



Faculdade de Ciências

Departamento de Ciências Biológicas

Licenciatura em Biologia Marinha, Aquática e Costeira

Trabalho de Culminação de Estudos

VARIANTE: TRABALHO DE INVESTIGAÇÃO

**Tema: Impactos de Eventos Extremos no Mangal no Distrito de Govuro: Análise
de Degradação Usando Imagens de Radar**

Autor:

Marcelo Justino Levene

Maputo, Abril de 2025



Faculdade de Ciências

Departamento de Ciências Biológicas

Licenciatura em Biologia Marinha, Aquática e Costeira

Trabalho de Culminação de Estudos

VARIANTE: TRABALHO DE INVESTIGAÇÃO

**Tema: Impactos de Eventos Extremos no Mangal no Distrito de Govuro: Análise
de Degradação Usando Imagens de Radar**

Autor:

Marcelo Justino Levene

Supervisor:

Doutor Eng.º Hugo Mabilana

Declaração de Honra

Declaro por minha honra que este trabalho de Culminação de Estudos II do curso de licenciatura em Biologia Marinha, Aquática e Costeira é resultado da minha investigação pessoal e de orientação dos meus supervisores, que todas as fontes utilizadas estão devidamente referenciadas e que o mesmo nunca foi apresentado para a obtenção de qualquer grau académico nesta Universidade ou em qualquer outra instituição.

Assinatura

A handwritten signature in cursive script, reading "Marcelo Justino Levene", is written over a horizontal line.

(Marcelo Justino Levene)

Agradecimentos

Em primeiro agradecer à Deus por me conceder o dom da vida, me permitindo alcançar este feito e por permitir com que a minha mãe vivencie esta vitória.

Agradeço a minha mãe por estar sempre do meu lado me apoiando nos meus estudos e pelas palavras de encorajamento sempre.

À minha família por todo amor e força que foi oferecida a mim. Em especial a minha avó Helena Saute, minha tia Adelina Levene, o meu tio Victor Tomas e ao meu primo Keven Levene que pelos puxões de orelha e apoio financeiro para que eu conseguisse completar o meu grau de licenciatura.

Quero agradecer em especial ao meu supervisor Doutor Eng.º Hugo Mabilana pelo apoio, confiança, motivação e os puxões de orelha que recebi durante este período. Este trabalho não teria sido possível de alcançar sem a sua orientação.

Quero agradecer aos meus explicadores, professores e docentes que foram responsáveis por transmitir todos os seus conhecimentos desde o ensino básico até a época em que frequentei a Faculdade de Ciências, conhecimentos estes que serão úteis durante a minha vida profissional.

Estendo os meus agradecimentos a todos os meus colegas, em especial ao Grupo Ecologia da Paisagem que me acompanharam durante este período, compartilhando conhecimento, experiências e por me fazerem acreditar que é sim possível trabalhar em conjunto para alcançar os nossos objectivos.

Os meus agradecimentos vão também aos meus amigos Stélio Pinto, Alcinda Muchanga e sua família que tem estado ao meu lado e me motivando para sempre continuar superando todos os obstáculos pela frente.

Dedicatória

A mulher que me trouxe ao mundo e sempre lutou para me ver bem e nunca desistiu de apoiar os meus sonhos, a minha mãe Ana João Matsinhe. A minha avó Helena (em memória).

Resumo

O distrito de Govuro tem uma grande extensão de mangal, apesar das evidências de morte e destruição do mangal, resultantes dos eventos extremos de origem meteorológica, com destaque para o ciclone Freddy (categoria 2) que foi registrada no ano de 2021. O presente estudo pretende medir a precisão dos dados SAR do Sentinel-1 no mapeamento da biomassa acima do solo do distrito de Govuro.

Os dados de campo foram obtidos a partir de uma expedição realizada no distrito de Govuro durante o mês de dezembro de 2023, onde foram feitas amostragens da estrutura da floresta, obtendo-se dados do DAP (Diâmetro da Altura do Peito).

A biomassa do mangal foi estimada a partir de equações alométricas para cada espécie de mangal encontrada na área de estudo. Obteve-se as imagens de RADAR no site da Copernicus, e foram gerados os seus valores de retroespalhamento para as suas polarizações, e com base nestes dados, a biomassa de 2023 foi espacializada por meio de uma regressão linear múltipla.

A curva da regressão linear múltipla entre a biomassa estimada e o retroespalhamento da imagem de radar foi positiva, tendo gerado a seguinte equação: $Biomassa \left(\frac{Mg}{ha} \right) = 45.494 + (3.584 * VH) - (2.405 * VV)$. Este resultou em 5 estimativas de biomassa entre o intervalo de 2020 a 2024. Com base nesta relação foi possível gerar mapas de mudanças, possibilitando identificar a variação de biomassa entre os anos e suas diferenças quanto aos ganhos e perdas.

Em 2020 a floresta apresentou níveis de biomassa altos, chegando até 35.84 Mg/ha, em 2021, após a passagem do ciclone Freddy, verifica-se uma redução nos níveis de biomassa, situação que continuou até o ano de 2022. No ano de 2023 houve um ganho de biomassa e para o ano de 2024 os níveis voltaram a reduzir.

A partir test-t student pareado foi possível concluir que não existiam diferenças significativas quanto a variação dos níveis de biomassa entre os anos de 2020 – 2021 e 2022 - 2024, com um p-valeu de 0.924 e 0.658 respectivamente.

Conclui-se que os satélites de radar podem ser boas ferramentas para avaliar os ganhos e perdas da biomassa no distrito de Govuro.

Palavras-chaves: Mangais, Degradação, Eventos extremos, Radar, Govuro.

Lista de abreviaturas

AGB – Biomassa

AOF - Apply Orbit File

DAP - Diâmetro acima do peito

DN - Número digital da amplitude da imagem

GRD - Ground Range Detected

GPS- Global Positioning System (Sistema de Posicionamento Global)

JAXA - Agência de Exploração Aeroespacial do Japão

RADAR - Radio Detection and Ranging,

SAR - Synthetic Aperture Radar

SNAP – Sentinel Applications Platform

Índice de figuras

Figura 1: Padrão de zonação das principais espécies de mangal (Província da Zambézia) por (Barbosa et al., 2001).	6
Figura 2: Funcionamento básico dos radares imageadores por (Teixeira, 2011).	10
Figura 3: Região de micro-ondas no espectro eletromagnético por (Beneditti, 2010). ...	10
Figura 4: Sistema de polarização da onda eletromagnética por (Holecz, 2009).	11
Figura 5: Exemplo dos tipos de reflexão nos alvos por (Beneditti, 2010).	12
Figura 6: Mapa de área de estudo com os locais de amostragem. Fonte: Autor, 2024. ..	14
Figura 7: Métodos de medição do diâmetro acima do peito (DAP) sob as diferentes condições em que as árvores podem ser encontradas: normal (1), em um declive (2), árvore inclinada (3), bifurcada (4) e na presença de uma deformação (5) por (Fernando, 2020).	15
Figura 8: Imagens usadas no estudo, onde a imagem A corresponde ao ano 2020, B, C e D correspondem respectivamente aos anos 2021, 2022, 2023 e 2024.	17
Figura 9: Fluxograma das etapas no Snap	18
Figura 10: Biomassa acima do solo das quadrículas de amostragem.	22
Figura 11: Estimativa de Biomassa do Distrito de Govuro entre os anos de ocorrência dos eventos climáticos extremos.	24
Figura 12: Biomassa média do mangal	24
Figura 13: Comportamento da Biomassa de Govuro no intervalo de passagem dos eventos. Em vermelho a área visualmente mais afectada e em verde, a área visualmente menos afectada.	26
Figura 14: Valor de pixel da polarização VV e VH dos dados SAR do Sentinel-1 para o distrito de Govuro.	38

Índice de tabelas

Tabela 1: Data das imagens Sentinel-1A e anos de passagem das tempestades tropicais no distrito de Govuro.	17
Tabela 2: Equações alométricas específicas para espécies de mangal usadas na estimação da biomassa de mangal do distrito de Govuro.....	19
Tabela 3: Valores de retroespalhamento.	22
Tabela 4: test-t para avaliar se houveram diferenças na biomassa entre os anos.	25

Índice

Declaração de Honra	I
Agradecimentos.....	II
Dedicatória	III
Resumo	IV
Lista de abreviaturas.....	V
Índice de figuras	VI
Índice de tabelas	VII
1. Introdução.....	1
1.1. Problematização.....	3
1.2. Significância do estudo.....	3
2. Hipóteses	4
3. Objectivos.....	5
3.1. Objectivo geral	5
3.2. Objectivos específicos	5
4. Revisão bibliográfica.....	6
4.1. Definição de mangal.....	6
4.2. Importância do mangal	6
4.3. Causa da degradação do mangal.....	7
4.4. Acções humanas ou antropogénicas	7
4.5. Impactos climáticos	7
4.6. Ciclones tropicais	7
4.7. Métodos de investigação da mudança das alterações de cobertura de mangal	
8	
4.8. Detecção remota	8
4.9. Sensores ópticos	9
4.10. Sensores de RADAR	9
4.11. Resolução espacial dos sensores de radar	11

4.12.	Rugosidade Superficial	12
4.13.	Sentinel-1	12
4.14.	Uso da detecção remota para estudos do Mangal	13
5.	Material e métodos	14
5.1.	Área de estudo	14
5.2.	Material.....	14
5.2.1.	Base de dados de campo	15
5.2.2.	Pré-processamento das imagens Sentinel-1	16
5.3.	Processamento dos dados de campo.....	19
5.4.	Análise de dados.....	20
6.	Resultados.....	22
6.1.	Biomassa acima do solo	22
6.2.	Relação Biomassa estimada e os valores de retroespalhamento das imagens de Radar.....	22
7.	Discussão	27
7.1.	Biomassa do mangal do distrito de Govuro estimada através das equações alométricas.....	27
7.2.	Relação Biomassa estimada e retroespalhamento das imagens de SAR..	27
7.3.	Alterações na Biomassa do Mangal do Distrito de Govuro antes e após a passagem dos eventos climáticos extremos.....	28
8.	Conclusão	30
8.1.	Limitações e Recomendações.....	30
9.	Referências bibliográficas	32
10.	Anexos	38

1. Introdução

Os ecossistemas de mangais são sistemas únicos e complexos, que se desenvolvem em áreas entre-marés ao longo das zonas tropicais e subtropicais (Macamo & Siteo, 2016; Simard *et al.*, 2019). Este ecossistema fornece uma variedade de serviços, dentre os quais: a protecção costeira contra eventos climáticos extremos (Bandeira *et al.*, 2016; Macamo *et al.*, 2016; Pham & Yoshino, 2017).

Apesar da sua notória importância, as florestas de mangal têm sofrido um decréscimo contínuo e estão ameaçadas no mundo todo (Simard *et al.*, 2019). Cerca de 35% da sua área global original foi degradada ou destruída desde 1980, e as taxas globais actuais de perda variam entre 1 - 2% por ano (Simard *et al.*, 2019). Eventos climáticos extremos como: tempestades e ciclones correspondem a 46%, dos principais factores que promovem a mortalidade das florestas de mangal (Macamo *et al.*, 2016; Simard *et al.*, 2019). Embora os benefícios que estes apresentam na protecção da costa por serem resilientes aos impactos de curto prazo causados pelos ciclones, a sua mortalidade pode sugerir que estes ecossistemas não sejam resistentes a tendências de ciclones de longo prazo (Amaral *et al.*, 2023).

Os ciclones tropicais são os sistemas meteorológicos mais comuns dos trópicos, onde condições ambientais específicas da atmosfera e do oceano estão reunidas e estes são conhecidos globalmente como os mais devastadores (Bié, 2022; Charrua *et al.*, 2021). Moçambique é um país caracterizado por uma elevada frequência de eventos climáticos extremos (secas, cheias e ciclones), com os ciclones têm tido um aumento contínuo na sua frequência e intensidade (Lasse, 2023).

