

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A
SUSTENTABILIDADE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO E USO DE
RECURSOS RENOVÁVEIS
CAMPUS SOROCABA

MARIA FABIÃO BAÚQUE MATSIMBE

**Análise temporal das mudanças no uso do solo e influência na
Temperatura de Superfície Terrestre na bacia do rio Revuboe,
Moçambique**

Sorocaba
2025

**Análise temporal das mudanças no uso do solo e influência na
Temperatura de Superfície Terrestre na bacia do rio Revuboe,
Moçambique**

MARIA FABIÃO BAÚQUE MATSIMBE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso dos Recursos Renováveis - PPGPUR, Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, *campus* Sorocaba, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Planejamento e Uso dos Recursos Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos de Faria

Co-orientadora: Prof^ª. Dr^ª Carla Américo

Sorocaba
2025

Matsimbe, Maria Fabião Baúque

ANÁLISE TEMPORAL DAS MUDANÇAS NO USO DO SOLO E INFLUÊNCIA NA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE TERRESTRE NA BACIA DO RIO REVUBOE, MOÇAMBIQUE / Maria Fabião Baúque Matsimbe -- 2025.
59f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba
Orientador (a): Luiz Carlos de Faria
Banca Examinadora: Luiz Carlos de Faria, Ivan Vanderley Silva, Roberta Averno Valente Botezelli Tolini
Bibliografia

1. Mudanças no Uso e Cobertura do Solo. 2. Temperatura de Superfície Terrestre. I. Matsimbe, Maria Fabião Baúque. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -
CRB/8 6979



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
Centro de Ciências e Tecnologias Para a Sustentabilidade
Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Maria Fabião Baúque Matsimbe, realizada em 29/09/2025.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Luiz Carlos de Faria (UFSCar)

Prof. Dr. Ivan Vanderley Silva (Prefeitura de Barueri)

Profa. Dra. Roberta Aversa Valente Botezelli Tolini (UFSCar)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis.

DEDICATÓRIA

Meu esposo Edilson Matsimbe, meus filhos Jonathan Matsimbe e Azaph Matsimbe, minha irmã Argentina Bauque.

AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte inesgotável de inspiração, sabedoria e fortaleza, rendo minha mais profunda gratidão pelo dom da vida e pelas incontáveis bênçãos derramadas ao longo do meu caminho. Foi em Sua graça que encontrei amparo nos momentos de incerteza e, em Sua misericórdia, a serenidade necessária para prosseguir cada etapa desta jornada.

Expresso meu especial agradecimento à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Brasil (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

Registro minha mais profunda gratidão aos meus orientadores, Professor Doutor Luiz Carlos de Faria e Professora Doutora Carla Américo, pela dedicação incansável, paciência e generosidade acadêmica. Desde a concepção do tema, passando pelo rigoroso acompanhamento das análises, até os momentos finais da escrita, foram presença constante, transmitindo não apenas conhecimento, mas também inspiração e confiança. O empenho com que guiaram este trabalho permanecerá sempre como um marco em minha formação.

Agradeço igualmente a todos os docentes do Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Campus Sorocaba. Cada disciplina cursada foi um alicerce indispensável para a construção desta dissertação. De forma especial, deixo registrado meu apreço à Professora Roberta Valente, cuja disciplina de sensoriamento remoto representou meu primeiro contato com a metodologia que se tornou a espinha dorsal deste estudo. Nada sabia sobre o tema quando iniciei as aulas, mas sua clareza, rigor e incentivo abriram caminhos para que eu desse os primeiros passos nesta área, que hoje ocupa posição central em minha trajetória acadêmica.

Meus agradecimentos estendem-se também a todos os colegas africanos que, como eu, trilham seus percursos acadêmicos na UFSCar – Sorocaba. A presença de Sandra Massamba, Castigo Machava, Tonito Francisco, Mussa Issufo, Belton Guambe, Cardenito Colher, foi fundamental, não apenas no âmbito acadêmico, mas também no cotidiano, constituindo uma rede de amizade, companheirismo e apoio que tornaram esta caminhada menos árdua e mais significativa.

A todos os colegas da turma de pós-graduação, minha sincera gratidão pelas trocas de experiências, Ludmila Duarte, Paulo Santana pela convivência enriquecedora e pela construção conjunta de saberes.

Registro um agradecimento carinhoso à Luciana esposa do colega Alexandre, que com generosidade ímpar assumiu o papel de minha professora particular na disciplina de bioestatística. Sua paciência e dedicação foram decisivas para que eu conseguisse superar as dificuldades nesta disciplina.

Por fim, expresso meu reconhecimento a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho. Cada gesto de incentivo, cada palavra de apoio e cada contribuição, por menor que tenha parecido, representou alento e motivação para seguir em frente. A todos vocês, meu muito obrigada!

RESUMO

Este trabalho tem como propósito analisar as mudanças de uso e cobertura do solo e sua influência na temperatura da superfície terrestre na bacia do rio Revuboe, em Moçambique, ao longo do período de 2005 a 2023, utilizando técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento. A pesquisa responde a uma lacuna de estudos ambientais aplicados à região, ao mesmo tempo em que oferece subsídios técnicos e científicos para o planejamento territorial sustentável. O trabalho encontra-se estruturado em três capítulos principais, sendo o capítulo I correspondente a revisão de literatura, a qual apresenta uma discussão teórica e conceitual acerca das mudanças de uso e cobertura do solo, relacionando-as aos efeitos ambientais e climáticos, com enfoque à temperatura de superfície terrestre. São abordados os fundamentos do sensoriamento remoto, sua relevância na análise ambiental e as contribuições de diferentes estudos realizados em contextos nacionais e internacionais. No capítulo II é apresentada uma análise temporal de mudanças de uso e cobertura do solo mapeando e quantificando classes de uso do solo na bacia do Revuboe nos anos de 2005, 2009, 2015, 2020 e 2023. Por fim, no capítulo III é realizada a análise da relação entre as mudanças de uso e cobertura do solo e a temperatura de superfície terrestre, descrevendo a variabilidade espacial e temporal da temperatura superficial e estabelecendo sua correlação com as transformações ocorridas na paisagem. O estudo trouxe evidências de que mudanças no uso e cobertura do solo na bacia do Revuboe, têm provocado alterações no regime térmico da superfície terrestre, contribuindo para o agravamento de processos de degradação ambiental e impactos microclimáticos. Os resultados alcançados oferecem suporte técnico-científico para gestores e formuladores de políticas públicas, orientando estratégias de monitoramento ambiental, mitigação de impactos e promoção de práticas de uso do solo mais alinhadas com os princípios da sustentabilidade.

Palavras-chave: Geotecnologias; sensoriamento remoto; dinâmica da paisagem; monitoramento espacial; alteração microclimática.

ABSTRACT

This research aims to analyze land use and land cover changes and their influence on land surface temperature in the Revuboe River Basin, Mozambique, over the period from 2005 to 2023, through the application of remote sensing techniques and Geographic Information Systems (GIS). The research addresses a gap in environmental studies applied to the region, while providing technical and scientific support for sustainable territorial planning. The work is structured into three main chapters, in addition to the introduction and final considerations: Chapter I – literature review: presents a theoretical and conceptual discussion on land use and land cover changes, relating them to environmental and climatic effects, with particular emphasis on land surface temperature. It also discusses the fundamentals of remote sensing, its relevance in environmental analysis, and the contributions of different studies carried out in national and international contexts. Chapter II – Temporal analysis of land use and land cover changes: examines the temporal dynamics of land use and land cover, mapping and quantifying the main land use classes in the Revuboe River Basin for the years 2005, 2009, 2015, 2020, and 2023. Chapter III – Relationship between Land Use Changes and Land Surface Temperature: focuses on the analysis of the relationship between land use/land cover changes and land surface temperature, describing the spatial and temporal variability of surface temperature and establishing its correlation with landscape transformations. Overall, the dissertation demonstrates that land use transformations in the Revuboe River Basin, driven by agricultural expansion, urban growth, and mining activities, have caused significant changes in the surface thermal regime, contributing to the intensification of environmental degradation processes and microclimatic impacts. The findings provide technical-scientific support for decision-makers and policymakers, guiding environmental monitoring strategies, impact mitigation, and the promotion of land use practices more closely aligned with sustainability principles.

Keywords: Geotechnologies; remote sensing; landscape dynamics; spatial monitoring; microclimatic alteration.

LISTA DE SIGLAS

ASS	África Subsaariana
CENACARTA	Centro Nacional de Cartografia e Teledetecção
EG	Exatidão Global
GEE	Gases de Efeito Estufa
INE	Instituto Nacional de Estatística
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LULC	Land Use and Land Cover
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
OLI	Operational Land Imager
ONU	Organização das Nações Unidas
PIB	Produto Interno Bruto
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SR	Sensoriamento Remoto
TM	Thematic Map
TST	Temperatura de Superfície Terrestre
UCS	Uso e Cobertura do Solo

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
1. CAPITULO I - REVISÃO DE LITERATURA	3
1.1 Mudanças Climáticas e Uso e Cobertura do Solo	3
REFERÊNCIAS	7
2. CAPÍTULO II - ANÁLISE TEMPORAL DE MUDANÇAS DE USO E COBERTURA DO SOLO NA BACIA DO REVUBOE – MOÇAMBIQUE	12
RESUMO	12
ABSTRACT	12
2.1 INTRODUÇÃO	12
2.2 MATERIAL E METODOS	14
2.2.1 Área de estudo	14
2.2.2 Aquisição e Processamento de dados	16
2.2.3 Classificação do uso e cobertura do solo	17
2.2.4 Validação da classificação	18
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
2.4 CONCLUSÃO	25
REFERÊNCIAS	26
3. CAPITULO III - MUDANÇAS DE USO E COBERTURA DO SOLO E SUA INFLUÊNCIA NA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE TERRESTRE NA BACIA DO REVUBOE – MOÇAMBIQUE	30
RESUMO	30
ABSTRACT	30
3.1 INTRODUÇÃO	31
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	31
3.2.1 Determinação da Temperatura de Superfície Terrestre	32
3.2.2 Validação estatística	35
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
3.3.1 Análises da relação entre mudanças de uso e cobertura do solo e temperatura de superfície terrestre	38
3.4 CONCLUSÃO	44
REFERÊNCIAS	45
Conclusões e Considerações finais	48

Conclusão Geral	48
Considerações Finais	49

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o avanço das atividades antrópicas sobre os ecossistemas naturais tem se intensificado, principalmente por meio da expansão de áreas agrícolas e da urbanização acelerada. Essas transformações impactam diretamente o meio ambiente, contribuindo para o aumento das temperaturas na superfície terrestre. Isso ocorre porque tanto a urbanização quanto a atividade agrícola interferem nos ciclos naturais de umidade e temperatura, intensificando as alterações climáticas e acelerando o processo de aquecimento global.

O estudo dos efeitos das mudanças de uso e cobertura do solo sobre a temperatura de superfície terrestre é fundamental para entender como as atividades humanas afetam o clima e o meio ambiente, ajudando a planejar práticas mais sustentáveis e a proteger ecossistemas e comunidades. Permite ainda identificar padrões e tendências que podem impactar ecossistemas e sociedades para uma melhor previsão e resposta a desastres.

A análise da dinâmica espacial e dos fatores a ela associados representa uma estratégia eficaz para o monitoramento da paisagem. Nesse contexto, o uso de geotecnologias, com ênfase na integração entre o sensoriamento remoto (SR) e os Sistemas de Informação Geográficas (SIG), mostra-se fundamental para subsidiar investigações científicas voltadas à compreensão e interpretação do espaço geográfico.

A bacia do rio Revuboe, localizada em Moçambique, é uma região estratégica tanto do ponto de vista ambiental quanto socioeconômico, pois abriga importantes atividades agrícolas, áreas urbanas em expansão e empreendimentos de mineração. Nos últimos anos, o aumento da pressão antrópica sobre os recursos naturais tem provocado alterações significativas no uso e cobertura do solo, o que, por sua vez, influencia diretamente nas características térmicas da superfície terrestre.

A análise temporal dessas mudanças permite compreender como o processo de ocupação do território e transformação da paisagem está contribuindo para o aumento das temperaturas de superfície, fenômeno associado à intensificação das ilhas de calor, degradação ambiental e alterações microclimáticas. Estes impactos podem afetar a disponibilidade hídrica, a biodiversidade e a qualidade de vida das populações locais.

Estudos desse tipo são particularmente relevantes em países como Moçambique, onde ainda há escassez de pesquisas sistematizadas que integrem dados de sensoriamento remoto, geotecnologias e análise ambiental. Ao investigar a relação entre uso do solo e

temperatura da superfície na bacia do Revuboe, este estudo oferece subsídios técnicos e científicos para o planejamento territorial sustentável.

Além da importância científica, compreender a interação entre mudanças de uso e cobertura do solo e a temperatura da superfície terrestre revela-se essencial para orientar políticas públicas e estratégias de gestão territorial. A identificação de áreas críticas, sujeitas a maior vulnerabilidade ambiental e climática, possibilita o desenvolvimento de ações de mitigação e adaptação que dialogam tanto com a conservação dos ecossistemas quanto com a melhoria da qualidade de vida das comunidades locais. Nesse sentido, estudos aplicados a bacias hidrográficas, como a do rio Revuboe, assumem especial relevância por constituírem unidades naturais de planejamento e gestão ambiental.

Assim, o presente estudo tem como objetivo analisar os efeitos das mudanças de uso e cobertura do solo sobre a Temperatura de Superfície Terrestre na bacia do rio Revuboe, região centro de Moçambique por meio do processamento de imagens de satélite em ambiente SIG.

O presente trabalho está estruturado em três capítulos principais. O primeiro capítulo consiste em uma revisão bibliográfica, na qual são discutidos os fundamentos conceituais e os principais avanços científicos relacionados às mudanças de uso e cobertura do solo e às alterações desses processos na variação da temperatura de superfície terrestre.

O segundo capítulo tem como propósito realizar uma análise temporal detalhada das transformações no uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do rio Revuboe, destacando os principais vetores antrópicos e naturais que impulsionaram a reorganização da paisagem ao longo do período estudado.

Por fim, o terceiro capítulo dedica-se à investigação da variabilidade espacial e temporal da temperatura de superfície terrestre e estabelece sua relação com as alterações no uso e cobertura do solo, buscando compreender os impactos ambientais e climáticos decorrentes dessas transformações.

CAPÍTULO I

1. REVISÃO DE LITERATURA

1.1 Mudanças Climáticas e Uso e Cobertura do Solo

O clima é a descrição estatística em termos da média e variabilidade de variáveis como temperatura e precipitação, ao longo de um período que varia de meses a milhares ou milhões de anos. Nesse contexto, mudança climática é uma alteração no estado do clima e que persiste por um período prolongado, normalmente décadas ou mais (IPCC, 2018).

As mudanças climáticas representam o principal desafio enfrentado pelas sociedades no século XXI, devido ao seu impacto nos ciclos hidrológicos e na dinâmica do carbono em ecossistemas terrestres e marinhos, com efeitos predominantemente negativos em nível global, regional e local (Carlos; Cunha; Pires, 2019; Artaxo, 2020).

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) através da queima de combustíveis fósseis e o desmatamento, têm sido apontados como principais causas das mudanças climáticas (ABBAS et al., 2022; IPCC, 2023). Embora o efeito estufa seja um fenômeno natural e fundamental para a manutenção da vida no planeta, o rápido aumento das emissões de GEE leva à sua intensificação e alteração do equilíbrio térmico o que ameaça os sistemas naturais e as sociedades humanas (Hoegh-Guldberg et al., 2019).

Nos últimos anos, as emissões de GEE continuaram a aumentar, com contribuições históricas e contínuas decorrentes do uso insustentável de energia, do uso da terra e da mudança no uso da terra, dos estilos de vida e dos padrões de consumo e produção entre regiões, entre países e dentro deles, e entre indivíduos (IPCC, 2023).

A média anual das emissões de GEE durante 2010-2019 foi mais alta do que em qualquer década anteriormente registrada. Como resultado, a temperatura média global da superfície aumentou a uma taxa de $0,2^{\circ} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ por década, atingindo $1,0^{\circ}\text{C}$ em 2017 (IPCC, 2023).

