INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS - CAMPUS SANTA LUZIA
ESPECIALIZAÇÃO EM PROTEÇÃO E DEFESA CIVIL

Gabriel de Oliveira Pagliuca

ANÁLISE DAS ILHAS DE CALOR URBANAS E DA VULNERABILIDADE SOCIOESPACIAL COMO SUBSÍDIO AO PLANEJAMENTO DE AÇÕES DE DEFESA CIVIL EM LEME/SP

Santa Luzia - MG
2026

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS - CAMPUS SANTA LUZIA
ESPECIALIZAÇÃO EM PROTEÇÃO E DEFESA CIVIL

Gabriel de Oliveira Pagliuca

ANÁLISE DAS ILHAS DE CALOR URBANAS E DA VULNERABILIDADE SOCIOESPACIAL COMO SUBSÍDIO AO PLANEJAMENTO DE AÇÕES DE DEFESA CIVIL EM LEME/SP

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Santa Luzia, como exigência parcial para obtenção do certificado de Especialista em Proteção e Defesa Civil.

Orientadora: Tamiris Batista Diniz

Santa Luzia - MG
2026

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 02 dias do mês de outubro do ano de 2026, às 08:00 horas, sob a presidência da Professora Orientadora Tamiris Batista Diniz, o discente Gabriel de Oliveira Pagliuca do Curso de Pós-Graduação Lato Sensu em Proteção e Defesa Civil, R.A nº 0119680, defendeu o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “Análise das ilhas de calor urbanas e da vulnerabilidade socioespacial como subsídio ao planejamento de ações de Defesa Civil em Leme/SP” e foi APROVADO, condicionado ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa do TCC.

O discente deverá apresentar o trabalho com as devidas modificações em formato pdf, em 22/10/2026 (20 dias corridos após a data da defesa) na sala de TCC da plataforma de EaD. O não cumprimento dos procedimentos pós-defesa de TCC, até a data estipulada, implica em REPROVAÇÃO.

Alterações sugeridas pela banca examinadora e outras observações pertinentes à defesa: Foram sugeridos ajustes para melhorar a fluidez e a articulação textual do sumário, da introdução e dos objetivos; aprofundar as conceituações apresentadas no trabalho e detalhar a metodologia, justificando a escolha dos dados utilizados e das datas das imagens de satélite; ampliar as figuras para facilitar a visualização; incorporar ao referencial teórico discussões sobre as mudanças climáticas; e incluir, nas considerações finais, recomendações para trabalhos futuros, considerando as limitações da pesquisa.

Assinam esse documento a Professora Orientadora, os demais membros da banca examinadora Verônica Bernardes de Souza Léo, Guilherme Preato Guimarães, e o discente.

Em: 02/10/2026

_____

Prof.ª Tamiris Batista Diniz

_____

Prof.ª Verônica Bernardes de Souza Léo

_____

Prof. Guilherme Preato Guimarães

_____

Gabriel de Oliveira Pagliuca

]

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

P138a Pagliuca, Gabriel de Oliveira.

Análise das ilhas de calor urbanas e da vulnerabilidade socioespacial como subsídio ao planejamento de ações de defesa civil em Leme/SP. / Gabriel de Oliveira Pagliuca. - 2026.

73f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Proteção e Defesa Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - Campus Santa Luzia, 2026.

Orientador: Profª Dra. Tamiris Batista Diniz.

1. Vulnerabilidade social. 2. Gestão de emergências. 3. Sistemas de Informação Geográfica. I. Diniz, Tamiris Batista. (orient.). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Santa Luzia, MG. III. Título.

CDU: 711.4:551.588.7

Elaborada pela Biblioteca do IFMG campus Santa Luzia

RESUMO

O aquecimento urbano constitui um desafio para o planejamento territorial, a saúde pública e a gestão de riscos, especialmente quando a exposição ao calor se combina com desigualdades socioespaciais. Este trabalho analisa a distribuição do aquecimento superficial e da vulnerabilidade socioespacial em Leme/SP, articulando sensoriamento remoto, modelagem espacial, Zonas Climáticas Locais e indicadores censitários. Foram comparadas duas cenas Landsat 8 Collection 2 Level-2: uma associada ao período de forte aquecimento de setembro de 2020 e outra de referência, de 2026. A análise combinou regressão exploratória, Regressão Geograficamente Ponderada e um Índice de Vulnerabilidade às Ilhas de Calor, estruturado pelas dimensões de exposição térmica, sensibilidade social e capacidade adaptativa, estas últimas sintetizadas por Análise de Componentes Principais. A cena de 2020 apresentou patamar térmico superficial substancialmente mais elevado que a cena de referência. A regressão selecionou altitude, NDVI, vegetação e uso agropecuário como variáveis associadas à LST, enquanto a GWR apresentou ajuste superior ao modelo global e evidenciou variação espacial dessas relações. O IVIC identificou oito setores prioritários e demonstrou que a vulnerabilidade não corresponde necessariamente às maiores temperaturas, mas às diferentes combinações entre exposição térmica, sensibilidade social e capacidade adaptativa. Os resultados fornecem uma base territorial para orientar Soluções Baseadas na Natureza, ações intersetoriais e o planejamento preventivo da Defesa Civil.

Palavras-chave: Ilha de Calor Urbana. Temperatura da Superfície. Vulnerabilidade Socioespacial. Zonas Climáticas Locais. Soluções Baseadas na Natureza.

ABSTRACT

Urban warming poses a challenge to territorial planning, public health, and risk management, especially when heat exposure overlaps with socio-spatial inequalities. This study analyzes the spatial distribution of surface warming and socio-spatial vulnerability in Leme, São Paulo, Brazil, by integrating remote sensing, spatial modeling, Local Climate Zones, and census indicators. Two Landsat 8 Collection 2 Level-2 scenes were compared: one associated with the period of intense warming in September 2020 and a reference scene from 2026. The analysis combined exploratory regression, Geographically Weighted Regression, and an Urban Heat Island Vulnerability Index structured around thermal exposure, social sensitivity, and adaptive capacity, with the latter dimensions synthesized through Principal Component Analysis. The 2020 scene showed a substantially higher surface thermal level than the reference scene. The regression selected elevation, NDVI, vegetation, and agricultural land use as variables associated with LST, while GWR provided a better fit than the global model and revealed spatial variation in these relationships. The index identified eight priority census sectors and demonstrated that vulnerability does not necessarily correspond to the highest temperatures, but rather to different combinations of thermal exposure, social sensitivity, and adaptive capacity. The results provide a territorial basis for Nature-Based Solutions, intersectoral actions, and preventive Civil Defense planning.

Keywords: Urban Heat Island. Land Surface Temperature. Socio-spatial Vulnerability. Local Climate Zones. Nature-Based Solutions.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 8
1.1 Problema de pesquisa e pressuposto 8
1.2 Objetivos 9
1.2.1 Objetivo geral 9
1.2.2 Objetivos específicos 9
1.3 Organização do trabalho 10
2 DESENVOLVIMENTO 10
2.1 Fundamentação teórica 10
2.1.1 Mudanças climáticas, extremos de calor e ambiente urbano 10
2.1.2 Urbanização, clima urbano e ilhas de calor 11
2.1.3 Sensoriamento remoto e Temperatura da Superfície Terrestre 12
2.1.4 Índices espectrais, uso e cobertura da terra e condicionantes geoambientais 14
2.1.5 Modelagem estatística espacial e Regressão Geograficamente Ponderada 15
2.1.6 Risco térmico e vulnerabilidade socioespacial 17
2.1.7 Índice de Vulnerabilidade às Ilhas de Calor e Análise de Componentes Principais 18
2.1.8 Zonas Climáticas Locais 19
2.1.9 Soluções Baseadas na Natureza, planejamento urbano e prevenção de riscos 21
2.2 Materiais e métodos 22
2.2.1 Área de estudo 22
2.2.2 Delineamento metodológico 24
2.2.3 Aquisição e preparação dos dados orbitais 26
2.2.4 Estimativa da LST e comparação entre as cenas 27
2.2.5 Seleção e preparação das variáveis ambientais 30
2.2.6 Malha amostral, regressão exploratória e GWR 34
2.2.7 Zonas Climáticas Locais 36
2.2.8 Indicadores socioespaciais e Análise de Componentes Principais 37
2.2.9 Composição e normalização do Índice de Vulnerabilidade às Ilhas de Calor 41
2.2.10 Classificação do IVIC e priorização territorial 43
2.3 Resultados e discussão 43
2.3.1 Distribuição espacial da LST e contraste entre as cenas 43
2.3.2 Características ambientais associadas à distribuição térmica 45
2.3.3 Seleção do modelo e desempenho do modelo global 46
2.3.4 Desempenho e variação espacial da GWR 49
2.3.5 Diagnóstico e limitações da modelagem 51
2.3.6 PCA, capacidade adaptativa e sensibilidade social 53
2.3.7 IVIC e setores censitários prioritários 55
2.3.8 Zonas Climáticas Locais e Soluções Baseadas na Natureza 59
2.4 Implicações para a Defesa Civil e o planejamento urbano 62
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS 67
REFERÊNCIAS 72

1 INTRODUÇÃO

O calor urbano constitui um problema simultaneamente ambiental, social e de gestão de riscos. Seus efeitos não se distribuem uniformemente no território, uma vez que as condições de exposição e vulnerabilidade variam espacialmente. Dessa forma, a identificação das áreas mais aquecidas precisa ser articulada às desigualdades socioespaciais, de modo a produzir informações capazes de subsidiar a atuação do poder público (IPCC, 2014; IPCC, 2022; Siqueira-Gay; Dibo; Giannotti, 2017).

Embora os estudos sobre clima urbano tenham se concentrado historicamente nas grandes cidades, a menor extensão da mancha urbana não impede a formação de contrastes térmicos em cidades pequenas e médias. Diferenças na cobertura vegetal, impermeabilização, densidade construtiva, uso e cobertura da terra e características do relevo podem produzir respostas térmicas distintas dentro de uma mesma cidade. A análise dessas diferenças intraurbanas permite reconhecer setores submetidos a condições diferenciadas de aquecimento e amplia a compreensão de um fenômeno também presente fora dos grandes centros metropolitanos (Alves, 2017; Teixeira; Amorim, 2022; Porangaba; Galvani; Amorim, 2024).

Nesse contexto, o sensoriamento remoto permite identificar padrões espaciais de aquecimento superficial. Entretanto, a temperatura da superfície, isoladamente, não permite determinar a vulnerabilidade da população. A transformação de um diagnóstico térmico em informação útil ao planejamento e à gestão de riscos exige considerar também quem está exposto, quais grupos apresentam maior sensibilidade e quais condições territoriais favorecem ou limitam a capacidade de adaptação.

A integração dessas dimensões permite avançar do diagnóstico térmico para uma análise territorial da vulnerabilidade ao calor. Essa perspectiva é especialmente relevante para a atuação preventiva, pois os setores prioritários para intervenção não correspondem necessariamente aos locais mais aquecidos, mas àqueles em que condições térmicas desfavoráveis se combinam com maior sensibilidade social e menor capacidade adaptativa.

1.1 Problema de pesquisa e pressuposto

O problema de pesquisa consiste em compreender como os padrões espaciais de aquecimento superficial se relacionam com as condições socioespaciais dos setores censitários de Leme/SP e de que maneira a integração dessas informações pode subsidiar a priorização territorial de ações preventivas de proteção e defesa civil.

Parte-se do pressuposto de que os setores prioritários para intervenção não correspondem necessariamente às áreas que apresentam os maiores valores de temperatura da superfície, mas àquelas em que a exposição térmica se combina com maior sensibilidade social e menor capacidade adaptativa.

O problema é abordado por meio de duas dimensões analíticas complementares. Na dimensão ambiental, busca-se identificar quais características da vegetação, das superfícies construídas, do uso e cobertura da terra e do relevo estão associadas à distribuição espacial do aquecimento, bem como verificar se a intensidade dessas relações varia no território. Na dimensão socioespacial, procura-se identificar os setores em que maiores níveis de exposição térmica se sobrepõem a condições de maior sensibilidade e menor capacidade adaptativa.

A integração dessas dimensões permite diferenciar áreas simplesmente mais aquecidas daquelas em que o aquecimento superficial coincide com condições socioespaciais desfavoráveis, evitando que a definição de prioridades seja baseada exclusivamente nos maiores valores de temperatura observados.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a vulnerabilidade socioespacial associada ao aquecimento superficial urbano em Leme/SP, com vistas à identificação de áreas prioritárias para ações preventivas de proteção e defesa civil.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a distribuição espacial do aquecimento superficial na área urbana de Leme/SP;
- Avaliar a associação entre a temperatura superficial e características ambientais e morfológicas do território;
- Analisar as condições de sensibilidade social e capacidade adaptativa dos setores censitários;
- Integrar exposição térmica, sensibilidade social e capacidade adaptativa para identificar setores prioritários;
- Discutir as implicações dos resultados para o planejamento urbano, as Soluções Baseadas na Natureza e a atuação preventiva da Defesa Civil.

1.3 Organização do trabalho

Além desta introdução, o trabalho apresenta um capítulo de desenvolvimento que reúne a fundamentação teórica, os materiais e métodos, os resultados e sua discussão, bem como as implicações dos resultados para a proteção e defesa civil e o planejamento urbano. A fundamentação teórica aborda as mudanças climáticas e os extremos de calor, o clima urbano e as ilhas de calor, o sensoriamento remoto e a temperatura da superfície, os condicionantes ambientais do campo térmico, a modelagem espacial, a vulnerabilidade socioespacial, o IVIC, as Zonas Climáticas Locais e as Soluções Baseadas na Natureza. Na sequência, os materiais e métodos descrevem os dados utilizados e os procedimentos de processamento, modelagem e integração das informações. Os resultados e a discussão são apresentados desde a caracterização do campo térmico e de seus condicionantes até a análise da vulnerabilidade e a identificação dos setores prioritários. Por fim, são apresentadas as considerações finais e as referências.

2 DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento articula os conceitos que fundamentam a análise, descreve os procedimentos empregados e discute os resultados à luz do objetivo de apoiar a priorização territorial de ações preventivas.

2.1 Fundamentação teórica

2.1.1 Mudanças climáticas, extremos de calor e ambiente urbano

As mudanças climáticas constituem um contexto mais amplo para a crescente preocupação com os riscos associados ao calor. O aquecimento do sistema climático tem sido acompanhado por alterações na frequência e na intensidade de extremos de temperatura, ampliando a necessidade de medidas de adaptação e redução de vulnerabilidades, particularmente em ambientes urbanos (IPCC, 2022).

Nas cidades, entretanto, os efeitos do aquecimento global interagem com processos que atuam em escalas locais. A substituição de superfícies naturais por materiais construídos, a redução da cobertura vegetal, a impermeabilização do solo, a geometria urbana e as propriedades térmicas dos materiais modificam as trocas de energia entre a superfície e a atmosfera. Dessa forma, as condições térmicas observadas no espaço urbano resultam da interação entre fatores atmosféricos de maior escala e características próprias da superfície e da morfologia urbana.

Essa distinção de escalas é importante para os estudos de ilhas de calor. As condições meteorológicas influenciam o nível térmico observado em determinado dia, enquanto as características da superfície contribuem para produzir diferenças espaciais dentro da cidade. Assim, áreas submetidas às mesmas condições atmosféricas gerais podem apresentar respostas térmicas distintas em razão da vegetação, impermeabilização, materiais, relevo e configuração do tecido urbano.

Também é necessário distinguir a ilha de calor atmosférica da ilha de calor de superfície. A primeira é definida a partir da temperatura do ar e requer medições meteorológicas espacialmente representativas, enquanto a segunda está relacionada à resposta térmica das superfícies e pode ser investigada por sensoriamento remoto. Embora relacionadas, essas manifestações não são equivalentes e respondem de maneira distinta às condições atmosféricas e às características do território (Voogt; Oke, 2003; Oke et al., 2017).

As mudanças climáticas constituem, portanto, um contexto mais amplo para a crescente preocupação com os riscos associados ao calor urbano. Entretanto, sua análise deve ser distinguida daquela voltada às diferenças térmicas intraurbanas produzidas pela interação entre condições atmosféricas e características locais da superfície. Enquanto a identificação de tendências climáticas requer séries temporais adequadas e observações de longo prazo, a análise do campo térmico urbano permite investigar como diferentes configurações de cobertura, vegetação, relevo e morfologia produzem respostas térmicas distintas dentro de uma mesma cidade. Nesse sentido, a abordagem adotada neste trabalho concentra-se na dimensão espacial do aquecimento superficial e de sua relação com as características ambientais, morfológicas e socioespaciais do território.

2.1.2 Urbanização, clima urbano e ilhas de calor

A urbanização modifica a cobertura e o uso da terra, a morfologia das cidades e as condições de troca de energia entre a superfície e a atmosfera. A substituição de áreas vegetadas e permeáveis por edificações, pavimentos e outras superfícies artificiais altera propriedades como o albedo, a capacidade de armazenamento de calor, a disponibilidade de umidade e os processos de evapotranspiração. Ao mesmo tempo, a geometria das edificações e das vias interfere na incidência e retenção da radiação solar, no sombreamento e na circulação dos ventos. Essas transformações contribuem para a formação de condições climáticas distintas daquelas verificadas em áreas menos urbanizadas, constituindo o chamado clima urbano (Oke, 1987; Gartland, 2010; Lombardo; Fruehauf; Pellegrino, 2022).

Entre as principais manifestações do clima urbano encontram-se as Ilhas de Calor Urbanas (ICU), caracterizadas pela existência de diferenças térmicas entre setores da cidade ou entre a área urbana e seu entorno menos urbanizado. Sua formação não decorre de um único elemento, mas da interação entre diferentes características da superfície e da estrutura urbana, entre elas a densidade de edificações, a impermeabilização, a quantidade e distribuição da vegetação, os materiais construtivos, a presença de corpos d'água, a topografia e a configuração espacial do tecido urbano (Oke, 1987; Alves, 2017; Lopes; Hora, 2023).

A intensidade e a configuração das ilhas de calor também dependem da escala e das características particulares de cada cidade. Embora grande parte dos estudos iniciais tenha se concentrado nas metrópoles, as diferenças térmicas também são verificadas em cidades pequenas e médias. Nesses contextos, extensão territorial não determina a heterogeneidade intraurbana, uma vez que setores com diferentes padrões de ocupação, vegetação e densidade construtiva podem apresentar comportamentos térmicos distintos (Alves, 2017; Teixeira; Amorim, 2022).

Em Iporá/GO, por exemplo, Alves (2017) verificou diferenças espaciais e temporais na ocorrência das ilhas de calor em uma cidade de pequeno porte e identificou o NDVI e o BU entre as variáveis de maior contribuição para a variabilidade térmica. Outros estudos realizados em cidades menores também reforçam que a compreensão do clima urbano depende da análise das diferenciações internas do espaço, e não apenas da comparação genérica entre cidade e campo (Teixeira; Amorim, 2022).

Essa perspectiva é particularmente importante para o planejamento urbano. A análise de médias municipais pode ocultar contrastes entre áreas densamente edificadas, bairros arborizados, setores periféricos, fundos de vale e zonas em expansão. A escala intraurbana permite reconhecer essas diferenças e relacioná-las às características da superfície e da população, produzindo informações territorialmente mais adequadas à definição de prioridades de intervenção.

2.1.3 Sensoriamento remoto e Temperatura da Superfície Terrestre

O avanço do sensoriamento remoto ampliou as possibilidades de investigação do clima urbano ao permitir a observação sistemática das características térmicas e espectrais da superfície. Imagens orbitais possibilitam analisar grandes extensões territoriais de maneira espacialmente contínua, favorecendo a identificação de contrastes térmicos associados às diferentes formas de cobertura e ocupação da terra (Voogt; Oke, 2003; Silveira et al., 2023).

Nesse contexto, a LST representa a resposta térmica radiométrica das superfícies observadas pelo sensor. A LST está relacionada às propriedades dos materiais, à radiação incidente, à umidade e à emissividade das superfícies e, por isso, constitui uma variável importante para compreender a organização espacial do campo térmico urbano (Voogt; Oke, 2003).

Entretanto, a LST não deve ser confundida com a temperatura do ar. A ilha de calor atmosférica é caracterizada a partir de diferenças na temperatura do ar, normalmente registradas por estações meteorológicas, sensores fixos ou transectos móveis, enquanto a ilha de calor de superfície é investigada por meio do comportamento térmico das superfícies, que pode ser estimado por sensores remotos (Voogt; Oke, 2003; Oke et al., 2017). Embora existam relações entre ambas, elas representam componentes distintos do sistema superfície-atmosfera.

Dessa maneira, a LST é especialmente útil para identificar padrões espaciais de aquecimento superficial e analisar sua associação com diferentes características ambientais e urbanas. Áreas densamente edificadas, pavimentadas ou com solo exposto podem apresentar temperaturas superficiais elevadas, enquanto áreas com vegetação mais densa e corpos d'água tendem a apresentar valores inferiores. Estudos realizados em diferentes contextos urbanos mostram que as temperaturas superficiais respondem de maneira significativa às diferenças de uso e cobertura da terra (Silveira et al., 2023; Lopes; Nascimento; Hora, 2023).

Essa distinção conceitual é relevante porque o sensoriamento remoto permite representar o campo térmico de superfície, mas não substitui diretamente medições da temperatura do ar ou avaliações de conforto térmico da população. Seu principal potencial está na identificação da heterogeneidade térmica do território e na possibilidade de relacioná-la a características físicas da cidade.

Essa distinção possui também uma implicação operacional para o planejamento municipal. A caracterização detalhada da temperatura do ar em escala intraurbana depende da existência de estações meteorológicas, redes de sensores ou levantamentos por transectos capazes de representar adequadamente a heterogeneidade espacial da cidade. Essas estratégias são fundamentais para avaliar diretamente as condições atmosféricas experimentadas pela população, mas podem exigir maior disponibilidade de instrumentação, implantação, manutenção e procedimentos de coleta em campo.

O sensoriamento remoto orbital, por sua vez, possibilita obter informações espacialmente contínuas sobre extensas áreas com menor dependência de instrumentação distribuída no território. Embora não substitua o monitoramento da temperatura do ar, a LST permite realizar um diagnóstico territorial do aquecimento superficial e relacioná-lo às

características físicas da cidade. Essa possibilidade é particularmente relevante para municípios de pequeno e médio porte, nos quais diagnósticos espacialmente abrangentes e metodologicamente reproduzíveis podem contribuir para a atuação preventiva mesmo diante de limitações de recursos técnicos e operacionais.

