



UNIVERSIDADE
E D U A R D O
MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS
Departamento de Matemática e Informática

Trabalho de Licenciatura em
Ciências de Informação Geográfica

**Avaliação Geo-espacial das Ilhas de Calor Urbanas Baseada em
Geoprocessamento e Imagens de Satélite**

Caso de Estudo: Cidade de Tete entre os anos de 2017 a 2024

Discente: Carmone Armando Massingue

Maputo, Maio 2025



UNIVERSIDADE
E D U A R D O
MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS
Departamento de Matemática e Informática

Trabalho de Licenciatura em
Ciências de Informação Geográfica

**Avaliação Geo-espacial das Ilhas de Calor Urbanas Baseada em
Geoprocessamento e Imagens de Satélite**

Caso de Estudo: Cidade de Tete entre os anos de 2017 a 2024

Discente: Carmone Armando Massingue

Docente: Mestre, Márcio Fernando Mathe, UEM

Maputo, Maio 2025

Dedicatória

Com todo o meu amor e gratidão, dedico este trabalho aos meus pais, Armando Abel Massingue e Marta Carmone Valoi Massingue, que sempre foram meu porto seguro e me inspiraram a seguir meus sonhos. Aos meus irmãos em Cristo, que me fortaleceram com suas orações e apoio, dedico também esta conquista.

Declaração de Honra

Eu, Carmone Armando Massingue declaro por minha honra que o presente Trabalho de Licenciatura é resultado da minha investigação e que o processo foi concebido para ser submetido apenas para a obtenção do grau de Licenciado em Ciências de Informação Geográfica, na faculdade Ciências da Universidade Eduardo Mondlane.

Maputo, 13 de Maio de 2025

(Carmone Armando Massingue)

Agradecimentos

Em primeiro lugar, elevo minha alma em profundo reconhecimento ao Criador pela vida, saúde e proteção, expresso a minha sincera apreciação ao meu supervisor, Mestre Márcio Fernando Mathe, pela sua sabedoria e dedicação, e aos docentes do curso de Ciências de Informação Geográfica, em especial ao docente Mário Chelengo.

Aos meus queridos colegas de residência Tangará: Domingos Nduna, Charles Valoi e Dióclecio Mathe, agradeço a camaradagem e o apoio mútuo, e ao Elves Macamo pelos valiosos conselhos.

Os meus sinceros agradecimentos aos amigos Edson Cau e Carmen Mondjane, que me acolheram, e à estimada Edvania Nhamuhuco, pelo constante incentivo.

Aos meus colegas de percurso académico: Érico Mathe, Celso Mandjate e Atália Fiosse, agradeço a amizade e o apoio recíproco, recordando com saudade do Isaías.

Expresso o meu reconhecimento ao Diretor da Faculdade de Ciências, Doutor Daúde Jamal, e à Diretora de Graduação, Doutora Célia, pelo incentivo e suporte, e aos dedicados colaboradores da Faculdade, em especial à Doutora Mónica e à secretaria.

Aos meus amados pais, Armando e Marta Massingue, e aos meus irmãos Abel, Wilma e Amélia, agradeço o amor incondicional e o apoio constante.

Aos estudantes da Faculdade de Ciências, a minha eterna gratidão pela confiança depositada em mim como presidente do Núcleo de Estudantes.

Por fim, agradeço a todos os que, direta ou indiretamente, contribuíram para este trabalho.

Resumo

Esta monografia investigou a influência da distribuição espacial da cobertura vegetal na formação e intensificação de Ilhas de Calor Urbanas (ICU) na cidade de Tete, entre os anos de 2017 a 2024. Através da análise de dados de Temperatura da Superfície Terrestre (TST) diurnos e noturnos, obtidos por imagens do satélite Sentinel-3, e da avaliação da cobertura vegetal utilizando o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) do Sentinel-2. Os resultados demonstraram consistentemente temperaturas de superfície mais elevadas no centro urbano de Tete em comparação com a área vegetada. Durante o dia, foram observadas áreas no centro urbano com TST superiores a 50°C, fortemente associadas à predominância de superfícies impermeáveis como asfalto e betão, que apresentam alta absorção de radiação solar e baixa evapotranspiração. As temperaturas noturnas no centro urbano também se mantiveram elevadas, em alguns casos acima de 30°C, refletindo a lenta libertação do calor armazenado e a contribuição de fontes de calor antropogénicas.

A análise da cobertura vegetal confirmou a maior densidade de vegetação na área de referência, com valores de NDVI e SAVI significativamente mais altos em comparação com o centro urbano. A comparação direta das temperaturas de superfície entre as duas áreas revelou a existência de uma Ilha de Calor Urbano (ICU) de superfície em Tete, com variações na sua intensidade e magnitude ao longo dos anos e entre os períodos diurno e noturno. A magnitude da ICU diurna oscilou entre fraca e média intensidade, enquanto a noturna apresentou, em geral, menor intensidade, com alguns anos registrando valores próximos de zero ou até negativos, possivelmente influenciados pela cobertura de nuvens. A aplicação do teste não paramétrico de Mann-Kendall para identificar tendências na intensidade da ICU diurna e noturna ao longo do período analisado não revelou tendências estatisticamente significativas ao nível de 0.05. Contudo, a análise sugere uma ligeira tendência de diminuição na intensidade da ICU diurna e um ligeiro aumento na intensidade da ICU noturna, indicando uma dinâmica complexa na evolução térmica da cidade. As limitações do estudo, como a resolução espacial dos dados do Sentinel-3 e a influência da cobertura de nuvens em algumas medições, foram consideradas na interpretação dos resultados.

Palavras-chave: Ilha de Calor Urbana, Cobertura Vegetal, Temperatura da Superfície Terrestre.

Abreviaturas

ESA	Agência Espacial Europeia
ICUs	Ilhas de Calor Urbanas
INAM	Instituto Nacional de Meteorologia de Moçambique
IV	Índice de vegetação
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
SAVI	Índice de Vegetação Ajustado ao Solo
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SLSTR	Radiômetro de Temperatura da Superfície do Mar e da Terra
SNAP	Plataforma de Aplicações Sentinel
TST	Temperatura da Superfície Terrestre
VNIR	Visível e Infravermelho Próximo
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

Índice

Dedicatória.....	i
Declaração de Honra.....	ii
Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	iv
Abreviaturas.....	v
Lista de Figuras.....	viii
Lista de Tabelas.....	viii
1.INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contextualização.....	1
1.2 Definição do problema.....	2
1.3 Justificativa.....	2
1.4 Relevância do Estudo.....	3
1.5 Objectivos.....	4
1.5.1 Objectivo Geral.....	4
1.5.2 Objectivos Específicos.....	4
2.ÁREA DE ESTUDO.....	5
2.1 Localização geográfica da cidade de Tete.....	5
2.1.1. Caracterização da área de estudo.....	5
2.2 Clima.....	6
2.3 Demografia.....	6
2.4 Vegetação.....	6
2.5 Áreas selecionadas para análise das Ilhas de calor Urbanas (ICUs) na cidade de Tete.....	6
3.REVISÃO DE LITERATURA.....	8
3.1. Ilhas de Calor Urbanas.....	8
3.2. Causas e mecanismos de formação.....	9
3.3. Consequências ambientais e sociais.....	10
3.4. Tendências globais e regionais.....	11
3.5. Teledeteção e Deteção remota.....	11
3.6. Sistemas de Informação Geográfica.....	12
3.7. Índices de Vegetação.....	13

3.7.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).....	13
3.7.2 Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)	14
3.8. Temperatura da Superfície Terrestre	14
4.MATERIAL E METODOLOGIA.....	16
4.1. Material	16
4.2. Programas Computacionais	17
4.3. Métodos	18
4.3.1. Imagens Sentinel-3.....	18
4.4.2. Imagens Sentinel-2.....	19
4.4.3. NDVI e SAVI.....	19
4.4. O Teste de Mann-Kendal.....	20
5.RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
5.1. Comportamento da Temperatura da Superfície Terrestre	24
5.2. Comportamento da Cobertura Vegetal.....	27
5.3. Análise das Ilhas de Calor Urbanas entre Área Vegetada e Centro Urbano de Tete	30
5.4. Análise Comparativa da Dinâmica Térmica Superficial	40
5.5. Intensidade e Magnitude das Ilhas de Calor Urbano	43
5.6. Análise Mann-Kendall para ICU no período diurno e noturno.....	45
6.CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	48
6.1. Conclusão	48
6.2. Recomendações	50
7. Referências.....	51
Anexos	61
Anexo 1: Representação gráfica da Temperatura da Superfície Terrestre diária.....	61
Anexo 2: Temperatura da superfície Terrestre noturna do sentinel-3	61
Anexo 3: Representação gráfica dos valores de NDVI.....	62
Anexo 4: Representação gráfica dos valores de SAVI	62
Anexo 5: Tabela da distribuição normal padrão Z (0, 1).....	63
Anexo 6: Estatísticas das imagens NDVI da cidade de Tete.....	63

Anexo 7: Estatísticas das imagens SAVI da cidade de Tete.	64
Anexo 8: Temperatura máxima, mínima e média diária do centro urbano.	64
Anexo 9: Temperatura máxima, mínima e média diária da área vegetada.	64
Anexo 10: Temperatura máxima, mínima e média noturna do centro urbano.	65
Anexo 11: Temperatura máxima, mínima e média noturna da área vegetada.	65

Lista de Figuras

Figura 1. Mapa da localização da área de estudo.	5
Figura 2- Localização das áreas selecionada para análise das ilhas de calor urbana (ICUs) na cidade de Tete.	7
Figura 3. Representação das ilhas de calor (Fonte: Oke, 1975).	9
Figura 4: Fluxograma Metodológico.	23
Figura 5. Temperatura de Superfície Terrestre diária do sentinel-3.	25
Figura 6. Temperatura de Superfície Terrestre noturna do Sentinel-3.	26
Figura 7. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada do Sentinel-2.	28
Figura 8. Índice de Vegetação Ajustado ao Solo do Sentinel-2.	29
Figura 9. Mapeamento da TST diurna, NDVI e SAVI, da área vegetada.	32
Figura 10. Mapeamento da TST diurna, NDVI e SAVI, da área vegetada.	33
Figura 11. Mapeamento da TST diurna, NDVI e SAVI, do centro urbano.	34
Figura 12. Mapeamento da TST diurna, NDVI e SAVI, do centro urbano.	35
Figura 13. Mapeamento da TST noturna, NDVI e SAVI, da área vegetada.	36
Figura 14. Mapeamento da TST noturna, NDVI e SAVI, da área vegetada.	37
Figura 15. Mapeamento da TST noturna, NDVI e SAVI, do centro urbana.	38
Figura 16. Mapeamento da TST noturna, NDVI e SAVI, do centro urbano.	39
Figura 17. Comparação da TST diária e do NDVI do centro urbano e área vegetada.	41
Figura 18. Comparação da TST diária e do SAVI do centro urbano e área vegetada.	42
Figura 19. Comparação da TST noturna e do NDVI do centro urbano e área vegetada.	42
Figura 20. Comparação da TST noturna e do SAVI do centro urbano e área vegetada.	43
Figura 21. Tendência da ICU diária.	45
Figura 22. Tendência da ICU noturna entre a área vegetada e o centro urbano.	46

Lista de Tabelas

Tabela 1. Características das imagens para temperatura da superfície terrestre com base no Sentinel-3.	16
Tabela 2. Caraterísticas das imagens para índices de vegetação com base no Sentinel-2.	17
Tabela 3. descrição dos programas computacionais usados e sua finalidade.....	17
Tabela 4.Resultados das ilhas de calor Urbano de Superfície (ICU).	44
Tabela 5. Magnitudes e intensidades da ilha de calor	44

INTRODUÇÃO

Este capítulo visa apresentar ao leitor o contexto da pesquisa, o problema de investigação, a justificativa, a relevância e os objectivos da pesquisa.

1.1 Contextualização

A relação intrínseca entre a humanidade e o meio-ambiente, outrora caracterizada por um equilíbrio delicado, sofreu uma metamorfose drástica com a eclosão da Revolução Industrial no final do século XVIII. Este marco histórico, originado no Reino Unido, desencadeou uma era de urbanização desenfreada e exploração intensiva de recursos naturais, rompendo a harmonia entre cidades e ecossistemas (Pott e Estrela, 2017). O século XIX testemunhou um crescimento urbano exponencial, impulsionado pela industrialização e pela migração em massa para os centros urbanos, resultando em alterações profundas nos microclimas e na qualidade ambiental das cidades (Gartland, 2010).

Um dos fenómenos mais emblemáticos desse desequilíbrio é a formação de Ilhas de Calor Urbano (ICU), caracterizada por temperaturas significativamente mais elevadas nas áreas urbanas em comparação com as zonas rurais adjacentes (Fialho, 2012). Este fenómeno complexo é o resultado de uma interação de fatores, incluindo a remoção da vegetação e a substituição de superfícies naturais por materiais impermeáveis, como asfalto e betão, que absorvem e retêm calor (Allegrini e Carmeliet, 2018). Além disso, a emissão de calor gerada por actividades antropogénicas, como o transporte e a indústria, e a diminuição da circulação do vento devido à densidade de edifícios, contribuem para o agravamento das condições térmicas urbanas (Gartland, 2011; Sultana e Satyanarayana, 2020).

As Ilhas de Calor Urbano (ICU) podem ser analisadas sob duas perspetivas distintas: a temperatura superficial, diretamente influenciada pela perda de áreas vegetadas e o aumento de superfícies de alta absorção térmica (Oke et al., 2017), e a temperatura atmosférica, que pode apresentar um diferencial de até 4 °C ou mais entre áreas urbanas e rurais, especialmente durante a noite (Barbosa e Amorim, 2021). O aumento das temperaturas urbanas não só modifica o microclima, como também tem impactos adversos na qualidade do ar, na saúde humana e no conforto térmico, afetando desproporcionadamente as comunidades mais vulneráveis, frequentemente localizadas em áreas de infraestruturas precárias e maior exposição a desastres naturais (Monteiro, 1976).

As mudanças no uso e cobertura do solo, impulsionadas pela urbanização, são determinantes na formação das ICUs. A conversão de áreas vegetadas em superfícies impermeáveis intensifica o efeito de

ilha de calor, criando condições climáticas extremas nas cidades (Gartland, 2010). Este fenómeno é exacerbado pelas alterações climáticas globais e pela poluição atmosférica, exigindo ações urgentes por parte das autoridades urbanas.

Ferramentas de monitorização avançadas, como a Detecção Remota (DR) e os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), oferecem um potencial significativo para a análise de microclimas urbanos e a identificação de padrões térmicos (Trindade et al., 2017). No entanto, a eficácia dessas tecnologias depende da qualidade dos dados e da superação de limitações metodológicas, como a resolução espacial e temporal dos sensores (Zhou et al., 2018).

A aplicação dos dados precisos e que considerem as especificidades de cada cidade, é fundamental para a construção de ambientes urbanos resilientes, equitativos e saudáveis para todos

1.2 Definição do problema

A intensificação das Ilhas de Calor Urbano (ICU) representa um dos desafios ambientais mais significativos das cidades contemporâneas, manifestando-se através da elevação das temperaturas em zonas urbanas e na deterioração da qualidade ambiental (Gulambondo, 2025). Na cidade de Tete, este fenómeno tem sido agravado pelo crescimento populacional acelerado, pela expansão das indústrias mineiras e pelo processo de urbanização desenfreado, resultando na redução significativa da cobertura vegetal e no aumento da absorção térmica por superfícies impermeáveis (Marghidan, 2023).

A substituição de áreas vegetadas por materiais de elevada capacidade de retenção térmica, combinada com as emissões antropogénicas provenientes das actividades industriais e da concentração populacional, tem contribuído para um desequilíbrio térmico acentuado na região (Chigoma, 2004). Estes fatores não só intensificam o desconforto térmico da população, como também agravam os impactos na saúde pública, aumentando a exposição a doenças relacionadas ao calor e comprometendo o bem-estar das comunidades mais vulneráveis (Fialho, 2012).

Diante desse contexto, surge a seguinte pergunta central: **Como a distribuição espacial da vegetação influencia a formação e a intensificação das Ilhas de Calor Urbanas na cidade de Tete?**

1.3 Justificativa

A justificativa para este estudo fundamenta-se na escassez de pesquisas que utilizam dados do satélite para analisar as Ilhas de Calor Urbano (ICU) em Moçambique, considerando tanto o período diurno quanto o noturno. Apesar da relevância dos sensores térmicos orbitais na análise das variações climáticas urbanas (Trindade et al., 2017). A sua aplicação em território moçambicano ainda é limitada.

O sensor SLSTR do Sentinel-3 apresenta capacidade aprimorada para a medição de temperatura da superfície terrestre em diferentes horários, possibilitando a análise da variação térmica das cidades ao

longo do dia e da noite. No entanto, pesquisas que exploram essa potencialidade no contexto moçambicano ainda são escassas, dificultando um entendimento aprofundado das dinâmicas térmicas urbanas. O efeito das ICU não se manifesta apenas durante o dia, quando a radiação solar é intensa, mas também durante a noite, devido ao acúmulo de calor por superfícies urbanas, tornando essencial uma abordagem temporal abrangente (Santamouris, 2015).

1.4 Relevância do Estudo

Este estudo contribui para a escassa literatura científica focada na dinâmica das Ilhas de Calor Urbano (ICU) em cidades de países em desenvolvimento, particularmente no contexto africano e moçambicano. A análise detalhada das ICU na cidade de Tete, oferece um estudo de caso valioso para a compreensão dos fatores que influenciam a formação e intensificação das ICU em regiões tropicais e subtropicais.

A mitigação das ICU pode melhorar a qualidade de vida da população, reduzindo o desconforto térmico e os impactos na saúde pública, especialmente em comunidades vulneráveis. No domínio económico, a diminuição das ilhas de calor pode reduzir o consumo energético, incentivar práticas de construção sustentáveis e fomentar investimentos em infraestruturas verdes.

No campo tecnológico, destaca o potencial da Detecção Remota e o Geo-processamento no planeamento urbano sustentável, permitindo a criação de modelos preditivos para tomada de decisões estratégicas. Com isso, o estudo fornece informações essenciais para o desenvolvimento de cidades mais resilientes e ambientalmente equilibradas.

Este estudo está alinhado com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, particularmente o ODS 11 (Cidades e comunidades sustentáveis) e o ODS 13 (Ação contra as mudanças climáticas) (ONU, 2024).

1.5 Objectivos

1.5.1 Objectivo Geral

Analisar a influência da distribuição espacial da cobertura vegetal na dinâmica das ilhas de calor urbanas na cidade de Tete, recorrendo a técnicas de Geoprocessamento.

1.5.2 Objectivos Específicos

- Avaliar a distribuição espacial da Temperatura da Superfície Terrestre com base na variação da cobertura vegetal;
- Quantificar a intensidade das ilhas de calor urbanas avaliando a sua magnitude;
- Avaliar estatisticamente a existência de tendências na intensidade das Ilhas de calor urbanas.;

ÁREA DE ESTUDO

2.1 Localização geográfica da cidade de Tete

Neste capítulo estão descritas as condições gerais da área de estudo, tais como: Localização, Clima, Demografia e Vegetação.

2.1.1. Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado na Cidade de Tete, na Província de Tete, em Moçambique, que se localiza nas margens do vale do Rio Zambeze, a mais de 200 km da costa moçambicana do Índico. Com as suas coordenadas geográficas no Extremo Noroeste, Latitude $16^{\circ}05'30''$ S e Longitude $33^{\circ}20'00''$ E, e o extremo Sudeste Latitude $16^{\circ}15'00''$ S e Longitude $33^{\circ}35'00''$ E, num planalto situado a 500 metros de altitude nas margens do rio Zambeze. A cidade de Tete tem como limites naturais os rios Révubue e Mepumo a Leste, e o rio Kwiro a Sudoeste. A cidade ocupa uma superfície de 286 km^2 .

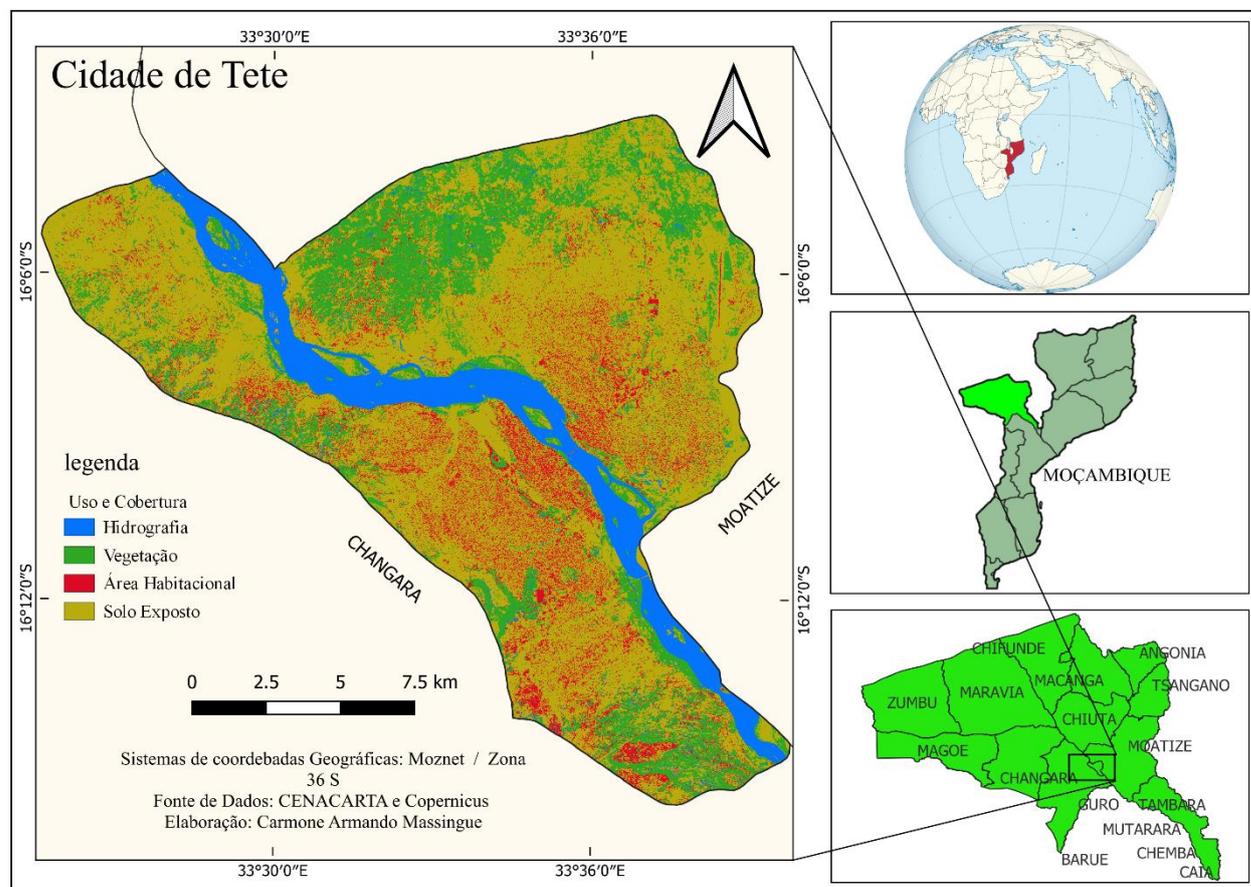


Figura 1. Mapa da localização da área de estudo.

2.2 Clima

No âmbito regional, a cidade de Tete está inserida em uma zona de influência dos fluxos sazonais da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Esse fenômeno ocasiona alternância climática, com um período caracterizado por temperaturas amenas e condições áridas, predominante entre Maio e Setembro, enquanto a fase quente e húmida se manifesta de Novembro a Abril (Govate, 2024). Entre Abril e Novembro, observa-se uma etapa de transição entre os períodos seco e chuvoso. A região apresenta duas estações climáticas bem definidas: uma estação seca prolongada, que pode atingir até oito meses, e uma estação chuvosa, com duração aproximada de quatro meses. O clima predominante na área é classificado como tropical seco. De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia de Moçambique (INAM), a temperatura média anual é de 26,5 °C, com variações significativas durante o período seco, as temperaturas podem alcançar até 40 °C durante o dia e 25 °C à noite. A cidade de Tete é reconhecida como a mais quente do país.

2.3 Demografia

A estrutura urbana de Tete é composta por nove bairros denominados: Josina Machel, Mateus Sansão Mutemba, Francisco Manyanga, Matundo, M'páduè, Filipe Samuel Magaia, Chingodzi, Déguè e Samora Moisés Machel. Segundo o censo populacional realizado em 2017 pelo Instituto Nacional de Estatística (INE), a área em análise apresenta uma população de aproximadamente 305.722 habitantes, com maior concentração populacional nos bairros periféricos. A taxa de crescimento populacional anual é estimada em 4,6%, projetando-se uma população de cerca de 469.045 habitantes no ano de 2020.