As mudanças de uso e cobertura do solo são consideradas a segunda fonte emissora de dióxido de carbono (CO_2) no mundo, perdendo somente para os combustíveis fósseis (IPCC, 2014; Mata et al., 2015). Essas mudanças afetam condições climáticas (Rahaman et al., 2020; Li Kongming et al., 2020; Winkler et al., 2021); modificam ciclos biogeoquímica e o equilíbrio da energia da Terra, levando a alterações nos serviços ecossistêmicos e nas características da superfície terrestre (Afuye et al., 2022; Mpanyaro et al., 2024).

A mudança no uso do solo significa a transição de uma área de terra para um propósito específico e induzida por atividades antropogênicas, enquanto a mudança na cobertura do solo descreve as características da superfície da terra (Patel et al., 2019). Quando a cobertura natural do solo transita para um tipo de uso antropogênico, normalmente ocorre a degradação e muitas vezes a condição inicial se torna efetivamente irreversível no curto prazo devido à contínuas intervenções humanas (Chen et al., 2024).

O crescimento da população global impulsiona a expansão de assentamentos humanos e conseqüente mudanças no uso e cobertura do solo (Patel; Indraganti; Jawarneh, 2024). Em 2022, estatísticas indicavam que 57% da população mundial residia em áreas urbanas, o que deverá aumentar para 68% até o ano de 2050 (Nações Unidas, 2022). Este fenômeno, desencadeia uma série de atividades que ocupam, degradam e fragmentam habitats naturais, resultando na redução dos serviços ecossistêmicos e da biodiversidade, bem como na degradação das comunidades bióticas (Pan et al., 2022).

Para Lírío e Moura (2017), o crescimento populacional, sobretudo em países em desenvolvimento, é um fenômeno que origina centros urbanos com alta densidade demográfica e com problemas ambientais graves relacionados, desafiando os governos e implicando na necessidade da adoção de agendas que tratem sobre as problemáticas e apontem soluções efetivas para o enfrentamento das questões que se apresentam.

A África Subsaariana (ASS) é muitas vezes referida como a região com a urbanização mais rápida do mundo, principalmente devido ao crescimento urbano desregulado associado ao êxodo rural e crescimento populacional, entre outros fatores (Chai; Seto, 2019). As áreas urbanas nesta região acomodavam em 2018, cerca de 472 milhões de residentes, e espera-se que esse número continue aumentando nos próximos anos (CSIS, 2018). Esta rápida expansão urbana é um dos principais impulsionadores da deterioração ambiental (Basu et al., 2023), mudanças climáticas (LI et al., 2020) e degradação de serviços ecossistemas essenciais (Thonfeld et al., 2020).

No Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (2014), já se apontava que os países pobres, sobretudo aqueles localizados em baixas latitudes, seriam os mais prejudicados. Esses países estão situados em regiões onde as condições climáticas são adversas, possuem baixa capacidade adaptativa e apresentam alta dependência em relação ao setor primário, responsável por expressiva parcela de seu Produto Interno Bruto (PIB).

Conseqüências negativas de mudanças de uso e cobertura do solo no meio ambiente impactam na qualidade de serviço ecossistêmico e na biodiversidade (Dinka; Chaka, 2019; Patel et al., 2019) por meio do desmatamento, aumento do escoamento e

poluição da água durante períodos de chuvas e inundações altamente intensas, o que afeta subsequentemente a segurança alimentar e hídrica (Mishra et al., 2021), bem como no deslizamentos de terra, erosão e inundações que estão se tornando comuns nos últimos anos (Nasidi et al., 2023). Também têm afetado na saúde da população, na infraestrutura de cidades, na biodiversidade e produtividade agrícola. Todos esses efeitos ocasionam perdas sociais e econômicas que tendem a se agravar à medida que o processo se intensifica (Tol, 2018).

Comunidades vulneráveis que menos contribuíram historicamente para a mudança atual do clima são afetadas de forma desproporcional (IPCC, 2023). Assim, torna necessário avançar com estratégias de monitoramento e mitigação das mudanças climáticas.

Um dos aspectos relevantes na estratégia de mitigação de mudanças climáticas é a compreensão da dinâmica de uso e cobertura do solo (Masolele et al., 2024) dado que essas mudanças, exercem forte influência na temperatura da superfície terrestre (TST) (Gohain et al., 2021; Ribeiro et al., 2024). Os autores Gogoi et al. (2019); Wang et al. (2018) enfatizam que o balanço de energia da superfície é controlado por mudanças de uso e cobertura do solo, o que, por consequência, afeta a temperatura da superfície terrestre.

De acordo com Qiu et al. (2017), a TST é uma variável importante na pesquisa climática e ambiental. Este parâmetro tem relevância significativa nas áreas como hidrologia, mudanças climáticas, serviços ecossistêmicos, biodiversidade, avaliação de agricultura/umidade do solo, avaliação de desastres naturais e análise de mudança de uso e cobertura do solo (Avdan; Jovanovska, 2016; Rajani; Varadarajan, 2021).

Estudar a TST de uma área pode fornecer informações úteis sobre condições de sobrevivência dos seres humanos (Vickers, 2017; Romaguera et al., 2018). Portanto, a detecção de mudanças no uso e cobertura do solo e suas forças motrizes é crucial para a conservação ambiental, gestão de recursos, planejamento do uso da terra, desenvolvimento socioeconômico e sustentável (Patel et al., 2019).

Diversos estudos já desenvolvidos, têm demonstrado que alterações no uso e cobertura do solo ocasionam mudanças significativas na temperatura de superfície, influenciando na mudança do comportamento de fatores ambientais globais ou regionais e padrões de circulação geral da atmosférica com efeitos danosos na biodiversidade e especificamente nas condições de vida da população (Gartland, 2010; Mohan; Kandya,

2015; Guha; Shen et al., 2017; Nayak; Mandal, 2019; Tan et al., 2020; Govil, 2021; Gohain et al., 2021).

Nesse contexto, torna-se evidente que a elaboração de estratégias de preservação e conservação dos recursos naturais passa, necessariamente, pela compreensão das complexas interações entre os seres humanos e o meio ambiente, as quais resultam em impactos e degradação ambiental (Liu et al., 2016; Jiang et al., 2017; Huang et al., 2020). Essa degradação constitui um dos principais problemas contemporâneos, sendo constantemente debatida por organismos internacionais como a Organização das Nações Unidas (ONU).

Estudos recentes têm recomendado diversas ações para a mitigação dos efeitos do aumento de temperatura resultante de mudanças de uso e cobertura do solo. Ribeiro et al. (2024) ressaltam a importância de preservar e expandir áreas verdes em regiões urbanas e periurbanas, enquanto Victor et al. (2023) destacam a necessidade de estudos climáticos detalhados e monitoramento contínuo para embasar políticas públicas eficazes. Complementando essas perspectivas, Saha et al. (2024) enfatizam a expansão da cobertura vegetal e estratégias de planejamento urbano-rural como resposta à expansão desordenada de assentamentos, que intensifica o aquecimento superficial.

Diante dessas recomendações, o sensoriamento remoto surge como uma ferramenta indispensável para viabilizar a coleta e análise de dados sobre a superfície terrestre. Como apontam Bernardes (2007) e Santos e Santos (2010) essa tecnologia não apenas facilita o mapeamento preciso, mas também permite a integração de dados em sistemas de informação geográfica, gerando insumos críticos para a tomada de decisão. Sua aplicação é amplamente documentada em estudos que analisam os impactos das mudanças no uso do solo na temperatura superficial (Akomolafe; Rosazlina, 2022; Gogoi et al., 2019), evidenciando seu papel central na pesquisa climática.

Essa capacidade de monitoramento é fundamental para um desafio maior: compreender os padrões de mudança no uso do solo e suas implicações territoriais. Como argumentam Chuyu et al. (2019), tal entendimento é essencial para orientar políticas ambientais rumo ao desenvolvimento sustentável. Além disso, como destacam Mzuri et al. (2022) e Velastegui-Montoya et al. (2022), a análise periódica dessas alterações permite antever e gerenciar impactos antropogênicos, transformando dados em ações concretas de mitigação.

No entanto, para que essas soluções técnicas tenham efeito prático, é imprescindível a articulação com políticas públicas e engajamento social. Busch,

Henderson e Stevenson (2019) e Silva e França (2018) alertam para a urgência de decisões que priorizem o monitoramento das mudanças no solo, a redução de emissões e, sobretudo, a educação climática. Somente assim será possível traduzir o conhecimento científico em transformações efetivas, unindo tecnologia, governança e conscientização para enfrentar os desafios climáticos.

Referências Bibliográficas

ABBAS, A. et al. Health implications, leader's societies, and climate change: A global review. Springer Climate. Springer Science and Business Media B.V., 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-15501-7_26. Acesso em: 14 abr. 2024.

AFUYE, G. A. et al. Long-term dynamics and response to climate change of different vegetation types using GIMMS NDVI data over Amathole District in South Africa. *Atmosphere*, v. 13, n. 4, p. 620, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos13040620>. Acesso em: 22 mai. 2024.

AKOMOLAFE, G. F.; ROSAZLINA, R. Land use and land cover changes influence the land surface temperature and vegetation in Penang Island, Peninsular Malaysia. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.xxxxx/placeholder>. Acesso em: 8 jun. 2024.

ARTAXO, P. As três emergências que nossa sociedade enfrenta: saúde, biodiversidade e mudanças climáticas. *Estudos Avançados*, v. 34, p. 53–66, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2020.34100.005>. Acesso em: 17 abr. 2024.

AVDAN, U.; JOVANOVSKA, G. Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. *Journal of Sensors*, v. 2016, n. 1, p. 1480307, 2016. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2016/1480307>. Acesso em: 1 jul. 2024.

BASU, T.; ARIJIT, D.; KETAN, D. Urban expansion induced loss of natural vegetation cover and ecosystem service values: a scenario-based study in the Siliguri Municipal Corporation (gateway of North-East India). *Land Use Policy*, v. 132, p. 106838, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106838>. Acesso em: 23 out. 2024.

BERNARDES, T.; ALVES, H. M. R.; VIEIRA, T. G. C. Classificação automática de imagens de satélites no mapeamento da região cafeeira de Patrocínio – MG. 2007.

BUSCH, K. C.; HENDERSON, J. A.; STEVENSON, K. T. Expanding epistemologies and methodologies in research on climate change education. *Environmental Education Research*, v. 25, n. 6, p. 955–971, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/13504622.2019.1607259>. Acesso em: 7 nov. 2024.

CARLOS, S. D. M.; CUNHA, D. A. D.; PIRES, M. V. Conhecimento sobre mudanças climáticas implica em adaptação? Análise de agricultores do Nordeste brasileiro. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 57, p. 455–474, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2019.187600>. Acesso em: 19 dez. 2024.

CHAI, B.; SETO, K. C. Conceptualizing and characterizing micro-urbanization: a new perspective applied to Africa. *Landscape and Urban Planning*, v. 190, p. 103595, 2019.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103595>. Acesso em: 11 out. 2024.

CHEN, Y. et al. Quantitatively analyzing the driving factors of vegetation change in China: Climate change and human activities. *Ecological Informatics*, v. 82, p. 102667, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102667>. Acesso em: 16 set. 2024.

CHUYU, X. et al. Analyzing spatial patterns of urban carbon metabolism and its response to change of urban size: a case of the Yangtze River Delta, China. *Ecological Indicators*, p. 615–625, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.05.031>. Acesso em: 7 ago. 2024.

CSIS. Urbanization in Sub-Saharan Africa. 2018. Disponível em: <https://www.csis.org/analysis/urbanization-sub-saharan-africa>. Acesso em: 2 abr. 2024.

GARTLAND, L. Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

GOGOI, V. et al. Land use and land cover change effect on surface temperature over Eastern India. 2019.

GOHAIN, K. J.; MOHAMMAD, P.; GOSWAMI, A. Assessing the impact of land use land cover changes on land surface temperature over Pune city, India. *Quaternary International*, v. 575–576, p. 259–269, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.04.052>. Acesso em: 29 nov. 2024.

GUHA, S.; GOVIL, H. Annual assessment on the relationship between land surface temperature and six remote sensing indices using Landsat data from 1988 to 2019. *Geocarto International*, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1886339>. Acesso em: 12 out. 2024.

HOEGH-GULDBERG, O. et al. The human imperative of stabilizing global climate change at 1.5°C. *Science*, v. 365, eaaw6974, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.aaw6974>. Acesso em: 9 dez. 2024.

IPCC. Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014.

IPCC. Global warming of 1.5°C: IPCC special report on impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels in context of strengthening response to climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Cambridge University Press, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9781009157940>. Acesso em: 10 dez. 2024.

IPCC. Relatório Síntese – Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III ao Sexto Relatório de Avaliação do IPCC. Genebra: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 18 dez. 2024.

LÍRIO, R. R.; MOURA, M. C. O. Problemas ambientais urbanos: um estudo sobre os impactos ambientais causados pelo descarte irregular de resíduos sólidos da construção civil no município de Serra/ES. Instituto Federal do Espírito Santo, 2017. Disponível em:

https://colatina.ifes.edu.br/images/tccs/AdmPub2018/TCC_Admpub_2018_RomilsonRodriguesDeLirio.pdf. Acesso em: 12 abr. 2024.

LIU, G. et al. Response of land cover types to land surface temperature derived from Landsat-5 TM in Nanjing Metropolitan Region, China. *Environmental Earth Sciences*, v. 75, n. 20, p. 1386, 2016. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12665-016-6202-4>. Acesso em: 1 jul. 2024.

MASOLELE, R. et al. Mapping the diversity of land uses following deforestation across Africa. *Scientific Reports*, v. 14, n. 1, p. 1681, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-01681-7>. Acesso em: 30 ago. 2024.

MISHRA, R. et al. Application of remote sensing for assessment of change in vegetation cover and the subsequent impact on climatic variables. *Environmental Science and Pollution Research*, p. 41675–41687, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13563-9>. Acesso em: 5 out. 2024.

MPANYARO, Z. et al. Mapping and assessing riparian vegetation response to drought along the Buffalo River Catchment in the Eastern Cape Province, South Africa. *Climate*, v. 12, n. 1, p. 7, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/cli12010007>. Acesso em: 7 set. 2024.

MZURI, R. T.; MUSTAFA, Y. T.; OMAR, A. A. Land degradation assessment using AHP and GIS-based modelling in Duhok District, Kurdistan Region, Iraq. *Geocarto International*, v. 37, n. 25, p. 7908–7926, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1987534>. Acesso em: 21 jun. 2024.

NASIDI, N. M. et al. An appraisal on hydro-climatic impact on flash floods incidences at Hadejia river valley watershed in Nigeria. *FUDMA Journal of Sciences*, v. 7, n. 5, p. 134–140, 2023. Disponível em: <https://fjs.fudutsinma.edu.ng/index.php/fjs/article/view/2002>. Acesso em: 31 maio 2024.

NAYAK, S.; MANDAL, M. Impact of land use and land cover changes on temperature trends over India. *Land Use Policy*, v. 89, p. 104238, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104238>. Acesso em: 3 nov. 2024.

PAN, Y. et al. Spatiotemporal variation of habitat quality in the Source Region of the Yellow River based on land use and vegetation cover changes. *Acta Ecologica Sinica*, v. 42, n. 19, p. 7978–7988, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5846/stxb202105131254>. Acesso em: 18 out. 2024.

PATHAK, H. Impact, adaptation, and mitigation of climate change in Indian agriculture. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 195, n. 1, p. 52, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10452-2>. Acesso em: 25 nov. 2024.

PATEL, S. et al. Agricultural growth and land use land cover change in peri-urban India. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 191, n. 9, p. 600, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7685-4>. Acesso em: 15 dez. 2024.

PATEL, S.; INDRAGANTI, M.; JAWARNEH, R. N. Land surface temperature responses to land use dynamics in urban areas of Doha, Qatar. *Sustainable Cities and Society*, v. 104, p. 105273, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105273>. Acesso em: 9 set. 2024.

QIU, G. Y. et al. Experimental studies on the effects of green space and evapotranspiration on urban heat island in a subtropical megacity in China. *Habitat International*, v. 68, p. 30–42, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2017.07.009>. Acesso em: 2 ago. 2024.

RAJANI, A.; VARADARAJAN, S. Estimation and validation of land surface temperature using remote sensing & GIS for Chittoor District, Andhra Pradesh. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, v. 12, n. 5, p. 607–617, 2021. Disponível em: <https://turcomat.org/index.php/turkbilmат/article/view/1059>. Acesso em: 31 maio 2024.