2.1.4 Índices espectrais, uso e cobertura da terra e condicionantes geoambientais

A interpretação da LST torna-se mais consistente quando realizada conjuntamente com variáveis capazes de representar características da cobertura da terra. Entre os indicadores mais utilizados nos estudos de clima urbano encontram-se NDVI, o NDBI e o BU. (Silveira et al., 2023).

O NDVI é utilizado para identificar a presença, a densidade e o vigor da cobertura vegetal a partir do contraste entre as respostas espectrais do vermelho visível e do infravermelho próximo. Valores mais elevados estão geralmente associados à vegetação mais densa e vigorosa, enquanto valores baixos ou negativos podem representar superfícies com pouca vegetação, solo exposto, áreas construídas ou corpos d'água, dependendo das características espectrais dos alvos (Silveira et al., 2023).

A vegetação exerce papel relevante no comportamento térmico urbano principalmente pela combinação de sombreamento e evapotranspiração. A literatura reunida demonstra, de modo recorrente, associação inversa entre vegetação e temperatura, com menores valores térmicos em áreas mais vegetadas. Alves (2017), ao simular diferentes configurações de NDVI em Iporá, verificou redução progressiva da intensidade da ilha de calor com o aumento da vegetação, incluindo diminuição da extensão das classes de maior intensidade térmica. Lopes, Nascimento e Hora (2023) também encontraram associação inversa entre NDVI e ilha de calor no Setor Bueno, em Goiânia.

Entretanto, o NDVI não constitui uma classificação direta do uso da terra. Valores reduzidos podem corresponder tanto a superfícies construídas quanto a determinados tipos de solo exposto, o que exige cautela em sua interpretação. Essa questão é particularmente relevante em áreas urbanas em expansão, terrenos sem cobertura vegetal e áreas agrícolas ou de silvicultura, nas quais superfícies não edificadas também podem apresentar temperaturas elevadas (Silveira et al., 2023).

O NDBI, por sua vez, foi desenvolvido para realçar áreas construídas a partir da resposta espectral das bandas do infravermelho. Valores mais elevados tendem a indicar maior presença de superfícies edificadas. Apesar de sua utilidade, Silveira et al. (2023) destacam que

respostas espectrais de áreas construídas podem se confundir com as de solo exposto, dificultando a separação entre esses alvos quando o NDBI é utilizado isoladamente.

Nesse sentido, o BU combina informações do NDBI e do NDVI com a finalidade de melhorar a diferenciação entre superfícies impermeáveis, vegetação e solo exposto. No estudo de Silveira et al. (2023), valores elevados de BU associados a valores reduzidos de NDVI estiveram relacionados às áreas de maior aquecimento superficial. A análise também mostrou que locais com solo exposto podem apresentar comportamento térmico semelhante ou até superior ao de áreas urbanizadas, reforçando a necessidade de interpretar conjuntamente os diferentes indicadores.

Assim, NDVI, NDBI e BU são complementares, mas não substituem a análise do uso e cobertura da terra. A classificação das superfícies oferece um contexto temático para diferenciar áreas construídas, vegetadas, solos expostos, corpos d'água e outros usos que podem produzir respostas espectrais ou térmicas semelhantes. Essa integração reduz o risco de atribuir automaticamente determinado valor espectral a uma única classe de superfície e permite compreender com maior precisão os fatores associados ao campo térmico.

Além das características da cobertura, fatores topográficos também podem participar da diferenciação térmica intraurbana. A altitude influencia as condições térmicas e pode produzir variações na temperatura do ar e da superfície. Alves e Galvani (2021), ao modelarem a ilha de calor urbana de superfície em São Carlos/SP, incorporaram variáveis como altitude e Índice de Posição Topográfica, juntamente com índices relacionados à vegetação, água e urbanização, destacando a importância de considerar simultaneamente condicionantes naturais e antrópicos.

A relevância dessa abordagem multivariada é confirmada por Lopes e Hora (2023). No mapeamento sistemático de estudos que utilizaram regressão para investigar ilhas de calor, as autoras verificaram recorrência de variáveis relacionadas à vegetação, áreas verdes, geometria urbana, presença de água, superfícies construídas, impermeabilização e altitude. Portanto, a distribuição espacial da temperatura deve ser compreendida como resultado da interação entre múltiplos componentes do ambiente urbano, e não como resposta exclusiva à presença ou ausência de vegetação.

2.1.5 Modelagem estatística espacial e Regressão Geograficamente Ponderada

A multiplicidade de fatores associados ao campo térmico urbano torna as técnicas de regressão instrumentos importantes para investigar a contribuição das diferentes variáveis. Lopes e Hora (2023), ao analisarem estudos de modelagem de ilhas de calor, verificaram

predominância do emprego de regressões múltiplas e destacaram entre os preditores mais frequentes o NDVI, as áreas verdes, a geometria urbana, a presença de água e as superfícies construídas.

Os modelos de regressão global estimam uma relação única entre a variável dependente e suas variáveis explicativas para toda a área analisada. Dessa forma, seus coeficientes representam a direção e a magnitude média das associações observadas. Essa abordagem é adequada para uma leitura geral dos fatores relacionados à temperatura, mas pressupõe que a relação estimada permaneça relativamente uniforme no espaço.

Entretanto, processos urbanos e ambientais podem apresentar não estacionariedade espacial, isto é, a intensidade e até mesmo a direção da relação entre duas variáveis podem variar de uma localização para outra. Uma mesma quantidade de vegetação, por exemplo, pode estar inserida em contextos distintos de densidade construtiva, relevo ou impermeabilização e, consequentemente, apresentar associações térmicas espacialmente diferentes.

A GWR busca representar essa heterogeneidade ao ajustar regressões locais, atribuindo maior influência às observações espacialmente próximas de cada ponto analisado. Em vez de produzir apenas um coeficiente para toda a cidade, a GWR permite observar como os coeficientes das variáveis explicativas se distribuem espacialmente (Alves; Galvani, 2021).

Ao comparar modelos estacionários por Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) e modelos locais por GWR para a ilha de calor urbana de superfície em São Carlos/SP, Alves e Galvani (2021) verificaram desempenho superior da abordagem local. No verão, por exemplo, a GWR explicou 90% da variação analisada, enquanto o modelo global explicou 79%. A comparação entre os modelos também apresentou menores valores do Critério de Informação de Akaike corrigido (AICc) para a GWR. O AICc é uma medida utilizada para comparar modelos considerando simultaneamente a qualidade do ajuste e a complexidade da especificação, de modo que, entre modelos ajustados à mesma base de dados, valores menores indicam melhor equilíbrio entre esses dois aspectos. Além disso, a abordagem local promoveu redução da autocorrelação espacial dos resíduos.

A utilização da GWR, contudo, não transforma associações estatísticas em relações causais. Sua principal contribuição para estudos urbanos está em revelar a variação espacial das associações e indicar onde determinada variável apresenta relação mais forte, mais fraca ou distinta com o fenômeno analisado. A interpretação deve, portanto, considerar conjuntamente a qualidade do ajuste, o AICc, a distribuição espacial dos resíduos e a coerência dos resultados com as características ambientais e urbanas do território (Alves; Galvani, 2021).

A combinação entre análise global e local é particularmente útil para o planejamento. Enquanto a regressão global permite reconhecer fatores gerais associados ao campo térmico, a GWR acrescenta uma dimensão territorial ao diagnóstico, contribuindo para evitar a suposição de que uma mesma relação ambiental ocorre com igual intensidade em toda a cidade.

2.1.6 Risco térmico e vulnerabilidade socioespacial

A identificação das áreas mais aquecidas constitui apenas uma dimensão do problema relacionado ao calor urbano. A população não apresenta condições homogêneas para enfrentar temperaturas elevadas, de modo que a intensidade térmica e a vulnerabilidade social precisam ser analisadas conjuntamente.

Siqueira-Gay, Dibo e Giannotti (2017), com base no arcabouço do IPCC, estruturam a análise da vulnerabilidade às ilhas de calor a partir das dimensões de exposição, sensibilidade e capacidade de adaptação. A exposição representa o contato com o fenômeno; a sensibilidade corresponde às características que podem aumentar a predisposição aos efeitos adversos; e a capacidade adaptativa está associada às condições disponíveis para responder, enfrentar ou reduzir esses efeitos.

No caso do calor urbano, a sensibilidade pode estar relacionada à composição demográfica da população. Crianças e idosos, por exemplo, aparecem entre os grupos considerados na construção de indicadores de vulnerabilidade. A capacidade adaptativa, por sua vez, pode envolver condições de infraestrutura, saneamento, alfabetização e acesso a serviços, elementos que influenciam os recursos disponíveis para prevenção e resposta (Siqueira-Gay; Dibo; Giannotti, 2017).

A dimensão socioespacial torna-se fundamental porque duas áreas submetidas a condições térmicas semelhantes podem apresentar consequências distintas em razão das características da população e das condições urbanas existentes. Da mesma maneira, um setor que não apresente a maior temperatura absoluta pode adquirir elevada relevância para o planejamento caso concentre população sensível e baixa capacidade de resposta.

Essa diferenciação também é observada em estudos sobre eventos extremos de calor. Ortiz Porangaba, Galvani e Amorim (2024), ao analisarem ilhas de calor superficiais e ondas de calor em Três Lagoas/MS, destacam que o risco térmico alcança a população exposta, enquanto a vulnerabilidade está associada às condições diferenciadas de resistência e recuperação diante dos eventos. Os autores identificaram desigualdades socioeconômicas importantes entre setores submetidos ao calor, demonstrando que a vulnerabilidade não pode ser explicada exclusivamente pela variável térmica.

Em perspectiva mais ampla, estudos sobre vulnerabilidade socioambiental também enfatizam seu caráter multidimensional e a importância da capacidade de resposta. Chaves et al. (2022) demonstram que condições sociais, econômicas, habitacionais e infraestruturais modificam a capacidade das populações de enfrentar eventos adversos, enquanto Mello et al. (2023) reforçam a relação entre desigualdades socioambientais, capacidade de adaptação e riscos de desastres.

Portanto, a análise do calor urbano deve ultrapassar a simples localização das maiores temperaturas. A perspectiva da vulnerabilidade socioespacial permite compreender onde ocorre a exposição térmica, quem está exposto e quais condições podem ampliar ou reduzir a capacidade de enfrentamento, aproximando o diagnóstico climático das necessidades do planejamento e da gestão de riscos.

2.1.7 Índice de Vulnerabilidade às Ilhas de Calor e Análise de Componentes Principais

A necessidade de integrar diferentes dimensões do problema levou ao desenvolvimento de índices compostos de vulnerabilidade. No contexto brasileiro, Siqueira-Gay, Dibo e Giannotti (2017) propuseram o Índice de Vulnerabilidade às Ilhas de Calor (IVIC) para o município de São Paulo, articulando informações ambientais e socioeconômicas com o objetivo de identificar áreas prioritárias para medidas de mitigação e subsidiar a gestão urbana.

Na proposta das autoras, o índice é estruturado pelas dimensões de exposição (E), sensibilidade (S) e capacidade de adaptação (A). A exposição foi representada pela LST , enquanto a sensibilidade incorporou indicadores associados a grupos populacionais potencialmente mais suscetíveis. A capacidade adaptativa reuniu variáveis relacionadas às condições urbanas e ao acesso a recursos e serviços. A estrutura geral foi expressa pela relação:

$$IVIC = A - (S+E)$$

Essa formulação evidencia que as dimensões não possuem o mesmo sentido: maior capacidade de adaptação representa uma condição favorável, enquanto maiores exposição e sensibilidade representam condições desfavoráveis. Mais importante do que a simples sobreposição de mapas é, portanto, compreender o significado de cada componente e a forma como contribui para a diferenciação territorial da vulnerabilidade.

A utilização de diversos indicadores sociais produz outro desafio: muitas dessas variáveis apresentam correlação entre si. Indicadores de infraestrutura, condições domiciliares, escolaridade ou características populacionais podem carregar informações parcialmente redundantes. Para lidar com essa questão, Siqueira-Gay, Dibo e Giannotti (2017) utilizaram a

Análise de Componentes Principais (ACP), também conhecida pela sigla em inglês PCA (*Principal Component Analysis*).

A PCA permite sintetizar conjuntos de variáveis correlacionadas em componentes que concentram parte significativa da variabilidade presente nos dados. Na construção do IVIC de São Paulo, a técnica foi aplicada separadamente aos indicadores de sensibilidade e capacidade adaptativa, permitindo identificar a contribuição relativa das variáveis e ponderar os componentes de acordo com a variância explicada (Siqueira-Gay; Dibo; Giannotti, 2017).

A utilização da PCA, portanto, não elimina a necessidade de interpretação substantiva dos indicadores. Os componentes resultantes precisam ser analisados considerando os carregamentos das variáveis e o sentido conceitual de cada dimensão. Sua contribuição está em reduzir redundâncias e fornecer uma síntese estatística dos indicadores antes de sua integração territorial.

A análise espacial do IVIC produz uma informação distinta daquela fornecida isoladamente pelo mapa térmico ou pelos indicadores sociais. No estudo de São Paulo, Siqueira-Gay, Dibo e Giannotti (2017) identificaram áreas centrais com condições críticas de exposição e setores periféricos caracterizados por maior sensibilidade e menor capacidade de adaptação. Essa diferenciação demonstra que a prioridade territorial pode decorrer de combinações distintas entre os componentes do índice.

Assim, índices como o IVIC não servem apenas para hierarquizar áreas mais ou menos críticas. Sua decomposição em exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa permite compreender por que determinado setor alcança determinada condição de vulnerabilidade e, consequentemente, fornece elementos para pensar intervenções compatíveis com os fatores predominantes em cada território.

2.1.8 Zonas Climáticas Locais

As diferenças térmicas observadas dentro das cidades também estão associadas à forma urbana. Para sistematizar a comparação entre diferentes tecidos urbanos, Stewart e Oke desenvolveram o sistema das *Local Climate Zones* (LCZ), denominado em português Zonas Climáticas Locais (ZCL). A classificação busca superar descrições genéricas como “urbano” e “rural”, distinguindo ambientes segundo características relacionadas à morfologia e à cobertura da superfície (Dorigon; Amorim, 2021).

As ZCL organizam o território em classes construídas e classes associadas a coberturas naturais. A diferenciação considera características que influenciam as trocas de energia entre a superfície e a atmosfera, permitindo distinguir, por exemplo, tecidos compactos e abertos,

diferentes alturas de edificações, áreas escassamente construídas, superfícies vegetadas e outras formas de cobertura.

A principal contribuição da classificação está na criação de uma linguagem padronizada para estudos de clima urbano. Dorigon e Amorim (2021) destacam que a padronização facilita a descrição dos ambientes e a comparação entre cidades diferentes, ao substituir categorias excessivamente genéricas por classes baseadas nas propriedades físicas do território.

A aplicação das ZCL em estudos brasileiros também demonstra que diferenças morfológicas e de cobertura estão relacionadas a comportamentos térmicos distintos. Zambonato et al. (2021), ao caracterizarem áreas urbanas a partir de elementos como arborização, revestimento vegetal, pavimentação, solo exposto, água, edificações e densidade construída, evidenciam a capacidade da classificação de representar a heterogeneidade existente dentro do espaço urbano. Vieira et al. (2024) também empregam as ZCL na análise das relações entre morfologia urbana e variações térmicas, reforçando sua utilidade para o planejamento climático.

A classificação, entretanto, constitui uma representação simplificada da realidade. Dorigon e Amorim (2021) discutem limitações relacionadas à generalização das classes e à necessidade de considerar elementos locais, entre eles o relevo. Assim, uma ZCL não deve ser interpretada como capaz de explicar isoladamente o comportamento térmico de determinada área, mas como uma estrutura de referência para contextualizar diferenças de forma urbana e cobertura da superfície.

O desenvolvimento do pacote LCZ4r, apresentado por Anjos, Medeiros e Castelhano (2025), amplia as possibilidades de aplicação da abordagem. Desenvolvido em ambiente R, o pacote permite trabalhar com mapas de ZCL, calcular áreas ocupadas pelas classes e obter parâmetros físicos associados a elas, como fração de superfície impermeável, albedo, fator de visão do céu e rugosidade. Quando associado a dados térmicos, também permite explorar diferenças de temperatura entre classes e analisar espacialmente o comportamento das ilhas de calor.

Desse modo, as ZCL complementam as informações obtidas pelos índices espectrais e pelas análises estatísticas. Enquanto NDVI, NDBI, BU, uso da terra e altitude descrevem atributos específicos do ambiente, as ZCL sintetizam características da estrutura e da cobertura urbana em classes comparáveis. Sua função no diagnóstico é oferecer contexto morfológico para interpretar as diferenças térmicas observadas, não determinar automaticamente a vulnerabilidade social de determinado território.

2.1.9 Soluções Baseadas na Natureza, planejamento urbano e prevenção de riscos

A identificação dos fatores relacionados ao aquecimento e das áreas de maior vulnerabilidade ganha relevância para a gestão pública quando o diagnóstico é convertido em subsídio à definição de medidas de mitigação e adaptação. Nesse contexto, SbN constituem uma abordagem voltada ao aproveitamento, conservação, restauração ou incorporação de processos naturais para enfrentar desafios sociais e ambientais e ampliar a resiliência urbana (Silva; Drach, 2024).

As SbN abrangem diferentes estratégias relacionadas à infraestrutura verde e azul, como ampliação da arborização, criação e conexão de áreas verdes, corredores verdes, telhados e fachadas vegetadas, biovaletas, jardins de chuva, sistemas de retenção e infiltração e pavimentos permeáveis. Essas soluções podem exercer funções simultâneas, como aumentar a permeabilidade do solo, favorecer a infiltração, ampliar a cobertura vegetal, melhorar a conectividade ecológica e contribuir para a redução das ilhas de calor (Silva; Drach, 2024; Carvalho et al., 2025).

No enfrentamento específico do calor urbano, a vegetação assume papel central. O sombreamento reduz a incidência direta de radiação sobre pavimentos, fachadas e áreas utilizadas por pedestres, enquanto a evapotranspiração participa do resfriamento do ambiente. A preservação e ampliação de áreas verdes, portanto, não atua apenas sobre a quantidade de vegetação existente, mas também sobre sua distribuição espacial e sua relação com os locais de maior aquecimento e uso cotidiano.

Nelo, Silva e Ribeiro (2024), ao analisarem os corredores verdes de Medellín, destacam as Soluções Baseadas na Natureza como estratégia de mitigação e adaptação às mudanças climáticas, ressaltando a relevância da vegetação e da conectividade verde na redução do calor urbano e na melhoria da qualidade ambiental. Essa perspectiva reforça que a eficiência das intervenções depende de sua inserção na estrutura urbana e das relações entre vegetação, topografia, infraestrutura e condições socioambientais locais.

Da mesma forma, Carvalho et al. (2025) demonstram que a aplicação das SbN deve partir do diagnóstico das fragilidades e potencialidades do território. Áreas com pouca arborização, elevada impermeabilização e deficiência de infraestrutura demandam combinações específicas de soluções, e não a simples reprodução de intervenções padronizadas. A seleção das medidas deve considerar as características morfológicas, ambientais e funcionais de cada espaço.

Essa necessidade de adequação territorial aproxima as SbN dos estudos de vulnerabilidade. O mapeamento integrado de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa permite identificar áreas prioritárias e distinguir os diferentes fatores que contribuem para a condição observada. Siqueira-Gay, Dibo e Giannotti (2017) demonstram essa possibilidade ao utilizar o IVIC como instrumento de suporte à gestão urbana e à identificação de áreas prioritárias para medidas de mitigação das ilhas de calor.

Sob a perspectiva da gestão de riscos e da Defesa Civil, essa abordagem fortalece a dimensão preventiva do planejamento. Estudos sobre vulnerabilidade socioambiental demonstram que os impactos dos eventos adversos não dependem somente da magnitude do fenômeno, mas também das condições sociais, econômicas, territoriais e infraestruturais que determinam a capacidade de resposta da população (Chaves et al., 2022; Mello et al., 2023). Dessa forma, reconhecer espacialmente a sobreposição entre exposição térmica e vulnerabilidade pode subsidiar a priorização territorial de ações preventivas.

A integração entre diagnóstico térmico, características ambientais, morfologia urbana e vulnerabilidade socioespacial estabelece, portanto, uma passagem entre a compreensão do fenômeno e a tomada de decisão. A LST permite representar o campo térmico superficial; os índices espectrais, o uso e cobertura da terra e a altitude auxiliam na interpretação de seus condicionantes; a modelagem espacial permite investigar como essas relações variam no território; as ZCL oferecem contexto para a morfologia urbana; e o IVIC incorpora a dimensão socioespacial. A partir dessa leitura integrada, as Soluções Baseadas na Natureza e outras medidas preventivas podem ser direcionadas aos setores em que os diferentes componentes do problema se sobrepõem, fortalecendo o planejamento urbano e a gestão preventiva dos riscos associados ao calor.

2.2 Materiais e métodos

2.2.1 Área de estudo

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2025), o município de Leme, localizado no estado de São Paulo, possui área territorial de 402,871 km². O Censo Demográfico de 2022 registrou população de 98.161 habitantes e densidade demográfica de 243,65 hab./km², enquanto a estimativa populacional para 2025 corresponde a 101.537 habitantes.