2.4 Vegetação

De acordo com Govate (2024), a vegetação predominante na área de estudo é classificada como savana aberta, adaptada às condições climáticas tropicais secas e geralmente encontrada em zonas montanhosas, conforme a classificação climática de Köppen. Em determinadas áreas, verifica-se a presença de cobertura vegetal mais densa. Nas regiões onde a precipitação média atinge 700 mm, predominam espécies vegetais características, como acácia, adansônia, combretum, sclerocarya e kirkia, conforme descrito por Dos Muchangos (1999).

2.5 Áreas selecionadas para análise das Ilhas de calor Urbanas (ICUs) na cidade de Tete.

As áreas selecionadas para o estudo estão situadas na cidade de Tete, na província de Tete, Moçambique. A figura 2 ilustra de forma detalhada a posição geográfica das duas áreas de investigação dentro do perímetro da cidade, permitindo uma melhor compreensão do contexto espacial envolvido na pesquisa. A delimitação das áreas no mapa foi realizada considerando características específicas relacionadas aos objetivos do estudo, garantindo maior precisão na análise dos dados coletados e no alcance dos resultados

esperados. Área de amostra **A** corresponde à (área vegetada) da cidade, enquanto a área de amostra **B** ao (centro urbano) de Tete, proporcionando contrastes relevantes para a análise.

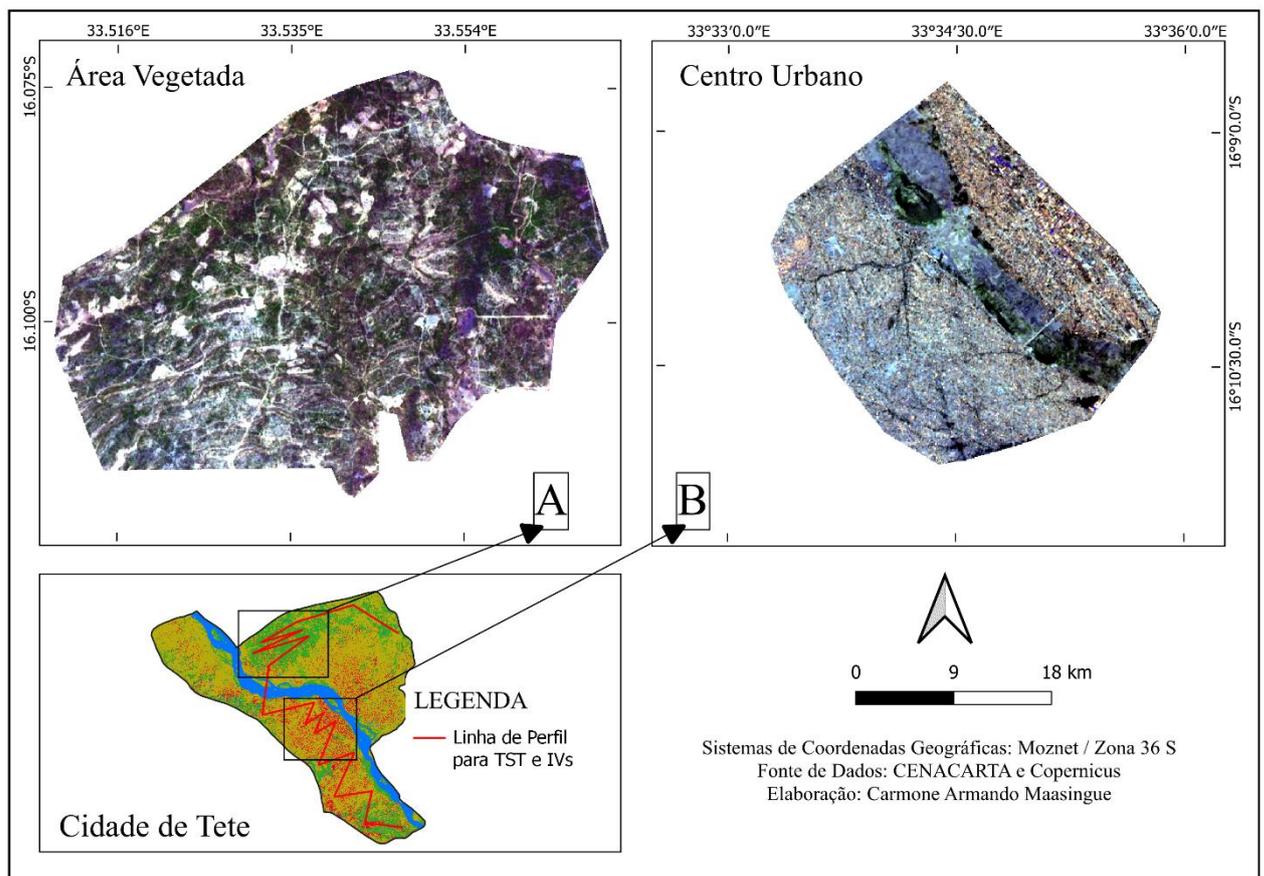


Figura 2- Localização das áreas selecionada para análise das ilhas de calor urbana (ICUs) na cidade de Tete.

3.1. Ilhas de Calor Urbanas

O conceito de Ilhas de Calor Urbanas (ICUs) se refere ao fenómeno pelo qual as áreas urbanas apresentam temperaturas significativamente mais elevadas do que as áreas rurais circundantes (Fialho, 2012). A definição clássica, frequentemente utilizada, descreve as ICUs como um gradiente térmico entre o centro urbano e as áreas suburbanas menos urbanizadas (Tibana et al., 2014). No entanto, a literatura demonstra uma certa vulnerabilidade conceitual, pois não há um consenso claro sobre a diferença de temperatura do ar e a temperatura da superfície e é necessária para atestar a existência do fenómeno (Fialho, 2012). Essa falta de clareza metodológica se reflete na diversidade de abordagens utilizadas para identificar e quantificar as ICUs (Zheng, 2024). A dificuldade em estabelecer uma definição universal é exacerbada pela complexidade do fenómeno, que envolve interações entre diversos factores físicos, antropogénicos e meteorológicos (Garuma, 2022).

É crucial distinguir entre diferentes tipos de ICUs para uma análise mais precisa. A literatura identifica, por exemplo, as ICUs superficiais, que se referem à temperatura da superfície terrestre, e as ICUs de dossel, que se concentram na temperatura do ar próximo ao nível do dossel urbano (Du et al., 2023). A temperatura da superfície, medida por Deteção remota, utilizando frequentemente o infravermelho termal, representa um indicador importante do efeito da ICU, mas não deve ser confundida com a temperatura do ar, a qual é a variável mais directamente relacionada ao conforto térmico e à saúde humana (Fialho, 2012). A escolha entre essas duas medidas depende do objectivo do estudo e dos dados disponíveis (Lathiifunnisa et al., 2024). A complexidade do sistema urbano e a influência de factores como a geometria urbana, a cobertura vegetal, a qualidade dos materiais de construção e as fontes antropogénicas de calor exigem uma abordagem multidisciplinar para uma compreensão completa do fenómeno (Siqueira-Gay et al., 2017).

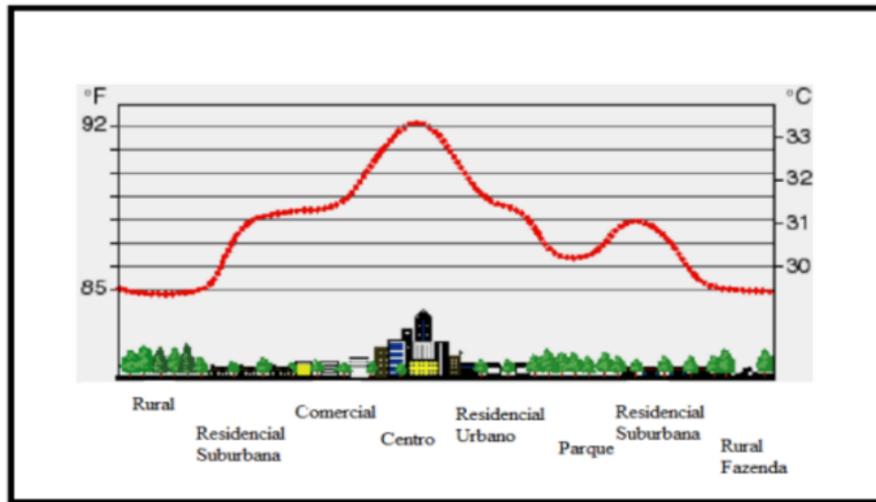


Figura 3. Representação das ilhas de calor (Fonte: Oke, 1975).

3.2. Causas e mecanismos de formação

A formação das ICUs resulta da complexa interação entre processos físicos, fontes antropogénicas de calor e factores meteorológicos. Os processos físicos desempenham um papel fundamental, sendo a absorção de radiação solar por superfícies urbanas de alta capacidade de absorção (asfalto, concreto) um dos mecanismos mais importantes (Golden, 2006).

Esses materiais, comparativamente à vegetação, possuem baixa albedo (Figura 3), reflectindo menos radiação solar e absorvendo uma maior proporção da energia incidente, contribuindo para o aquecimento da superfície (Golden, 2006). A redução da evapotranspiração em áreas urbanizadas, devido à diminuição da cobertura vegetal e ao aumento de superfícies impermeáveis, também contribui significativamente para o aquecimento, pois a evapotranspiração promove um resfriamento evaporativo (Wilby, 2011). A capacidade térmica dos materiais de construção, que influenciam na capacidade de armazenamento de calor durante o dia e na liberação lenta desse calor à noite, também desempenha um papel crucial na intensificação do efeito das ICUs (Golden, 2006). A geometria urbana, com seus edifícios altos e densos, afecta a radiação de onda longa, aprisionando o calor no interior do espaço urbano e reduzindo a dissipação do calor para a atmosfera (Wilby, 2011).

Além dos processos físicos, as fontes antropogénicas de calor desempenham um papel significativo na formação das ICUs. Actividades humanas como a indústria, o transporte e o uso de ar condicionado liberam grandes quantidades de calor no ambiente urbano. O calor residual gerado por edifícios e infraestrutura também contribui para o aquecimento, sendo a densidade populacional e o consumo de energia factores determinantes na magnitude desse calor residual (Sajjad, 2020). A comparação entre os efeitos de diferentes fontes de calor revela que a contribuição relativa de cada fonte varia conforme as características da cidade e com a época do ano.

Os factores meteorológicos também influenciam a formação e a intensidade das ICUs. A velocidade do vento afeta directamente a dispersão do calor urbano, sendo que em condições de baixa velocidade do vento, o calor fica mais concentrado no espaço urbano, intensificando os efeitos das ICUs (Parker, 2005), (Wen et al., 2023). A cobertura de nuvens influencia a quantidade de radiação solar que atinge a superfície, e em dias nublados, a intensidade da ICU tende a ser menor (Brenig et al., 2008). A humidade relativa do ar afeta a evapotranspiração, e em condições de baixa humidade, o efeito de resfriamento evaporativo é reduzido, contribuindo para o aumento da temperatura (Fialho, 2012). A interação complexa entre esses factores meteorológicos e as características físicas e antropogénicas do ambiente urbano torna a modelagem do fenómeno um desafio significativo (Wen et al., 2023).

3.3. Consequências ambientais e sociais

As ICUs geram uma série de consequências ambientais e sociais negativas, afetando a qualidade de vida nas cidades e exigindo ações de mitigação. O aumento da temperatura do ar e da superfície, consequência directa das ICUs, impacta directamente o conforto térmico e a saúde humana (Fialho, 2012). As alterações nos padrões de circulação atmosférica, com a formação de ilhas de calor e a diminuição da ventilação, agravam os problemas de poluição do ar, prejudicando a qualidade do ar e a saúde da população (Siqueira-Gay et al., 2017). A redução da biodiversidade, devido à alteração das condições ambientais, é outra consequência preocupante (Sajjad, 2020). Os impactos na qualidade da água, através do aumento da temperatura da água e da poluição térmica, afectam os ecossistemas aquáticos urbanos. As mudanças nos ecossistemas urbanos, com a perda de habitats e a alteração da dinâmica das espécies, comprometem a biodiversidade e os serviços ecossistémicos (Donaghy, 2008). Além disso, estudos indicam que as ICUs podem influenciar na formação de chuvas, aumentando a intensidade das precipitações em algumas áreas e diminuindo-a em outras (Gaohon, 2013). A influência das ICUs na vegetação urbana é significativa, com a temperatura mais elevada afetando o crescimento, a saúde e a biodiversidade das plantas (Buckeridge, 2015).

Relativamente aos impactos na saúde humana, as ICUs contribuem para o aumento da mortalidade relacionada ao calor, particularmente em grupos populacionais vulneráveis (Lo et al., 2020). O aumento da temperatura agrava doenças respiratórias e cardiovasculares, afectando o bem-estar e a produtividade da população (Sajjad, 2020). As desigualdades sociais na exposição ao calor são evidentes, com populações de baixa renda, frequentemente residentes em áreas mais urbanizadas e com menos recursos para mitigar o calor, sendo mais vulneráveis aos efeitos negativos das ICUs.

Os impactos socioeconómicos das ICUs são significativos, acarretando aumento do consumo de energia para refrigeração, elevando os custos de energia e as emissões de gases de efeito estufa (Tibana, 2014). Os custos com saúde pública, decorrentes do aumento de doenças e mortalidade relacionadas ao calor,

representam uma carga financeira considerável. A redução da qualidade de vida, causada pelo desconforto térmico e pelos problemas ambientais associados às ICUs, afeta a produtividade económica e o desenvolvimento social das cidades (Sajjad, 2020). As implicações para o planeamento urbano são significativas, pois as ICUs exigem abordagens inovadoras para o desenvolvimento de cidades mais sustentáveis e resilientes (Siqueira-Gay et al., 2017).

3.4. Tendências globais e regionais

As tendências globais em relação às ICUs indicam um aumento da intensidade e frequência do fenómeno em todo o mundo (Chen et al., 2021). As mudanças climáticas, com o aumento da temperatura média global, contribuem para a intensificação das ICUs, tornando as áreas urbanas ainda mais quentes (Fard, 2020). Entretanto, a magnitude das ICUs varia consideravelmente entre diferentes regiões do planeta, influenciada por fatores como o clima regional, a densidade populacional, o padrão de urbanização e a disponibilidade de recursos hídricos (Du et al., 2023). Estudos comparativos entre tendências de ICUs de superfície e de dossel revelam diferenças significativas, com a temperatura da superfície frequentemente apresentando maiores aumentos do que a temperatura do ar (Huang, 2020). Análises sobre a influência da vegetação nas tendências de ICUs mostram a importância da cobertura vegetal na mitigação do efeito de calor, com áreas mais arborizadas apresentando temperaturas mais baixas (Chen et al., 2021).

As tendências regionais demonstram variações significativas nas características e na intensidade das ICUs, dependendo dos contextos locais (Li et al., 2022). Estudos de caso em diferentes regiões do mundo revelam a influência de fatores como a urbanização acelerada, o crescimento populacional e as políticas públicas no desenvolvimento e na intensidade das ICUs (Dubreuil et al., 2019). Em cidades de diferentes portes, as tendências de ICUs podem variar, com cidades maiores frequentemente apresentando ICUs mais intensas (Amorim, 2017).

3.5. Teledeteção e Detecção remota

Teledeteção, ou deteção remota, é a aquisição de informação sobre um objecto ou fenómeno sem contacto físico directo. Isso é alcançado através da deteção e medição da energia electromagnética emitida, reflectida ou espalhada pelos alvos (Bernardes, 2018). A energia detectada é então processada para produzir imagens ou outros dados que podem ser usados para extrair informações sobre as características do alvo. A gama de aplicações é vasta, abrangendo desde monitoramento ambiental até mapeamento urbano (Urmambetova, 2017). A precisão da informação obtida depende de vários factores, incluindo a resolução espacial e espectral do sensor, as condições atmosféricas e a técnica de processamento de imagem (Qian, 2022). A deteção remota proporciona uma visão sinóptica, permitindo o monitoramento de grandes áreas com uma única aquisição de dados.

A repetibilidade das aquisições permite monitorar mudanças ao longo do tempo, essencial para estudos de dinâmica ambiental e urbana (Bertoluzza, 2019).

As plataformas para detecção remota podem ser terrestres, aéreas ou orbitais (Bernardes, 2018). Neste contexto, focamos nas plataformas orbitais, que oferecem cobertura global e repetibilidade temporal (Bernardes, 2018). Satélites como o Landsat (Adeniran, 2022) e o Sentinel (Mendili, 2020), (Pirinen, 2023) possuem uma variedade de sensores com diferentes capacidades espectrais e espaciais (Bernardes, 2018). O Sentinel-3, em particular, possui o instrumento *Sea and Land Surface Temperature Radiometer* (SLSTR) (Esposito, 2024), que fornece dados de (TST) com alta precisão (Adeniran, 2022). A escolha da plataforma e do sensor depende da escala espacial, resolução e tipo de informação necessários para o estudo (Bernardes, 2018). A disponibilidade de dados gratuitos de alta resolução de satélites como o Sentinel-3 tem impulsionado significativamente a pesquisa em diversas áreas, incluindo o estudo das ilhas de calor urbanas (Sobrino, 2020). A comparação entre dados de diferentes satélites, como Landsat-8 e Sentinel-3, é fundamental para garantir a harmonização e a precisão dos resultados (Adeniran, 2022).

3.6. Sistemas de Informação Geográfica

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) desempenham um papel fundamental na análise e interpretação dos dados de detecção remota utilizados no mapeamento de ilhas de calor urbanas (Boulos, 2001). Os SIG permitem integrar diferentes fontes de dados espaciais, como imagens de satélite, dados de cobertura do solo, dados demográficos e dados meteorológicos (Munysi, 2024), facilitando a análise espacial das ICUs (Arellano, 2021). A capacidade de análise espacial dos SIG permite identificar padrões, tendências e relações espaciais entre a temperatura de superfície e outros factores que influenciam a formação das ICUs (Munysi, 2024). A visualização espacial dos dados de TST em mapas temáticos facilita a compreensão e a comunicação dos resultados (Boulos, 2001).

Apesar dos avanços na tecnologia de detecção remota e SIG, existem limitações e desafios no mapeamento de ilhas de calor urbanas. A resolução espacial dos dados de satélite pode ser insuficiente para capturar a heterogeneidade térmica em escalas finas (Granero-Belinchn, 2019). A influência da atmosfera na medição da temperatura da superfície pode levar a erros na estimativa da TST (Souza, 2015). A disponibilidade de dados de alta resolução pode ser limitada, tanto em termos espaciais quanto temporais (Arellano, 2021). A calibração e validação dos dados de satélite são essenciais para garantir a precisão dos resultados, e podem ser complexas e dispendiosas (Adeniran, 2022). A integração de diferentes fontes de dados pode ser desafiadora, devido a diferenças na resolução espacial e temporal, sistemas de coordenadas e formatos de dados (Boulos, 2001). A interpretação dos resultados requer um conhecimento especializado em detecção remota, SIG e climatologia urbana (Boulos, 2001). A resolução temporal dos dados pode ser insuficiente para capturar a variabilidade diurna e sazonal das temperaturas

de superfície (Esposito, 2024). A utilização de técnicas de *unmixing* térmico para aumentar a resolução espacial da TST pode ser complexa e depender de hipóteses que podem não ser válidas em todos os casos (Granero-Belinch, 2019). A falta de dados de validação em campo pode dificultar a avaliação da precisão dos resultados (Sidiqi, 2016). A complexidade dos processos urbanos e a influência de múltiplos factores na formação das ICUs exigem uma abordagem integrada e multidisciplinar para o mapeamento e a gestão das ICUs (Xiang, 2024). A incorporação de dados de outras fontes, como dados climáticos, socioeconômicos e de mobilidade urbana, pode melhorar a compreensão das ICUs e auxiliar em estratégias de mitigação mais eficazes (Esposito, 2024).

3.7. Índices de Vegetação

Índices de vegetação (IVs) são ferramentas essenciais em detecção remota, derivadas de dados espectrais de imagens de satélite, para quantificar e monitorar a cobertura vegetal (Robinson, 2017). Eles fornecem informações sobre a biomassa, a produtividade e a saúde das plantas, permitindo a monitorização de mudanças na vegetação ao longo do tempo e em diferentes escalas espaciais (Pettorelli, 2014). A disponibilidade de dados de alta resolução espacial e temporal, como os provenientes da constelação de satélites Sentinel-2, ampliou significativamente as aplicações dos IVs em estudos ecológicos e de gestão ambiental (Sun, 2020). A capacidade de monitorar mudanças frequentes e em larga escala torna esses índices vitais para a compreensão de fenómenos como a expansão urbana e os seus impactos sobre a vegetação, incluindo o efeito de ilha de calor urbana (Li, 2008). A análise integrada de IVs com outros dados de detecção remota, como a temperatura da superfície terrestre (TST), contribui para uma avaliação mais completa do estado dos ecossistemas e dos impactos das mudanças climáticas (Quille-Mamani, 2024).

3.7.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

O NDVI, um dos índices de vegetação mais amplamente utilizados (Nicole, 2014). O NDVI é sensível à biomassa e à actividade fotossintética, com valores variando entre -1 e +1. Valores próximos a +1 indicam alta densidade de vegetação, enquanto valores próximos a 0 sugerem baixa densidade ou ausência de vegetação (Pettorelli, 2014). A utilização do NDVI em estudos de monitorização da vegetação é vasta, abrangendo desde a avaliação da produtividade agrícola (Adeniyi, 2020) até o mapeamento de áreas desmatadas (Fusami, 2020) e a detecção de estresse hídrico em plantas (Quille-Mamani, 2024). Entretanto, a sua aplicação em áreas urbanas pode ser complexa devido à mistura espectral entre diferentes alvos urbanos, que afeta a precisão na quantificação da vegetação

Apesar de sua ampla utilização, o NDVI apresenta algumas limitações (Kocur-Bera, 2024). Sua sensibilidade à saturação em áreas com alta densidade de vegetação (Pettorelli, 2014) pode resultar em subestimação da biomassa em áreas densamente vegetadas. A influência da variabilidade do solo e da

atmosfera nos valores do NDVI também afeta a sua precisão (Lugassi, 2019). A baixa resolução espacial de alguns produtos NDVI, como os derivados de sensores como o MODIS, pode dificultar a identificação de pequenas áreas de vegetação em áreas urbanas densas (Barka, 2019). Além disso, a presença de nuvens e sombras nas imagens de satélite pode afetar a qualidade dos dados NDVI, comprometendo a confiabilidade das análises (Sun, 2020).

3.7.2 *Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)*

O SAVI tem demonstrado melhor desempenho que o NDVI em áreas semiáridas e desérticas, onde a influência do solo é mais pronunciada, (Gantumur, 2021). Em comparação com o NDVI, estudos indicam que o SAVI apresenta maior estabilidade temporal em regiões com clima continental e alta latitude (Sun, 2020).

O SAVI apresenta vantagens significativas em relação ao NDVI em determinados contextos (Sun, 2020). A principal vantagem é a sua menor sensibilidade à influência do solo, o que o torna mais adequado para áreas com baixa cobertura vegetal ou solo exposto (Fusami, 2020), (Wu, 2014). Isso resulta em uma maior precisão na estimativa da biomassa e da produtividade vegetal em tais áreas (Adeniyi, 2020). Em estudos comparativos, o SAVI mostrou-se superior ao NDVI na classificação de diferentes tipos de vegetação em regiões de salgada (Sun, 2020), e na previsão da produtividade de culturas de trigo (Adeniyi, 2020). Adicionalmente, o SAVI demonstrou melhor desempenho na detecção de contaminação do solo em áreas de produção de petróleo (Gantumur, 2021), sugerindo a sua utilidade em aplicações ambientais. A maior estabilidade temporal do SAVI em certas regiões (Sun, 2020) também contribui para a sua superioridade em análises de longo prazo de mudanças na vegetação. Apesar dessas vantagens, a escolha entre o NDVI e o SAVI depende das características específicas da área de estudo e dos objectivos da pesquisa.

3.8. Temperatura da Superfície Terrestre

A temperatura da superfície terrestre (TST) é um parâmetro fundamental no estudo das ilhas de calor urbanas (Li, 2008).

