



Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras

Monografia para Obtenção do Grau de Licenciatura em Oceanografia

Aplicação das imagens do Sentinel-2 para o monitoramento multi temporal do uso e cobertura da terra e processos costeiros em Marromeu

Autor:

Juvêncio Emerson Arão Bila

Quelimane, Outubro de 2025



Monografia para Obtenção do Grau de Licenciatura em Oceanografia

Aplicação das imagens do Sentinel-2 para o monitoramento multi temporal do uso e cobertura da terra e processos costeiros em Marrómu

Autor:

Juvêncio Emerson Arão Bila
(Juvêncio Emerson Arão Bila)

Supervisor:

Filipe Filipe
(Prof-Doutor Filipe P.J. Nehama)

Co-Supervisor:

Orlando Afonso Nhatugus Júnior
(Lic. Orlando Afonso Nhatugus Júnior)

Presidente do júri:

Banito B. Magalade
(MSc. Banito B. Magalade)

Avaliador:

Nélio das Neves Olívio Sitoe
(MSc. Nélio das Neves Olívio Sitoe)

Quelimane, Outubro de 2025

Agradecimentos

Em primeiro lugar, sou profundamente grato a Deus pelo dom da vida, por ser o meu seguro guia e pela sabedoria concedida, que me permitiu realizar este trabalho. Como está escrito:

“O Senhor é o meu pastor, nada me faltará.” (Salmo 23:1)

A Ele dedico toda honra e toda glória.

Agradeço aos meus pais, Arão Raimundo Bila e Zaquina Jacinto Bila, pelo cuidado permanente, pelo apoio incondicional e pelos ensinamentos de vida, mesmo à distância. Estendo a minha gratidão aos meus irmãos, Clementina Reginaldo, Guilherme Bila, Elídio Bila e Geraldo Xavier, pelo constante apoio e presença.

Expresso a minha sincera gratidão aos meus orientadores, Prof. Doutor Fialho P. J. Nehama e Lic. Orlando Afonso Nhatuguês Júnior, pelo apoio, paciência e pela dedicação de cada momento do seu tempo para garantir a concretização deste trabalho. A vossa orientação mostrou-me que a verdadeira ciência não se limita às auscultações, mas que a prática constitui um elemento indispensável para a compreensão da mesma.

Deixo também um agradecimento especial aos meus amigos Hélder Carlos Baroso, Evandro Rungo, Amanda Boa, Sérgio Bacar, Kilfrei Jovêncio Jone, Mulatinha Mamões, Bolton Marcelino, Lucamba Gonçalves, Pinto Maurício, Odete Carlos, Telma Chaleca, Jamar Timana, Manuel Macuacua, Elias de Sousa, Dércio Abrage, Yurica Nhate, Erica Mavota, Nelia Bijal, Lic S.Andarrusse e Quelio Metequeta. Obrigado pelo suporte, pelas contribuições sempre construtivas e, sobretudo, pela amizade. Sou igualmente grato pela educação transmitida, pelas palavras de incentivo, pelos conselhos, pelas críticas e por estarem presentes nos momentos mais importantes da minha vida.

Mais uma vez ao meu pai Arão Raimundo Bila por sempre acreditar no meu potencial. Agradeço toda a educação transmitida a mim, as palavras de incentivo, os conselhos, as críticas e por estar presente nos momentos mais importantes da minha vida

Dedicatória

Dedico este trabalho, com todo o meu amor e gratidão, aos meus pais, Arão Raimundo Bila e Zaquina Jacinto Bila, pelo cuidado, apoio incondicional e pelos ensinamentos que moldaram a minha vida. A vocês devo a base da minha formação, a força nos momentos difíceis e a fé para seguir adiante.

Este trabalho é tão meu quanto vosso.

Declaração de Honra

Eu, **Juvêncio Emerson Arão Bila**, declaro, sob minha honra, que este trabalho é resultado do meu esforço individual, não tendo sido previamente apresentado para obtenção de qualquer grau académico, e que todas as fontes consultadas estão devidamente citadas e referenciadas. Esta monografia é apresentada em cumprimento parcial dos requisitos de obtenção do grau de licenciatura em Oceanografia, pela Universidade Eduardo Mondlane.

Quelimane, Outubro de 2025

Autor:

(Juvêncio Emerson Arão Bila)

Resumo

As zonas costeiras são ecossistemas de elevada importância ecológica e socioeconômica, mas também altamente vulneráveis à erosão, às mudanças climáticas e às pressões antrópicas. Em Moçambique, essas pressões são particularmente evidentes no distrito de Marrromeu, localizado no delta do rio Zambeze e reconhecido como área Ramsar de alta biodiversidade. O presente estudo analisou a dinâmica multi temporal do uso e cobertura da terra, a evolução da linha de costa e a severidade das queimadas no período de 2016 a 2025, utilizando imagens do Sentinel-2. Foram aplicados índices espectrais (NDVI, NDWI, MNDWI e dNBR) e classificação supervisionada (Máxima Verossimilhança), complementados por análise da linha de costa em ambiente SIG. Os resultados demonstraram elevada acurácia 93%, Kappa = 0,90 e revelaram transformações significativas: redução de solo exposto e vegetação rala, associada ao aumento de vegetação moderada e densa/mangal. A análise do dNBR evidenciou que, entre 2016-2020, predominaram queimadas de baixa a moderada severidade, com ocorrência localizada de queimadas intensas. Já entre 2020-2025, observou-se maior homogeneidade espacial, com prevalência de queimadas de severidade moderada-baixa e redução de eventos extremos, ainda que acompanhada de menor regeneração ativa da vegetação. A análise da linha de costa indicou forte variabilidade espacial entre os setores estudados, com alternância entre áreas de erosão e acreção. No setor A, observou-se coexistência de deposição e recuo; no setor B, instabilidade marcada por erosão predominante; e no setor C, erosão contínua com deposição pontual. Estes resultados reforçam a resiliência natural do ecossistema, mas também destacam limitações na sucessão ecológica decorrentes de recorrência de fogo.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Sentinel-2; Uso e cobertura da terra; Linha de costa; Marrromeu.

Abstract

Coastal zones are ecosystems of high ecological and socioeconomic importance, yet they are highly vulnerable to erosion, climate change, and anthropogenic pressures. In Mozambique, these pressures are particularly evident in the Marromeu district, located in the Zambezi River delta and recognized as a Ramsar site of high biodiversity. This study analyzed the multitemporal dynamics of land use and land cover, coastline evolution, and fire severity between 2016 and 2025 using Sentinel-2 imagery. Spectral indices (NDVI, NDWI, MNDWI, and dNBR) and supervised classification (Maximum Likelihood) were applied, complemented by coastline analysis in a GIS environment. The results showed high accuracy 93%, Kappa = 0.90 and revealed significant transformations: reduction of bare soil and sparse vegetation, associated with the expansion of moderate and dense/mangrove vegetation. The dNBR analysis indicated that between 2016 and 2020, fires of low to moderate severity predominated, with localized occurrences of high-severity events. Between 2020 and 2025, a more spatially homogeneous pattern was observed, with prevalence of low-to-moderate severity fires and a reduction of extreme events, although accompanied by lower active vegetation regeneration. Coastline analysis indicated strong spatial variability among the studied sectors, with alternating erosion and accretion. Sector A showed coexistence of deposition and retreat; Sector B revealed instability dominated by erosion; and Sector C displayed continuous erosion with localized deposition. These findings highlight both the natural resilience of the ecosystem and the limitations of ecological succession due to recurrent fires.

Keywords: Remote sensing; Sentinel-2; Land use and land cover; Coastline; Marromeu.

LISTA DE ABREVIATURAS

GIS – Sistema de Informação Geográfica

NDVI – Índice de Vegetação com Diferença Normalizada

LULC – Uso e cobertura de Terra

NDWI – Índice de Diferença Normalizada de Água

MNDWI – Índice Modificado de Diferença Normalizada de Água

ha – Hectares

m – Metros

RS – Remote Sensing

TOA - Refletância do Topo da Atmosfera

NBR – Taxa de Queima Normalizada

SR – Refletância de Superfície

MSI – Instrumento Multiespectral

MaxVer – Classificador de Máxima Verossimilhança

SCL – Camada de Classificação de Cena

CM – Complexo de Marromeu

RNM – Reserva Nacional de Marromeu

ESA - Agência Espacial Europeia

Red – Vermelho

NIR – Infravermelho Proximo

Lista de Figuras

Figura 1: Distribuição espacial da densidade de focos de queimadas na RNM entre 2012 e 2014....	9
Figura 2: Sentinel-2 Satellite Orbital Configuration (Astrium-GmbH) (Drusch et al., 2012).....	10
Figura 3: Sentinel-2 resolução espacial de 10 metros: B2 (490 nm), B3 (560 nm), B4(665 nm) e B8 (842 nm)(ESA, 2015).....	11
Figura 4: Sentinel 2 resolução espacial de 20 metros: B5 (750 nm), B6 (740 nm), B7 (783 nm), B8b (865 nm), B11 (1610 nm) e B12 (2190 nm)(ESA, 2015).	11
Figura 5: Sentinel-2 resolução espacial de 60 metros: B1 (443 nm), B9 (940 nm) e B10 (1375 nm) (ESA, 2015).	12
Figura 6: Localização da área de estudo, Província de Sofala, Distrito de Marromeu.....	15
Figura 7: Ilustração de pontos aleatórios no Google Earth Pro extraídos da imagem classificada do Sentinel-2.	22
Figura 8: Mapa de Uso e Cobertura do Solo 2016.	27
Figura 9: Mapa de Uso e Cobertura do Solo 2020.	28
Figura 10: Mapa de uso e cobertura do solo 2025.....	29
Figura 11: Gráfico da evolução do uso e cobertura do solo no período de 2016 a 2025.	30
Figura 12: Distribuição espacial da severidade de queimadas e dos processos de regeneração da vegetação no distrito de Marromeu entre 2016-2020 e 2020-2025, derivada de imagens Sentinel-2.	31
Figura 13: Posições da linha de costa (2016-2025), com locais delimitados de A, B e C.....	32
Figura 14: lustrações das áreas críticas de variação das linhas costeiras da série temporal de 2016 e 2025.....	33
Figura 15: Representação gráfica das taxas de variação(ha) das áreas críticas das linhas costeiras da série temporal de 2016 e 2025.	34
Figura 16: Mapa de uso e cobertura da terra derivada de imagens Sentinel-2 no distrito de Marromeu.	43
Figura 17: Mapa ilustrando o NBR ao longo dos anos no distrito de Marromeu.....	43
Figura 18: Comportamento das Marés no ano de 2016 para o mês de Julho.	44
Figura 19: Comportamento das Marés no ano de 2020 para o mês de Julho.	44
Figura 20: Comportamento das Marés no ano de 2025 para o mês de Julho.	44

Lista de Tabelas

Tabela 1: Qualidade da classificação segundo intervalos de coeficiente de concordância.	9
Tabela 2: Vantagens e Limitações para uso costeiro do satélite Sentinel-2.	12
Tabela 3- Conjunto de imagens Sentinel-2 (nível L2A) selecionados para a análise multi temporal.	15
Tabela 4: Estimativa geral de precisão fornecida pela verificação de base combinada e pontos de validação selecionados aleatoriamente para 2020.	24
Tabela 5: Precisão do mapeamento da severidade de queimadas e da regeneração da vegetação de pontos de validação selecionados aleatoriamente para 2016.	25

Lista de Equações

Equação 1: Mascara de nuvens e sombras SCL	17
Equação 2: Formula cálculo de NDVI.....	19
Equação 3: Formula cálculo de NBR.	19
Equação 4: Formula cálculo de dNBR.	20
Equação 5: Formula cálculo de NDWI.....	22
Equação 6: Formula cálculo de MNDWI.	22

Índice

Agradecimentos	iii
Dedicatória.....	iv
Declaração de Honra.....	v
Resumo	vi
Abstract.....	vii
LISTA DE ABREVIATURAS	viii
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas	x
Lista de Equações	x
CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO.....	1
1.Introdução	1
1.1. Problematização.....	2
1.2. Justificativa	3
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Geral	3
1.3.2. Específicos.....	3
CAPÍTULO II: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1. Importância do monitoramento do uso e cobertura da terra	4
2.2. Ecossistemas costeiros e estabilidade da linha de costa	4
2.3. Sensoriamento remoto aplicado ao estudo costeiro.....	4
2.4. Índices Espectrais	5
2.5. Características do Distrito de Marromeu.....	5
2.5.1. Clima.....	5
2.5.2. Solos	6
2.5.3. Hidrologia.....	6

2.5.4. Dinâmica costeira	6
2.5.5. Vegetação e Flora.....	6
2.5.6. Pressões antrópicas	7
2.5.7. Mangais.....	7
2.5.8. Importância Ecológica	7
2.6. Mudanças climáticas e pressões antrópicas em ambientes costeiros.....	8
2.7. Queimadas descontroladas.....	8
2.8. Validação e análise de acurácia.....	9
2.9. Sentinel-2: Características e Aplicações no Monitoramento Ambiental	10
2.10. Especificações técnicas.....	10
2.10.1. Resolução espacial de 10 metros	11
2.10.2. Resolução espacial de 20 metros	11
2.10.3. Resolução espacial de 60 metros	12
2.11. Níveis de processamento	12
2.11.1. Vantagens e Limitações para uso costeiro	12
CAPÍTULO III: MATERIAIS E METÓDOS	14
3.1. Descrição da Área de estudo.....	14
3.2. Dados	15
3.2.1. Imagens de Satélite.....	15
3.2.2. Dados Complementares	16
3.3. Pré-Processamento das Imagens.....	16
3.4. Classificação do Uso e Cobertura do Solo	17
3.4.1. Definição das Classes	17
3.4.2. Uso e cobertura do solo	19
3.4.2.1. Severidade das queimadas	19

3.4.3. Algoritmo de Classificação.....	20
3.4.3.1. Definição do número de classes	20
3.4.3.2. Aplicação do classificador	20
3.4.3. Avaliação da Acurácia.....	21
3.5. Processos costeiros	22
3.5.1. Análise da Linha de Costa	22
CAPÍTULO IV: RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4.1 Validação das imagens de Sentinel-2.....	24
4.2. Uso e cobertura do solo no distrito de Marromeu	26
4.3. Distribuição espacial da severidade de queimadas.....	30
4.4. Mapeamento da linha de costa da região de Marromeu	31
4.5. Dinâmica da linha de costa	32
4.6. DISCUSSÃO	35
CAPÍTULO VI: CONCLUSÃO.....	35
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
Anexos	43

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO

1. Introdução

As zonas costeiras de Moçambique representam ecossistemas de elevada complexidade ecológica e importância socioeconómica, atuando como interfaces entre os sistemas terrestres e marinhos. Esses ambientes fornecem serviços ambientais essenciais, como a proteção contra tempestades, o sequestro de carbono, a manutenção da biodiversidade e o suporte a atividades económicas locais, como a pesca e o turismo. Contudo, as mesmas características que conferem alta produtividade também tornam essas áreas extremamente vulneráveis a pressões externas, incluindo a elevação do nível do mar, a intensificação de eventos climáticos extremos e as ações antrópicas, como o desmatamento e as queimadas (Friess et al., 2019; Alongi, 2015; Scholes, 2021).

Na província de Sofala, essas pressões manifestam-se de forma particularmente intensa no distrito de Marromeu, localizado na foz do rio Zambeze e integrado ao Complexo de Marromeu, uma área reconhecida internacionalmente como Sítio Ramsar pela sua importância ecológica. O distrito apresenta um mosaico de ecossistemas costeiros e fluviais incluindo planícies de inundação, mangais e florestas abertas que sustentam uma rica biodiversidade e comunidades que dependem fortemente dos recursos naturais (Beilfuss & Brown, 2006; CEAGRE, 2016).

A dinâmica ambiental de Marromeu é fortemente condicionada pelo pulso hidrológico anual do rio Zambeze, que consiste na variação sazonal do nível das águas em função do regime de chuvas. Durante a estação chuvosa (novembro a março), as cheias periódicas inundam as planícies, depositando sedimentos e nutrientes que favorecem a regeneração da vegetação e a fertilidade do solo. Já na estação seca (maio a outubro), a retração das águas expõe novas superfícies, permitindo o crescimento de gramíneas e o uso agrícola temporário (Junk et al., 1989; Beilfuss & Brown, 2006). Esse processo natural é vital para a manutenção dos mangais, savanas e florestas de várzea.

No entanto, as alterações no pulso hidrológico, resultantes de fatores como a regulação artificial do fluxo do rio pela barragem de Cahora Bassa e o aumento da variabilidade climática, têm comprometido o equilíbrio ecológico da região. Paralelamente, a intensificação de pressões antrópicas, como a expansão agrícola, o corte de madeira e as queimadas descontroladas, vem agravando a degradação da vegetação e acelerando processos de erosão costeira e perda de habitat (Rebelo & Richards, 2010; Palalane et al., 2015).

1.1. Problematização

O distrito de Marromeu, localizado no delta do rio Zambeze, constitui um dos sistemas socioecológicos mais complexos e ambientalmente sensíveis de Moçambique. Inserido em uma região de confluência entre influências fluviais, marinhas e atmosféricas, o delta caracteriza-se por uma dinâmica hidrológica altamente variável, condicionada pelo pulso anual de inundação (Junk et al., 1989), pelas oscilações de maré e pelas flutuações climáticas regionais. Esses processos naturais determinam o padrão de distribuição da vegetação, a renovação dos solos aluviais e a produtividade biológica dos ecossistemas locais, sustentando habitats de elevada relevância ecológica (Beilfuss & Brown, 2006; BIOFUND, 2016).