A população municipal apresenta forte concentração no espaço urbano, que reúne aproximadamente 98,24% dos habitantes. O recorte adotado no estudo compreendeu 149 dos

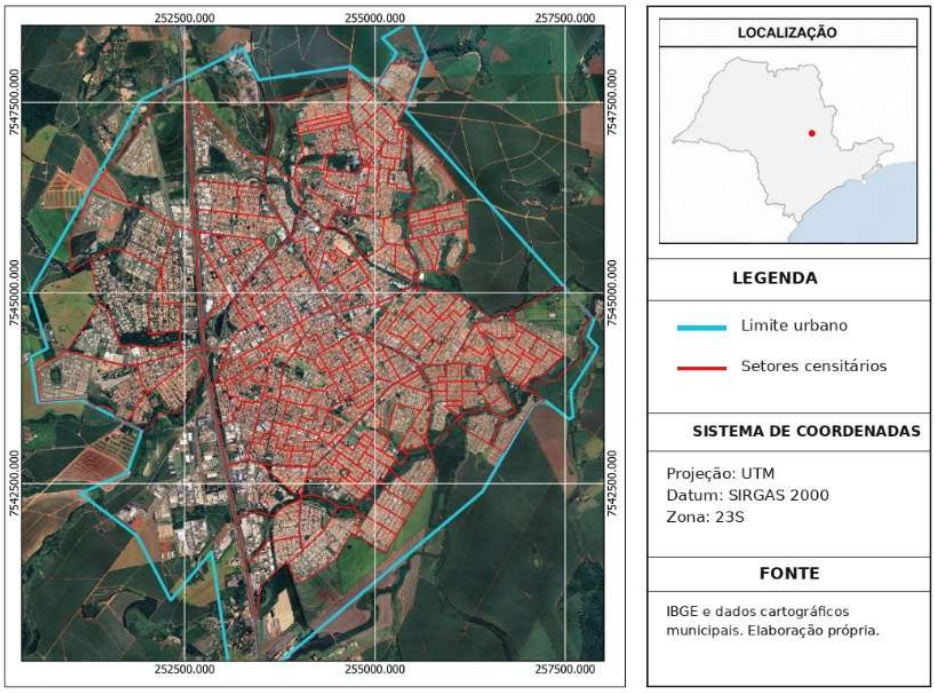
163 setores censitários do município, abrangendo, portanto, a maior parte da população e das áreas submetidas à dinâmica urbana analisada. Essa característica torna o recorte particularmente adequado à investigação das diferenças intraurbanas de aquecimento superficial e vulnerabilidade socioespacial.

O município apresenta clima tropical com inverno seco, classificado como Aw segundo Köppen. A temperatura média anual é de aproximadamente 21,7 °C, com mínima média de 15,2 °C e máxima média de 28,1 °C. O regime climático apresenta marcada sazonalidade, com período mais seco no inverno e maior concentração das chuvas nos meses mais quentes. Essa característica é relevante para a interpretação do comportamento térmico superficial, uma vez que a disponibilidade de umidade, o estado da vegetação e as condições atmosféricas variam ao longo do ano e podem influenciar a resposta térmica das superfícies urbanas.

A estrutura urbana de Leme também contempla áreas ambientalmente protegidas integrantes do Sistema de Parques Integrados (SPI), previsto na legislação municipal de uso e ocupação do solo. Suas áreas foram delimitadas e posteriormente ampliadas e ajustadas por sucessivas normas municipais, entre elas as Leis Complementares nº 181/1996, nº 254/1999 e nº 294/2000.

O estudo concentrou-se na área urbanizada do município, cuja delimitação, juntamente com a distribuição dos setores censitários considerados na análise, é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Área do Estudo



Fonte: elaboração própria (2026).

Esse recorte territorial corresponde à área de interesse para a investigação dos padrões de aquecimento superficial e de sua relação com as condições socioespaciais da população. A escolha de Leme/SP permite examinar essas relações em uma cidade de porte pequeno a médio, contexto ainda menos explorado nos estudos de clima urbano quando comparado às grandes áreas metropolitanas (Alves, 2017; Teixeira; Amorim, 2022).

A delimitação adotada permitiu compatibilizar a análise das informações orbitais com as unidades territoriais do Censo Demográfico de 2022. Dessa forma, o recorte urbano constituiu a referência espacial comum para a modelagem térmica e para a posterior integração entre exposição e indicadores socioespaciais.

2.2.2 Delineamento metodológico

O estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de abordagem quantitativa e caráter exploratório-descritivo, com recorte espacial na área urbana de Leme/SP. A investigação combinou pesquisa bibliográfica, geoprocessamento, sensoriamento remoto, análise estatística espacial e integração de dados ambientais e censitários, com a finalidade de construir um diagnóstico territorial da vulnerabilidade associada ao calor urbano.

A fundamentação teórica e a definição inicial das variáveis utilizadas na pesquisa foram apoiadas por levantamento bibliográfico realizado principalmente no Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por meio do acesso CAFe. Inicialmente, foram definidas palavras-chave relacionadas aos principais eixos do trabalho, abrangendo clima urbano e ilhas de calor, temperatura da superfície terrestre, sensoriamento remoto, vulnerabilidade socioespacial, modelagem espacial, Regressão Geograficamente Ponderada, Zonas Climáticas Locais e Soluções Baseadas na Natureza.

A seleção das publicações ocorreu de forma progressiva. Em uma primeira etapa, os resultados recuperados foram avaliados a partir de seus títulos, sendo mantidos aqueles potencialmente relacionados ao objeto da pesquisa. Os trabalhos pré-selecionados foram organizados no gerenciador bibliográfico Zotero, em coleções temáticas correspondentes aos principais assuntos investigados. Em seguida, realizou-se a leitura dos resumos, com a finalidade de verificar a efetiva aderência dos estudos ao problema de pesquisa e aos procedimentos metodológicos empregados. Os trabalhos que não apresentavam relação direta com os eixos investigados foram descartados nessa etapa. Por fim, os artigos remanescentes foram submetidos à leitura integral, constituindo o conjunto de referências utilizado na fundamentação teórica, na definição das variáveis e na discussão dos resultados.

Após a etapa de fundamentação bibliográfica, o procedimento empírico foi estruturado em seis etapas articuladas, iniciando-se pela aquisição e preparação dos dados ambientais e térmicos, passando pela modelagem espacial da Temperatura da Superfície Terrestre (LST) e culminando na integração entre exposição térmica, características morfológicas e indicadores socioespaciais para a composição do Índice de Vulnerabilidade às Ilhas de Calor (IVIC).

Inicialmente, foram adquiridas e processadas as imagens Landsat 8 utilizadas para a obtenção da LST e dos índices espectrais NDVI, NDBI e BU. Em seguida, foram incorporadas as informações de altitude e de uso e cobertura da terra. As variáveis ambientais foram posteriormente organizadas em uma malha regular de 150 m × 150 m, com utilização de buffer de 90 m para representação das proporções das classes de uso e cobertura da terra. A base resultante foi utilizada na regressão exploratória e, posteriormente, na Regressão Geograficamente Ponderada. Na etapa socioespacial, foram incorporadas as Zonas Climáticas Locais (ZCL) e os indicadores censitários utilizados na construção das dimensões de sensibilidade social e capacidade adaptativa e, por fim, na composição do IVIC.

Os procedimentos de geoprocessamento, recorte, reprojeção, alinhamento dos dados matriciais, extração de valores e produção cartográfica foram realizados no QGIS 3.40. O Modelo Digital de Elevação foi obtido por meio do complemento OpenTopography. A regressão exploratória e a GWR foram executadas no PlanX GeoStats Lab, enquanto as Análises de Componentes Principais foram realizadas no Stats Unlock.

A Tabela 1 sintetiza as etapas metodológicas, os principais procedimentos empregados e os produtos gerados para utilização nas etapas subsequentes.

Tabela 1 - Síntese do delineamento metodológico

Etapa	Procedimento	Produto analítico
1	Aquisição e preparação das cenas Landsat 8 Collection 2 Level-2	Bandas refletivas e térmica alinhadas ao recorte de estudo
2	Cálculo da LST, NDVI, NDBI e BU; incorporação da altitude	Superfícies térmicas e variáveis ambientais com resolução compatível
3	Reclassificação do MapBiomas e amostragem em malha de 150 m × 150 m com buffer de 90 m	Base de modelagem com 1.640 registros completos
4	Regressão exploratória e ajuste da GWR	Modelo global selecionado, coeficientes locais e diagnósticos
5	Obtenção das ZCL e definição da classe dominante por setor	Caracterização morfológica dos setores censitários
6	PCA dos indicadores censitários e composição do IVIC	Índice normalizado e identificação de setores prioritários

Fonte: elaboração própria (2026).

Ferramentas de inteligência artificial generativa foram utilizadas como recurso auxiliar durante o desenvolvimento do trabalho, principalmente para apoio à organização e revisão textual, discussão de procedimentos metodológicos e aprimoramento da clareza da redação. A seleção das bases de dados, o processamento geoespacial, a execução das análises estatísticas, a conferência dos resultados e as decisões metodológicas permaneceram sob responsabilidade do autor. As informações e sugestões obtidas com auxílio dessas ferramentas foram avaliadas criticamente e confrontadas com as bases de dados e referências bibliográficas utilizadas na pesquisa.

2.2.3 Aquisição e preparação dos dados orbitais

Foram utilizadas duas cenas Landsat 8, provenientes dos sensores Operational Land Imager (OLI) e Thermal Infrared Sensor (TIRS), Collection 2 Level-2, disponibilizadas pelo United States Geological Survey (USGS). As cenas correspondem à órbita/ponto 220/075 do Worldwide Reference System 2 (WRS-2): 27 de setembro de 2020, às 13:10:26, no Tempo Universal Coordenado (UTC), com cobertura de nuvens de 0,23%; e 16 de fevereiro de 2026, às 13:10:09 UTC, com cobertura de nuvens de 0,06%. As bandas refletivas apresentam resolução espacial de 30 m, enquanto a banda térmica foi utilizada no produto reamostrado para 30 m. Os dados foram posteriormente reprojetados para o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas 2000 (SIRGAS 2000), projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), zona 23 Sul.

A cena de 2020 foi adotada como representativa de um cenário de estresse térmico, pois foi obtida durante o período de forte aquecimento associado à onda de calor registrada no estado de São Paulo pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2020). A imagem de 27 de setembro antecedeu em poucos dias os maiores valores registrados no final daquele mês e, portanto, foi interpretada como associada ao período do evento, não necessariamente ao seu pico. A cena de 2026 foi utilizada como referência comparativa em razão da baixa cobertura de nuvens.

A seleção das cenas combinou pertinência ao problema e qualidade de observação. Como as imagens correspondem a épocas distintas do ano e a condições atmosféricas e sazonais diferentes, sua comparação foi tratada como episódica. As cenas representam condições específicas existentes nos respectivos momentos de aquisição e não constituem uma série temporal adequada à identificação de tendências climáticas de longo prazo. Dessa forma, o contraste foi utilizado para examinar diferenças nos padrões de aquecimento superficial entre

duas situações distintas, e não para medir evolução climática no intervalo ou atribuir as diferenças observadas às mudanças climáticas.

Após a aquisição, as bandas foram recortadas, reprojetadas e alinhadas em SIRGAS 2000/UTM zona 23 Sul. O alinhamento foi necessário para que cada posição espacial correspondesse às mesmas coordenadas nos diferentes rasters e para que a extração posterior das variáveis ambientais fosse realizada sobre uma base comum.

2.2.4 Estimativa da LST e comparação entre as cenas

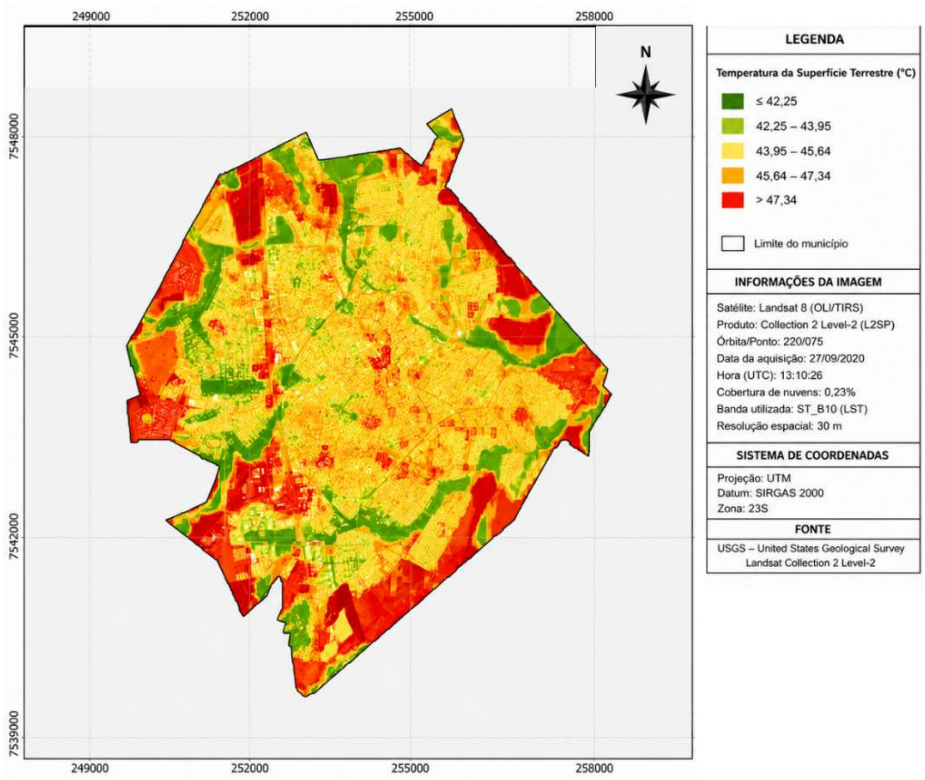
A reflectância de superfície e a Temperatura da Superfície Terrestre (LST) foram obtidas mediante a aplicação dos fatores de escala do produto Landsat Collection 2 Level-2, conforme as Equações 1 e 2:

$$\rho = DN \times 0{,}0000275 - 0{,}2 \quad (1)$$

$$LST = (DN \times 0{,}00341802) - 124{,}15 \quad (2)$$

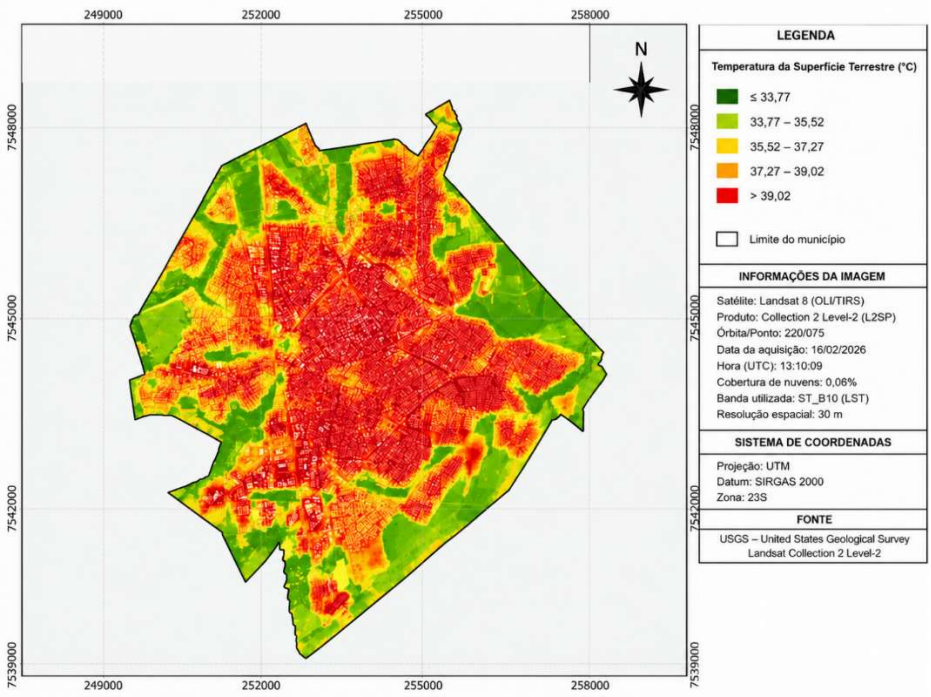
Em que ρ representa a reflectância de superfície e *DN* o valor digital do pixel. A distribuição espacial da LST nas cenas de 2020 e 2026 é apresentada na Figura 2 e 3, possibilitando a comparação dos padrões térmicos observados nos dois períodos.

Figura 2 - Temperatura da Superfície Terrestre 2020



Fonte: elaboração própria (2026).

Figura 3 - Temperatura da Superfície Terrestre 2026



Fonte: elaboração própria (2026).

Para comparar a posição térmica relativa dos setores, os valores de LST foram normalizados separadamente em cada cena pelo método mínimo - máximo, conforme a Equação 3:

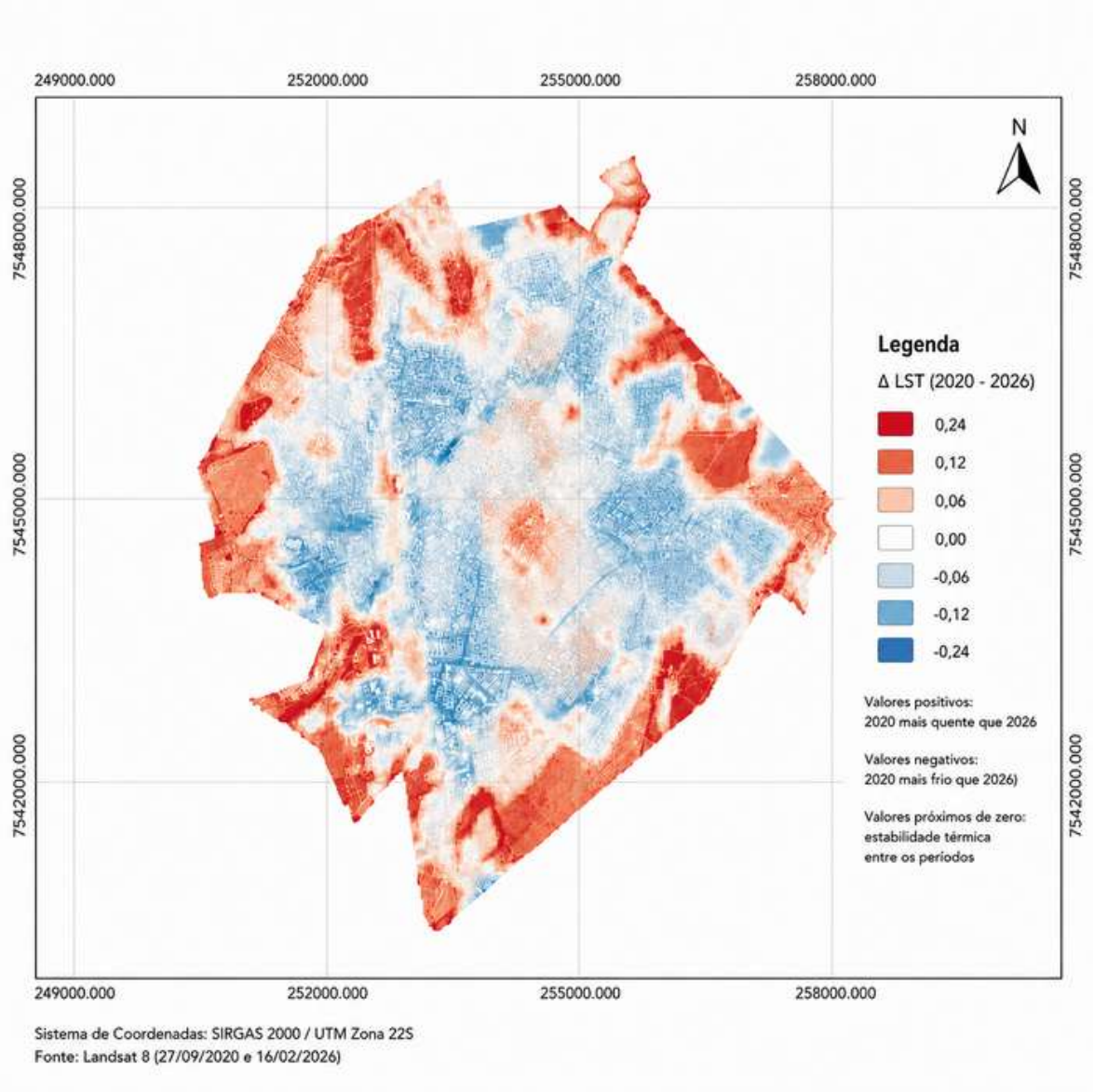
$$LST\ normalizada = \frac{LST - LSTmin}{LSTmax - LSTmin} \quad (3)$$

Posteriormente, calculou-se a diferença entre as superfícies normalizadas de 2020 e 2026:

$$\Delta LST = LST\ norma(2020) - LST\ norma(2026) \quad (4)$$

Valores positivos de ΔLST indicam maior intensidade térmica relativa em 2020; valores negativos representam maior intensidade relativa em 2026; e valores próximos de zero indicam estabilidade térmica relativa entre as cenas. Como a normalização foi realizada separadamente, a diferença representa a posição relativa dos pixels em cada cena, e não a diferença absoluta de temperatura em graus Celsius. A distribuição espacial desse resultado é apresentada na Figura 4.

Figura 4 - Diferença da temperatura da superfície normalizada (2020-2026)



Fonte: elaboração própria (2026).

Para preservar a interpretação física dos coeficientes, a LST da cena de 2020, expressa em graus Celsius, foi utilizada como variável dependente na regressão exploratória e na GWR. A normalização foi empregada na comparação térmica relativa entre as cenas e na composição da dimensão de exposição do IVIC. Dessa forma, distinguem-se duas finalidades analíticas: os valores absolutos de LST foram utilizados na modelagem das relações entre temperatura e variáveis ambientais, enquanto os valores normalizados permitiram representar a posição térmica relativa necessária à integração dos componentes do índice de vulnerabilidade. A metodologia de vulnerabilidade utilizada como referência também emprega a temperatura

superficial como componente da dimensão de exposição e sua integração posterior à escala dos setores censitários.

2.2.5 Seleção e preparação das variáveis ambientais

A definição das variáveis ambientais potencialmente associadas à distribuição espacial da LST foi orientada pela literatura especializada, com destaque para o mapeamento sistemático realizado por Lopes e Hora (2023). As autoras analisaram estudos que empregaram modelos de regressão na investigação das ilhas de calor urbanas, buscando identificar os métodos utilizados e as variáveis consideradas na explicação do fenômeno. A pesquisa reuniu inicialmente 643 trabalhos e, após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, 34 estudos aderentes foram analisados integralmente (Lopes; Hora, 2023).

O levantamento evidenciou ampla diversidade de fatores empregados nos modelos de regressão, com mais de cem variáveis identificadas. Predominaram aquelas relacionadas à vegetação, às áreas construídas, à morfologia urbana e à presença de água. Entre as variáveis mais recorrentes destacaram-se o NDVI, áreas verdes, características relacionadas à geometria urbana, proporção de água e áreas construídas. Embora alguns modelos tenham utilizado mais de 30 variáveis, Lopes e Hora (2023) verificaram que a utilização de conjuntos entre quatro e oito variáveis foi a situação mais frequente entre os estudos analisados.

Com base nesse levantamento, foi definido um conjunto inicial de variáveis candidatas, considerando sua recorrência na literatura, sua relação com os processos de aquecimento superficial e a disponibilidade de dados espacialmente compatíveis com a área de estudo. Foram considerados o NDVI, o NDBI, o BU, a altitude e as proporções das classes de uso e cobertura da terra. Essa seleção teve caráter preliminar e não implicou a permanência automática das variáveis no modelo final. A adequação estatística das diferentes combinações foi posteriormente avaliada por meio da regressão exploratória.