Os ciclones ocorrem ocasionalmente em Moçambique, com uma média de 4 vezes ao ano entre o período de Novembro à Abril, tendo as regiões centro e norte como as mais afectadas (Charrua *et al.*, 2021; Guambe & Silva, 2022). A vulnerabilidade a estes eventos extremos deve-se principalmente a sua localização geográfica na zona de convergência inter-tropical e á jusante de bacias hidrográficas partilhadas com os países vizinhos, a longa costa de Moçambique e a existência de extensas áreas com altitude abaixo do nível médio das águas do mar, onde as províncias de Sofala, Zambézia e Inhambane tem sido as mais afectadas pelos ciclones no país (Chitata & Remane, 2022; Matlombe, 2019). A província de Inhambane experimentou a passagem de um ciclone e duas tempestades tropicais entre 2021 à 2024, sendo: o ciclone Guambe em 2021 de categoria 2 na escala

Seffer-Simpson e as tempestades tropicais Freddy em 2023 e Filipo em 2024(Mundiais, 2024).

Estudos de avaliação de eventos extremos para os ecossistemas de mangal pode ser realizada *in situ*, mas também pode ser baseada em modelos e no sensoriamento remoto, também conhecidos como *ex situ* (Ha *et al.*, 2020; Jia *et al.*, 2023).

Estudos de sensoriamento remoto por satélite são considerados mais precisos, rápidos e económicos, onde o mesmo fornece uma solução para produzir mapas sobre condição dos mangais (Jia *et al.*, 2023). Os dados de sensoriamento remoto por satélite têm sido amplamente usados no monitoramento das florestas de mangal em todo o mundo, podendo ser usados sensores ópticos ou de radar. (Chambo, 2017; Pham & Yoshino, 2017).

Os sensores ópticos tem uma capacidade limitada no mapeamento do mangal, com um comprimento de onda que vai de 400nm à 700nm, podendo somente monitorar até a copa, sendo dependentes de uma fonte de luz e são limitadas pela cobertura de nuvens, por estarem incapacitados de passar através destas (Ha *et al.*, 2020). Sensores activos de RADAR (*Radio Detection And Ranging*), em contraste, pode penetrar pelas nuvens, fornecer imagens diurnas e noturnas em todas as condições climáticas, pois sensores como da banda C tem um comprimento de onda alto, variando de 3.75 cm a 7.5 cm (Pham & Yoshino, 2017). Além disso, o Radar de Abertura Sintética (SAR- *Synthetic Aperture Radar*) possui a capacidade de fornecer dados de vegetação 3D (Nesha *et al.*, 2020), tornando-se uma ferramenta potencial para estimativa da Biomassa Acima do Solo (AGB) nos trópicos em grande escala (Kaasalainen *et al.*, 2015).

Este estudo avalia a condição de uma floresta de mangais no distrito de Govuro que foi afectado por ciclones e inundações associadas entre os anos de 2018 a 2022 através da combinação de técnicas de amostragem de campo e detecção remota por imagens de RADAR.

1.1. Problematização

Muitos estudos de avaliação dos impactos dos ciclones e outros eventos extremos nos ecossistemas de mangal de Moçambique são feitos através do uso de sensores de sensores ópticos (Chambo, 2017; Fatoyinbo & Armstrong, 2010; Francisco *et al.*, 2019) contudo, estes sensores apresentam limitações que os tornam incapazes de ser usados em certas condições.

No entanto, só se tem conhecimento de um estudo efectuado a nível continental e que envolvia os mangais de moçambique com o uso sensores de radar (Fatoyinbo & Simard, 2013), apesar das potencialidades que este apresenta em relação aos sistemas ópticos.

Poucos estudos têm investigado a associação entre os dados de radar do Sentinel-1 e a biomassa de vegetação específica em mangais (Argamosa *et al.*, 2018; Hidayah *et al.*, 2024; Navarro *et al.*, 2019). Portanto, este estudo tem como objetivo medir a precisão dos dados SAR do Sentinel-1 no mapeamento da biomassa acima do solo do distrito de Govuro.

1.2. Significância do estudo

Este estudo devera apresentar a contribuição na avaliação do uso dos satélites de radar para a avaliação da degradação dos ecossistemas de mangal (Lee *et al.*, 2021) no nível regional para a região da africa oriental.

O trabalho devera apresentar também dados comparativos que permitem determinar com maior precisão o impacto dos eventos climáticos extremos sobre os ecossistemas do mangal, com informações complementares sobre os locais que tenham sofrido um maior impacto com a passagem destes eventos.

2. Hipóteses

- **Nula:** Os satélites de radar não têm sensibilidade para estimar a degradação das florestas de mangal.
- **Alternativa:** Os satélites de radar têm uma sensibilidade para a avaliação da degradação das florestas de mangal.

3. Objectivos

3.1. Objectivo geral

- Avaliar a sensibilidade de imagens de radar Sentinel-1 na degradação da floresta de mangal no Distrito de Govuro.

3.2. Objectivos específicos

- Ajustar os dados imagens de radar com os dados da biomassa do mangal por técnicas de regressão;
- Estimar a biomassa de mangal em Mg/ha perdida pela passagem dos eventos climáticos extremos.

4. Revisão bibliográfica

4.1. Definição de mangal

Os mangais são considerados os ecossistemas mais produtivos da terra (Macamo *et al.*, 2016; Nicolau *et al.*, 2022), que se desenvolvem nas zonas entre-marés ao longo da costa das zonas tropicais e subtropicais dentre os 30° N e 30° S de latitude ocupando zonas abrigadas e lugares com baixa intensidade de marés e fraca energia das ondas (Fernando, 2020; Macamo & Siteo, 2016; Simard *et al.*, 2019). A sua composição é por árvores e arbustos, com a sua vegetação sempre verde (Fernando, 2020), onde as suas espécies exibem uma zonação específica (Barbosa *et al.*, 2001) (figura 1), que é atribuída de acordo com o nível resposta para factores como a hidrologia, o bioclíma, o nível de inundação e a salinidade (Chambo, 2017; Charrua *et al.*, 2020).

O número total de espécies em Moçambique é de 9, nomeadamente: *Avicennia marina*, *Bruguiera gymnorhiza*, *Ceriops tagal*, *Heritiera littoralis*, *Lumnitzera racemosa*, *Rhizophora mucronata*, *Sonneratia alba*, *Xylocarpus granatum* e *Xylocarpus mullocensis* (Machava-António *et al.*, 2020).

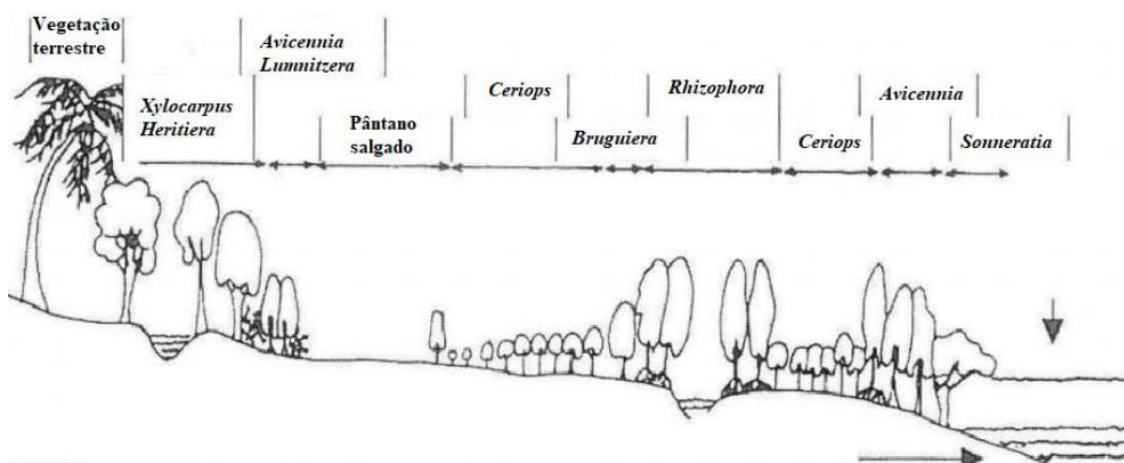


Figura 1: Padrão de zonação das principais espécies de mangal (Província da Zambézia) por (Barbosa *et al.*, 2001).

4.2. Importância do mangal

Nos tempos actuais, o homem procura compreender as importâncias ecológicas assim como sócio económicas que os mangais fornecem (Chambo, 2017).

Os ecossistemas de mangal são uns dos principais ecossistemas que providencia numerosos bens e serviços (Machava-António *et al.*, 2020; Bacar *et al.*, 2023). Estes serviços podem dividir-se em directos (por exemplo extraídos da madeira dos mangais)

que são, a lenha e o carvão para o uso doméstico ou negócio, o desenvolvimento da apicultura, para o fornecimento de alimentos para os animais e o *Xylocarpus granatum* é usado para a medicina. E os serviços indirectos que são os serviços ecológicos que funcionam como uma barreira, protegendo a terra contra a erosão, na mitigação de tempestades tropicais e reduzido danos dos efeitos das marés, como áreas de nidificação da fauna, habitat para vários vertebrados e invertebrados, biofiltro da água e o controlo da sua qualidade, e contribuindo como meio para o sequestro do carbono (Machava-António *et al.*, 2020; Pham & Yoshino, 2017).

4.3. Causa da degradação do mangal

O ecossistema de mangal tem como suas principais fontes de pressão as acções humanas ou antropogénias e os impactos climáticos.

4.4. Acções humanas ou antropogénicas

A acção humana tem-se destacado como principal factor que promove a degradação das florestas de mangal nas últimas décadas, por conta da exploração da madeira, a industrialização e urbanização desregrada, a construção de salinas e tanques de aquacultura, e a produção agrícola (Chambo, 2017; Francisco *et al.*, 2019; Macamo *et al.*, 2021; Nicolau *et al.*, 2017).

4.5. Impactos climáticos

As consequências derivadas das mudanças climáticas, como o aumento do nível do mar, chuvas, a erosão e sedimentação, tufões e ciclones contribuem para a redução das florestas de mangal (Chambo, 2017; Nicolau *et al.*, 2017).

4.6. Ciclones tropicais

Os ciclones tropicais são sistemas meteorológicos que se desenvolvem sobre os oceanos tropicais ou subtropicais, associados com áreas de baixa pressão na superfície, com ventos fortes em rotação e vem acompanhados de precipitações intensas, trovões e relâmpagos, que são dependentes do calor para a sua manutenção (Rebelo, 2020; Souza & Reboita, 2020). Os ciclones são conhecidos como um dos eventos meteorológicos mais

devastadores existentes, sendo o principal factor ambiental responsável por perdas de vidas e propriedades (Bié, 2022; Rebelo, 2020). Este recebem deferentes nomenclaturas de acordo com as zonas oceânicas onde eles se formam: sendo apelidado de *furacões* no Atlântico norte-Occidental e Caraíbas, de *tufões* no Pacífico Norte-Occidental e Mar da China e como *Ciclones tropicais* no Pacífico Sul-occidental e Oceano Índico (Rebelo, 2020).

As áreas costeiras tem sido as mais afectadas por estes desastres, devido aos seus ventos fortes, chuvas torrenciais e o aumento do nível do mar (Rebelo, 2020), e a sua formação depende essencialmente das elevadas temperaturas dos oceanos, onde estes fenómenos se formam (Rebelo, 2020).

A localização geográfica de Moçambique torna-o como um dos principais factores que contribui para a sua vulnerabilidade, visto que alguns ciclones tropicais que se formam no oceano Índico, atravessam o canal de Moçambique e afectam as zonas costeiras, e o aumento da probabilidade de ocorrência dos ciclones junto com a sua intensidade tem como o principal factor o aquecimento global dos oceanos e uma atmosfera mais quente, o que leva ao aumento de danos nas cidades costeiras (Matlombe, 2019; Rebelo, 2020).

Dentre 2018 a 2021, Moçambique registrou 7 ciclones, se destacando o Idai como tendo sido o mais severo dentre todos (Guambe & Silva, 2022).