Entretanto, essa dinâmica natural tem sido cada vez mais modificada pela intervenção humana e pelas alterações climáticas, o que vem comprometendo o equilíbrio funcional do delta. A regulação artificial do regime hidrológico do rio Zambeze pela barragem de Cahora Bassa, associada à redução das cheias naturais, tem alterado significativamente os padrões de sedimentação e recarga de nutrientes, impactando diretamente a regeneração da vegetação e a estabilidade morfodinâmica costeira (Beilfuss, 2012). Paralelamente, a expansão agrícola, as queimadas sazonais, o desmatamento e a ocupação desordenada vêm acelerando processos de perda de cobertura vegetal, degradação dos solos e erosão das margens fluviais e costeiras (Chidumayo, 1997; CEAGRE, 2016).

Essa combinação de pressões antrópicas e naturais tem resultado em alterações espaciais significativas nos padrões de uso e cobertura da terra (LULC), refletindo diretamente na resiliência ecológica e na estabilidade ambiental do delta. Estudos apontam que mais de 90% da costa moçambicana apresenta algum grau de erosão (Moreira, 2005), sendo a região de Marromeu uma das mais afetadas devido à sua posição geográfica no baixo Zambeze e à interação entre os fluxos fluviais e as forças de maré. No entanto, a compreensão integrada das relações entre o uso e cobertura da terra, os processos de queimadas, a regeneração da vegetação e a dinâmica costeira ainda é limitada, o que dificulta a formulação de estratégias de gestão territorial e conservação ambiental adequadas.

Essa limitação metodológica resulta na ausência de informações espaço-temporais detalhadas para compreender como as pressões antrópicas e naturais interagem e impactam a estabilidade da linha de costa de Marromeu. Diante disso, o problema central desta pesquisa consiste em compreender como as transformações multi temporais no uso e cobertura da terra têm influenciado a dinâmica costeira no distrito de Marromeu.

1.2. Justificativa

O monitoramento multi temporal das zonas costeiras é fundamental para antecipar riscos e propor soluções diante das projeções de intensificação dos impactos climáticos e do crescimento da pressão antrópica (IPCC, 2021; UNEP, 2021). A utilização de imagens do Sentinel-2 possibilita o monitoramento multi temporal detalhados capazes de superar limitações de dados estáticos e de baixa resolução. A integração de índices espectrais derivados dessas imagens, como NDVI, NDWI e dNBR, permite avaliar tanto a distribuição espacial de diferentes classes de uso e cobertura, quanto a intensidade de distúrbios e os impactos sobre a vegetação e a linha de costa (Cianciullo et al., 2023).

Diante desse contexto as imagens do Sentinel-2, parte do programa Copernicus da União Europeia, destaca-se por sua resolução espacial entre 10 e 20 m, revisita de cinco dias e ampla cobertura espectral, atributos que viabilizam o mapeamento preciso de uso e cobertura da terra, bem como a análise da dinâmica da linha de costa (Drusch et al., 2012; Louis et al., 2016). O acesso gratuito aos dados amplia ainda mais a aplicabilidade do método em países com restrições de recursos financeiros para aquisição de imagens de alta resolução.

Nesse contexto geral, este trabalho justifica-se por contribuir para a redução das lacunas científicas e aplicadas no monitoramento das zonas costeiras em Moçambique, tomando Marromeu como área de estudo. Ao aplicar uma abordagem integrada que envolve índices espectrais, classificação supervisionada e análise da linha de costa em ambiente SIG, esta investigação fornece informações robustas e espacialmente detalhadas sobre processos de uso e cobertura da terra, severidade de queimadas e dinâmica costeira.

1.3. Objetivos

1.3.1. Geral

- Aplicar as imagens do Sentinel-2 para o monitoramento multi temporal do uso e cobertura da terra e processos costeiros em Marromeu.

1.3.2. Específicos

- Identificar e caracterizar as principais classes de uso e cobertura da terra no distrito de Marromeu;
- Avaliar a confiabilidade e precisão da classificação temática obtida por meio do classificador de Máxima Verossimilhança (MaxVer);
- Delimitar a linha de costa e identificar áreas críticas de erosão e acreção.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Importância do monitoramento do uso e cobertura da terra

O monitoramento do uso e cobertura da terra é fundamental para compreender as transformações ambientais e suas implicações na dinâmica costeira. Alterações como desmatamento, expansão agrícola e urbanização impactam diretamente a biodiversidade, os ciclos hidrológicos e a estabilidade da linha de costa (Lambin et al., 2003). Entre as missões mais relevantes, destaca-se o Sentinel-2, lançado pela Agência Espacial Europeia (ESA) em 2015 como parte do programa Copernicus. A missão é composta por dois satélites (Sentinel-2A e Sentinel-2B) que capturam imagens multiespectrais com resolução espacial de 10 m, 20 m e 60 m em 13 bandas espectrais, abrangendo o visível, o infravermelho próximo (NIR) e o infravermelho de ondas curtas (SWIR) (Drusch et al., 2012).

No contexto africano, a pressão crescente sobre ecossistemas frágeis é impulsionada por fatores como crescimento populacional, aumento da demanda por recursos e mudanças climáticas (UNEP, 2021). Em Moçambique, regiões como o distrito de Marromeu enfrentam desafios adicionais, devido à sobreposição de atividades econômicas e à elevada sensibilidade ambiental.

2.2. Ecossistemas costeiros e estabilidade da linha de costa

As zonas costeiras desempenham funções ecológicas essenciais, incluindo proteção contra a erosão, regulação climática, absorção de energia das ondas e suporte à biodiversidade. A remoção ou degradação dessas formações vegetais pode levar à maior vulnerabilidade da linha de costa, aumentando a taxa de recuo costeiro e a suscetibilidade a eventos extremos, como ciclones e inundações (Spalding et al., 2014).

Em deltas fluviais, como o delta do Rio Zambeze, a dinâmica costeira é determinada por uma complexa interação entre descarga fluvial, ação de marés, ondas e processos sedimentares (Woodroffe et al., 2016). As alterações no uso da terra em áreas de planície de inundação podem modificar o regime sedimentar, afetando a manutenção natural da linha de costa.

2.3. Sensoriamento remoto aplicado ao estudo costeiro

O sensoriamento remoto permite adquirir informações multiespectrais e multi temporais sobre grandes áreas, sendo amplamente utilizado no mapeamento de uso e cobertura da terra (Jensen, 2005). Essa capacidade é particularmente útil para Marromeu, um distrito caracterizado por mosaicos de

savanas, pântanos, florestas e áreas agrícolas, inserido na planície de inundação do delta do rio Zambeze uma das zonas húmidas mais importantes do sul da África (Beilfuss & Brown, 2006).

2.4. Índices Espectrais

Os índices espectrais são ferramentas derivadas do sensoriamento remoto que permitem realçar determinadas características da cobertura da terra a partir da combinação matemática de bandas espectrais. Entre os mais utilizados encontra-se o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), que mede a densidade e vigor da vegetação com base na diferença entre a reflectância do infravermelho próximo e do vermelho (Pettorelli et al., 2016). Outro índice relevante é o NDWI (Normalized Difference Water Index), desenvolvido para destacar corpos hídricos e áreas alagadas, embora apresente limitações ao confundir solos húmidos com água (Xu, 2006).

O MNDWI (Modified NDWI) foi proposto para superar algumas dessas limitações, substituindo a banda do infravermelho próximo pela do infravermelho de ondas curtas, o que melhora a discriminação da água em relação ao solo. Em regiões como Marromeu, onde há interação dinâmica entre áreas de vegetação, zonas alagáveis e superfícies expostas, esses índices são fundamentais para análises multitemporais. Além disso, índices mais recentes como o NBR (Taxa de queima normalizada) e o dNBR (NBR diferenciado) vêm sendo aplicados para avaliar áreas atingidas por queimadas e classificar a severidade dos impactos (Key & Benson, 2006).

2.5. Características do Distrito de Marromeu

A distribuição e a densidade da vegetação em Marromeu são fortemente condicionadas por fatores naturais e antrópicos. Entre os fatores naturais, destaca-se o pulso hidrológico anual do rio Zambeze, que, durante a estação chuvosa, provoca inundações que distribuem sedimentos e nutrientes, promovendo a regeneração de gramíneas perenes e espécies adaptadas a solos aluviais (Junk et al., 1989). Além disso, queimadas naturais de baixa intensidade, muitas vezes provocadas por raios, desempenham um papel ecológico no controle de espécies invasoras e na reciclagem de nutrientes (Chidumayo, 1997).

2.5.1. Clima

A região apresenta clima tropical húmido, caracterizado por duas estações distintas: seca e chuvosa entre novembro e março e outra seca entre maio e outubro. A precipitação média anual situa-se entre 900 e 1 100 mm, sendo mais de 70% concentrada na estação chuvosa, especialmente em janeiro e fevereiro. A temperatura média anual ronda os 24 °C, com máximas mensais em torno de 32 °C na

época quente e mínimas próximas de 16 °C durante a estação seca. A humidade relativa apresenta valores superiores a 75% no período chuvoso e diminui para 55 - 65% nos meses secos (MITADER, 2015; INAM, 2021).

2.5.2. Solos

Em geral os solos são profundos, ricos em matéria orgânica e com capacidade de retenção da água e nutrientes, capazes de sustentar a produção de uma grande variedade de culturas agrícolas ao longo de muitos anos (solos aluviários). Porém, podem ser negativamente afetados por alagamento durante os anos de elevada precipitação. Os solos estuarinos marinhos são salinos, com baixo potencial para agricultura, enquanto que o solo arenoso tem baixa capacidade de retenção de nutrientes e água, mas nos anos de inundações são importantes para garantir a segurança alimentar (MAE, 2005).

2.5.3. Hidrologia

A hidrologia do sistema é dominada pelo rio Zambeze, cujo pulso de cheia sazonal condiciona a deposição de sedimentos e a fertilidade da planície de inundação. As descargas médias de pico anual rondam os 5 900 m³ s⁻¹, com variações interanuais significativas entre 1 900 e 10 000 m³ s⁻¹, podendo ser superiores em eventos extremos. O período de maior descarga ocorre geralmente entre fevereiro e março, influenciando diretamente a regeneração da vegetação de várzea e a formação de bancos de areia no estuário (Beilfuss & Brown, 2006).

2.5.4. Dinâmica costeira

A dinâmica costeira do distrito de Marrromeu resulta da interação entre processos fluviais, marinhos e atmosféricos que moldam continuamente a linha de costa. A descarga sazonal do rio Zambeze constitui o principal fator de aporte sedimentar, redistribuído posteriormente pela ação das marés e correntes litorâneas. Esse equilíbrio entre transporte e deposição de sedimentos condiciona a estabilidade morfodinâmica da costa, originando alternadamente setores de acreção e erosão. O avanço da linha de costa em determinadas áreas reflete a deposição sedimentar em ambientes estuarinos, enquanto o recuo em outras zonas está associado à ação erosiva de ondas, tempestades e correntes de maré (Beilfuss & Brown, 2006; Woodroffe et al., 2016).

2.5.5. Vegetação e Flora

A vegetação no Complexo de Marrromeu (CM) está intimamente relacionada com a vasta rede hidrográfica do distrito, com os ciclos de inundação e até com as variações diárias das marés. No Complexo de Marrromeu o mangal vem sofrendo distúrbios devido a atividades humanas como corte

de estacas para a construção de habitações locais, as espécies dominantes são o mangal branco (*Avicennia marina*), *Rhizophora mucronata*, *Ceriops tagal*, *Xilocarpus granatum* e *Bruguiera gymorrhiza* (CEAGRE, 2016).

2.5.6. Pressões antrópicas

O Complexo de Marromeu enfrenta diversas pressões humanas que comprometem a resiliência ecológica. As queimadas descontroladas ocorrem com elevada frequência, em média de dois a três eventos por ano em cada unidade espacial, afetando em certos anos mais de 20-30% da superfície. Análises dNBR indicam predominância de queimadas de baixa a moderada severidade, mas com focos localizados de alta intensidade em períodos de seca prolongada (Rebelo & Richards, 2010; CEAGRE, 2016). A pressão agrícola é outro fator relevante, destacando-se a Companhia de Sena, que ocupa aproximadamente 10 000 hectares com plantações de cana-de-açúcar, além da agricultura de subsistência praticada pelas comunidades locais (Palalane et al., 2015). O corte de madeira para construção e combustível, associado ao crescimento populacional, intensifica a degradação dos mangais e aumenta a vulnerabilidade costeira.

2.5.7. Mangais

Os mangais são ecossistemas costeiros de grande relevância ecológica, caracterizados pela presença de árvores adaptadas a solos alagados e com elevada salinidade. Estes ambientes são considerados zonas de transição entre os sistemas marinhos e terrestres e desempenham funções ambientais fundamentais, como a proteção das margens contra a erosão, a estabilização dos sedimentos, a regulação hidrológica e o sequestro de carbono (Alongi, 2015).

Em Moçambique, os mangais distribuem-se ao longo de grande parte da costa, incluindo o delta do Zambeze e a Reserva de Marromeu. Estes ambientes são, no entanto, vulneráveis às pressões humanas, como o corte de madeira para construção e combustível, a expansão agrícola, a urbanização e a aquacultura. As mudanças climáticas também representam uma ameaça crescente, através da subida do nível do mar e da intensificação de tempestades costeiras (Spalding, et al., 2014).

2.5.8. Importância Ecológica

A importância ecológica dos mangais ultrapassa os limites ambientais e alcança a dimensão socioeconômica. Esses ecossistemas oferecem proteção natural contra ciclones tropicais e marés altas, funcionando como barreiras que reduzem o impacto das inundações nas zonas costeiras. Além

disso, desempenham papel essencial na ciclagem de nutrientes e na manutenção da qualidade da água, sendo considerados ecossistemas-chave para a resiliência climática (Friess et al., 2020).

O Complexo de Marromeu foi designado sítio Ramsar por reunir ecossistemas de elevada relevância ecológica, como planícies de inundação, mangais e lagoas costeiras, que sustentam espécies ameaçadas, grandes herbívoros e aves aquáticas migratórias em concentrações superiores a 20.000 indivíduos. Além de abrigar habitats críticos para a reprodução e alimentação de peixes e aves, o local assegura a manutenção da biodiversidade regional e desempenha papel estratégico na conservação em escala internacional (Beilfuss & Brown, 2006; Ribeiro et al., 2016).

2.6. Mudanças climáticas e pressões antrópicas em ambientes costeiros

As mudanças climáticas têm intensificado a vulnerabilidade dos ecossistemas costeiros. O aumento do nível do mar e a frequência de eventos extremos resultam em maior risco de erosão, perda de habitats e deslocamento populacional (IPCC, 2021). Em paralelo, pressões antrópicas, como a agricultura extensiva, queimadas descontroladas e expansão urbana, afetam a regeneração da vegetação e comprometem a resiliência natural (Rebelo & Richards, 2010; CEAGRE, 2016).

2.7. Queimadas descontroladas

O fogo é uma perturbação importante na manutenção da diversidade e função de ecossistemas naturais na África subsahariana e é uma ferramenta de manejo das pastagens. No entanto, quando as queimadas ocorrem a alta frequência e alta intensidade, podem limitar a capacidade de regeneração das comunidades bióticas e causar perdas de biodiversidade (CEAGRE, 2016).

Segundo Rebelo e Richards (2010) devido à redução do fluxo hidrológico na planície de inundação, nos anos de seca prolongada, as queimadas neste habitat são de alta intensidade devido à existência de abundante biomassa herbácea que serve de combustível. Um estudo sobre a ocorrência de queimadas revelou que entre 2002 e 2007, em média cerca de 50% da RNM queimou anualmente tendo em 2006 atingido o máximo com as queimadas a atingirem cerca de 73% da área da Reserva. Com base nas observações realizadas durante o reconhecimento aéreo em Novembro de 2015 estima-se que mais de 80% da planície de inundação tenha sido queimada. Na floresta aberta, as queimadas são frequentes e propagam-se com muita facilidade por ser um tipo de vegetação não inundado e sujeito a períodos secos de 4-5 meses/ano. Os focos de queimadas descontroladas estão concentrados nas proximidades dos aglomerados da população humana (Figura 1).