ROMAGUERA, M. et al. Detecting geothermal anomalies and evaluating LST geothermal component by combining thermal remote sensing time series and land surface model data. *Remote Sensing of Environment*, v. 204, p. 534–552, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.09.012>. Acesso em: 26 set. 2024.

SAHA, J. et al. Assessing seasonal dynamics of land surface temperature (LST) and land use land cover (LULC) in Bhairab, Kishoreganj, Bangladesh: A geospatial analysis from 2008 to 2023. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, v. 9, p. 100560, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100560>. Acesso em: 5 ago. 2024.

SANTOS, A. L. C.; SANTOS, F. D. Mapeamento das classes de uso e cobertura do solo da bacia hidrográfica do Rio Vaza-Barris, Sergipe. *Revista Multidisciplinar da UNIESP*, 2010.

SHEN, X.; LIU, B.; LU, X. Effects of land use/land cover on diurnal temperature range in the temperate grassland region of China. *Science of the Total Environment*, v. 575, p. 1211–1218, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.217>. Acesso em: 20 jul. 2024.

SILVA, V. P.; FRANÇA, G. L. S. Percepções de mudanças do clima, impactos e adaptação para sertanejos do semiárido. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 14, n. 22, p. 229–248, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/abclima.v22i14.60792>. Acesso em: 3 dez. 2024.

TAN, J. et al. Spatial relationship between land-use/land-cover change and land surface temperature in the Dongting Lake area, China. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.lakearea.2020.123456>. Acesso em: 24 set. 2024.

THONFELD, F. et al. The impact of anthropogenic land use change on the protected areas of the Kilombero Catchment, Tanzania. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 168, p. 41–55, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.07.019>. Acesso em: 15 nov. 2024.

TOL, R. S. J. The economic impacts of climate change. *Review of Environmental Economics and Policy*, v. 12, n. 1, p. 4–25, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/reep/rex027>. Acesso em: 10 dez. 2024.

UNITED NATIONS. World urbanization prospects 2018 [World Statistics]. 2022. Disponível em: <https://population.un.org/wup/DataQuery/>. Acesso em: 19 abr. 2024.

VELASTEGUI-MONTOYA, A. et al. Land use and land cover in tropical forest: global research. *Forests*, v. 13, n. 10, p. 1709, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f13101709>. Acesso em: 11 jun. 2024.

VICKERS, N. J. Animal communication: When I'm calling you, will you answer too? *Current Biology*, v. 27, n. 14, p. R713–R715, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.05.064>. Acesso em: 17 jul. 2024.

VICTOR, V. B. et al. Uso do sensoriamento remoto na estimativa da temperatura de superfície terrestre no município de Moatize, região centro de Moçambique. 2023. Disponível em: <https://proceedings.science/p/164729?lang=pt-br>. Acesso em: 17 jul. 2024.

WANG, Y. et al. Patterns of land change and their potential impacts on land surface temperature change in Yangon. Myanmar. *Sci. Total Environ.* 643, 738–750, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.209>. Acesso em: 18 jul. 2024

WINKLER, K. et al. Global land use changes are four times greater than previously estimated. *Nat. Commun.* 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22702-2>. Acesso em 18. Jul 2024

CAPÍTULO II

ANÁLISE TEMPORAL DE MUDANÇAS DE USO E COBERTURA DO SOLO NA BACIA DO REVUBOE – MOÇAMBIQUE

RESUMO

Mudanças de uso e cobertura do solo (UCS) ocasionadas pelas ações antrópicas, têm gerado impactos negativos no ambiente, contribuindo consideravelmente para a crise global da biodiversidade. Nesta circunstância, foi definido como objetivo deste estudo, analisar a evolução temporal do uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do rio Revuboe, na região central de Moçambique durante os anos 2005 e 2023 visando propor medidas sustentáveis de gestão dos recursos da bacia. A partir de imagem de satélite Landsat foram quantificadas as classes de uso e cobertura do solo através da classificação supervisionada pelo método de máxima verossimilhança. Os resultados demonstraram que durante o período de estudo (2005 a 2023) houve grandes alterações na paisagem. O padrão dominante da dinâmica da paisagem caracterizou-se pela conversão de áreas de vegetação densa e esparsa para usos agrícolas, sendo esta, a classe mais dominante na bacia. As classes de agricultura e área urbana registaram um aumento de 37.4% e 5.5% respetivamente. A classe de água em todo período de estudo manteve-se estável e com ligeiro aumento (0.4%) no período de 2015 a 2023 possivelmente influenciado pela flutuação de elementos climáticos na bacia. Este estudo pode orientar aos tomadores de decisão na criação de propostas mitigadoras de alterações e monitoramento do clima da bacia.

Palavras-chave: Mudanças espaciotemporais; sensoriamento remoto; sistemas de informação geográfica; classificação supervisionada; padrões espaciais.

ABSTRACT

Land use and land cover (LULC) changes caused by anthropogenic action have resulted in significant environmental degradation, substantially contributing to the global biodiversity crisis. Within this context, this study was designed to analyze temporal LULC changes in Mozambique's central Revuboe River watershed during 2005 and 2023 with the objective of developing sustainable basin management strategies. Using Landsat satellite imagery, we quantified LULC classes through supervised classification employing the Maximum Likelihood algorithm. Our findings reveal substantial landscape

transformations during the study period (2005-2023). The predominant change pattern involved conversion of dense and sparse vegetation to agricultural uses, establishing croplands as the dominant land cover class in the basin. Key quantitative results include: Agricultural areas expanded by 37.4%. Urban zones increased by 5.5%. Water bodies remained stable overall, with a marginal 0.4% increase from 2015-2023, likely attributable to climatic variability within the basin. This research provides critical spatial-temporal data to inform decision-making processes for developing mitigation strategies and climate monitoring systems in the Revuboe Basin.

Keywords: Spatiotemporal changes; remote sensing; geographic information systems; supervised classification; spatial patterns.

3.1 Introdução

As mudanças no uso e cobertura do solo representam uma das principais transformações ambientais antropogênicas, com impactos diretos nos ecossistemas, nos recursos hídricos e no clima regional (IPCC, 2022). São fenômenos dinâmicos que refletem a interação entre fatores socioeconômicos, ambientais e políticos. Em Moçambique, essas transformações têm sido impulsionadas por atividades como agricultura de subsistência, expansão urbana, mineração e exploração de recursos naturais, resultando em impactos significativos nos ecossistemas locais (Cianciullo et al., 2023).

A bacia hidrográfica do Revuboe, localizada na província de Tete, destaca-se como uma das regiões mais impactadas por essas dinâmicas, em função da presença de atividades intensivas como a agricultura e a mineração de carvão, particularmente na região de Moatize. Essas atividades têm gerado profundas transformações no ambiente, contribuindo para processos de degradação do solo, perda de cobertura vegetal e alterações no regime hidrológico da bacia (Duarte; Duarte, 2024).

Estudos recentes indicam que o monitoramento temporal dessas mudanças, por meio de técnicas de sensoriamento remoto e algoritmos de aprendizado de máquina, permite identificar padrões espaciais de transformação com maior precisão, fornecendo subsídios importantes para o ordenamento territorial e a conservação ambiental (Forkuor; Cofie, 2011; Macarrigue et al., 2023). Séries temporais de imagens de satélite, tem se

consolidado como uma ferramenta eficaz para detectar tendências de desmatamento, expansão agrícola e crescimento urbano em escalas locais e regionais.

A análise do uso e cobertura do solo ajuda na determinação do grau de impacto de ações antrópicas sobre o ambiente e é de extrema importância na avaliação ambiental, uma vez que as características dos meios físicos, bióticos e socioeconômicos são produto das variadas formas de uso e ocupação da área e de suas interferências antrópicas nos processos ambientais (Romão; Souza, 2011; Raja Shekar; Mathew, 2023). Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo realizar uma análise temporal das mudanças de uso e cobertura do solo na bacia do Revuboe, entre 2005 e 2023, identificando os principais vetores de transformação e os impactos ambientais associados.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Área de Estudo

A área de estudo compreende a bacia do Rio Revuboe localizada na província de Tete, região centro de Moçambique, África (Figura 1).

A região apresenta uma paisagem urbana e rural tendo como matriz dominante áreas de vegetação esparsa e agricultura, abrangendo uma área de cerca de 17400 Km².

De acordo com o Centro Nacional de Cartografia e Teledeteção (CENACARTA, 1997), a bacia apresenta três tipos climáticos dominantes sendo tropical semi-árido (BSh) na parte Sul da bacia, tropical úmido (Am) na parte central e tropical modificado pela altitude (CWa) na parte norte conforme a classificação climática de Koppen.

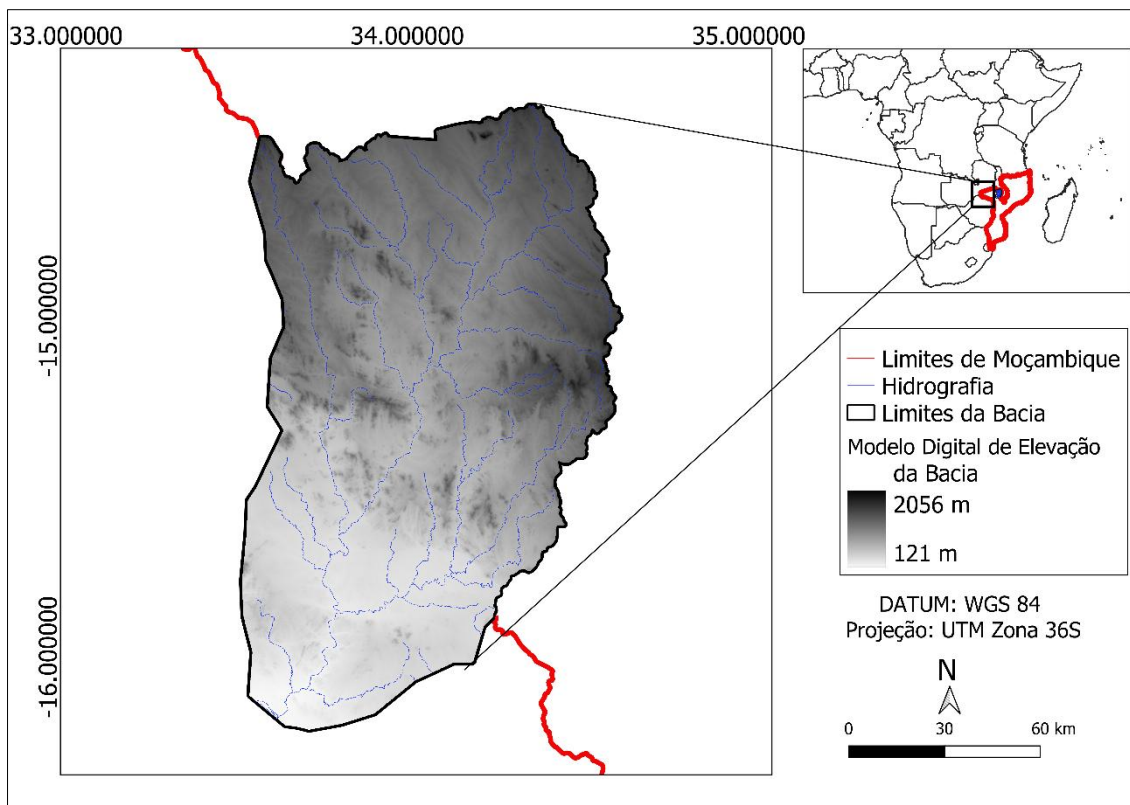


Figura 1: Localização da área de estudo, bacia do rio Revuboe, Moçambique, África.

No verão, durante o mês mais quente, as temperaturas médias mensais podem chegar a 45°C, enquanto no mês mais frio podem atingir 5°C (Victor et al., 2023). A maior parte da precipitação ocorre na estação chuvosa, entre outubro e março, com um acumulado anual de aproximadamente 800 mm. Já na estação seca, de abril a setembro, os índices pluviométricos são mais baixos, totalizando cerca de 644 mm anuais (Macie, 2015).

A bacia do Revuboe apresenta relevo ondulado dominado por planaltos, com declives de 1% a 8% e altitudes que variam entre 211 m e 335 m acima do nível médio do mar na região sul da bacia (Passe, 2018). Mais a norte, as altitudes variam de 120 a 1990 metros.

Os agrupamentos de solos mais dominantes na área destacam-se os seguintes: solos castanho-acinzentados, castanho-avermelhados pouco profundos sobre rochas calcárias e os derivados de rochas basálticas, estes últimos, podendo ser avermelhados, castanho-avermelhados ou pretos, são ainda de profundidade variável e caracterizados por apresentarem boas capacidades de retenção de nutrientes e água (MAE, 2014).

De acordo com Mosca (2017) a agricultura familiar em Moçambique constitui principal atividade econômica ocupando um pouco mais de 75% da população ativa. A agricultura contribui com cerca de 22% do PIB (INE, 2019).

A população atual de Moçambique é de cerca de 33,7 milhões com base nas projeções dos últimos dados das Nações Unidas e o país regista um rápido aumento populacional, com uma taxa de crescimento anual da população de 2,85%. A população urbana do país, estimada em 38% (Banco Mundial e Nações Unidas - Urbanização Mundial) é ainda relativamente baixa, mas Moçambique está a urbanizar-se rapidamente (WPR, 2024).

Entre os censos de 1997 e 2007, a Província de Tete, que engloba a bacia do Revuboe, registrou uma taxa média anual de crescimento de 4,6%, substancialmente superior à média nacional de 2,7% (MAE, 2014). Passou de 1.144.604 habitantes em 1997 para 1.807.485 habitantes em 2007. O censo de 2017 revelou um cenário ainda mais marcante. A população aumentou 46,6%, alcançando 2.648.941 habitantes (Duarte; Duarte, 2024).

3.2.2 Aquisição e Processamento de dados

Foram obtidas gratuitamente no site de distribuição de produtos de sensoriamento remoto *Earth Explorer* da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) imagens da Coleção 2 e Nível 2 do satélite Landsat 05 sensor TM (*Thematic Map*) dos anos 2005 e 2009 e do Landsat 08 sensor OLI (*Operational Land Imager*), dos anos 2015, 2020 e 2023. Essas imagens são do período seco e com baixo percentual de cobertura de nuvens (<10%). Todas as imagens foram reprojatadas e padronizadas para o sistema de coordenadas UTM (WGS 84, Zona 36 Sul), com as refletâncias corrigidas aos efeitos da atmosfera.

O processamento foi realizado no *software* de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) QGis 3.4.18. Foi elaborada uma composição colorida multibanda RGB composta pela combinação das bandas R4G3B2 para imagem Landsat 05 e, R5G4B3 para as imagens do Landsat 08, gerando assim uma imagem em falsa cor – Tabela 1.

Tabela 1: Dados coletadas - Bacia do Revuboe, Moçambique, África.

Ano	Sensor	Path/Row	Data	Bandas RGB	Bandas para TST
2005	Landsat 5 TM	168/70-71	22/09	432	6 (Terral)
2009	Landsat 5 TM	168/70-71	04/11	432	6 (Terral)
2015	Landsat 8 OLI/TIRS	168/70-71	18/09	543	10 (Terral)
2020	Landsat 8 OLI/TIRS	168/70-71	15/09	543	10 (Terral)
2023	Landsat 8 OLI/TIRS	168/70-71	23/08	543	10 (Terral)

O ano de 2007 corresponde ao ano de instalação da empresa brasileira VALE DO RIO

DOCE para exploração de reservas de carvão mineral. Pretendendo compreender como era a paisagem antes e depois da instalação das empresas, definiu-se o ano de 2005 como ano inicial e 2023 como ano final do estudo.

3.2.3 Classificação do uso e cobertura do solo

O método de classificação utilizada foi a supervisionada. Segundo definição de Eastman (1998), a classificação supervisionada consiste em detectar tipos específicos de cobertura da terra já conhecidas. O operador identifica e fornece ao sistema exemplos das classes de uso, chamadas áreas de treinamento. O SIG então utiliza algoritmos para classificar a imagem através do exame das reflectâncias de cada pixel com os quais ele mais se parece.

Um dos algoritmos mais utilizados nos sistemas de classificação, é o da máxima verossimilhança gaussiana (Demarchi; Piroli; Zimback, 2011), o qual foi empregado neste trabalho. Esse classificador, segundo Eastman (1998) avalia a probabilidade de um determinado pixel pertencer a uma categoria e o classifica para a categoria a qual tenha a maior probabilidade de associação.