4.7. Métodos de investigação da mudança das alterações de cobertura de mangal

Estes métodos focam-se na descrição geral da alteração de cobertura da vegetação, podendo ser realizados no campo (*in-situ*) e a partir de dados de imagens satélite como ferramenta para o estudo destes ecossistemas (*ex-situ*). A partir de estudos *ex-situ*, podem ser aplicadas análises da mudança das paisagens a longo prazo, possibilitado também de forma relativamente económica o estudo em áreas extensas de mangais (Machava, 2014; Pham *et al.*, 2019).

4.8. Detecção remota

Detecção remota ou sensoriamento remoto é definida como uma tecnologia para a obtenção de informações sobre determinado objecto, sua área, fenómeno ou

caracterização, sem que haja um contacto directo/físico com o mesmo (Machava, 2014). Este processo é baseado na interacção da radiação electromagnética e dos diferentes materiais em cena (Machava, 2014; Cavalcanti *et al.*, 2016). Ela também inclui todo o trabalho realizado após a obtenção da imagem, desde o seu processamento até à interpretação dos resultados, que é atribuído o nome de geoprocessamento (Garcia *et al.*, 2012; Cavalcant *et al.*, 2016).

Os sensores usados são dispositivos que capturam a energia electromagnética do solo, vegetação, rochas, corpos de água, infraestruturas, entre outros, e posteriormente transformados em dados, imagens ou outros produtos que possam transmitir alguma informação (Cavalcanti *et al.*, 2016). A captura de imagens desenvolvidas por satélites ou plataformas aerotransportadas (aviões, helicópteros ou veículos aéreos não tripulados) é o tipo de detecção remota mais usado (Garcia *et al.*, 2012). As imagens obtidas podem ser ópticas, que são obtidas a partir de sensores multiespectrais ópticos (usualmente referidos a satélites ópticos) e imagens de radar (Cavalcanti *et al.*, 2016).

4.9. Sensores ópticos

Os satélites óticos ou passivos, são sensores que usam as regiões visível e infra-vermelha da reflectância da terra (Fatoyinbo & Armstrong, 2014). Estes são satélites que dependem essencialmente dependentes de uma fonte de luz, o que se torna um dos seus limitantes e estes satélites tem como o seu principal desafio a presença e persistências de nuvens, em particular nas zonas tropicais, o que torna o seu uso bem mais difícil (Fatoyinbo & Armstrong, 2014; Ha *et al.*, 2020).

4.10. Sensores de RADAR

Estes satélites recebem dois diferentes termos, nomeadamente: RADAR (*Radio Detection and Ranging*) ou SAR (*Synthetic Aperture Radar*), se referindo ao mesmo assunto (Fatoyinbo & Armstrong, 2014; Teixeira, 2011). Estes termos referem-se a dispositivos que tem a sua própria fonte de luz para gerar imagens, podendo detectar informações as suas através da sua distância e posição, sendo deste modo, considerada uma técnica sensoramento remoto ativa que pode penetrar nas nuvens, fornecer imagens diurnas e noturnas em todas as condições climáticas (Beneditti, 2010; Ha *et al.*, 2020; Pham & Yoshino, 2017).

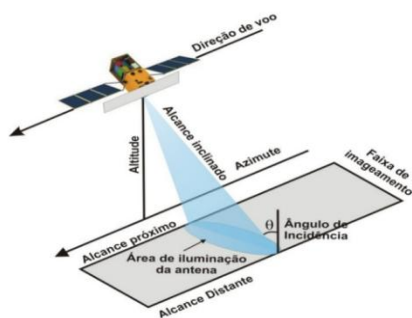


Figura 2: Funcionamento básico dos radares imageadores por (Teixeira, 2011)

As faixas dos satélites de radar encontram-se entre P e K (figura 3), sendo os pontos em que este pode transmitir e receber pulsos em um curto intervalo de tempo e regular. Estes pulsos são transmitidos pela antena do sensor, atingindo a superfície do terreno e a sua interação com o mesmo faz com que a energia se espalhe em várias direcções (Beneditti, 2010; Fatoyinbo & Armstrong, 2014; Pham *et al.*, 2019).

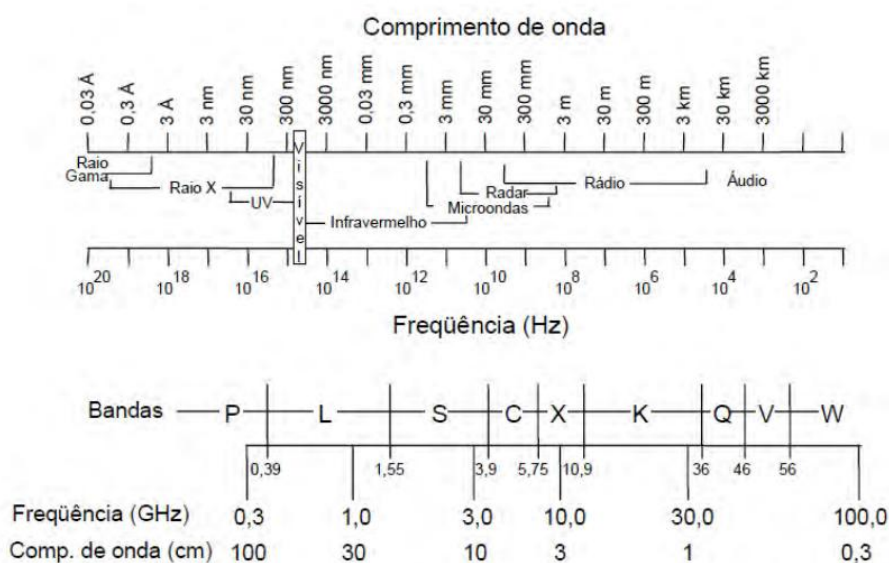


Figura 3: Região de micro-ondas no espectro eletromagnético por (Beneditti, 2010).

Uma parte da energia espalhada retorna ao próprio sensor do mesmo modo e é recuperada à medida que o sensor tende a deslocar-se, por estes funcionarem na faixa das micro-ondas e a transmitância atmosférica é praticamente total para estas faixas, ganhando o nome de retroespalhamento. A informação do alvo é transportada através de ondas eletromagnéticas que são definidas pela direção de propagação, amplitude, comprimento de onda (λ) ou frequência, polarização e fase (Fatoyinbo & Armstrong, 2014; Teixeira, 2011)

Os sinais das micro-ondas polarizadas que são transmitidas podem ser verticais (V), horizontais (H), resultando na recepção de informação de polarização “lineares” (HH e VV) ou “cruzadas” (HV ou VH), sendo a primeira letra referente à polarização da radiação transmitida pela antena e a segunda à polarização recebida (Holecz, 2009; Pham *et al.*, 2019).

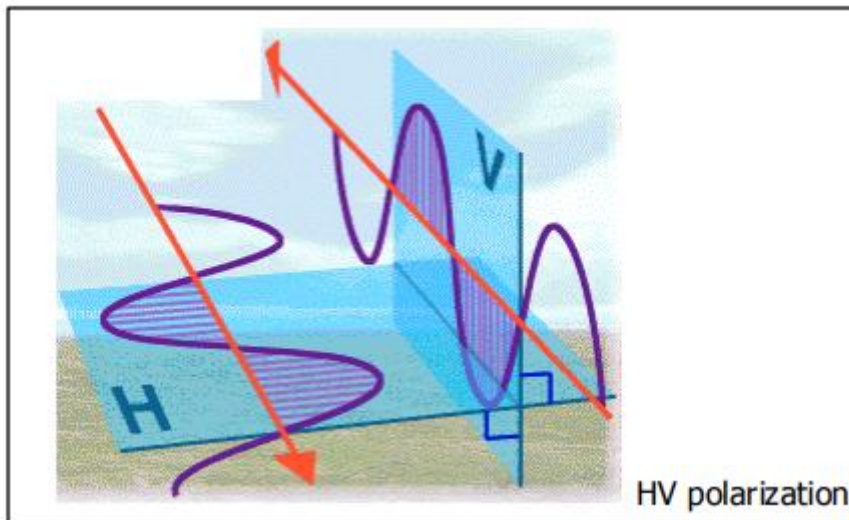


Figura 4: Sistema de polarização da onda eletromagnética por (Holecz, 2009).

O coeficiente de retroespalhamento é fortemente influenciado pelo ângulo de incidência, isto é, diferentes superfícies podem transmitir sinais diferenciados em função do comportamento angular do retroespalhamento e no caso de zonas húmidas, a influência do ângulo de incidência varia de acordo com a estrutura florestal que a compoñha e as características topográficas (Holecz, 2009; Teixeira, 2011).

4.11. Resolução espacial dos sensores de radar

Esta é uma característica bastante importante para determinar o conteúdo de um sistema de radar, isto é, a menor distância possível que permite distinguir dois objectos em intervalos pequenos. A resolução espacial é definida em duas direcções: a paralela à direcção do voo, que é chamada de resolução azimuth que é dada pelo tamanho da antena; e a segunda é perpendicular à direcção do voo que é definida como resolução em range e é medida ao longo da direcção de iluminação do radar e é proporcional ao comprimento do pulso processado (Beneditti, 2010; Holecz, 2009; Teixeira, 2011).

4.12. Rugosidade Superficial

A rugosidade superficial refere-se a interacção que as micro-ondas emitidas pelo sensor de radar tem com a superfície que entram em contacto, influenciando no espalhamento da energia destas micro-ondas e, conseqüentemente, o brilho dos alvos nas imagens de radar dando uma coloração mais escura (Fatoyinbo & Armstrong, 2014). Em superfícies lisas e horizontais, a energia incidente é quase toda espalhada na direcção oposta ao sensor de radar, sendo assim conhecidas como especulares, que são locais tais como águas calmas. As micro-ondas que incidem sobre superfícies rugosas tem sido representadas nas imagens como áreas com mais brilho, pois estes locais tem um alto retroespalhamento (reflexão difusa), tendo múltiplas reflexões em diferentes ângulos (Beneditti, 2010; Fatoyinbo & Armstrong, 2014; Holecz, 2009; Teixeira, 2011).

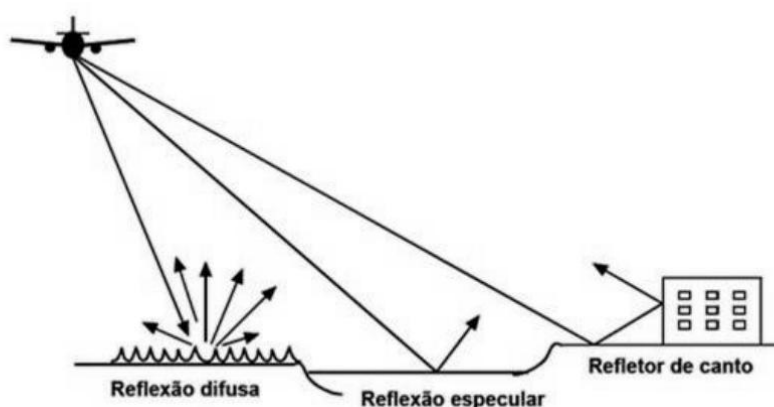


Figura 5: Exemplo dos tipos de reflexão nos alvos por (Beneditti, 2010).

Em florestas de mangal, o retroespalhamento pode ser influenciado pelo tipo de mangal e a sua estrutura, podendo ter um maior retroespalhamento em resultado de uma alta rugosidade da superfície resultada dos pneumatóforos, pelo acumulo de árvores mortas durante as marés baixas ou estações secas e pelo efeito de “duble bounce” que é o coeficiente de retroespalhamento da dupla-reflexão entre os troncos e a superfície do solo (Fatoyinbo & Armstrong, 2014).