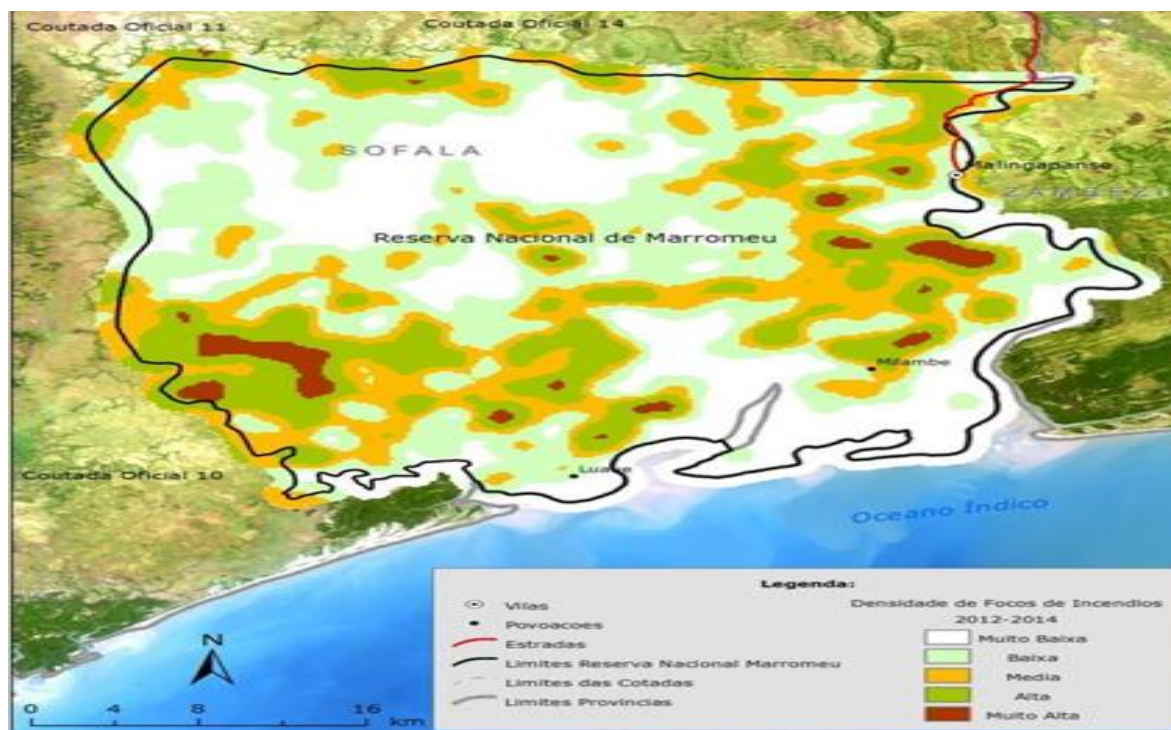


Figura 1: Distribuição espacial da densidade de focos de queimadas na RNM entre 2012 e 2014.

Fonte: CEAGRE, 2016.

2.8. Validação e análise de acurácia

A avaliação da acurácia é etapa fundamental para garantir a confiabilidade dos resultados. A matriz de confusão, combinada com métricas como a acurácia global, acurácia do usuário, acurácia do produtor e coeficiente Kappa, permite avaliar a correspondência entre a classificação e os dados de referência (Congalton, 1991). Segundo Landis & Koch (1977), consideram que valores de Kappa acima de 0,80 indicam excelente concordância, entre 0,60 e 0,80 indicam concordância substancial, e abaixo de 0,40 indicam concordância fraca.

Tabela 1: Qualidade da classificação segundo intervalos de coeficiente de concordância.

VALOR KAPPA	QUALIDADE DA CLASSIFICAÇÃO
<0,00	Péssima
0,00 – 0,20	Ruim
0,20 – 0,40	Razoável

0,40 – 0,60	Boa
0,60 – 0,80	Muito boa
0,80 – 1,00	Excelente

Fonte: Adaptado de Landis e Koch (1977).

2.9. Sentinel-2: Características e Aplicações no Monitoramento Ambiental

O Sentinel-2 faz parte do programa Copernicus, uma iniciativa da União Europeia voltada para a observação da Terra, e é composto por dois satélites gêmeos Sentinel-2A (lançado em 23 de junho de 2015) e Sentinel-2B (lançado em 7 de março de 2017). Eles operam em órbita heliossíncrona a aproximadamente 786 km de altitude, com uma inclinação de 98,6°, garantindo revisita de 5 dias na linha do equador quando operam em conjunto (Drusch et al., 2012).

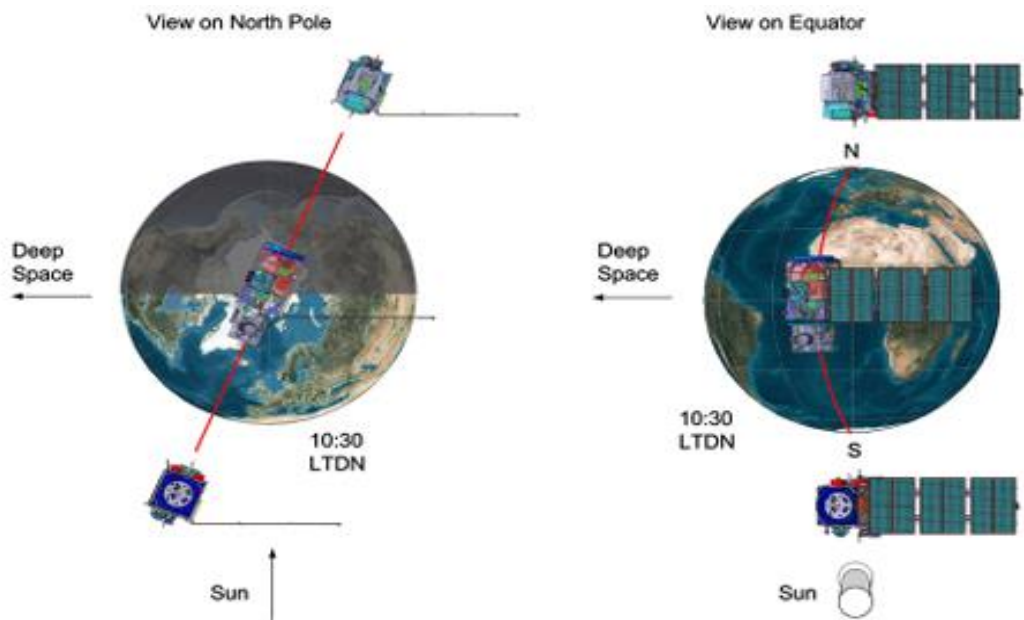


Figura 2: Configuração orbital do satélite Sentinel-2 (Astrium-GmbH) (Drusch et al., 2012).

2.10. Especificações técnicas

O instrumento a bordo, o MSI (MultiSpectral Instrument), captura dados em 13 bandas espectrais distribuídas nos intervalos do visível, infravermelho próximo (NIR) e infravermelho de ondas curtas (SWIR):

2.10.1. Resolução espacial de 10 metros

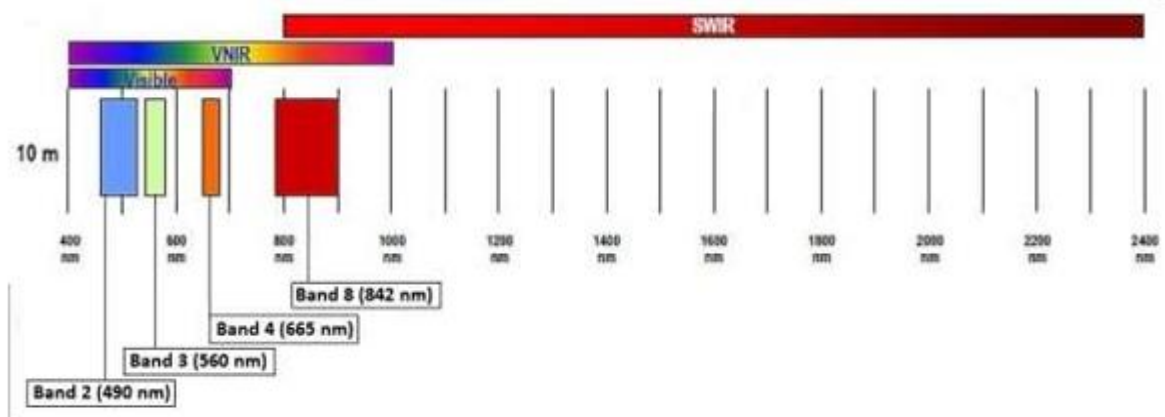


Figura 3: Sentinel-2 resolução espacial de 10 metros: B2 (490 nm), B3 (560 nm), B4(665 nm) e B8 (842 nm)(ESA, 2015).

Fonte: Adaptado de ESA (2015).

2.10.2. Resolução espacial de 20 metros

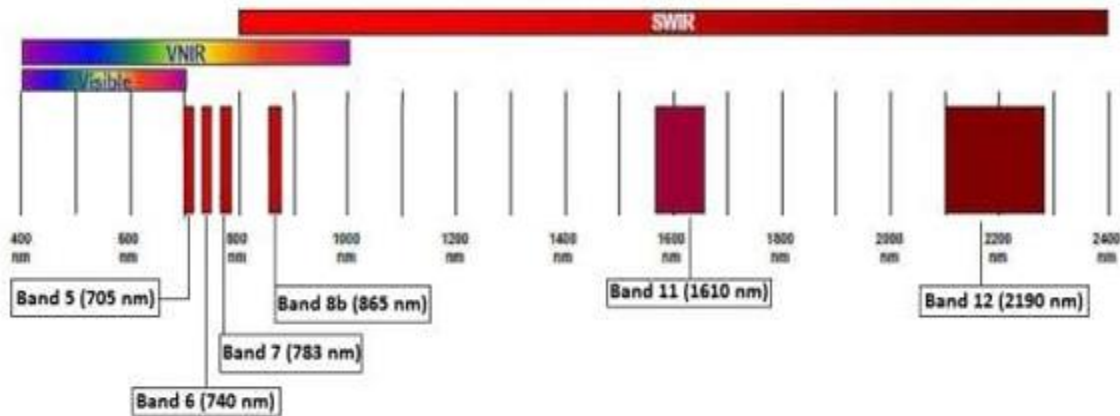


Figura 4: Sentinel 2 resolução espacial de 20 metros: B5 (750 nm), B6 (740 nm), B7 (783 nm), B8b (865 nm), B11 (1610 nm) e B12 (2190 nm)(ESA, 2015).

Fonte: Adaptado de ESA (2015).

2.10.3. Resolução espacial de 60 metros

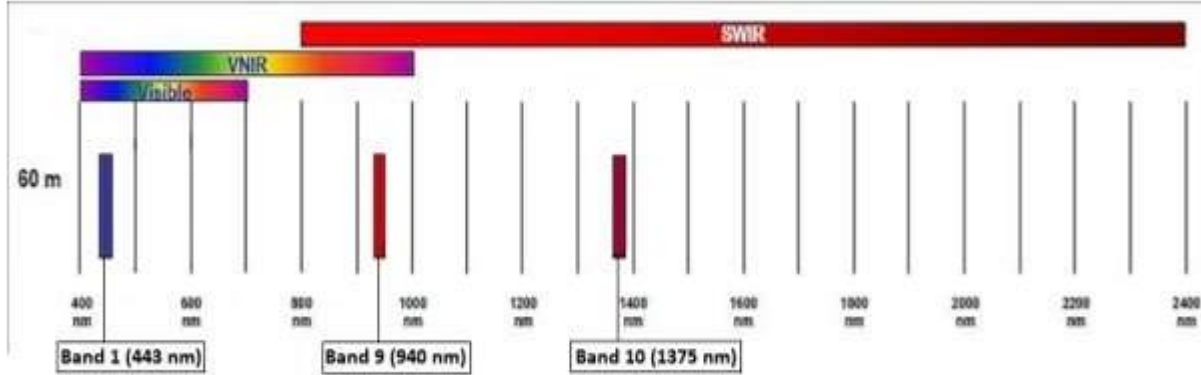


Figura 5: Sentinel-2 resolução espacial de 60 metros: B1 (443 nm), B9 (940 nm) e B10 (1375 nm) (ESA, 2015).

Fonte: Adaptado de ESA (2015).

2.11. Níveis de processamento

O Sentinel-2 disponibiliza diferentes produtos:

1. **Nível 1C:** valores de *Top-of-Atmosphere reflectance* (TOA), ortorretificados e com correção geométrica.
2. **Nível 2A:** valores de *Surface Reflectance* (SR), já corrigidos atmosféricamente pelo processador **Sen2Cor**. Incluem a **banda SCL (Scene Classification Layer)**, que classifica cada pixel em 12 categorias, como vegetação, água, sombra de nuvem, nuvem fina e nuvem densa (Louis, et al., 2016).

O produto L2A é o mais indicado para análises de uso e cobertura da terra, pois elimina o efeito atmosférico, aproximando a reflectância dos valores reais na superfície.

2.11.1. Vantagens e Limitações para uso costeiro

Tabela 2: Vantagens e Limitações para uso costeiro do satélite Sentinel-2.

Vantagens	Limitações	Referências
Alta resolução espacial (10–20 m), adequada para o mapeamento detalhado de ambientes costeiros.	Dependência de condições atmosféricas favoráveis, já que a presença de nuvens e neblina pode comprometer a captura de dados.	Drusch et al. (2012)

Alta resolução espectral, com múltiplas bandas que permitem a extração de índices de vegetação e de água (NDVI, NDWI, MNDWI).	A resolução temporal de 5 dias pode ainda ser insuficiente em regiões tropicais com cobertura persistente de nuvens.	Woodcock & Zhu (2012)
Curto tempo de revisita (5 dias), facilitando o monitoramento contínuo de dinâmicas costeiras.	Necessidade de pré-processamento (correções atmosféricas e radiométricas) para garantir comparabilidade temporal.	Pahlevan et al. (2017)
Disponibilidade gratuita e global dos dados, favorecendo análises em larga escala.	Volume de dados elevado, exigindo infraestrutura computacional e conhecimento técnico para processamento.	Aschbacher & Milagro-Pérez (2012)
Inclusão da banda Scene Classification Layer (SCL), que auxilia na identificação de nuvens, sombras e vegetação.	Classificação automática da SCL pode conter erros e exigir validação em campo.	ESA (2017)

CAPÍTULO III: MATERIAIS E METÓDOS

3.1. Descrição da Área de estudo

A área de interesse neste estudo é o Complexo de Marromeu (CM), que localiza-se na Província de Sofala e ocupa uma área de 10 544 Km², abrangendo os distritos de Cheringoma, Marromeu e Muanza. O Complexo de Marromeu é limitado a Nordeste pelos distritos de Chinde e Mopeia (província de Zambézia) através do rio Zambeze, Noroeste pelo distrito de Caia, a Oeste pelo distrito de Cheringoma e a Sul o Oceano Índico (Macamo, 2024). A sua localização geográfica, o clima e o relevo, fazem com que esta seja habitada por uma elevada diversidade de espécies de fauna e flora marinha, costeira, aquática e terrestre. Ao nível regional, a RNM ocupa a parte mais baixa e pantanosa do Complexo de Marromeu (CM), o qual é parte da paisagem Gorongosa-Marromeu, uma área vasta, rica em diversidade e com várias iniciativas de conservação. O CM, para além da RNM, inclui duas reservas florestais (Reserva Florestal de Nhampacué e Reserva Florestal de Inhamitanga), quatro coutadas oficiais (Coutada Oficial no 10, 11, 12, e 14), extensas terras para a agricultura comercial (notavelmente as da Companhia de Sena, a maior plantação de açúcar em Moçambique), concessões florestais, fazendas do bravio e terras comunitárias (Ribeiro et al., 2016).

Província de Sofala - Distrito de Marromeu

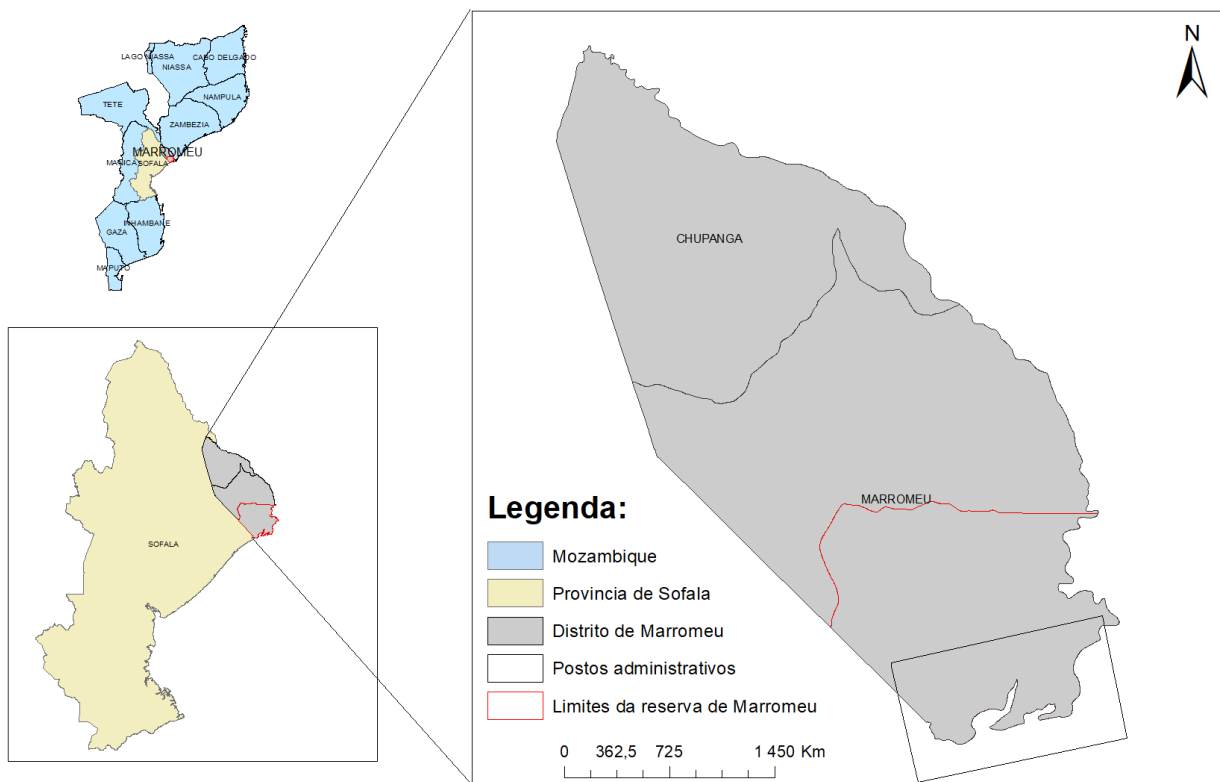


Figura 6: Localização da área de estudo, Província de Sofala, Distrito de Marromeu, onde o retângulo mais a sul representa a áreas onde foi feita a análise de processos costeiros.