A escolha de variáveis relacionadas à vegetação e às superfícies construídas também encontra suporte nos estudos empíricos reunidos. Lopes, Nascimento e Hora (2023), ao investigarem variáveis urbanas e ambientais associadas à temperatura superficial, encontraram coeficientes negativos para NDVI e vegetação arbórea e positivos para NDBI e superfícies asfaltadas, indicando comportamentos térmicos distintos entre superfícies vegetadas e construídas. A altitude também foi considerada como variável candidata por representar um condicionante topográfico capaz de participar das variações espaciais da temperatura da superfície, tendo sido utilizada em estudos de modelagem térmica (Alves; Galvani, 2021).

Para representar espectralmente as condições da vegetação e das superfícies construídas, foram calculados NDVI, NDBI e BU, conforme as Equações 5, 6 e 7:

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (5)$$

$$NDBI = \frac{SWIR-NIR}{SWIR+NIR} \quad (6)$$

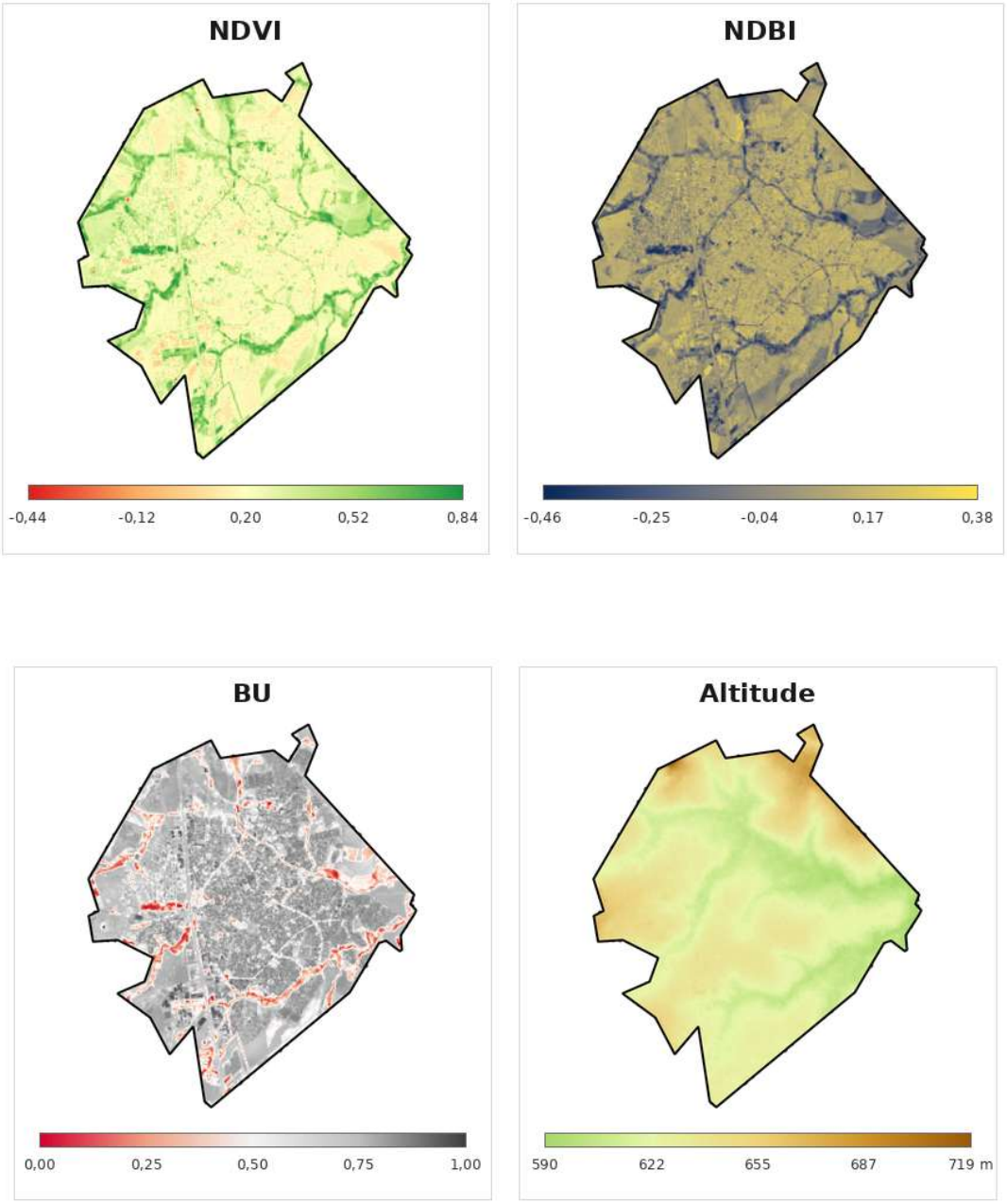
$$BU = NDBI - NDVI \quad (7)$$

Em que NIR corresponde à banda do infravermelho próximo; RED, à banda do vermelho; e SWIR, à banda do infravermelho de ondas curtas. O NDVI foi empregado como indicador da presença e do vigor da cobertura vegetal, enquanto o NDBI foi utilizado como indicador espectral associado às superfícies construídas. O BU foi incorporado como indicador complementar, uma vez que o NDBI pode apresentar respostas semelhantes para áreas urbanizadas e superfícies de solo exposto. A combinação entre NDVI e NDBI amplia a capacidade de distinção entre vegetação, construções e solo exposto (Silveira et al., 2023).

A utilização conjunta desses índices também permite reconhecer que diferentes tipos de superfície podem apresentar respostas térmicas semelhantes por mecanismos distintos. Silveira et al. (2023), por exemplo, identificaram áreas de elevada temperatura associadas não apenas à ocupação urbana, mas também a fragmentos de solo exposto, acompanhados de valores elevados de BU e reduzidos de NDVI. Esse comportamento reforça a necessidade de interpretar os índices de maneira integrada, evitando associar automaticamente valores elevados de indicadores de construção exclusivamente às superfícies edificadas.

A altitude foi obtida a partir do Modelo Digital de Elevação *Shuttle Radar Topography Mission Global 1 Arc-Second* (SRTM GL1), com resolução espacial aproximada de 30 m, acessado pelo complemento OpenTopography no QGIS. O modelo foi recortado para a área de estudo, reprojetado para SIRGAS 2000/UTM zona 23 Sul e alinhado aos demais dados matriciais. A distribuição espacial do NDVI, NDBI, BU e da altitude na área de estudo é apresentada na Figura 5, permitindo visualizar a heterogeneidade espacial das variáveis ambientais consideradas inicialmente na modelagem da LST.

Figura 5 - Variáveis ambientais

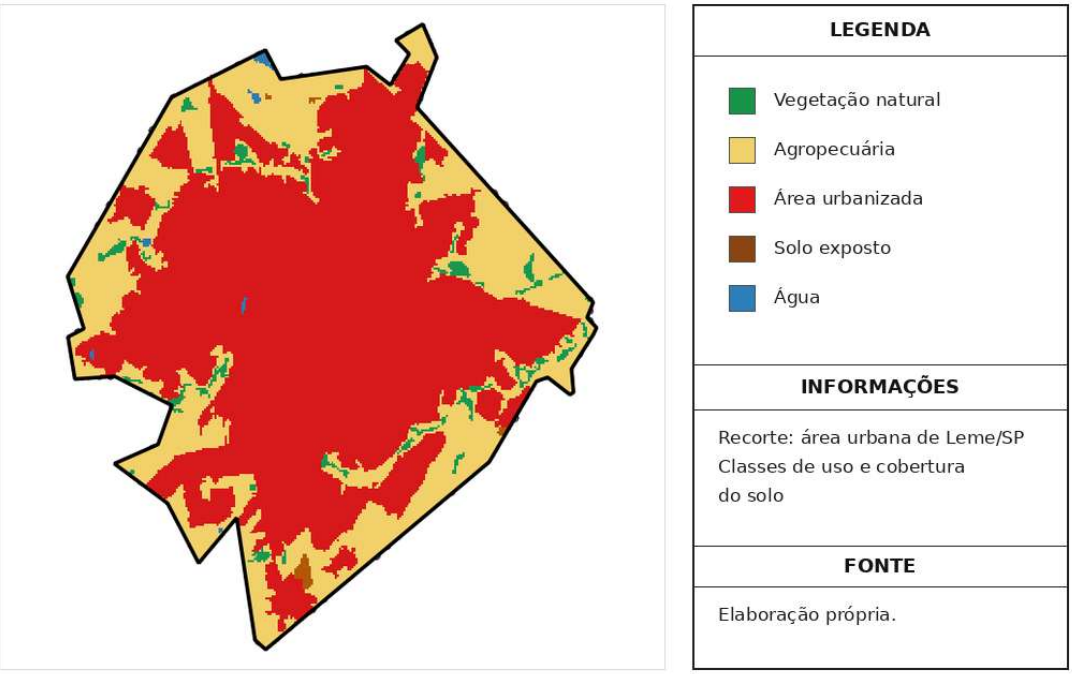


Fonte: elaboração própria (2026).

O uso e a cobertura da terra foram obtidos do Projeto MapBiomas, Coleção 10.1 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, com resolução espacial de 30 m. Foi selecionado o mapa correspondente ao ano de 2024. No recorte analisado, foram identificados os códigos 3, 15, 20, 21, 24, 25, 33, 39, 41 e 48, posteriormente reagrupados em vegetação natural, uso agropecuário, área urbanizada, outras áreas não vegetadas/solo exposto e água (Projeto MapBiomas, 2026).

A reclassificação teve como finalidade reduzir o detalhamento original da legenda para categorias compatíveis com a análise das características superficiais potencialmente associadas à distribuição térmica. Dessa forma, buscou-se representar a participação relativa de superfícies vegetadas, usos agropecuários, áreas urbanizadas, superfícies não vegetadas ou de solo exposto e corpos d'água no entorno das unidades amostrais. A distribuição espacial dessas classes no município é apresentada na Figura 6.

Figura 6 - Uso e cobertura da terra reclassificado



Fonte: elaboração própria (2026).

Optou-se pelo mapa de 2024 por corresponder ao ano mais recente disponibilizado na Coleção 10.1 e por representar uma configuração territorial mais próxima do contexto atual de planejamento municipal. A análise da série histórica municipal de uso e cobertura da terra entre 2020 e 2024 , indicou relativa estabilidade da composição geral das principais classes ao longo do período. Entretanto, a estabilidade observada em escala municipal não exclui alterações localizadas no interior das unidades analisadas. A diferença temporal entre a cobertura da terra de 2024 e a LST de 2020 foi, portanto, considerada uma limitação da análise, razão pela qual as associações encontradas foram interpretadas como contextuais e não como relações causais diretas.

2.2.6 Malha amostral, regressão exploratória e GWR

Para estruturar a base utilizada na modelagem do campo térmico superficial, foi estabelecida uma malha regular de 150 m × 150 m sobre a área de estudo. A dimensão adotada corresponde a cinco pixels dos dados Landsat de 30 m de resolução espacial e foi definida como uma escala intermediária entre o detalhamento espacial das informações originais e a necessidade de reduzir a redundância entre observações muito próximas. A utilização direta de todos os pixels de 30 m produziria um número muito elevado de registros espacialmente adjacentes, com forte similaridade entre observações vizinhas, enquanto uma malha excessivamente espaçada poderia reduzir a capacidade de representar a heterogeneidade térmica intraurbana. Dessa forma, o espaçamento de 150 m permitiu manter uma distribuição regular de pontos em toda a área urbana e resultou, após a integração das variáveis e exclusão dos registros incompletos, em 1.640 observações utilizadas na modelagem.

A utilização de informações referentes ao entorno encontra correspondência em estudos que incorporam a quantidade ou a proporção de determinadas coberturas nas proximidades dos pontos de observação. Lopes, Nascimento e Hora (2023), por exemplo, consideraram a área de vegetação existente em um raio definido ao redor dos pontos como variável explicativa da temperatura. No presente estudo, o buffer de 90 m foi empregado especificamente para converter as classes categóricas de uso e cobertura da terra em proporções representativas do entorno das unidades amostrais.

A LST da cena de 2020, expressa em graus Celsius, foi adotada como variável dependente da modelagem. O conjunto inicial de variáveis explicativas candidatas compreendeu BU, altitude, NDVI, NDBI e os percentuais de vegetação, uso agropecuário, solo exposto e água. Conforme descrito anteriormente, esse conjunto foi definido a partir da literatura e posteriormente submetido à avaliação estatística, não implicando a inclusão automática de todas as variáveis no modelo final.

A regressão exploratória foi utilizada para comparar diferentes combinações de preditores e selecionar uma especificação que apresentasse simultaneamente desempenho estatístico, parcimônia e coerência com as relações esperadas a partir da literatura. Foram avaliadas 162 combinações, considerando o Critério de Informação de Akaike corrigido (AICc), o coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajustado), a coerência do sinal dos coeficientes, a multicolinearidade e os diagnósticos dos resíduos. O AICc foi empregado como medida de comparação entre modelos, favorecendo especificações que apresentassem melhor

equilíbrio entre ajuste e complexidade, enquanto o R^2 ajustado foi utilizado para avaliar a proporção da variação da LST explicada considerando o número de preditores incluídos.

A avaliação da multicolinearidade considerou as relações existentes entre os preditores e, para a especificação selecionada, o Fator de Inflação da Variância (Variance Inflation Factor - VIF) e o número de condição. A estrutura espacial dos resíduos também foi examinada por meio do Índice de Moran, permitindo verificar a permanência de autocorrelação espacial após o ajuste do modelo. Esses diagnósticos foram interpretados conjuntamente, evitando que a escolha e a avaliação da especificação se baseassem exclusivamente em medidas de capacidade explicativa. Os respectivos valores são apresentados e discutidos na seção de resultados. No modelo final, os VIF permaneceram próximos de 1, enquanto o número de condição e a autocorrelação residual indicaram a necessidade de cautela na interpretação dos coeficientes.

A regressão exploratória foi empregada como procedimento de seleção da especificação, e não como demonstração de relações causais. Dessa forma, a permanência de determinado preditor no modelo indica sua contribuição estatística dentro do conjunto de variáveis e das condições analisadas, devendo os coeficientes ser interpretados como associações com a distribuição espacial da LST.

A especificação selecionada foi composta por altitude, NDVI, percentual de vegetação e percentual de uso agropecuário. Essa combinação foi inicialmente considerada em um modelo global e posteriormente aplicada à Regressão Geograficamente Ponderada, permitindo avaliar se a direção e a magnitude das associações entre a LST e os preditores permaneciam constantes ou variavam espacialmente.

A GWR foi ajustada utilizando kernel gaussiano fixo e largura de banda de 200 m. O kernel estabelece a ponderação espacial das observações utilizadas na estimação de cada regressão local, atribuindo maior influência às observações mais próximas. A largura de banda define a extensão espacial dessa ponderação e, consequentemente, a escala de vizinhança considerada na estimação dos coeficientes locais.

A regressão exploratória, o ajuste da GWR e a obtenção dos respectivos diagnósticos foram realizados no PlanX GeoStats Lab, em ambiente QGIS 3.40. O desempenho do modelo local foi posteriormente comparado ao modelo global por meio dos indicadores de ajuste e dos diagnósticos dos resíduos, com o objetivo de verificar se a consideração da não estacionariedade espacial proporcionou melhor representação das relações entre a LST e os preditores selecionados.

2.2.7 Zonas Climáticas Locais

As Zonas Climáticas Locais (ZCL) foram obtidas por meio do pacote LCZ4r, desenvolvido em ambiente R para facilitar a obtenção e a análise de informações baseadas no sistema Local Climate Zones. A classificação diferencia áreas construídas e coberturas naturais segundo características relacionadas à forma urbana, ao uso e cobertura da terra e às propriedades físicas da superfície, oferecendo uma base padronizada para a caracterização do ambiente urbano (Anjos; Medeiros; Castelhano, 2025).

O sistema de ZCL é composto por dez classes associadas a ambientes construídos, identificadas pelos números de 1 a 10, e sete classes relacionadas predominantemente à cobertura da superfície, identificadas pelas letras A a G. Entre as classes construídas, distinguem-se combinações de compacidade, altura das edificações, proporção de superfícies construídas e impermeáveis e presença de cobertura vegetal. As classes de cobertura representam, de forma geral, superfícies vegetadas, solo exposto, rocha, pavimentação e água. Essa estrutura permite representar a heterogeneidade morfológica do território de maneira mais detalhada do que uma simples distinção entre áreas urbanas e não urbanas.

No presente estudo, as classes de ZCL foram utilizadas principalmente como informação de contextualização morfológica dos setores censitários. Entre as classes posteriormente relevantes para a interpretação dos setores prioritários, destacaram-se a ZCL 3, correspondente a tecido compacto de baixa altura, e a ZCL 5, associada a tecido aberto de média altura.

Após a obtenção do mapa correspondente à área de estudo, as classes de ZCL foram espacialmente relacionadas aos 149 setores censitários utilizados na análise socioespacial. Para cada setor, foi calculada a proporção da área ocupada por cada classe. Foi considerada ZCL dominante aquela que representou mais de 50% da área do respectivo setor censitário. Nos setores em que nenhuma classe ultrapassou esse limite, não foi atribuída uma ZCL dominante.

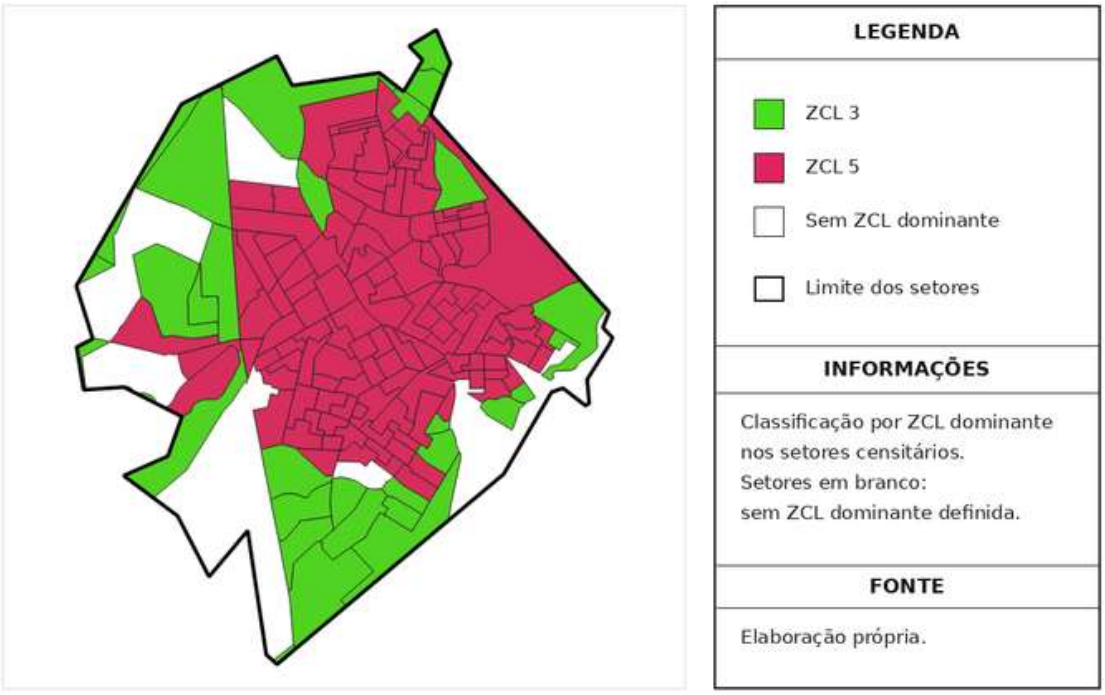
A adoção desse critério buscou evitar que uma classe com participação apenas ligeiramente superior às demais fosse interpretada como representativa da morfologia predominante do setor. Dessa forma, a classificação dominante foi atribuída apenas quando havia predominância territorial efetiva de uma determinada ZCL.

A associação das ZCL aos setores censitários teve como finalidade compatibilizar a classificação morfológica com a unidade espacial empregada na análise da vulnerabilidade. As ZCL não foram incorporadas como componente matemático do IVIC, sendo utilizadas como informação complementar para contextualizar as características da estrutura e da cobertura

urbana dos setores e auxiliar na interpretação dos padrões de exposição térmica e vulnerabilidade socioespacial.

A distribuição espacial das ZCL dominantes nos setores censitários é apresentada na Figura 7.

Figura 7 - ZCL dominantes por setor censitário



Fonte: elaboração própria (2026).

A classificação obtida permitiu, portanto, acrescentar uma dimensão morfológica à análise sem atribuir automaticamente maior ou menor vulnerabilidade a uma determinada ZCL. Sua função no estudo foi fornecer contexto para a interpretação dos setores posteriormente identificados pelo IVIC, permitindo relacionar as condições de vulnerabilidade às diferentes configurações do tecido urbano.

2.2.8 Indicadores socioespaciais e Análise de Componentes Principais

Os indicadores socioespaciais foram obtidos a partir dos dados do Censo Demográfico de 2022, disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) na base de agregados por setores censitários. Foram consideradas as informações referentes aos 149 setores censitários compreendidos no recorte de estudo. As variáveis foram selecionadas nas bases temáticas de características dos domicílios, alfabetização, demografia e parentesco e posteriormente associadas à malha vetorial dos setores censitários em ambiente QGIS.

A seleção e a organização dos indicadores nas dimensões de sensibilidade social e capacidade adaptativa foram orientadas pela estrutura conceitual empregada por Siqueira-Gay, Dibo e Giannotti (2017) na construção do Índice de Vulnerabilidade às Ilhas de Calor (IVIC). Assim, o IBGE constituiu a fonte dos dados censitários, enquanto a literatura forneceu a referência para sua organização e interpretação no contexto da vulnerabilidade ao calor. A aplicação realizada em Leme/SP corresponde, contudo, a uma adaptação da proposta de referência às características territoriais e às variáveis selecionadas para este estudo.

A sensibilidade social foi representada por dois indicadores. O primeiro correspondeu à proporção de mulheres responsáveis pelo domicílio, obtida da variável V01063, pertencente ao tema Pessoas - Parentesco, cuja descrição corresponde a "pessoa responsável pelo domicílio, sexo feminino". Para fins do Censo Demográfico de 2022, considera-se pessoa responsável pelo domicílio aquela com 12 anos ou mais de idade cuja responsabilidade domiciliar é reconhecida pelos demais moradores. Dessa forma, o indicador utilizado neste estudo corresponde à proporção de pessoas do sexo feminino registradas nessa condição, não sendo necessariamente equivalente à condição de principal provedora econômica do domicílio.