4.13. Sentinel-1

A missão Sentinel-1 foi inicializada em abril de 2014 pela Comissão Europeia e a Agência Espacial Europeia (ESA). Ela é composta por dois satélites: SENTINEL-1A e SENTINEL-1B, com um tempo de revista de 12 dias. O Sentinel-1 oferece uma resolução

espacial bem mais imensa e um ciclo de operações menor que os seus predecessores, como ERS-1, ERS-2, RADARSAT, e assim por diante. O Sentinel-1A é um dispositivo de observação radar de abertura sintética (SAR) que forma uma parte do programa de Copernicus que tem as polarizações VV e HV para compensar as suas limitações, ao passo que o Sentinel-1B fará em breve. Esta missão utiliza uma variedade de satélites de observação da Terra e dados terrestres, operando na faixa C (8-4 GHz ou 3.5-7.5cm) (Argamosa *et al.*, 2018).

4.14. Uso da detecção remota para estudos do Mangal

O sensoriamento remoto providencia ótimas oportunidades para o mapeamento da estrutura física e os parâmetros do mangal, onde a biomassa está inclusa, com baixos custos, em curto espaço de tempo e cobrindo uma vasta área (Pham *et al.*, 2019). Os satélites de radar mostram uma importante contribuição para o estudo deste ecossistema por conseguir ultrapassar as limitações dos sensores ópticos, como a penetração sobre as nuvens, a presença da sua própria fonte de luz e a possibilidade de funcionar em qualquer estação (Ha *et al.*, 2020; Simard *et al.*, 2019).

5. Material e métodos

5.1. Área de estudo

Este estudo envolve a área de mangais do posto administrativo da Nova Mambone, localizada no distrito de Govuro, à norte da Província de Inhambane entre as 20° e 22° S e longitudes 34 a 36° E. Ele limita-se pelo Rio Save ao norte, sendo bastante afectado por inundações periódicas, e pelo distrito de Inhassoro ao sul e ao extremo Oeste pelo posto administrativo do Save, e é banhado pelo Oceano Índico. Nova Mambone é a vila-sede do distrito de Govuro, com uma população que tem como actividade principal a pesca (Machava, 2014). O clima é tropical árido na zona interior e tropical húmido na zona costeira, com uma pluviosidade anual média de 1.500 mm com maior incidência de fevereiro à março (época chuvosa). Actualmente, a Nova Mambone está mais próxima da linha da água devido ao efeito da erosão das margens causada pelo rio Save, influenciada pelos eventos climáticos extremos que tem se feito sentir nesta região nos últimos tempos.

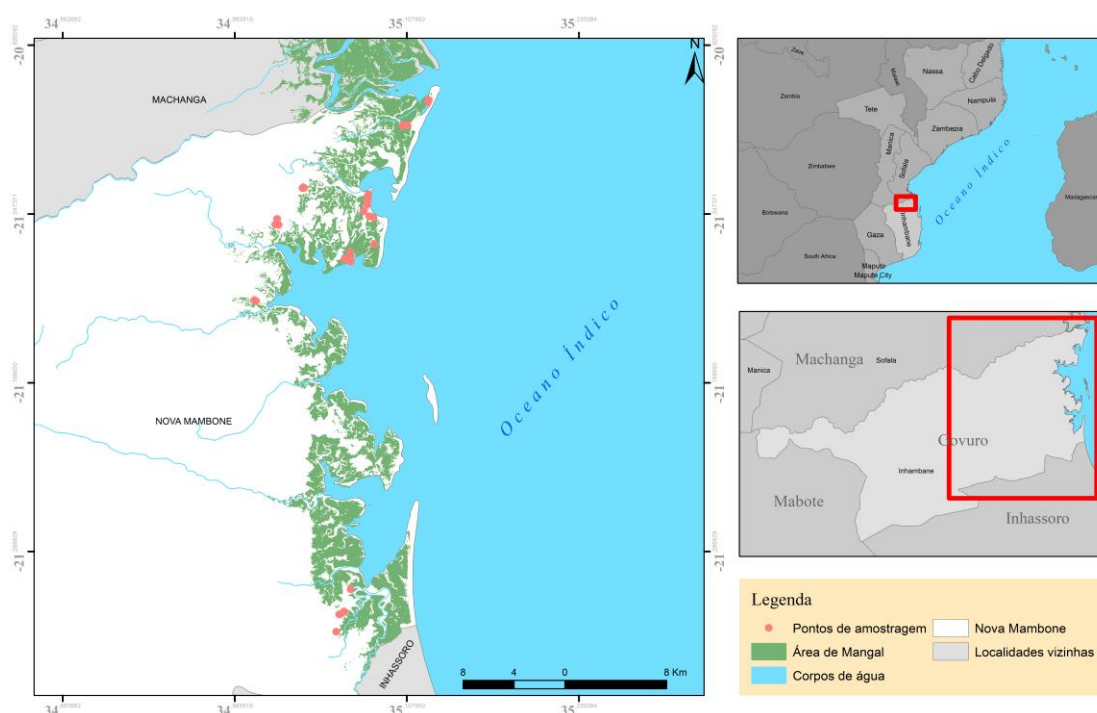


Figura 6: Mapa de área de estudo com os locais de amostragem. Fonte: Autor, 2024.

5.2. Material

- ✓ Base de dados Excel do DAP do mangal;
- ✓ Imagens de Radar de Abertura Sintética (SAR) da missão do Sentinel-1, fornecidas pelo site da European Space Agency (ESA, 2024);

- ✓ Software SNAP Desktop 10.0 fornecido pelo site European Space Agency (ESA, 2024);
- ✓ Software ArcMap 10.8;
- ✓ Softwares R Studio e Excel.

5.2.1. Base de dados de campo

Para este estudo foram usados dados da expedição realizada no mês de dezembro de 2023 no Distrito de Govuro, província de Inhambane, onde foram demarcadas num total de 36 quadrículas, durante os períodos de maré vazante (da maré morta).

A equipe de amostragem delimitou as quadrículas numa área de 10 x 10 m (Machava-António *et al.*, 2020; Nicolau *et al.*, 2017). Foram também recolhidas as coordenadas geográficas de cada quadrícula com recurso a um GPS.

Cada indivíduo (plantas) dentro das quadrículas foi identificado ao nível de espécie e foi retirado o seu diâmetro a altura do peito (1,37m acima do solo) das plantas adultas (mais de 2.5cm) com o auxílio da suta graduada.

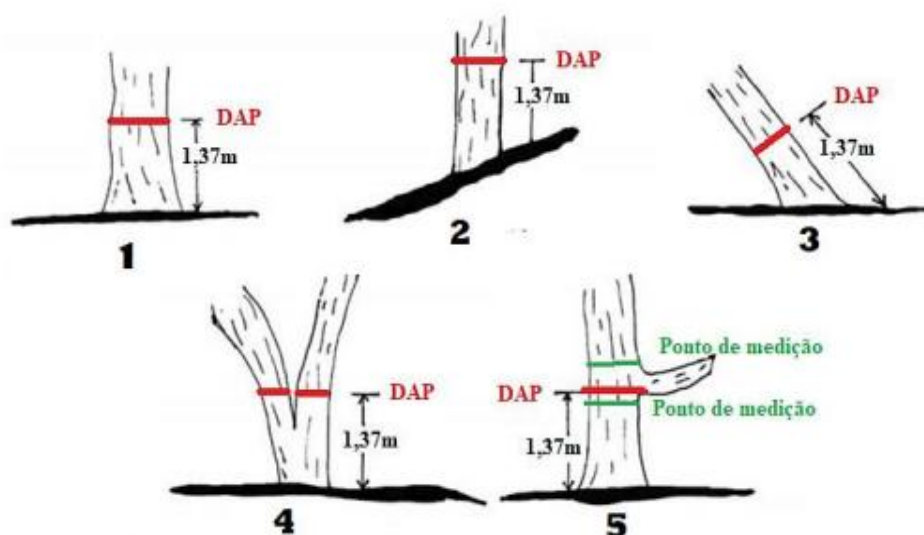
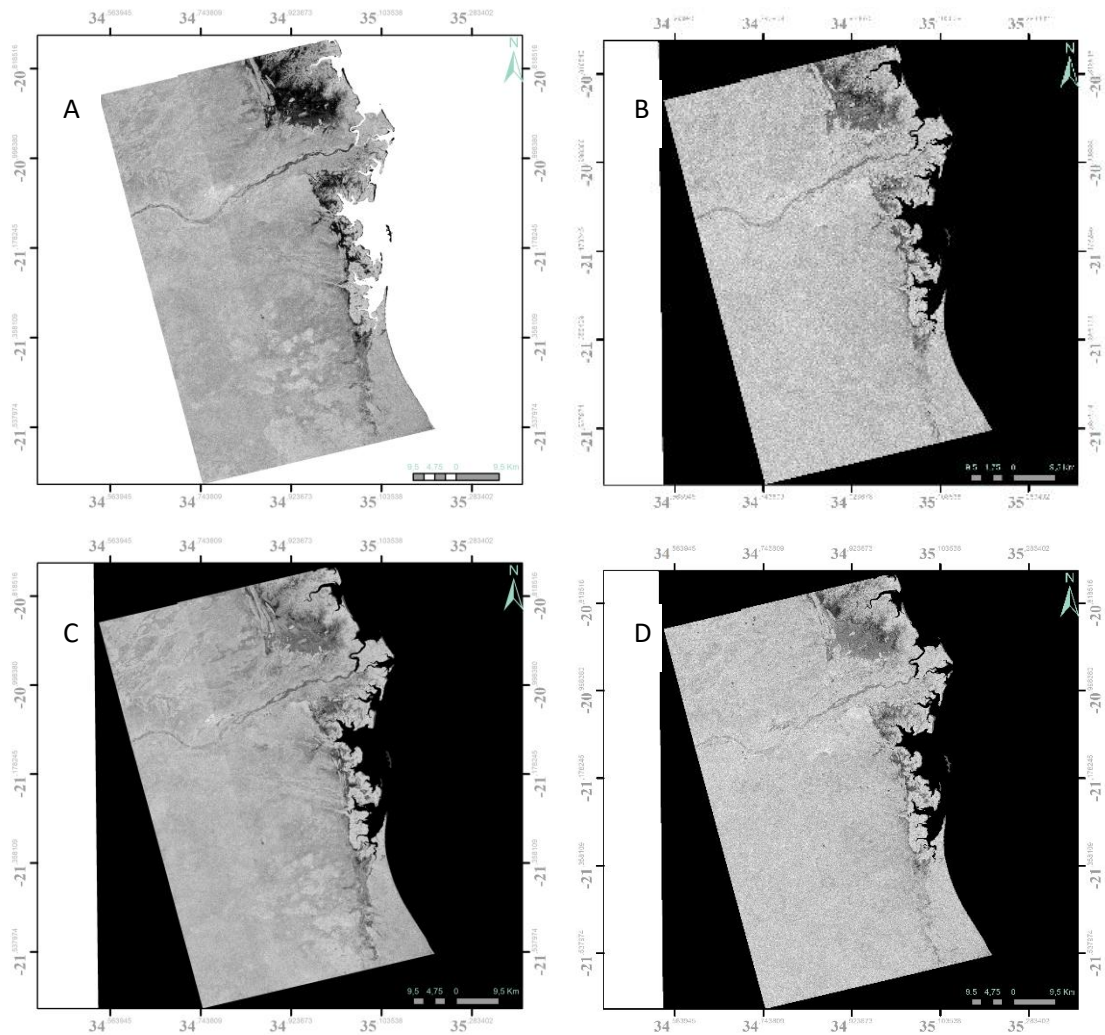


Figura 7: Métodos de medição do diâmetro acima do peito (DAP) sob as diferentes condições em que as árvores podem ser encontradas: normal (1), em um declive (2), árvore inclinada (3), bifurcada (4) e na presença de uma deformação (5) por (Fernando, 2020).

5.2.2. Pré-processamento das imagens Sentinel-1

As imagens Sentinel-1 *Ground Range Detected* (GRD) que apresentam uma resolução espacial de 5 a 25 metros obtidas para o estudo compreendem o período de 2020 a 2024 (figura 8). Estas imagens foram obtidas por download gratuito no repositório de imagens da Copernicus (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>). Foram escolhidas imagens referentes aos períodos anterior e posterior aos eventos climáticos extremos e o restante refere-se à transição de um evento pelo distrito de Govuro (vide tabela 1).