3.2. Dados

3.2.1. Imagens de Satélite

Para este estudo foram utilizadas imagens do satélite Sentinel-2, disponibilizadas pelo programa europeu Copernicus, no período compreendido entre 2016 e 2025. As imagens foram adquiridas no nível de processamento L2A, que oferecem produtos ortorretificados e corrigidos atmosféricamente. A escolha pelo Sentinel-2 justifica-se por sua alta resolução espacial (10 a 20 metros), ampla cobertura multiespectral que permite discriminar diferentes tipos de cobertura e uso do solo e alta frequência de revisita (5 dias), o que garante maior disponibilidade temporal de dados. Além disso, trata-se de um sensor gratuito e de acesso aberto, fator fundamental para pesquisas em regiões em desenvolvimento, onde recursos para aquisição de dados comerciais podem ser limitados.

A seleção das imagens procurou minimizar os efeitos da sazonalidade, assegurando que as cenas utilizadas fossem adquiridas em períodos comparáveis do ano, preferencialmente no auge da estação seca (junho a agosto). Ao concentrar as análises em datas próximas, dentro da mesma estação, reduziu-se a influência dessas variações sazonais sobre os índices espectrais e garantiu-se maior consistência na avaliação multi temporal da vegetação e da linha de costa.

Tabela 3- Conjunto de imagens Sentinel-2 (nível L2A) selecionados para a análise multi temporal.

Dados	Hora (UTC)	ID do bloco	ID do grânulo (L2A)	Sensor	Cobertura de Nuvens (%)	Estação do Ano
11/07/2016	07:31	T36KZE	S2A_MSIL2A_20161107T073112_N0500_R049_T36KZE_20230925T122212	Sentinel-2 L2A	9.92	Época seca
14/07/2020	07:26	T36KZE	S2B_MSIL2A_20200714T072619_N0500_R049_T36KZE_20230322T165537	Sentinel-2 L2A	9.98	Época seca
18/07/2025	07:26	T36KYE	S2B_MSIL2A_20250718T072619_N0511_R049	Sentinel-2 L2A	9.85	Época seca

			_T36KYE_20250718T0 95941			
--	--	--	-----------------------------	--	--	--

3.2.2. Dados Complementares

Como apoio às análises, foram utilizados dados cartográficos auxiliares, incluindo shapefiles contendo informações de hidrografia, limites administrativos e curvas de nível, os quais possibilitaram maior precisão na delimitação da área de estudo. Também foram considerados registros secundários provenientes de relatórios técnicos, literatura científica e políticas de conservação relacionadas à Reserva Nacional de Marromeu e ao Complexo do Delta do Zambeze, os quais foram utilizados para fornecer contexto ecológico e socioambiental, permitindo comparar os padrões observados no uso e cobertura da terra com informações previamente documentadas, validar interpretações e apoiar a discussão dos resultados à luz de dados históricos e políticas de gestão ambiental.

3.3. Pré-Processamento das Imagens

Em princípio foi usado um computador com acesso a internet e dados, softwares instalados tais como: ArcGIS, Excel e Matlab. A partir desses softwares tornou-se possível a materialização do estudo.

As imagens Sentinel-2 foram obtidas em WGS 84 e, para compatibilização com análises espaciais locais e mapas de referência, foram reprojetaadas para o sistema UTM correspondente à zona da área de estudo (WGS 84 / UTM 36S) utilizando a ferramenta 'Project' do ArcGIS. Esse procedimento garante que todas as camadas estejam no mesmo sistema de coordenadas, facilitando a análise e interpretação espacial.

O pré-processamento das imagens constituiu uma etapa essencial para assegurar a confiabilidade dos resultados. As imagens foram recortadas (clipping e Extract by Mask) de acordo com os limites da área de estudo, reduzindo o volume de dados e concentrando a análise no distrito de Marromeu.

Em seguida aplicada ainda uma máscara de nuvens e sombras, minimizando distorções comuns em áreas tropicais e costeiras, onde a nebulosidade é frequente. Posteriormente, foram geradas composições RGB e de bandas no infravermelho próximo e de ondas curtas, que se mostraram relevantes para a diferenciação da vegetação, água e áreas de solo exposto.

Utilizou-se a banda SCL para identificar e remover pixels classificados como:

- 3 - Sombras de nuvens
- 7 - Probabilidade baixa de nuvens
- 8 - Nuvens de média probabilidade
- 9 - Alta probabilidade de nuvens
- 10 – Cirro

A operação foi realizada no “*raster calculator*” que é uma ferramenta disponível em softwares de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), como o ArcGIS, utilizada para realizar operações matemáticas, lógicas ou algébricas sobre dados matriciais (*rasters*). Cada célula do raster armazena um valor numérico (refletância, altitude, índice espectral, etc.), e o raster calculator permite manipular esses valores para gerar novas camadas temáticas como a seguinte expressão:

$$M_{nuvem + sombras}(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{se } SCL(x, y) \in \{3,8,9,10\} \\ 0, & \text{Caso contrario} \end{cases}$$

Equação 1: Mascara de nuvens e sombras SCL

onde:

- SCL(x,y) é o valor da camada SCL no píxel (x,y).
- Os valores {3,8,9,10} correspondem respetivamente a: sombra de nuvem (shadow) , Nuvens médias (medium probability cloud), Nuvens altas (high probability cloud) e Cirrus.
- O resultado $M_{nuvem}(x,y)=1$ indica píxeis mascarados como nuvem, enquanto $M_{nuvem}(x,y)=0$ indica píxeis livres de nuvem.

Essa máscara foi aplicada sobre as bandas espectrais, eliminando os pixels contaminados por nuvens e sombras.

3.4. Classificação do Uso e Cobertura do Solo

3.4.1. Definição das Classes

A definição das classes de uso e cobertura da terra (LULC) foi estabelecida a partir da combinação de critérios ecológicos e espectrais, de modo a assegurar uma correspondência entre a resposta espectral dos alvos e a sua relevância ecológica para a área de estudo. Assim, foram consideradas classes que representam os principais ecossistemas e formas de ocupação do solo no distrito de

Marrromeu, tais como vegetação densa/mangal, vegetação moderada, vegetação rala, solo exposto e corpos de água. Do ponto de vista espectral, a distinção entre estas classes baseou-se em índices derivados das bandas do Sentinel-2, como o NDVI para diferenciar níveis de biomassa e vigor vegetativo, o NDWI e o MNDWI para delimitação de corpos hídricos, e o dNBR para caracterização da severidade de queimadas e áreas de regeneração (Xu, 2006; Key & Benson, 2006). A integração de critérios ecológicos foi fundamental para garantir que as classes representassem não apenas respostas espectrais distintas, mas também funções ambientais e processos ecológicos relevantes na dinâmica do delta do Zambeze (Congalton & Green, 2009).

As classes consideradas são apresentadas a seguir:

1. Vegetação densa / mangal – corresponde a formações arbóreas de elevada biomassa e dossel fechado, incluindo áreas de mangal. Espectralmente, caracterizam-se por altos valores de NDVI ($> 0,6$), forte refletância no NIR (Banda 8) e baixa absorção no vermelho (Banda 4) e no SWIR (Bandas 11 e 12).
2. Vegetação moderada – abrange formações arbustivas e florestas abertas, com biomassa e densidade intermediárias. Apresentam valores médios de NDVI (0,4-0,6), refletância intermediária no NIR e resposta variável no SWIR.
3. Vegetação rala / agricultura – inclui áreas agrícolas sazonais, pastagens e superfícies em regeneração inicial. Espectralmente, apresentam NDVI baixo a moderado (0,2-0,4), com maior variação no vermelho e valores intermediários no verde (Banda 3).
4. Solo exposto / áreas urbanizadas – refere-se a superfícies sem cobertura vegetal significativa, como solos nus, áreas de mineração, estradas e zonas urbanas. São caracterizadas por NDVI $\leq 0,2$, baixa refletância no NIR e altos valores no SWIR, associados à ausência de biomassa verde.
5. Água – engloba corpos hídricos permanentes e temporários, como rios, lagoas e áreas alagadas. Apresentam NDWI e MNDWI positivos ($> 0,3$), forte absorção no NIR e SWIR e elevada refletância no verde (Banda 3).

3.4.2. Uso e cobertura do solo

A extração das informações de uso e cobertura do solo foi auxiliada pelo emprego de índices espectrais. O NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) foi utilizado para discriminar áreas vegetadas e avaliar diferentes níveis de biomassa (Pettorelli et al., 2016).

O NDVI é calculado da seguinte fórmula:

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

Equação 2: Formula cálculo de NDVI.

3.4.2.1. Severidade das queimadas

A caracterização do uso e cobertura da terra (LULC) constitui uma etapa essencial para compreender a distribuição espacial das diferentes classes de ocupação e vegetação no distrito de estudo. Contudo, esta abordagem por si só não é suficiente para avaliar a magnitude dos distúrbios que afetam essas classes, especialmente no contexto de queimadas, que representam um dos principais fatores de alteração da paisagem em ecossistemas tropicais e costeiros. Nesse sentido, a incorporação do índice dNBR torna-se fundamental, uma vez que permite quantificar a severidade das queimadas por meio da variação espectral antes e após os eventos de fogo, complementando a análise obtida com o LULC.

Dessa forma, o cruzamento entre os resultados do LULC e da análise de severidade contribui para uma avaliação mais robusta e integrada dos processos ambientais em curso, oferecendo subsídios para a gestão territorial, a conservação dos ecossistemas sensíveis e o planejamento de estratégias de mitigação frente à recorrência de distúrbios.

Para a análise da severidade das queimadas na área de estudo foi utilizado a Taxa de queima normalizada (NBR), índice espectral amplamente empregado em estudos de distúrbios por fogo. O NBR é calculado a partir da relação entre a reflectância no infravermelho próximo (NIR) e no infravermelho de ondas curtas (SWIR) (Key & Benson, 2006).

O NBR é calculado da seguinte fórmula:

$$NBR = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)}$$

Equação 3: Formula cálculo de NBR.

➤ **Diferença da severidade das queimadas**

A detecção da severidade foi realizada através do Taxa de Queima Normalizada Diferenciada (dNBR), que consiste na diferença entre o NBR pré-fogo e o NBR pós-fogo:

O dNBR é calculado da seguinte fórmula:

$$dNBR = NBR_{\text{pré-fogo}} - NBR_{\text{pós-fogo}}$$

Equação 4: Formula cálculo de dNBR.

3.4.3. Algoritmo de Classificação

A classificação da cobertura do solo foi realizada pelo método de Máxima Verossimilhança (MaxVer), amplamente utilizado em estudos de sensoriamento remoto por se basear em fundamentos estatísticos robustos e probabilísticos. O algoritmo assume que os valores espectrais de cada classe seguem uma distribuição normal multivariada, permitindo estimar a probabilidade de cada pixel pertencer a uma determinada classe (Jensen, 2005).

3.4.3.1. Definição do número de classes

Foram consideradas cinco classes principais de uso e cobertura da terra, definidas a partir de critérios ecológicos e espectrais, conforme descrito na seção anterior: (i) vegetação densa/mangal, (ii) vegetação moderada, (iii) vegetação rala/agricultura, (iv) solo exposto/áreas urbanizadas e (v) água. Essa definição fundamenta-se na literatura especializada (Spalding et al., 2010; Lambin et al., 2003).

3.4.3.2. Aplicação do classificador

Após a definição das classes de uso e cobertura da terra (LULC), procedeu-se à aplicação do classificador supervisionado Máxima Verossimilhança (MaxVer), amplamente utilizado em estudos de sensoriamento remoto devido à sua robustez estatística. Este algoritmo baseia-se no pressuposto de que a distribuição espectral das classes segue uma função de probabilidade normal multivariada, avaliando a probabilidade de cada píxel pertencer a determinada classe com base nos parâmetros derivados das amostras de treino (Jensen, 2005).

Para o treinamento do classificador, foram selecionadas amostras representativas de cada classe LULC, de acordo com critérios ecológicos e espectrais previamente definidos. Cada conjunto de treino foi extraído a partir da inspeção visual de composições coloridas e índices espectrais,

complementados por conhecimento prévio da área. As amostras foram distribuídas de forma a cobrir a variabilidade interna das classes, evitando redundância espacial e garantindo representatividade.

3.4.3. Avaliação da Acurácia

A avaliação da acurácia de uma classificação é uma técnica aplicada para quantificar a taxa de proximidade do resultado da classificação do uso e cobertura do solo em relação a imagem de referência com maior resolução espacial.

A qualidade dos mapas produzidos foi avaliada por meio da construção de uma matriz de confusão, a partir da qual foram calculados a acurácia global e o coeficiente Kappa, conforme os critérios de Landis & Koch (1977). Essa avaliação garantiu a validação estatística da classificação, permitindo aferir a confiabilidade dos resultados obtidos.

A acurácia da classificação foi avaliada por meio de uma Matriz de Confusão, utilizando 100 pontos aleatórios (Random points) gerados sobre a imagem classificada e comparados com uma imagem de referência. A validação baseou-se em dados de Google Earth Pro, permitindo verificar se os pontos atribuídos a cada classe coincidiam com as coberturas observadas, metodologia semelhante à aplicada por Furaca et al., (2021).

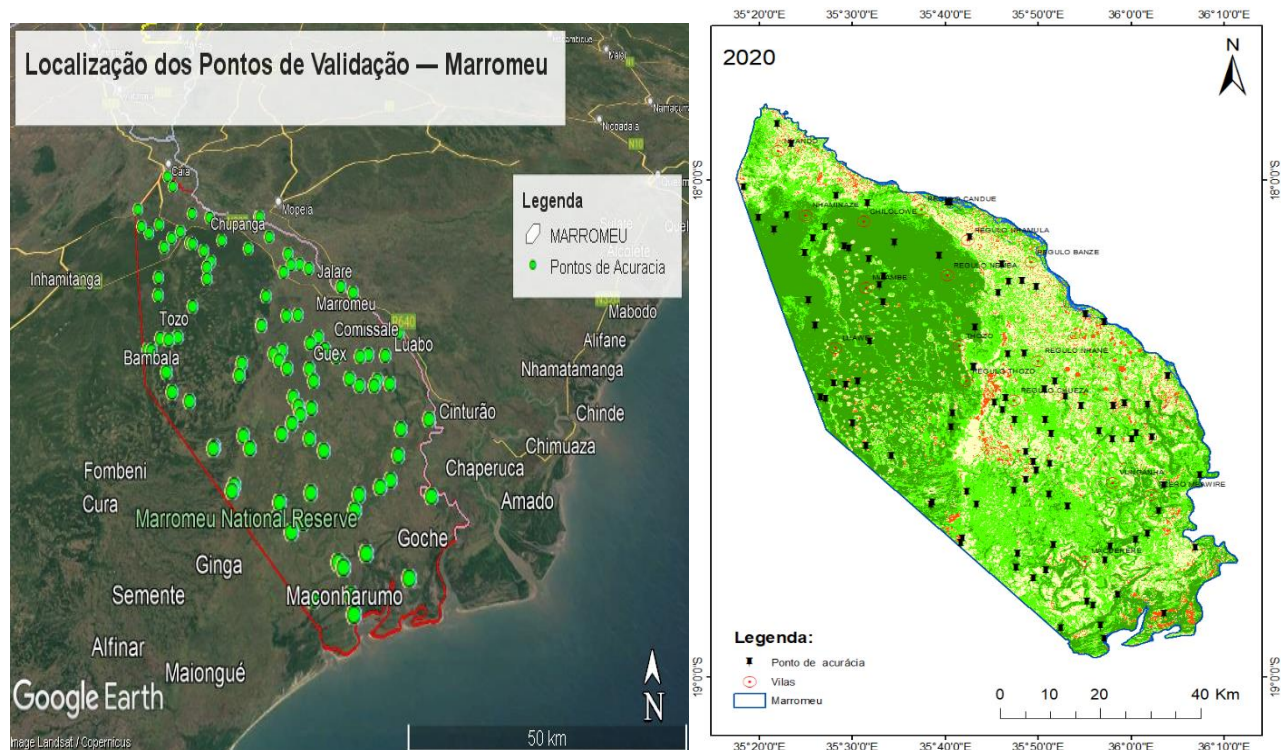


Figura 7: Ilustração de pontos aleatórios no Google Earth Pro extraídos da imagem classificada do Sentinel-2.

3.5. Processos costeiros

O índice NDWI, proposto por McFeeters (1996), foi concebido visando maximizar a reflectância da água na banda do verde e minimizar a reflectância na banda NIR (Infravermelho próximo). Para este estudo, o cálculo do NDWI foi aplicado para auxiliar a informação sobre a presença dos recursos hídricos em imagens de sensoriamento remoto do Sentinel-2 usando proporções de bandas do verde e do infravermelho próximo (NIR), permitindo maior precisão na delimitação da linha de costa e de áreas alagadas.

O NDWI é calculado da seguinte fórmula:

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

Equação 5: Formula cálculo de NDWI.

O índice MNDWI concebido por Xu (2006) e tem como objetivo minimizar a principal limitação do NDWI, a ineficiência em suprimir o ruído proveniente das características das áreas construídas. Assim, o índice foi desenvolvido considerando que um corpo hídrico apresenta maior absorção na banda SWIR (Infravermelho de ondas curtas) se comparado ao da banda NIR, diferentemente das áreas construídas. Para o estudo, o cálculo do MNDWI foi aplicado para melhorar a informação sobre as características dos corpos hídricos, em imagens do Sentinel-2 usando proporções de bandas do verde e infravermelho médio (SWIR).

O MNDWI é calculado da seguinte fórmula:

$$MNDWI = \frac{(Green - SWIR)}{(Green + SWIR)}$$

Equação 6: Formula cálculo de MNDWI.