Na classificação de imagens foram definidas as seguintes classes de uso e cobertura do solo: Vegetação densa, vegetação esparsa, área agrícola, Água, Mineração e área urbanizada. Essas classes são de maior domínio na área de estudo. Tabela 2 descreve com detalhes características de cada uma das classes de uso e cobertura do solo.

Tabela 2: Descrição das classes de uso e cobertura do solo bacia do Revuboe, Moçambique

Classes	Descrição
Vegetação densa	Área com formação florestal nativa, dimensões mínimas de 0.5 hectares de formações arbóreas com porte superior a 5 metros de altura.
Vegetação esparsa	Áreas com formações de savana constituídas por um estrato predominantemente arbustivo, esparsamente distribuído sobre um estrato gramíneo-lenhoso; áreas parcialmente desmatadas.
Agricultura	Inclui todas as áreas cultivadas com plantios temporários e permanentes, utilizadas para a produção de alimentos, fibras, outras matérias-primas.
Água	Inclui todas as águas interiores, como rios, riachos, canais e outros corpos de água lineares.

Classes	Descrição
Mineração	Área de mineração (principalmente de carvão mineral) delimitada ou não para o efeito incluindo poços desativados
Área urbanizada	Áreas urbanizadas (cidades e vilas), áreas industriais, aldeias e comunidades de povoamento disperso.

Foram coletadas amostras de treinamento na imagem a partir da predefinição de classes de uso ou cobertura, de acordo com a resposta espectral das mesmas. Para determinar o número de pixels amostrados por classe, foi utilizada a fórmula aplicada por VALENTE (2001):

$$\frac{T_p \times (1,5 \text{ a } 3,0\%)}{T_c} \quad \text{Equação 1}$$

Sendo: T_p Total de pixels da cena e; T_c Total de classes de uso e cobertura do solo.

3.2.4 Validação da classificação

Após a classificação de uso e cobertura do solo, cada mapa foi submetido ao filtro majoritário 4×4 para remoção de pixels isolados. Com os mapas gerados de uso e cobertura do solo efetuou-se a análise da acurácia ou fidedignidade das classes de uso e cobertura a partir da construção da matriz de erros das imagens classificadas, segundo metodologia proposta por Congalton (1991).

A matriz de erros foi gerada através da amostragem aleatória estratificada com erro padrão geral esperado de 0,05. Segundo Lillesand et al. (2004) a matriz de erro, também denominada matriz de confusão ou tabela de contingência, compara basicamente, categoria por categoria, a relação entre os dados de referência conhecidos e os resultados correspondentes de uma classificação automatizada. A partir da matriz de confusão pode desenvolver-se uma série de medidas estatísticas que concluem o processo de validação, entre estas, a exatidão global, acurácia do produtor e do usuário.

A Exatidão Global (EG) refere-se é a medida de verificação da proximidade de uma determinada medida ao seu valor real, em que relaciona os elementos da diagonal principal (concordância real) com o total de pontos amostrados da imagem classificada (Silva; Trevisan, 2019; Rwanga et al., 2017), sendo dada pela Equação 2.

$$EG = \frac{A}{n} \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

Sendo:

EG: Exatidão Global; A: número de pontos amostrais com acerto e; n = número de pontos amostrais.

A acurácia do produtor e do usuário refere-se, respectivamente, aos erros de omissão e de comissão. Segundo Silva e Trevisan (2019) e Rwanga et al. (2017), os erros de omissão são considerados uma medida mais rigorosa, pois levam em consideração os valores nas células marginais da matriz. No caso das linhas, os valores indicam o número de amostras que, pertencendo a uma determinada categoria, não foram incluídos (Equação 3).

$$E_0 = \frac{+X_i - X_{ii}}{+X_i} \quad \text{Equação 3}$$

Sendo:

E_0 = erro de omissão; $+X_i$ = valor na marginal da linha e; X_{ii} = número na diagonal daquela linha.

O Erro de Comissão são os valores das células nas diagonais das colunas, isto é, pixels que não se incluem em uma determinada categoria, pertencente realmente a outra, sendo calculados conforme a Equação 4 (Silva; Trevisan, 2019; Rwanga et al., 2017).

$$C = \frac{+X_k - X_{ii}}{+X_k} \quad \text{Equação 4}$$

Sendo:

E_c = erro de comissão; $+X_k$ = valor na marginal da coluna e; X_{ii} = número na diagonal daquela coluna.

Entre Dezembro de 2023 a Fevereiro de 2024 foi realizado trabalho de campo visando o reconhecimento da área e dos níveis de intervenção antrópica, isto é, observar em campo diversas atividades que constituem fatores de alteração da paisagem na bacia. O trabalho de campo consistiu também na marcação de 180 pontos por meio de um receptor GPS, os quais serviriam para a validação da classificação de uso e cobertura de solo, no entanto, devido a não boa distribuição dos mesmos em toda área da bacia, não foram usados para gerar a matriz de confusão, optando-se apenas em utilizar imagens de alta resolução do *Google Earth*.

Outrossim, apesar da qualidade posicional dessas imagens variar de região para região (Menezes et al, 2019), e de possuírem resolução espacial e temporal diferente nas várias regiões do globo (Jasem; Al-Hamadani, 2020), elas são as mais usadas para a validação da classificação de uso e cobertura do solo a partir de imagens de satélite em regiões onde é difícil o acesso de imagens de alta resolução, atualizadas e de grande escala (Silva Júnior; França; Moraes, 2022) como é o caso de Moçambique.

Utilizando 397 pontos de verdade de campo aleatoriamente distribuídos oriundos de imagem de alta resolução do *Google Earth Pro* e combinação de banda cor natural foi possível obter a matriz de erros e posteriormente, a Exatidão Global (EG), acurácias do produtor e do usuário utilizando o *plugin AcaTaMa* do software QGIS.

Na sequência, feita a validação dos mapas temáticos de uso e cobertura do solo, as imagens foram inseridas em um ambiente SIG, onde foi possível realizar o processamento e análises que forneceram subsídios para a compreensão das mudanças espaciais ocorridas na bacia nos últimos 17 anos.

3.3 Resultados e Discussão

Os mapas de uso e cobertura do solo da bacia, elaborados para os anos de 2005, 2009, 2015, 2020 e 2023, estão apresentados na Figura 2.

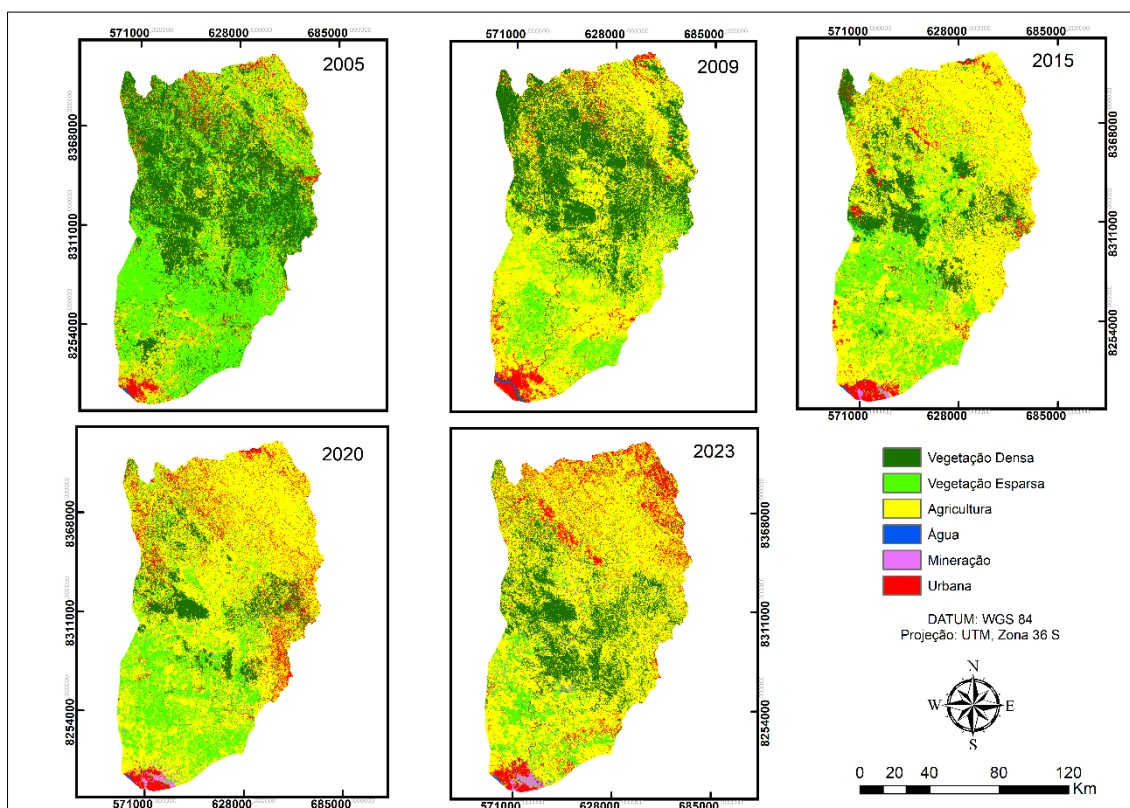


Figura 2: Uso e Cobertura do Solo dos anos em estudo na bacia do Revuboe, Moçambique, África.

A partir da matriz de confusão (Tabela 3), foram extraídas medidas estatísticas que concluem o processo de validação sendo: a exatidão global, acurácia do produtor e do usuário.

Tabela 3: Matriz de Confusão da imagem classificada de 2023, Bacia do Revuboe, Moçambique

	Validação						Total	Acurácia do Usuário
	1 Vegetação Densa	2 Vegetação Esparsa	3 Agricultura	4 Água	5 Mineração	6 Urbano		
1	59	7	4	0	0	0	70	0.84
2	0	25	0	0	1	0	26	0.96
3	6	7	217	0	0	0	230	0.94
4	0	1	1	13	0	0	15	0.87
5	2	2	1	0	15	0	20	0.75
6	1	0	10	0	0	25	36	0.69
Total	68	42	233	13	16	25	397	
Acurácia do Produtor	0.89	0.64	0.94	1	0.79	1		
Acurácia Global							0.90	

A classificação apresentou confusão entre as classes vegetação densa e vegetação esparsa sendo que sete pontos dos setenta da classe de vegetação densa, foram classificadas como vegetação esparsa. Possivelmente este erro seja causado pelo fato que a classe vegetação esparsa apresenta-se como uma formação de transição entre as áreas de vegetação densa e agricultura.

O mesmo cenário foi observado nas classes de agricultura e vegetação esparsa, devido ao fato de áreas agrícolas, que posteriormente perdem a capacidade de produtividade, serem abandonadas e, anos depois, passarem por um processo de reflorestamento. Isso resulta em valores de refletância espectral próximos aos observados em áreas agrícolas.

A classe de áreas urbanas apresentou maior confusão com a classe agricultura (dez pontos amostrais identificados erroneamente como agricultura) possivelmente por ser comum encontrar áreas de cultivo dentro das cidades e pequenas vilas. As classes de vegetação esparsa e agricultura apresentaram menos erros de comissão; as classes vegetação densa e água também tiveram poucos erros de comissão. A classe de Agricultura também teve pouquíssimo erro de omissão. De forma geral, as classes que tiveram maior frequência de erros de comissão foram a mineração e urbano. Com relação aos erros de omissão, as classes de vegetação esparsa e mineração se sobressaíram.

Para os anos de 2005, 2009, 2015 e 2020, a exatidão global foi de 85,3%, 86,1%, 86,7% e 87,8% respectivamente, calculada a partir da matriz de confusão gerada pela sobreposição de imagens classificadas e imagens de alta resolução do *Google Earth Pro*

georreferenciadas para os respectivos anos. Os valores de exatidão alcançados são classificados como bons segundo Congalton (1991) e Lillesand et al. (2015) assegurando a confiabilidade dos resultados.

Por meio da classificação supervisionada, foram determinadas as áreas das classes de uso do solo em porcentagem objetivando analisar sua evolução no período de 17 anos. A Tabela 4 mostra a distribuição percentual de classes de uso e cobertura do solo nos vários anos de análise.

Para o ano de 2005 observou-se que as classes de vegetação densa (36,39%), vegetação esparsa (34,26%) e agricultura (25,14%) eram de maior extensão e classes de área urbana (14,05%), mineração (0,14%) e água (0,03%), ocupavam menor porcentual dentro da bacia.

Tabela 4: Área de classes de uso e cobertura do solo para cada ano de estudo na bacia do Revuboe, Moçambique, África.

Anos	Classes de Uso e Cobertura do Solo												Total ha	Total %
	Vegetação densa		Vegetação esparsa		Agricultura		Água		Mineração		Urbana			
	ha	%	ha	%	Há	%	ha	%	ha	%	ha	%		
2005	633089	36	596100	34	437344	25	516	<1	2386	<1	70466	4	1739901	100%
2009	556486	32	384153	22	710850	41	2271	<1	768	<1	85373	5	1739901	100%
2015	214832	12	378031	22	1034012	59	1057	<1	8660	<1	102409	6	1739001	100%
2020	158926	9	380186	22	1021494	59	1159	<1	16791	1	161345	9	1739901	100%
2023	329823	19	124939	7	1087040	62	8198	<1	23872	1	166029	10	1739901	100%

Em todo período do nosso estudo, a análise de dados revela um padrão evidente de conversão de áreas de vegetação densa e esparsa para usos agrícolas. Em um estudo desenvolvido por Cianciullo et al. (2023) em Moçambique, a conversão de áreas florestais em terras agrícolas é identificada como uma das principais causas do desmatamento. Essa conversão de áreas de vegetação densa e esparsa em terras agrícolas, é resultado da necessidade dos pequenos agricultores aumentarem sua produção (Niquisse; Cabral, 2018) por constituir fator chave para a redução da pobreza pela comercialização de excedentes agrícolas (Cunguara et al., 2013).

A agricultura moçambicana é majoritariamente, desde pós-independência, caracterizada por pequenas propriedades que cultivam menos de 1 hectare, com as atividades agrícolas feitas em moldes tradicionais, sem mecanização, financiamento e insumos agrícolas melhorados, comprometendo o desempenho dos agricultores familiares que constituem a maioria que pratica a agricultura (Chihanhe; Mananze; Machava, 2022).

É uma agricultura de baixo uso de tecnologias modernas (Marassiro; Oliveira; Pereira, 2021).

Para além de produzir para o consumo, os agricultores familiares produzem *commodities* em forma de monocultura para o agronegócio. Segundo Mosca (2017) os produtos dos sistemas de agronegócios, geralmente para exportação, produzidos pelos camponeses “produtores de mercadorias”, são adquiridos pelas empresas nas fases a montante das cadeias de valor. O aumento de rendimentos das famílias produtoras, a possibilidade de imitação tecnológica, a utilização de insumos e outros aspectos, são apontados como vantagens deste modelo de produção. Possui também riscos, como por exemplo: efeitos ambientais provocados pela monocultura devido, por exemplo, ao desmatamento em consequência da ampliação das áreas trabalhadas, ao esgotamento dos solos, entre outros.

O setor agrícola moçambicano registrou crescimento ao longo das duas últimas décadas, associado ao investimento privado e na mecanização agrícola (Chihanhe; Mananze; Machava, 2022). Este crescimento traz como consequência a devastação de áreas de vegetação natural.

A classe temática vegetação densa registrou uma perda de 303910 hectares correspondente a 17,44% entre 2005 e 2023. Nesse período ocorreu um aumento significativo da classe de agricultura que passou de 437344 hectares em 2005 para 1088040 hectares em 2023. Em 2005, a agricultura estava presente em 25,14% da área da bacia e passou a ocupar um pouco mais de 62% em 2023, ganhando 95562 hectares, o que representou um aumento de 37,39%. Essa enorme expansão concentra-se na parte sul da bacia onde estão localizadas as principais e maiores cidades dentro da bacia.

A área de vegetação esparsa teve uma redução contínua passando de 34,26% em 2005 para 7,18% em 2023. A área dedicada a mineração aumentou, embora de formas mais lenta, passando de 0,14% em 2005 para 1,37% em 2023. Área urbana apresentou um crescimento contínuo na bacia desde o ano inicial de análise passando de 4,05% em 2005 para 9,5% em 2023. A expansão de áreas urbanas pode ser resultado da instalação de empresas de exploração mineira e outros serviços nas imediações da cidade de Tete e Moatize - principais centros urbanos dentro da bacia.