O segundo indicador correspondeu à proporção conjunta de crianças e adolescentes de 0 a 14 anos e pessoas idosas com 60 anos ou mais. A população de 0 a 14 anos foi obtida pela soma das variáveis V01031, V01032 e V01033, referentes, respectivamente, às faixas etárias de 0 a 4, 5 a 9 e 10 a 14 anos. Esse agrupamento foi adotado em função das faixas etárias disponibilizadas pela base censitária e abrange crianças e parte da população adolescente. A população idosa foi representada pelas variáveis V01040 e V01041, correspondentes às faixas de 60 a 69 anos e 70 anos ou mais. A adoção do limite de 60 anos ou mais está de acordo com o critério estabelecido pelo Estatuto da Pessoa Idosa para a definição de pessoa idosa.

A proporção conjunta desses grupos etários foi calculada em relação ao total de pessoas residentes no respectivo setor censitário, representado pela variável V0001. Dessa forma, o indicador expressou a participação relativa de crianças, adolescentes e pessoas idosas na população de cada setor, grupos considerados potencialmente mais sensíveis aos efeitos associados ao calor.

A capacidade adaptativa foi representada por quatro indicadores relacionados às condições domiciliares e ao capital humano: esgotamento sanitário, coleta domiciliar direta de resíduos, disponibilidade de água encanada no interior do domicílio e alfabetização. As informações domiciliares foram obtidas no tema Características do Domicílio - Parte 2.

Para o esgotamento sanitário foi utilizada a variável V00309, referente aos domicílios particulares permanentes ocupados cuja destinação do esgoto do banheiro, sanitário ou buraco

para dejeções ocorre por rede geral ou pluvial. A disponibilidade de água encanada no interior do domicílio foi representada pela variável V00199.

A coleta domiciliar direta de resíduos foi representada pela variável V00397, referente aos domicílios particulares permanentes ocupados cujo lixo é coletado diretamente no domicílio por serviço de limpeza. Embora a base censitária também contemple o lixo depositado em caçamba de serviço de limpeza, essa modalidade não foi incorporada ao indicador. Optou-se pela coleta direta por representar uma condição mais homogênea de atendimento no próprio domicílio, enquanto a utilização de caçambas envolve pontos coletivos e condições de acesso que não são detalhadas pela variável censitária. Consequentemente, esse indicador deve ser interpretado especificamente como cobertura de coleta domiciliar direta, e não como cobertura total do serviço de limpeza. Essa escolha pode produzir uma estimativa mais restritiva da cobertura nos setores em que a utilização de caçambas seja relevante, constituindo uma limitação do indicador adotado.

A composição da capacidade adaptativa corresponde a uma adaptação da proposta de Siqueira-Gay, Dibo e Giannotti (2017) ao contexto e à escala de análise de Leme/SP. A renda não foi incorporada como variável específica, uma vez que também não constitui indicador explícito do IVIC utilizado como principal referência metodológica, que privilegia condições de infraestrutura, alfabetização e acessibilidade a serviços.

A acessibilidade a hospitais, por sua vez, foi empregada pelas autoras a partir do número de estabelecimentos alcançáveis em até 60 minutos de transporte público. A aplicação direta desse critério em Leme tenderia a apresentar reduzida capacidade de diferenciação entre os setores, em razão da menor extensão da área urbana, além de poder incluir estabelecimentos situados em municípios vizinhos e introduzir uma dimensão regional em uma análise de caráter intraurbano. Por essa razão, esse indicador não foi incorporado à composição da capacidade adaptativa. Essas escolhas representam adaptações metodológicas ao contexto local e devem ser consideradas na interpretação dos resultados.

A alfabetização foi obtida no tema Pessoas - Alfabetização. Foram utilizadas as variáveis V00852 a V00857, que distinguem pessoas que sabem e não sabem ler e escrever nas faixas etárias de 15 a 29 anos, 30 a 59 anos e 60 anos ou mais. A partir dessas informações foi calculada a proporção de pessoas alfabetizadas entre a população de 15 anos ou mais abrangida pelas respectivas categorias. A adoção do limite de 15 anos ou mais acompanha o recorte utilizado pelo IBGE na divulgação dos indicadores de alfabetização e permite reduzir a influência de indivíduos ainda inseridos nas etapas iniciais do processo regular de escolarização.

A Tabela 2 apresenta a síntese das dimensões socioespaciais utilizadas na composição do IVIC, bem como os respectivos indicadores e variáveis censitárias adotados no estudo.

Tabela 2 - Dimensões empregadas na composição do IVIC

Dimensão	Indicador construído	Variável do IBGE	Base temática
Sensibilidade social	Mulheres responsáveis pelo domicílio	V01063	Pessoas – Parentesco
	Crianças e adolescentes de 0 a 14 anos	V01031 + V01032 + V01033	Pessoas – Demografia
	Pessoas idosas com 60 anos ou mais	V01040 + V01041	Pessoas – Demografia
Capacidade adaptativa	Esgotamento sanitário	V00309	Características do Domicílio – Parte 2
	Coleta domiciliar direta de resíduos	V00397	Características do Domicílio – Parte 2
	Água encanada no interior do domicílio	V00199	Características do Domicílio – Parte 2
	Alfabetização da população com 15 anos ou mais	V00852 a V00857	Pessoas – Alfabetização

Fonte: elaboração própria (2026).

A utilização de proporções teve como finalidade possibilitar a comparação entre setores censitários com diferentes tamanhos populacionais e números de domicílios. Nas variáveis de sensibilidade demográfica, a população total do setor foi utilizada como referência para a construção das proporções. Para os indicadores domiciliares, foram consideradas as unidades domiciliares correspondentes às categorias às quais as variáveis censitárias se referem.

Antes da Análise de Componentes Principais, os indicadores foram padronizados por meio de escores-z, de forma a eliminar diferenças de escala entre as variáveis. A PCA foi aplicada separadamente às dimensões de capacidade adaptativa e sensibilidade social, utilizando a matriz de correlação dos indicadores padronizados.

A retenção dos componentes considerou conjuntamente os autovalores, a proporção de variância explicada e a interpretação dos carregamentos. O critério de Kaiser, baseado em autovalores superiores a 1, foi utilizado como referência, mas não como critério exclusivo de retenção.

Para a capacidade adaptativa foram retidos os dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2). Embora somente o PC1 apresentasse autovalor superior a 1, o PC2 foi mantido por acrescentar uma dimensão interpretativamente relevante, associada principalmente à alfabetização. Os componentes foram combinados segundo suas participações relativas na variância explicada pelo conjunto retido, conforme a Equação 8:

$$CA = (0{,}7825 \times PC1) + (0{,}2175 \times PC2) \quad (8)$$

Em que CA representa o escore sintético de capacidade adaptativa; PC1 e PC2 correspondem aos escores dos dois componentes retidos; e os pesos representam a participação relativa de cada componente na variância total explicada pelo conjunto.

Para a sensibilidade social, foi mantido somente o PC1, calculado conforme a Equação 9:

$$S = (0{,}7071 \times ZMR) + (0{,}7071 \times ZCI) \quad (9)$$

Em que S representa o escore de sensibilidade social; ZMR corresponde à proporção padronizada de mulheres responsáveis pelo domicílio; e ZCI corresponde à proporção padronizada conjunta de crianças e adolescentes de 0 a 14 anos e pessoas idosas com 60 anos ou mais. Como os carregamentos apresentaram o mesmo sinal, valores mais elevados representam maior sensibilidade social.

Os escores resultantes das duas dimensões foram posteriormente normalizados e utilizados na composição do IVIC. As análises de componentes principais foram realizadas no Stats Unlock, e a associação dos resultados aos setores censitários foi realizada no QGIS 3.40.

2.2.9 Composição e normalização do Índice de Vulnerabilidade às Ilhas de Calor

A composição do Índice de Vulnerabilidade às Ilhas de Calor (IVIC) foi realizada a partir da integração de três dimensões: exposição térmica, sensibilidade social e capacidade adaptativa, seguindo a estrutura conceitual proposta por Siqueira-Gay, Dibo e Giannotti (2017). Nessa abordagem, a capacidade adaptativa apresenta sentido favorável, enquanto a exposição térmica e a sensibilidade social representam condições que contribuem para o aumento da vulnerabilidade.

A exposição térmica foi representada pela LST da cena de 2020. Inicialmente, os valores da superfície térmica foram normalizados pelo método mínimo-máximo, conforme a Equação 3, resultando em uma superfície com valores compreendidos entre 0 e 1. Em seguida, foi calculada, para cada setor censitário, a média dos valores de LST normalizada contidos em seu interior. Dessa forma, valores mais próximos de 1 representam setores que apresentam, em média, posições relativamente mais elevadas no campo térmico da cena de 2020, enquanto valores mais próximos de 0 correspondem a condições relativamente menos aquecidas.

Os escores de sensibilidade social e capacidade adaptativa, obtidos a partir dos procedimentos descritos na seção anterior, também foram normalizados pelo método mínimo-máximo, conforme a Equação 3. Esse procedimento permitiu expressar as três dimensões utilizadas na composição do índice em uma escala comum entre 0 e 1. Valores mais elevados de exposição térmica e sensibilidade social foram interpretados como fatores de agravamento da vulnerabilidade, enquanto valores mais elevados de capacidade adaptativa representaram condições comparativamente mais favoráveis.

A estrutura de integração adotada mantém o sentido estabelecido na formulação de Siqueira-Gay, Dibo e Giannotti (2017), na qual a capacidade adaptativa atua em sentido contrário à exposição e à sensibilidade. No presente estudo, o IVIC foi calculado conforme a Equação 10:

$$IVIC = CAnorm - (LSTnorm + Snorm) \quad (10)$$

Em que CAnorm corresponde ao escore normalizado de capacidade adaptativa; LSTnorm representa a exposição térmica, calculada pela média dos valores previamente normalizados da LST de 2020 no interior de cada setor censitário; e Snorm corresponde ao escore normalizado de sensibilidade social.

A estrutura da equação faz com que valores elevados de exposição térmica e sensibilidade social reduzam o valor do IVIC, enquanto valores mais elevados de capacidade adaptativa atuam em sentido contrário. Assim, antes da normalização final, menores valores do índice correspondem a combinações relativamente mais desfavoráveis entre exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa.

Após a integração das três dimensões, os valores resultantes do IVIC foram novamente normalizados pelo método mínimo-máximo, sem inversão do sentido do índice. Dessa forma, o IVIC final foi expresso em uma escala de 0 a 1, na qual valores próximos de zero indicam maior vulnerabilidade relativa, enquanto valores próximos de um representam condições comparativamente mais favoráveis.

O IVIC resultante deve ser interpretado de forma relativa ao conjunto dos 149 setores censitários analisados em Leme/SP. Seus valores permitem comparar as diferentes condições existentes no interior da área de estudo, não constituindo limiares universais de vulnerabilidade aplicáveis diretamente a outros municípios.

2.2.10 Classificação do IVIC e priorização territorial

Para facilitar a interpretação cartográfica e a identificação das áreas de maior interesse para intervenção, o IVIC normalizado foi dividido em cinco classes, considerando sua escala final entre 0 e 1. O intervalo total foi subdividido em faixas de 0,20, resultando nas classes de vulnerabilidade muito alta, alta, média, baixa e muito baixa.

A atribuição das classes preservou o sentido do IVIC. Portanto, quanto menor o valor do índice, maior a vulnerabilidade relativa do setor censitário. A classificação em cinco níveis foi empregada como recurso de hierarquização territorial, permitindo distinguir os setores que apresentaram condições comparativamente mais desfavoráveis no conjunto analisado.

Para fins de priorização, foram destacados os setores enquadrados nas classes de vulnerabilidade muito alta e alta, correspondentes aos valores de IVIC de até 0,40. A análise não se restringiu, entretanto, à posição final de cada setor no índice. Nos setores prioritários, as dimensões de exposição térmica, sensibilidade social e capacidade adaptativa foram examinadas separadamente para identificar quais fatores contribuíram predominantemente para sua condição de vulnerabilidade.

Essa etapa permitiu distinguir, por exemplo, setores cuja prioridade estava relacionada principalmente à elevada exposição térmica daqueles em que predominavam maior sensibilidade social, menor capacidade adaptativa ou a combinação de condições desfavoráveis. Essa diferenciação foi utilizada posteriormente para orientar a interpretação territorial e a indicação de medidas de intervenção compatíveis com as características de cada setor.

As Zonas Climáticas Locais foram utilizadas como informação complementar nessa etapa. A ZCL dominante não integrou matematicamente o cálculo do IVIC, mas foi associada aos setores prioritários para caracterizar sua morfologia urbana e auxiliar na definição de medidas territorialmente compatíveis, incluindo Soluções Baseadas na Natureza e ações preventivas de proteção e defesa civil.

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Distribuição espacial da LST e contraste entre as cenas

A cena de 27 de setembro de 2020 apresentou temperatura média da superfície terrestre (LST) de 44,79 °C e desvio-padrão de 2,54 °C, enquanto a cena de 16 de fevereiro de 2026 apresentou média de 37,26 °C e desvio-padrão de 3,50 °C, com valores variando entre 28,32 °C e 47,16 °C. A diferença superior a 7 °C entre as médias evidencia um patamar térmico

superficial substancialmente mais elevado na cena de 2020. Esse resultado é compatível com a utilização dessa cena como representação de uma condição de maior estresse térmico, embora a comparação não deva ser interpretada como tendência de aquecimento ou resfriamento entre os anos, uma vez que as imagens correspondem a condições sazonais e atmosféricas distintas.

A diferença entre as duas cenas não pode ser atribuída isoladamente a uma única causa. A LST registrada em cada aquisição resulta da interação entre as características da superfície e as condições atmosféricas e sazonais existentes no momento da passagem do satélite. Além disso, eventuais modificações no uso e cobertura da terra ocorridas entre 2020 e 2026 podem contribuir para diferenças locais. A análise realizada neste trabalho, contudo, não permite quantificar separadamente a contribuição desses fatores. Dessa forma, o contraste observado não deve ser interpretado como evidência de mudança climática nem como efeito exclusivo das transformações territoriais ocorridas no intervalo.

Nesse sentido, as condições meteorológicas e sazonais contribuem para explicar diferenças no patamar térmico geral entre as cenas, enquanto as características da superfície e da morfologia urbana auxiliam na compreensão da heterogeneidade espacial observada dentro de cada situação analisada.

Apesar da maior temperatura média em 2020, a dispersão dos valores foi superior em 2026, cujo desvio-padrão alcançou 3,50 °C, frente a 2,54 °C em 2020. Esse comportamento indica que o maior patamar térmico observado em 2020 não esteve associado, necessariamente, a uma maior variabilidade absoluta das temperaturas no interior da área de estudo. Assim, os resultados diferenciam duas características do campo térmico: a intensidade geral do aquecimento e a heterogeneidade espacial das temperaturas.

A distribuição espacial apresentada nas Figuras 2 e 3 evidencia que as temperaturas não se distribuem de maneira homogênea na área urbana. A ocorrência de superfícies com respostas térmicas distintas é coerente com estudos que relacionam a LST às características da cobertura da superfície. Silveira et al. (2023), por exemplo, identificaram temperaturas elevadas tanto em áreas urbanizadas quanto em fragmentos de solo exposto, além da associação entre temperaturas mais elevadas, menores valores de NDVI e maiores valores de BU. Esses resultados reforçam a necessidade de analisar o campo térmico conjuntamente com as características ambientais da superfície, aspecto aprofundado nas etapas seguintes da análise.

A comparação das superfícies normalizadas mostrou ainda que a posição térmica relativa dos locais não foi idêntica entre as duas cenas. Dessa forma, além da diferença no nível médio de temperatura, observaram-se alterações na posição relativa de determinadas áreas dentro do campo térmico urbano. Esse resultado indica que a distribuição espacial do

aquecimento não deve ser interpretada apenas pelos valores absolutos de LST, mas também pela forma como diferentes setores se posicionam em relação ao conjunto da cidade em cada situação analisada.

A cena de 2020 foi, portanto, adotada nas análises subsequentes como representação da condição de maior exposição térmica. A partir desse cenário, buscou-se verificar quais características ambientais estavam associadas à distribuição da LST e, posteriormente, em quais setores essa exposição se sobrepunha a condições de maior sensibilidade social e menor capacidade adaptativa.

2.3.2 Características ambientais associadas à distribuição térmica

A distribuição das variáveis ambientais evidenciou diferenças espaciais entre as unidades analisadas, indicando que a área urbana não apresenta condições homogêneas de cobertura vegetal, ocupação do solo e características topográficas. A comparação desses padrões com a distribuição da LST mostrou que a interpretação do aquecimento superficial não pode ser atribuída a uma única característica da superfície, mas à combinação de diferentes fatores ambientais.

Entre as variáveis inicialmente consideradas, a regressão exploratória selecionou altitude, NDVI, proporção de vegetação e proporção de uso agropecuário para composição do modelo global. Variáveis como NDBI, BU, proporção de solo exposto e de corpos d'água não integraram o modelo selecionado. Essa exclusão não significa necessariamente ausência de relação dessas variáveis com a temperatura superficial, mas indica que, considerando simultaneamente os critérios utilizados na seleção do modelo e as demais variáveis analisadas, elas não contribuíram para a combinação final escolhida.

A presença simultânea do NDVI e da proporção de áreas vegetadas entre os preditores selecionados reforça a importância da vegetação para a diferenciação do campo térmico urbano. No modelo global, ambas apresentaram associação negativa com a LST, indicando que maiores valores de NDVI e maior participação de cobertura vegetal estiveram relacionados a menores temperaturas superficiais. Esse comportamento é consistente com resultados encontrados por Silveira et al. (2023), que observaram associação entre menores valores de NDVI e temperaturas superficiais mais elevadas, especialmente em áreas urbanizadas e superfícies com reduzida cobertura vegetal.

A proporção de uso agropecuário, por outro lado, apresentou associação positiva com a LST no modelo global. Esse resultado sugere que, no recorte analisado, áreas classificadas como agropecuárias não apresentaram necessariamente comportamento térmico semelhante ao

de superfícies vegetadas mais densas. Uma possível interpretação está relacionada às diferentes condições de cobertura existentes nessas áreas, incluindo períodos de menor cobertura vegetal, solo exposto e variações fenológicas. Resultados semelhantes foram discutidos por Silveira et al. (2023), que identificaram temperaturas superficiais elevadas em fragmentos associados a solo exposto e usos agrícolas, demonstrando que a presença de cobertura classificada como não urbana não implica necessariamente menores temperaturas de superfície.

A altitude também integrou o conjunto de variáveis selecionadas, apresentando associação positiva com a LST no modelo global. Esse comportamento difere da expectativa simplificada de redução da temperatura com o aumento da altitude e indica que, na escala intraurbana analisada, a altitude provavelmente atua em conjunto com outras características da superfície e da ocupação territorial. Dessa forma, o resultado deve ser interpretado com cautela, principalmente porque o efeito estimado pelo modelo representa uma associação estatística dentro do intervalo altimétrico existente na área estudada, e não uma relação climática geral entre altitude e temperatura.

Os resultados ambientais indicam, portanto, que o aquecimento superficial em Leme decorre da combinação de diferentes características territoriais. A vegetação apresentou associação com menores valores de LST, enquanto o uso agropecuário e a altitude apresentaram associação positiva no modelo global. Entretanto, essas relações representam efeitos médios para toda a área analisada. A possibilidade de que a intensidade e até o sentido dessas associações variem espacialmente foi posteriormente investigada por meio da Regressão Geograficamente Ponderada.

2.3.3 Seleção do modelo e desempenho do modelo global

A regressão exploratória resultou na seleção de altitude, NDVI, percentual de vegetação e percentual de uso agropecuário entre as variáveis candidatas à explicação da distribuição espacial da LST. Das 162 combinações avaliadas, essa especificação apresentou o melhor desempenho segundo os critérios adotados para seleção. NDBI, BU, percentual de solo exposto e percentual de água, embora considerados inicialmente, não integraram a especificação final. A exclusão dessas variáveis não representa ausência de associação com a temperatura da superfície, mas indica que, na presença dos demais preditores e considerando os critérios de seleção empregados, elas não compuseram o modelo global selecionado.

O modelo apresentou R^2 de 0,3100, R^2 ajustado de 0,3083 e AICc de 7.112,7265. Assim, aproximadamente 31% da variabilidade observada na LST foi representada pela combinação das quatro variáveis selecionadas. A proximidade entre o R^2 e o R^2 ajustado mostra

que a penalização decorrente do número de preditores foi pequena. O valor de AICc, por sua vez, deve ser interpretado comparativamente às demais especificações avaliadas, e não de forma isolada, tendo sido utilizado para identificar, entre os modelos candidatos, aquele com melhor equilíbrio entre ajuste e complexidade. Os coeficientes e os indicadores gerais do modelo selecionado são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Síntese do modelo global selecionado

Componente	Indicador	Valor
Ajuste	R^2	0,3100
Ajuste	R^2 ajustado	0,3083
Ajuste	AICc	7.112,7265
Coeficiente	Intercepto	33,7634
Coeficiente	Altitude	+0,0200285
Coeficiente	NDVI	-7,51855
Coeficiente	Vegetação (%)	-0,043118
Coeficiente	Uso agropecuário (%)	+0,0231012

Fonte: elaboração própria com base nos resultados do PlanX GeoStats Lab (2026).

A partir dos coeficientes apresentados na Tabela 3, o modelo global pode ser expresso pela seguinte relação:

$$LST = 33,7364 + 0,0200285(Altitude) - 7,51855\ (NDVI) - 0,043118\ (Vegetação) + 0,0231012\ (Agropecuário) \quad (11)$$

Os coeficientes representam associações condicionais, isto é, a variação estimada da LST em relação a cada preditor quando os demais são mantidos constantes. Nesse sentido, NDVI e percentual de vegetação apresentaram relações negativas com a LST, enquanto altitude e percentual de uso agropecuário apresentaram relações positivas. Como as variáveis possuem unidades e amplitudes distintas, a magnitude absoluta dos coeficientes não deve ser utilizada diretamente para estabelecer uma hierarquia de importância entre os preditores. Assim, não seria adequado concluir, por exemplo, que o NDVI foi a variável “mais importante” apenas por apresentar o coeficiente numericamente mais elevado.