3.5.1. Análise da Linha de Costa

A dinâmica costeira foi investigada a partir da extração da linha de costa em diferentes momentos (2016, 2020 e 2025). Para tal, foi aplicado o limiar espectral derivado dos índices NDWI e MNDWI, possibilitando a diferenciação precisa entre ambientes aquáticos e terrestres. As linhas resultantes foram vetorizadas e comparadas em ambiente SIG.

A análise da evolução da linha de costa foi realizada por meio da sobreposição das linhas vetorizadas em diferentes anos. As feições extraídas foram convertidas para o formato raster e padronizadas em termos de resolução espacial. Com o auxílio da ferramenta “Raster Calculator”, calcularam-se as diferenças espaciais entre os distintos períodos (2016-2025).

A quantificação das alterações foi realizada com base na comparação da posição das linhas de costa, em áreas de estudo (A, B e C), de forma a identificar padrões espaciais diferenciados de erosão e deposição (acrecção) sedimentar, relacionando-os com as características da cobertura vegetal e dos processos hidrodinâmicos locais.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Validação das imagens de Sentinel-2

A matriz de confusão (tabela 4) resultou da comparação entre as classes resultantes da classificação supervisionada de imagem do Sentinel-2 e os pontos de referência de validação onde foi possível avaliar o desempenho do mapeamento de uso e cobertura de Terra/Solo no distrito de Marromeu.

Os resultados evidenciam que para a classe corpos de água apresentou acurácia do produtor igual a 1 e acurácia do usuário também igual a 1, indicando que todos os pontos de referência foram corretamente identificados no mapa e que não houve confusão com pixels de outras classes. A classe Solo exposta/Área urbanizada apresentou acurácia do produtor igual a 1, porém a acurácia do usuário de 0,60, evidenciando que, embora todos os pontos de solo expostos tenham sido classificados corretamente, 40% dos pixels classificados podem ter se confundidos com outras classes. Para classe de Vegetação rala/Agricultura apresentou acurácia do produtor de 0,88 e acurácia do usuário de 0,88, refletindo boa correspondência entre dados classificados e de referência, com baixa incidência de erros de omissão e comissão. Para a Vegetação moderada, a acurácia do produtor foi de 0,97 e o usuário de 0,90, destacando excelente desempenho com poucos erros. A classe Vegetação densa/Mangal obteve acurácia do produtor igual a 1 e acurácia do usuário de 0,97, indicando praticamente nenhuma confusão com os pixels de outras classes. A acurácia global obtida para os pontos de referência foi de 0,93, que significa que 93% das amostras (pontos) foram definidas corretamente.

Tabela 4: Estimativa geral de precisão fornecida pela verificação de base combinada e pontos de validação selecionados aleatoriamente para 2020.

Classes	C.água	S.Exposto	V.Rala	V.Moderada	V.Densa	Total	A.Usuário	C.Kappa
C. água	3	0	0	0	0	3	1	0
S. exposto	0	6	0	0	0	6	0.6	0
V. Rala	0	2	15	0	0	17	0.88	0
V.Moderada	0	0	2	35	0	39	0.9	0
V. Densa	0	0	0	1	34	35	0.97	0
Total	3	10	17	36	34	100		
A. P (%)	100	60	88.2	97.2	100			

C. Kappa	0	0	0	0	0				0.9
----------	---	---	---	---	---	--	--	--	-----

A tabela 5 corresponde à matriz de confusão resultante da avaliação de acurácia do mapa de severidade de queimadas, permitindo verificar o grau de concordância entre as classes classificadas pelo modelo e as classes de referência obtidas por validação visual.

Observa-se que as classes de Queimadas de baixa a moderada-alta severidade apresentaram elevados níveis de concordância entre a classificação e a realidade observada, com acurácia do usuário variando entre 0,90 e 0,94, refletindo uma alta precisão na identificação dessas áreas. A classe de mudança mínima ou inalterada também apresentou desempenho satisfatório, com acurácia do produtor de 0,88 e do usuário de 1, indicando que as áreas pouco afetadas pelo fogo foram corretamente reconhecidas pelo algoritmo.

A classe de aumento da vegetação revelou acurácia do produtor de 0,78, o que sugere alguma confusão espectral com áreas de mudança mínima, possivelmente devido à semelhança nas respostas espectrais da vegetação regenerada e de áreas estáveis após o fogo. Já a classe de alta severidade foi a que apresentou menor desempenho, com acurácia do usuário de apenas 0,40, refletindo uma sub-representação dessas áreas na amostra de validação. Essa limitação é comum em paisagens onde os incêndios de alta intensidade são espacialmente restritos ou onde a presença de sombras e solos expostos interfere na resposta espectral do dNBR. A acurácia global obtida para os pontos de referência foi de 0,90 e o coeficiente Kappa de 0,87, o que indica forte concordância entre o mapa classificado e os dados de referência.

Tabela 5: Precisão do mapeamento da severidade de queimadas e da regeneração da vegetação de pontos de validação selecionados aleatoriamente para 2016.

Classes	A. vegetação	M. mínima	Q.B. Severidade	Q. Moderada-baixa	Q. Moderada-alta	Q.A. severidade	Total	A. Usuário	C. Kappa
Aumento da vegetação	7	2	0	0	0	0	9	0,78	0
Mudança mínima/inalterado	0	22	0	0	0	0	22	1	0
Q. Baixa severidade	0	0	25	2	0	0	27	0,93	0

Q. Moderada-baixa	1	0	1	19	0	0	21	0,90	0
Q. Moderada-alta	0	0	1	0	15	0	16	0,94	0
Q. Alta severidade	0	1	0	2	0	2	5	0,4	0
Total	8	25	27	23	15	2	100	0	0
A.P (%)	0,88	0,88	0,93	0,83	1	1	0	0,9	0
C. Kappa	0	0	0	0	0	0	0	0	0,87

4.2. Uso e cobertura do solo no distrito de Marromeu

A Figuras 5,6 e 7 apresentam a distribuição espacial da cobertura da terra no distrito de Marromeu para os anos de 2016, 2020 e 2025, obtida a partir de imagens do Sentinel-2 classificadas em cinco classes principais: corpos de água, solo exposto/área urbanizada, vegetação rala/agricultura, vegetação moderada e vegetação densa/mangal.

Em 2016, observa-se uma maior extensão de áreas classificadas como vegetação rala/agricultura, distribuídas principalmente no interior do distrito, indicando pressão antrópica associada a atividades agrícolas e desmatamento. Os corpos de água aparecem em menor proporção, localizados sobretudo junto ao delta do rio Zambeze e zonas costeiras.

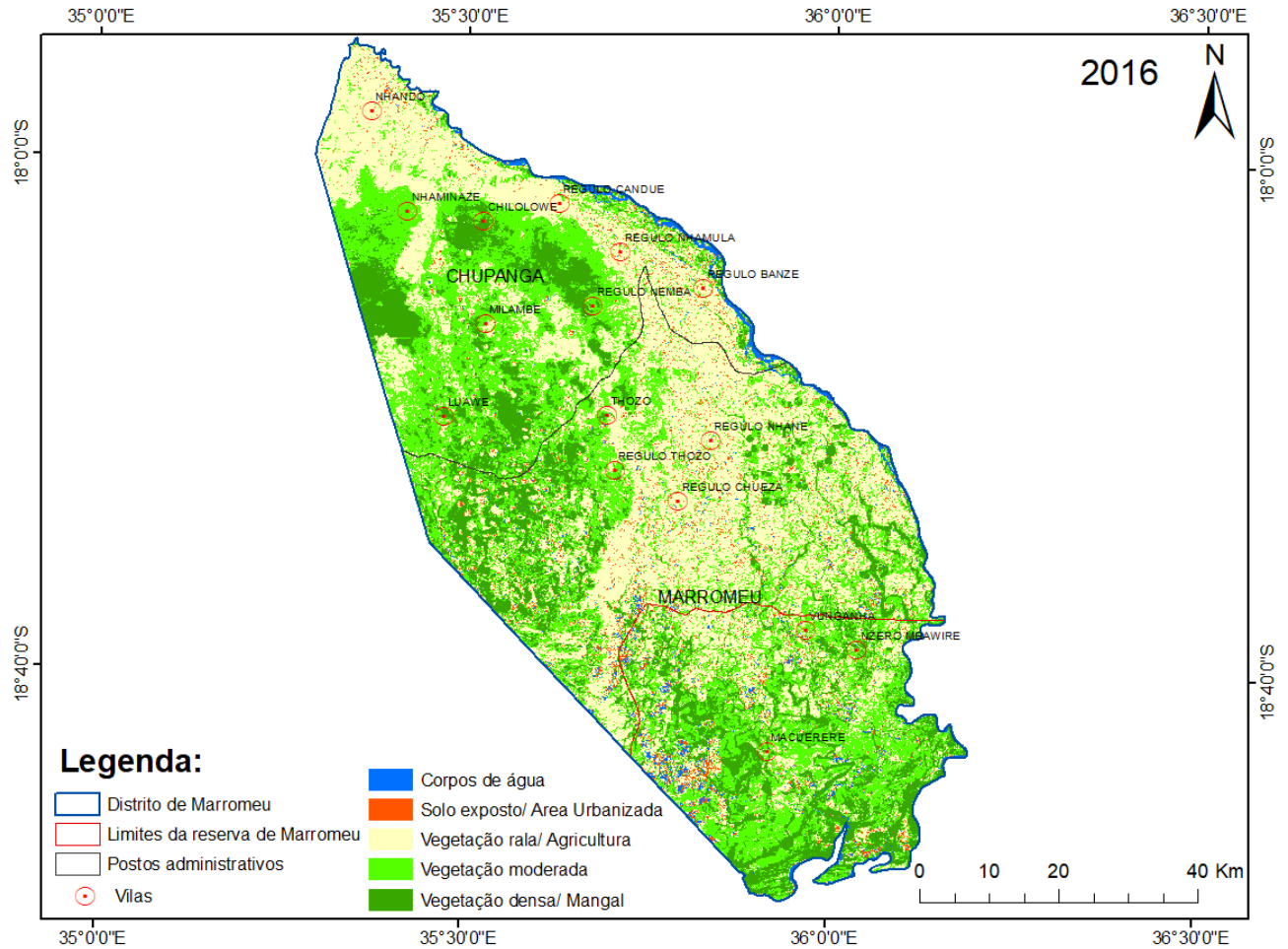


Figura 8: Mapa de Uso e Cobertura do Solo 2016.

No ano de 2020, nota-se uma redução significativa das áreas de vegetação rala/agricultura e um incremento (recuperação) das áreas de vegetação moderada e densa, sobretudo dentro dos limites da Reserva de Marromeu, evidenciando um processo de regeneração vegetal. Esse comportamento pode estar associado à diminuição da pressão agrícola em algumas regiões, bem como a políticas de conservação e processos naturais de sucessão ecológica.

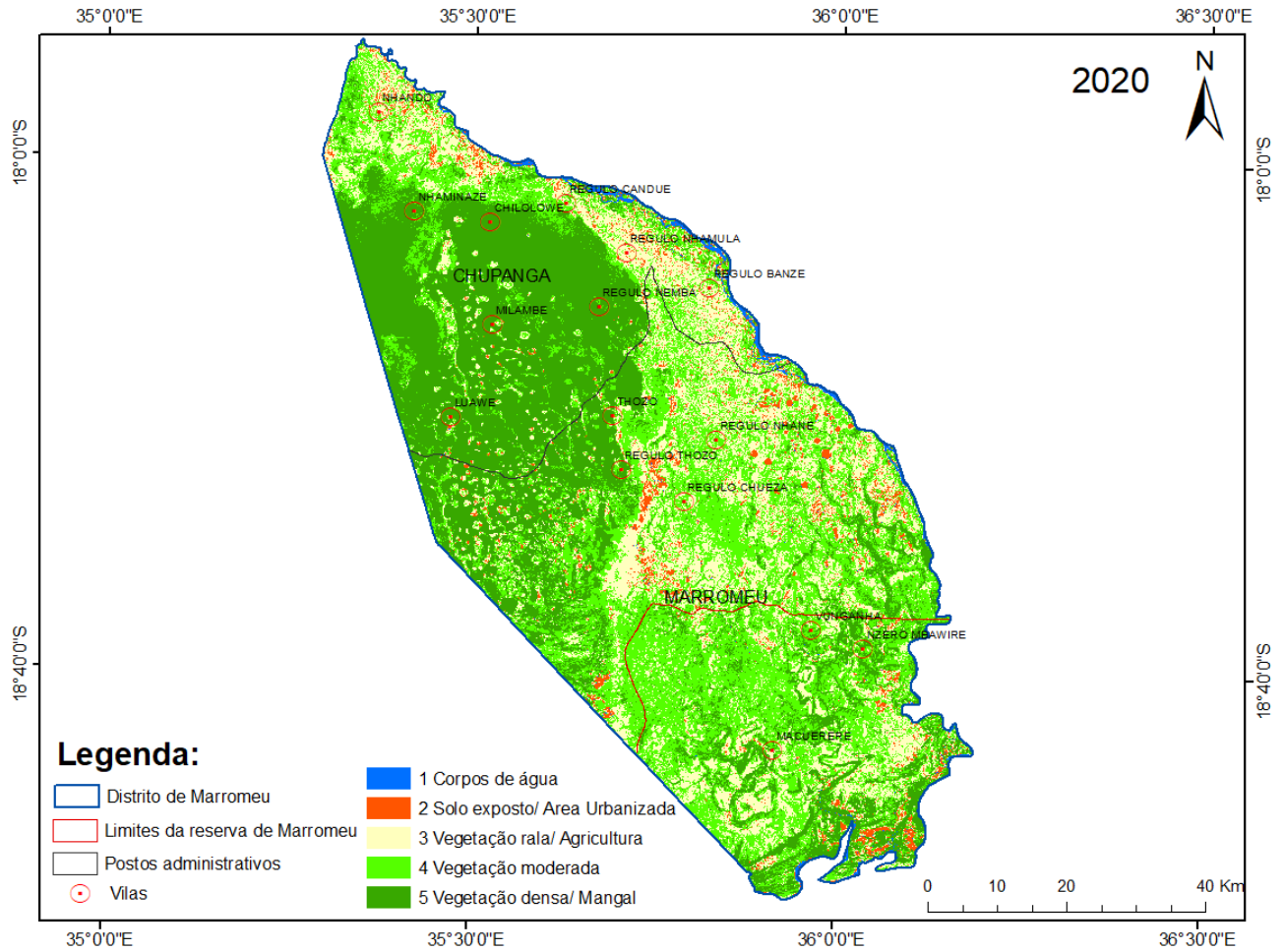


Figura 9: Mapa de Uso e Cobertura do Solo 2020.

Para o cenário de 2025, projeta-se uma expansão ainda maior da vegetação densa/mangal, principalmente nas zonas húmidas e ao longo do delta do Zambeze. As áreas de vegetação moderada também apresentam crescimento, enquanto o solo exposto sofre uma redução expressiva, sugerindo ganhos ambientais e recuperação ecológica. A manutenção da cobertura de corpos de água permanece relativamente estável entre 2020 e 2025, refletindo o equilíbrio hídrico da região.

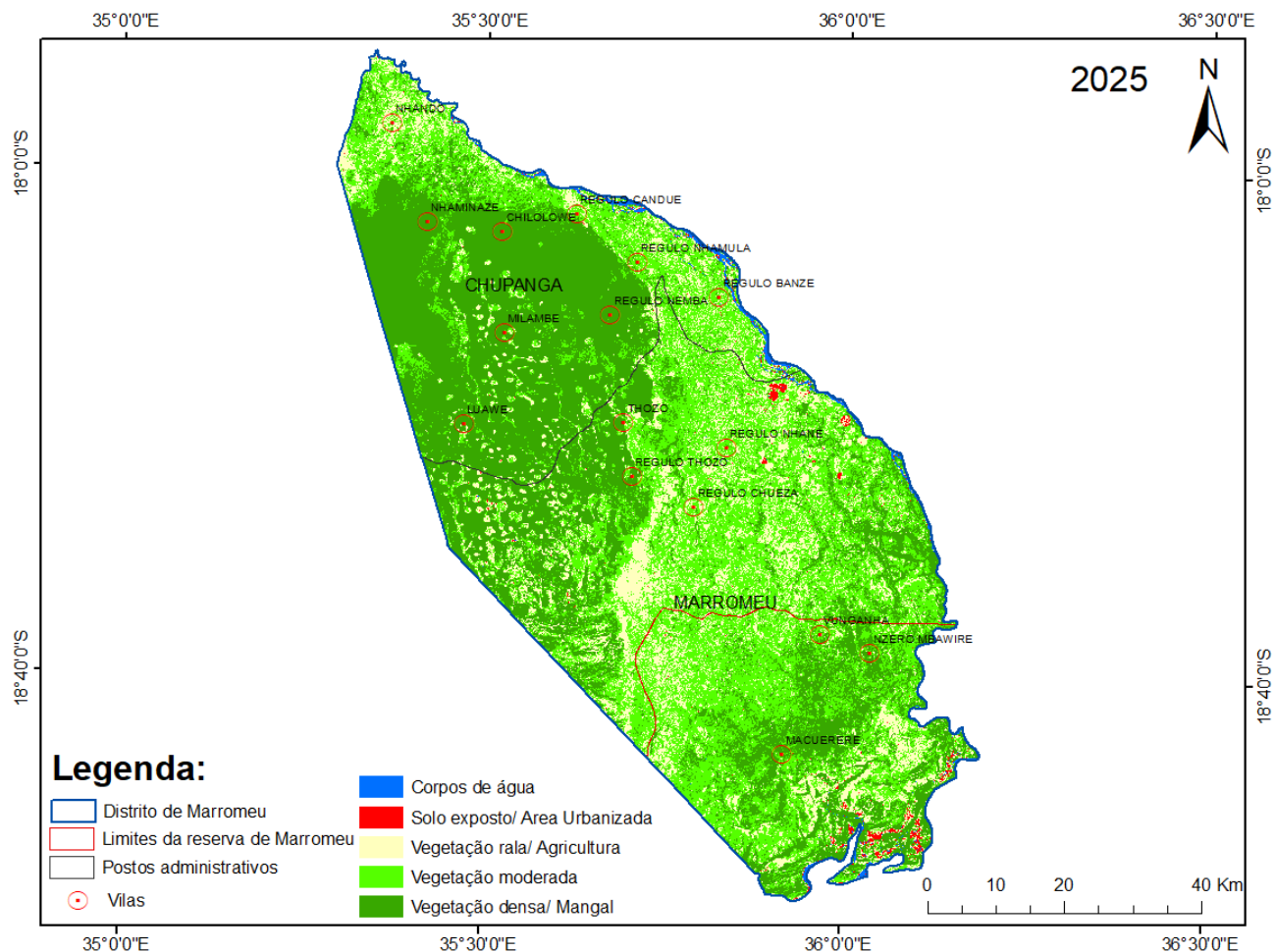


Figura 10: Mapa de uso e cobertura do solo 2025.

