
- ✚ Chilagane, N. A. (2018). Impacts Of Land Use And Land Cover Changes On The Ecosystem Services Of The Little Ruaha River Catchment, Tanzania Nyemo Amos Chilagane A Dissertation Submitted In Fulfilment .... December. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21103.89769>
- ✚ Clough, J. S., W. Pinnacle Consulting, Inc., e others. (2016). Technical documentation for SLAMM 6.x. Warren Pinnacle Consulting;
- ✚ Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., Van der Ploeg, S., Anderson, S. J., Kubiszewski, I., Farber, S., e Turner, R. K. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*;
- ✚ Cooper, J.A.; Pilkey, O.H. (2002). The Barrier Islands of Southern Mozambique. *Journal of Coastal Research*, SI 36 (ICS 2002 Proceedings, Northern Ireland), 164-172;
- ✚ Craft, C., Clough, J., Ehman, J., Joye, S., Park, R., Pennings, S., Guo, H., e Machmuller, M. (2009). Forecasting the effects of accelerated sea-level rise on tidal marsh ecosystem services. *Frontiers in Ecology and the Environment*;
- ✚ Dang, A. T. N., Reid, M., e Kumar, L. (2023) — *Coastal Melaleuca wetlands under future climate and sea-level rise scenarios in the Mekong Delta, Vietnam: vulnerability and conservation*;
- ✚ Deguenon et al. (2023) — *Simulation of the Impacts of Sea-Level Rise on Coastal Ecosystems in Benin Using a Combined Approach of Machine Learning and the Sea Level Affecting Marshes Model*;
- ✚ Dyer, K. R., e Huntley, D. A. (1999). The origin, classification and modelling of sand banks and ridges. *Continental Shelf Research*, 19(10), 1285–1330. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(99\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(99)00028-X) ;
- ✚ Estatísticas, I. N. (2019). Relatório de uma missão de curta duração.
- ✚ Fatoyinho, T.E., Simard, M., Washington-Allen 2008., Shugart, H.H. (2008). Landscape-scale extent, height, biomass, and carbon estimation of Mozambique's mangrove forests with Landsat ETM+ and Shuttle Radar Topography Mission elevation data. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*. <https://doi.org/10.1029/2007JG000551>
- ✚ Fernandino, G., Elliff, C. I., e Silva, I. R. (2018). Ecosystem-based management of coastal zones in face of climate change impacts: Challenges and inequalities. *Journal of Environmental Management*, 215, 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.034>

- ✚ Fernandez-Nunez, M.; Burningham, H.; Díaz-Cuevas, P.; Ojeda-Zújar, J. (2019). *Evaluating the Response of Mediterranean–Atlantic Saltmarshes to Sea-Level Rise*. *Resources*, 8(1), 50.
- ✚ Ferreira, T. A. B. (2019). Aplicação De Sistema De Análise De Linha De Costa (Digital Shoreline Analysis System) Para Avaliação De Mudanças Costeiras No Delta Do Parnaíba. 1–102. <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/28519>
- ✚ Furaca, N. B., Hogueane, A. M., Mackay, F., Willemsse, M., e Langa, A. A. (2021). Exploring urbanization and critical habitat loss through land cover change around the Bons Sinais. 1, 43–58.
- ✚ Gesch, D.B. (2009). Analysis of Lidar Elevation Data for Improved Identification and Delineation of Lands Vulnerable to Sea-Level Rise. <https://doi.org/10.2112/SI53-006.1>
- ✚ Gornitz, V., Global coastal hazards from future sea level rise. *Global Planetary Change*. V.4, 379-398. 1991. [https://DOI:10.1016/0921-8181\(91\)90118-G](https://DOI:10.1016/0921-8181(91)90118-G);
- ✚ Harris, D. L., Rovere, A., Casella, E., Power, H., Canavesio, R., Collin, A., Pomeroy, A., Webster, J. M., e Parravicini, V. (2018). Coral reef structural complexity provides important coastal protection from waves under rising sea levels. *Science Advances*, 4(2). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao4350>;
- ✚ Hereher, M.E.2015. Assessment of South Sinai coastal vulnerability to climate change. *Journal of Coastal Research*, V.31(6), 1469–1477. ISSN 0749-0208 ;
- ✚ Hogueane, A. M. (2007). Perfil Diagnóstico da Zona Costeira de Moçambique. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 7(1), 69–82. <https://doi.org/10.5894/rgci11>
- ✚ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2020). IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157964>
- ✚ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- ✚ Kirwan, M. L.; Megonigal, J. P. *Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea-level rise*. *Nature*, v. 504, n. 7478, p. 53-60, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature12856>
- ✚ Landis, J. R., e Koch, G. G. (1977). *The measurement of observer agreement for categorical data*. *Biometrics*, 33(1), 159–174. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- ✚ Lewis, N. S., Marois, D. E., e Littles, C. J. (2020). Projecting Changes to Coastal and Estuarine Ecosystem Goods and Services — Models and Tools Projecting Changes to Coastal and Estuarine Ecosystem Goods and Services — Models and Tools. August. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-45843-0>