A TST representa a temperatura da superfície dos diferentes elementos que compõem a paisagem urbana, como edifícios, ruas, vegetação e água. A obtenção da TST a partir de imagens de satélite com bandas termais envolve a aplicação de algoritmos de conversão de radiância em temperatura, considerando factores como a emissividade da superfície e a transmitância atmosférica (Santos, 2014). A TST varia significativamente em função das características da superfície e das condições atmosféricas (Muzaky, 2019). Áreas urbanas com alta densidade de superfícies impermeáveis tendem a apresentar temperaturas mais elevadas do que áreas com maior cobertura vegetal ou corpos de água (Kim, 2020). A análise da distribuição espacial da TST permite identificar as áreas mais afectadas pelo efeito de ilha de calor, fornecendo informações importantes para o planeamento urbano e a mitigação da ICU (Dimitrov, 2024).

Existe uma forte relação inversa entre a TST e os IVs, como o NDVI e o SAVI (Muzaky, 2019). Áreas com alta densidade de vegetação tendem a apresentar temperaturas mais baixas devido ao efeito de resfriamento evaporativo e à sombra proporcionada pela vegetação (Kim, 2020). A análise da correlação entre a TST e os IVs permite quantificar a influência da vegetação na mitigação da ICU (Wang, 2023). A integração desses dados em modelos de simulação climática contribui para uma melhor compreensão dos processos físicos que governam a formação da ICU (Arellano, 2021).

A vegetação desempenha um papel fundamental na mitigação das ilhas de calor urbanas (Nicole, 2014). Através da evapotranspiração, as plantas liberam vapor de água para a atmosfera, o que contribui para o resfriamento do ar (Wang, 2023). A sombra proporcionada pelas árvores reduz a quantidade de radiação solar que atinge a superfície, diminuindo o aquecimento das superfícies urbanas (Kim, 2020). Além disso, a vegetação contribui para a melhoria da qualidade do ar, reduzindo a concentração de poluentes atmosféricos que podem agravar o efeito de ilha de calor (Nicole, 2014). A análise da relação entre a cobertura vegetal e a temperatura da superfície terrestre (TST) permite avaliar a eficácia da vegetação na mitigação da ICU (Wang, 2023). O planejamento urbano deve priorizar a integração de espaços verdes em diferentes escalas, desde a escala de bairro até a escala urbana, para maximizar os benefícios da vegetação na redução da ICU (Dimitrov, 2024).

No presente capítulo são apresentados os materiais bem como a metodologia usada com vista ao alcance dos objectivos traçados.

4.1. Material

Esta pesquisa emprega técnicas de Deteção Remota para analisar a influência da distribuição espacial da cobertura vegetal na formação e intensificação das Ilhas de Calor Urbanas (ICU). Para isso, são utilizadas imagens de satélite para estimar a Temperatura da Superfície Terrestre (TST), mapear as Ilhas de Calor Urbano (ICU) e os calcular Índices de vegetação (IVs). As imagens orbitais foram adquiridas a partir dos sensores Visível e Infravermelho Próximo (VNIR) do Sentinel-2, com resolução espacial de 10 metros, e do Radiômetro de Temperatura da Superfície do Mar e da Terra (SLSTR) do Sentinel-3, com resolução espacial de 1000 metros. Esses dados foram obtidos gratuitamente por meio do *Copernicus Open Access Hub* (<https://dataspace.copernicus.eu/>). A seleção de dados incluiu 8 imagens diurnas e 8 nocturnas SLSTR do Sentinel-3, com cobertura de nuvens limitada a 5% (vide as características na tabela 1), e 8 imagens VNIR do Sentinel-2, com cobertura de nuvens inferior a 15% (vide as características na tabela 2). As imagens correspondem ao período de Setembro a Dezembro de cada ano, intervalo caracterizado por temperaturas historicamente elevadas na região, conforme registros climáticos do Instituto Nacional de Meteorologia de Moçambique (INAM).

Tabela 1. Características das imagens para temperatura da superfície terrestre com base no Sentinel-3.

Número	Data (Ano,mês,Dia)	Hora (Hora,min,seg)	Nuvens	Resolução Espacial	Formato
1	20171016	065851	5%	1000 m	Geotif
2	20171016	184546	5%		
3	20181215	071158	5%		
4	20181215	203621	5%		
5	20191115	072702	5%		
6	20191115	194956	5%		
7	20201114	072507	5%		
8	20201114	194802	5%		
9	20211015	074008	5%		

10	20211015	200302	5%		
11	20221224	070055	5%		
12	20221224	202543	5%		
13	20230930	074202	5%		
14	20230930	200457	5%		
15	20241118	074430	5%		
16	20241118	200725	5%		

Tabela 2. Características das imagens para índices de vegetação com base no Sentinel-2.

Número	Data (Ano,mês,Dia)	Hora (Hora,min,seg)	Nuvens	Resolução Espacial	Formato
1	20171016	073234	13%	10 m	Geotif
2	20181215	074319	10%		
3	20191115	073009	12%		
4	20201114	074159	10%		
5	20211015	073901	15%		
6	20221224	073619	10%		
7	20230930	073719	10%		
8	20241118	074211	12%		

4.2. Programas Computacionais

O tratamento dos dados alfanuméricos e espaciais requerem a utilização de programas específicos que permitam a realização de operações sobre os mesmos. Para a redação e alcance dos objetivos propostos neste trabalho, foram usados os programas descritos na tabela 3.

Tabela 3. descrição dos programas computacionais usados e sua finalidade

Programas	Finalidade
QGIS Versão 3.28.5	Processamento de dados vectorias e matriciais e elaboração de mapas
(SNAP) Versão 10.0.0	Correção atmosférica, projeção e processamento dos dados matriciais

Rstudio 2024.09.0	Testes estatísticos e gráficos	
Mendeley Reference Manager Versão 2.112.0	Gestão das referências bibliográficas e de citação.	
Microsoft 365	Word 2016	Redação do presente trabalho.
	Excel 2016	Visualização de tabelas estatísticas
Draw.Io versão online	Elaboração de fluxogramas	

4.3. Métodos

Para gerar mapas de TST foram utilizadas imagem de satélite Sentinel-3, sensor SLSTR. Para o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI) foram utilizadas as imagem do satélite Sentinel-2, sensor VNIR. Todo o processamento das imagens digitais foi realizado no *software* Qgis 3.28 e SNAP 10.00.

Todas imagens do Sentinel-2 e Sentinel-3, para adequarem-se à área de estudo, foram reprojectadas de WGS1984 para o sistema MOZNET Zona 36S, posteriormente foram feitos cortes das imagens, essa etapa é denominada como pré-processamento de imagens digitais. De seguida as imagens passaram por uma correção atmosférica utilizando o *software* de código aberto *Sentinel Application Platform* (SNAP) da Agência Espacial Europeia (ESA). Tendo as imagens NDVI e SAVI do Sentinel-2 como referência, as imagens TST do Sentinel-3 foram reamostradas para uma nova resolução de 10 m. Este procedimento para a obtenção de imagens de alta resolução é bem documentado pela comunidade científica (Belgiu e Stein, 2019) e apresenta excelentes resultados. Por fim, o estudo estatístico dos resultados da nossa investigação baseou-se em software especializado para ciência de dados, RStudio versão 0.99.

4.3.1. Imagens Sentinel-3

Os satélites Sentinel-3 do nível 2 permitem obter imagens TST com 1000 metros de resolução espacial utilizando o radiómetro de varrimento de alta resolução. As imagens escolhidas para o estudo correspondem aos mesmos oito dias das imagens do Sentinel-2. Desta forma, ao longo dos meses de Setembro e Dezembro do ano de 2017 a 2024, um total de 16 imagens foram utilizadas do Sentinel-3.

Após a obtenção das imagens, converteu se este resultado para imagem de temperatura superfície (TST), porém a imagem resultante desta conversão apresenta os seus dados em temperatura Kelvin, de acordo com Coelho e Correa (2013), sendo assim há a necessidade de subtrair 273.15 do seu resultado, para a obtenção de imagem de temperatura em grau Celsius, através da Equação (3).

$$TST(^{\circ}C) = TST(K) - 273.15 \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$TST(K)$ – Temperatura de Superfície Terrestre em Kelvin

273.15 – Constante Kelvin

4.4.2. Imagens Sentinel-2

Os satélites Sentinel-2 permitem obter imagens de alta resolução espacial de 10 metros graças às suas 12 bandas, cuja resolução varia entre 10 e 60 metros. A superfície da Terra e suas alterações podem assim ser monitoradas com precisão através de imagens de alta resolução.

4.4.3. NDVI e SAVI

O NDVI usando imagens Sentinel-2 é determinado pela banda vermelha (4) e a banda espectral do infravermelho próximo (8). Este índice permite-nos determinar se existe vegetação numa determinada zona ou área. O intervalo deste índice é entre -1 (solos limpos e desprovidos de vegetação) e 1 (vegetação densa). É calculado pela seguinte fórmula:

$$(NIR - Vermelho) / (NIR + Vermelho) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

NIR – reflectância no infravermelho próximo;

$Vermelho$ – reflectância no vermelho.

O SAVI, foi desenvolvido para minimizar os efeitos da influência do solo nos valores do NDVI, especialmente em áreas com pouca vegetação (Fusami, 2020). Onde L é um fator de ajuste que varia de 0 a 1, geralmente igual a 0,5. O fator L é utilizado para reduzir a influência da reflectância do solo sobre os valores do índice, melhorando a capacidade de deteção da vegetação em áreas com baixa cobertura vegetal (Wu, 2014). É calculado pela seguinte fórmula.

$$SAVI = (1 + L) * (NIR - Vermelho) / (NIR + Vermelho + L) \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

NIR - Refletância na banda do infravermelho Próximo (Banda 8)

$Vermelho$ – Refletância na banda do Vermelho (Banda 4)

L - Fator de ajuste do Solo. Este valor varia de 0 a 1, sendo que:

- ❖ $L = 0$: Não há correção para o efeito do solo (o SAVI se torna igual ao NDVI)
- ❖ $L = 1$: Correção máxima para o efeito do Solo

❖ $L = 0.5$: valor de ajuste padrão, recomendado para a maioria dos casos

4.4. O Teste de Mann-Kendal

O teste de Mann-Kendall é um teste não paramétrico usado para detectar tendências monotônicas em séries temporais (Coen, 2020). Ele avalia se existe uma tendência crescente ou decrescente nos dados ao longo do tempo, sem fazer suposições sobre a distribuição dos dados. Antes de realizar o teste de Mann-Kendall, é necessário formular as hipóteses nula e alternativa. A hipótese nula (H_0) geralmente afirma que não existe tendência monotônica na série temporal (Wang, 2020). Ou seja, a média da variável em estudo permanece constante ao longo do tempo. A hipótese alternativa (H_1) pode ser unilateral ou bilateral dependendo da questão de pesquisa (Wang, 2020). Por exemplo, se a pesquisa busca determinar se a temperatura média anual está a aumentar, a hipótese alternativa seria unilateral (tendência crescente). Se o objectivo for apenas detectar a presença de qualquer tendência monotônica (crescente ou decrescente), a hipótese alternativa seria bilateral (Wang, 2020). A escolha da hipótese alternativa influencia a interpretação dos resultados e o cálculo do valor-p (Coen, 2020).

A base teórica do teste reside na comparação de todos os pares possíveis de observações na série temporal (Coen, 2020). Para cada par de observações (x_j, x_i) , onde $i < j$, calcula-se a diferença $x_j - x_i$, conforme a equação 4. Se a diferença for positiva, indica uma tendência crescente entre essas duas observações, enquanto uma diferença negativa indica uma tendência decrescente (Wang, 2020). A soma dessas diferenças, ponderada por um fator que leva em conta a Auto correlação dos dados, forma a estatística de teste S (Coen, 2020). Sob a hipótese nula de ausência de tendência, a distribuição de S é aproximadamente normal para séries temporais suficientemente longas (Wang, 2020). A significância estatística da tendência é avaliada com base no valor-p, que representa a probabilidade de observar a estatística de teste S ou um valor mais extremo, assumindo a hipótese nula de ausência de tendência (Coen, 2020).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

n – Número de pontos de dados;

x_j e x_i – valores de dados em séries temporais i e j , e

$\text{sgn}(x_j - x_i)$ – É a função sinal.

A técnica de análise de tendências é utilizada em conjuntos de dados sequenciais, como séries temporais. Nesses conjuntos, cada elemento é comparado com os elementos que o sucedem, com o intuito de

descobrir padrões e direções predominantes ao longo da sequência. Cada elemento serve como ponto de partida para a análise, sendo confrontado com os demais para identificar tendências.

$$Sgn(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{se } x_j - x_i > 0 \\ 0, & \text{se } x_j - x_i = 0 \\ -1, & \text{se } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad \text{Equação 5}$$

Uma parte fundamental desse teste é o cálculo de Tau de Kendall (τ), um coeficiente de correlação de postos que varia de -1 a +1, determinado através da equação 6.

$$\tau = \frac{S}{n-(n-1)/2} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

τ – Coeficiente de correlação de postos de Kendall.

S – Estatística de Mann-Kendall, que mede a direção da tendência.

n – Número de pontos de dados na série temporal.

A Significância estatística de uma tendência é avaliada através do cálculo da probabilidade relacionada a S e n . A variância de S , necessária para esse cálculo, é obtida pela seguinte fórmula:

$$VAR(S) = 1/18[(n - 1)(2n + 5) \sum_{p=1}^q t_p(t_p - 1)(2t_p - 5)] \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

$VAR(S)$ – Variância da estatística de Mann-Kendall (S);

n – Número de pontos de dados na série temporal;

q – Definido como o número de grupos empatados;

t_p – O número de dados no grupo p^{th} ; e

A soma é realizada sobre todos os grupos de dados empatados para o cálculo da estatística de teste Z que está seguindo como;

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{VAR(S)}}, & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{VAR(S)}}, & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad \text{Equação 8}$$

A estatística de teste Z , utilizada para avaliar a significância de tendências em séries temporais, segue uma distribuição normal padrão. Em um teste de hipóteses com nível de significância de 5% (ou seja, um intervalo de confiança de 95%) e uma hipótese alternativa bilateral, os valores críticos que delimitam a região de rejeição são $-1,96$ e $+1,96$. A hipótese nula de ausência de tendência é rejeitada se $|Z| > 1,96$; $\alpha = 0,05$ (Coen, 2020).

Fluxograma Metodológico

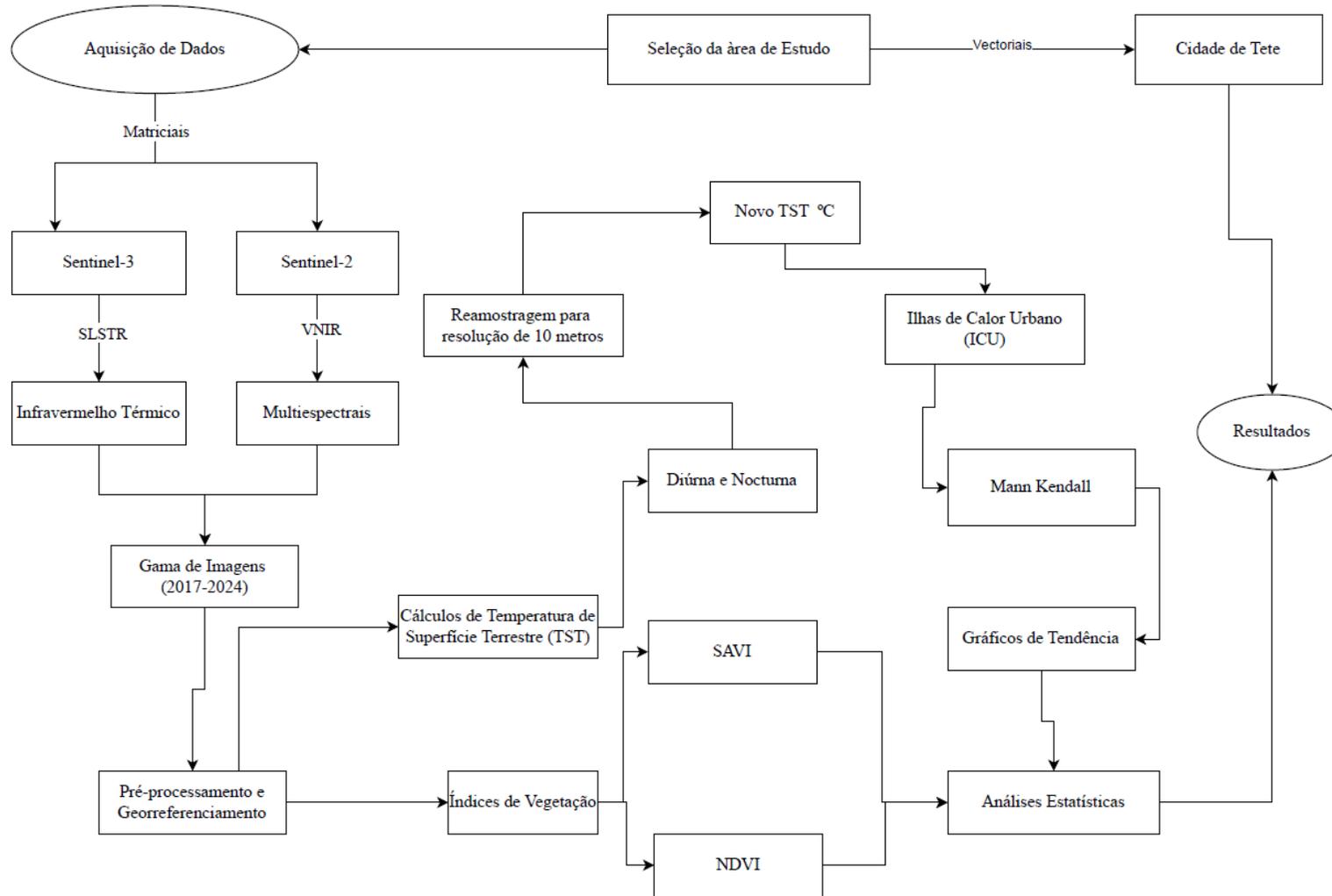


Figura 4: Fluxograma Metodológico

O presente capítulo apresenta a análise e a discussão dos resultados obtidos a luz da metodologia descrita no quarto capítulo desta pesquisa.

5.1. Comportamento da Temperatura da Superfície Terrestre

Este estudo analisa os dados de Temperatura da Superfície Terrestre (TST) para cidade Tete, de 2017 a 2024, utilizando imagens diárias e noturnas do Sentinel-3. A análise centra-se na identificação e caracterização do efeito das Ilhas de Calor Urbana (ICU), um fenómeno em que as áreas urbanas experimentam temperaturas mais elevadas do que as áreas rurais circundantes (Sousa, 2012). Esta secção detalha a análise dos dados do TST diurnos e noturnos.

O pós-processamento das imagens revelou áreas em Tete com TST diurna superior a 50 °C durante o período de estudo. A Figura 5 representa visualmente estas zonas de temperatura elevada. Estas áreas de altas temperaturas estão fortemente associadas a regiões densamente urbanizadas caracterizadas por elevadas concentrações de superfícies impermeáveis como o asfalto e o betão (Sousa, 2012). O impacto destes materiais no balanço energético superficial está bem documentado. O asfalto e o betão absorvem uma quantidade significativa de radiação solar, levando ao aumento da temperatura da superfície. Além disso, a reduzida evapotranspiração destas superfícies contribui para temperaturas mais elevadas (Lopes, 2022). A selecção de uma imagem representativa por ano, com uma percentagem de cobertura de nuvens inferior a 5%, garante a consistência dos dados e minimiza a influência das condições atmosféricas nas medições de temperatura. A análise destas imagens fornece informação sobre a distribuição espacial e a intensidade do efeito ICUs em Tete ao longo de diferentes anos.

As imagens noturnas do Sentinel-3 revelaram áreas em Tete com TST superior a 30 °C durante o período 2017-2024. A Figura 6 mostra a distribuição espacial destas temperaturas noturnas mais elevadas. À semelhança da análise diurna, estas áreas de altas temperaturas estão concentradas em regiões densamente urbanizadas com uma cobertura superficial impermeável significativa. No entanto, a TST noturna é menos intensa do que a diária porque a radiação solar está ausente (Liu, 2021). Os edifícios retêm o calor durante o dia e libertam-no durante a noite, contribuindo assim para temperaturas noturnas elevadas (Wu, 2023).

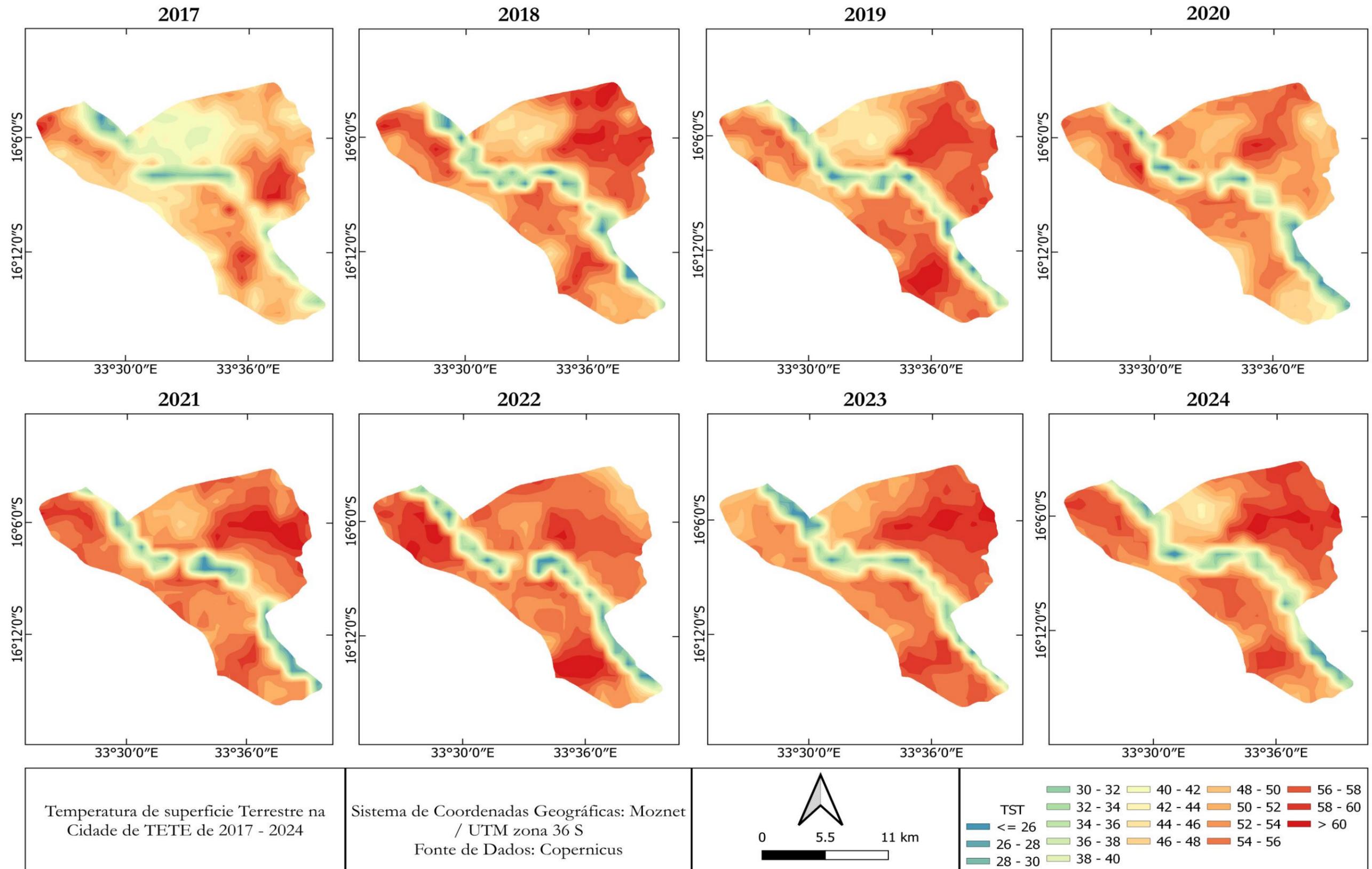


Figura 5. Temperatura de Superfície Terrestre diária do sentinel-3

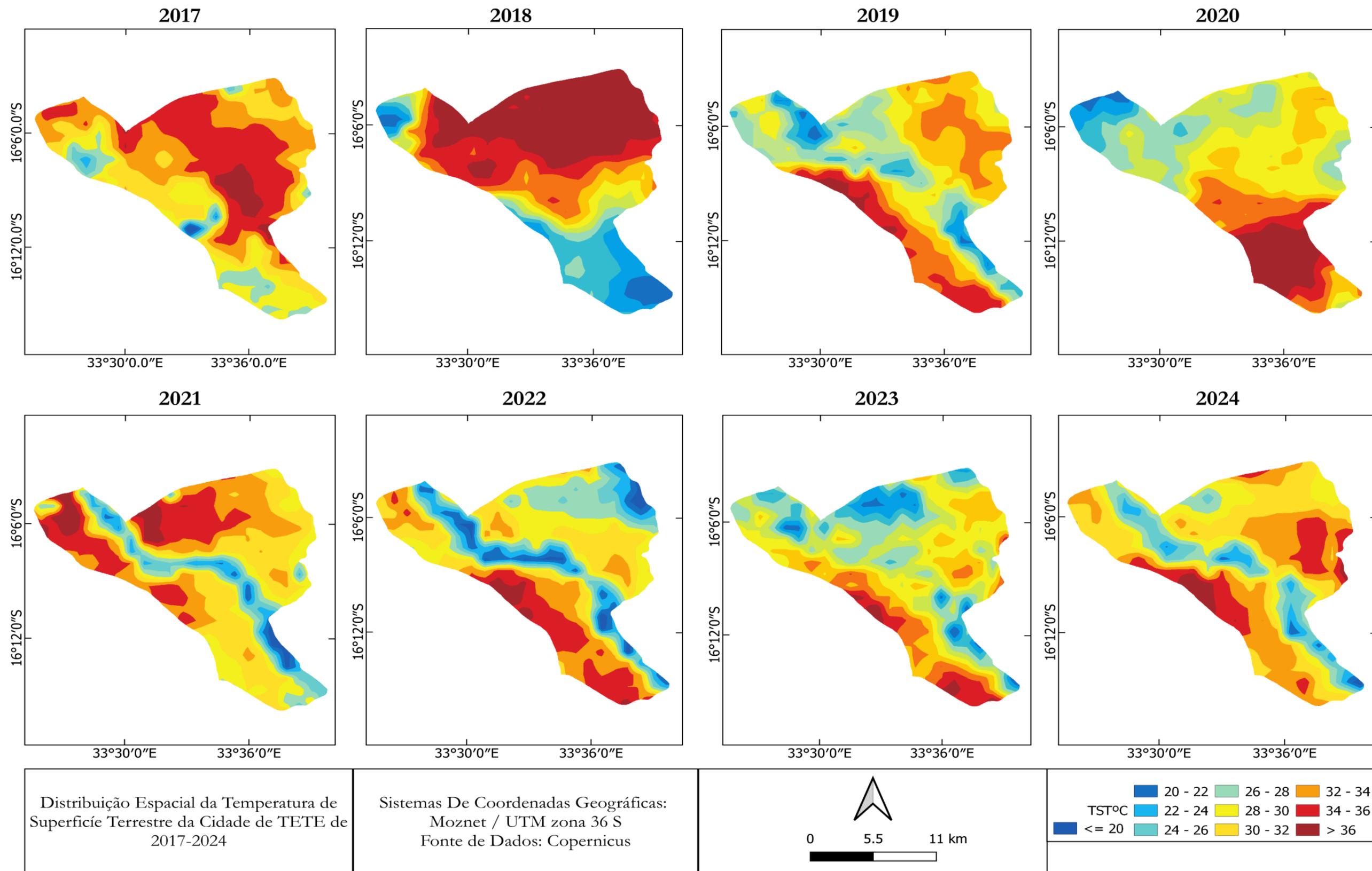


Figura 6. Temperatura de Superfície Terrestre nocturna do Sentinel-3

5.2. Comportamento da Cobertura Vegetal

A análise das alterações na paisagem requer ferramentas robustas para avaliar a evolução ambiental. Os índices de vegetação, como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI), oferecem valiosas capacidades de monitorização espaço-temporal para alterações na cobertura vegetal (Benedetti, 2013). Este estudo utiliza estes índices para examinar a dinâmica da vegetação e a sua relação com as TST na cidade de Tete.