A figura 8 mostra a variação espaço-temporal do uso e cobertura da terra (LULC) entre 2016 a 2025, evidenciando mudanças significativas nas classes analisadas. A classe Corpos de água apresenta redução contínua, de 1,8% em 2016 para 0,8% em 2020 e 0,7% em 2025. O Solo exposto/Área urbanizada oscila de 3,1% em 2016 para 3,6% em 2020, caindo para 0,5% em 2025, possivelmente devido a regeneração vegetal ou ocupação por outras classes. A Vegetação rala/Agricultura sofre decréscimo acentuado, de 41,8% em 2016 para 23,9% em 2020 e 16,7% em 2025, indicando substituição por vegetação mais densa ou regenerada. Em sentido oposto, a Vegetação moderada cresce progressivamente, de 34,0% em 2016 para 36,0% em 2020 e 39,3% em 2025. O maior destaque é a Vegetação densa/Mangal, que aumenta de 19,3% em 2016 para 35,8% em 2020 e 42,7% em 2025, revelando forte processo de regeneração natural ou reflorestamento.

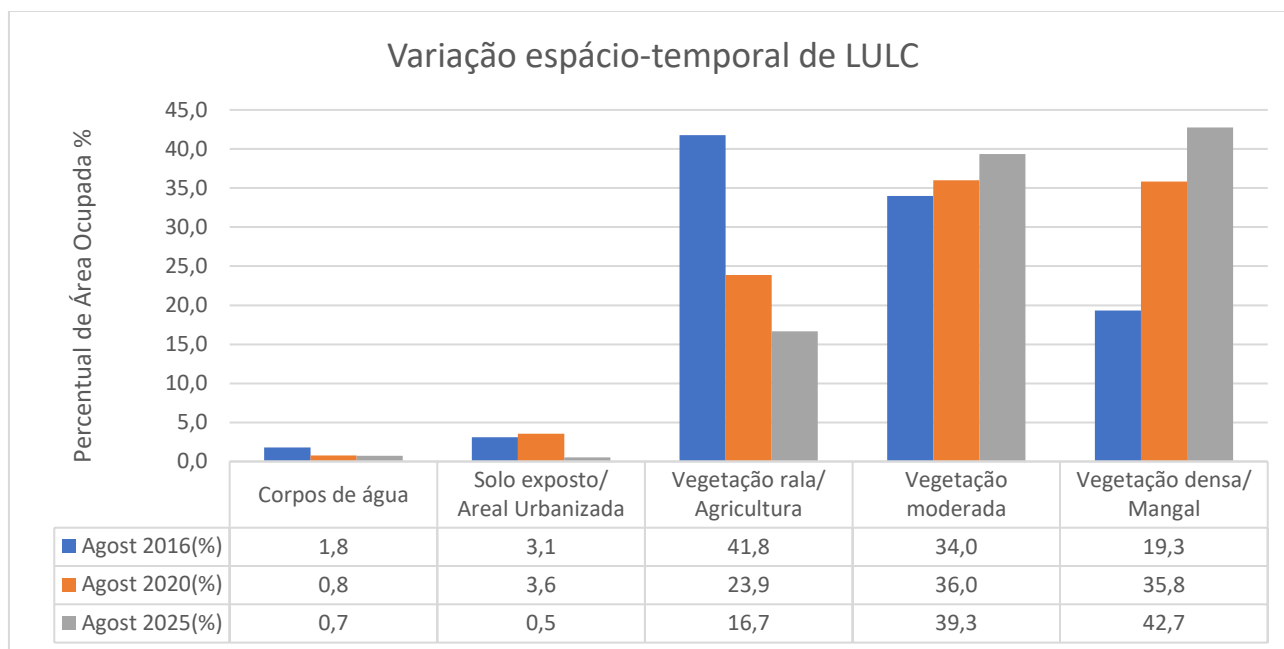


Figura 11: Gráfico da evolução do uso e cobertura do solo no período de 2016 a 2025.

4.3. Distribuição espacial da severidade de queimadas

A Figura 9 apresenta a distribuição espacial da severidade de queimadas e dos processos de regeneração da vegetação no distrito de Marromeu, obtida a partir da análise multi temporal de imagens do Sentinel-2 para os períodos 2016-2020 e 2020-2025.

Entre 2016 e 2020, observa-se um mosaico de padrões espaciais, caracterizado pela ocorrência significativa de queimadas de diferentes intensidades. Predominam áreas de queimadas de baixa a moderada severidade (classes 3 e 4), distribuídas amplamente por todo o distrito, com maior concentração nas regiões centrais e meridionais. Adicionalmente, manchas de queimadas moderadas a altas (classe 5) e de alta severidade (classe 6) aparecem em menor proporção, mas de forma marcadamente localizada, sobretudo em áreas de maior pressão antrópica e elevada inflamabilidade da vegetação. Paralelamente, são evidenciadas zonas de aumento de vegetação/regeneração (classe 1, em verde), embora espacialmente fragmentadas e restritas, refletindo a capacidade de recomposição da cobertura vegetal em áreas anteriormente perturbadas por corte seletivo, abandono agrícola ou fogo de baixa intensidade.

No período subsequente (2020-2025), verifica-se uma mudança substancial na dinâmica espaço-temporal. A paisagem apresenta uma maior homogeneidade, dominada por extensas áreas classificadas como queimadas de severidade moderada-baixa (classe 4), que cobrem quase

integralmente o distrito. As classes associadas a queimadas de maior severidade (5 e 6) tornam-se residuais e pontuais, indicando um decréscimo na ocorrência de eventos extremos de fogo. Ao mesmo tempo, as áreas de regeneração ativa reduzem-se drasticamente em extensão e dispersão, sugerindo que a dominância de queimadas recorrentes de baixa a moderada intensidade pode estar limitando a sucessão ecológica e dificultando o avanço de estágios mais maduros de vegetação.

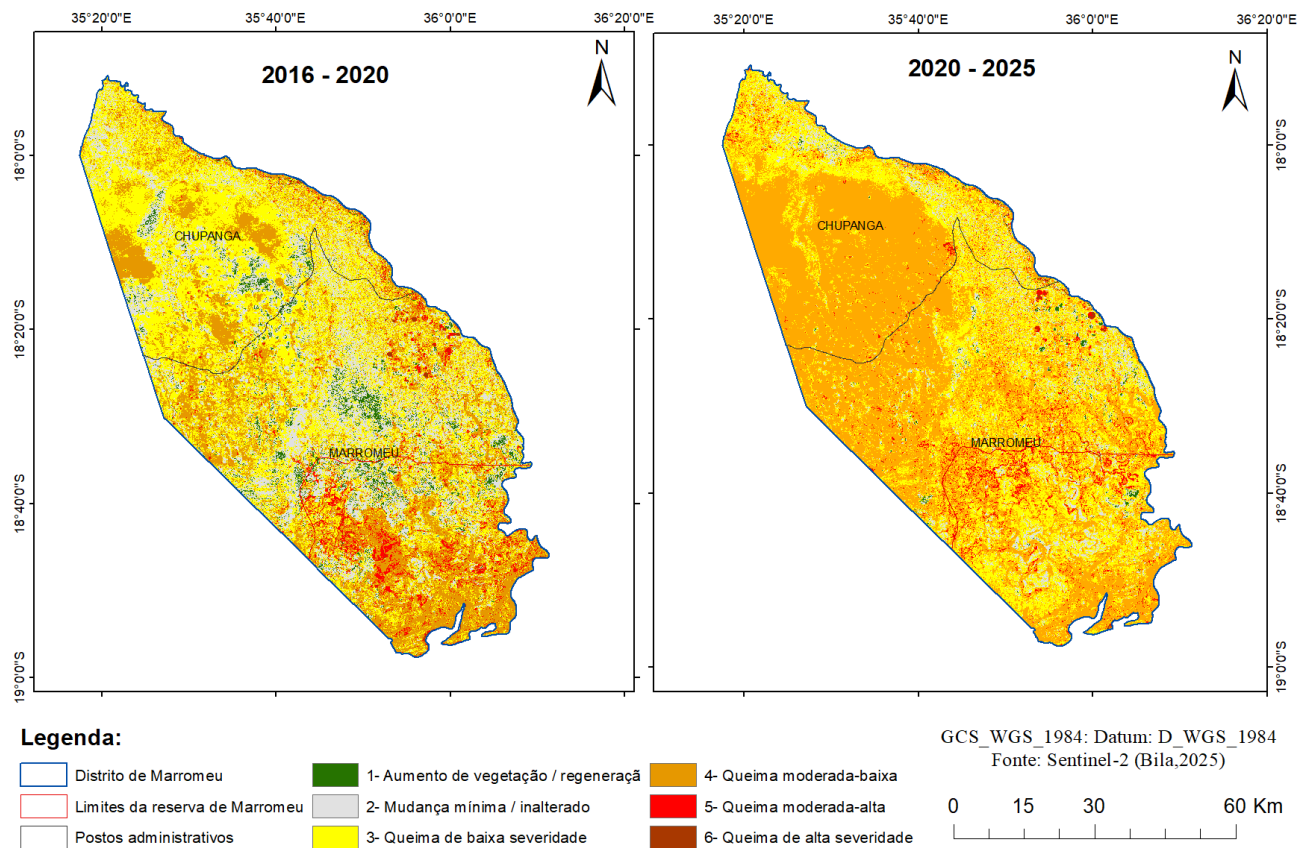


Figura 12: Distribuição espacial da severidade de queimadas e dos processos de regeneração da vegetação no distrito de Marroméu entre 2016-2020 e 2020-2025, derivada de imagens Sentinel-2.

4.4. Mapeamento da linha de costa da região de Marroméu

A análise das mudanças costeiras na região de Marroméu consistiu na aplicação do limiar espectral derivado dos índices. A área de estudo foi caracterizada por dois processos inversos, nomeadamente erosão e acreção de sedimentos em locais diferentes. Um dos destaques nas mudanças (alteração) da linha de costa é o surgimento de bancos de areia no período de 2016 a 2025, na região centro de Marroméu. De 2016 a 2020, a presenças desses bancos de areia são pouco notáveis.

Por outro lado, na região oeste de Marromeu também pode-se verificar o processo de erosão ao longo do tempo, tendo se intensificado desde 2020 até o último ano analisado. Podendo apresentar indícios de sofrer influência da ação das marés. Podendo se verificar na região estas alterações na linha de costa associadas a processos de erosão e acreção.

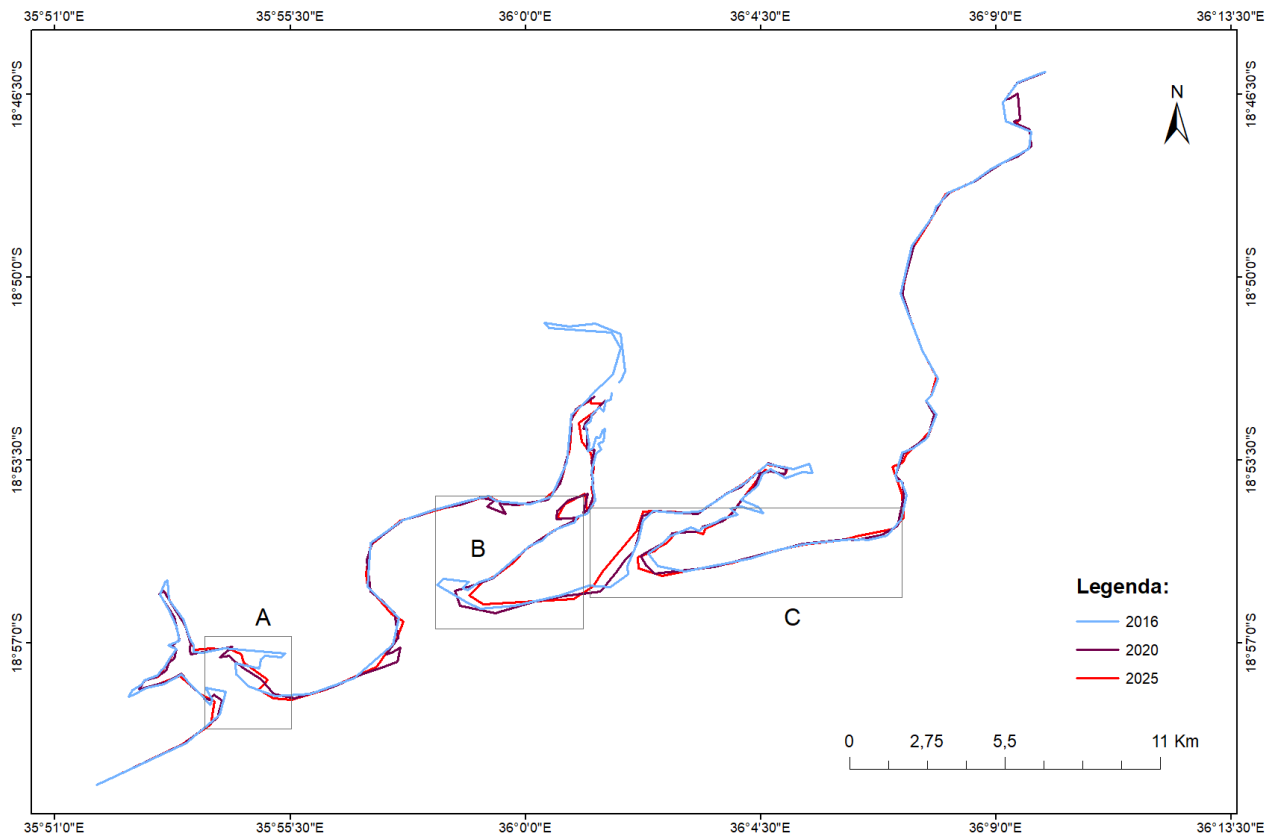


Figura 13: Posições da linha de costa (2016-2025), com locais delimitados de A, B e C.

4.5. Dinâmica da linha de costa

A figura 11 apresenta a análise espaço-temporal da dinâmica costeira em três setores distintos identificados como A, B e C, comparando os anos de 2016 e 2025. As imagens centrais correspondem à linha de costa extraída em 2016, enquanto as imagens à direita representam a linha de 2025, ambas sobrepostas com os limites costeiros vetorizados. A legenda indica a presença de áreas de acreção (em verde) e erosão (em vermelho), bem como a posição da linha de costa nos anos de 2016 (amarelo) e 2025 (vermelho).

No setor A observasse um padrão de transformação significativo, com áreas localizadas de acreção ao longo de margens internas e zonas de intensa erosão em trechos adjacentes. Essa configuração

evidencia um comportamento dinâmico, com alternância entre processos de deposição e retração da linha de costa. No setor B predominam áreas de acreção em pontos específicos, embora zonas expressivas de erosão também se destaquem, sobretudo em regiões mais expostas à ação hidrodinâmica, sugerindo forte instabilidade morfológica. Já no setor C o predomínio da erosão é mais evidente, interrompido por pequenas faixas de acreção, indicando uma tendência de recuo costeiro mais consolidado em relação aos demais setores.