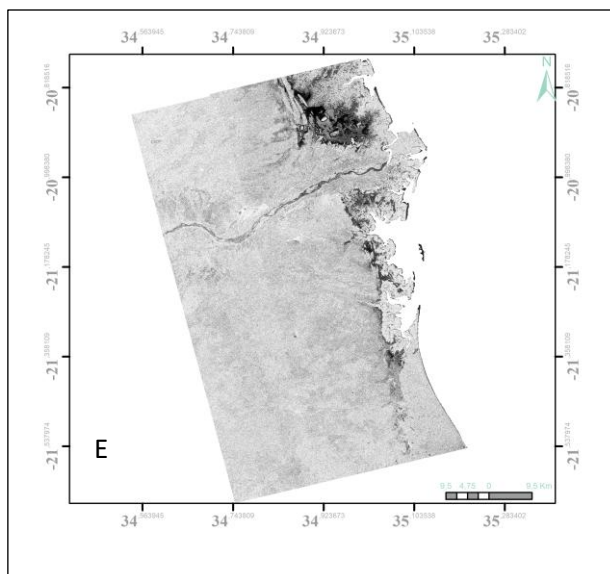


Figura 8: Imagens usadas no estudo, onde a imagem A corresponde ao ano 2020, B, C e D correspondem respectivamente aos anos 2021, 2022, 2023 e 2024.

Tabela 1: Data das imagens Sentinel-1A e anos de passagem das tempestades tropicais no districto de Govuro.

Data da Imagem Sentinel-1	Ciclone/tempestade tropical	Escala Saffir-Simpson
31/03/2020	Sem registo	
26/03/2021	Guambe:11 a 22 de fevereiro	Categoria 2
21/03/2022	Sem registo	
28/03/2023	Freddy: 6 a 24 de fevereiro	Tempestade tropical
28/03/2024	Filipo: 10 a 14 de março	Tempestade tropical

O pré-processamento das imagens, foi feito com o auxílio do programa gratuito e de código aberto SNAP (*Sentinel Application Platform*) na versão 10.0, desenvolvido pela Agência Espacial Europeia (ESA). Este programa possui inúmeros recursos para o processamento de imagens satélite, principalmente da constelação de sensores do Sentinel. O pré-processamento constituiu das seguintes etapas (Argamosa *et al.*, 2018): (a) aplicação do arquivo orbital (*Apply Orbit File* – AOF); (b) calibração radiométrica;

(c) filtragem do ruído *Speckle*; (d) correção do terreno alcance-Doppler (*Range Doppler Terrain Correction – RDTC*); e (e) conversão linear para decibéis (dB). (**Figura 9**).



Figura 9: Fluxograma das etapas no Snap

O AOF é a primeira etapa do pré-processamento dos dados Sentinel-1 SAR, que corrige os efeitos de movimento e posição do satélite durante a aquisição de dados. Essa correção é feita com base em informações precisas da órbita, obtidas a partir de Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS) e outros sistemas de rastreamento. O método calcula a posição e a velocidade do satélite com alta precisão (Cardoso, 2023). O programa SNAP realiza o processamento dessa etapa, baixando automaticamente os vectores de estado de órbita atualizados para cada cena SAR, o que garante a precisão das informações georreferenciadas e a confiabilidade das análises espaciais (Filipponi, 2019).

A calibração nos dados Sentinel-1 é realizada para converter os valores digitais dos *pixels* em retroespalhamento SAR radiometricamente calibrado. O produto *Ground Range Detected* (GRD) do Sentinel-1 contém as informações necessárias para aplicar a equação de calibração, permitindo a conversão dos valores de intensidade da imagem em valores de ruído de sigma (Argamosa *et al.*, 2018; Filipponi, 2019).

Uma etapa crucial no processamento dos dados SAR é a filtragem do ruído *speckle*, que é um tipo de ruído causado pelas interferências construtivas e destrutivas das ondas eletromagnéticas refletidas da superfície terrestre. Esse ruído se manifesta como pequenos pontos claros e escuros nas imagens, afetando significativamente sua qualidade visual e dificultando a interpretação. Para melhorar a qualidade da imagem e facilitar a identificação dos alvos, são utilizados filtros de *speckle*. No pré-processamento deste trabalho, foi utilizado o filtro Refined Lee, visando à obtenção de melhores resultados na redução do ruído nas polarizações VV e VH (Argamosa *et al.*, 2018; Dewaele & Wambacq, 2016).

As variações na altura do terreno podem causar distorções geométricas nas imagens SAR, devido à aquisição de dados com vista lateral em ângulos variáveis maiores que 0 graus.

Essas distorções são corrigidas na etapa de processamento conhecida como *Range Doppler Terrain Correction* (RDTC), também chamada de correção geométrica do terreno ou Geocoding. Esse processo envolve várias sub-etapas, incluindo a estimativa da altura topográfica, a projeção dos dados SAR em um modelo de terreno e a reamostragem dos dados em uma grade regular. O modelo de terreno usado nessa etapa geralmente é derivado de Modelos Digitais de Elevação (MDTs) ou outras fontes de informações topográficas (Cardoso, 2023).

A última etapa do pré-processamento dos dados SAR é a Conversão linear para decibéis (dB). Nessa etapa, o coeficiente de retroespalhamento, que é originalmente sem unidade, é convertido em decibéis (dB) por meio de uma transformação logarítmica. Essa conversão para uma escala logarítmica expressa em dB compacta a faixa de dados, facilitando a distinção das feições presentes na imagem e melhorando o processo de detecção de mudanças, que seria mais difícil de discernir em uma escala linear.

De seguida, as imagens pré-processadas foram exportadas para o ArcMap e fez-se uma máscara da delimitação da área de mangal a partir de um shapefile já disponível.

5.3. Processamento dos dados de campo

Com os dados de campo previamente organizados numa folha Excel, fez-se a estimativa da biomassa por indivíduo de cada quadrícula, com o auxílio de equações alométricas específicas. As equações alométricas foram selecionadas de estudos anteriores em habitats com características similares e estas foram baseadas na amplitude do DAP encontrada no campo.

As equações alométricas baseiam-se na relação entre a biomassa das árvores e os parâmetros de medição, como o DAP da árvore, de acordo com as equações específicas apresentadas na **Tabela 2**.

Tabela 2: Equações alométricas específicas para espécies de mangal usadas na estimação da biomassa de mangal do distrito de Govuro.

Espécies	Equações	N	DAP (cm)	Autor	Origem
<i>Avicennia marina</i>	$B = 0.308 * D^{2.11}$	419	<35	Comley e McGuinness (2005)	Queensland, Austrália

<i>Bruguiera gymnorhiza</i>	$B = 0.0679 * D^{1.4914}$	67	<15	Cole <i>et al.</i> (1999) Kauffman e Cole (2010)	Micronésia
<i>Ceriops tagal</i>	$B = 10^{(-0.7247)} * D^{2.3379}$	270	<22	Comley e McGuinness (2005)	Queensland, Austrália
<i>Lumnitzera racemosa</i>	$B = 0,208 * D^{0.48}$	145	<30	Komiyama <i>et al.</i> (2005)	Tailândia e Indonésia
<i>Rhizophora mucronata</i>	$B = 0.8069 * D^{2.5154}$	694	<30	Kauffman e Cole (2010)	Kenia, Gazi Bay
<i>Sonneratia alba</i>	$B = 0.251 * 0.475 * (D^{2.46})$	44	<20	Komyama <i>et al.</i> (2005)	Tailândia e Indonésia
<i>Xylocarpus granatum</i>	$B = 0.0823 * D^{2.59}$	151	<30	Clough e Scott (1989)	Kenia, Gazi Bay

Onde: B é biomassa (Mg);

D é o diâmetro à altura do peito (cm).

Procedeu-se com o cálculo da biomassa total da biomassa para cada quadrícula, somando a biomassa estimada dos indivíduos presentes em determinada quadrícula seguida da conversão em megagrama por hectare (Mg*ha⁻¹). Com a biomassa de cada quadrícula.

Os pontos de amostragem foram espacializados no ArcMap e de seguida foram extraídos os valores do em decibéis nas imagens referentes aos pontos para cada ano.

5.4. Análise de dados

Foi feito o ajuste da relação Biomassa (AGB) – dB por meio de uma regressão linear múltipla no R Studio (Hidayah *et al.*, 2024), modelo matemático que relacionou o comportamento da variável Y (Biomassa) com a X (valor em dB nas diferentes polarizações), conforme a equação:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2$$

Equação 1: Equação da regressão múltipla

Foi usado o coeficiente de determinação (R²) para avaliar a relação Biomassa-Retroespalhamento (dB). A regressão foi feita sem o uso do coeficiente linear (*a*), assumindo que quando o valor dos dB da imagem for zero, a Biomassa também será zero,

sendo que a recta de regressão deverá passar pela origem. Isso pressupõe que se não houver biomassa vegetal numa determinada área, ou seja, numa área sem vegetação os valores de dB serão nulos.

A partir dessa relação, foi possível espacializar a estimativa de biomassa para períodos anteriores e posteriores aos eventos climáticos e foi feita uma análise comparativa entre as estimativas de biomassa do mangal, para a detecção de mudanças (*Change Detection*). O resultado do processo de detecção de mudanças foi o mapa de mudanças de biomassa entre 2020-2024.

Para verificar a validade do modelo foi utilizado um outro conjunto de dados amostrados com 36 pontos e utilizado o teste t pareado para avaliar se houve diferenças significativas entre as biomassas de cada ano, também com 5% de significância.

6. Resultados

6.1. Biomassa acima do solo

Nas 36 quadrículas amostradas, foram identificadas um total de 7 espécies de mangal. A biomassa quadrículas variou de 0,353 Mg/ha à 29,059 Mg/ha, como é ilustrada na figura abaixo:

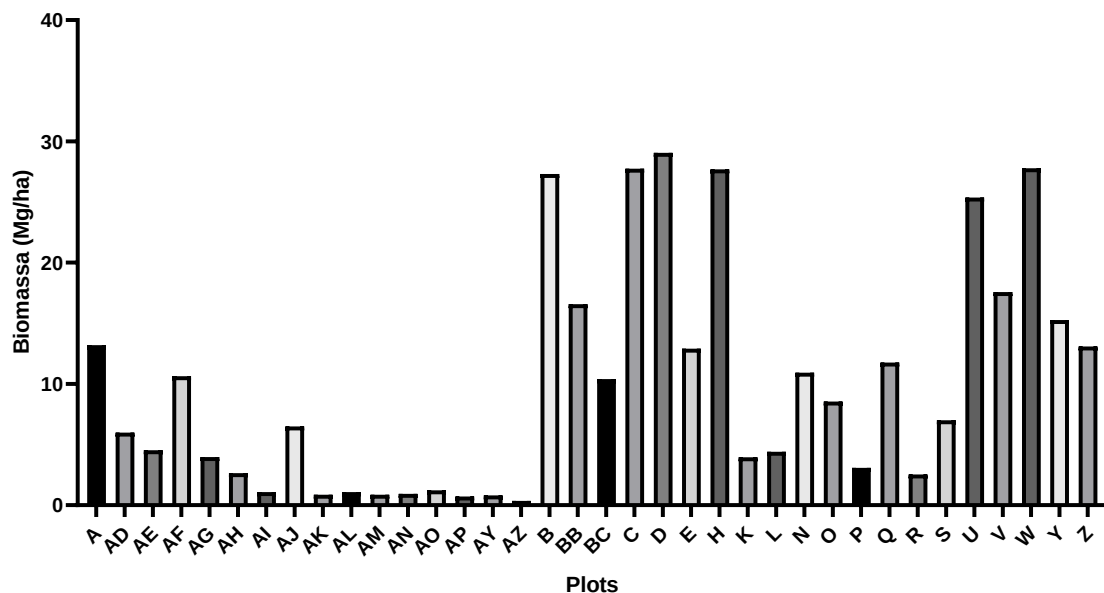


Figura 10: Biomassa acima do solo das quadrículas de amostragem.