A figura 7 ilustra a distribuição geográfica do NDVI ao longo do período de estudo. Valores mais elevados de NDVI (aproximados de 1) indicam a presença de vegetação, enquanto valores nulos ou negativos correspondem a corpos de água, nuvens, solo descoberto e áreas urbanas. As áreas com valores de NDVI mais elevados agruparam-se consistentemente no Norte da área de estudo, e na parte Sul da cidade, onde existe uma cobertura vegetal significativa, especificamente o vale de Nhartanda. Por outro lado, valores mais baixos de NDVI correlacionaram-se com a rede urbana e com os corpos de água no meio urbano. Para melhorar a análise, o anexo 3 apresenta representações gráficas dos dados do NDVI. A análise gráfica facilita as comparações dos índices de vegetação. Os níveis digitais que representam o NDVI nestes gráficos exibem uma oscilação mínima e dispersão de valor. O anexo 6 fornece um resumo detalhado dos dados do NDVI, incluindo a média, o desvio padrão, o mínimo e o máximo para cada ano do estudo. Estas estatísticas fornecem uma medida quantitativa da variabilidade do NDVI ao longo do tempo. A análise destas medidas estatísticas para cada ano permite uma compreensão mais matizada da dinâmica da vegetação. Por exemplo, um desvio padrão elevado num determinado ano pode indicar uma heterogeneidade significativa na cobertura vegetal em toda a área de estudo, potencialmente devido a factores como a seca localizada ou mudanças no uso da terra (Chen, 2014).

A figura 8 mostra a distribuição geográfica da vegetação usando o SAVI ao longo do período de estudo. À semelhança do NDVI, valores mais elevados de SAVI corresponderam a áreas com vegetação mais densa. O índice SAVI, ao incorporar um fator de ajuste do solo, visa minimizar os efeitos do brilho do solo nos cálculos do índice de vegetação, particularmente útil em regiões semiáridas onde o fundo do solo influencia significativamente a refletância espectral (Silva, 2019). Isto torna o SAVI um indicador potencialmente mais robusto da saúde da vegetação em tais ambientes em comparação com o NDVI isolado. Os padrões de distribuição espacial observados no SAVI reflectem provavelmente factores ecológicos semelhantes que influenciam o NDVI.

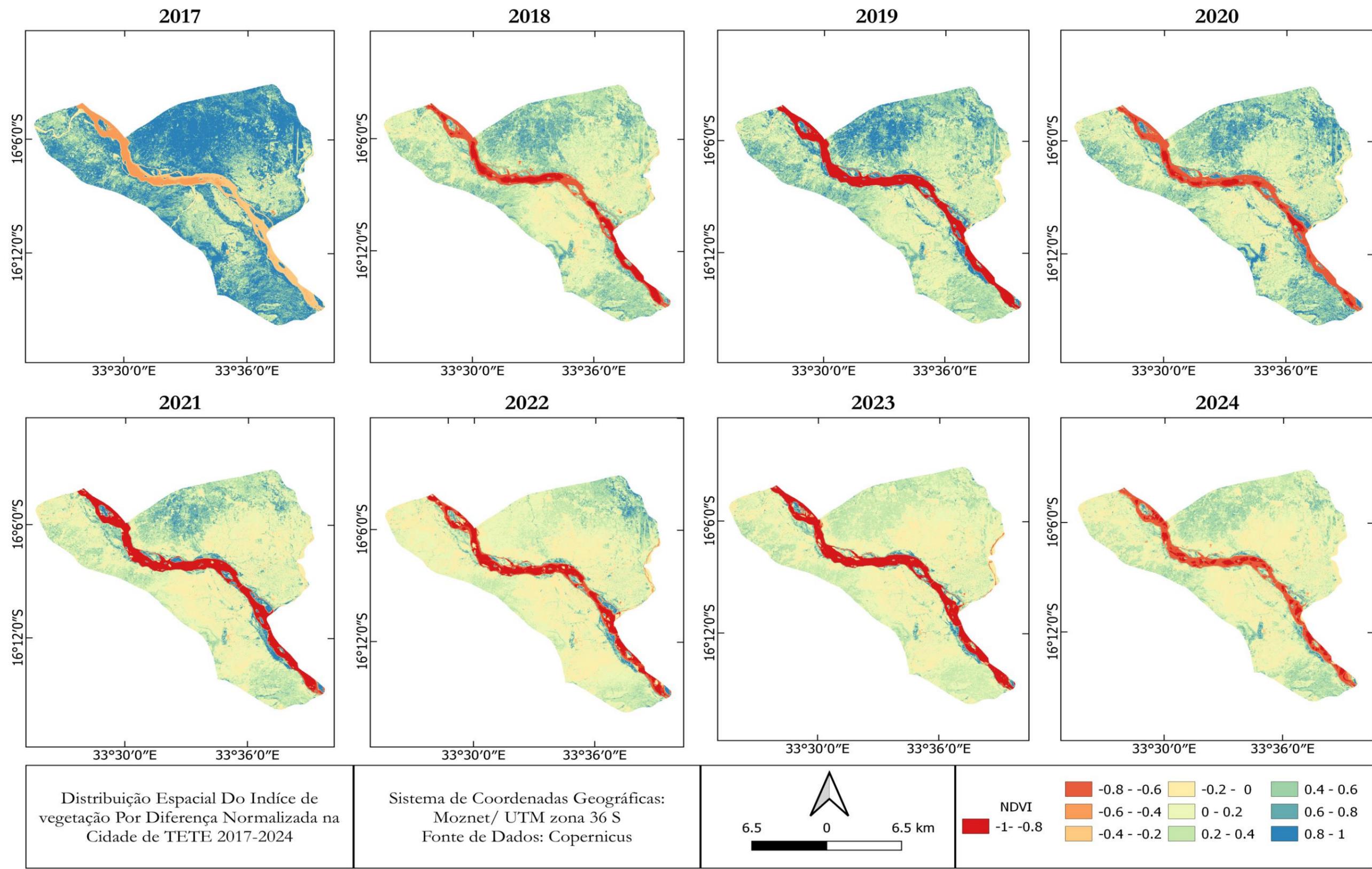


Figura 7. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada do Sentinel-2

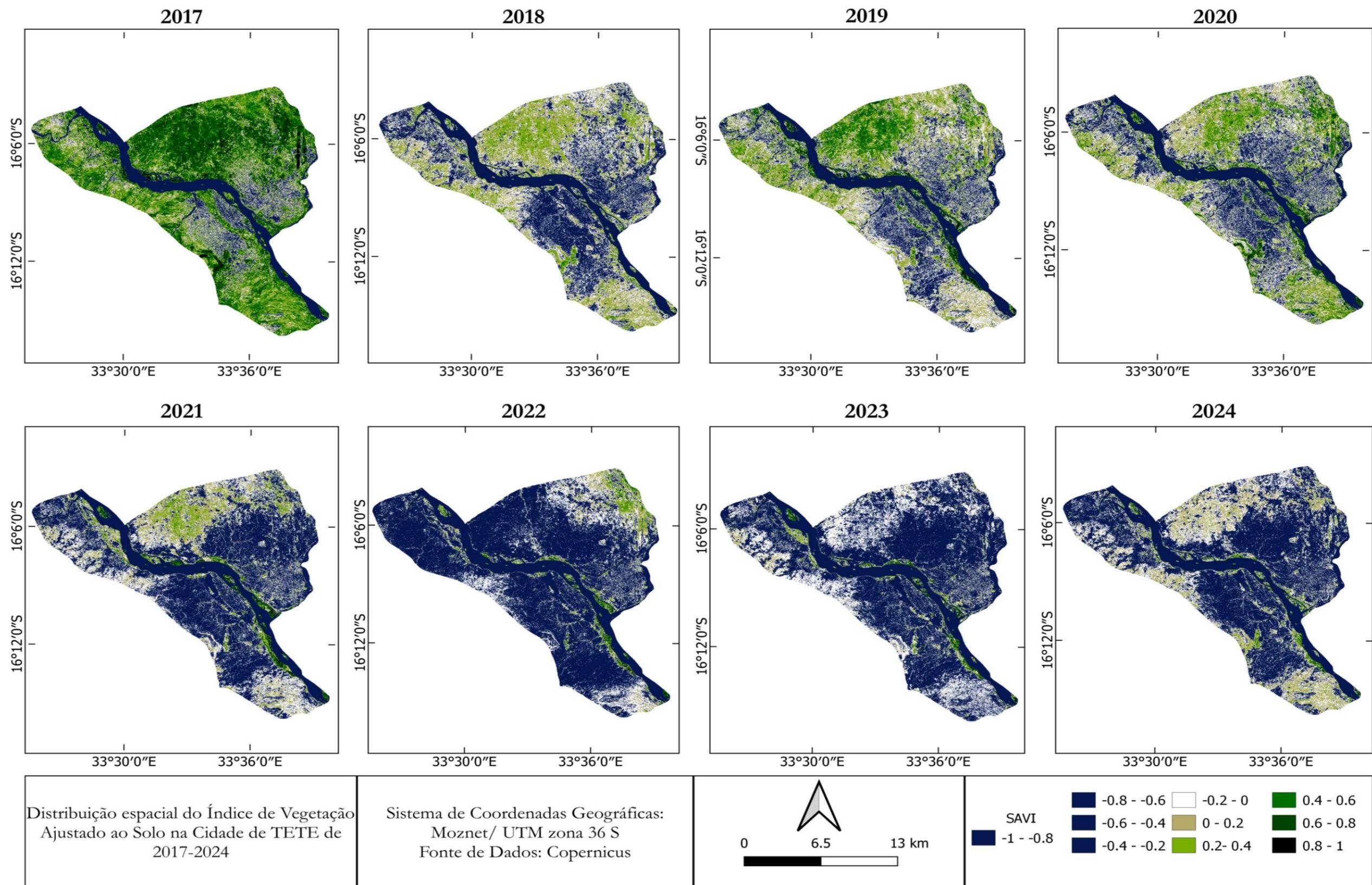


Figura 8. Índice de Vegetação Ajustado ao Solo do Sentinel-2

5.3. Análise das Ilhas de Calor Urbanas entre Área Vegetada e Centro Urbano de Tete

Esta análise das Ilhas de Calor Urbanas de superfície (ICU) na cidade de Tete, foca em duas áreas representativas: **área vegetada** e o **centro urbano**. Estas zonas foram seleccionadas devido às suas características contrastantes, reflectindo a transformação dinâmica da região urbana. Antes de quantificar as ICU, realizamos uma análise detalhada do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), do Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) e da Temperatura da Superfície Terrestre (TST), que foram apresentadas por mapas e gráficos.

Os dados espaciais de TST (diários e nocturnos), SAVI e NDVI revelaram variações significativas, com dados máximos e mínimos que foram cuidadosamente analisados. As comparações entre as duas áreas mostraram-se fundamentais para atingirmos os objectivos específicos definidos, particularmente na quantificação e análise da correlação entre a cobertura vegetal e a temperatura da superfície.

Foi seleccionada a área vegetada como uma área de referência rural devido à sua considerável cobertura vegetal, que apresentou em alguns casos, valores de NDVI superiores a 0.9, e temperaturas médias diurnas que atingiram até 48 °C, com médias nocturnas de 30 °C. De acordo com Liu et al. (2012), áreas vegetadas tendem a ter uma capacidade de armazenamento de calor inferior a áreas desprovidas de vegetação, resultando em temperaturas de superfície mais amenas. A análise preliminar do comportamento do NDVI, SAVI e TST em ambas áreas revelou tendências significativas, e utilizamos a área vegetada como base de comparação para validar os dados do centro Urbano.

A figura 9 ilustra a variação da TST na área vegetada, destacando um TST máximo de 51 °C registado no dia 29 de Dezembro de 2021. O NDVI nesse mesmo dia foi de 0.85, e o SAVI alcançou o valor de 0.61. Em comparação, no dia 30 de Janeiro de 2017, obtivemos o maior valor de NDVI de 0.91 na área vegetada, com uma TST correspondente de 33.2 °C. Essa análise sugere uma correlação inversa: altos índices de vegetação estão associados a temperaturas mais baixas, corroborando a hipótese de que a cobertura vegetal pode atenuar os efeitos das ilhas de calor urbanas (Errea, 2023). Importante observar que essa correlação negativa entre TST e NDVI foi também observada em estudos realizados em Tanzânia (Kabanda, 2019).

A análise da variação da temperatura nocturna, a Figura 14 mostra um TST máximo de 32.6 °C em 04 de Dezembro de 2022, e um NDVI máximo de 0.76 com SAVI de 0.5, enquanto o NDVI máximo registado foi de 0.91, com TST correspondente de 24.4 °C em 30 de Janeiro de 2017 (Figura 13).

O centro urbano da cidade de Tete foi escolhido para uma análise aprofundada da intensidade e magnitude das ICUs. Os dados espaciais Figura 5 revelaram manchas de calor intenso que correspondem a elevações significativas na TST. Situado em uma área com elevado tráfego de pessoas e veículos, o

centro urbano da cidade de Tete exibe características que contribuem para a absorção de radiação solar, um factor crítico na formação das ICU. Neste contexto, é fundamental considerar o impacto dos materiais de construção na retenção de calor, como discutido por Souza (2024) na análise da cidade de São Paulo.

Apesar de centro urbano ter uma densidade populacional inferior a outros bairros de cidade de Tete, as temperaturas médias diárias da superfície são muito elevadas, alcançando até 54 °C, com médias nocturnas que alcançam 30 °C. A variação da TST diária no centro urbano indica um valor máximo de 54.0 °C no dia 29 de Dezembro de 2021, associada a um NDVI máximo de apenas 0.85 e um SAVI de 0.67. A representação espacial da Figura 11 mostra o comportamento do LST, NDVI e SAVI ao longo dos anos. Os mapas do LST mostram manchas vermelhas na parte central do distrito (o centro comercial), representando temperaturas mais elevadas, enquanto as manchas azuis representam temperaturas mais baixas. A análise NDVI e SAVI mostra vestígios de vegetação dentro e em redor da área urbana. A presença de vegetação, mesmo em quantidades limitadas, sugere um potencial para mitigar o efeito ICU (Li, 2024).

A análise da variação da temperatura nocturna, a Figura 16 mostra um TST máximo de 33.1 °C em 4 de Dezembro de 2022, e um NDVI máximo de 0.8 com SAVI de 0.6, enquanto o NDVI máximo registado foi de 0.92, com TST correspondente de 25 °C em 30 de Janeiro de 2017 (Figura 15).