A Tabela 5 mostra a variação das classes de uso e cobertura do solo durante o período de análise.

Tabela 5: Variação em hectares e porcentagem das classes de uso e cobertura entre anos de estudo na bacia do Revuboe, Moçambique, África.

Classes	Mudanças em hectares				%	
	2005 – 2009	2009- 2015	2015- 2020	2005- 2023	2005-2023	Observação
Vegetação densa	-76603	-348657	-55903	-303910	-17,5	Diminuiu
Vegetação Esparsa	-212015	-5992	+2025	-471229	-27,1	Diminuiu
Agricultura	+273508	+323910	-13268	+650696	+37,4	Aumentou
Água	-1754	-1214	-100	+7682	+0,4	Aumentou
Mineração	-1610	+7892	+8130	+21494	+1,2	Aumentou
Urbano	+14907	+17036	+58936	+95562	+5,5	Aumentou

Em todos os intervalos de tempo, a vegetação densa foi perdendo sua área em cerca de 17,5%. O mesmo cenário se verifica para a classe de vegetação esparsa que perdeu 27,1%, sendo a classe que mais área perdeu em todo período de estudo. Essas duas classes demonstram cenários de diminuição contínua em todo período de estudo, excetuando o último ano de estudo em que a vegetação densa registrou aumento. A mineração apresentou uma tendência crescente, aumentando cerca de 1,2% de sua área.

A área de agricultura registrou maior aumento, ganhando de outras classes, cerca de 37,4% de área. A expansão de áreas agrícolas é vista como estratégia para o desenvolvimento econômico da população. Para Duarte e Duarte (2024), a agricultura representa um campo com grande potencial para expandir o emprego e contribuir para o crescimento econômico da região. Aumentar a produtividade agrícola é uma recomendação fundamental, visando a geração de empregos e o fortalecimento da economia local (Cebola, 2018). Estas podem constituir principais razões para a rápida e contínua expansão de áreas agrícolas.

A Figura 3 descreve a evolução das classes de uso e cobertura agrupadas no intervalo de 2005 a 2023. Pode-se notar observando o gráfico que a atualmente, a classe de agricultura é a mais dominante constituindo principal matriz da área. Desde o ano inicial de estudo, esta classe tem registrado aumento significativo dentro da bacia.

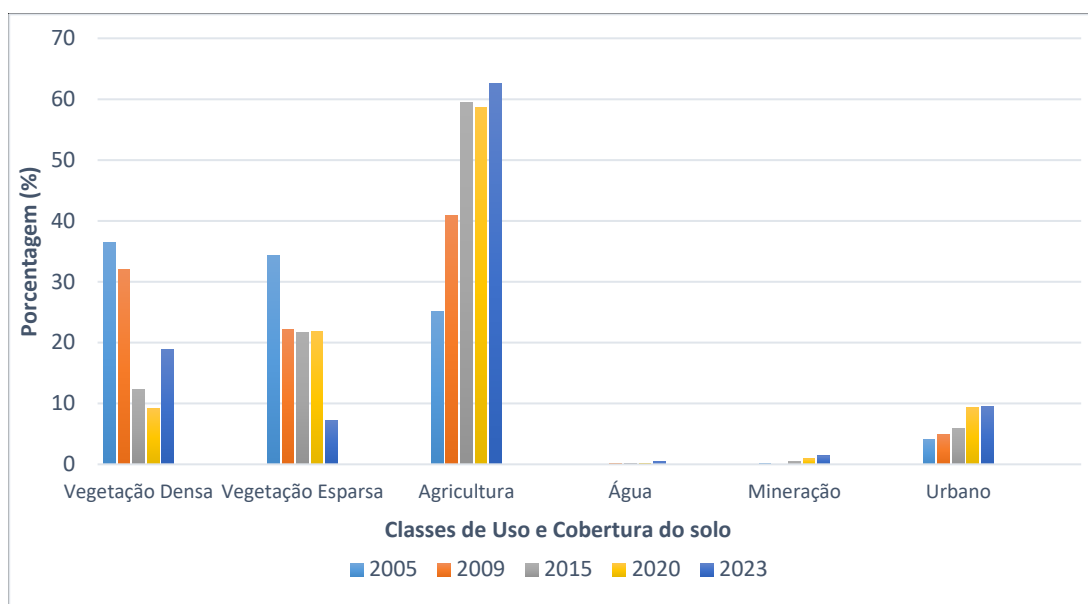


Figura 3- Evolução das classes de uso e cobertura do solo entre os anos, 2005 a 2023 na bacia do Revuboe, Moçambique, África.

Para uma análise mais detalhada sobre dinâmica da paisagem, o Tabela 6 apresenta resultados da matriz de transição que cruza os resultados do mapeamento para analisar o quanto uma classe ganhou ou perdeu entre os anos de 2005 e 2023.

Tabela 6: Matriz de transição em porcentagem das classes de uso e cobertura entre 2005 a 2023 na bacia do Revuboe, Moçambique, África.

	Vegetação Densa	Vegetação Esparsa	Agricultura	Água	Mineração	Urbano
Vegetação Densa	31.73	3.76	56.77	0.55	0.97	6.22
Vegetação Esparsa	13.7	12.24	66.3	0.4	1.48	5.88
Agricultura	10.3	6.1	66.81	0.31	1.58	14.9
Água	18.2	0.05	2.91	74.91	0.23	3.7
Mineração	9.14	4.78	59.2	4.2	1.23	21.45
Urbano	1.7	2.36	56.4	0.44	2.79	36.31

A diagonal principal apresenta as áreas que se mantiveram constantes entre os mapeamentos que varia em cada uma das classes mapeadas. Pode se notar que a classe

água teve maior porcentual de permanência e perdendo cerca de 18% de sua área para a classe de vegetação densa.

Com segunda maior taxa de permanência está a classe de agricultura, com cerca de 67%. Os valores fora da diagonal principal apresentam as transições entre as classes temáticas no período de 17 anos. A partir da matriz de transição é possível notar que o crescimento da área de produção agrícola está associado à incorporação de áreas anteriormente ocupadas majoritariamente por classes de vegetação esparsa (66,3%) e vegetação densa (56,77%).

É possível ainda verificar a conversão de áreas de vegetação esparsa e agricultura em áreas de vegetação densa. Esta conversão é consistente com o estudo conduzido por Tefera e Kassa (2017) que mostraram que há uma tendência crescente de plantio de eucalipto em áreas outrora ocupadas por savana. O tipo de agricultura praticada em Moçambique, é de pousio e as áreas temporariamente abandonadas acabam regenerando e adquirir características próximas às de uma floresta nativa (Monteiro, 2004). Este fato, justifica a conversão de áreas de agricultura em áreas de vegetação densa.

A área de mineração foi a que menor porcentual de permanência teve (1,23%) e se expandiu sobre as áreas que anteriormente eram de assentamento urbano. Vale destacar que a classe de área urbana é a única que aumenta de forma sucessiva entre os anos analisados, ganhando espaço outrora ocupado pela mineração (21,45%), agricultura (14,9%) e vegetação densa (6,22%).

Em todo período de estudo, nota-se a conversão contínua de vegetação densa e esparsa para uso agrícola, refletindo a expansão da agricultura familiar e comercial, com destaque para pequenas propriedades de baixo uso tecnológico. Os resultados indicam uma dinâmica de forte transformação da paisagem, com predomínio da agricultura como principal uso do solo, refletindo processos socioeconômicos locais e impactos ambientais significativos.

3.4 Conclusão

Em 17 anos de análise, a bacia do rio Revuboe, registrou mudanças estatisticamente significativas na sua paisagem. Estas mudanças indicam uma intensificação das atividades humanas, particularmente a agricultura e urbanização, com conseqüente redução das áreas de vegetação nativa e de vegetação esparsa.

A classe de vegetação esparsa e de vegetação densa são as que mais áreas perderam para a agricultura e urbanização.

O presente trabalho, permitiu obter uma visão completa sobre a dinâmica da paisagem na bacia do Revuboe e os resultados podem ser bastantes uteis para uma melhor prática de planejamento territorial mais alinhada com princípios de sustentabilidade ambiental.

Referências Bibliográficas

CEBOLA, T. P. A nova onda de imigrantes em Tete, Moçambique: o caso dos zimbabwianos (2007–2016). 2018. Dissertação (Mestrado em Demografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBDAXAMFB/1/tomas_disserta_o_com_ficha2_.pdf. Acesso em: 31 maio 2024.

CHIHANHE, A. C.; MANANZE, S. E.; MACHAVA, C. M. O agronegócio em Moçambique: um olhar sobre o passado, presente e perspectivas futuras. Maputo. 2022.

CIANCIULLO, S.; ATTORRE, F.; TREZZA, F. R. et al. Analysis of land cover dynamics in Mozambique (2001–2016). *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, v. 34, p. 81–92, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12210-023-01133-9>. Acesso em: 2 dez. 2024.

CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, v. 37, n. 1, p. 35–46, 1991.

CUNGUARA, B. et al. Análise situacional, constrangimentos e oportunidades para o crescimento agrário em Moçambique. 2013.

DEMARCHI, J. C.; PIROLI, E. L.; ZIMBACK, C. R. L. Análise temporal do uso do solo e comparação entre os índices de vegetação NDVI e SAVI no município de Santa Cruz do Rio Pardo – SP usando imagens LANDSAT-5. *Raega - O Espaço Geográfico em Análise*, v. 21, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/raega.v21i0.17416>. Acesso em: 3 jun. 2024.

DUARTE, G. F. P.; DUARTE, E. F. P. Moatize: urbanização e meio ambiente. *Geociências*, v. 43, p. 211–222, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5016/geociencias.v43i2.18106>. Acesso em: 4 jul. 2024.

FORKUOR, G.; COFIE, O. Dynamics of land-use and land-cover change in Freetown, Sierra Leone and its effects on urban and peri-urban agriculture – a remote sensing approach. *International Journal of Remote Sensing*, v. 32, n. 4, p. 1017–1037, 2011. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01431160903505302>. Acesso em: 31 maio 2024.

JASEM, M. S.; AL-HAMADANI, O. Positional accuracy assessment for updating authoritative geospatial datasets based on open source data and remotely sensed images. *Journal of Engineering*, v. 26, n. 2, p. 70–84, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.31026/j.eng.2020>. Acesso em: 10 ago. 2024.

INE. Resultados Definitivos. Cerimónia Central. Maputo, 29 abr. 2019. Disponível em: <https://www.portaldogoverno.gov.mz/por/content/download/11965/95631/version/2/file/Resultados+do+Censo+2017+Apresentacao+Final1.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2024.

IPCC. Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate

Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. 1st ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9781009157940>. Acesso em: 3 dez. 2024.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPAN, J. W. Remote sensing and image interpretation. 5. ed. Madison: Wiley, 2004.

MACARRINGUE, L. S.; BOLFE, É. L.; DUVERGER, S. G. 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*, v. 12, n. 8, p. 342, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijgi12080342>. Acesso em: 12 nov. 2024.

MACIE, A. E. A. Mineração de carvão na bacia carbonífera de Moatize, província de Tete – Noroeste de Moçambique: uma análise socioambiental. 2015. Dissertação (Mestrado em Mineralogia Experimental e Aplicada) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44144/tde-03112015-141000/>. Acesso em: 2 set. 2024.

MAE. Perfil Distrital de Moatize – Província de Tete. 1. ed. Direção Nacional de Administração Local, Maputo: Moçambique, 2014. Disponível em: <https://www.tete.gov.mz/por/content/download/5144/37195/version/1/file/Moatize.pdf>. Acesso em: 8 ago. 2024.

MARASSIRO, M. J.; OLIVEIRA, M. L. R. de; PEREIRA, G. Agricultura familiar em Moçambique: características e desafios. *Research, Society and Development*, 2021.

MONIE, F.; CARVALHO. Mineração e reestruturação espacial em Moatize (Moçambique). *beÁfrica: Revista da Associação Brasileira de Estudos Africanos*, 2019.

MOSCA, J. Agricultura familiar em Moçambique: ideologias e políticas. 2017.

NIQUISSE, S.; CABRAL, P. Assessment of changes in ecosystem service monetary values in Mozambique. *Environmental Development*, v. 25, p. 12–22, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2017.09.003>. Acesso em: 5 jun. 2024.

PASSE, J. Indústria carbonífera no Distrito de Moatize, Província de Tete, Moçambique e sua influência ambiental dos solos por elementos potencialmente tóxicos. 2019. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Meio Ambiente) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44137/tde-11032019-090319/>. Acesso em: 2 set. 2024.

PATEL, G. et al. Agricultural growth and land use land cover change in peri-urban India. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 191, n. 9, p. 600, 2019.

RAJA, P.; MATHEW, A. Detection of land use/land cover changes in a watershed: a case study of the Murredu watershed in Telangana state, India. *Watershed Ecology and the Environment*, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2589471422000298>. Acesso em: 31 maio 2024.

ROMÃO, A. C. B. C.; SOUZA, M. L. Análise de uso e ocupação do solo na bacia do ribeirão São Tomé, Noroeste do Paraná–PR. *Raega*, v. 21, p. 337–364, 2011.

RWANGA, S. S. et al. Accuracy assessment of land use/land cover classification using remote sensing and GIS. *International Journal of Geosciences*, v. 8, 2017.

SILVA JÚNIOR, J. A.; FRANÇA, T. M. S.; MORAES, V. S. Avaliação da acurácia planimétrica de imagens Google Earth numa zona urbana e rural do estado de Pernambuco, Brasil. *Revista Cartográfica*, n. 105, 2022. Disponível em: <https://revistasipgh.org/index.php/rcar/article/view/1386>. Acesso em: 12 dez. 2024.

SILVA, A. C. G.; TREVISAN, G. D. M. Comparação da classificação de ocupação do solo do município de Frederico Westphalen-RS, utilizando os métodos Isodata e Distância Mínima. *Nativa*, v. 7, n. 6, p. 727–733, 2019. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/7970>. Acesso em: 31 maio 2024.

TEFERA, B.; KASSA, H. Trends and driving forces of Eucalyptus plantation by smallholders in the Lake Tana watershed of Ethiopia. In: STAVE, K.; GOSHU, G.; AYNALEM, S. (Eds.). *Social and Ecological System Dynamics*. AESS Interdisciplinary Environmental Studies and Sciences Series. Cham: Springer, 2017.

VALENTE, R. D. O. A. Análise da estrutura da paisagem na bacia do Rio Corumbataí, SP. 2001. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.11.2001.tde-16042004-145533>. Acesso em: 8 abr. 2024.

WPR. World Population Review. Mozambique Population. 2024. Disponível em: <https://worldpopulationreview.com/countries/mozambique-population>. Acesso em: 3 dez. 2024.

CAPÍTULO III

MUDANÇAS DE USO E COBERTURA DO SOLO E SUA INFLUÊNCIA NA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE TERRESTRE NA BACIA DO REVUBOE – MOÇAMBIQUE

RESUMO

Mudanças de uso e cobertura do solo caracterizada pela contínua expansão de áreas agrícolas e urbanização, tem contribuído significativamente para o aumento da temperatura de superfície terrestre e intensificação do desconforto térmico. Nesta circunstância, foi definido como objetivo deste estudo, analisar a evolução temporal do uso e cobertura do solo e sua influência na variação da Temperatura da Superfície Terrestre (TST) na bacia hidrográfica do rio Revuboe, na região central de Moçambique. A partir de imagem de satélite Landsat foram quantificadas as classes de uso e cobertura do solo. Posteriormente, foi realizado o cálculo de Temperatura de Superfície Terrestre. Por fim, foi analisada a relação entre mudanças de uso e cobertura do solo e Temperatura de Superfície Terrestre. O ano de 2015 foi o mais quente com uma média de 37,4 °C. As classes de mineração e de vegetação esparsa registraram valor de TST mais elevada (41,2°C). A partir da análise estatística dos dados, conclui-se que mudanças de uso e cobertura do solo, interferem de forma significativa na temperatura de superfície terrestre na bacia Revuboe. Este estudo pode orientar aos tomadores de decisão na criação de propostas mitigadoras de alterações e monitoramento do clima da bacia.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Geoprocessamento; degradação ambiental; monitoramento ambiental; planejamento microclimático.