- ✚ Macamo, C. C. F., e, Henriques Balidy , Salomão O. Bandeira, J. G. K. (2015). *Marine Science*. 14(1), 856–860;
- ✚ Martínez, M. L., Intralawan, A., Vázquez, G., Pérez-Maqueo, O., Sutton, P., e Landgrave, R. (2007). The coasts of our world: Ecological, economic and social importance. *Ecological Economics*, 63(2–3), 254–272. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.10.022>;
- ✚ Martins, J. S. (2018). Universidade Federal Do Rio De Janeiro Departamento De Geografia Programa De Pós-Graduação Em Geografia Dissertação Apresentada Ao Programa De Pós-Janeiro, Como Parte Dos Requisitos Necessários;
- ✚ Massangaie, D. d. (Setembro de 2019). estudo da variação da linha de costa na região de mecúfi- cabo delgado.
- ✚ Matos, L. e Trotsuk, E. (2020). Thematic Paper: Turtle Nesting Report 2020 - 21 Bazaruto Archipelago National Park. October 2020;
- ✚ Mcinnes, K. L., Erwin, T. A., e Bathols, J. M. (2011). Global Climate Model projected changes in 10 m wind speed and direction due to anthropogenic climate change. *Atmospheric Science Letters*, 12(4), 325–333. <https://doi.org/10.1002/asl.341>
  
- ✚ Martínez-López, J., Bagstad, K. J., Balbi, S., Magrach, A., Voigt, B., Athanasiadis, I., Pascual, M., Willcock, S., e Villa, F. (2018). Towards globally customizable ecosystem service models. *Science of the Total Environment*, 650, 2325–2336. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.371>;
- ✚ McInnes, K. L., Macadam, I., Hubbert, G. D., e O’Grady, J. G. (2011). An assessment of sea level rise and extreme tides and waves in coastal zones of the Indian Ocean. *Regional Environmental Change*, 11(S1), 229–243. <https://doi.org/10.1007/s10113-010-0191-0>
- ✚ Ministério Para a Coordenação da Acção Ambiental (MICOA). (2012). Perfil Ambiental e Mapeamento do Uso Actual da Terra nos Distritos Da Zona Costeira De Moçambique. Projecto de Avaliação Ambiental Estratégica da Zona Costeira - Moçambique, Distrito de Vilankulo - Província de Inhambane;
- ✚ Mountrakis, G., Im, J., e Ogole, C. (2011). Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(3), 247–259. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.11.00>
- ✚ Neukermans, G., e Koedam, N. (2014). Saco da Inhaca mangrove vegetation mapping and change detection using very high resolution satellite imagery and historic aerial photography. In S. Bandeira e J. Paula (Eds.), *The Maputo Bay Ecosystem* (pp. 131–134). Zanzibar Town: WIOMSA;