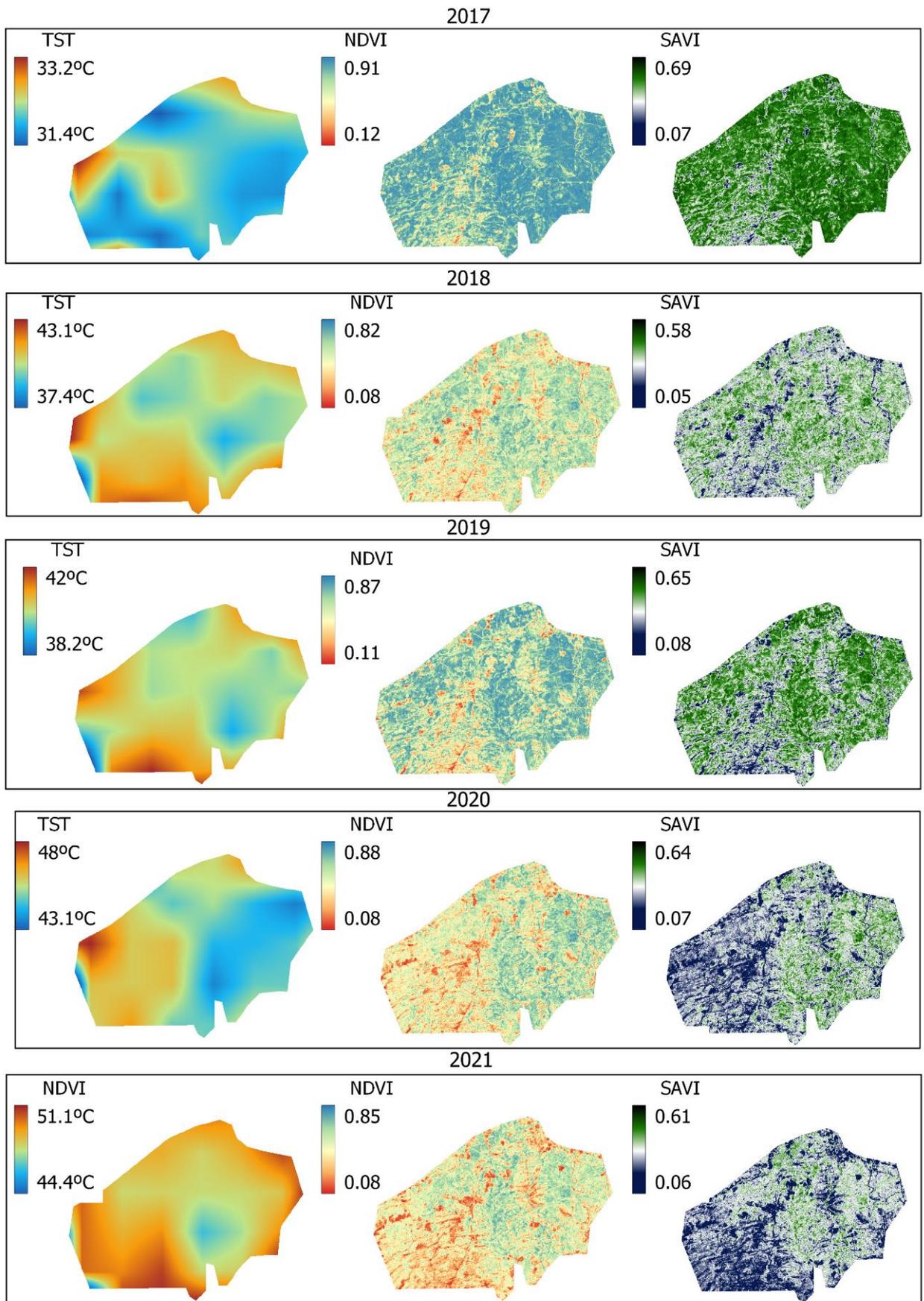


Figura 9. Mapeamento da TST diurna, NDVI e SAVI, da área vegetada

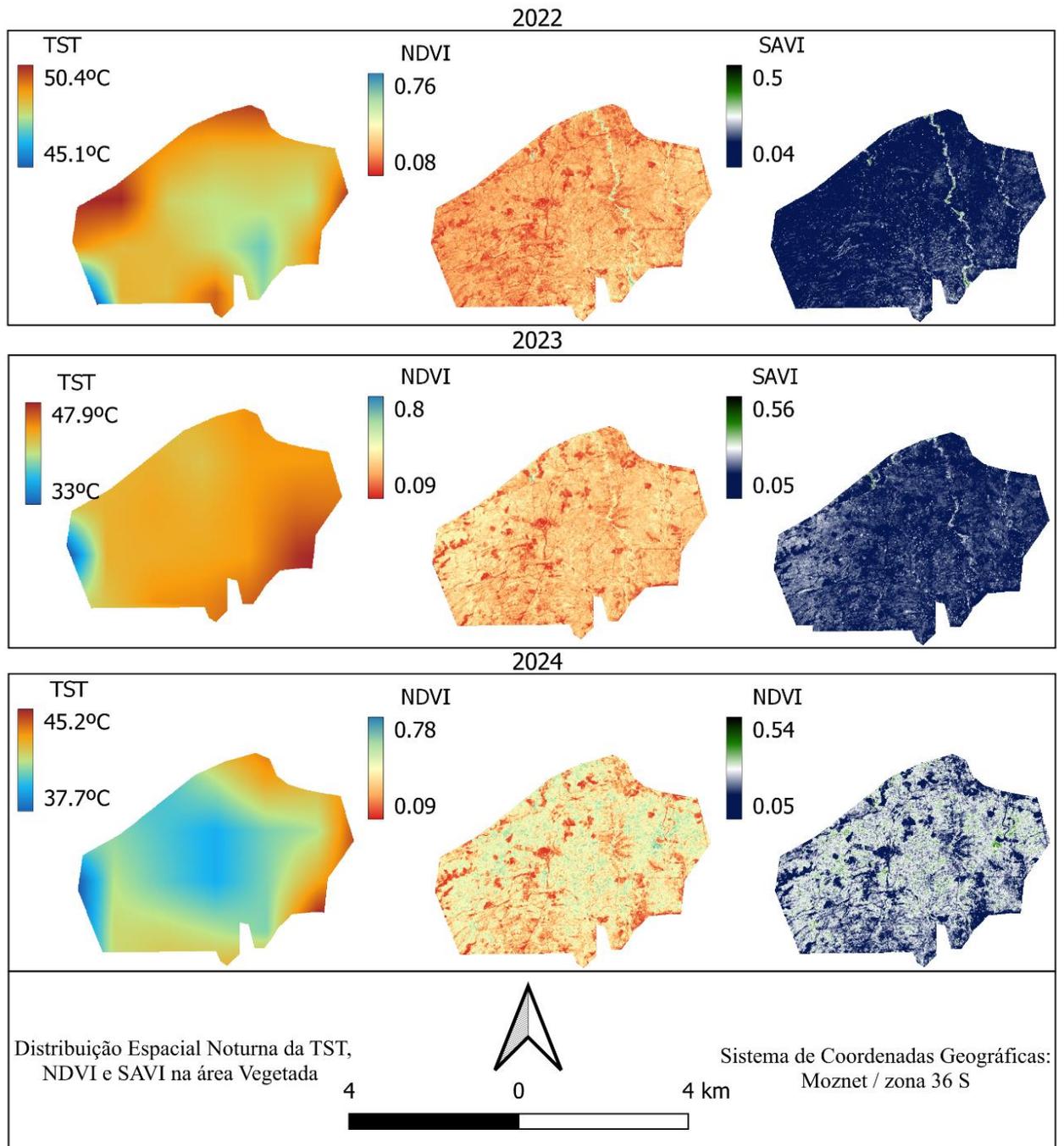


Figura 10. Mapeamento da TST diurna, NDVI e SAVI, da área vegetada

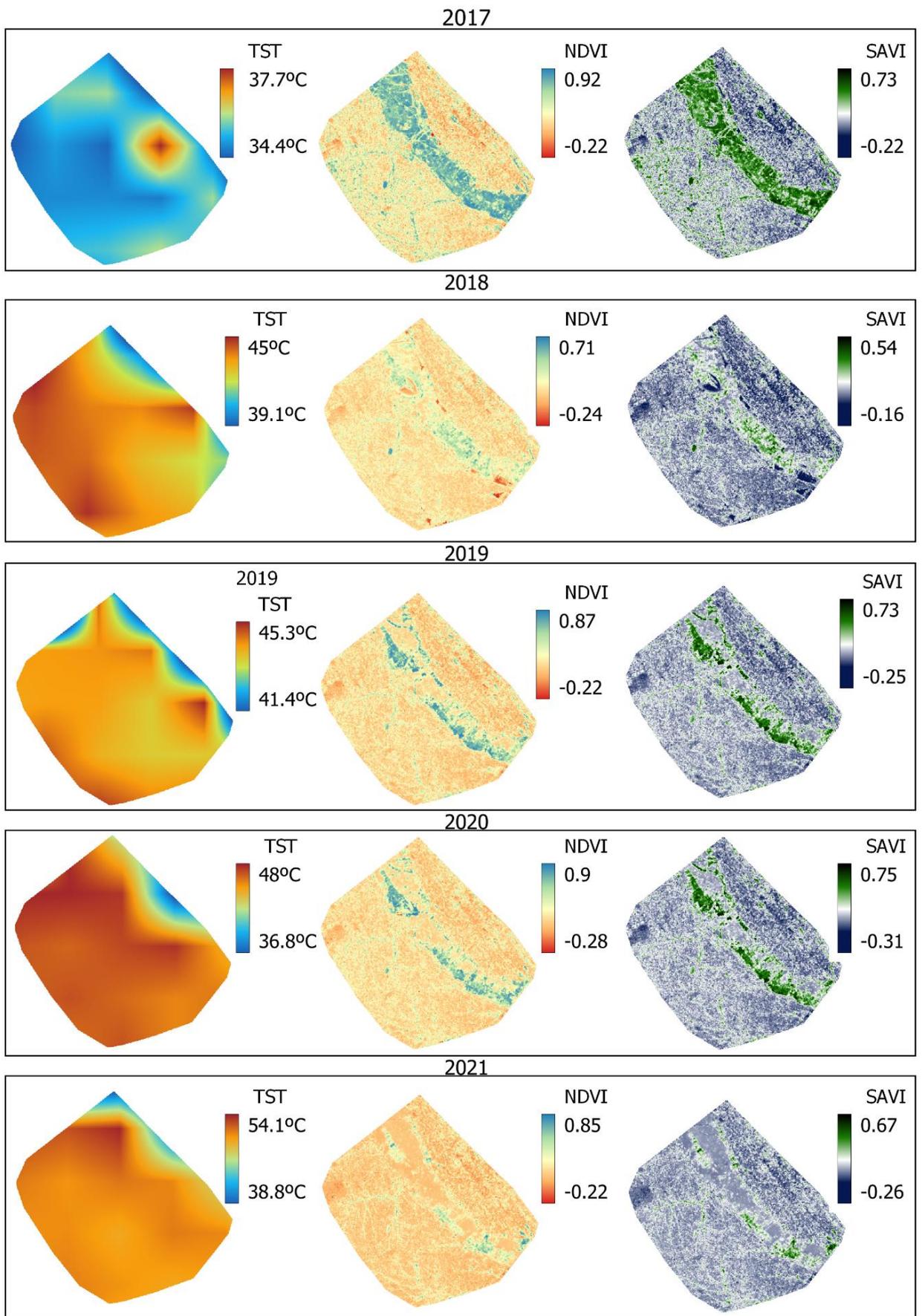


Figura 11. Mapeamento da TST diurna, NDVI e SAVI, do centro urbano

F

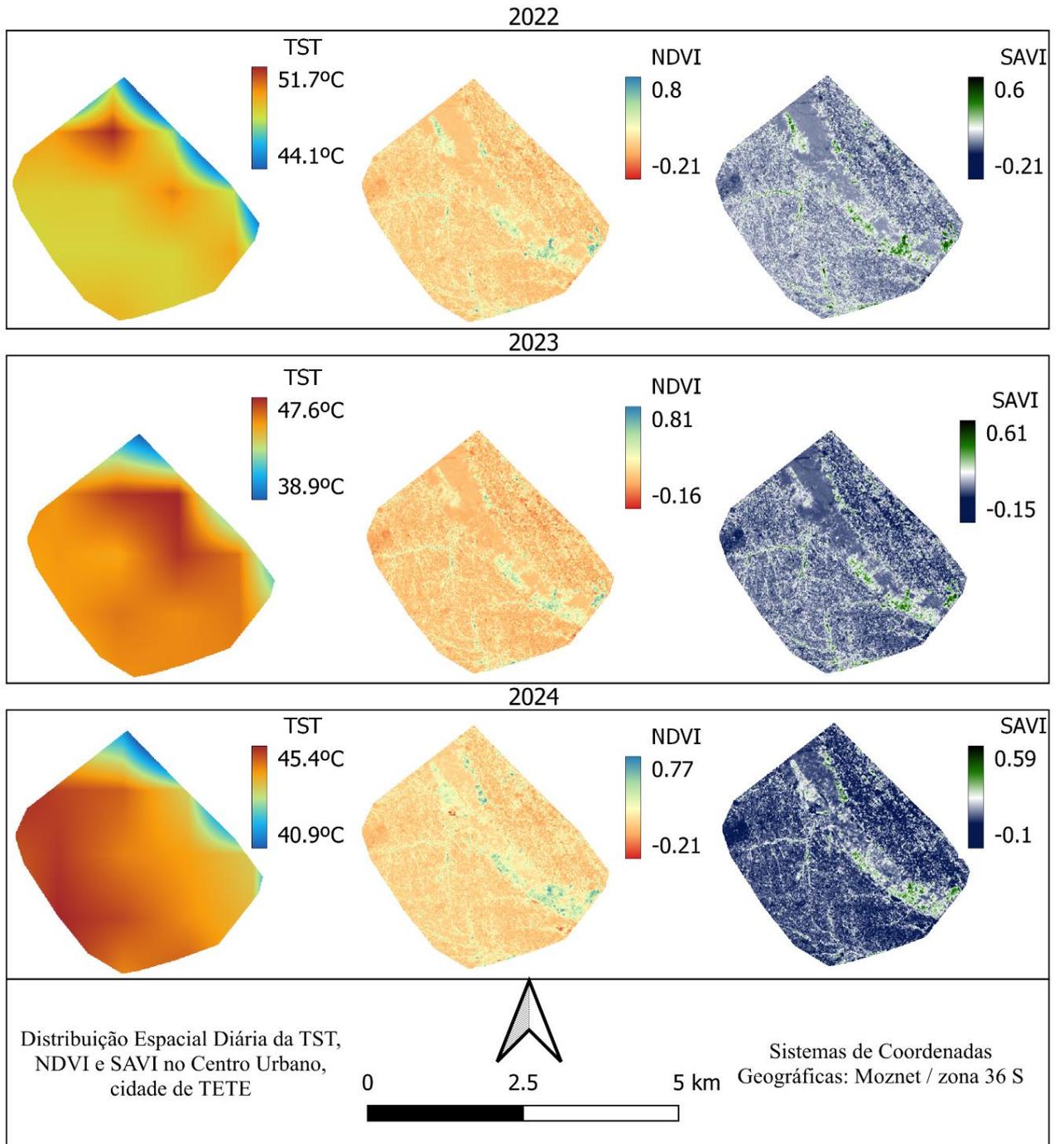


Figura 12. Mapeamento da TST diurna, NDVI e SAVI, do centro urbano

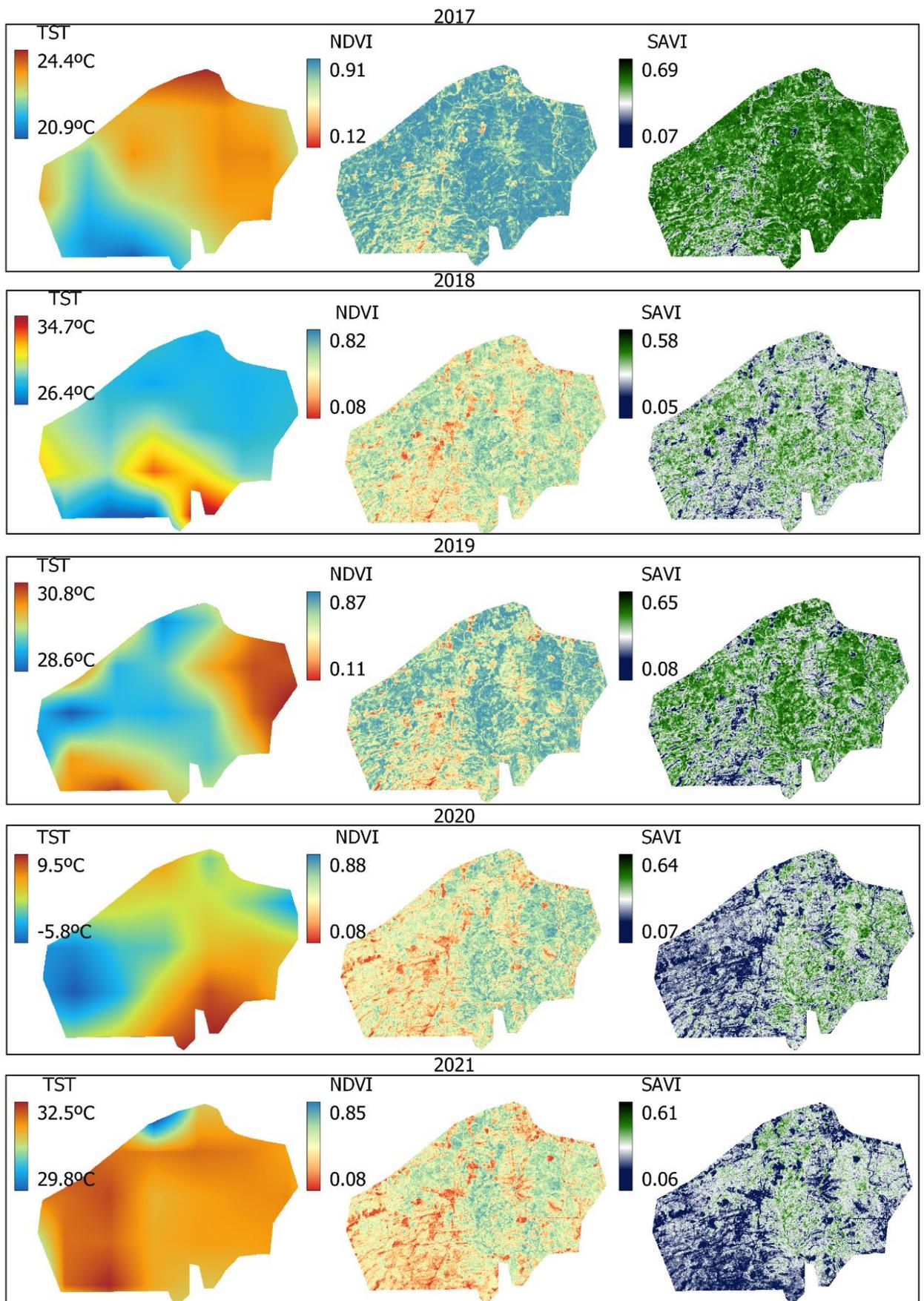


Figura 13. Mapeamento da TST noturna, NDVI e SAVI, da área vegetada

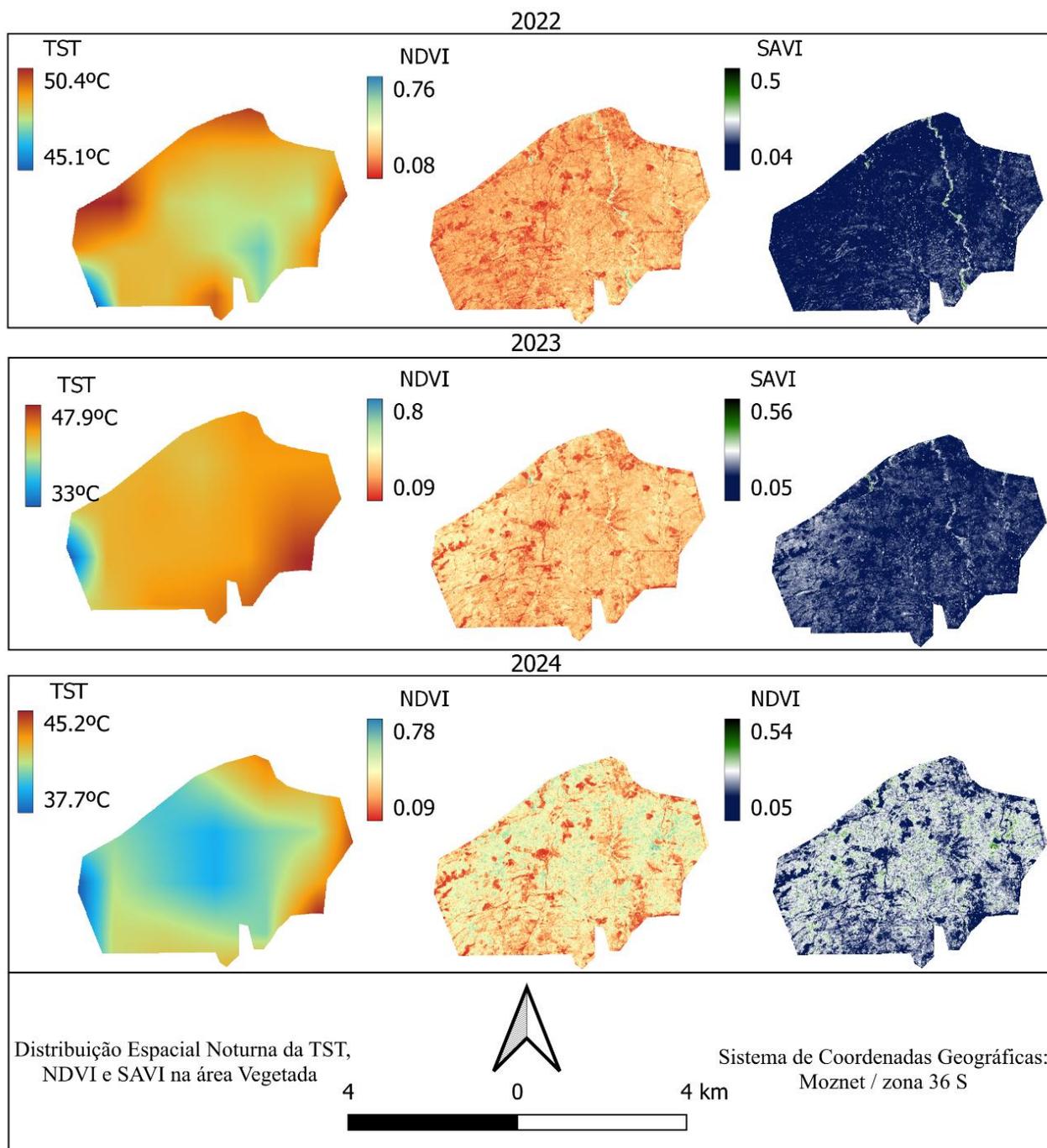


Figura 14. Mapeamento da TST noturno, NDVI e SAVI, da área vegetada

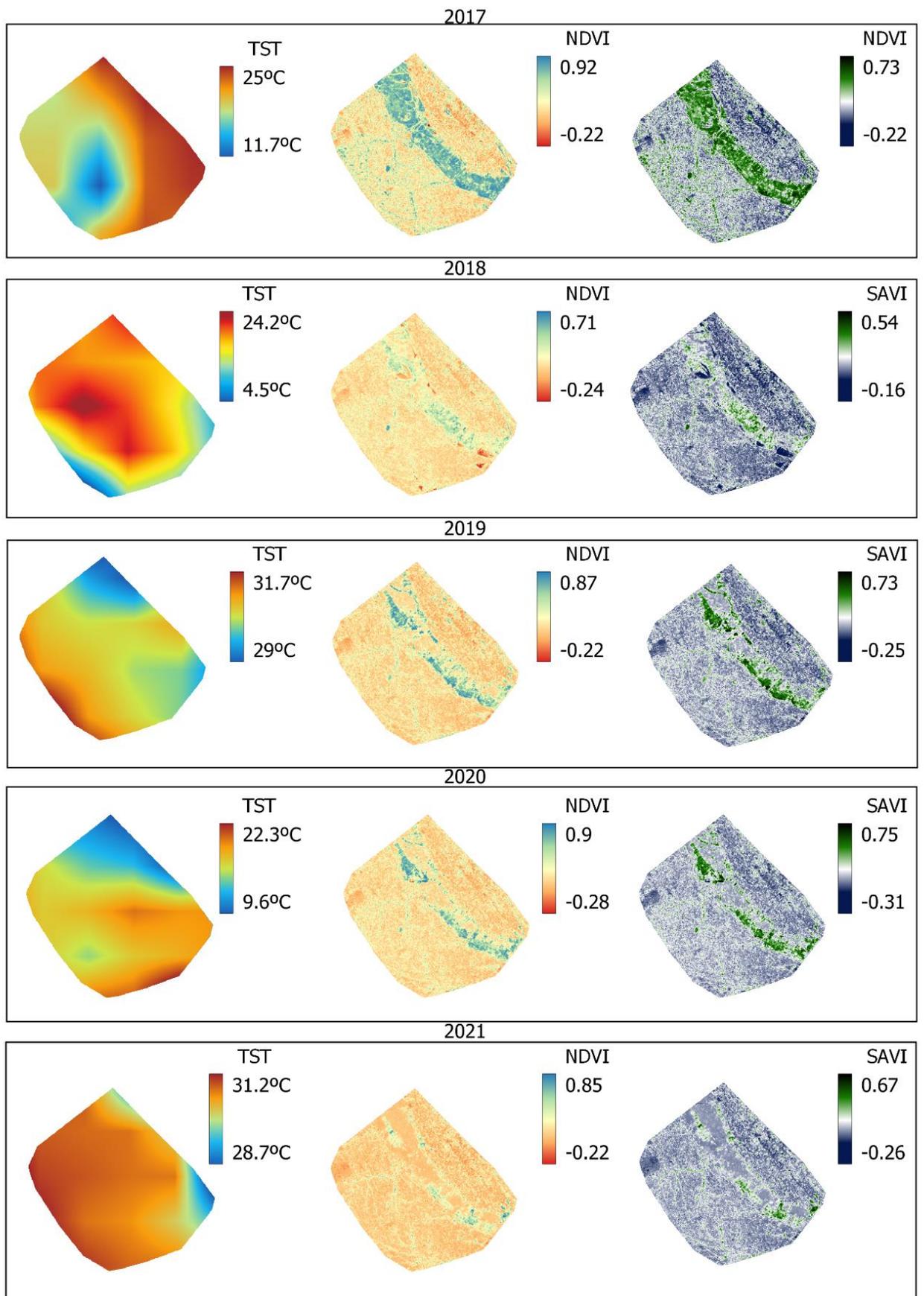


Figura 15. Mapeamento da TST nocturna, NDVI e SAVI, do centro urbana

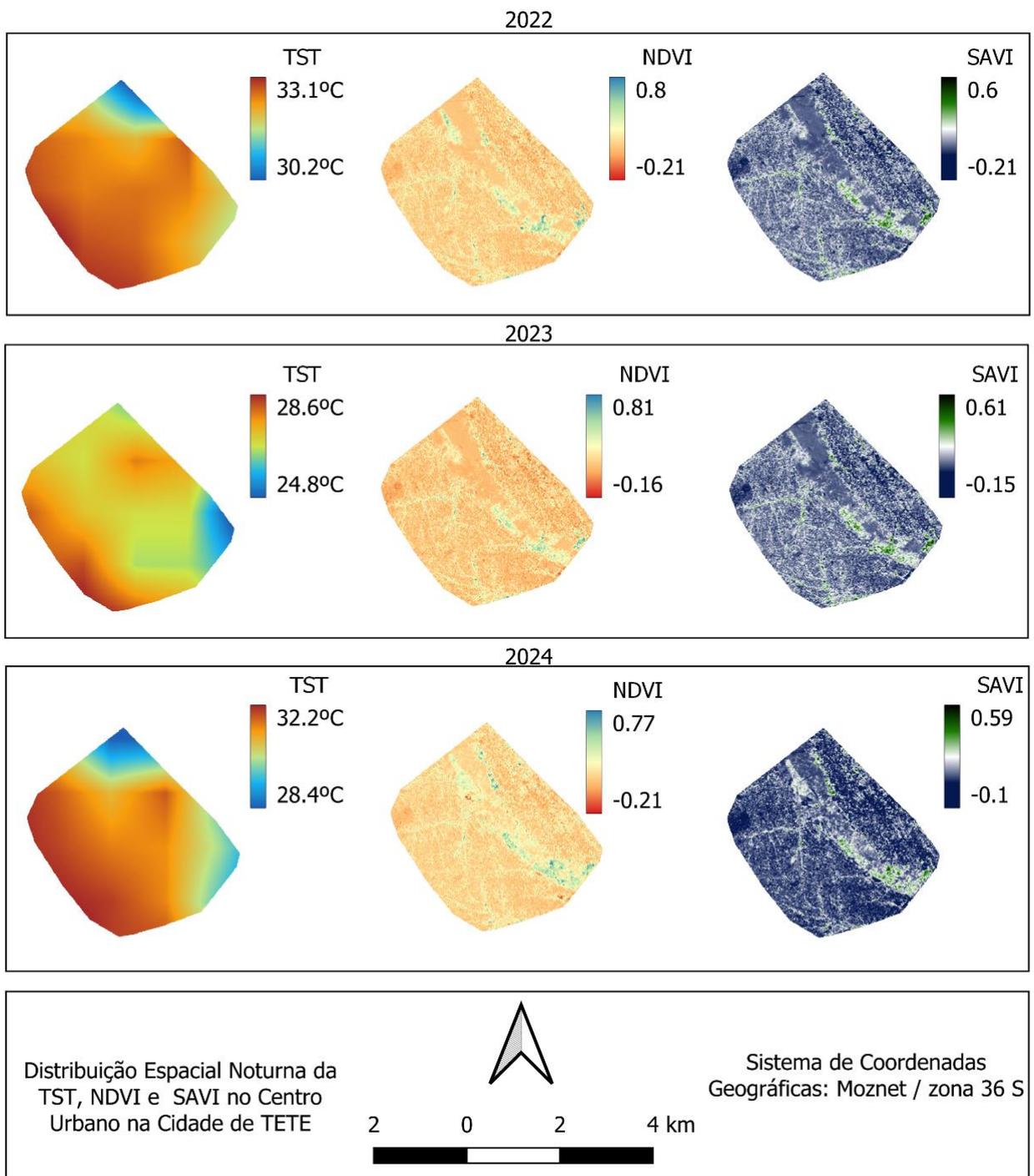


Figura 16. Mapeamento da TST nocturna, NDVI e SAVI, do centro urbano

5.4. Análise Comparativa da Dinâmica Térmica Superficial

Esta secção apresenta uma análise comparativa dos dados de temperatura da superfície urbana obtidos para o centro urbano e área vegetada. A análise centra-se na identificação de padrões e diferenças nas temperaturas diurnas e nocturnas, explorando possíveis explicações para as variações observadas e reconhecendo limitações nos dados.