O sinal negativo obtido para o NDVI encontra respaldo nos estudos utilizados como referência. Em Iporá/GO, Alves (2017) identificou o NDVI entre as variáveis geourbanas que mais contribuíram para a explicação da variabilidade da ilha de calor urbana em uma cidade de pequeno porte. De forma semelhante, Alves e Galvani (2021), ao modelarem a ilha de calor urbana de superfície em São Carlos/SP, encontraram coeficientes negativos para o NDVI nas

quatro estações analisadas, evidenciando a recorrência da relação inversa entre vegetação e aquecimento superficial em diferentes contextos urbanos.

A permanência simultânea do NDVI e do percentual de vegetação no modelo é particularmente relevante. Embora ambas as variáveis estejam relacionadas à cobertura vegetal, elas representam aspectos distintos: o primeiro expressa uma resposta espectral da vegetação presente na superfície, enquanto o segundo representa sua participação espacial no entorno das unidades amostrais. A seleção de ambas indica que, no conjunto analisado, essas informações contribuíram conjuntamente para a especificação que melhor representou a LST, não tendo sido tratadas pelo procedimento de seleção como variáveis completamente redundantes.

O percentual de uso agropecuário apresentou coeficiente positivo, indicando associação entre maior participação dessa cobertura no entorno e maiores valores estimados de LST, consideradas constantes as demais variáveis. Esse resultado é compatível com a necessidade de não interpretar superfícies agropecuárias necessariamente como áreas termicamente amenas. Silveira et al. (2023), ao analisarem cidades catarinenses, observaram em Lages a ocorrência de temperaturas superficiais elevadas também em fragmentos de solo exposto associados ao predomínio de agricultura e silvicultura. No caso de Leme, entretanto, a explicação do coeficiente positivo por condições como solo exposto ou estágio fenológico permanece apenas como hipótese interpretativa, sobretudo porque o mapa de uso e cobertura da terra corresponde a 2024, enquanto a LST modelada é de 2020.

Um resultado distinto da literatura de referência ocorreu para a altitude, cujo coeficiente foi positivo. No estudo de Alves e Galvani (2021), os coeficientes da altitude no modelo global foram negativos nas quatro estações analisadas, variando de - 0,001 a - 0,007. Em Leme, portanto, não se reproduziu essa relação inversa. O resultado não significa que maiores altitudes causem aumento da temperatura, mas indica que, considerando conjuntamente os demais preditores, as cotas mais elevadas da área analisada estiveram associadas a maiores valores estimados de LST. A divergência reforça o caráter contextual das relações entre fatores ambientais e temperatura da superfície e sugere que a altitude pode estar espacialmente combinada a características de ocupação e cobertura não representadas diretamente pelo coeficiente global.

Apesar da seleção de quatro preditores ambientalmente coerentes, o R^2 de 0,3100 mostra que o modelo global representou apenas parte da variabilidade espacial da LST. Isso não significa que os 69% restantes correspondam exclusivamente a variáveis ausentes. Essa parcela pode estar relacionada também a relações não lineares, diferenças de escala,

características da superfície não incorporadas ao modelo e, especialmente, à possibilidade de que as associações entre os preditores e a LST não permaneçam constantes em toda a área estudada.

Essa última hipótese torna-se central para a continuidade da análise. Um modelo global atribui um único coeficiente a cada variável para toda a área, porém as relações entre vegetação, uso da terra, altitude e temperatura podem assumir intensidades e até direções distintas conforme a localização. A comparação com a Regressão Geograficamente Ponderada, apresentada na seção seguinte, permitiu avaliar justamente essa heterogeneidade espacial.

2.3.4 Desempenho e variação espacial da GWR

A aplicação da Regressão Geograficamente Ponderada apresentou melhora expressiva no ajuste em relação ao modelo global. A GWR alcançou R^2 global de 0,8329 e AICc de 5.862,1193, enquanto o modelo global havia apresentado R^2 de 0,3100 e AICc de 7.112,7265. A redução do AICc, acompanhada pelo aumento da capacidade explicativa, indica que a consideração da variação espacial das relações entre a LST e os preditores proporcionou uma representação mais adequada do padrão térmico observado. A soma dos quadrados dos resíduos da GWR foi de 1.765,3025.

A diferença entre os dois modelos constitui um resultado importante da análise. Enquanto o modelo global representou aproximadamente 31% da variabilidade da LST por meio de uma única relação válida para toda a área, a GWR apresentou capacidade de ajuste global superior a 83%. Esse comportamento indica que as associações entre altitude, NDVI, percentual de vegetação, percentual de uso agropecuário e LST não se distribuem de maneira uniforme no território, sendo mais adequadamente representadas quando sua variação espacial é considerada.

Resultado semelhante foi observado por Alves e Galvani (2021) na análise da ilha de calor urbana de superfície em São Carlos/SP. Os autores encontraram valores de R^2 entre 0,81 e 0,90 para os modelos GWR, superiores aos valores de 0,57 a 0,79 obtidos pelos modelos globais, além de menores valores de AICc para a abordagem local. Embora os valores não devam ser comparados diretamente entre cidades e bases de dados distintas, a concordância no comportamento dos modelos reforça a importância de considerar a não estacionariedade espacial na investigação das relações entre características ambientais e o campo térmico urbano.

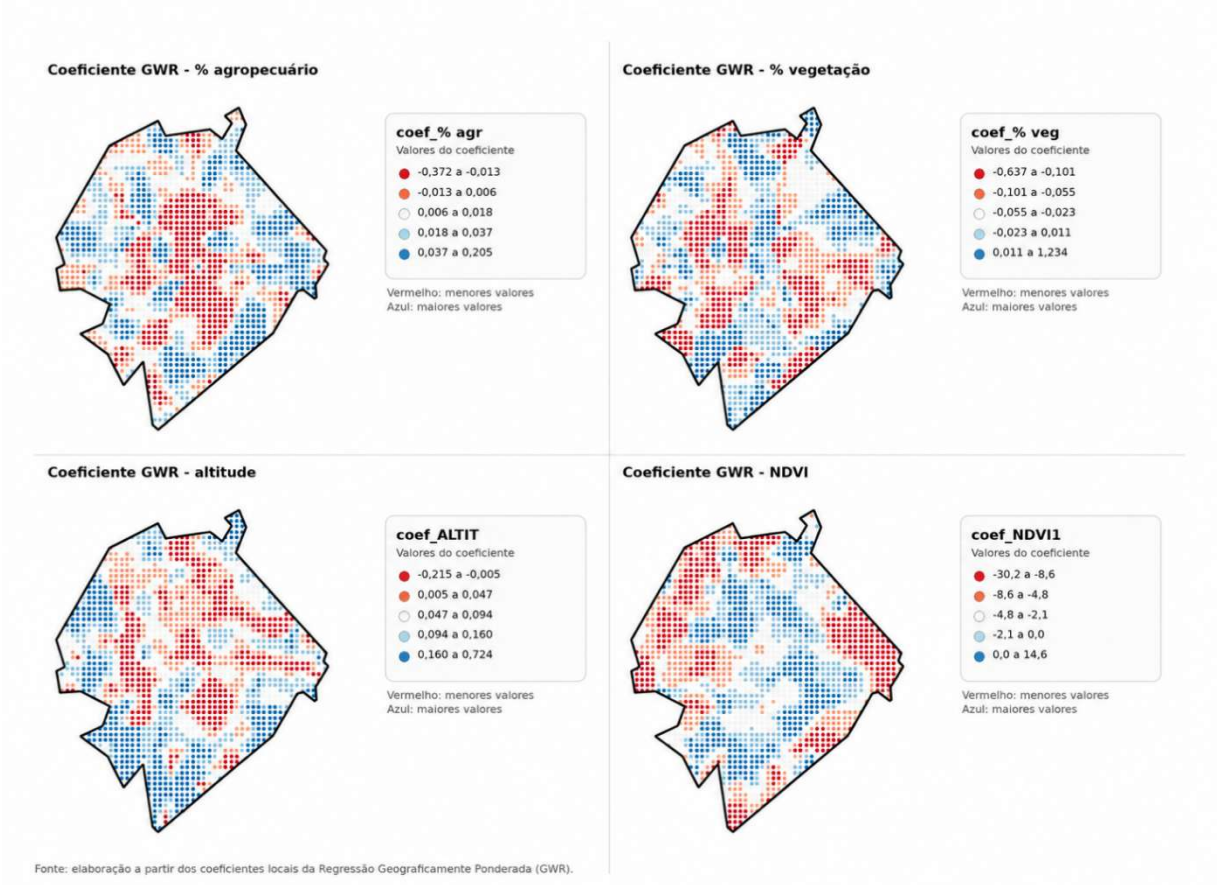
Entretanto, o desempenho da GWR não foi homogêneo em toda a área analisada. O R^2 local variou de 0,0039 a 0,9052, com mediana de 0,4495, evidenciando diferenças expressivas

na capacidade dos quatro preditores de representar a LST conforme a localização. Em determinadas áreas, portanto, a combinação das variáveis selecionadas apresentou elevada capacidade explicativa, enquanto em outras sua contribuição foi reduzida.

Essa amplitude constitui um resultado substantivo do modelo. Um elevado R^2 global da GWR não significa que aproximadamente 83% da temperatura esteja igualmente explicada em todos os pontos da cidade. Ao contrário, a distribuição do R^2 local demonstra que o desempenho varia espacialmente, indicando áreas em que os fatores ambientais considerados apresentam maior correspondência com o campo térmico e outras em que processos não representados pelo modelo provavelmente possuem maior importância.

Os coeficientes locais estimados também apresentaram variações espaciais de magnitude e, em determinadas áreas, de sinal. A distribuição espacial dos coeficientes correspondentes à altitude, ao NDVI, ao percentual de vegetação e ao percentual de uso agropecuário é apresentada na Figura 8.

Figura 8 - Coeficientes locais da GWR



Fonte: elaboração própria (2026).

Conforme observado na Figura 8, os efeitos estimados pelo modelo global não se reproduziram com a mesma intensidade em toda a área estudada. Assim, o coeficiente global de uma variável representa uma síntese média de relações que, localmente, podem apresentar comportamentos distintos. Essa heterogeneidade demonstra que a influência estatística dos condicionantes ambientais sobre a LST depende do contexto espacial em que estão inseridos, não sendo adequado assumir que uma mesma característica superficial esteja associada à temperatura com intensidade constante em toda a cidade.

A identificação dessa variabilidade amplia a interpretação produzida pelo modelo global. A presença de um coeficiente negativo para o NDVI em escala global, por exemplo, indica uma tendência geral de associação entre maiores valores do índice e menores temperaturas superficiais, mas a GWR permite verificar onde essa associação se intensifica, se enfraquece ou apresenta comportamento distinto. O mesmo raciocínio se aplica à vegetação, ao uso agropecuário e à altitude. Dessa forma, a contribuição principal da GWR não consiste apenas no aumento do R^2, mas na demonstração de que as relações ambientais associadas à LST apresentam estrutura espacial própria.

Ainda assim, o melhor desempenho estatístico da GWR não implica que o modelo represente integralmente os processos responsáveis pela distribuição térmica. A amplitude do R^2 local, a estabilidade dos coeficientes e a estrutura espacial dos resíduos precisam ser consideradas conjuntamente antes de atribuir significado aos padrões observados. Esses aspectos são examinados na seção seguinte.

2.3.5 Diagnóstico e limitações da modelagem

Os diagnósticos da especificação final indicaram baixa colinearidade entre os preditores. A correlação máxima absoluta entre as variáveis explicativas foi de 0,443, sem pares com correlação superior a 0,85. Os valores do Fator de Inflação da Variância também permaneceram baixos: 1,074 para altitude, 1,479 para NDVI, 1,264 para percentual de vegetação e 1,179 para percentual de uso agropecuário. Esses resultados indicam que não houve evidência de multicolinearidade elevada segundo o VIF.

Apesar dos baixos valores de VIF, o número de condição foi de 25.657,172, e o relatório de diagnóstico apontou possível instabilidade nas estimativas dos coeficientes. Os dois indicadores não são contraditórios, pois avaliam aspectos distintos da estrutura do modelo. Assim, embora os preditores não apresentem forte redundância individual segundo o VIF, o elevado número de condição recomenda cautela na interpretação isolada dos coeficientes, sobretudo dos padrões locais produzidos pela GWR.

A análise dos resíduos também revelou que o modelo não eliminou completamente a dependência espacial. O Índice de Moran dos resíduos foi de 0,059188, com valor esperado de -0,000610, z-score de 4,9212 e $p = 0{,}000001$. Embora a magnitude do índice seja pequena e próxima de zero, sua significância estatística indica que os resíduos ainda apresentam organização espacial após o ajuste da GWR.

Esse resultado é importante porque demonstra que o elevado desempenho global da GWR não representa uma explicação completa da distribuição da LST. A permanência de autocorrelação residual sugere que parte da estrutura espacial do campo térmico não foi capturada pelas quatro variáveis selecionadas ou pela escala de vizinhança utilizada. O próprio diagnóstico do modelo aponta como possibilidades a presença de processos espaciais omitidos, inadequação da escala adotada ou variáveis explicativas que não representam integralmente a geografia do fenômeno.

Esse comportamento apresenta semelhanças e diferenças em relação aos resultados de Alves e Galvani (2021). No estudo realizado em São Carlos/SP, a GWR também apresentou desempenho superior ao modelo global, com maiores valores de R^2e menores valores de AICc. Entretanto, os autores observaram resíduos com Índice de Moran próximo de zero, indicando forte redução da autocorrelação espacial após a aplicação do modelo local. No presente estudo, embora o valor de Moran também seja numericamente baixo, a significância estatística demonstra que ainda permanece uma estrutura espacial residual a ser considerada.

Outro aspecto relevante refere-se à escala espacial da GWR. Diferentes larguras de banda foram testadas durante a calibração do modelo, sendo selecionada a banda fixa de 200 m por apresentar o melhor ajuste entre as alternativas avaliadas. Dessa forma, a escala adotada não correspondeu a uma escolha arbitrária, mas ao resultado da comparação entre diferentes configurações do modelo.

Com a largura de banda selecionada, o suporte às regressões locais variou entre 55 e 305 observações, com mediana de 259, sem ocorrência de regressões locais classificadas como de baixo suporte. Esses resultados indicam que as estimativas locais dispuseram de quantidade suficiente de observações segundo o diagnóstico do modelo.

Entretanto, mesmo após a seleção da largura de banda de melhor ajuste, permaneceram diferenças expressivas na capacidade explicativa local e autocorrelação espacial estatisticamente significativa nos resíduos. Esse resultado sugere que as limitações remanescentes não podem ser atribuídas exclusivamente à escolha da largura de banda, podendo estar relacionadas também à composição das variáveis explicativas, à forma funcional do modelo ou a processos espaciais não representados na especificação adotada.

Nesse sentido, aprimoramentos futuros podem explorar novas especificações voltadas especialmente às porções do território em que o ajuste local foi reduzido, incorporando variáveis capazes de representar com maior detalhe características da morfologia urbana, da impermeabilização e das propriedades físicas das superfícies. Também podem ser avaliadas abordagens que permitam considerar diferentes escalas espaciais de atuação dos preditores, como a Regressão Geograficamente Ponderada Multiescala (Multiscale Geographically Weighted Regression - MGWR). Diferentemente da GWR convencional, que adota uma mesma largura de banda para todas as variáveis explicativas, a MGWR permite estimar uma largura de banda específica para cada preditor, sendo particularmente útil quando se admite que os fatores associados à LST possam atuar em escalas espaciais distintas.

2.3.6 PCA, capacidade adaptativa e sensibilidade social

A Análise de Componentes Principais revelou estruturas distintas para as dimensões de capacidade adaptativa e sensibilidade social. Na capacidade adaptativa, o primeiro componente principal (PC1) apresentou autovalor de 2,9348 e explicou 73,37% da variância total, enquanto o segundo componente (PC2) respondeu por 20,39%. Em conjunto, os dois componentes concentraram 93,76% da variabilidade dos quatro indicadores considerados. Os principais resultados das duas análises são sintetizados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados da PCA para capacidade adaptativa e sensibilidade social

Dimensão	Componente	Variância explicada	Carregamentos principais
Capacidade adaptativa	PC1	73,37%	Água = 0,972; esgoto = 0,967; lixo = 0,891; alfabetização = -0,510
Capacidade adaptativa	PC2	20,39%	Alfabetização = 0,859; lixo = 0,209; esgoto = 0,140; água = 0,120
Sensibilidade social	PC1	73,14%	Mulheres responsáveis = 0,855; crianças e idosos = 0,855

Fonte: elaboração própria (2026).

Na capacidade adaptativa, o PC1 foi fortemente definido pelos indicadores de abastecimento de água, coleta de esgoto e coleta de resíduos, cujos carregamentos foram, respectivamente, 0,972, 0,967 e 0,891. O resultado evidencia uma estrutura comum entre esses serviços domiciliares, permitindo interpretar o primeiro componente predominantemente como uma dimensão de infraestrutura urbana básica. A alfabetização também participou do PC1, porém com carregamento negativo de -0,510, indicando que sua variação entre os setores não acompanhou integralmente o mesmo padrão espacial dos indicadores de infraestrutura.

O PC2 apresentou comportamento diferente. A alfabetização foi sua variável dominante, com carregamento de 0,859, enquanto os carregamentos de água, esgoto e coleta de resíduos foram substancialmente menores. Dessa forma, o segundo componente expressou principalmente uma dimensão educacional que não foi plenamente representada pela estrutura de infraestrutura sintetizada pelo PC1.

Embora apenas o PC1 tenha apresentado autovalor superior a 1, o PC2 foi mantido na composição da capacidade adaptativa devido à sua contribuição interpretativa e ao acréscimo de 20,39% da variância explicada. Com a retenção dos dois componentes, a representação acumulada alcançou 93,76%. Essa decisão permitiu preservar no indicador sintético tanto a dimensão associada à infraestrutura domiciliar quanto a informação relacionada à alfabetização, evitando que a capacidade adaptativa fosse representada predominantemente pelas condições de saneamento e serviços urbanos. O próprio diagnóstico da PCA indica, entretanto, que a retenção de apenas um componente seria defensável pelo critério de Kaiser, de modo que a inclusão do PC2 constitui uma escolha substantiva que deve ser explicitada na interpretação dos resultados.

Essa estrutura encontra correspondência conceitual com Siqueira-Gay, Dibo e Giannotti (2017), que também incorporaram abastecimento de água, coleta de resíduos, esgotamento sanitário e alfabetização à dimensão de capacidade de adaptação e empregaram componentes principais para sua síntese. A relevância desses indicadores também é coerente com estudos de vulnerabilidade que relacionam a disponibilidade de serviços básicos e a escolaridade às condições de resposta e adaptação da população diante de situações adversas.

Para a sensibilidade social, o primeiro componente apresentou autovalor de 1,4628 e explicou 73,14% da variância total, sendo suficiente para representar a estrutura conjunta dos dois indicadores analisados. As proporções de mulheres responsáveis pelo domicílio e de crianças e idosos apresentaram carregamentos idênticos de 0,855, indicando contribuição equilibrada para o componente.

O mesmo sinal e a mesma magnitude dos carregamentos mostram que o PC1 representa sobretudo a ocorrência conjunta dessas duas características demográficas entre os setores, e não a predominância de uma delas sobre a outra. Dessa forma, setores com escores mais elevados de sensibilidade são aqueles em que essas características apresentam maior expressão relativa no conjunto analisado. O resultado é coerente com a literatura utilizada no trabalho, que reconhece crianças, idosos e mulheres entre os grupos considerados em análises de vulnerabilidade socioambiental.

A redução das variáveis originais a componentes sintéticos tornou possível comparar os 149 setores a partir de duas dimensões distintas: uma relacionada às condições disponíveis para adaptação e resposta, e outra às características demográficas associadas à sensibilidade. Entretanto, os componentes não substituem a interpretação dos indicadores originais. Dois setores podem apresentar valores semelhantes no índice sintético por combinações diferentes de infraestrutura, alfabetização ou composição demográfica. Por essa razão, a análise posterior dos setores prioritários considera novamente os indicadores individuais para identificar qual condição contribui predominantemente para a vulnerabilidade observada.

2.3.7 IVIC e setores censitários prioritários

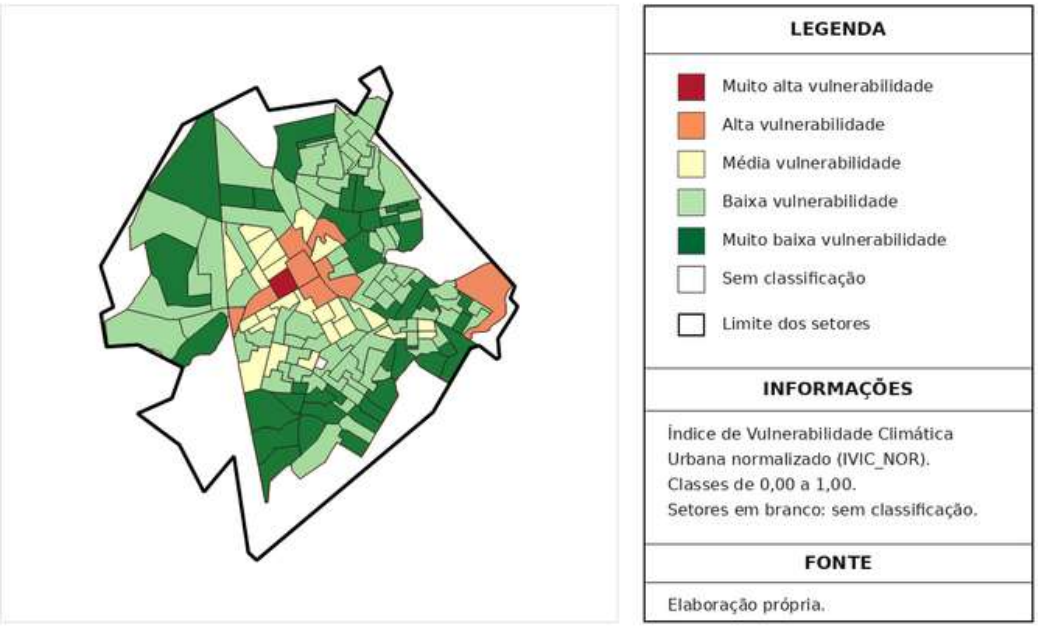
Para facilitar a identificação e a leitura dos setores censitários ao longo da apresentação e discussão dos resultados, foi adotada uma nomenclatura simplificada composta pela letra “S”, seguida dos três últimos algarismos do código oficial do setor censitário. Assim, por exemplo, o setor de código 352670405000001 é identificado no texto como S001. Os códigos completos do IBGE são preservados nas tabelas de identificação dos setores, de modo a garantir sua correspondência com a base censitária original.