ABSTRACT

Changes in land use and cover, characterized by the continuous expansion of agricultural areas and urbanization, have contributed significantly to the increase in land surface temperature and intensification of thermal discomfort. In this circumstance, the aim of this study was defined as analyzing the temporal evolution of land use and cover and its influence on the Land Surface Temperature (LST) in the Revuboe river basin, in the central region of Mozambique. Land use and land cover classes were quantified using landsat satellite images. Subsequently, the Land Surface Temperature calculation was carried out. Finally, the relationship between changes in land use and cover and Earth

Surface Temperature was analyzed. The year 2015 was the hottest with an average of 37,4 °C. The mining and sparse vegetation classes recorded the highest LST value (41,2°C). From the statistical analysis of the data, it is concluded that land use and land cover changes interfere significantly in the Land Surface Temperature within the basin. The present study can guide decision makers in creating proposals to mitigate changes and monitor the basin's climate.

Keywords: Remote sensing; geoprocessing; environmental degradation; environmental monitoring; microclimatic planning.

1. introdução

A mudança de uso e cobertura do solo tem um impacto direto na temperatura de superfície terrestre. Por exemplo, o desmatamento e a urbanização frequentemente resultam em temperaturas mais altas devido à substituição de vegetação por materiais como concreto e asfalto, que retêm mais calor (Zheng et al., 2019; Guha; Govil, 2021).

Como em muitas bacias hidrográficas de Moçambique, a bacia do rio Revuboe enfrenta importantes desafios ambientais, entre eles a degradação da vegetação, impulsionada principalmente pelas atividades humanas (Macarringue et al., 2022). O rápido crescimento populacional e a expansão da agricultura familiar constituem os principais fatores de mudança no uso e na cobertura do solo na região (Duarte; Duarte, 2024).

A ausência de uma gestão territorial adequada tem resultado na ocupação desordenada de áreas ecologicamente sensíveis, com a formação de bairros espontâneos e infraestrutura precária, o que agrava a vulnerabilidade socioambiental das comunidades locais (Macarringue et al., 2022). Esse processo é particularmente evidente nas cidades de Tete e Moatize que são as maiores da província e que têm experimentado um acelerado crescimento econômico e urbano, muitas vezes sem o devido planejamento (Duarte; Duarte, 2024).

Como consequência, a paisagem da bacia tem passado por profundas transformações, com a conversão de áreas naturais em espaços urbanos e agrícolas, acarretando perda de biodiversidade, contaminação do solo e degradação dos ecossistemas. Diante desse cenário, tornam-se necessárias estratégias sustentáveis que conciliem o desenvolvimento humano com a conservação ambiental (Pan et al., 2021).

Ferramentas de monitoramento e análise territorial, como o sensoriamento remoto, têm se mostrado fundamentais para compreender e gerir essas dinâmicas. O uso de imagens de satélite permite acompanhar a evolução das mudanças ao longo do tempo, fornecendo informações detalhadas sobre variações na temperatura de superfície e nas classes de uso e cobertura do solo (Chai; Seto, 2019; Gogoi et al., 2019; Akomolafe; Rosazlina, 2022).

Na bacia, já foram realizadas pesquisas sobre o uso de produtos de sensoriamento remoto para estimar a temperatura da superfície terrestre, como nos estudos de Victor et al. (2023). No entanto, esses estudos não têm como foco a análise dos impactos das mudanças no uso e cobertura da terra sobre a temperatura da superfície.

Dessa forma, considerando a bacia hidrográfica como unidade fundamental para a análise ambiental, gestão e planejamento, permitindo uma avaliação integrada dos impactos das ações humanas no meio ambiente, conforme destacado por Ferreira de Almeida, Simões e Ferraz (2019), o presente estudo busca utilizar técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica para mapear e quantificar as mudanças no uso e cobertura do solo e sua influência na variação da temperatura de superfície na bacia hidrográfica do rio Revuboe.

2. Material e métodos

2.1 Determinação da Temperatura de Superfície Terrestre

Para o cálculo da temperatura de superfície terrestre (TST) utilizou-se a metodologia proposta pela *United States Geological Survey* (2009) e Sobrino, Jiménez-Munoz e Paolini (2004) envolvendo as seguintes etapas: conversão de Números Digitais (ND) para radiância; conversão de temperatura de brilho do topo da atmosfera; índice de vegetação por diferença normalizada, proporção de vegetação; emissividade e temperatura de superfície terrestre.

a) Radiância Espectral - Para a conversão de ND para radiância, utilizou-se os parâmetros fixos de conversão da imagem Landsat para radiância espectral. Esse procedimento foi realizado através da Equação (5).

$$L_{\lambda} = ML Q_{cal} + AL \quad \text{Equação 5}$$

Sendo:

L_{λ} - é a radiância espectral ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$);

ML - é o fator de escala multiplicativo de radiância para a banda (RADIANCE_MULT_BAND_n - dos metadados);

AL - é o fator de redimensionamento aditivo específico da banda dos metadados (RADIANCE_ADD_BAND_n - de os metadados);

DN - é o valor de pixel do produto padrão calibrado.

b) Temperatura de Brilho do Topo da Atmosfera - Após a conversão de ND para radiância, os dados da banda termal foram convertidos de radiância espectral para temperatura de brilho (T) usando as constantes térmicas fornecidas no arquivo de metadados conforme demonstrado na Equação (6).

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L\lambda} + 1\right)} \quad \text{Equação 6}$$

Sendo:

T - é a temperatura efetiva de brilho do satélite em graus Kelvin,

$L\lambda$ - é a radiância espectral, e

K1 e K2 - são constantes de calibração (K1_CONSTANT_BAND_x e K2_CONSTANT_BAND_x, onde x é o número da banda térmica).

c) Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - A próxima etapa no cálculo do TST requer o cálculo do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). O valor do NDVI varia de -1 para +1. Valores entre 0 e -1 indicam que a terra é coberta por objetos não vegetais, como plantas mortas, pedras, estradas, casas e terras estéreis. O grau ou nível de terreno coberto por folhagem verde ou plantas é indicado pelo NDVI com valores de 0 a +1. Zero indica a área com baixa cobertura de folhagem verde ou plantas, e +1 indica área com maior cobertura de folhagens ou plantas verdes (Chang et al., 2021; Suharyanto, 2023).

A equação (7) é usada para gerar os resultados do índice de vegetação e é dada abaixo:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad \text{Equação 7}$$

Sendo:

NDVI – Índice de vegetação por diferença normalizada

NIR – Banda do infravermelho próximo

R – Banda do vermelho

O NDVI é calculado para obter dados de entrada para o cálculo da Proporção de Vegetação (PV).

d) Proporção de Vegetação - é calculada a proporção de vegetação através da equação (8).

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right)^2 \quad \text{Equação 8}$$

Sendo:

NDVI - valores da imagem NDVI

NDVI max/min - valores Máximo e Mínimo da imagem NDVI

e) Emissividade - Com dados do NDVI e do PV, é calculada a emissividade. A emissividade está relacionada com a capacidade, inerente à superfície, em converter energia armazenada em energia radiante, emitindo-a para o espaço. Os valores de emissividade da superfície terrestre geralmente variam de 0,9 até próximo de 1,0 e dependem da rugosidade, do tipo de solo e da cobertura presente, e sua distribuição (Sobrino; Jimenez; Paolini, 2004).

A emissividade (Equação 9) pode ser estimada utilizando-se a proporção de vegetação (P_v), a qual associa valores de NDVI.

$$\varepsilon = mP_v + n \quad \text{Equação 9}$$

Sendo:

ε – emissividade

P_v – Proporção de vegetação

Na equação da emissividade, o valor de m é considerado 0,004 e o valor n como 0,986 (Sobrino; Jimenez; Paolini, 2004).

f) Temperatura de Superfície Terrestre - Finalmente, a temperatura da superfície terrestre é calculada pela fórmula da equação (10):

$$TST = \left(T / \left(1 + \left(\lambda * \frac{T}{\rho} \right) \right) \right) L n \varepsilon \quad \text{Equação 10}$$

Sendo:

TST - Temperatura da superfície Terrestre (°C);

T - Temperatura de brilho no sensor (°C);

λ - Comprimento de onda central da banda utilizada (no caso, a banda 10, corresponde à 10,8 μm); e

ρ - Constante equivalente ao valor 14388 $\mu\text{m K}$ (constante de Planck multiplicada pela razão entre a velocidade da luz e a constante de Boltzmann)

ε - Emissividade.

Por fim e com a utilização da ferramenta de estatística zonal, foram calculadas as temperaturas médias, mínimas e máximas da bacia. Os dados foram tabulados através do Microsoft Excel para apresentação em tabelas e gráficos.

2.2 Validação estatística

A fim de verificar estatisticamente se o fator uso e cobertura do solo influenciou na Temperatura de Superfície Terrestre (TST), os dados foram submetidos a testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade da variância (Levene). Com base nos resultados desses testes preliminares, que determinaram o tipo de análise mais adequado, foi aplicado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis para analisar a existência de diferença significativa entre as médias das classes de uso e cobertura do solo e a TST. Para as comparações pareadas entre os grupos, foi utilizado o teste post-hoc de Dunn. Todas as análises foram realizadas no software R 4.4.1 com os pacotes ggplot2, raster, car, MASS e FSA.

3. Resultados e discussão

Os mapas de Temperatura de Superfície Terrestre, elaborados para os anos de 2005, 2009, 2015, 2020 e 2023, estão apresentados na Figura 1.

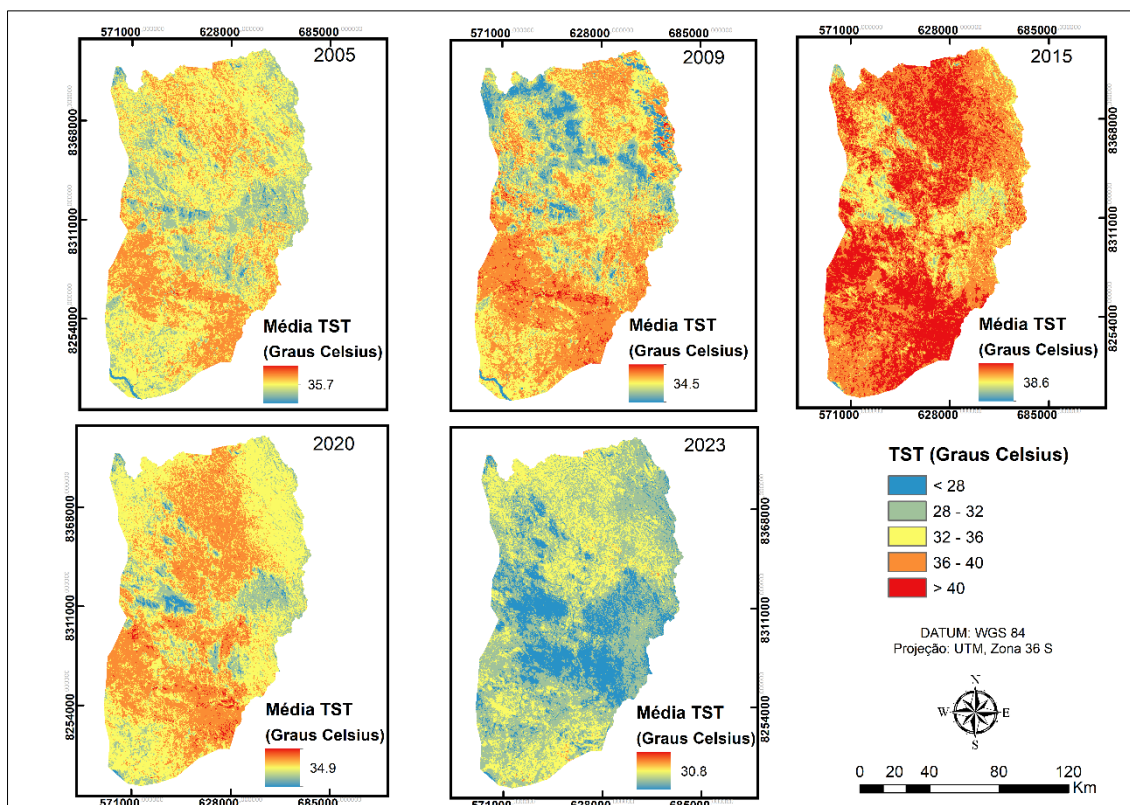


Figura 1: Temperatura de Superfície Terrestre em °C 2005 -2023 na bacia do Revuboe, Moçambique, África.

A Temperatura média variou entre 35,7°C com desvio padrão de 2,8 em 2005 e 30,8°C com desvio padrão de 2,6 em 2023, registrando um pico máximo de 38,6°C com desvio padrão de 3,5 em 2015 indicando potenciais extremos climáticos. Resultados semelhantes foram observados por Victor et al., 2023 no estudo da estimativa de Temperatura de Superfície Terrestre no município de Moatize que se localiza dentro da bacia. Os autores observaram que a TST do mês mais quente do verão, podia atingir valores acima de 45°C e, as médias mensais do mês mais frio 16°C. Este fato, demonstra o comportamento irregular de elementos climáticos dentro da bacia.

Estudo desenvolvido por Duarte (2023) dentro da bacia, verificou alterações nos padrões climáticos caracterizadas principalmente pelo aumento de temperatura como resultado da intensificação da atividade de exploração do carvão mineral.

O ano de 2015 destacou-se como o mais quente de todo o período analisado, apresentando temperatura média de 38,6 °C, com desvio padrão de 3,2. Esse valor superou expressivamente a média registrada nos demais anos da série histórica (2005–2023).

Este ano foi caracterizado por um dos mais intensos eventos de El Niño do século XXI, cujos impactos foram amplamente registrados na África Austral. Estudos apontam que esse fenômeno atmosférico-oceânico contribuiu para a ocorrência de uma das secas mais severas das últimas décadas, considerada a pior em cerca de 35 anos (Archer et al., 2017; Glauber et al., 2018). O fenômeno El Niño de 2015 e 2016 não apenas reduziu a precipitação na região, mas também esteve associado a anomalias térmicas acentuadas, intensificando ondas de calor e ampliando a vulnerabilidade socioambiental na região (Ainembabazi; Rusike; Keizire, 2018; Kolusu et al., 2019).

Esse quadro está em consonância com os impactos amplamente reportados para a África Austral, onde a seca prolongada comprometeu a produção agrícola, com queda de até 40% na safra de milho em relação à média histórica (Archer et al., 2017), e aumentou a insegurança alimentar em vários países (Ainembabazi; Rusike; Keizire, 2018). Na bacia do Revúboe, a expansão agrícola sobre áreas de vegetação natural e o crescimento urbano intensificaram o aquecimento superficial, diminuindo a capacidade de resiliência da paisagem frente a eventos climáticos extremos (Cunguara et al., 2013; Victor et al., 2023).

3.1 Análises da relação entre mudanças de uso e cobertura do solo e temperatura de superfície terrestre

Para entender a relação entre uso e cobertura do solo e TST, foram definidos valores médios do TST para cada ano de estudo e o percentual correspondente de cada classe de uso e cobertura do solo.

A Tabela 1 descreve a variação da temperatura média de superfície terrestre em graus centígrados nas seis classes de uso e cobertura do solo em todo o período de estudo. Do quadro é possível compreender que os padrões de distribuição e variação de temperatura ao longo do tempo de estudo, tem diminuído gradualmente nos últimos 17 anos.

A análise da TST em função das mudanças de uso e cobertura do solo demonstra ao longo dos anos, uma distribuição espacial não homogênea. A temperatura da superfície terrestre apresentou variações entre diferentes tipos de uso e cobertura do solo, principalmente devido às características distintivas de cada uma das classes de uso e cobertura do solo.

Tabela 1: Variação da Média de Temperatura de Superfície Terrestre nas classes de uso e cobertura do solo na bacia do Revuboe, Moçambique, África.

Classes	2005		2009		2015		2020		2023		μ/Classe (°C)
	°C	%	°C	%	°C	%	°C	%	°C	%	
Vegetação Densa	38,9	36,4	30,9	32	35,3	12,4	30,6	9,1	27,9	18,9	32,7
Vegetação Esparsa	36,6	34,3	37,3	22,1	41,2	21,7	36,6	21,9	33,0	7,2	36,9
Agricultura	35,6	25,1	36,0	40,9	38,2	59,5	35,0	58,7	31,2	62,5	35,2
Água	33,5	0,03	21,4	0,13	29,2	0,06	27,4	0,07	29,6	0,47	28,2
Mineração	35,9	0,14	31,6	0,04	41,2	0,5	36,4	0,96	32,5	1,37	35,5
Urbano	35,7	4,05	34,6	4,9	39,0	5,9	34,3	9,3	32,3	9,5	35,2
μ/ano (°C)	35,7		34,4		38,6		34,9		30,8		

As classes de uso ligadas à mineração, vegetação esparsa e áreas urbanas apresentaram os maiores valores térmicos em 2015, com destaque para a mineração e a vegetação esparsa, ambas atingindo 41,2 °C, seguidas pela classe urbana, com média máxima de 39,0 °C. Esse comportamento está relacionado tanto às características biofísicas dessas superfícies quanto às alterações ambientais provocadas pelas atividades humanas.