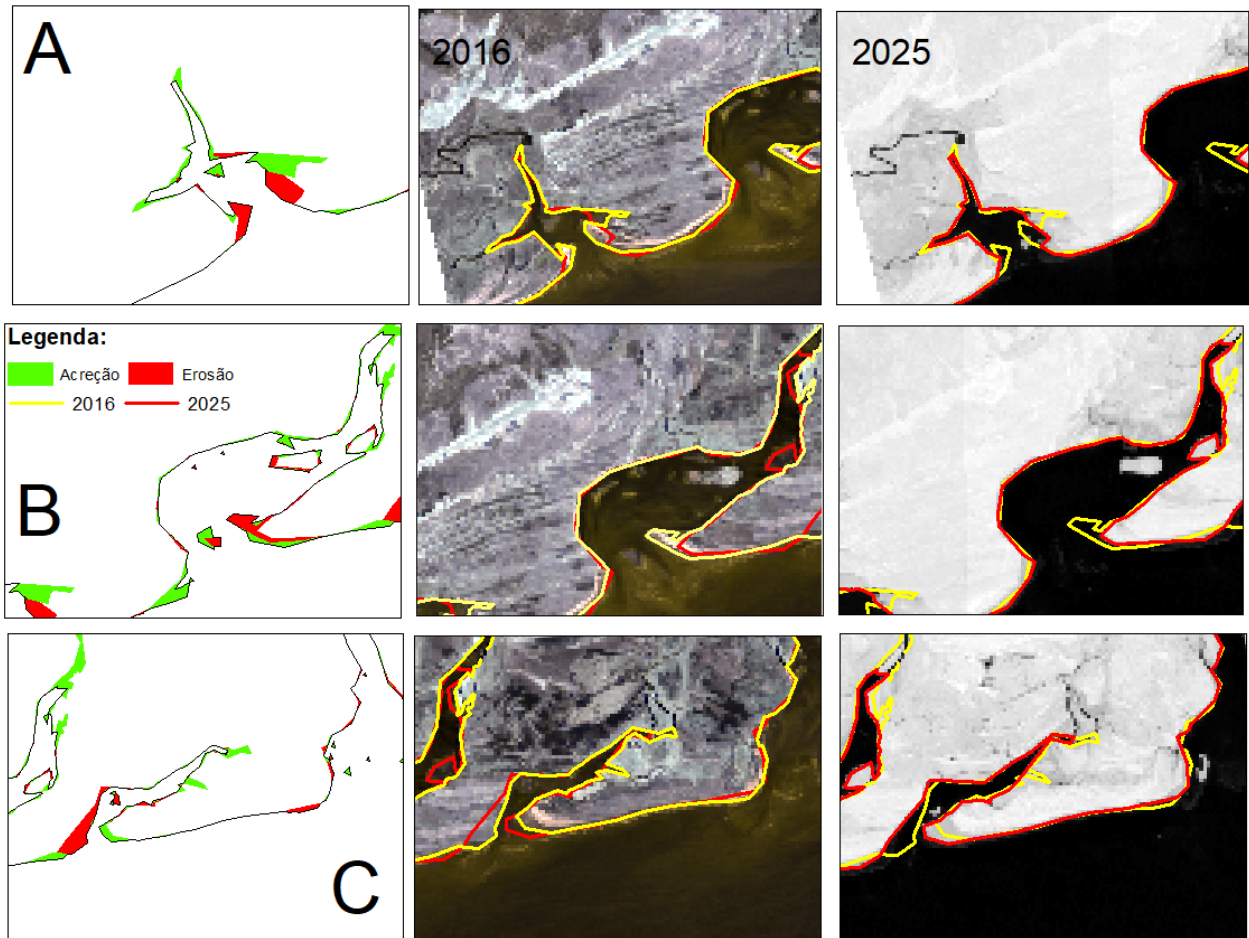


Figura 14: lustrações das áreas críticas de variação das linhas costeiras da série temporal de 2016 e 2025.

A Figura 12 apresenta a taxa de variação anual em hectares por ano (ha/ano), correspondente aos processos de ganho e perda em três áreas distintas da zona costeira analisada. Na Área A, observa-se um equilíbrio dinâmico entre os dois processos, com valores muito próximos 1.187,8 ha/ano de ganho e -1.186,0 ha/ano de perda, o que indica uma estabilidade morfodinâmica relativa. Esse padrão sugere

que os processos de deposição e remoção sedimentar tendem a se compensar ao longo do tempo, mantendo a linha de costa em posição quase constante.

A Área B distingue-se por apresentar as maiores taxas absolutas de variação, tanto positivas quanto negativas. O ganho atinge 4.456,6 ha/ano, enquanto a perda chega a -4.550,6 ha/ano, evidenciando uma dinâmica costeira altamente ativa. A magnitude semelhante entre ganhos e perdas sugere uma instabilidade morfológica significativa, provavelmente relacionada à forte mobilidade sedimentar e à influência combinada de processos hidrodinâmicos e antrópicos.

Na Área C, as taxas de variação são menos intensas que as observadas na Área B, mas ainda consideráveis, com 1.792,9 ha/ano de ganho e -1.765,6 ha/ano de perda. Assim como na Área A, a proximidade entre os valores indica um balanço costeiro próximo do equilíbrio, embora marcado por flutuações espaciais e temporais da linha de costa, possivelmente associadas às variações no regime de marés, correntes e aporte sedimentar.

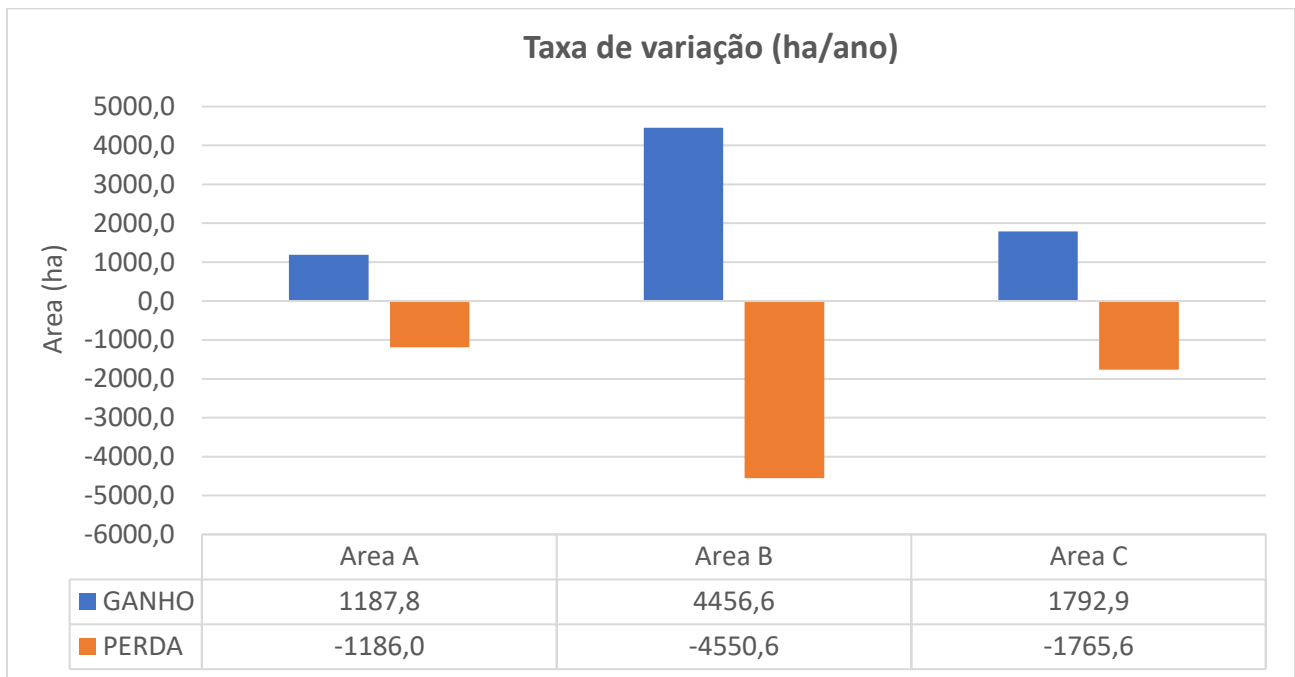


Figura 15: Representação gráfica das taxas de variação(ha) das áreas críticas das linhas costeiras da série temporal de 2016 e 2025.

4.6. DISCUSSÃO

A análise espaço-temporal da cobertura do solo e da linha de costa no distrito de Marromeu entre 2016 e 2025 revelou padrões de transformação ambiental intimamente associados ao regime hidrológico do rio Zambeze e às pressões antrópicas locais. A partir da interpretação das imagens Sentinel-2, observou-se uma redução das áreas de vegetação rala e solo exposto, simultaneamente ao aumento das classes de vegetação moderada e densa, evidenciando tendências de regeneração ecológica. Essa regeneração reflete a resiliência natural das planícies de inundação e das florestas de várzea, cuja dinâmica é fortemente condicionada pelo pulso hidrológico anual do Zambeze, responsável pelo transporte e deposição de sedimentos férteis que favorecem o crescimento da vegetação (Junk et al., 1989; Beilfuss & Brown, 2006).

No entanto, apesar dessas evidências positivas, as queimadas recorrentes permanecem como um dos principais fatores de perturbação ecológica. As áreas com severidade moderada identificadas pelo índice dNBR coincidem espacialmente com as zonas de savana e agricultura extensiva, sugerindo a continuidade da prática de queima controlada para renovação de pastagem e expansão agrícola, frequentemente observada no delta do Zambeze (Palalane et al., 2015). Embora muitas dessas queimadas apresentem baixa severidade, a sua alta frequência impede o avanço da sucessão vegetal para estágios florestais mais maduros, limitando a regeneração natural e mantendo extensas áreas em estado herbáceo. Esse padrão foi igualmente descrito por Roy et al. (2014) em outros ecossistemas tropicais, onde o fogo recorrente atua como elemento estabilizador de paisagens abertas.

Em Marromeu, a associação entre queimadas e uso agropecuário é particularmente evidente nas zonas interiores e marginais às planícies inundáveis, onde a pressão humana é mais intensa. Nessas áreas, a recuperação da vegetação é frequentemente interrompida por novos ciclos de fogo, o que reduz a capacidade de fixação de carbono e afeta o equilíbrio ecológico local. Além disso, a proximidade entre áreas agrícolas e florestas de várzea aumenta o risco de propagação do fogo, ameaçando habitats críticos de espécies dependentes de zonas húmidas. Esse processo ilustra a fragilidade do mosaico ecológico de Marromeu, onde os limites entre os ambientes naturais e antropizados são difusos e dinâmicos.

A análise da linha de costa revelou um comportamento espacialmente variável entre os diferentes setores analisados. O setor A, localizado mais a oeste, apresentou alternância entre deposição e recuo, refletindo a influência combinada do aporte sedimentar fluvial e da energia das marés. Já o setor B,

na zona central, mostrou maior instabilidade, com pequenas áreas de erosão e acreção em curtos intervalos de tempo, sugerindo um equilíbrio dinâmico altamente sensível às variações hidrodinâmicas. No setor C, situado a leste, verificou-se erosão costeira mais intensa e contínua, interrompida apenas por episódios de deposição temporária. Esses resultados são coerentes com estudos em deltas tropicais que apontam a redução do aporte sedimentar e o aumento da energia marinha como causas diretas da instabilidade da linha de costa (Woodroffe et al., 2016; Spalding et al., 2014).

A correspondência entre as áreas de vegetação densa/mangal e maior estabilidade da linha de costa destaca o papel crucial desses ecossistemas na retenção de sedimentos e proteção contra a erosão (Alongi, 2015). Nos setores onde os mangais permanecem preservados, a linha de costa mostrou-se mais estável e resiliente, contrastando com áreas degradadas dominadas por solo exposto ou vegetação rala, onde o recuo foi mais acentuado. Esse padrão reforça a interdependência entre dinâmica fluvial, cobertura vegetal e morfodinâmica costeira, características fundamentais do delta do Zambeze. O surgimento de bancos de areia após 2025, identificado em imagens de alta resolução, demonstra a mobilidade sedimentar da região, que pode gerar depósitos temporários sujeitos à redistribuição sazonal.

Essas evidências revelam que as mudanças observadas não são homogêneas, mas resultam da interação entre processos naturais e antrópicos. Enquanto a regeneração vegetal e a deposição fluvial contribuem para a estabilidade de alguns setores, as queimadas recorrentes, o desmatamento e a regulação do fluxo hidrológico pela barragem de Cahora Bassa têm efeitos adversos sobre a dinâmica sedimentar e a integridade ecológica. O pulso hidrológico artificialmente atenuado reduz a frequência das cheias naturais e, conseqüentemente, o transporte de sedimentos finos essenciais para a manutenção das planícies de inundação e dos mangais (Beilfuss & Brown, 2006; BIOFUND, 2018).

A utilização do Sentinel-2 neste contexto mostrou-se eficaz para a caracterização espacial detalhada e o monitoramento multi temporal das transformações ambientais em Marrromeu. Embora o sensor não seja ideal para detectar focos de fogo ativos tarefa mais adequada ao Sentinel-3 , ele se revelou adequado para a avaliação pós-queimada, permitindo mapear cicatrizes e estimar a severidade das queimadas com alta resolução espacial. A integração de índices espectrais (NDVI, NDWI, MNDWI e dNBR) e da classificação supervisionada pelo algoritmo de Máxima Verossimilhança assegurou

resultados consistentes e coerentes com a literatura, confirmando o potencial do sensoriamento remoto como ferramenta analítica e não apenas demonstrativa (Jensen, 2005; Drusch et al., 2012).

Por fim, a integração entre os resultados de uso e cobertura do solo e da linha de costa permitiu compreender de forma sistêmica o funcionamento ecológico do delta do Zambeze. O estudo evidenciou que a estabilidade costeira e a regeneração da vegetação dependem diretamente da manutenção do pulso hidrológico e do manejo equilibrado das atividades humanas. Portanto, os resultados obtidos fornecem subsídios concretos para o planejamento ambiental e para o fortalecimento das estratégias de conservação no Sítio Ramsar de Marrromeu, uma das zonas húmidas mais valiosas de Moçambique.

CAPÍTULO VI: CONCLUSÃO

O estudo sobre o uso e cobertura do solo e a dinâmica da linha de costa no Complexo de Marromeu, utilizando imagens Sentinel-2 entre 2016 e 2025, permitiu identificar padrões claros de regeneração ecológica e processos costeiros dinâmicos. As principais conclusões são:

1. Observou-se uma redução significativa de áreas de solo exposto e vegetação rala/agricultura, associada ao aumento da vegetação moderada e densa/mangal. Estes padrões refletem a resiliência natural do ecossistema, favorecida pelo aporte de sedimentos e nutrientes do rio Zambeze, bem como a efetividade de políticas de conservação, incluindo o estatuto de área Ramsar da Reserva Nacional de Marromeu.
2. Foram identificadas variações espaciais significativas entre setores, com processos de erosão e acreção ocorrendo simultaneamente. As áreas com vegetação densa/mangal demonstraram maior estabilidade, funcionando como barreiras naturais à erosão e contribuindo para a conservação costeira.
3. O sensoriamento remoto Sentinel-2 demonstrou ser uma ferramenta robusta para monitoramento multitemporal, fornecendo dados confiáveis para o mapeamento da cobertura do solo e a delimitação da linha de costa. Suas características, como alta frequência de revisita e cobertura multiespectral, permitiram análises detalhadas e contínuas, garantindo robustez e precisão na interpretação espacial e temporal.

A análise integrada evidencia a interdependência entre cobertura vegetal e estabilidade costeira, reforçando a importância de estratégias de manejo que considerem tanto a proteção da vegetação quanto a manutenção de processos hidrológicos naturais, promovendo resiliência ecológica e sustentabilidade ambiental no Complexo de Marromeu.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Sensoriamento Remoto e Interpretação de Imagens*. 7ª edição. Wiley.
- (CEAGRE), C. d. (2016). *Plano de Maneio da Reserva Nacional de Marromeu*.
- (MITADER), M. d. (2015). *ESTRATÉGIA E PLANO DE ACÇÃO PARA A CONSERVAÇÃO DA DIVERSIDADE BIOLÓGICA EM MOÇAMBIQUE(2015-2035)*.
- Alongi, D. M. (2015). The impact of climate change on mangrove forests. *Current Climate Change Reports*, 1, 30–39.
- Anthony, E. J., Brunier, G., Besset, M., Goichot, M., Dussouillez, P., & Nguyen, V. L. (2015). Linking rapid erosion of the Mekong River delta to human activities. *Scientific Reports*, 5, artigo 14745.
- Aschbacher, J. &.-P. (2012). O programa europeu de monitoramento da Terra (GMES): Status e perspectivas. *Sensoriamento Remoto do Ambiente*, 120 .
- Beilfuss, R. (2012). A risky climate for southern African wetlands: The impact of climate change on hydrological regimes and wetlands. *International Crane Foundation & Eduardo Mondlane University*.
- Beilfuss, R., & Brown , C. (2006). Assessing environmental flow requirements for the Marromeu Complex of the Zambezi Delta, Mozambique. *River Research and Applications*, 22(2), 219–240.
- Cabral, P. A. (2017). Assessing Mozambique’s exposure to coastal climate hazards and erosion. *Science of the Total Environment*, 575, 123–131.
- Camfield , F. E., & Morang , A. (1996). Coastal and Hydraulics Laboratory, US Army Engineer Waterways Experiment Station, 3909 Halls Ferry Road, Vicksburg, MS 39180-6199, USA pp. 129-151, 1996.
- Chidumayo, E. N. (1997). *Miombo ecology and management: An introduction*. *Stockholm Environment Institute*.
- Cianciullo, S., Attorre , F., Rezende , M., Ntumi , C., Riccardi , T., Malatesta , L., . . . Campira , J. (30 de janeiro de 2023). Análise da dinâmica da cobertura do solo em Moçambique (2001–2016).
- Congalton, R. G. (1991). *Uma revisão sobre a avaliação da precisão das classificações de dados de sensoriamento remoto*. *Sensoriamento Remoto do Ambiente*.
- Congalton, R. G. (2009). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices* (2nd ed.). CRC Press.