As figuras 16 e 17 ilustram a variação diária da temperatura de superfície urbana para o centro urbano e área vegetada. Em todas as imagens diárias, as temperaturas médias na área vegetada foram consistentemente mais baixas do que no centro urbano. A diferença mínima de TST foi de 0,24 °C, observada no dia 4 de Dezembro de 2022, com centro urbano a registar uma temperatura média de 48,74 °C e área vegetada com 48,50 °C. E a diferença máxima de TST atingiu os 3,81 °C no dia 20 de Dezembro de 2019, onde o centro urbano registou uma temperatura média de 44,02 °C e área reservada 40,21 °C. As temperaturas mais baixas são consistentes na área vegetada com a menor inércia térmica esperada e maior cobertura vegetal.

A análise comparativa da TST nocturna entre a área vegetada e centro urbano (figura 18 e 19) reflete na maioria os resultados diurnos, sendo que a área vegetada apresenta temperaturas mais baixas na maioria dos casos. A diferença máxima de temperatura foi de 14,89 °C no dia 24 de Dezembro de 2024, com o centro urbano a registar uma temperatura média de 16,73 °C e área vegetada 1,84 °C. No entanto, a 29 de Janeiro de 2017, 5 de Dezembro de 2018 e 29 de Dezembro de 2021, a área vegetada apresentou temperaturas ligeiramente superiores ao centro urbano. A diferença foi de -2,67 °C no dia 29 de Janeiro de 2017 (média do centro urbano: 20,3 °C, média da área vegetada: 23,0 °C), no dia 5 de Dezembro de 2018 a diferença foi de -11,4 °C (média do centro urbano: 18,04 °C, média da área vegetada: 29,43°C) e -1,2 °C no dia 29 de Dezembro de 2021 com média do centro urbano: 30,65 °C e média da área vegetada: 31,85 °C. Estas excepções exigem investigação mais aprofundada. As temperaturas mais baixas no centro urbano nestas datas específicas são atribuídas à cobertura de nuvens e ao assombreamento, que reduziram a radiação solar e, posteriormente, diminuíram as temperaturas à superfície. Os dados horários da plataforma INAM confirmam a precipitação nestes dias, reforçando ainda mais a influência da cobertura de nuvens e da precipitação na TST no momento da passagem do satélite Sentinel 3. A presença de densa cobertura de nuvens no dia 29 de Janeiro de 2017, 5 de Dezembro de 2018 e 29 de Dezembro de 2021, no centro urbano, é um factor significativo a considerar. O impacto da cobertura de nuvens na intensidade da ICUs é um fenómeno complexo, sendo necessária mais investigação para compreender completamente a sua influência (Luo, 2020).

A cobertura de nuvens, como discutido anteriormente, afecta significativamente a precisão das medições de temperatura em determinados dias. Além disso, a resolução espacial dos dados de satélite sentinel 3 é

um factor crítico que afecta a capacidade de capturar variações de temperatura de pequena escala, especialmente em áreas urbanas e regiões costeiras (Mehta, 2023). A resolução espacial de 1000 metros do Sentinel 3, por exemplo, pode não ser suficiente para representar adequadamente a heterogeneidade térmica de áreas urbanas densamente construídas, onde a temperatura pode variar significativamente entre ruas, edifícios e espaços verdes (Li, 2024). Esta limitação é ainda mais acentuada em áreas onde a transição entre ambientes urbanos e zonas aquáticas pode ocorrer em distâncias curtas (Fahrezi, 2024). A resolução espacial grosseira pode levar a uma mistura de pixels, ou seja, um único píxel pode representar uma mistura de diferentes tipos de superfície (água, vegetação, construções), resultando em valores de temperatura de superfície médios que não refletem a realidade local (Yadav, 2023). Isso dificulta a análise detalhada da influência de elementos urbanos específicos na TST em cidades como Tete com uma rede Hidrográfica que atravessa o centro da cidade. Métodos de interpolação espacial também podem ser utilizados para melhorar a resolução dos dados, como o presente trabalho, mas é importante considerar as incertezas associadas a esses métodos (Kln, 2024). A combinação de dados de diferentes sensores e resoluções pode ser uma estratégia eficaz para superar as limitações de cada fonte de dados individualmente (Kln, 2024)

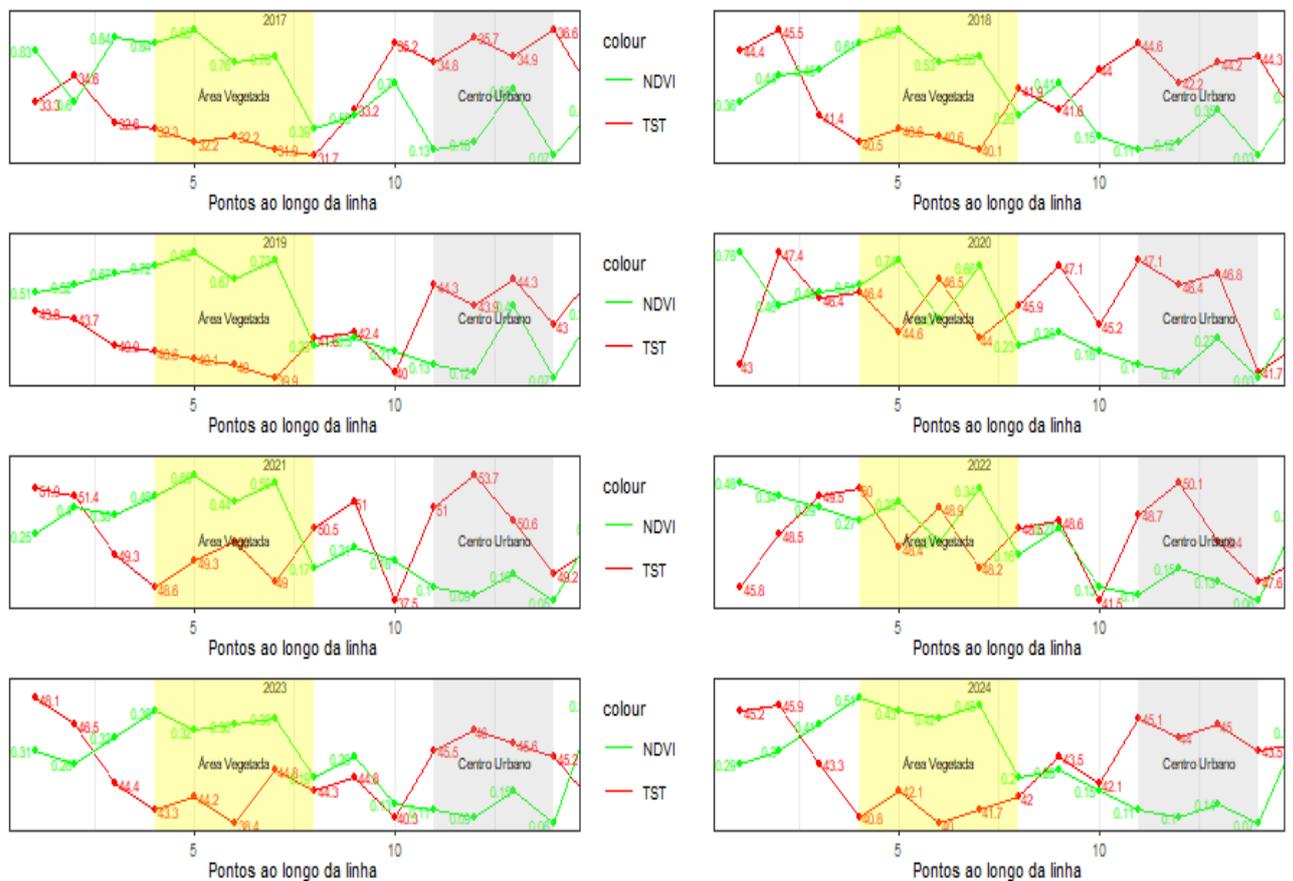


Figura 17. Comparação da TST diária e do NDVI do centro urbano e área vegetada

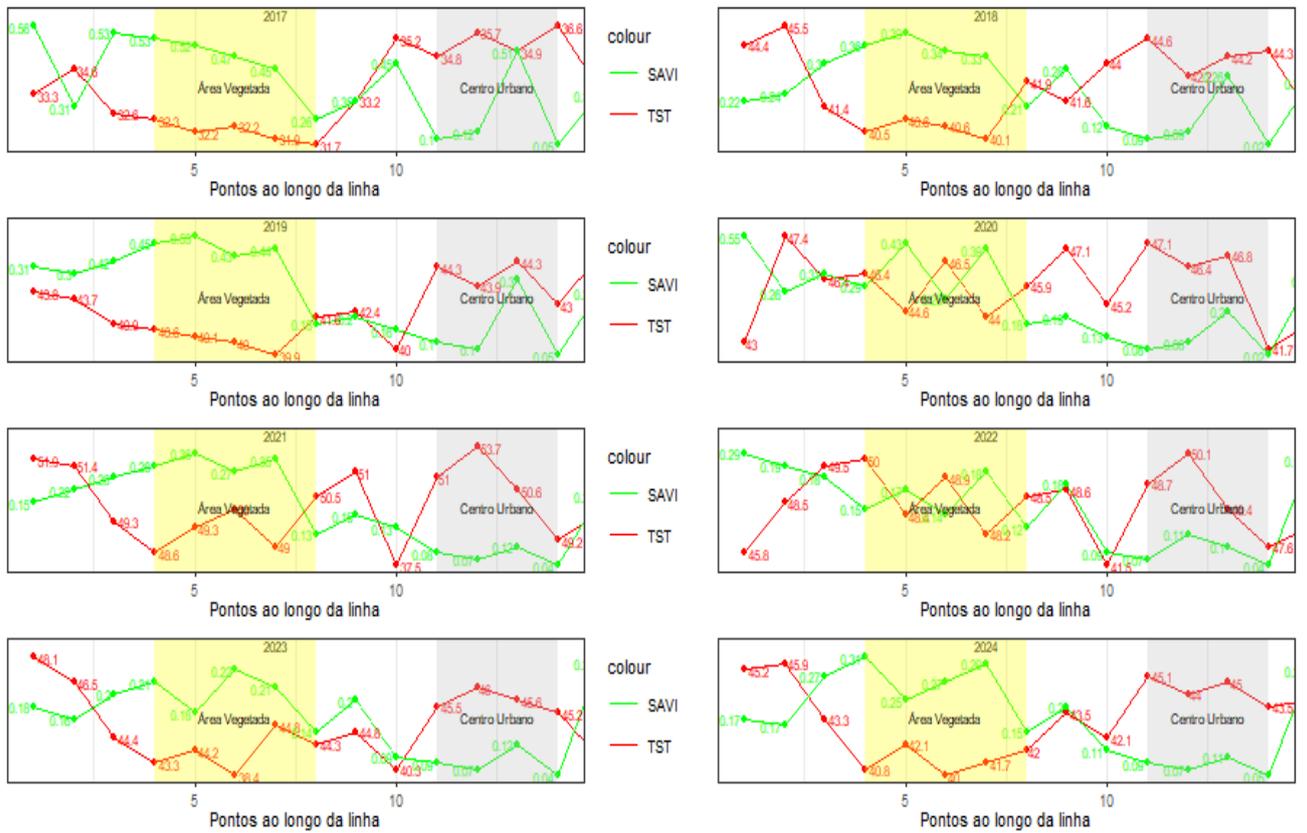


Figura 18. Comparação da TST diária e do SAVI do centro urbano e área vegetada

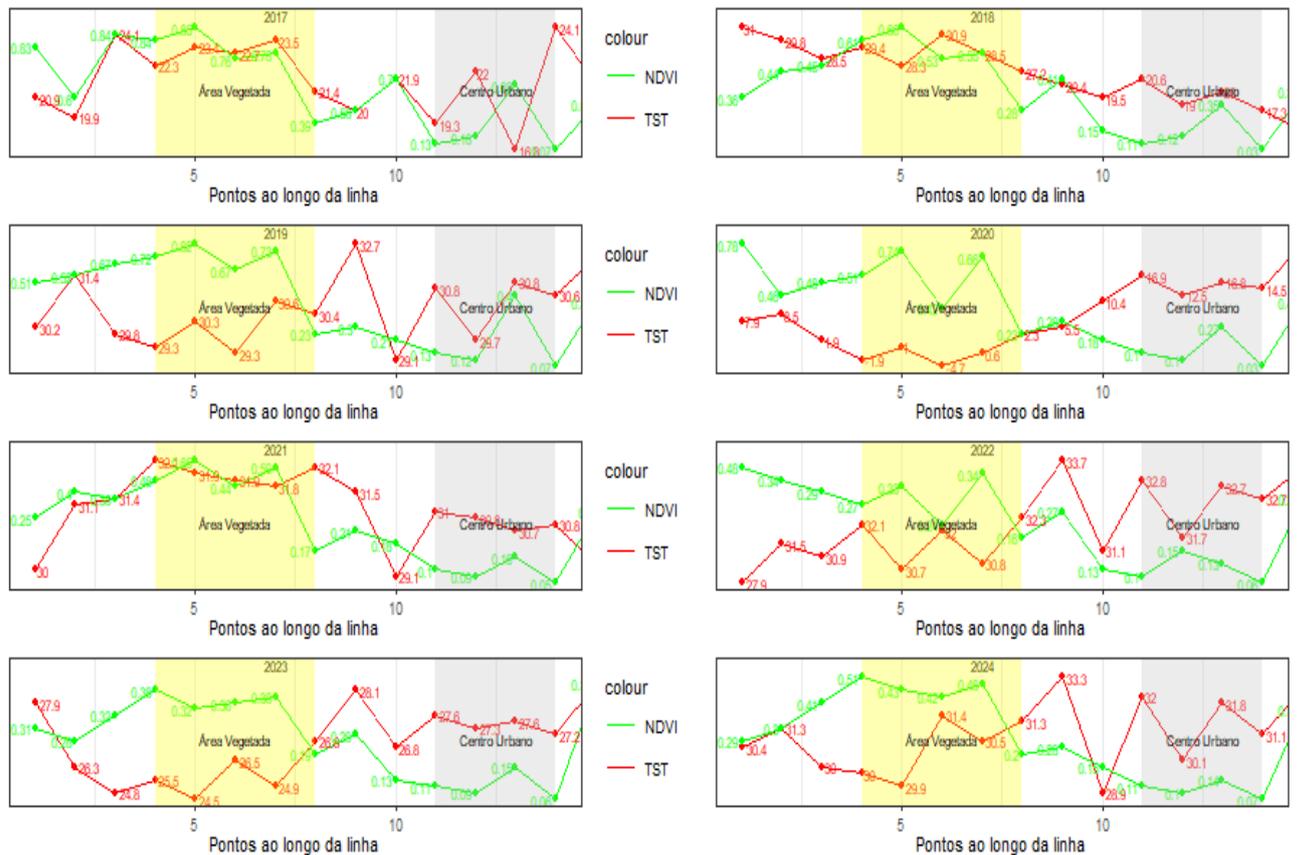


Figura 19. Comparação da TST noturna e do NDVI do centro urbano e área vegetada

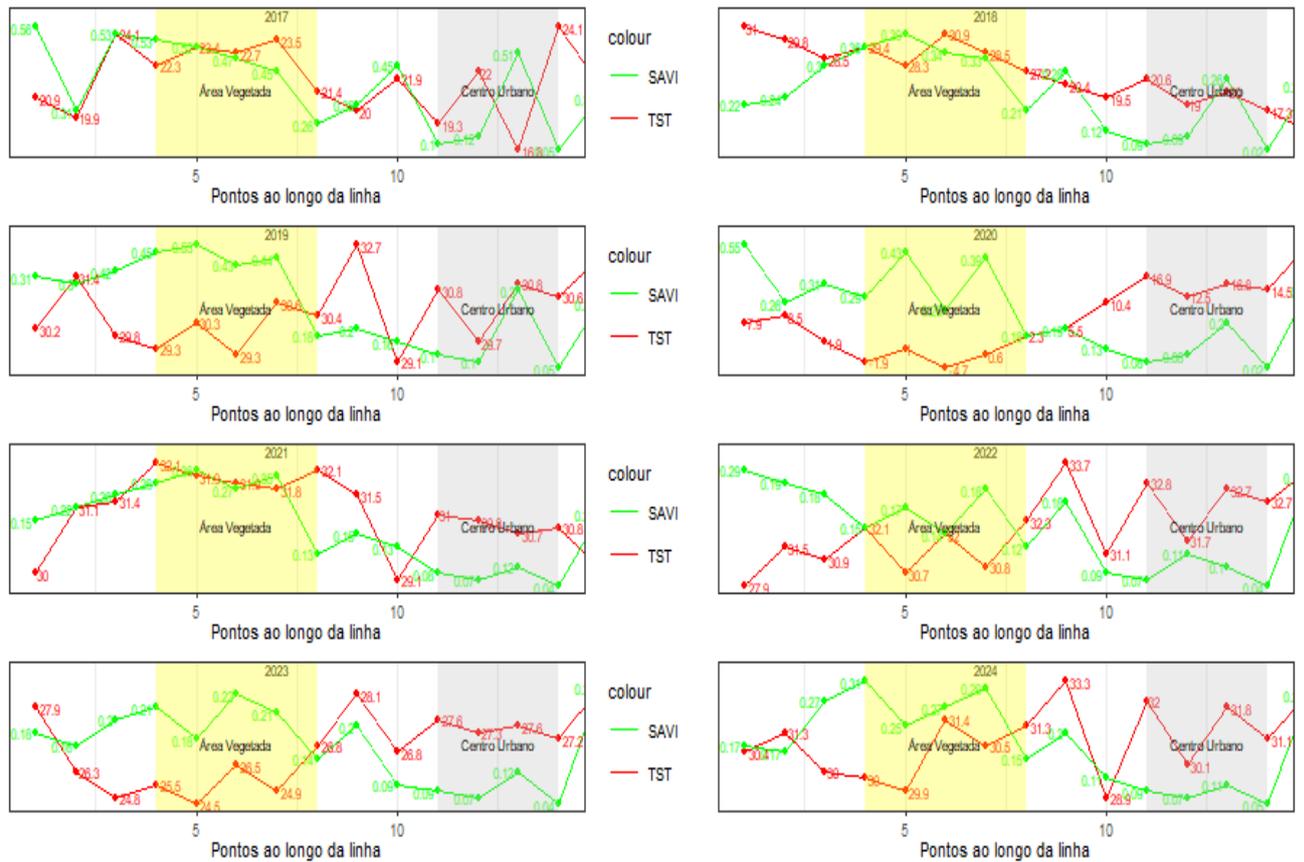


Figura 20. Comparação da TST nocturna e do SAVI do centro urbano e área vegetada

5.5. Intensidade e Magnitude das Ilhas de Calor Urbano

Fernández García (1996) estabeleceu critérios para classificar a intensidade e a magnitude das ilhas de calor, baseando-se nas diferenças de temperatura entre áreas urbanas e rurais. Uma ilha de calor é considerada de baixa intensidade quando a variação entre as temperaturas mais altas e mais baixas está entre 0 °C e 2 °C; de intensidade moderada, quando essa variação fica entre 2 °C e 4 °C; de alta intensidade, quando varia de 4 °C a 6 °C; e de intensidade muito alta, quando ultrapassa 6 °C.

A análise da intensidade das Ilhas de Calor Urbano (ICU) entre o centro urbano e uma área vegetada em Tete, no período de 2017 a 2024, revela uma variabilidade significativa ao longo dos anos entre os períodos diurno e nocturno. A classificação da magnitude da ICU foi realizada com base nos parâmetros de Fernández García (1996), permitindo uma compreensão mais aprofundada da dinâmica térmica entre as duas áreas.

Nos anos 2017 e 2018, durante o dia, observou-se uma ICU de média magnitude, com diferenças de temperatura de 3.30 °C e 2.94 °C, respectivamente. Contudo, o período nocturno apresentou valores negativos (nulos), com -2.68 °C em 2017 e um valor negativo expressivamente de -11.4 °C em 2018. A

diminuição ou inversão da magnitude da ICU à noite pode estar relacionada à influência da cobertura de nuvens no momento da coleta de dados, afectando o balanço radiactivo na área urbana.

No ano de 2019 a ICU diurna atingiu novamente a média magnitude (3.81 °C), enquanto a intensidade nocturna diminuiu para a fraca magnitude (0.74 °C). Esse padrão sugere uma maior absorção de radiação solar pelas superfícies urbanizadas durante o dia, intensificando o calor. A menor intensidade nocturna pode ser atribuída à liberação gradual do calor armazenado, embora ainda mantendo uma leve diferença térmica.

No ano de 2020 verificou-se uma ICU diurna de fraca magnitude (0.94 °C), contrastando com uma magnitude muito forte à noite (14.9 °C). Este resultado atípico pode estar fortemente influenciado pelas condições atmosféricas, como a cobertura de nuvens, que potencialmente intensificou a retenção de calor sobre a área urbana durante a noite.

Em 2021 e 2022, estes anos apresentaram padrões consistentes de fraca magnitude da ICU durante o dia (1.68 °C e 0.24 °C, respectivamente). No período nocturno, observou-se magnitude nula em 2021 (-1.20 °C) e fraca magnitude em 2022 (0.99 °C).

Por fim, os anos de 2023 e 2024, em 2023, a ICU manteve-se na fraca magnitude tanto durante o dia (2.0 °C) quanto à noite (1.64 °C). Em 2024, a ICU diurna retornou à média magnitude (3.28 °C), enquanto a nocturna permaneceu na fraca magnitude (0.91 °C), seguindo um padrão semelhante ao observado em 2019.

Tabela 4. Resultados das ilhas de calor Urbano de Superfície (ICU).

Ilhas de Calor de Superfície Urbana, Cidade de Tete		
	Dia	Noite
2017	3.30	-2.68
2018	2.94	-11.4
2019	3.81	0.74
2020	0.94	14.9
2021	1.68	-1.20
2022	0.24	0.99
2023	2.0	1.64
2024	3.28	0.91

Tabela 5. Magnitudes e intensidades da ilha de calor

Magnitude	Intensidade
Fraca	0°C a 2°C
Moderada (média)	2°C a 4°C
Forte	4°C a 6°C
Muito Forte	Acima de 6

Fonte: adaptado Fernández García (1996)

5.6. Análise Mann-Kendall para ICU no período diurno e noturno.

A análise temporal da ICU entre a área vegetada e o centro urbano da cidade de Tete, utilizando o teste de Mann-Kendall aplicado a dados diurnos e noturnos do Sentinel-3 entre 2017 e 2024, revela padrões distintos na possível evolução do efeito ilha de calor urbana (ICU) ao longo do tempo.

Os resultados do teste de Mann-Kendall para os dados diurnos (figura 19) indicaram uma Estatística S de -6 e uma estatística de Teste Z de -0.6186, resultando em um valor-p de 0.5362. Com um nível de significância de 0.05, a decisão foi de não rejeitar a hipótese nula, sugerindo a ausência de uma tendência estatisticamente significativa na diferença de temperatura diurna entre as áreas analisadas. Contudo, a interpretação da tendência foi negativa, indicando uma ligeira diminuição na intensidade do ICU diurno durante o período estudado, embora essa diminuição não seja estatisticamente comprovada.

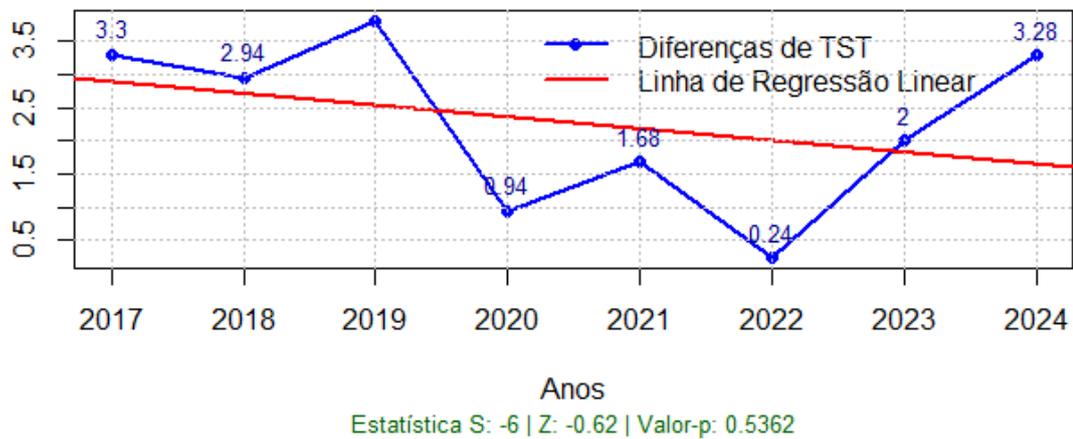


Figura 21. Tendência da ICU diária.