Ullah *Et Al.*, 2023 no seu estudo realizado na região de Baixo Himalaia, também verificaram, através da utilização de imagens do sensor OLI/TIRS Landsat, a influência da mudança de uso e cobertura da terra na distribuição da temperatura da superfície. Os autores afirmam que aumento da urbanização e a existência de áreas de solo exposto,

auxiliou na intensificação de temperatura de superfície terrestre. Afirmam ainda que a taxa de aumento ou diminuição da TST depende da capacidade térmica do material de cada tipo de cobertura do solo. Por exemplo, as áreas construídas têm um TST elevado devido à baixa capacidade térmica do que outras classes de uso e cobertura do solo.

No caso das áreas de mineração, estudos têm mostrado que a remoção da cobertura vegetal e a exposição de solos e rejeitos minerais reduzem significativamente a capacidade do solo de dissipar energia por meio de processos como evapotranspiração, intensificando a absorção de radiação solar e a consequente elevação da temperatura da superfície (Azeez, 2022).

Além disso, a atividade mineira frequentemente gera paisagens fragmentadas, com solos compactados e pouco permeáveis, o que diminui a retenção hídrica e favorece o aquecimento rápido. Outro fator relevante é a ocorrência de combustão espontânea em depósitos de carvão ou resíduos minerais, liberando calor constante e contribuindo para a intensificação das anomalias térmicas (Kandulna et al., 2025). Tais alterações tornam a mineração uma das classes de uso mais associadas a hotspots térmicos, mesmo quando ocupa uma área relativamente menor dentro da paisagem.

No caso das áreas de vegetação esparsa, o efeito térmico está diretamente relacionado à baixa densidade de cobertura vegetal. A presença reduzida de plantas limita o efeito de resfriamento exercido pela transpiração e pela rugosidade da superfície, mecanismos essenciais para dissipar calor em regiões tropicais (Feldman et al., 2022).

Nessas condições, prevalecem solos expostos e com baixos índices de umidade, que apresentam maior albedo e menor capacidade de armazenar água, favorecendo a rápida elevação da temperatura superficial. Esse efeito é particularmente pronunciado em ambientes semiáridos ou de transição, onde a escassez hídrica compromete ainda mais o potencial de resfriamento da vegetação.

Como apontam Li et al. (2023), a temperatura da superfície é um indicador sensível do balanço energético e hídrico entre o solo e a atmosfera, de modo que coberturas vegetais fragmentadas ou pouco densas tendem a amplificar os extremos térmicos e a intensificar o desconforto térmico regional.

Portanto, tanto a mineração quanto a vegetação esparsa compartilham características que explicam a recorrência de elevadas temperaturas: a limitação dos mecanismos de resfriamento associados à presença vegetal e à umidade do solo, combinada com superfícies de alta exposição à radiação solar e baixa capacidade de dissipação de energia. Esses fatores reforçam o papel dessas classes de uso e cobertura como contribuintes

significativos para a formação de ilhas de calor em escala local e para alterações no microclima regional.

Por outro lado, os menores valores de TST foram observados nas classes de água e vegetação densa com 21,4°C e 27,9°C respectivamente. Resultados similares foram encontrados no estudo desenvolvido por Ullah et al. (2023) onde a TST na classe de vegetação densa e na água era menor.

A Figura 2, permite observar o comportamento de mudanças de Temperatura de Superfície Terrestre entre o ano inicial e final de estudo.

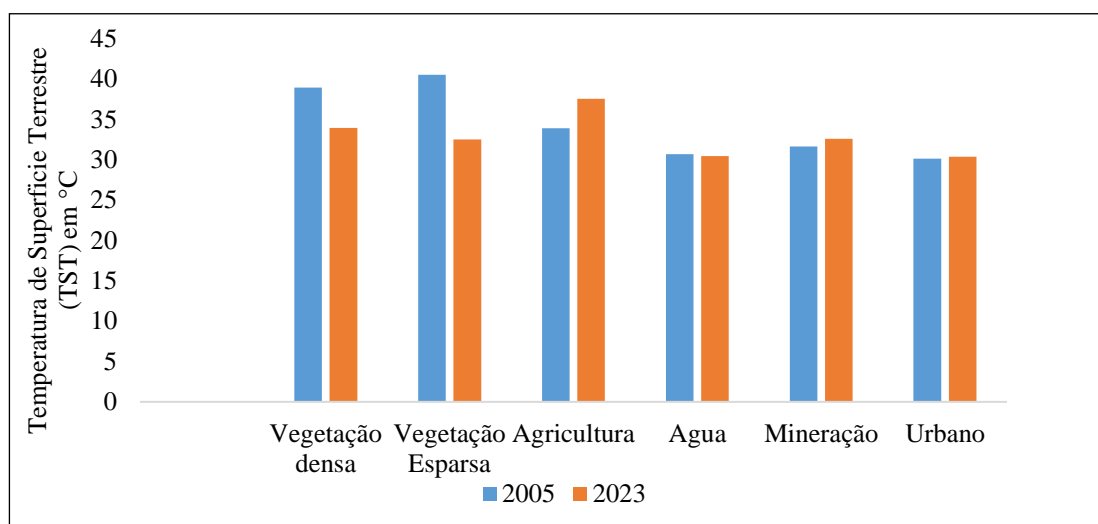


Figura 2: Média de TST para cada classe de uso e cobertura do solo de 2005 a 2023 na bacia do Revuboe, Moçambique, África.

Entre o ano inicial e final, a média de temperatura de superfície tende a diminuir nas classes de vegetação densa e vegetação esparsa. Nas classes de agricultura, mineração e urbano, a temperatura está aumentando. A classe de água mostrou uma tendência de estabilidade em todo período de estudo.

No estudo desenvolvido por Guha e Govil (2021) foi demonstrado que a TST possui uma relação positiva com áreas construídas e vazias, enquanto em áreas com a vegetação, relação é negativa. Outro estudo de Gohain et al. (2021) demonstrou aumento de TST devido à perda de vegetação e ganho de área construída. Portanto, mudanças no uso e cobertura do solo podem causar impactos profundos no comportamento climático da superfície terrestre, alterando a troca de calor, umidade, fluxos de gases e albedo (Bonan, 2008).

Portanto, a distribuição espacial da TST é influenciada pela variação dos elementos da estrutura da paisagem com maior destaque para as classes de mineração, vegetação esparsa e urbana. A rápida urbanização associada ao desflorestamento para dar lugar a

áreas de produção agrícola, intensificou a temperatura de superfície terrestre dentro da bacia. Olorunfemi et al. (2018) observam que extremos do LST em zonas construídas e de mineração exacerbam o efeito de ilha de calor urbana.

Testes estatísticos de normalidade de Shapiro-Wilk e de homogeneidade de variância de Levene, sugeriram a violação do pressuposto de normalidade e da homogeneidade de variância dos dados ($p < 0,001$) para todos os anos de análise, dando indicação de que as premissas da ANOVA não foram atendidas. A transformação dos dados pelo teste de Box-Cox também não atendeu as premissas, persistindo a violação dos pressupostos tendo, por conseguinte, aplicado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. Este teste obteve p-valor $< 0,05$ para todos os anos demonstrando existir diferenças estatísticas significativas entre as temperaturas em diferentes categorias de uso e cobertura do solo.

Para analisar a comparação entre grupos estudados, o teste post-hoc de Dunn demonstrou existir diferenças significativas entre as classes de uso e cobertura do solo. As diferenças são confirmadas pelo p valor < 0.05 .

Para o ano de 2005, as classes de vegetação densa e vegetação esparsa, vegetação esparsa e agricultura, vegetação esparsa e água, vegetação densa e urbano e vegetação esparsa e urbano demonstraram diferenças estatisticamente significativas com valores p ajustados e não ajustados < 0.05 no teste post-hoc de Dunn. Para as restantes comparações, o p valor não foi significativo e as diferenças foram muito pequenas para serem consideradas relevantes.

No ano de 2009, as diferenças entre classes vegetação densa e vegetação esparsa, vegetação densa e agricultura, e vegetação esparsa e agricultura foram significativas, sugerindo que essas classes são muito diferentes entre si. As classes vegetação esparsa e água, agricultura e água e água e urbano foram classificados como significativos. O restante das classes não foi significativo.

Posteriormente, o ano de 2015 as classes de vegetação densa e vegetação esparsa, vegetação densa e agricultura, e vegetação esparsa e agricultura mostraram diferenças estatisticamente significativas, sugerindo que valores dessas classes se diferenciam bastante. A interpretação dos resultados indica que, na maioria dos casos, a classe vegetação densa é significativamente diferente dos outros, e a classe vegetação esparsa também se diferencia da classe agricultura.

Para o ano de 2020, as comparações entre as classes vegetação densa e vegetação, esparsa vegetação densa e agricultura, vegetação esparsa e agricultura, vegetação densa e mineração, vegetação densa e urbano, e vegetação esparsa e urbano foram significativas,

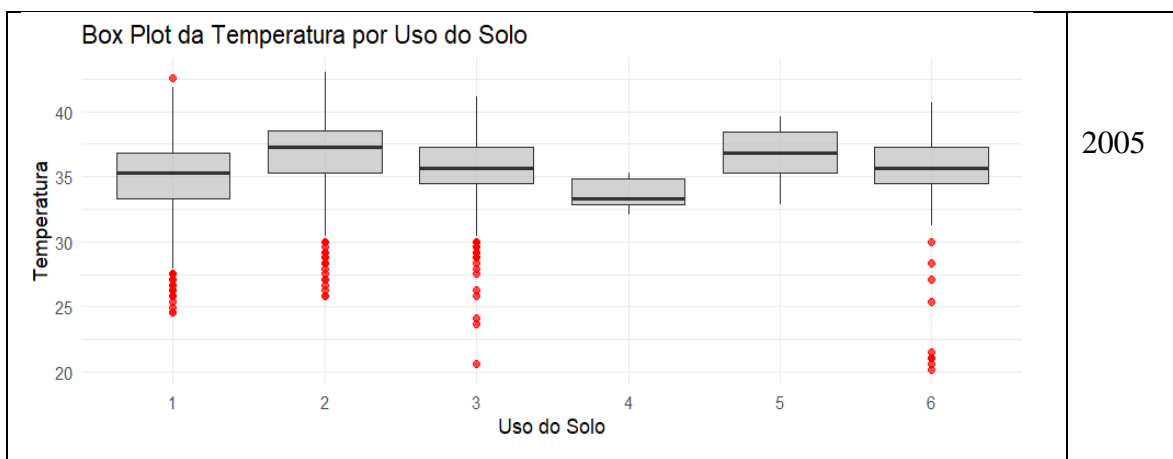
indicando que esses grupos diferem de forma consistente. A análise indica que a classe vegetação densa se distingue significativamente dos outros grupos, enquanto a classe vegetação esparsa também apresenta diferenças significativas em relação a outras classes.

Por fim, para o ano de 2023 as comparações entre os grupos vegetação densa e vegetação esparsa, vegetação densa e agricultura, vegetação esparsa e agricultura, vegetação densa e mineração, vegetação e urbano e agricultura e urbano mostram diferenças estatisticamente significativas. Isso indica que esses grupos diferem de forma consistente. As diferenças marginais podem ser investigadas mais a fundo, mas a maioria das comparações indica diferenças claras e significativas entre as classes analisados.

Para Mingoti e Gloria (2005), as diferenças estatisticamente significativas demonstram que valores observados nos grupos analisados são provavelmente reais e não são atribuídas ao acaso, ou seja, as evidências fornecidas pelos dados sugerem que as diferenças entre os grupos são suficientemente grandes para não serem explicadas apenas pela variabilidade natural que ocorre em qualquer amostra.

Na Figura 3 está representada o boxplot que descreve padrões de distribuição da temperatura em cada tipo de uso e cobertura do solo. A água se destaca por possuir valores mais estáveis de temperatura variando entre 24°C e 27°C. A mediana situa-se em torno de 25,5°C, enquanto a faixa interquartil (que abrange 50% dos dados) fica entre 25°C e 26°C. Nos primeiros três anos de análise, a mediana da TST da classe de água demonstrou ser inferior à mediana dos demais e, uma menor dispersão e baixo intervalo interquartil.

Os dois últimos anos de análise (2020 e 2023) a classe de água apresenta uma maior variabilidade, demonstrando uma ampla dispersão de valores de temperatura. No entanto, esta classe sempre registrou valores mais baixos de TST em todo período de estudo. Resultados semelhantes foram encontrados em trabalhos como de Diksha; Kumari, (2023) e Imran et al. (2021).



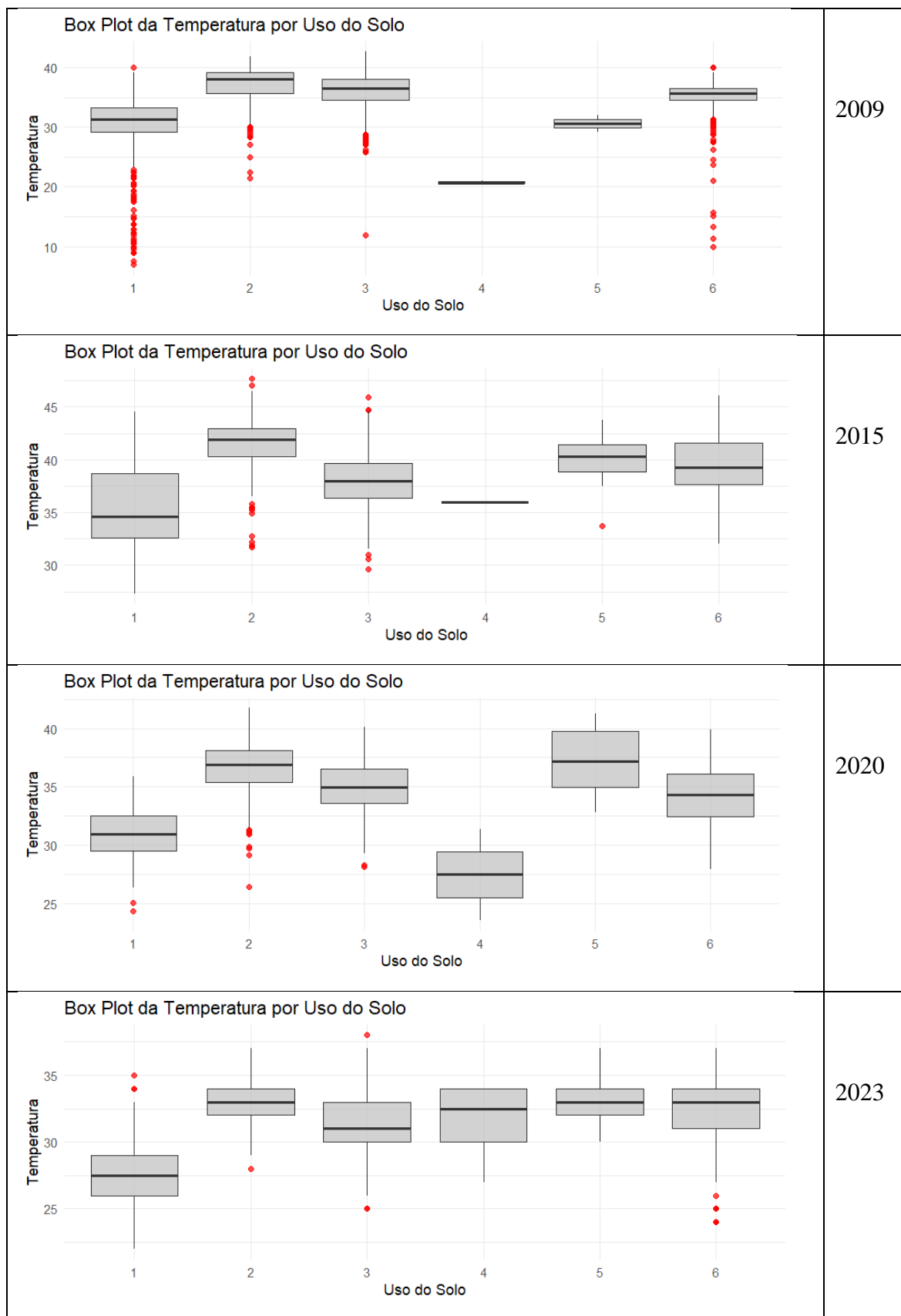


Figura 3: Boxplot de comparação entre Temperatura de superfície terrestre e Classes de uso e cobertura do solo.