6.2. Relação Biomassa estimada e os valores de retroespalhamento das imagens de Radar

Os valores de retroespalhamento das polarizações VV e VH da imagem do ano de 2023 foram extraídos para cada ponto de amostragem. A média do retroespalhamento para a polarização VV foi de -10,439 dB, com um valor máximo de -5,891 dB e mínimo de -14,605 dB. O valor médio de retroespalhamento para a polarização VH foi de -16,922 dB, com um máximo de -13,438 dB e um valor mínimo de -19,932 dB de retroespalhamento, como ilustrado na tabela abaixo:

Tabela 3: Valores de retroespalhamento.

Retroespalhamento	Mínimo	Máximo	Média
VV	-5,891 dB	-14,605 dB	-10,439 dB
VH	-13,438 dB	-19,932 dB	-16,922

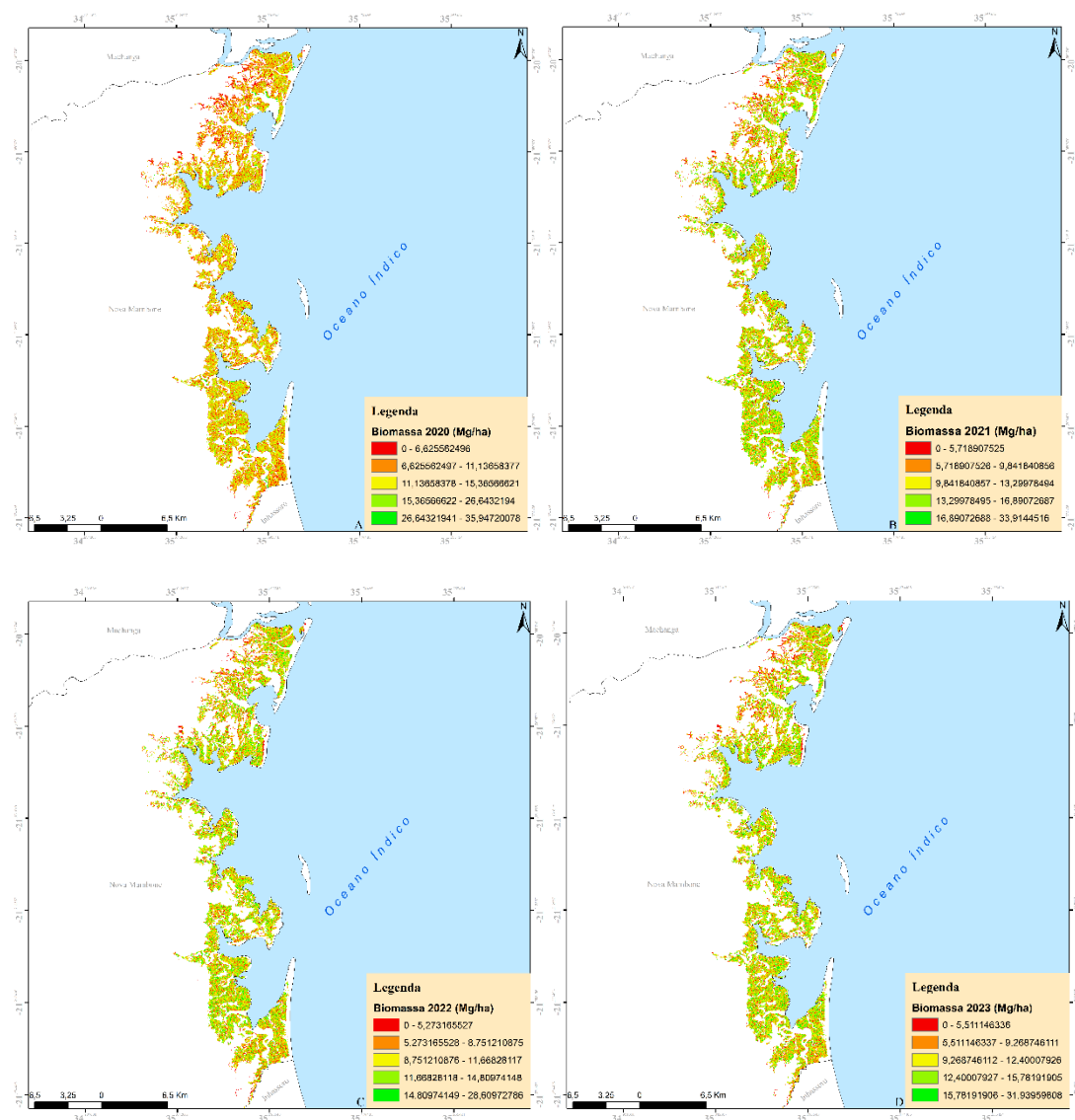
O resultado da análise de regressão Biomassa-retroespalhamento deu origem a equação 2:

$$Biomassa \left(\frac{Mg}{ha} \right) = 45.494 + 3.584 * VH - 2.405 * VV$$

Equação 2: Equação da relação Biomassa-dB

A relação Biomassa-Retroespalhamento (dB) foi positiva, apresentando um coeficiente de determinação (R^2) de 0.2188, ou seja, as variáveis preditoras explicam 21,88% da variação da biomassa nessa amostra de dados.

A equação foi especializada para cada um dos anos (figura 11) para realizar a estimativa da biomassa.



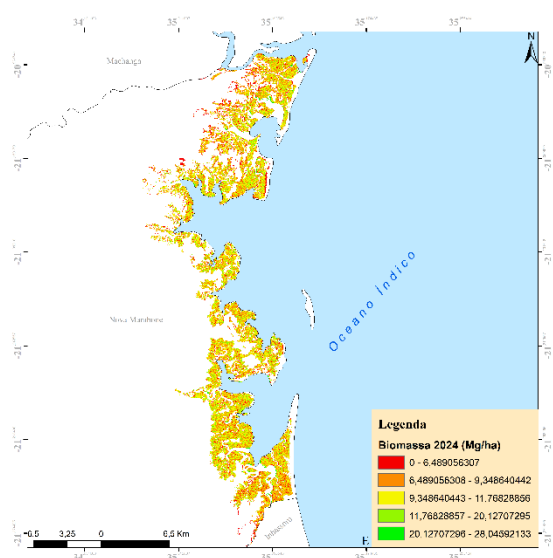


Figura 11: Estimativa de Biomassa do Distrito de Govuro entre os anos de ocorrência dos eventos climáticos extremos.

A biomassa média dos anos é ilustrada na figura 12:

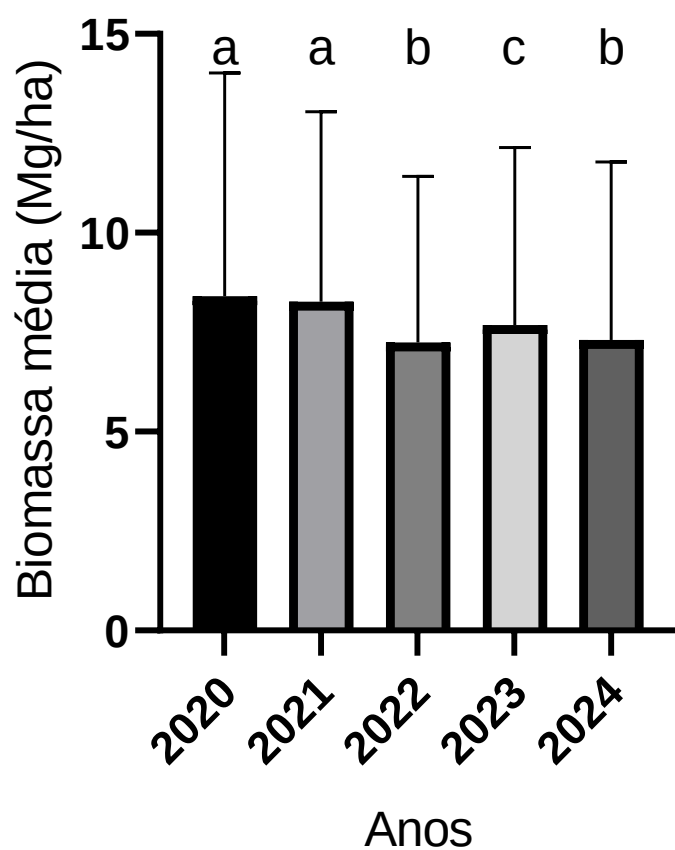


Figura 12: Biomassa média do mangal

O test-t pareado com um nível de confiança de 95% para os com as amostras dos anos, com o objectivo de observar se houve mudanças da biomassa em alguns anos, como é ilustrado na tabela 3:

Tabela 4: test-t para avaliar se houveram diferenças na biomassa entre os anos.

	2020	2021	2022	2023	2024
2020		0,924837	0,000000	0,000560	0,000000
2021			0,000000	0,000000	0,000000
2022				0,003552	0,658248
2023					0,002393
2024					

Não existe diferença significativa entre a variação da biomassa entre os anos de 2020 e 2021 (p-valeu=0.924837) e para os anos de 2022 e 2024 (p-valeu=0.658248).

A biomassa do mangal estimada para o distrito de Govuro no intervalo de passagem dos eventos climáticos extremos não apresentou alterações significativas. Em 2020 a floresta apresenta níveis de biomassa considerados altos, e com a ocorrência dos eventos extremos verifica-se uma redução contínua da biomassa, seguida de uma recuperação no ano de 2023. Em 2024 a estimativa de biomassa voltou a registrar um decréscimo (Figura 12). A figura 13 ilustra a variação da biomassa entre os anos de 2020 e 2024, onde é ilustrado comportamento da biomassa entre os anos de estudo.

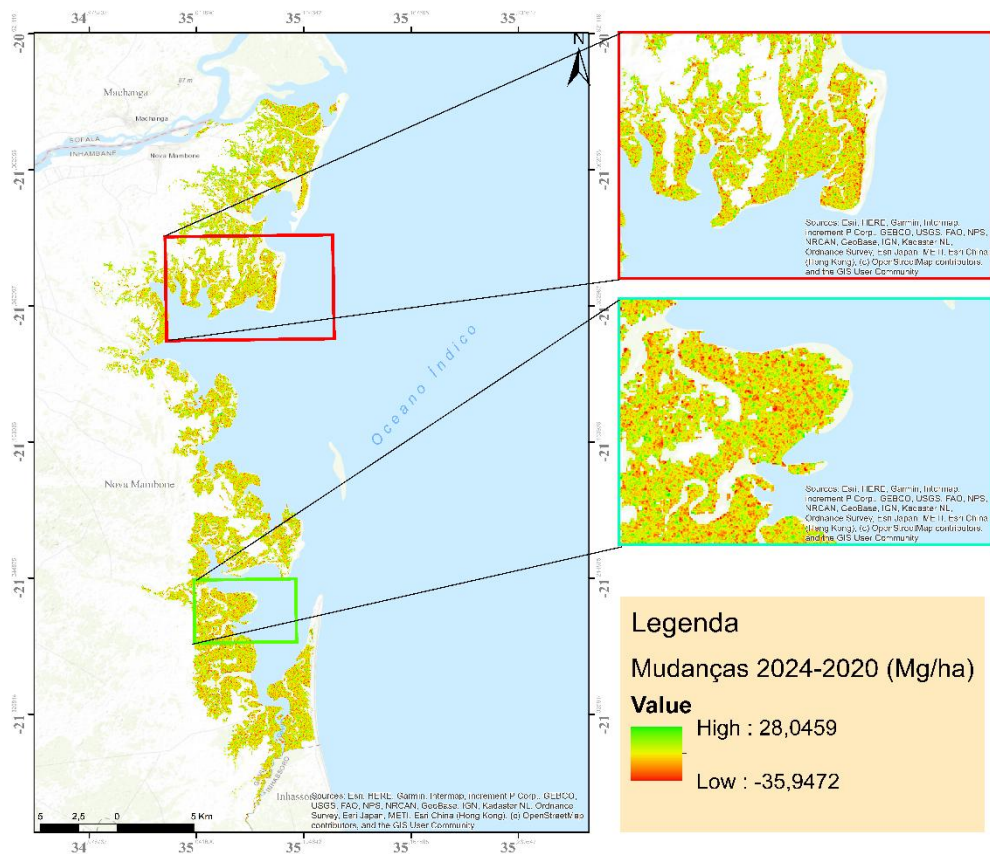


Figura 13: Comportamento da Biomassa de Govuro no intervalo de passagem dos eventos. Em vermelho a área visualmente mais afectada e em verde, a área visualmente menos afectada.