Em contraste, a análise dos dados noturnos (figura 20) revelou uma Estatística S de 12 e uma Estatística de Teste Z de 1.3609, com um valor-p de 0.1735. Similarmente aos resultados diurnos, a decisão foi de não rejeitar a hipótese nula, apontando para a ausência de uma tendência estatisticamente significativa no ICU noturno. No entanto, a interpretação da tendência foi positiva, sugerindo um ligeiro aumento na diferença de temperatura noturna entre as áreas seleccionadas ao longo do tempo, apesar de não atingir significância estatística.

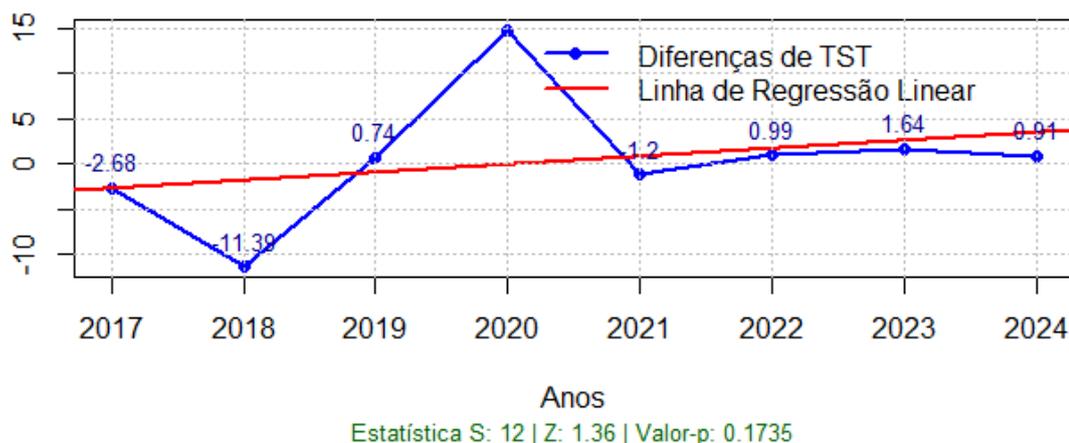


Figura 22. Tendência da ICU nocturna entre a área vegetada e o centro urbano.

A comparação dos resultados entre os períodos diurno e nocturno revela uma dinâmica complexa na possível evolução do ICU em Tete. Enquanto a análise diurna sugere uma ligeira tendência de diminuição da diferença de temperatura entre o centro urbano e a área vegetada, a análise nocturna aponta para uma ligeira tendência de aumento dessa diferença. Ambas as tendências, contudo, não são estatisticamente significativas ao nível de 0.05, indicando que não podemos afirmar com confiança que o ICU diurno tenha diminuído ou que o ICU nocturno tenha aumentado de forma consistente durante o período de 2017 a 2024, com base neste teste específico.

A divergência nas tendências observadas entre o dia e a noite pode ser atribuída às diferentes dinâmicas de aquecimento e resfriamento das superfícies urbanas e vegetadas. Durante o dia, materiais urbanos como asfalto e concreto absorvem mais radiação solar, levando mais tempo para esfriar. A ligeira tendência negativa na diferença diurna pode, hipoteticamente, estar relacionada a factores como uma possível diminuição da cobertura vegetal em algumas áreas da área Vegetada, mudanças nos materiais de construção ou até mesmo variações climáticas regionais que afectam ambas as áreas de forma semelhante durante o dia.

Por outro lado, a tendência positiva (embora não significativa) observada durante a noite pode reflectir a lenta liberação do calor armazenado pelo material urbano ao longo do dia. Um possível aumento na densidade ou extensão das áreas urbanizadas em Tete durante o período analisado poderia intensificar esse efeito de retenção de calor nocturno, resultando em temperaturas mais elevadas no centro urbano em comparação com a área vegetada, que tende a perder calor mais rapidamente através da radiação e evapotranspiração.

O fato de nenhuma das tendências ser estatisticamente significativa ressalta a complexidade do fenómeno do ICU e a necessidade de cautela ao interpretar os resultados. Vários factores podem contribuir para

essa ausência de significância, incluindo a duração do período de análise (8 anos pode ser relativamente curto para detectar tendências de longo prazo), a resolução espacial dos dados do Sentinel-3, a selecção específica das áreas urbanas e vegetadas, e a influência de outros factores ambientais e socioeconómicos não considerados directamente nesta análise.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. Conclusão

A presente investigação dedicou-se a analisar a influência da distribuição espacial da cobertura vegetal na formação e intensificação de ilhas de calor urbanas (ICUs) na cidade de Tete, utilizando técnicas de detecção remota. Através da análise integrada da Temperatura da Superfície Terrestre (TST) e dos índices de vegetação NDVI e SAVI, foi possível identificar e caracterizar o efeito ICU na cidade ao longo do período de 2017 a 2024.

Os resultados confirmam a existência de um diferencial térmico significativo entre o centro urbano, caracterizado pela predominância de superfícies impermeáveis e escassa vegetação, e uma área de referência com maior cobertura vegetal, a área vegetada.

A análise detalhada da TST revelou que as áreas urbanizadas de Tete apresentam temperaturas de superfície consistentemente mais elevadas, tanto durante o dia quanto à noite, em comparação com a área vegetada. Este padrão sublinha o papel crucial da substituição da vegetação por materiais de construção com alta capacidade de absorção de calor e baixa evapotranspiração na génese das ICUs.

A comparação directa entre o centro urbano e a área vegetada quantificou a intensidade e magnitude da ICU, demonstrando uma variabilidade inter-anual e entre os períodos diurno e nocturno, influenciada por factores como a radiação solar, as propriedades térmicas das superfícies urbanas e, em alguns casos, pelas condições atmosféricas.

A aplicação do teste de Mann-Kendall para avaliar tendências temporais na intensidade da ICU não evidenciou alterações estatisticamente significativas no período estudado. No entanto, as ligeiras tendências observadas sugerem uma dinâmica complexa que merece atenção em estudos futuros com um horizonte temporal mais extenso. A investigação também reconheceu as limitações inerentes ao uso de dados de satélite com resolução espacial de 1000 metros, que podem não capturar a heterogeneidade térmica em micro escala dentro do ambiente urbano de Tete, e a influência da cobertura de nuvens em algumas das medições de temperatura.

Apesar destas limitações, os resultados desta tese fornecem evidências robustas da presença e da dinâmica das ilhas de calor urbanas em Tete, destacando o papel da cobertura vegetal como um fator de mitigação.

A correlação inversa observada entre a densidade da vegetação e as temperaturas de superfície reforça a importância do planejamento urbano que integre e preserve espaços verdes para reduzir os impactos negativos das ICUs, como o aumento do consumo de energia, o desconforto térmico e os potenciais riscos à saúde da população.

6.2. Recomendações

Com base nos resultados desta investigação, recomenda-se enfaticamente a integração e expansão de espaços verdes no planeamento urbano da cidade de Tete como uma estratégia fundamental para mitigar a intensidade das ilhas de calor urbanas. A análise consistente da menor temperatura de superfície na área vegetada sublinha o papel crucial da cobertura vegetal no arrefecimento do ambiente urbano. Portanto, políticas públicas que incentivem a criação de parques, jardins, telhados verdes e a preservação da vegetação existente, especialmente nas áreas mais densamente construídas, são essenciais. Adicionalmente, considerando a influência da cobertura de nuvens e a limitação da resolução espacial dos dados do Sentinel-3, sugere-se a realização de estudos futuros que incorporem dados de satélite de maior resolução e dados meteorológicos locais para uma análise mais detalhada e precisa da dinâmica térmica urbana.

Para além das estratégias baseadas na vegetação, recomenda-se a investigação e implementação de outras medidas de mitigação das ICUs, como a utilização de materiais de construção com maior albedo, a otimização do desenho urbano para promover a ventilação e o sombreamento, e a gestão eficiente do calor antropogénico. A realização de estudos de modelagem climática urbana poderá auxiliar na avaliação da eficácia de diferentes cenários de intervenção. Finalmente, é crucial o desenvolvimento de planos de adaptação às ICUs que considerem os potenciais impactos na saúde pública e no consumo de energia, envolvendo a comunidade local e as partes interessadas no processo de planeamento e implementação de soluções sustentáveis para a cidade de Tete.

7. Referências

- Adeniran, I. A. Et Al. (2022). Cross-Comparison Between Sun-Synchronized And Geostationary Satellite-Derived Land Surface Temperature: A Case Study In Hong Kong. *Remote Sensing*. 10.3390/Rs14184444
- Adeniyi, O. D., Szabó, A., Tamás, J., & Nagy, A. (2020). Wheat Yield Forecasting Based On Landsat Ndvi And Savi Time Series.
- Allegrini, J., & Carmeliet, J. (2018). Simulations Of Local Heat Islands In Zürich With Coupled Cfd And Building Energy Models. *Urban Climate*, 24, 340-359.
- Almutairi, B., El, A., Belaid, M. A., & Musa, N. (2013). Comparative Study Of Savi And Ndvi Vegetation Indices In Sulaibiya Area (Kuwait) Using Worldview Satellite Imagery. *Int. J. Geosci. Geomat*, 1, 50-53.
- Amorim, M. C. D. C. T. (2017). O Sensoriamento Remoto No Diagnostico Das Ilhas De Calor Superficiais: Exemplos De Cidades De Porte Mdio E Pequeno Do Ambiente Tropical/Brasil. University Of Naples Federico Ii. <https://doi.org/10.18055/Finis6888>
- Amorim, M.C. (2019). Ilhas De Calor Superficiais: Frequência Da Intensidade E Variabilidade Espacial Em Cidade De Clima Tropical Continental. *Geo Uerj*.
- Arellano, B., Roca, J., Martínez, D., Serra, C., Lana, X., & Biere, R. (2021, October). Modelling Nighttime Air Temperature From Remote Sensing Imagery And Gis Data. In *Space, Satellites, And Sustainability Ii* (Vol. 11888, Pp. 78-87). Spie.
- Barbosa, H.P., & Amorim, M.C. (2021). Ilhas De Calor Urbanas Noturnas No Bairro Jardim Maracanã Em Presidente Prudente (São Paulo, Brasil). *Geografia Em Questão*.
- Barka, I., Bucha, T., Molnár, T., Móricz, N., Somogyi, Z., & Koreň, M. (2019). Suitability Of Modis-Based Ndvi Index For Forest Monitoring And Its Seasonal Applications In Central Europe. *Central European Forestry Journal*, 65(3-4), 206-217.
- Belgiu, M., & Stein, A. (2019). Spatiotemporal Image Fusion In Remote Sensing. *Remote Sensing*, 11(7), 818.
- Beltramone, G. Et Al. (2023). Comparison Between Air Temperature And Different Land Surface Temperature Satellite Products For The City Of Crdoba, Argentina. Workshop On Information Processing And Control. 10.1109/Rpic59053.2023.10530689

- Bernardes, S. Et Al. (2018). Image Processing And Analysis Methods. None. 10.14358/Mrs/Chapter7
- Bertoluzza, M. (2019). Novel Methods For Change Detection In Multitemporal Remote Sensing Images. None. None
- Boulos, M. Et Al. (2001). Health Geomatics: An Enabling Suite Of Technologies In Health And Healthcare. *Journal Of Biomedical Informatics*. 10.1006/Jbin.2001.1015
- Brenig, L. Et Al. (2008). Cloud Formation And Rainfalls Induced By An Artificial Solar Setting.
- Buckeridge, M. S. (2015). Arvores Urbanas Em So Paulo: Planejamento, Economia E Gua. University Of So Paulo. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142015000200006>
- Casagrande, B. G. Et Al. (2013). Preparao De Arquivos Climticos Futuros Para Avaliao Dos Impactos Das Mudanas Climticas No Desempenho Termoenergico De Edificaes. *Associao Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construdo*. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212013000400012>
- Chakraborty, T. Et Al. (2020). A Spatially Explicit Satellite-Derived Surface Urban Heat Island Database For Urbanized Areas In The United States: Characterization, Uncertainties, And Possible Applications. None. 10.31223/Osf.Io/59tf8
- Chen, C. Et Al. (2021). Enhanced Surface Urban Heat Islands Due To Divergent Urban-Rural Greening Trends. *Environmental Research Letters*. 10.1088/1748-9326/Ac36f8
- Chen, F., Yang, S., Yin, K., & Chan, P. (2017). Challenges To Quantitative Applications Of Landsat Observations For The Urban Thermal Environment. *Journal Of Environmental Sciences*, 59, 80-88 .
- Chigoma, A. D. E. (2004). Degradação Do Solo E Movimentos Populacionais No Posto Administrativo Urbano De Muatala-Cidade De Nampula . Uem.
- Coelho, A. L. N. Et Al. (2013). Temperatura De Superfcie Celsius Do Sensor Tirs/Landsat-8: Metodologia E Aplicaes. Universidade Federal De Gois. <https://doi.org/10.18227/1678-7226rga.v7i1.2996>
- De Lima Mendes, T. G., Et Al. (2019). Abordagem Científica Sobre Ilhas De Calor Em Recife-Pe. *Journal Of Environmental Analysis And Progress*, P001-013.

- Dimitrov, S., Iliev, M., Borisova, B., Semerdzhieva, L., & Petrov, S. (2024). A Methodological Framework For High-Resolution Surface Urban Heat Island Mapping: Integration Of Uas Remote Sensing, Gis, And The Local Climate Zoning Concept. *Remote Sensing*, 16(21), 4007.
- Donaghy, K.P. (2008). Smart Growth And Climate Change: Regional Development, Infrastructure And Adaptation. 10.1080/01944360802145990
- Du, H. Et Al. (2023). Contrasting Trends And Drivers Of Global Surface And Canopy Urban Heat Islands. *Geophysical Research Letters*. 10.1029/2023gl104661
- Dubreuil, V. Et Al. (2019). Climate Change In The Br 163 Region: A Multiscale Analysis.
- Esposito, A. Et Al. (2024). Urban Morphology And Surface Urban Heat Island Relationship During Heat Waves: A Study Of Milan And Lecce (Italy). *Remote Sensing*. 10.3390/Rs16234496
- Fard, B. J., Bhatia, U., & Ganguly, A. R. (2020). Mega Regional Heat Patterns In Us Urban Corridors. *Arxiv Preprint Arxiv:2011.13031*.
- Farina, A. (2012). Exploring The Relationship Between Land Surface Temperature And Vegetation Abundance For Urban Heat Island Mitigation In Seville, Spain.
- Fialho, E. S. (2012). Ilha De Calor: Reflexes Acerca De Um Conceito. None. <https://doi.org/10.5654/Actageo2012.0002.0004>
- Fusami, A. A. Et Al. (2020). Comparing The Effect Of Deforestation Result By Ndvi And Savi. None. 10.29322/Ijsrp.10.06.2020.P102110
- Gaida, W., Breunig, F. M., Galvão, L. S., & Ponzoni, F. J. (2020). Correção Atmosférica Em Sensoriamento Remoto: Uma Revisão. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 13(1), 229-248.
- Gantumur, S., Kharitonova, G. V., Stepanov, A. S., & Dubrovin, K. N. (2021, November). Assessment Of Soil Contamination Using Remote Sensing Data In The Tamsag-Bulag Oil Field, Mongolia. In *Iop Conference Series: Earth And Environmental Science* (Vol. 895, No. 1, P. 012013). Iop Publishing.
- Gaohon, D. (2013). Effect Of Urban Heat Island And Sea Breeze Front Superimposition On A Local Heavy Rainfall.
- García, F. F. (1996). *Manual De Climatologia Aplicada: Clima, Medio Ambiente Y Planificación*. Editorial Síntesis.

- Gartland, L. (2010). *Ilhas De Calor: Como Mitigar Zonas De Calor Em Áreas Urbanas*. São Paulo: Oficina De Textos.
- Garuma, G. F. (2022). How The Interaction Of Heatwaves And Urban Heat Islands Amplify Urban Warming. *Advances In Environmental And Engineering Research*. 10.21926/Aeer.2202022
- Golden, J. (2006). Photovoltaic Canopies: Thermodynamics To Achieve A Sustainable Systems Approach To Mitigate The Urban Heat Island Hysteresis Lag Effect. *None*. 10.1080/14786450600593139
- Govate, E. L. (2024). *Análise De Vulnerabilidade E Delineação Das Áreas De Protecção Dos Aquíferos De Nbartanda E De Matundo-Cidade De Tete, Moçambique* (Doctoral Dissertation, Universidade Eduardo Mondlane).
- Granero-Belinchn, C. Et Al. (2019). Night Thermal Unmixing For The Study Of Microscale Surface Urban Heat Islands With Trishna-Like Data. *Remote Sensing*. 10.3390/Rs11121449
- Gulambondo, j. E. C. (2025). Ambiente bioclimático da cidade de tete: desmistificando o mistério do calor intenso. *International journal semiarid*, 8(2), 178-192.
- Gyimah, R.R. (2023). The Hot Zones Are Cities: Methodological Outcomes And Synthesis Of Surface Urban Heat Island Effect In Africa. *Cogent Social Sciences*, 9.
- Habibie, M. I. Et Al. (2021). Mapping And Monitoring Urban Areas Using Sentinel 1 And Sentinel 2. *None*. 10.1109/Agers53903.2021.9617263
- Hashim, N. Et Al. (2007). Mapping Urban Heat Island Phenomenon: Remote Sensing Approach. *None*. None
- Huang, J. Et Al. (2020). A Numerical Study On Mitigation Strategies Of Urban Heat Islands In A Tropical Megacity: A Case Study In Kaohsiung City, Taiwan. *Sustainability*. 10.3390/Su12103952
- Ibrahim, M. (2021). Mitigation Strategies Of The Urban Heat Island Over Greater Cairo Metropolitan Area, Egypt Utilizing Envi-Met Model. *None*. 10.21608/Cat.2022.214538
- Joshi, R. Et Al. (2015). Urban Heat Island Characterization And Isotherm Mapping Using Geo-Informatics Technology In Ahmedabad City, Gujarat State, India. *None*. 10.4236/Ijg.2015.63021

- Junior, I. C. M. Et Al. (2024). Maize Crop Detection Through Geo-Object-Oriented Analysis Using Orbital Multi-Sensors On The Google Earth Engine Platform. *Agriengineering*. 10.3390/Agriengineering6010030
- Kim, B. Et Al. (2020). Analysis Of Urban Heat Island (Uhi) Alleviating Effect Of Urban Parks And Green Space In Seoul Using Deep Neural Network (Dnn) Model. *Journal Of The Korean Institute Of Landscape Architecture*. 10.9715/Kila.2020.48.4.019
- Kocur-Bera, K., & Malek, A. (2024). Assessing The Feasibility Of Using Remote Sensing Data And Vegetation Indices In The Estimation Of Land Subject To Consolidation. *Sensors*, 24(23), 7736.
- Kueppers, L. Et Al. (2007). Irrigation Cooling Effect: Regional Climate Forcing By Landuse Change. *None*. 10.1029/2006gl028679
- Ladan, Et Al. (2023). The Potential Of Urban Green Infrastructure In Mitigating Urban Heat Islands In The Semi-Arid Regions. *International Journal Of Academic Research In Business And Social Sciences*. 10.6007/Ijarbss/V13-I6/17392
- Lathiifunnisa, R. Et Al. (2024). Climate Change And Surface Urban Heat Islands In Jakarta: Analysis Of Landsat Data And Ground Observations. *None*. 10.1117/12.3009649
- Li, H. Et Al. (2022). Characterizing Temporal Dynamics Of Urban Heat Island In A Rapidly Expanding City: A 39 Years Study In Zhengzhou, China. *Land*. 10.3390/Land11101838
- Li, K., & Yu, Z. (2008). Comparative And Combinative Study Of Urban Heat Island In Wuhan City With Remote Sensing And Cfd Simulation. *Sensors*, 8(10), 6692-6703.
- Li, Y., Wang, S., Zhang, S., Wei, M., Chen, Y., Huang, X., & Zhou, R. (2024). The Creation Of Multi-Level Urban Ecological Cooling Network To Alleviate The Urban Heat Island Effect. *Sustainable Cities And Society*, 114, 105786.
- Liu, H., Huang, B., Zhan, Q., Gao, S., Li, R., & Fan, Z. (2021). The Influence Of Urban Form On Surface Urban Heat Island And Its Planning Implications: Evidence From 1288 Urban Clusters In China. *Sustainable Cities And Society*, 71, 102987.
- Lo, Y. Et Al. (2020). U.K. Climate Projections: Summer Daytime And Nighttime Urban Heat Island Changes In Englands Major Cities. *Journal Of Climate*. 10.1175/Jcli-D-19-0961.1
- Loghin, V. (Nan). Vasile Loghin 317 Integrating Remote Sensing In Geographical Research. *None*.
None

- Lugassi, R., Zaady, E., Goldshleger, N., Shoshany, M., & Chudnovsky, A. (2019). Spatial And Temporal Monitoring Of Pasture Ecological Quality: Sentinel-2-Based Estimation Of Crude Protein And Neutral Detergent Fiber Contents. *Remote Sensing*, 11(7), 799.
- Mallick, C., & Yang, Y. (2015). Spatiotemporal Analysis Of Thermal Inequity: A Case Study Of Hong Kong. *New York, Ny: Landscape Architecture And Regional Planning*.
- Marghidan, C., van Aalst, M., Blanford, J., Maure, G., & Marrufo, T. (2023). Extreme heat alerts and impacts across Mozambique 2016–2022: gathering evidence from media articles. *AGILE: GIScience Series*, 4, 11.
- Mendili, L. E. Et Al. (2020). Towards A Multi-Temporal Deep Learning Approach For Mapping Urban Fabric Using Sentinel 2 Images. *Remote Sensing*. 10.3390/Rs12030423
- Monteiro C.A.F.(1976) Teoria E Clima Urbano.Série Teses E Monografias N°25.São Paulo: Universidade De São Paulo
- Muchangos, A. D. (1999). Moçambique Paisagens E Regiões Naturais.
- Mueller, C. Et Al. (2023). Mapping The Surface Urban Heat Island Effect Using The Landsat Surface Temperature Product. *Ieee International Geoscience And Remote Sensing Symposium*. 10.1109/Igarss52108.2023.10282386
- Munysi, M. (2024). Urban Heat Island Spatial Model For Climate Village Program Planning. *Journal Of Applied Data Sciences*. 10.47738/Jads.V5i2.223
- Muzaky, H., & Jaelani, L. M. (2019). Analisis Pengaruh Tutupan Lahan Terhadap Distribusi Suhu Permukaan: Kajian Urban Heat Island Di Jakarta, Bandung Dan Surabaya. *Jurnal Penginderaan Jauh Indonesia*, 1(2), 45-51.
- Na, J. (Nan). Research Progress On Urban Heat Island Effect Based On Energy Balance. *None*. None
- Nagare K. S. Et Al. (2024). Effective Storm Water Management In The Urban Area A Case Study. *International Journal Of Scientific Research In Science Engineering And Technology*. 10.32628/Ijsrset24113148
- Nicole, W. (2014). Beyond Spatial Relationships: Residential Greenness And Birth Outcomes.
- Oke, T. R., & Maxwell, G. B. (1975). Urban Heat Island Dynamics In Montreal And Vancouver. *Atmospheric Environment (1967)*, 9(2), 191-200.