As classes de vegetação apresentam um gradiente térmico crescente. A vegetação densa mostra uma mediana em torno de 27°C, com 50% dos valores concentrados entre 26°C e 28°C, e extremos que provavelmente não ultrapassam 30°C. Esta classe possui uma distribuição simétrica em quase todos os anos (excetuando o ano de 2015 que possui assimetria positiva) com bigodes de comprimento semelhante em todos os lados. Este modelo, demonstra segundo Carvalho et al. (2019) uma distribuição equilibrada em torno do valor central, ou seja, a frequência dos valores diminui de forma semelhante em ambos os lados da mediana. Já a vegetação esparsa apresenta um aumento significativo, com mediana próxima a 29°C e faixa interquartil entre 28°C e 30°C, refletindo como a redução da cobertura vegetal resulta em maior absorção de radiação solar e consequente aumento térmico.

Ao extremo mais quente encontram-se as áreas de mineração e urbanizadas. A mineração apresenta mediana em torno de 32°C, com 50% dos dados entre 31°C e 33°C, frequentemente atingindo máximas próximas a 35°C. Essa elevação térmica é típica de áreas com solo exposto, onde a remoção da vegetação e a alteração da superfície natural criam microclimas significativamente mais quentes. As áreas urbanas apresentam mediana em torno de 33°C e faixa interquartil entre 32°C e 34°C. Outro aspecto interessante de analisar nesta classe é a presença de outliers acima de 36°C, representando pontos de calor extremo associados a densas concentrações de construções, asfalto e pouca vegetação.

O ano de 2015 foi o que registrou o valor mais alto de temperatura sendo a classe de vegetação esparsa a mais quente quando comparado com o restante das classes de uso e cobertura do solo. A presença de corpos negros (jazidas de carvão mineral, principalmente na região sul da bacia) influencia na elevação de temperatura de superfície terrestre em áreas de vegetação esparsa. Liu (2016) e Xie, Wang e Fu, (2011) comprovaram que áreas de mineração como lixões e minas de carvão a céu aberto, têm maiores contribuições no aumento de temperatura e aquecimento local por absorverem facilmente o calor.

Os outliers superiores e inferiores demonstram que a amplitude térmica é elevada indicando que na bacia, são registrados valores extremos de temperatura (muito altos e muito baixos). Victor et al. (2023) verificaram no seu estudo realizado dentro da área da bacia, valores de temperatura máxima de 45°C e mínima de 5°C. A região norte da bacia que é predominantemente ocupada por relevo de montanhas e clima tropical modificado pela altitude, registra temperaturas muito baixas no inverno. Contrariamente, a região sul que é de clima tropical seco e abundância de jazidas carboníferas o que a confere temperaturas extremamente altas.

Ao comparar todas as classes, fica evidente um gradiente térmico que vai desde as temperaturas mais baixas e estáveis da água, passando pelas áreas vegetadas com moderado efeito regulador, até chegar às elevadas temperaturas nas áreas intensamente modificadas pelo homem – mineração e urbanização. Esse padrão não apenas confirma expectativas teóricas sobre o impacto do uso do solo no clima local, como também quantifica com clareza as diferenças térmicas entre cada tipo de cobertura terrestre.

4. Conclusão

Este estudo demonstrou que a temperatura da superfície terrestre (TST) varia significativamente em função dos diferentes tipos de uso e cobertura do solo, corroborando pesquisas anteriores que destacam a influência das características térmicas de cada classe na distribuição espacial da temperatura de superfície. As classes de mineração, vegetação esparsa e áreas urbanas apresentaram os valores mais elevados de TST, demonstrando o impacto da ação antrópica, especialmente da urbanização acelerada e da exploração mineral. Em contraste, áreas com vegetação densa e corpos de água mantiveram as temperaturas mais baixas, atuando como reguladores térmicos naturais.

As análises estatísticas confirmaram diferenças significativas entre as classes de uso e cobertura do solo ao longo dos anos, reforçando que as alterações no padrão de ocupação territorial influenciam diretamente a distribuição espacial da TST.

Os resultados reforçam que a substituição de áreas naturais por atividades humanas (urbanização, mineração e agricultura) intensifica o aquecimento superficial. Portanto, políticas de planejamento territorial que priorizem a conservação de vegetação densa e a gestão sustentável de áreas urbanas e mineradas são essenciais para mitigar impactos climáticos locais.

Referências Bibliográficas

AKOMOLAFE, G. F.; ROSAZLINA, R. Land use and land cover changes influence the land surface temperature and vegetation in Penang Island, Peninsular Malaysia. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25560-0>. Acesso em: 24 set. 2024

AZEEZ, A. H. A. Estimation of land surface temperature and distribution across land use/land cover in response to coal mining activity in V. D. Yelevisky coal mine area – Russia. Russian Journal of Earth Sciences, v. 22, ES2005, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.2205/2021ES000778>. Acesso em 24 set. 2024

BONAN, G. B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, v. 320, n. 5882, p. 1444–1449, 2008.

CARVALHO, M. J.; FERNANDES, J. A.; FREITAS, A. Construção e interpretação de diagramas de extremos e quartis por alunos portugueses do 9.º ano de escolaridade. *Bolema - Boletim de Educação Matemática*, v. 33, p. 1508–1532, 2019. Disponível: <https://doi.org/10.1590/1980-4415v33n65a25>. Acesso em 24 set. 2024

CHAI, B.; SETO, K. C. Conceptualizing and characterizing micro-urbanization: a new perspective applied to Africa. *Landscape and Urban Planning*, v. 190, p. 103595, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103595>. Acesso em 24 set. 2024

CHEN, Y. et al. Quantitatively analyzing the driving factors of vegetation change in China: Climate change and human activities. *Ecological Informatics*, v. 82, p. 102667, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1574954124002097>. Acesso em: 10 out. 2024.

CHIHANHE, A. C.; MANANZE, S. E.; MACHAVA, C. M. O agronegócio em Moçambique: um olhar sobre o passado, presente e perspectivas futuras. [S. l.], 2022.

CUNGUARA, B. et al. Análise situacional, constrangimentos e oportunidades para o crescimento agrário em Moçambique. [S. l.], 2013.

DEMARCHI, J. C.; PIROLI, E. L.; ZIMBACK, C. R. L. Análise temporal do uso do solo e comparação entre os índices de vegetação NDVI e SAVI no município de Santa Cruz do Rio Pardo – SP usando imagens Landsat-5. *Raega - O Espaço Geográfico em Análise*, v. 21, 2011. Disponível em: <http://revistas.ufpr.br/raega/article/view/17416>. Acesso em: 28 jun. 2024.

DIKSHA, M.; KUMARI, R. Spatiotemporal characterization of land surface temperature in relation landuse/cover: a spatial autocorrelation approach. *Journal of Landscape Ecology*, v. 16, p. 1–18, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.2478/jlecol-2023-0001>. Acesso em 24 set. 2024

DUARTE, G. F. P.; DUARTE, E. F. P. Moatize: urbanização e meio ambiente. *Geociências*, v. 43, n. 2, p. 211–222, 2024. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/1810>. Acesso em: 2 set. 2024.

FELDMAN, A. F. et al. Tropical surface temperature response to vegetation cover changes and the role of drylands. *Global Change Biology*, v. 29, p. 110–125, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.16455>. Acesso em: 14 jun. 2024

FERREIRA, I. et al. Landscape pattern changes over 25 years across a hotspot zone in southern Brazil. *Southern Forests: A Journal of Forest Science*, v. 81, n. 2, p. 175–184, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.2989/20702620.2018.1542563>. Acesso em 22 jun. 2024

GOGOI, V. et al. Land use and land cover change effect on surface temperature over Eastern India. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45213-z>. Acesso em: 18 jul. 2024

GOVE, S. A. S. Sustentabilidade da indústria extractiva em Moçambique: caso dos mega-projectos sob a bacia carbonífera de Moatize. *Brazilian Journal of Development*, v. 8, n. 1, p. 2866–2878, 2022. Disponível em: <https://brazilianjournals.com/ojs/index.php/BRJD/article/view/42574>. Acesso em: 22 jun. 2024.

GOHAIN, K.; MOHAMMAD, P.; GOSWAMI, A. Assessing the impact of land use land cover changes on land surface temperature over Pune city, India. *Quaternary International*, v. 575–576, p. 259–269, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.04.052>. Acesso em 24 set. 2024

GUHA, S.; GOVIL, H. Annual assessment on the relationship between land surface temperature and six remote sensing indices using Landsat data from 1988 to 2019. *Geocarto International*, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1886339>. Acesso em: 12 set. 2024

HOEGH-GULDBERG, O. et al. The human imperative of stabilizing global climate change at 1.5°C. *Science*, v. 365, n. 6459, p. eaaw6974, 2019. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aaw6974>. Acesso em: 2 set. 2024.

IMRAN, H. M. et al. Impact of land cover changes on land surface temperature and human thermal comfort in Dhaka City of Bangladesh. *Earth Systems and Environment*, v. 5, p. 667–693, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00243-4>. Acesso em: 24 set. 2024

IPCC. *Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/product/identifider/9781009157940/type/book>. Acesso em: 2 set. 2024.

KANDULNA, W. et al. Spatial variability of land surface temperature of a coal mining region using a geographically weighted regression model: a case study. *Land*, v. 14, n. 696, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/land14040696>. Acesso em: 24 set. 2024

LI, Z. et al. Satellite remote sensing of global land surface temperature: definition, methods, products, and applications. *Reviews of Geophysics*, v. 61, e2022RG000777, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2022RG000777>. Acesso em: 12 mai 2024

LIU, J. The research to the influential factors of the surface temperature in Antaibao Opencast Coal Mine. D. Thesis – China University of Geosciences, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph20043650>. Acesso em: 12 mai. 2024

MACARRINGUE, L. S.; BOLFE, É. L.; DUVERGER, S. G. et al. 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*, v. 12, n. 8, p. 342, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijgi12080342>. Acesso em: 12 mai. 2024

MOHD SAIRI, N. A.; BURHAN, B.; MOHD SAFIAN, E. E. Identifying the spatial patterns of housing distribution in Johor Bahru through spatial autocorrelation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 540, p. 012008, 2020.

Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/540/1/012008>. Acesso em: 12 mai. 2024

NIQUISSE, S.; CABRAL, P. Assessment of changes in ecosystem service monetary values in Mozambique. *Environmental Development*, v. 25, p. 12–22, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211464517301653>. Acesso em: 21 jun. 2024.

OLORUNFEMI, I. et al. GIS and remote sensing-based analysis of the impacts of land use/land cover change (LULCC) on the environmental sustainability of Ekiti State, Southwestern Nigeria. *Environmental Development and Sustainability*, v. 22, n. 2, p. 661–692, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0214-z>. Acesso em: 14 mai. 2025

O’SULLIVAN, D.; UNWIN, D. J. *Geographic information analysis*. New Jersey: John Wiley and Sons, 2010.

RIBEIRO, M. P. et al. Impacts of urban landscape pattern changes on land surface temperature in Southeast Brazil. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 33, p. 101142, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352938524000065>. Acesso em: 22 jul. 2024.

SOBRINO, J.; JIMENEZ, J.; PAOLINI, L. Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5. *Remote Sensing of Environment*, v. 90, p. 434–440, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>. Acesso em: 30 Jun. 2024

SUHARYANTO, S. Land surface temperature changes caused by land cover. [S. l.], 2023.

ULLAH, W. et al. Analysis of the relationship among land surface temperature (LST), land use land cover (LULC), and normalized difference vegetation index (NDVI) with topographic elements in the lower Himalayan region. *Heliyon*, v. 9, n. 2, p. e13322, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405844023005297>. Acesso em: 12 maio 2025.

USGS. *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook*. Version 5. USGS, 2019.

VICTOR, V. B. et al. Uso do sensoriamento remoto na estimativa da temperatura de superfície terrestre no município de Moatize, região centro de Moçambique. 2023. Disponível em: <https://proceedings.science/p/164729?lang=pt-br>. Acesso em: 17 jul. 2024.

XIE, M.; WANG, Y.; FU, M. An overview and perspective about causative factors of surface urban heat island effects. *Progress in Geography*, v. 30, n. 1, p. 35–41, 2011.

ZHENG, X. et al. A new thermal infrared channel configuration for accurate land surface temperature retrieval from satellite data. *Remote Sensing of Environment*, v. 231, p. 111216, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111216>. Acesso em 25 ago. 2024

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclusão geral

Este estudo constitui uma importante ferramenta para compreensão das transformações da paisagem na bacia do Revuboe. Os resultados fornecem aos gestores públicos, estratégias para identificar padrões de ocupação do território e implementar políticas direcionadas, com foco na preservação de zonas ecologicamente sensíveis.

Foi possível observar que ao longo de 17 anos de análise (2005-2023), a bacia do Rio Revuboe passou por transformações drásticas em sua cobertura do solo, com mudanças que refletem a crescente pressão antrópica na região.

A pesquisa atingiu os objetivos propostos nos três capítulos. O primeiro capítulo possibilitou a compreensão teórica da relação entre mudanças de uso e cobertura do solo e a temperatura de superfície terrestre. O segundo capítulo identificou e quantificou as transformações espaciais ocorridas na bacia do rio Revuboe entre 2005 e 2023, evidenciando a conversão de áreas de vegetação para agricultura e expansão urbana. O terceiro capítulo demonstrou a influência direta dessas mudanças sobre a temperatura de superfície terrestre, confirmando a hipótese de que áreas antropizadas registram maiores valores térmicos. Assim, todos os objetivos específicos e o objetivo geral da dissertação foram alcançados oferecendo uma visão integrada da dinâmica socioambiental e de seus reflexos no microclima da região.

Considerações finais

Esta pesquisa evidencia a necessidade de ações integradas voltadas ao planejamento territorial e à mitigação dos impactos ambientais. Com base nos resultados alcançados, torna-se necessário avançar para medidas que podem contribuir para a conservação dos recursos naturais.

Entre as principais medidas, destaca-se a implementação de um zoneamento ecológico-econômico (ZEE), que permita delimitar as áreas adequadas para urbanização, agricultura, mineração e preservação ambiental, com base na capacidade de suporte dos ecossistemas locais. A criação e ampliação de áreas de preservação permanente, bem como programas de reflorestamento com espécies nativas, são fundamentais para restaurar áreas degradadas, reduzir a temperatura da superfície e promover a conectividade ecológica.

A regulamentação da expansão urbana e da atividade minerária é outra medida essencial para conter os processos de degradação. A exigência de estudos de impacto ambiental, planos de compensação ambiental e o cumprimento da legislação vigente podem evitar a conversão acelerada de áreas vegetadas em superfícies impermeáveis.

Adicionalmente, políticas de incentivo à agricultura sustentável, como a promoção de sistemas agroecológicos e agroflorestais, podem contribuir para o uso equilibrado da terra, aliando produção e conservação. É também essencial investir em educação ambiental, tanto nas escolas quanto nas comunidades da bacia, de forma a promover a conscientização sobre os impactos do uso inadequado do solo e fortalecer o protagonismo comunitário na gestão ambiental. O mapeamento de áreas de risco térmico e a criação de áreas verdes urbanas são estratégias que podem ser aplicadas em núcleos urbanos da bacia, com vistas à mitigação das ilhas de calor e melhoria da qualidade ambiental.

Por fim, recomenda-se a formulação de um Plano de Gestão Integrada da Bacia do Rio Revuboe, que articule diferentes setores e níveis de governo, além de fomentar a produção científica por meio de parcerias com instituições de ensino e pesquisa. Essas ações, se implementadas de forma articulada e participativa, têm o potencial de equilibrar o desenvolvimento econômico com a conservação ambiental, contribuindo para a resiliência climática da região.

Sugere-se como perspectivas futuras, a replicação da metodologia com dados de alta resolução espacial e temporal e a integração de variáveis socioeconômicas para entender fatores locais que impulsionam mudanças de uso e cobertura do solo e sua relação com variação de temperatura de superfície.