7. Discussão

7.1. Biomassa do mangal do distrito de Govuro estimada através das equações alométricas

Para a estimativa da biomassa do mangal neste estudo, foram usadas equações alométricas específicas (tabela 2). Muitas dessas equações pertencem a locais com latitudes similares, as espécies que compõem o local (vide tabela 1). Kauffman & Donato, (2012), refere que para a melhor escolha da equação a usar, é necessário considerar: factores de solo, localização geográfica, composição específica do local onde a equação foi desenvolvida, bem como a amplitude do DAP encontrado. As equações usadas por Fatoyinbo *et al.*, (2008) para estimar a biomassa da *A. marina*, *B. gymnorhiza* e *C. Tagal* foram as escolhidas por sua aplicabilidade em qualquer área de Moçambique. Poucos estudos desenvolveram equações para *L. Recemosa* e *S. Alba*, o que condicionou a escolha das equações mais adequadas neste estudo. As equações usadas para a *R. Mucronata* e *X. Granatum* foram desenvolvidas no Quênia, por conta da sua semelhança geográficas nas condições e a amplitude do DAP.

Em estudos de sensoriamento remoto, para que a sua abordagem seja eficaz, a integração dos resultados do sensoriamento remoto com os dados de campo é essencial. Isso pode ser alcançado pelo desenvolvimento de equações alométricas para estimar a biomassa acima do solo, considerando os dados de diâmetro em campo, e parâmetros estimados por dados de sensoriamento remoto (Fatoyinbo & Armstrong, 2010; Cavalcanti *et al.*, 2016). No entanto, esses modelos são específicos do local e da espécie, o que limita a confiabilidade de algumas estimativas de biomassa por sensoriamento remoto a serem aplicadas em diferentes áreas de mangal (Cavalcanti *et al.*, 2016).

Pesquisas recentes concentraram-se no desenvolvimento de modelos matemáticos que podem ser usados para estimar a biomassa do mangal com base nos valores de *pixel* de imagens de satélite, sendo assim uma forma rápida, amiga do ambiente e económica (Fatoyinbo & Armstrong, 2010; Hidayah *et al.*, 2024; Kauffman & Donato, 2012).

7.2. Relação Biomassa estimada e retroespalhamento das imagens de SAR

A polarização cruzada (VH) do sentinel-1 permite extrair informações da copa das árvores e de pequenos ramos permite recolher informações que possibilitarão a obtenção

de um R^2 aceitável, extraindo desse jeito muitas características estatísticas que ajudam a modelagem dos valores de biomassa acima do solo (Cavalcanti *et al.*, 2016).

A partir da combinação dos dados de retroespalhamento das imagens de radar e a biomassa, foi possível desenvolver uma equação para a estimativa da biomassa. Segundo Hidayah *et al.*, 2024 e Navarro *et al.*, 2019, com a técnica de detecção remota por radar e a combinação de dados campo, torna-se possível fazer uma melhor identificação da extensão da floresta de mangal em áreas remotas e de difícil acesso e medir a sua biomassa usando análises de regressão (Navarro *et al.*, 2019; Hidayah *et al.*, 2024).

O ajuste do modelo apresenta R^2 considerado baixo, explicando pouco mais de 20 % da variabilidade das estimativas. Acredita-se que o número limitado de amostras pode ter sua influência conjugada para levar em conta as diferenças na densidade ou cobertura do dossel, a fim de produzir um modelo mais representativo da biomassa estimada, como é apontado por Hidayah *et al.*, 2024, em seu estudo.

Em contexto global, o uso de imagens de radar tem sido de grande sucesso em estudos dos ecossistemas de mangal (Cavalcanti *et al.*, 2016; Pham *et al.*, 2017; Hidayah *et al.*, 2024), fornecendo inúmeras informações, como a extensão da sua vegetação, parâmetros estruturais, limites de inundação, sua saúde e quantidade de biomassa total.

7.3. Alterações na Biomassa do Mangal do Distrito de Govuro antes e após a passagem dos eventos climáticos extremos

A biomassa do distrito de Govuro teve uma variação nos seus níveis entre os anos de eventos extremos e os anos sem passagem dos eventos climáticos, tendo apresentado uma perdas e ganhos entre estes anos.

Processos ou mudanças, como alterações na biomassa, podem ocorrer antes que a vegetação de um determinado local atinja uma relativa estabilidade nas suas características fisiológicas, estruturais e aforísticas (Odum, 1985).

O impacto de ciclones e furacões nos mangais demonstrou em muitos lugares causar mortalidade massiva de árvores e mudanças no ecossistema, sendo um factor limitante para o seu desenvolvimento (Macamo *et al.*, 2016). Uma das grandes vantagens do uso do sensoriamento remoto é a capacidade de medir sistematicamente a extensão das florestas de mangal e a sua biomassa em uma larga escala, em comparação aos estudos

de campo (Fatoyinbo *et al.*, 2008; Pham *et al.*, 2019; Hidayah *et al.*, 2024). Uma das limitações do uso de dados de campo com o auxílio dos dados de satélite é que a colecta dos dados de campo raramente são colectados na data em que a imagem foi adquirida (Machava, 2014).

Do ponto de vista do sensoriamento remoto, a biomassa acima do solo é reconhecida como um importante indicador ecológico para determinar a condição ambiental das florestas de mangal (Hidayah *et al.*, 2024). O curto tempo de revisita (resolução temporal) das imagens Sentinel-1 é vantajoso em aplicações de detecção de mudanças florestais, além disso, as imagens são gratuitas e de fácil acesso (Cardoso, 2023; Hidayah *et al.*, 2024; Navarro *et al.*, 2019).

O uso do sensoriamento remoto activo como o Lidar e radar de abertura sintética são as melhores ferramentas disponíveis para obter informações sobre a estrutura e biomassa, além da distribuição espacial do mangal (Fatoyinbo & Simard, 2013; Pham *et al.*, 2017; Abdel-hamid *et al.*, 2018).

8. Conclusão

Os ecossistemas de mangal são sensíveis a contínuos eventos climáticos extremos, evidenciando uma variação nas estimativas de biomassa por satélite de radar. Sua perda contribui para as emissões de gases de efeito estufa e tem implicações negativas para os ecossistemas e comunidades costeiras. Este estudo demonstrou a aplicabilidade de dados de radar para avaliar o impacto dos eventos climáticos extremos sobre o mangal de Govuro, apesar de persistirem desafios relativos a acurácia no ajuste dos modelos.

A biomassa média nos mangais de Govuro foi estimada em 358.41 Mg/ha. A combinação das polarizações VV e VH com as estimativas de campo por meio da regressão linear múltipla, produziu um modelo positivo: ($R^2 = 0,2188$), com a equação: $Biomassa \left(\frac{Mg}{ha} \right) = 45.494 + (3.584 * VH) - (2.405 * VV)$.

Foi possível verificar e quantificar as alterações na biomassa do mangal do distrito de Govuro, entre os anos de 2020 a 2024, com a passagem dos diferentes eventos climáticos extremos. Em 2020, a floresta apresentava um nível de biomassa consideravelmente alto, e com o ciclone Guambe em 2021, os níveis de biomassa tenderam a decrescer até ao ano de 2022 e houve uma recuperação na imagem do ano de 2023, e os níveis voltaram a reduzir no ano de 2024.

8.1. Limitações e Recomendações

- ✓ A base de dados disponibilizada era referente a um estudo com o maior foco nas áreas degradadas;
- ✓ Recomenda-se o desenvolvimento de equações alométricas específicas para o mangal do distrito de Govuro e outros locais de Moçambique, tendo em conta as diferenças estruturais do mangal entre a zona sul, centro e norte. Visto que o padrão de desenvolvimento do mangal se difere em cada zona;
- ✓ Recomenda-se o desenvolvimento de estudos semelhantes em que as seleções das amostras sejam variadas para levar em conta as diferenças na densidade ou cobertura do dossel, a fim de produzir um modelo mais representativo da biomassa estimada, para entender melhor as variações de biomassa nos mangais e seu papel na mitigação das mudanças climáticas.

9. Referências bibliográficas

- Abdel-hamid, A., Dubovyk, O., & El-magd, I. A. (2018). Mapping Mangroves Extents on the Red Sea Coastline in Egypt using Polarimetric SAR and High Resolution Optical Remote Sensing Data. *Sustainability*, 10, 1–22. <https://doi.org/10.3390/su10030646>
- Amaral, C., Poulter, B., Lagomasino, D., Fatoyinbo, T., Taillie, P., Lizcano, G., Canty, S., Silveira, J. A. H., Teutli-Hernández, C., Cifuentes-Jara, M., Charles, S. P., Moreno, C. S., González-Trujillo, J. D., & Roman-Cuesta, R. M. (2023). Drivers of mangrove vulnerability and resilience to tropical cyclones in the North Atlantic Basin. In *Science of the Total Environment* (Vol. 898, Issue July). Science of the Total Environment. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165413>
- Argamosa, R., Blanco, A., Baloloy, A., Candido, C., Dumalag, J., DImapilis, Lady, & Paringit, E. (2018). MODELLING above GROUND BIOMASS of MANGROVE FOREST USING SENTINEL-1 IMAGERY. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4(3), 13–20. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-3-13-2018>
- Bacar, F. F., Lisboa, S. N., & Siteo, A. (2023). The Mangrove Forest of Quirimbas National Park Reveals High Carbon Stock Than Previously Estimated in Southern Africa. *Wetlands*, 43(6), 60. <https://doi.org/10.1007/s13157-023-01707-1>
- Bandeira, S., Macamo, C., Mahazule, R., & Mabilana, H. (2016). *Estudo de lições aprendidas e boas práticas de reabilitação do mangal*.
- Barbosa, F. M. A., Cuambe, C. C., & Bandeira, S. O. (2001). Status and distribution of mangroves in Mozambique. *South African Journal of Botany*, 67(3), 393–398. [https://doi.org/10.1016/S0254-6299\(15\)31155-8](https://doi.org/10.1016/S0254-6299(15)31155-8)
- Beneditti, C. A. (2010). *Imagens multitemporais ALOS / PALSAR baseada em orientação a objeto na discriminação da cobertura da terra*. Universidade Estadual Paulista.
- Bié, A. J. (2022). *Ciclones tropicais no Sudoeste do Oceano Índico: representação em reanálises atmosféricas e experimentos de sensibilidade com modelo regional acoplado*.
- Cardoso, D. (2023). *USO DE SÉRIES TEMPORAIS DO SENSOR SENTINEL-1 SAR NA ANÁLISE DE ÁREAS INUNDÁVEIS NOS RIOS MADEIRA E CANUMÃ NO ESTADO DO AMAZONAS, BRASIL* [UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA -

UnB]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK558907/>

- Cavalcanti, L., Santos, M., & Bitencourt, M. D. (2016). Remote sensing in the study of Brazilian mangroves : review , gaps in the knowledge , new perspectives and contributions for management *. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 16(May), 245–261. <https://doi.org/10.5894/rgci662>
- Chambo, J. J. (2017). *ESCOLA SUPERIOR DE CIÊNCIAS MARINHAS E COSTEIRAS Monografia para obtenção do grau de licenciatura em Oceanografia Avaliação da cobertura de floresta de mangal no posto administrativo de Macuse (“Namacurra”), através do sensoriamento remoto.*
- Charrua, A. B., Bandeira, S. O., Catarino, S., Cabral, P., & Romeiras, M. M. (2020). Assessment of the vulnerability of coastal mangrove ecosystems in Mozambique. *Ocean and Coastal Management*, 189, 12. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105145>
- Charrua, A. B., Padmanaban, R., Cabral, P., Bandeira, S., & Romeiras, M. M. (2021). Impacts of the tropical cyclone idai in mozambique: A multi-temporal landsat satellite imagery analysis. *Remote Sensing*, 13(2), 1–17. <https://doi.org/10.3390/rs13020201>
- Chitata, J. G., & Remane, M. A. (2022). BEIRA E OS EFEITOS DO CICLONE TROPICAL IDAI. ANÁLISE TEMPORAL BASEADA EM IMAGENS SATELITES E FOTOGRAFIAS. *Boletim GeoÁfrica*, 1, 91–96. <http://hdl.handle.net/10362/98442>
- Dewaele, P., & Wambacq, P. (2016). Speckle filtering of synthetic aperture radar images : A Review. *Remote Sensing Reviews*, 8(February 1994), 313–340. <https://doi.org/10.1080/02757259409532206>
- Fatoyinbo, T. E., & Armstrong, A. H. (2010). *Chapter Number Remote Characterization of Biomass Measurements : Case Study of Mangrove Forests.* August 2010, 1–14.
- Fatoyinbo, T. E., & Armstrong, A. H. (2014). *Remote Characterization Of Biomass Measurements : Case Remote Characterization of Biomass Measurements : Case Study of Mangrove Forests* (Issue January).
- Fatoyinbo, T. E., & Simard, M. (2013). Height and biomass of mangroves in Africa from ICESat/GLAS and SRTM. *International Journal of Remote Sensing*, 34(2), 668–681. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.712224>

- Fatoyinbo, T. E., Simard, M., Washington-Allen, R. A., & 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*, 113(2), 1–13. <https://doi.org/10.1029/2007JG000551>
- Fernando, A. D. J. (2020). *Composição Específica da Vegetação , Estrutura e Estado de Conservação do Mangal da Baía de Maputo* *Composição Específica da Vegetação , Estrutura e Estado de Conservação do Mangal da Baía de Maputo*. Univrsidade Eduardo Mondlane.
- Filipponi, F. (2019). Sentinel-1 GRD preprocessing workflow. *The 3rd International Electronic Conference on Remote Sensing (ECRS 2019)*, 3(June), 2–6.
- Francisco, L., Ribeiro, N., & Siteo, A. (2019). Análise de Mudança de Cobertura do Mangal na Baía de Sofala, Moçambique. *Captar*, 8(July 2022), 11.
- Garcia, M., Arbelo, M., & Gil, A. (2012). *Satélites para Detecção Remota aplicada à Gestão Territorial (versão em português)* (Issue January).
- Guambe, J. J., & Silva, J. J. (2022). Climate, political and health vulnerabilities of tourism in Mozambique. *GEOUSP*, 26(2022), 18.
- Ha, N. T., Manley-Harris, M., Pham, T. D., & Hawes, I. (2020). A comparative assessment of ensemble-based machine learning and maximum likelihood methods for mapping seagrass using sentinel-2 imagery in Tauranga Harbor, New Zealand. *Remote Sensing*, 12(3), 1–17. <https://doi.org/10.3390/rs12030355>
- Hidayah, Z., Utama, R. Y., As-Syakur, A. ., Rachman, H., & Wiyanto, D. (2024). Mapping mangrove above ground carbon stock of benoa bay bali using sentinel-1 satellite imagery. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1298(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1298/1/012013>
- Holecz, F. (2009). *Synthetic Aperture Radar*. Sarmap.
- Jia, M., Wang, Z., Mao, D., Ren, C., Song, K., Zhao, C., Wang, C., Xiao, X., & Wang, Y. (2023). Mapping global distribution of mangrove forests at 10-m resolution. *Science Bulletin*, 68(12), 1306–1316. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2023.05.004>
- Kaasalainen, S., Holopainen, M., Karjalainen, M., Vastaranta, M., Kankare, V., Karila, K., & Osmanoglu, B. (2015). Combining lidar and synthetic aperture radar

- data to estimate forest biomass: Status and prospects. *Forests*, 6(1), 252–270. <https://doi.org/10.3390/f6010252>
- Kauffman, J., & Donato, D. (2012). *Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests*.
 - Lasse, N. (2023). *POTENCIAL DOS ECOSISTEMAS (FLORESTAS) NA REDUÇÃO DA VULNERABILIDADE CLIMÁTICA DOS MEIOS DE SUBSISTÊNCIA EM MOÇAMBIQUE: CASO DO CICLONE TROPICAL FREDDY*. 1–10.
 - Lee, C. K. F., Duncan, C., Nicholson, E., Fatoyinbo, T. E., Lagomasino, D., Thomas, N., Worthington, T. A., & Murray, N. J. (2021). Mapping the Extent of Mangrove Ecosystem Degradation by Integrating an Ecological Conceptual Model with Satellite Data. *Remote Sensing*, 13, 1–19.
 - Macamo, C., Massuanganhe, E., Nicolau, D., Bandeira, S. O., & Adams, J. B. (2016). Mangrove's response to cyclone Eline (2000): What is happening 14 years later. *Aquatic Botany*, 134, 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2016.05.004>
 - Macamo, C., Nicolau, D., Machava, V., Chitará, S., & Bandeira, S. (2021). *Uma contribuição para o esquema de compensação da biodiversidade de Moçambique: Quadro para avaliar a condição ecológica das florestas de mangais*. 104.
 - Macamo, C., & Siteo, A. (2016). *Relatório de Governação Ambiental 2016 - Governação e gestão de mangais em Moçambique*.
 - Machava-António, V. M., Bandeira, S. O., Macamo, C. C., & Mahanzule, R. (2020). Value chain analysis of mangrove forests in central Mozambique: Uses, stakeholders and income. *Western Indian Ocean Journal of Marine Science*, 19(1), 1–17. <https://doi.org/10.4314/wiojms.v19i1.1>
 - Machava, V. C. E. (2014). *Avaliação da Biomassa do Mangal do Estuário do Rio Save após o Ciclone Eline e Cheias do Ano 2000, usando o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada*.
 - Matlombe, L. F. (2019). *Participação das Comunidades Vulneráveis na Gestão do Risco de Inundações no Baixo Limpopo - Moçambique* [Universidade Nova de Lisboa]. <http://hdl.handle.net/10362/98442>
 - Mundiais, D. (2024). *Ciclones em Moçambique*. *Ciclones Em Moçambique*. <https://www.dadosmundiais.com/africa/mocambique/ciclones.php>

- Navarro, J., Algeet, N., Fernández-Landa, A., Esteban, J., Rodríguez-Noriega, P., & Guillén-Climent, M. (2019). Integration of UAV, Sentinel-1, and Sentinel-2 data for mangrove plantation aboveground biomass monitoring in Senegal. *Remote Sensing*, 11(1), 23. <https://doi.org/10.3390/rs11010077>
- Nesha, M. K., Hussin, Y. A., van Leeuwen, L. M., & Sulistioadi, Y. B. (2020). Modeling and mapping aboveground biomass of the restored mangroves using ALOS-2 PALSAR-2 in East Kalimantan, Indonesia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 91(May), 102158. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102158>
- Nicolau, D., Macamo, C., Bandeira, S. O., Tajú, A., & Mabilana, H. A. (2017). Mangrove change detection, structure and condition in a protected area of eastern Africa: the case of Quirimbas National Park, Mozambique. *Western Indian Ocean Journal of Marine Science*, 17(2), 856–860.
- Nicolau, D., Sidi, M., Fernando, A., Taimo, T., Macamo, C., Machava, V., & Nhandimo, S. (2022). *Rápido levantamento ecológico e socioeconómico do mangal do Parque Nacional de Maputo (PNAM)* (Issue June).
- Pham, T. D., Yokoya, N., Bui, D. T., & Yoshino, K. (2019). Remote Sensing Approaches for Monitoring Mangrove Species , Structure , and Biomass : Opportunities and Challenges. *Remote Sensing*, 11, 1–24. <https://doi.org/10.3390/rs11030230>
- Pham, T. D., & Yoshino, K. (2017). Aboveground biomass estimation of mangrove species using ALOS-2 PALSAR imagery in Hai Phong City, Vietnam. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11(2), 026010. <https://doi.org/10.1117/1.jrs.11.026010>
- Pham, T. D., Yoshino, K., & Bui, D. T. (2017). Biomass estimation of *Sonneratia caseolaris* (L.) Engler at a coastal area of Hai Phong city (Vietnam) using ALOS-2 PALSAR imagery and GIS- based multi-layer perceptron neural networks. *GIScience & Remote Sensing*, 54(3), 329–353. <https://doi.org/10.1080/15481603.2016.1269869>
- Rebelo, M. S. da C. (2020). *Exposição, Vulnerabilidade e Risco aos Perigos Naturais em Moçambique: o caso dos ciclones tropicais no Município de Angoche Manuel*. https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/45281/1/ULSD896673_td_Manuel_Reb

elo.pdf

- Simard, M., Fatoyinbo, L., Smetanka, C., Rivera-Monroy, V. H., Castañeda-Moya, E., Thomas, N., & Van der Stocken, T. (2019). Mangrove canopy height globally related to precipitation, temperature and cyclone frequency. *Nature Geoscience*, 12(1), 40–45. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0279-1>
- Souza, C. A., & Reboita, M. S. (2020). Intensidade do vento de dois ciclones tropicais obtida por diferentes conjuntos de dados. *Revista Brasileira de Geografia*, 06, 758–769.
- Teixeira, S. G. (2011). *RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA APLICADO AO MAPEAMENTO E RECONHECIMENTO DE ZONAS ÚMIDAS COSTEIRAS* (Issue July). UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ.

10. Anexos

a) Valores do coeficiente de retroespalhamento

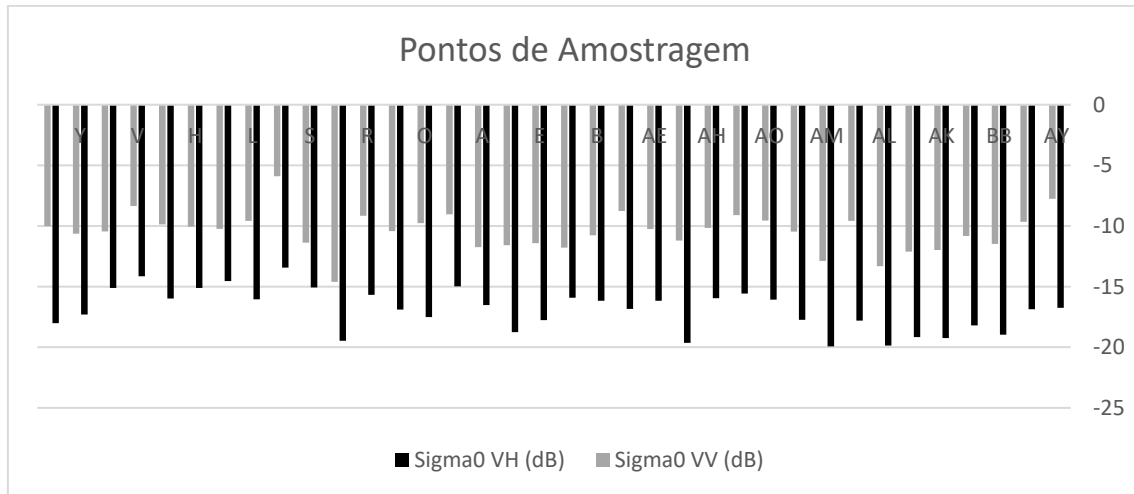


Figura 14: Valor de pixel da polarização VV e VH dos dados SAR do Sentinel-1 para o distrito de Govuro.

a) Equação para a conversão da biomassa para Mg/ha

$$Biomassa \left(\frac{Mg}{ha} \right) = Biomassa \left(\frac{Kg}{m^2} \right) * 10^{-2}$$

Equação 3: Equação para a conversão da biomassa para Mg/ha