- Oke, T.R., Mills, G., & Voogt, J.(2017). Urban Climates. Cambridge: Cambridge University Press.
- Olenkov, V. Et Al. (2020). Using Satellite Images To Study Urban Heat Island And Environmental Monitoring. None. 10.1088/1757-899x/962/4/042002
- Parker, D. (2005). A Demonstration That Large-Scale Warming Is Not Urban. None. 10.1175/Jcli3730.1
- Pereira Trindade, P.M., Luderitz Saldanha, D., & Pereira Filho, W. (2017). Utilização Do Infravermelho Termal Na Análise Espaço Temporal Da Temperatura De Superfície E Ilhas De Calor Urbanas. *Revista Brasileira De Cartografia*.
- Pettorelli, N. (2014). The Normalized Difference Vegetation Index. None. 10.1093/Acprof:Osobl/9780199693160.001.0001
- Pirinen, A. Et Al. (2023). Creating And Leveraging A Synthetic Dataset Of Cloud Optical Thickness Measures For Cloud Detection In Msi. *Remote Sensing*. 10.3390/Rs16040694
- Pott, C. M., & Estrela, C. C. (2017). Histórico Ambiental: Desastres Ambientais E O Despertar De Um Novo Pensamento. *Estudos Avançados*, 31, 271-283.
- Qian, W. Et Al. (2022). Analysis On Spatio-Temporal Evolution And Influencing Factors Of Heat Island Effect In Jinan. *Geoinformatics*. 10.1109/Geoinformatics57846.2022.9963797.
- Quille-Mamani, J. A. Et Al. (2024). Spatio-Temporal Evolution Of Olive Tree Water Status Using Land Surface Temperature And Vegetation Indices Derived From Landsat 5 And 8 Satellite Imagery In Southern Peru. *Agriculture*. 10.3390/Agriculture14050662
- Rahmadanti, R. Et Al. (2022). Persebaran Urban Heat Island Di Kota Banjarbaru Menggunakan Penginderaan Jauh. *Jurnal Sylva Scientiae*. 10.20527/Jss.V5i2.5352
- Ribeiro, B. M. G. Et Al. (2011). Mapeamento Da Cobertura Do Solo Urbano Utilizando Imagens Worldview-Ii E O Sistema Interimage. Federal University Of Uberlândia. <https://doi.org/10.14393/Rbcv63n0-43767>
- Robinson, N. P., Allred, B. W., Jones, M. O., Moreno, A., Kimball, J. S., Naugle, D. E., ... & Richardson, A. D. (2017). A Dynamic Landsat Derived Normalized Difference Vegetation Index (Ndvi) Product For The Conterminous United States. *Remote Sensing*, 9(8), 863.
- Sajjad, S. H. Et Al. (2020). Transforming Urban Systems. None. 10.34154/2020-Jue-0101-01-02/Euraass

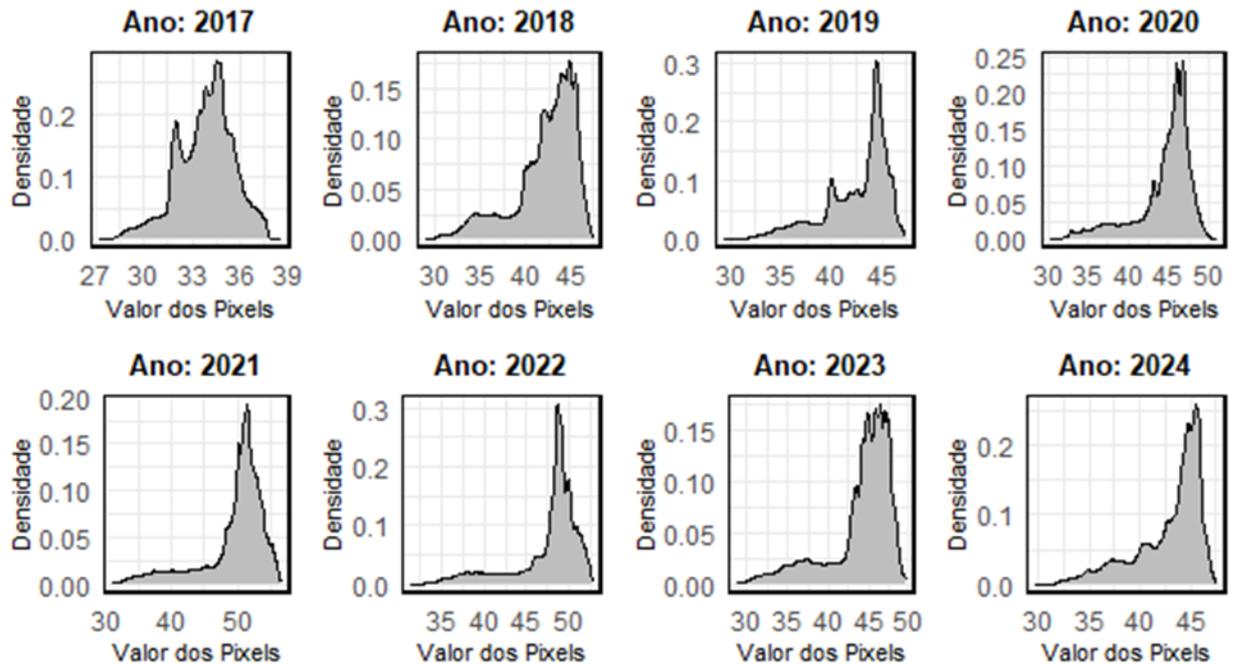
- Santamouris, M. (2015). Regulating the damaged thermostat of the cities—Status, impacts and mitigation challenges. *Energy and Buildings*, 91, 43-56.
- Santos, C. A. C. D. Et Al. (2014). Obteno Do Saldo De Radio Em Reas De Pastagem E Floresta Na Amaznia (Estao Seca) Atravs Do Sensor Modis. Sociedade Brasileira De Meteorologia. <https://doi.org/10.1590/0102-778620130591>
- Scherer, M. J. Et Al. (2014). Jardins Verticais: Potencialidades Para O Ambiente Urbano. Universidade Federal Do Paran. <https://doi.org/10.5380/Relainep.V2i2.37883>
- Shumilo, L. Et Al. (2019). Sentinel-3 Urban Heat Island Monitoring And Analysis For Kyiv Based On Vector Data. International Conference On Dependable Systems, Services And Technologies. 10.1109/Dessert.2019.8770042
- Sidiqui, P. Et Al. (2016). Spatio-Temporal Mapping And Monitoring Of Urban Heat Island Patterns Over Sydney, Australia Using Modis And Landsat-8. International Workshop On Earth Observation And Remote Sensing Applications. 10.1109/Eorsa.2016.7552800
- Silva, C. A. D. Et Al. (2013). Discriminacao De Reas De Soja Por Meio De Imagens Evi/Modis E Anlise Baseada Em Geo-Objeto. Federal University Of Campina Grande. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000100007>
- Singh, R. P. B. Et Al. (Nan). Remote Sensing Of Urban Micro-Climate With Special Reference To Urban Heat Island Island Using Landsat Thermal Data. None. 10.7163/Gpol.2014.38
- Siqueira-Gay, J. Et Al. (2017). Vulnerabilidade S Ilhas De Calor No Municipio De So Paulo: Uma Abordagem Para A Implantao De Medidas Mitigadoras Na Gesto Urbana. None. 10.5585/Geas.V6i2.902
- Sobrinho, J. A. Et Al. (2020). A Methodology For Comparing The Surface Urban Heat Island In Selected Urban Agglomerations Around The World From Sentinel-3 Slstr Data. Remote Sensing. 10.3390/Rs12122052
- Souza, J. F. D. Et Al. (2015). Influncia Do Uso E Ocupao Do Solo Na Temperatura Da Superfcie: O Estudo De Caso De Joo Pessoa - Pb. Associao Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construdo. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212016000100058>.
- Souza, S. S. F., & Konrad, O. Dallastra, M., Da Silva, A. K. A., (2024). Verificao Da Ocorrncia De Ilhas De Calor Urbano, A Partir Do Sensoriamento Remoto No Municpio De Tangará Da Serra—Mt. *Revista Políticas Públicas & Cidades*, 13(2), E950-E950.

- Stathopoulou, M., & Cartalis, C. (2007). Daytime Urban Heat Islands From Landsat Etm+ And Corine Land Cover Data: An Application To Major Cities In Greece. *Solar Energy*, 81(3), 358-368.
- Sun, C. Et Al. (2020). Evaluation Of Vegetation Index-Based Curve Fitting Models For Accurate Classification Of Salt Marsh Vegetation Using Sentinel-2 Time-Series. Italian National Conference On Sensors. 10.3390/S20195551.
- Themistocleous, K. (2022). The Study Of Urban Heat Island Effect In Cyprus Using Sentinel-3 Data. Remote Sensing. 10.1117/12.2636333.
- Tibana, Y. Et Al. (2014). Modeling Building Hvac Energy Consumption During An Extreme Heat Event In A Dense Urban Environment. None. 10.1115/Es2014-6315
- Trindade P.M.P., Saldanha D.J., & Filho W.P.(2017) Utilização Do Infravermelho Termal Na Análise Espaço-Temporal Da Temperatura De Superfície E Ilhas De Calor Urbanas.Revista Brasileira De Cartografia,69(4),837-855.
- Urmambetova, T. (2017). Characterization Of Surface Heat Fluxes Over Heterogeneous Areas Using Landsat 8 Data For Urban Planning Studies. None. 10.24193/Jssp.2017.1.04.
- Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal Remote Sensing Of Urban Climates. *Remote Sensing Of Environment*, 86(3), 370-384.
- Wang, M. Et Al. (2023). Fine-Scale Analysis Of The Long-Term Urban Thermal Environment In Shanghai Using Google Earth Engine. Remote Sensing. 10.3390/Rs15153732.
- Muzaky, H. Et Al. (2019). Analisis Pengaruh Tutupan Lahan Terhadap Distribusi Suhu Permukaan: Kajian Urban Heat Island Di Jakarta, Bandung Dan Surabaya. None.
- Wen, C. Et Al. (2023). Diurnal Variation In Urban Heat Island Intensity In Birmingham: The Relationship Between Nocturnal Surface And Canopy Heat Islands. Land. 10.3390/Land12112062.
- Wilby, R. Et Al. (2011). Decadal Variations In The Nocturnal Heat Island Of London. None. 10.1002/Wea.679.
- Wu, F., Han, W., Li, Z., Zhang, Y., Guo, J., Su, T., ... & Lee, S. S. (2020). The Mechanisms And Seasonal Differences Of The Impact Of Aerosols On Daytime Surface Urban Heat Island Effect. *Atmospheric Chemistry And Physics*, 20(11), 6479-6493.

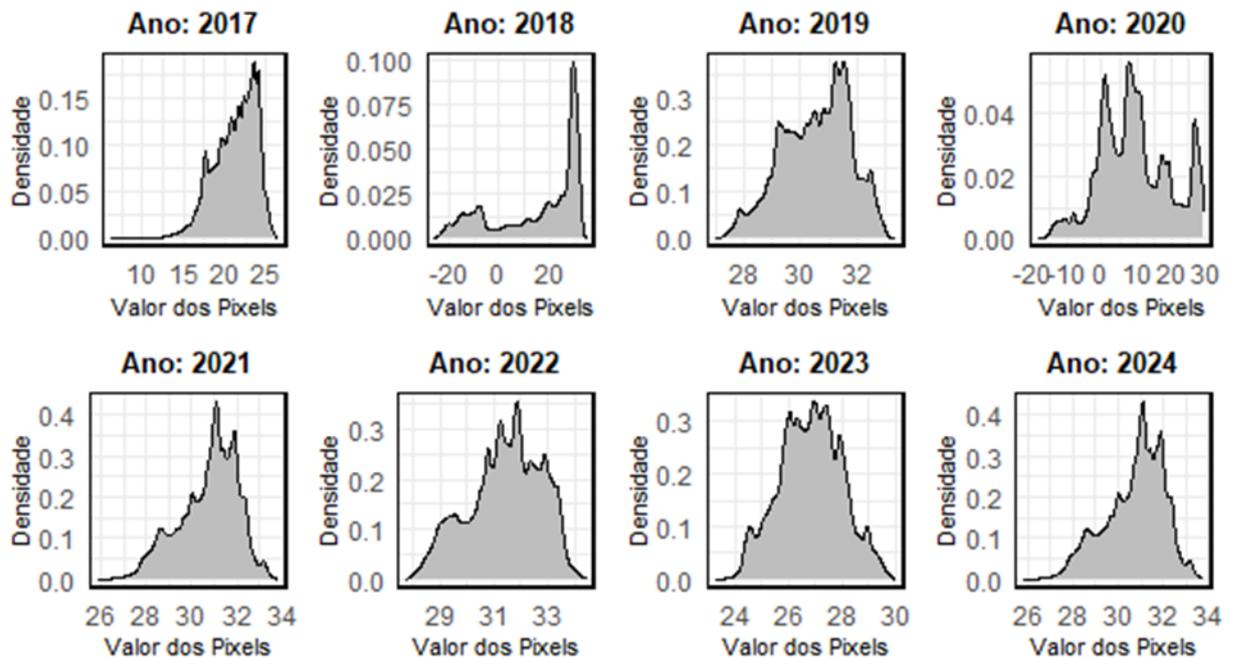
- Wu, J. J., Gao, Z. H., Li, Z. Y., Wang, H. Y., Pang, Y., Sun, B., ... & Zhang, J. X. (2014). Estimation For Sparse Vegetation Information In Desertification Region Based On Tiangong-1 Hyperspectral Image. *Spectroscopy And Spectral Analysis*, 34(3), 751-756.
- Xiang, Y. Et Al. (2024). Research On The Spatial-Temporal Evolution Of Changshas Surface Urban Heat Island From The Perspective Of Local Climate Zones. *Land*. 10.3390/Land13091479.
- Xu, J. Et Al. (2020). Downscaling Aster Land Surface Temperature Over Urban Areas With Machine Learning-Based Area-To-Point Regression Kriging. *Remote Sensing*. 10.3390/Rs12071082.
- Zafri, R. Et Al. (2019). Seasons In Stuttgart: Developing A Google Earth Engine Tool For Heat Island Mapping. *The International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences*. 10.5194/Isprs-Archives-Xlii-4-W18-1123-2019.
- Zhang, J. Et Al. (Nan). A Combined Stripe Noise Removal And Deblurring Recovering Method For Thermal Infrared Remote Sensing Images. *Ieee Transactions On Geoscience And Remote Sensing*. 10.1109/Tgrs.2022.3196050.
- Zhang, Y. (2016). Economics Analysis On Haze Weather And Urban Development In China. *None*. 10.2991/Hss-26.2016.102.
- Zhao, T. Et Al. (2004). Environmental Effects Of Urban Expansion In Medium-Sized Cities Of China: A Case Study In Mianyang City. *None*. 10.1117/12.558224.
- Zheng, Z. Et Al. (2024). Knowledge Visualization In Outdoor Thermal Environment Studies: A Comprehensive Review And International Comparison. *Shs Web Of Conferences*. 10.1051/Shsconf/202419202009.
- Zhou, D., Xiao, J., Bonafoni, S., Berger, C., Deilami, K., Zhou, Y., Froking, S., Yao, R., Qiao, Z., & Sobrino, J. (2018). Satellite Remote Sensing Of Surface Urban Heat Islands: Progress, Challenges, And Perspectives. *Remote. Sens.*, 11, 48.

Anexos

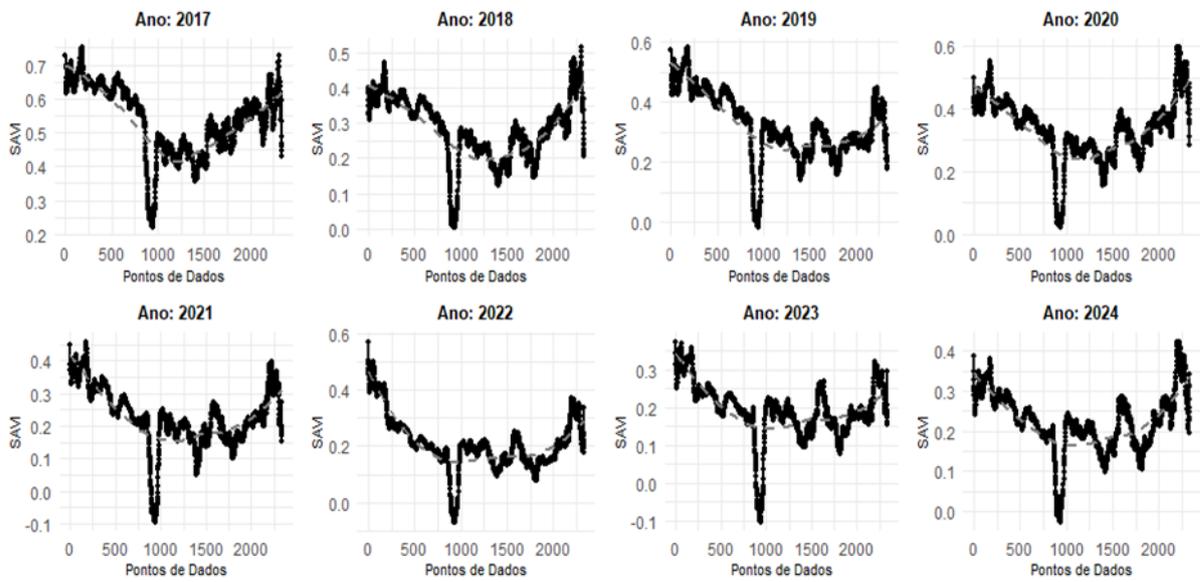
Anexo 1: Representação gráfica da Temperatura da Superfície Terrestre diária



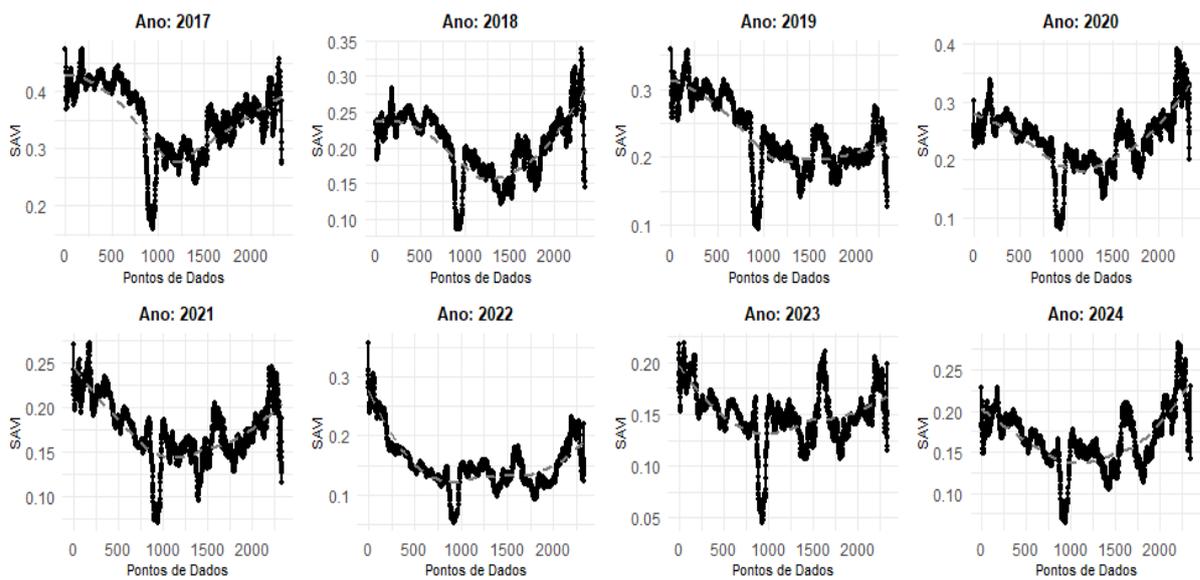
Anexo 2: Temperatura da superfície Terrestre noturna do sentinel-3



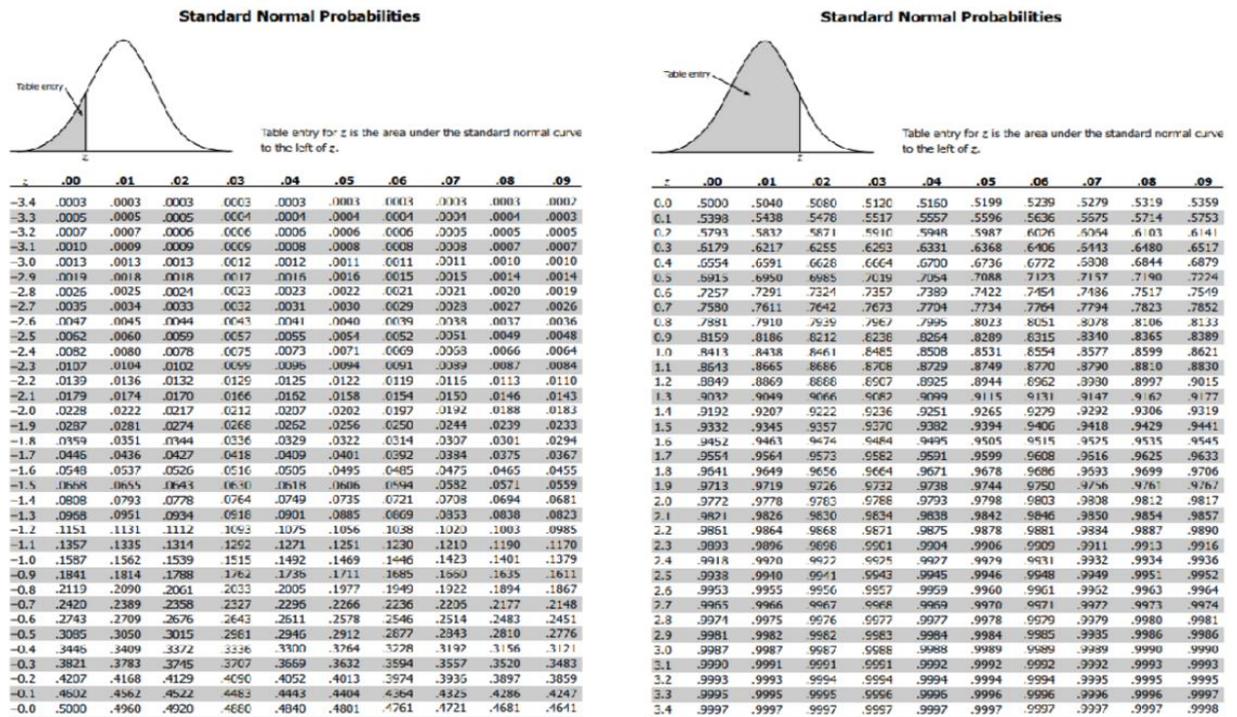
Anexo 3: Representação gráfica dos valores de NDVI



Anexo 4: Representação gráfica dos valores de SAVI



Anexo 5: Tabela da distribuição normal padrão Z (0, 1)



Anexo 6: Estatísticas das imagens NDVI da cidade de Tete.

	Ano_Imagem	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
1	2017	0.9339368	-0.4833598	0.5388126	0.2875833
2	2018	0.8530987	-0.5191740	0.2828214	0.2564594
3	2019	0.8970995	-0.6597307	0.3312263	0.3173934
4	2020	0.9214008	-0.4797688	0.3233893	0.2828255
5	2021	0.8968167	-0.8221345	0.2207062	0.2851382
6	2022	0.8867133	-0.6296297	0.1935996	0.2301622
7	2023	0.8847993	-0.4181818	0.1841091	0.2459405
8	2024	0.8482508	-0.5466053	0.2127017	0.2181021

Anexo 7: Estatísticas das imagens SAVI da cidade de Tete.

	Ano Imagem	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
1	2017	0.7536639	-0.2446721	0.3553896	0.1832945
2	2018	0.6784684	-0.1872285	0.2039861	0.1281332
3	2019	0.7783914	-0.2498626	0.2405860	0.1580379
4	2020	0.7682549	-0.3087592	0.2262757	0.1547172
5	2021	0.7399999	-0.3429217	0.1717330	0.1218991
6	2022	0.7158590	-0.2457703	0.1431637	0.1043160
7	2023	0.7291518	-0.2687126	0.1447648	0.1064463
8	2024	0.6754386	-0.1570137	0.1598233	0.1073914

Anexo 8: Temperatura máxima, mínima e média diária do centro urbano.

Ano	máximo	mínimo	média
2017	37.74096	34.42776	35.32251
2018	45.03155	39.12136	43.45674
2019	45.28378	41.40017	44.02816
2020	48.02938	36.78683	46.23746
2021	54.05871	38.79430	50.48194
2022	51.67678	44.10494	48.74148
2023	47.57150	38.89220	45.71041
2024	45.36578	40.85094	44.42374

Anexo 9: Temperatura máxima, mínima e média diária da área vegetada.

Ano	máximo	mínimo	media
2017	33.20797	31.37780	32.02673
2018	43.11318	37.36587	40.51312
2019	41.98104	38.15606	40.21769
2020	47.95318	43.05489	45.29738
2021	51.09292	44.40691	48.79772
2022	50.35229	45.08660	48.50181
2023	47.85708	32.99718	43.71092
2024	45.17809	37.74117	41.14040

Anexo 10: Temperatura máxima, mínima e média noturna do centro urbano.

Ano	máximo	mínimo	média
2017	24.95519	11.739130	20.30210
2018	24.23489	4.542169	18.03903
2019	31.66226	29.007776	30.43737
2020	22.26412	9.620386	16.73748
2021	31.17117	28.720270	30.65059
2022	33.14727	30.242077	32.48021
2023	28.59072	24.796900	27.12261
2024	32.22149	28.368616	31.18988

Anexo 11: Temperatura máxima, mínima e média noturna da área vegetada.

ano	máximo	mínimo	média
2017	24.433649	20.926081	22.981675
2018	34.747459	26.447229	29.429780
2019	30.771936	28.587305	29.695730
2020	9.510706	-5.845343	1.841806
2021	32.499474	29.756281	31.853813
2022	32.613338	30.226917	31.493540
2023	27.677698	24.240229	25.483862
2024	31.792871	28.441797	30.283331