- Drusch, M., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Del Bello, U., Bargellini, P., . . . Isola, C. (2012). Sentinel-2: Missão Óptica de Alta Resolução da ESA para Serviços Operacionais GMES. *Sensoriamento Remoto do Ambiente*, 120, 25–36.
- ESA. (2017). Sentinel-2 MSI: Algoritmo Nível 2A. Agência Espacial Europeia.
- ESA. (2015). Uso do Sentinel-2 (Documento Padrão da ESA ESA SP-1322/1). Agência Espacial Europeia.
- Foody, G. M. (2004). A relative evaluation of multi-class image classification by support vector machines, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42, 1335-1343.
- Friess, D. A., Rogers, K., Lovelock, C. E., Krauss, K. W., Lucas, R., Primavera, J., & Rajkaran, A. (2019). *The state of the world's mangrove forests: Past, present, and future. Annual Review of Environment and Resources*, 44, 89–115.
- Furaca, N. B., Hogue, A. M., MacKay, F., Willemse, M., & Langa, A. A. (2021). Explorando a urbanização e a perda crítica de habitat por meio da mudança na cobertura do solo ao redor dos Bons Sinais Estuário, Moçambique.
- Hall, D. K., Riggs, G. A., & Salomonson, V. V. (1995). Development of Methods for Mapping Global Snow Cover Using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Data.
- INAM. (2021). Boletim Climatológico Anual 2020–2021. Instituto Nacional de Meteorologia, Maputo.
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC - V. Masson-Delmotte, P. Z. (2021). *The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Jensen, J. (2005). Introdução ao Processamento Digital de Imagens: Uma Perspectiva de Sensoriamento Remoto. 3ª edição. Prentice Hall.
- Junk, W. J., Bayley, P. B., & Sparks, R. E. (1989). *The flood pulse concept in river-floodplain systems*.
- Jury, M. R. (2002). Malawi's Shire River fluctuations and climate.
- Key, C. H. (2006). Landscape assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index, and remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. In D. C. Lutes, R. E. Keane, J. F. Caratti, C. H.
- Lambin, E. F., Geist, H. J., & Lepers, E. (2003). Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annual Review of Environment and Resources*, 28, 205–241.
- Lindis, J. R., & Koch, G. G. (1977). *A medição da concordância do observador para dados categóricos. Biometria*.
- Louis, J., Debaecker, V., Pflug, B., Bieniarz, J., Gascon, F., Main-Knorn, M., & Mueller-Wilm, U. (2016). SENTINEL-2 SEN2COR: L2A PROCESSOR FOR USERS.

- Macamo, Ó. A. (2024). *Dinâmica da população e da ocupação de habitats pela Palapala-Hippotragus níger (Harris, 1838) no Complexo de Marromeu.*
- Macarringue, L. S. (2023). Land Use and Land Cover Classification in the Northern Region of Mozambique Based on Landsat Time Series and Machine Learning. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12(8), Article 342.
- MAE, M. d. (2005). *Perfil do Distrito de Marromeu. Maputo.*
- MAHONGO, S. B., & FRANCIS, J. (s.d.). Analysis of Rainfall Variations and Trends in Coastal Tanzania. *Western Indian Ocean Journal of Marine Science*, 11, 121-133. 2012.
- Maueua , C., Cossa, O., Mulhovo , G., & Pereira , M. (2007). *VULNERABILIDADE CLIMATICA NAS ZONAS COSTEIRA, Caso de estudo: DELTA DO ZAMBEZE.*
- Mausel, P. W. (1993). Spectral Identification of Successional Stages Following Deforestation in the Amazon .
- McFeeters, S. (1996). O uso do Índice de Diferença Normalizada de Água (NDWI) na delimitação de características de águas abertas. *International Journal of Remote Sensing* , 17(7), 1425–1432.
- MICOA, M. p. (2014). *Relatório do Estado do Ambiente em Moçambique.*
- MONICO, J. F., DAL PÓZ, A. P., DOS SANTOS, M. C., & DE OLIVEIRA, L. C. (2009). Accuracy and Precision: reviewing the concepts by means of an accurate procedure.
- Moreira, M. E. (2005). *A dinâmica dos sistemas litorais do Sul de Moçambique durante os últimos 30 anos.*
- Pahlevan, N. C. (2017). Processamento de dados do Instrumento Multiespectral (MSI) Sentinel-2 para aplicações em ciências aquáticas: Demonstrações e validações. *Sensoriamento Remoto do Ambiente*, 2, 47–56.
- Palalane, J., Larson, M., Dinis, J., & Hans, H. (2015). Erosão costeira em Moçambique: processos de governança e medidas corretivas. *Journal of Coastal Research*.
- Pettorelli, N., Mysterud, A., Gaillard, J.-M., & Tucker, C. J. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change.
- Poursanidis, D. T. (2021). Cloud-native seascape mapping of Mozambique’s Quirimbas National Park with Sentinel-2. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 7(2), 275–291.
- Rebelo, L. M., & Richards, F. (2010). Flood Pulses and their Impact on Wetland Vegetation in the Zambezi Delta. *African Journal of Ecology*, 48(4), 917–929.
- Ribeiro , N. S., Macandza , V. A., Buquine , C. P., Ribau , M. S., & Cuambe , O. E. (2016). *PLANO DE MANEIO DA RESERVA NACIONAL DE MARROMEU (2017 – 2026).*

- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., & Deering, D. (1974). *Monitoramento de sistemas de vegetação nas Grandes Planícies com ERTS. Publicação Especial da NASA*, 351, 309.
- Roy, D. P. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*.
- Scholes, R. J. (2021). *The IPBES assessment report on land degradation and restoration. IPBES Secretariat*.
- Silva, A. R., & Saito, C. H. (2009). Dinâmica da ocupação antrópica e instabilidade da linha de costa em áreas tropicais. *Ambiente & Sociedade*, 12(2), 325–341.
- Spalding, M. D. (2010). *World atlas of mangroves*. Earthscan.
- Spalding, M. D., Ruffo, S., Lacambra, C., & Meliane, I. (2014). Coastal ecosystems: A critical element of risk reduction. *Conservation Letters*, 7(3), 293–301.
- UNEP, –U. (2021). *Protected Planet Report 2021. Nairobi: UNEP-WCMC*.
- Wikipedia, C. (s.d.).
- Woodcock, C. E., & Zhu, Z. (2012). Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery.
- Woodroffe, C. D., Rogers, K., Saintilan, N., & Mendelssohn, I. A. (2016). Mangrove sedimentation and response to relative sea-level rise. *Annual Review of Marine Science*, 8, 243–266.
- Xu, H. (2006). Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033.

Anexos

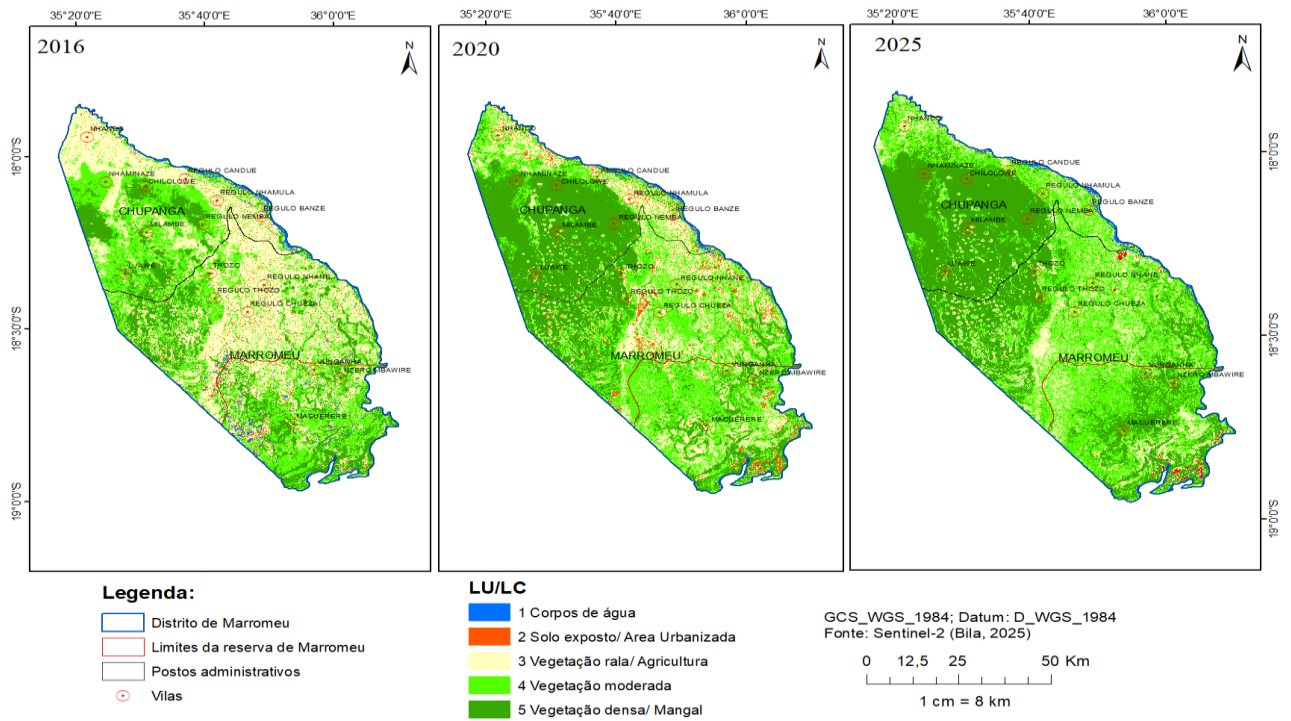


Figura 16: Mapa de uso e cobertura da terra derivada de imagens Sentinel-2 no distrito de Marromeu.

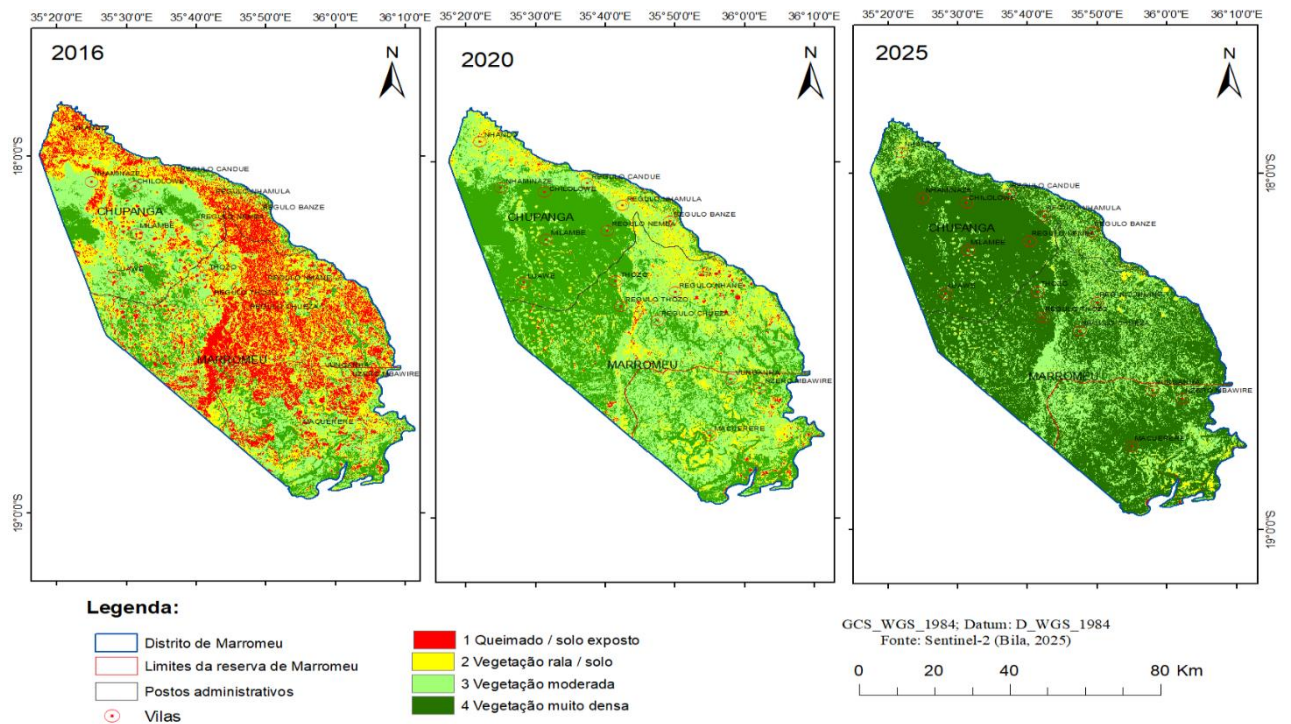


Figura 17: Mapa ilustrando o NBR ao longo dos anos no distrito de Marromeu.

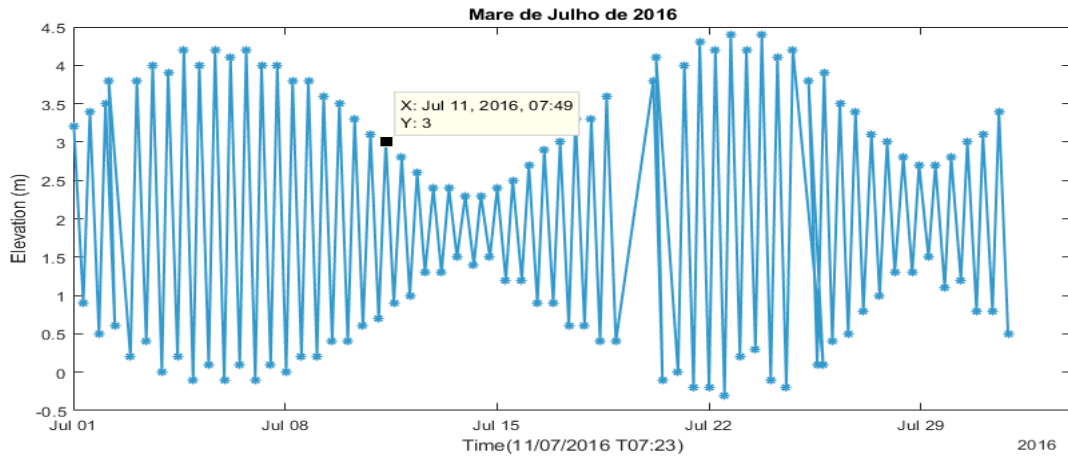


Figura 18: Comportamento das Marés no ano de 2016 para o mês de Julho.

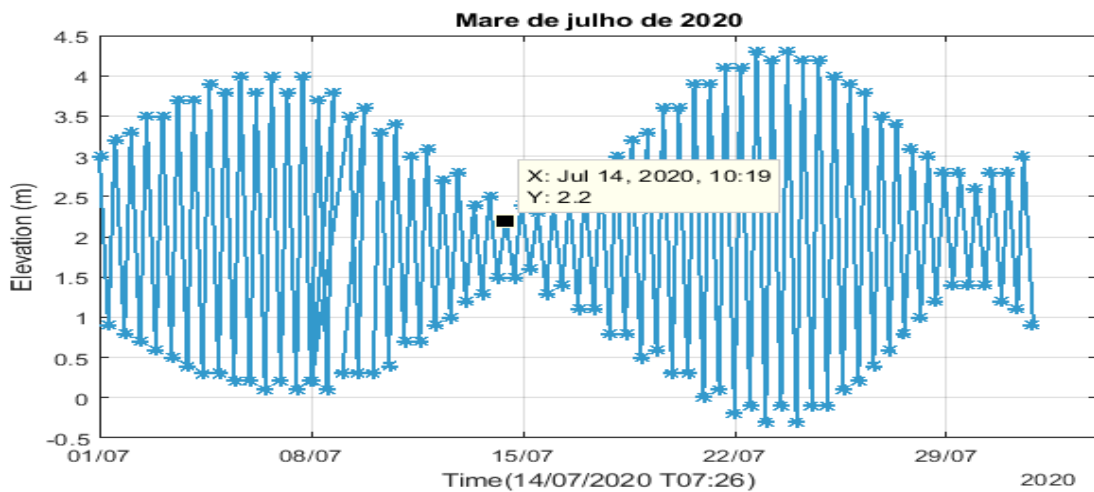


Figura 19: Comportamento das Marés no ano de 2020 para o mês de Julho.

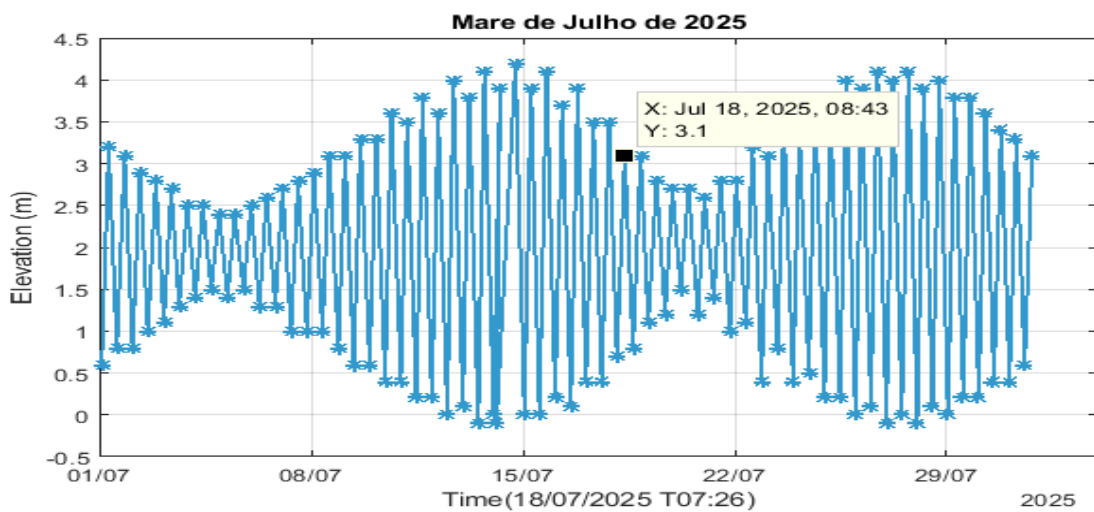


Figura 20: Comportamento das Marés no ano de 2025 para o mês de Julho.