A integração entre exposição térmica, sensibilidade social e capacidade adaptativa resultou em uma distribuição espacial da vulnerabilidade distinta daquela obtida pela análise isolada da Temperatura da Superfície Terrestre. O principal resultado do Índice de Vulnerabilidade às Ilhas de Calor (IVIC) foi evidenciar que os setores em situação mais desfavorável não correspondem necessariamente aos de maior exposição térmica, uma vez que a vulnerabilidade resulta da combinação das três dimensões consideradas.

Essa interpretação está de acordo com a estrutura conceitual adotada no estudo, na qual maiores valores de exposição térmica e sensibilidade contribuem para condições mais desfavoráveis, enquanto maior capacidade adaptativa atua em sentido contrário. A formulação segue a abordagem de Siqueira-Gay, Dibo e Giannotti (2017), que estruturam o IVIC a partir da relação entre capacidade de adaptação, sensibilidade e exposição.

A distribuição espacial do índice entre os 149 setores censitários analisados é apresentada na Figura 9. Como o IVIC final foi normalizado em escala de 0 a 1 sem inversão de sentido, valores próximos de zero representam condições relativamente mais vulneráveis, enquanto valores próximos de um correspondem a situações comparativamente mais favoráveis dentro do conjunto analisado em Leme/SP. Portanto, as classes expressam uma hierarquia relativa entre os setores do município e não devem ser interpretadas como limites universais de vulnerabilidade.

Figura 9 - IVIC normalizado por setor censitário



Fonte: elaboração própria (2026).

Considerando o critério de priorização estabelecido, foram identificados oito setores censitários com IVIC normalizado igual ou inferior a 0,40, correspondentes às classes de vulnerabilidade muito alta e alta. A análise individual das dimensões demonstra, contudo, que esses setores atingiram a condição prioritária por diferentes combinações entre exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa.

O setor S001 apresentou o maior escore de sensibilidade social entre os setores prioritários, com escore de sensibilidade social igual a 1,40. A interpretação dos indicadores originais ajuda a compreender esse resultado: 53,16% da população do setor correspondia ao grupo conjunto de crianças e idosos, enquanto 32,91% dos responsáveis pelos domicílios considerados eram mulheres, valores elevados no conjunto dos setores destacados. Assim, embora sua exposição térmica normalizada tenha sido de 0,38, a elevada sensibilidade social, associada à capacidade adaptativa comparativamente reduzida, contribuiu para que o setor apresentasse o menor IVIC do conjunto.

A importância da integração das dimensões torna-se ainda mais clara quando o setor S001 é comparado ao setor S197. Este último apresentou a maior LST média entre os setores prioritários, aproximadamente 48,49 °C, além de LST normalizada igual a 1,00, correspondendo à maior posição relativa de exposição térmica. Entretanto, seu IVIC normalizado foi de 0,25, e seu escore de sensibilidade social, de 0,49, foi consideravelmente

inferior ao observado em diversos outros setores prioritários. Assim, apesar da exposição térmica extrema, o setor S197 não apresentou a maior vulnerabilidade integrada, demonstrando que a hierarquia térmica e a hierarquia do IVIC não são equivalentes.

No setor S206, a condição prioritária assumiu natureza distinta. A exposição térmica normalizada foi de apenas 0,20 e o escore de sensibilidade social foi de 0,67. Entretanto, o escore sintético de capacidade adaptativa foi o menor entre os setores prioritários. Entre os indicadores que compõem essa dimensão, destaca-se a coleta domiciliar direta de resíduos, presente em apenas 13,16% dos domicílios considerados, valor substancialmente inferior ao observado nos demais setores destacados. O resultado evidencia um caso em que a vulnerabilidade integrada está associada predominantemente às condições de capacidade adaptativa, e não à exposição térmica elevada.

O setor S008 apresentou configuração semelhante quanto à dimensão social. Sua exposição térmica normalizada foi relativamente baixa, de 0,25, mas o escore de sensibilidade social atingiu 1,34. O setor apresentou 53,66% de crianças e idosos e 30,12% de mulheres responsáveis pelo domicílio, reforçando a contribuição da composição demográfica para sua condição de vulnerabilidade. Dessa forma, seu IVIC normalizado de 0,24 não pode ser explicado pela temperatura isoladamente.

O setor S002 apresentou IVIC normalizado de 0,23, LST normalizada de 0,40 e escore de sensibilidade social de 1,08. Seu escore sintético de capacidade adaptativa foi de aproximadamente 0,515. O resultado representa uma situação intermediária entre os casos anteriores, na qual nenhuma das dimensões isoladamente alcança o extremo observado nos setores S197, S206 ou S001, mas sua combinação produz uma condição final de elevada vulnerabilidade relativa.

Os setores S003, S099 e S017 apresentaram IVIC normalizado de 0,31, 0,33 e 0,35, respectivamente. Nesses casos, observa-se combinação entre níveis relativamente elevados de exposição térmica e sensibilidade social, parcialmente compensados por maior capacidade adaptativa. O setor S003, por exemplo, apresentou a maior capacidade adaptativa entre os setores prioritários, com escore de aproximadamente 0,817, mas simultaneamente apresentou LST normalizada de 0,57 e sensibilidade social de 1,04. O setor S017 apresentou comportamento semelhante, com capacidade adaptativa de aproximadamente 0,737 e LST normalizada de 0,54, enquanto o setor S099 apresentou capacidade adaptativa de aproximadamente 0,740, sensibilidade de 1,05 e exposição normalizada de 0,43.

A Tabela 5 sintetiza os valores das principais dimensões consideradas na interpretação dos setores prioritários.

Tabela 5 - Síntese das dimensões do IVIC nos setores censitários prioritários de Leme/SP

Setor censitário	Código IBGE	IVIC normalizado	LST normalizada	LST média (°C)	Escore sintético de capacidade adaptativa	PC1 sensibilidade	Principal característica observada
S001	**352670405000001**	**0,00**	0,38	44,42	0,263	**1,40**	elevada sensibilidade associada à menor capacidade adaptativa
S002	**352670405000002**	0,23	0,40	44,53	0,515	1,08	combinação de sensibilidade e condições adaptativas intermediárias
S008	**352670405000008**	0,24	0,25	43,58	0,641	**1,34**	elevada sensibilidade social
S197	**352670405000197**	0,25	**1,00**	**48,49**	0,551	0,49	exposição térmica muito elevada
S206	**352670405000206**	0,28	0,20	43,24	**0,001**	0,67	capacidade adaptativa muito reduzida
S003	**352670405000003**	0,31	0,57	45,65	**0,817**	1,04	exposição e sensibilidade parcialmente compensadas pela capacidade adaptativa
S099	**352670405000099**	0,33	0,43	44,76	0,740	1,05	combinação de exposição e sensibilidade
S017	**352670405000017**	0,35	0,54	45,46	0,737	0,90	exposição relativamente elevada associada à sensibilidade

Fonte: elaboração própria (2026).

A comparação entre os oito setores evidencia uma dissociação entre a hierarquia da exposição térmica e a hierarquia da vulnerabilidade integrada. O setor S197, apesar de apresentar a maior exposição térmica, não correspondeu ao menor IVIC. Em sentido oposto, o setor S001, cuja exposição térmica normalizada foi de apenas 0,38, apresentou o menor valor do índice devido à combinação de elevada sensibilidade social e menor capacidade adaptativa. O setor S206 reforça esse resultado ao tornar-se prioritário mesmo com baixa exposição térmica relativa, principalmente em razão de sua capacidade adaptativa reduzida.

Essas diferenças demonstram que setores com níveis semelhantes de vulnerabilidade podem apresentar estruturas internas bastante distintas. A temperatura superficial elevada constitui um componente importante da vulnerabilidade ao calor, mas seu efeito territorial deve ser interpretado em conjunto com as características da população e com os recursos e condições disponíveis para adaptação. Dessa forma, o IVIC acrescenta uma informação que não seria obtida pela simples classificação dos setores segundo a LST.

Esse resultado é coerente com a aplicação desenvolvida por Siqueira-Gay, Dibo e Giannotti (2017) no município de São Paulo. As autoras identificaram diferenças espaciais entre áreas marcadas principalmente pela exposição e áreas em que maior sensibilidade ou menor capacidade de adaptação assumiam papel relevante, demonstrando que a decomposição do índice permite compreender as diferentes formas pelas quais a vulnerabilidade se manifesta no território.

No caso de Leme/SP, a principal contribuição do IVIC consiste, portanto, não apenas em estabelecer uma ordem de prioridade entre os setores censitários, mas em permitir a identificação da dimensão que mais contribui para a condição observada em cada território. Essa diferenciação fornece a base para a análise subsequente das características morfológicas representadas pelas Zonas Climáticas Locais e para a discussão de medidas territorialmente compatíveis com as condições identificadas.

2.3.8 Zonas Climáticas Locais e Soluções Baseadas na Natureza

A associação das Zonas Climáticas Locais (ZCL) aos setores prioritários permitiu acrescentar uma dimensão morfológica à interpretação do IVIC. As ZCL não integraram matematicamente o cálculo do índice, sendo utilizadas como informação complementar para caracterizar a estrutura urbana dos setores e auxiliar na discussão das possibilidades de intervenção. Essa distinção é importante, pois uma determinada classe de ZCL não determina, por si só, maior ou menor vulnerabilidade.

Entre os setores classificados como prioritários pelo IVIC, observou-se predominância da ZCL 5, correspondente a tecidos urbanos com edificações abertas de média altura, enquanto o setor censitário S197 foi associado à ZCL 3, caracterizada por edificações compactas de baixa altura. Esse resultado mostra que os setores prioritários identificados no estudo estão inseridos em configurações morfológicas distintas e reforça a necessidade de considerar as características locais antes da definição de medidas de adaptação.

A predominância da ZCL 5 entre os setores prioritários não permite concluir, isoladamente, que essa classe seja mais vulnerável em Leme/SP, uma vez que seria necessário comparar sua frequência entre os setores prioritários com sua participação no conjunto dos 149 setores analisados. O resultado permite afirmar apenas que a maior parte das áreas priorizadas pelo IVIC apresenta essa configuração morfológica, enquanto o setor S197 constitui um caso distinto dentro do grupo.

Essa cautela é compatível com a própria interpretação das ZCL. A classificação sintetiza características da forma urbana e da cobertura da superfície, mas constitui uma

representação simplificada do território e não deve ser utilizada isoladamente para explicar o comportamento térmico de determinada área. Elementos locais, como cobertura vegetal, relevo, materiais das superfícies e condições de ocupação, também interferem na resposta térmica.

A relação entre os resultados ambientais obtidos anteriormente e as possibilidades de intervenção oferece, entretanto, um fundamento importante para a discussão das Soluções Baseadas na Natureza. No modelo global desenvolvido para Leme/SP, o NDVI e a proporção de vegetação apresentaram associação negativa com a LST. Dessa forma, intervenções voltadas à ampliação ou qualificação da cobertura vegetal encontram respaldo não apenas na literatura, mas também nos resultados observados na própria área de estudo.

Nesse contexto, estratégias como arborização urbana, conexão de áreas verdes, corredores verdes, jardins de chuva, biovaletas e outras formas de infraestrutura verde podem contribuir simultaneamente para a ampliação da vegetação, melhoria da permeabilidade e adaptação do espaço urbano. A literatura utilizada no trabalho destaca que essas soluções podem exercer múltiplas funções, incluindo aumento da cobertura vegetal, infiltração da água, conectividade ecológica e mitigação do aquecimento urbano.

Nelo, Silva e Ribeiro (2024), ao analisarem os corredores verdes de Medellín, destacam a importância de considerar conjuntamente vegetação, infraestrutura urbana, topografia e condições socioambientais na definição de estratégias de adaptação. O estudo reforça que as intervenções devem responder às particularidades do território, evitando soluções padronizadas aplicadas independentemente do contexto local.

Para os setores prioritários associados à ZCL 5, a configuração mais aberta do tecido urbano pode oferecer possibilidades para avaliação de intervenções distribuídas no espaço público, particularmente arborização de vias, ampliação de cobertura vegetal e qualificação de áreas públicas. Entretanto, a indicação de locais específicos para plantio ou implantação de infraestrutura verde exige análise posterior em escala de projeto, considerando disponibilidade de espaço, redes de infraestrutura, circulação, acessibilidade e condições existentes de arborização.

O setor S197 requer interpretação particular. Além de integrar a ZCL 3, apresentou a maior exposição térmica entre os setores prioritários, com LST normalizada igual a 1,00 e LST média de aproximadamente 48,49 °C. Nesse caso, a elevada exposição térmica constitui elemento central de sua classificação, enquanto sua configuração urbana compacta pode limitar a disponibilidade de áreas contínuas para intervenções de maior porte.

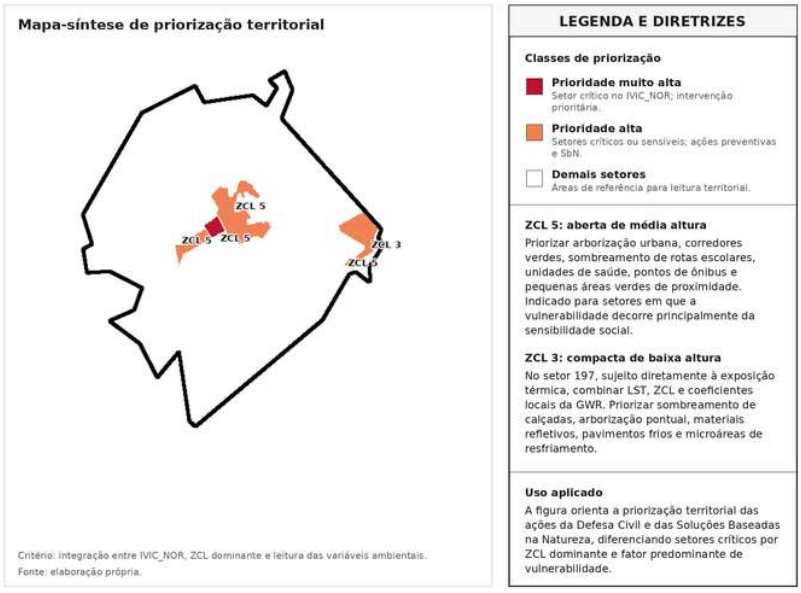
Por esse motivo, no setor S197, torna-se pertinente avaliar estratégias adaptadas a espaços urbanos mais restritos, como arborização onde houver viabilidade física, sombreamento de áreas de circulação e permanência, pequenas áreas vegetadas e soluções distribuídas em diferentes pontos do tecido urbano. A adoção de medidas específicas, contudo, deve ser precedida de levantamento em campo, pois a classificação ZCL indica a morfologia predominante, mas não informa diretamente a disponibilidade real de espaço para cada intervenção.

Outras soluções, como jardins de chuva, biovaletas e pavimentos permeáveis, também podem ser consideradas quando compatíveis com as condições locais. Carvalho et al. (2025) destacam que essas estratégias podem contribuir tanto para a gestão das águas pluviais quanto para a redução dos efeitos associados às ilhas de calor, mas sua implementação depende da avaliação das características e necessidades específicas de cada território.

A análise conjunta do IVIC e das ZCL demonstra, portanto, que a priorização territorial constitui apenas a primeira etapa do processo de intervenção. O IVIC permite identificar onde estão os setores comparativamente mais vulneráveis e quais dimensões contribuem para essa condição, enquanto as ZCL acrescentam informações sobre a configuração morfológica em que essas condições se manifestam. A definição das medidas mais adequadas exige, em seguida, avaliação local e compatibilização com as características físicas, funcionais e sociais de cada setor.

A síntese espacial dessas diretrizes é apresentada na Figura 10.

Figura 10 - Setores prioritários segundo o IVIC e respectivas Zonas Climáticas Locais



Fonte: elaboração própria (2026).

2.4 Implicações para a Defesa Civil e o planejamento urbano

Os resultados obtidos permitem utilizar o IVIC como instrumento de apoio ao planejamento preventivo, especialmente por possibilitar a identificação não apenas dos setores prioritários, mas também das diferentes condições que contribuem para sua vulnerabilidade. Essa distinção é relevante para a gestão pública porque setores com valores semelhantes do índice podem demandar estratégias distintas de prevenção, adaptação e planejamento urbano.

A utilização de indicadores territoriais de vulnerabilidade como subsídio à gestão de riscos encontra respaldo em estudos que destacam a importância de integrar características do meio físico às condições sociais e à capacidade de resposta da população. Chaves et al. (2022) ressaltam que a vulnerabilidade a desastres está relacionada também às condições de vida, infraestrutura, escolaridade e presença de grupos sensíveis, enquanto Mello et al. (2023) destacam a utilidade do mapeamento de vulnerabilidade para o planejamento urbano e a gestão integrada de riscos.

No caso de Leme/SP, a principal contribuição do IVIC para a Defesa Civil está na possibilidade de estabelecer uma priorização territorial anterior à ocorrência de episódios extremos de calor. Em vez de direcionar a atenção exclusivamente às áreas que apresentam maiores temperaturas superficiais, o índice permite reconhecer setores nos quais a exposição térmica se combina com características demográficas sensíveis ou condições reduzidas de adaptação. Essa abordagem amplia o diagnóstico de risco e aproxima a análise térmica das condições efetivamente existentes no território.

Nos setores S001 e S008, por exemplo, a elevada sensibilidade social apresentou papel importante na classificação de vulnerabilidade. O primeiro apresentou 53,16% de crianças, adolescentes e idosos e 32,91% de mulheres responsáveis pelo domicílio, enquanto o segundo apresentou 53,66% de crianças e idosos e 30,12% de mulheres responsáveis. Nesses casos, a informação territorial pode subsidiar a identificação prévia de populações que demandam maior atenção durante períodos de calor intenso.

Para esses setores, a atuação preventiva pode envolver a articulação da Defesa Civil com as áreas de Saúde, Educação e Assistência Social, permitindo relacionar o mapa de vulnerabilidade à localização de escolas, unidades de saúde, equipamentos socioassistenciais e outros serviços utilizados por grupos sensíveis. A presença de crianças e idosos como grupos relevantes em análises de vulnerabilidade a desastres também é reconhecida na literatura, sobretudo em razão de diferenças de mobilidade e capacidade de resposta diante de eventos adversos.

Nesse contexto, o IVIC pode servir como uma primeira camada para orientar ações de preparação, como identificação dos equipamentos públicos existentes nos setores prioritários, definição de públicos prioritários para comunicação preventiva e reconhecimento de locais que necessitam de maior atenção durante episódios de temperaturas elevadas. Essas medidas não devem ser definidas exclusivamente a partir do índice, mas complementadas por informações sobre população residente, equipamentos públicos, condições de mobilidade e levantamentos realizados em campo.

O setor S197 apresenta uma situação diferente. Sua principal característica entre os setores prioritários foi a elevada exposição térmica, com LST normalizada igual a 1,00 e LST média de aproximadamente 48,49 °C. Nesse caso, a contribuição do diagnóstico para a gestão municipal está mais diretamente relacionada ao planejamento do espaço físico, reforçando a pertinência de avaliar intervenções de resfriamento urbano compatíveis com sua configuração morfológica em ZCL 3.

As ações nesse setor podem, portanto, ser articuladas às políticas de planejamento urbano, meio ambiente e infraestrutura, considerando medidas como aumento da cobertura vegetal onde houver viabilidade, sombreamento de espaços de circulação e permanência, qualificação de áreas públicas e redução da exposição de superfícies urbanas. Conforme discutido anteriormente, a seleção definitiva dessas medidas depende de diagnóstico em escala local, uma vez que a classificação territorial não substitui a avaliação das condições físicas de implantação.

O setor S206 também demanda interpretação específica. Apesar de apresentar exposição térmica normalizada relativamente baixa, de 0,20, sua capacidade adaptativa foi a mais reduzida entre os setores prioritários. Destaca-se, particularmente, o valor de 13,16% obtido para o indicador de coleta de resíduos. Esse resultado deve ser entendido como um sinal de fragilidade na dimensão de infraestrutura e serviços utilizada na composição da capacidade adaptativa, e não como evidência de que a coleta de resíduos determine diretamente a exposição ao calor.

Assim, antes da definição de qualquer intervenção, esse resultado merece verificação em campo e junto às bases administrativas municipais. Caso a deficiência seja confirmada, o setor exemplifica a necessidade de integrar a adaptação climática às políticas de infraestrutura e prestação de serviços. A literatura utilizada no trabalho também reconhece que condições de saneamento e serviços básicos fazem parte da capacidade de resposta das populações diante de eventos adversos.

Nos setores S003, S099 e S017, a condição prioritária decorreu de combinações menos extremas entre exposição térmica, sensibilidade e capacidade adaptativa. Nesses casos, o diagnóstico sugere estratégias combinadas, nas quais intervenções ambientais e urbanísticas podem ser articuladas a medidas preventivas direcionadas aos grupos mais sensíveis.

A aplicação prática do IVIC pode, portanto, ser organizada a partir de três questões sucessivas: onde estão os setores prioritários; quais dimensões explicam sua condição; e quais políticas ou intervenções são compatíveis com essas características. Essa sequência evita que todos os setores classificados como vulneráveis recebam automaticamente a mesma recomendação.

Tabela 6 – Aplicação dos resultados do IVIC ao planejamento

Setor censitário	**Condição de maior destaque**	**Implicação para o planejamento**
S001	Elevada sensibilidade e menor capacidade adaptativa	Priorizar identificação de grupos sensíveis, equipamentos públicos e articulação intersetorial
S002	Sensibilidade social elevada	Reforçar planejamento preventivo voltado à população sensível
S008	Elevada sensibilidade social	Priorizar crianças, idosos e equipamentos utilizados por esses grupos
S197	Exposição térmica muito elevada e ZCL 3	Priorizar avaliação de medidas físicas de resfriamento urbano
S206	Capacidade adaptativa reduzida	Verificar condições de infraestrutura e serviços e integrar políticas setoriais
S003	Exposição e sensibilidade	Combinar medidas de adaptação física e proteção preventiva
S099	Exposição e sensibilidade	Combinar medidas ambientais e atenção aos grupos sensíveis
S017	Exposição relativamente elevada e sensibilidade	Articular adaptação urbana e medidas preventivas

Fonte: elaboração própria (2026).