- ✚ Oliveira, U., e Soares-filho, B. (2019). BioDinamica : a toolkit for analyses of biodiversity and biogeography on the Dinamica-EGO modelling platform. <https://doi.org/10.7717/peerj.7213>;
- ✚ Palalane, J., Larson, M., Hanson, H., e Juízo, D. (1 de Maio de 2016). Coastal Erosion in Mozambique: Governing Processes and Remedial Measures. pp. 700-718;
- ✚ Pacule, J. P. (2023). Variabilidade e Tendências de Alguns Parâmetros Geoambientais na Baía de Maputo Nas Últimas Três Décadas;
- ✚ Perreira, G. C., De Moraes, F. (201). Índice (NDWI) e imagens SRTM aplicados ao mapeamento das áreas inundáveis do entorno da Lagoa da Confusão - TO. Instituto de Geociências - Unicamp;
- ✚ Pereira, i. J. J., e Nascimento, F. R. (2016). “Avaliação dos Recursos Naturais na Ilha da Inhaca (Oceano Índico, Moçambique). VOL 36.
- ✚ Pilkey, O. H.; Davis, T. W, 1987. An analysis of coastal recession models: North Carolina coast. In: D. Nummedal, O.H. Pilkey and J.D. Howard (Editors), Sea-level Fluctuation and Coastal Evolution. SEPM (Society for Sedimentary Geology);
- ✚ Proisy, C., Souza Filho, P. W. M., Fromard, F., Prost, M. T., e Mendes, A. C. (2003). Monitoring the Dynamic of the Amazon Coast (Pará, Brasil and French Guiana Using a Common Methodology Based on a Spatial Analysis Coupled To a Simulation Tool. January;
- ✚ Pomeroy, A., Lowe, R., Symonds, G., Van Dongeren, A., e Moore, C. (2012). The dynamics of infragravity wave transformation over a fringing reef. Journal of Geophysical ResearchOceans, 117, 17. <https://doi.org/10.1029/2012jc008310>;
- ✚ Pylarinou, A. (2015). *Impacts of Climate Change on UK Coastal and Estuarine Habitats: A Critical Evaluation of the Sea Level Affecting Marshes Model (SLAMM)* (Doctoral thesis, University College London). UCL Discovery;
- ✚ Rikimaru, A.; Roy, P. S.; Miyatake, S. (2002). Tropical Forest Cover Density Mapping. Tropical Ecology, v.43;
- ✚ Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., de Vries, J. V., McCall, R., e Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. Coastal Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>;
- ✚ Society, N. G. (2013). *Four Seasons of Travel: 400 of the World's Best Destinations in Winter, Spring, Summer, and Fall* (Ilustrada ed.). National Geography;
- ✚ Thieler, E.R.; Hammar-klose, E.S. (2000) National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise; Preliminary Results for the US Pacific Coast; Technical Report; U.S. Geological Survey: Woods Hole, MA, USA;

- ✚ Tricart, J. *Ecodinamica*. Rio de Janeiro, 1977;
- ✚ Turner, K. G., Anderson, S., Gonzales-Chang, M., Costanza, R., Courville, S., Dalgaard, T., Dominati, E., et al. (2016). A review of methods, data, and models to assess changes in the value of ecosystem services from land degradation and restoration. *Ecological Modelling*, 319,. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.07.017>;
- ✚ Van Dongeren, A., Lowe, R., Pomeroy, A., Trang, D. M., Roelvink, D., Symonds, G., e Ranasinghe, R. (2013). Numerical modeling of low-frequency wave dynamics over a fringing coral reef. *Coastal Engineering*, 73, 178–190. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.11.004>;
- ✚ *Warren Pinnacle Consulting, Inc. (2015). Final Report: Evaluation of Regional Sea Level Affecting Marshes Model (SLAMM). Gulf Coast Prairie Landscape Conservation Cooperative. [Esteriormente revisado em 2016]*;
- ✚ Weatherdon, L. V, Magnan, A. K., Rogers, A. D., Sumaila, U. R., e Cheung, W. W. L. (2016). Observed and Projected Impacts of Climate Change on Marine Fisheries, Aquaculture , Coastal Tourism, and Human Health : An Update. 3(April). <https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00048>;