A utilização desses resultados pela Defesa Civil deve, entretanto, observar uma distinção fundamental entre planejamento estratégico e operação durante um evento. O IVIC elaborado neste estudo é adequado para indicar setores que merecem maior atenção no planejamento municipal, mas não constitui um sistema de alerta de calor. Sua dimensão de exposição foi construída a partir de LST obtida por sensoriamento remoto, que representa a temperatura radiométrica da superfície em uma determinada aquisição e não a temperatura do ar experimentada diretamente pela população.

Dessa forma, a utilização operacional do diagnóstico durante episódios de calor devem ser complementada por dados e previsões meteorológicas, além de informações atualizadas sobre a população e as condições locais. O mapa do IVIC pode indicar onde a atenção preventiva deve ser maior, enquanto os dados meteorológicos permitem avaliar quando as condições atmosféricas justificam a ativação de medidas específicas.

Essa distinção também evita atribuir ao produto uma capacidade que ele não possui. O IVIC não prevê a ocorrência de uma onda de calor nem estabelece, isoladamente, um limiar para emissão de alerta. Sua contribuição consiste em oferecer uma base territorial de vulnerabilidade que pode ser previamente incorporada ao planejamento da Defesa Civil e posteriormente combinada com informações meteorológicas quando houver previsão de calor intenso.

Outro aspecto importante é a necessidade de atualização periódica do diagnóstico. Mudanças na cobertura vegetal, ocupação urbana, infraestrutura, composição demográfica e distribuição dos serviços podem alterar a posição relativa dos setores. Portanto, a utilização institucional do índice exige preservação da metodologia e das bases utilizadas, permitindo sua reprodução com dados mais recentes. O próprio uso de índices espaciais de vulnerabilidade como instrumento de planejamento pressupõe compreender as condições locais e sua evolução temporal.

Em termos de gestão municipal, os resultados apontam ainda para a necessidade de atuação intersetorial. A Defesa Civil pode utilizar a informação territorial para organizar a prevenção e a preparação, mas parte das intervenções identificadas depende de outras áreas da administração. Arborização e infraestrutura verde envolvem meio ambiente e planejamento urbano; sombreamento e qualificação de vias e espaços públicos envolvem obras e mobilidade; atenção aos grupos sensíveis demanda articulação com saúde, assistência social e educação; e deficiências de infraestrutura exigem participação dos serviços responsáveis por saneamento e manutenção urbana.

A existência do Sistema de Parques Integrados constitui ainda uma referência institucional relevante para o planejamento ambiental municipal. Embora essas áreas não tenham integrado diretamente a modelagem desenvolvida neste estudo, sua distribuição pode ser considerada em etapas posteriores de planejamento de infraestrutura verde, conectividade entre áreas vegetadas e Soluções Baseadas na Natureza, especialmente quando relacionada aos setores identificados como prioritários pelo IVIC. Essa integração permitiria articular estruturas verdes já reconhecidas pelo planejamento municipal às novas prioridades territoriais identificadas pelo diagnóstico.

Assim, o principal produto do estudo para a gestão de riscos não é apenas um mapa indicando setores mais ou menos vulneráveis, mas uma estrutura de priorização territorial capaz de orientar a investigação e a coordenação das ações municipais. O IVIC indica onde iniciar a análise; sua decomposição demonstra porque determinado setor foi priorizado; e as

informações ambientais e morfológicas auxiliam na definição das intervenções que devem ser posteriormente verificadas e detalhadas em escala local.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho buscou compreender como os padrões espaciais de aquecimento superficial se relacionam com as condições ambientais e socioespaciais da área urbana de Leme/SP e de que maneira a integração dessas informações pode contribuir para a priorização territorial de ações preventivas de proteção e defesa civil. Os resultados permitem responder à questão de pesquisa ao demonstrar que a vulnerabilidade ao calor urbano não corresponde simplesmente à localização das maiores temperaturas superficiais, mas resulta da combinação entre exposição térmica, sensibilidade social e capacidade adaptativa. Dessa forma, o pressuposto estabelecido no início da pesquisa foi sustentado pelos resultados obtidos: áreas prioritárias para intervenção não são necessariamente aquelas que apresentam isoladamente os maiores valores de LST. O objetivo geral do trabalho, centrado justamente na integração das dimensões térmica, ambiental, morfológica e censitária, foi estruturado nesse sentido.

A análise térmica evidenciou diferenças expressivas entre as duas cenas Landsat consideradas. A cena de 27 de setembro de 2020 apresentou LST média de 44,79 °C, enquanto a cena de 16 de fevereiro de 2026 apresentou média de 37,26 °C. Essa diferença superior a 7 °C confirmou o maior patamar térmico superficial da cena de 2020, adotada como representativa de um período de estresse térmico. Entretanto, o maior desvio-padrão observado em 2026 demonstrou que um patamar térmico médio mais elevado não significa, necessariamente, maior variabilidade intraurbana. A comparação deve permanecer restrita ao contraste entre as condições observadas nas duas aquisições, sem ser interpretada como tendência temporal de aquecimento ou resfriamento do município, uma vez que as imagens correspondem a condições sazonais e atmosféricas distintas.

Na dimensão ambiental, a regressão exploratória selecionou altitude, NDVI, proporção de vegetação e proporção de uso agropecuário como variáveis associadas à distribuição espacial da LST. O modelo global apresentou R^2 de 0,3100, indicando que essas variáveis representaram parte da variabilidade térmica, mas que uma parcela expressiva permaneceu relacionada a processos não captados por uma relação única para toda a área. A aplicação da Regressão Geograficamente Ponderada apresentou desempenho substancialmente superior, com R^2 global de 0,8329 e AICc inferior ao do modelo global. Ao mesmo tempo, o R^2 local variou de 0,0039 a 0,9052, mostrando que a capacidade explicativa do conjunto de variáveis não foi uniforme no espaço. Assim, um dos principais resultados da modelagem foi a identificação da não estacionariedade espacial das relações entre características ambientais e temperatura superficial em Leme/SP.

Esse resultado também impõe cautela à interpretação da modelagem. Embora a GWR tenha apresentado desempenho global superior, permaneceu autocorrelação espacial estatisticamente significativa nos resíduos, indicando que processos espaciais não representados pelo modelo ainda estão presentes. A escolha da largura de banda fixa de 200 m decorreu da comparação entre diferentes alternativas de calibração e apresentou suporte adequado às regressões locais, mas não eliminou a heterogeneidade do ajuste. Portanto, os coeficientes estimados devem ser entendidos como associações espaciais e não como relações causais.

Aprimoramentos futuros podem incorporar variáveis relacionadas à impermeabilização, densidade e morfologia construída, características físicas dos materiais e outras propriedades da superfície. Também se mostra pertinente avaliar a aplicação da Regressão Geograficamente Ponderada Multiescala (MGWR), que permite estimar diferentes larguras de banda para cada variável explicativa. Essa abordagem possibilitaria investigar se fatores como altitude, vegetação, NDVI e uso agropecuário apresentam escalas espaciais distintas de associação com a LST, superando a utilização de uma única largura de banda para o conjunto dos preditores adotada na GWR deste estudo.

Na dimensão socioespacial, a Análise de Componentes Principais permitiu sintetizar as informações censitárias utilizadas para representar capacidade adaptativa e sensibilidade social. Na capacidade adaptativa, os dois componentes retidos explicaram conjuntamente 93,76% da variabilidade dos indicadores, distinguindo principalmente uma dimensão relacionada à infraestrutura domiciliar e outra associada à alfabetização. Na sensibilidade social, o primeiro componente explicou 73,14% da variância e apresentou contribuições equivalentes das proporções de mulheres responsáveis pelo domicílio e de crianças e idosos. Esses resultados permitiram reduzir a informação original a dimensões sintéticas sem dispensar a interpretação dos indicadores que lhes deram origem.

A integração dessas dimensões no IVIC constituiu um dos principais resultados do trabalho. Entre os 149 setores censitários analisados, oito foram enquadrados nas classes definidas como prioritárias, com IVIC normalizado igual ou inferior a 0,40. A comparação entre esses setores revelou configurações distintas de vulnerabilidade. O setor S001, apesar de não apresentar a maior exposição térmica, apresentou a condição mais desfavorável no índice, associada sobretudo à elevada sensibilidade social e à menor capacidade adaptativa. Em contraste, o setor S197 apresentou a maior exposição térmica, com LST normalizada igual a 1,00 e LST média de 48,49 °C, mas não apresentou o menor IVIC. Já o setor S206 tornou-se prioritário mesmo com exposição térmica relativamente reduzida, destacando-se por sua baixa

capacidade adaptativa. Esses exemplos evidenciam de forma concreta a dissociação entre a hierarquia térmica e a hierarquia da vulnerabilidade integrada.

A associação dos setores prioritários às Zonas Climáticas Locais acrescentou contexto morfológico à interpretação. A maior parte dos setores destacados foi associada à ZCL 5, enquanto o setor S197 apresentou predominância de ZCL 3. Esse resultado não permite afirmar que uma dessas classes seja, por si só, mais vulnerável que outra, mas evidencia que condições prioritárias podem ocorrer em diferentes configurações do tecido urbano. Nesse sentido, as ZCL funcionam como apoio à interpretação territorial e à seleção posterior de medidas compatíveis com as características físicas de cada local, sem integrar matematicamente o IVIC.

Os resultados ambientais também oferecem fundamento para a discussão de Soluções Baseadas na Natureza. A associação negativa observada entre NDVI, vegetação e LST no modelo global reforça a pertinência de estratégias voltadas à ampliação e qualificação da cobertura vegetal. Arborização, sombreamento, corredores verdes, jardins de chuva, biovaletas e pavimentos permeáveis constituem possibilidades a serem avaliadas de acordo com a morfologia e a disponibilidade física de cada setor, não devendo ser aplicadas de maneira padronizada apenas em função da classificação obtida pelo índice. O diagnóstico produzido pelo estudo indica áreas para investigação prioritária, mas a definição das intervenções exige levantamento em campo e análise em escala de projeto.

Sob a perspectiva da Proteção e Defesa Civil, a principal contribuição do trabalho está na construção de uma base territorial prévia de vulnerabilidade ao calor. O IVIC não constitui um sistema de alerta e não permite prever a ocorrência de uma onda de calor, pois a exposição utilizada corresponde à temperatura radiométrica da superfície obtida em uma determinada cena orbital. Sua aplicação mais adequada está no planejamento preventivo, indicando quais setores merecem maior atenção e quais dimensões contribuem para essa prioridade. Em uma aplicação operacional futura, essa base poderá ser combinada com previsões e dados meteorológicos, informações de saúde, localização de equipamentos públicos e bases atualizadas da população, permitindo associar a pergunta “quando atuar”, fornecida pelo monitoramento meteorológico, à pergunta “onde priorizar”, subsidiada pelo diagnóstico territorial desenvolvido neste trabalho. O próprio capítulo de implicações diferencia explicitamente essa função estratégica de um sistema operacional de alerta.

A aplicação do IVIC também evidencia a necessidade de atuação intersetorial. Setores cuja vulnerabilidade decorre principalmente da sensibilidade social requerem articulação com Saúde, Educação e Assistência Social; aqueles marcados predominantemente pela exposição demandam maior atenção das políticas de planejamento urbano, meio ambiente, infraestrutura

e mobilidade; e situações caracterizadas por baixa capacidade adaptativa podem exigir articulação com os serviços responsáveis por saneamento, manutenção urbana e oferta de serviços públicos. Dessa forma, a contribuição do estudo ultrapassa a produção de um mapa de vulnerabilidade e estabelece uma estrutura capaz de orientar a sequência de investigação e coordenação das políticas municipais.

Entre as limitações do estudo, destacam-se o caráter episódico das duas cenas Landsat, a utilização da LST como representação da temperatura da superfície e não da temperatura do ar, a diferença temporal entre a cena térmica de 2020 e os dados de uso e cobertura da terra de 2024, a agregação dos indicadores socioespaciais por setores censitários e a permanência de estrutura espacial nos resíduos da GWR. Também não foi realizada uma análise específica capaz de separar, na comparação entre as cenas de 2020 e 2026, a contribuição das condições meteorológicas e sazonais, de eventuais alterações no uso e cobertura da terra e de processos climáticos de longo prazo sobre os valores de LST observados. O IVIC também constitui uma medida relativa ao conjunto dos 149 setores analisados, razão pela qual seus valores e limites de classificação não devem ser transferidos diretamente para outros municípios. Essas limitações não invalidam o diagnóstico, mas delimitam sua interpretação e seu campo de aplicação.

Como continuidade da pesquisa, recomenda-se ampliar a análise para séries temporais de imagens orbitais, preferencialmente utilizando cenas comparáveis quanto à época do ano e às condições de aquisição, permitindo avaliar a persistência dos padrões espaciais identificados e investigar alterações na cobertura e ocupação do território. A incorporação de séries meteorológicas de longo prazo também permitiria contextualizar os resultados em relação à variabilidade climática e aos extremos de calor, sem confundir diferenças entre aquisições individuais com tendências climáticas.

Outra frente relevante consiste na integração entre a ilha de calor de superfície e a ilha de calor atmosférica, mediante utilização de estações meteorológicas, sensores de temperatura do ar ou transectos móveis. Essa abordagem permitiria avaliar em que medida os padrões superficiais identificados por sensoriamento remoto correspondem às condições atmosféricas experimentadas pela população.

Recomenda-se, ainda, aprofundar a avaliação das medidas de mitigação e adaptação aplicáveis aos setores prioritários, avançando da indicação geral de Soluções Baseadas na Natureza para análises em escala local. Estudos posteriores podem avaliar disponibilidade física para arborização, sombreamento, infraestrutura verde, pavimentos permeáveis,

qualificação de áreas públicas e conectividade com áreas integrantes do Sistema de Parques Integrados, considerando as características morfológicas e funcionais de cada setor.

Conclui-se, portanto, que a integração entre sensoriamento remoto, modelagem espacial, dados censitários, PCA, ZCL e IVIC permitiu avançar de uma leitura exclusivamente térmica para uma interpretação territorial e multidimensional da vulnerabilidade ao calor urbano em Leme/SP. Mais do que identificar onde a superfície se apresenta mais aquecida, a abordagem permite reconhecer onde diferentes condições ambientais e socioespaciais se combinam de maneira desfavorável e quais fatores justificam a priorização de cada território. Essa diferenciação constitui o principal subsídio do trabalho ao planejamento urbano e à atuação preventiva da Defesa Civil.

REFERÊNCIAS

ALVES, Elis Dener Lima. Ilha de calor urbana em cidade de pequeno porte e a influência de variáveis geourbanas. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 20, p. 110-127, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.5380/abclima.v20i0.46190. Acesso em: 30 jun. 2026.

ALVES, Elis Dener Lima; GALVANI, Emerson. Modelagem da ilha de calor urbana de superfície utilizando regressão geograficamente ponderada (GWR). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, p. 718-742, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.5380/rbclima.v28i0.76786. Acesso em: 30 jun. 2026.

ANJOS, Max Wendell Batista dos; MEDEIROS, Dayvid Carlos de; CASTELHANO, Francisco Jablinski. LCZ4r, um pacote R para análise de zonas climáticas locais e ilhas de calor urbanas. **Revista da ANPEGE**, v. 21, n. 44, e19763, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.5418/ra2025.v21i44.19763. Acesso em: 30 jun. 2026.

CARVALHO, Gabriel Lincoln Lopes et al. Estratégias integradas de soluções baseadas na natureza como potencializadoras de centralidades. **Revista Projetar - Projeto e Percepção do Ambiente**, v. 10, n. 1, p. 81-97, 2025. Disponível em: https://periodicos.ufrn.br/revprojetar/article/view/36621. Acesso em: 30 jun. 2026.

CHAVES, Sammya Vanessa Vieira et al. Vulnerabilidade social da cidade de Teresina, Piauí. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 8, n. 2, p. 13-27, 2022. Disponível em: https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/27200. Acesso em: 30 jun. 2026.

DORIGON, Larissa Piffer; AMORIM, Margarete Cristiane de Costa Trindade. As classificações dos climas das cidades. **Geografia (Londrina)**, v. 30, n. 2, p. 211-231, 2021. Disponível em: https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/geografia/article/view/41011. Acesso em: 30 jun. 2026.

GARTLAND, Lisa. **Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 279 p.

IBGE. **Leme: panorama**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2025. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/leme.html. Acesso em: 30 jun. 2026.

INMET. **Onda de calor histórica provoca recordes de temperatura acima dos 41 °C em São Paulo e dos 44 °C em Mato Grosso do Sul**. São Paulo: 7º Distrito de Meteorologia, 2020. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/Nota_SP_MS_CALOR_30_09_2020.pdf. Acesso em: 30 jun. 2026.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva: IPCC, 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

LOMBARDO, Magda Adelaide; FRUEHAUF, Amanda Lombardo; PELLEGRINO, Paulo Renato Mesquita. Clima urbano nas metrópoles e seus impactos ambientais. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v. 8, n. 1, p. 434-448, jan. 2022. Disponível em: https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/42264. Acesso em: 30 jun. 2026.

LOPES, E. da S.; HORA, K. E. R. Modelo de regressão para identificação de ilha de calor: um mapeamento sistemático. **PARC: Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, v. 14, e023026, dez. 2023. Disponível em: https://doi.org/10.20396/parc.v14i00.8668386. Acesso em: 30 jun. 2026.

LOPES, E. da S.; NASCIMENTO, D. T. F.; HORA, K. E. R. Análise de ilhas de calor a partir de avaliação de variáveis urbanas e ambientais no Setor Bueno - Goiânia/GO (2020). **Sociedade e Território**, Natal, v. 35, n. 3, p. 45-68, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.21680/2177-8396.2023v35n3ID33842. Acesso em: 30 jun. 2026.

MAPBIOMAS. **Coverage statistics by biomes, states and municipalities: MapBiomas Brasil Collection 10.1**. Versão 1.0. [S. l.]: MapBiomas Data, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.58053/MapBiomas/SJZOLT. Acesso em: 24 jul. 2026.

MATTEDI, M. A. et al. Aplicação do índice de vulnerabilidade socioambiental a desastres por meio de Sistema de Informação Geográfica (SIG): estudo de caso do município de Blumenau (SC). **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, São Paulo, v. 13, n. 1, e23423, 2024. Disponível em: https://periodicos.uninove.br/geas/article/view/23423. Acesso em: 30 jun. 2026.

MELLO, B. J.; SOUZA, C. M. M.; AUMOND, J. J.; SILVA, J. I. A. O.; LANGA, E. D.; NOVAES, J. M. A vulnerabilidade socioambiental a desastres: cenários e desafios para o município de Brusque (SC). **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, São Paulo, v. 12, n. 2, e22368, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.5585/geas.v12i2.22368. Acesso em: 24 jul. 2026.

NELO, L. M. de A.; SILVA, L. F. da; RIBEIRO, A. P. Soluções Baseadas na Natureza para mitigar o calor urbano: a eficácia dos corredores verdes em Medellín, Colômbia. **Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes**, Tupã, v. 12, n. 36, p. 12-29, 2024. Disponível em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/cidadesverdes/article/view/5117. Acesso em: 30 jun. 2026.

OKE, T. R. **Boundary layer climates**. 2. ed. London: Methuen & Co., 1987. 435 p.

OKE, T. R.; MILLS, G.; CHRISTEN, A.; VOOGT, J. A. **Urban Climates**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

PORANGABA, G. F. O.; GALVANI, E.; AMORIM, M. C. de C. T. Ilhas de calor superficiais e ondas de calor em Três Lagoas, MS: análise pela ótica do risco e da vulnerabilidade socioambiental. **Revista Brasileira de Climatologia**, Dourados, v. 35, p. 275-296, 2024. Disponível em: https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/18319. Acesso em: 30 jun. 2026.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. Versão 3.40. [S. l.]: Open Source Geospatial Foundation Project, 2024. Disponível em: https://qgis.org. Acesso em: 24 jul. 2026.

SILVA, A. M. M. da; DRACH, P. R. C. Explorando as Soluções Baseadas na Natureza: conceitos e princípios. **Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes**, Tupã, v. 12, n. 35, p. 1-15, 2024. Disponível em:

https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/cidadesverdes/article/view/5104. Acesso em: 30 jun. 2026.

SILVEIRA, P. C. da et al. Análise das superfícies urbanas para identificação de ilhas de calor através da aplicação de índices radiométricos e da temperatura da superfície. **Revista Brasileira de Climatologia**, Dourados, v. 33, p. 329-353, 2023. Disponível em: https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/16322. Acesso em: 30 jun. 2026.

SIQUEIRA-GAY, J.; DIBO, A. P. A.; GIANNOTTI, M. A. Vulnerabilidade às Ilhas de Calor no Município de São Paulo: uma abordagem para a implantação de medidas mitigadoras na gestão urbana. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 105-123, 2017. Disponível em: https://periodicos.uninove.br/geas/article/view/10052. Acesso em: 30 jun. 2026.

STEWART, I. D. **Redefining the urban heat island**. 2011. Tese (Doctor of Philosophy in Geography) - The University of British Columbia, Vancouver, 2011.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local Climate Zones for urban temperature studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston, v. 93, n. 12, p. 1879-1900, dez. 2012.

TEIXEIRA, D. C. F.; AMORIM, M. C. de C. T. Intensidade, magnitude e evolução diária da ilha de calor atmosférica em cidades de pequeno porte: análise simultânea a partir das Zonas Climáticas Locais (LCZs). **Revista Brasileira de Climatologia**, Dourados, v. 30, p. 377-401, 2022. Disponível em: https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/14882. Acesso em: 30 jun. 2026.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **How do I use a scale factor with Landsat Level-2 science products?** Reston: USGS, [s.d.]. Disponível em: https://www.usgs.gov/faqs/how-do-i-use-a-scale-factor-landsat-level-2-science-products. Acesso em: 24 jul. 2026.

VIEIRA, A. F. F. et al. Relação entre a temperatura de superfície e a morfologia urbana com base no zoneamento climático local de Olinda-PE. **Revista Brasileira de Climatologia**, Dourados, v. 35, p. 547-572, 2024. Disponível em: https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/18756. Acesso em: 30 jun. 2026.

VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 86, n. 3, p. 370-384, 2003.

ZAMBONATO, B. et al. Caracterização de zonas climáticas locais na cidade de Santa Maria - Rio Grande do Sul. **Revista de Geografia**, Recife, v. 38, n. 2, p. 85-107, 2021. Disponível em: https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/view/245685. Acesso em: 30 jun. 2026.