

Daniele Gomes Ferreira

**A influência da superfície urbana na
variação da temperatura de superfície:
uma proposta metodológica de análise**

Belo Horizonte
2021

Daniele Gomes Ferreira

**A influência da superfície urbana na
variação da temperatura de superfície:
uma proposta metodológica de análise**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de doutor.

Linha de pesquisa: Tecnologia do Ambiente Construído

Orientadora: Eleonora Sad de Assis

Belo Horizonte
2021

FICHA CATALOGRÁFICA

F383i

Ferreira, Daniele Gomes.

A influência da superfície urbana na variação da temperatura de superfície [manuscrito] : uma proposta metodológica de análise / Daniele Gomes Ferreira. - 2021.

122f. : il.

Orientador: Eleonora Sad de Assis.

Tese (doutorado)– Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura.

1. Climatologia - Teses. 2. Urbanização - Teses. 3. Estatística - Análise - Teses. 4. Geoprocessamento - Teses. 5. Belo Horizonte (MG) - Teses. I. Assis, Eleonora Sad. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Arquitetura. III. Título.

CDD 720.47

Daniele Gomes Ferreira

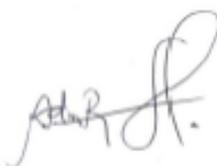
"A INFLUÊNCIA DA SUPERFÍCIE URBANA NA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE: UMA PROPOSTA METODOLÓGICA DE ANÁLISE"

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais e aprovada pela banca examinadora.

Comissão Examinadora:



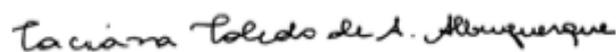
Profa. Dra. Eleonora Sad de Assis (PACPS/UFMG - orientadora)



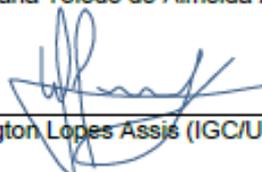
Dra. Adma Raia Silva (Infraero)



Prof. Dr. Carlos Fernando Ferreira Lobo (IGC/UFMG)



Profa. Dra. Taciana Toledo de Almeida Albuquerque (EE/UFMG)



Prof. Dr. Wellington Lopes Assis (IGC/UFMG)

Belo Horizonte, 04 de fevereiro de 2021.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho contou com o auxílio de instituições e pessoas as quais dedico meus agradecimentos:

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig), pela concessão de bolsa por meio do Programa de Capacitação de Recursos Humanos de servidor público estadual (Processos HBD-00036-17 e HBD-00035-18).

Ao Instituto Estadual do Patrimônio Histórico e Artístico de Minas Gerais (IEPHA-MG), por conceder afastamento parcial para estudos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, pelo apoio financeiro na participação em eventos.

À Organização Meteorológica Mundial, pelo apoio financeiro para participação da 10ª Conferência Internacional de Clima Urbano (10ICUC).

À Prodabel, Empresa de informática da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte, por fornecer bases de dados espaciais fundamentais para a utilização na pesquisa.

À profa. Eleonora Sad de Assis, pelas orientações e suporte na condução desta pesquisa e de várias outras ao longo da minha trajetória acadêmica, sem as quais não seria possível chegar aos resultados obtidos no doutorado.

Ao prof. Wellington Lopes de Assis do Instituto de Geociências da UFMG (IGC/UFMG) que incentivou o avanço nos estudos, contribuiu nas análises estatísticas e realizou a análise sinótica para os dias selecionados para pesquisa.

Ao prof. Carlos Fernando Ferreira Lobo do Instituto de Geociências da UFMG (IGC/UFMG) por todo o conhecimento repassado sobre estatística espacial e pelo enorme auxílio prestado nas análises estatísticas.

Ao prof. Lutz Katzschner, por todas as orientações e diversos trabalhos realizados em conjunto, os quais me proporcionaram aprofundamento na fundamentação teórica e nos princípios metodológicos.

Às alunas de iniciação científica voluntária Carolina Bordoni Diniz, Priscila Aparecida Braga Tuzani, Elisa M. C. Almeida pelas atividades realizadas e pelos avanços que proporcionaram no desenvolvimento do trabalho.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável e do Departamento de Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo da Escola de Arquitetura da UFMG pelo apoio e colaboração.

Aos colegas e amigos do IEPHA-MG e da Gerência de Monitoramento e Avaliação, que acompanharam e apoiaram momentos desafiadores do nosso trabalho diário e ajudaram na construção do conhecimento que vai muito além do clima urbano e do patrimônio cultural.

Aos amigos que acompanharam toda essa trajetória, em especial Rejane, Simone e Juliana, pelos momentos compartilhados, escutas e apoio.

À minha família pelo carinho em todos os momentos e ao Gustavo pela paciência, atenção e colaboração, pela presença constante de vocês e pelo apoio incondicional.

RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo apresentar uma proposta metodológica e analisar dados para verificar como parâmetros que descrevem a superfície urbana se relacionam com a temperatura de superfície derivada de satélite. A superfície urbana foi representada por razões de área de elementos construídos (edifícios) e de vegetação, enquanto a temperatura de superfície foi representada pelo parâmetro intensidade de temperatura de superfície (ΔT_s). O recorte espacial correspondeu aos limites da cidade de Belo Horizonte. O recorte temporal escolhido foi representativo do período seco e limitou-se à avaliação de ΔT_s no horário de captura de imagens do satélite Landsat 8, que corresponde a horário pela manhã. Foram desenvolvidas rotinas para tratamento e processamento de dados de superfície urbana e proposta uma metodologia para coleta e tratamento de imagem de satélite no canal termal. Métodos estatísticos espaciais e não espaciais, além de análises exploratórias foram aplicadas para a avaliação da relação entre as variáveis. Os resultados apontaram que a intensidade de temperatura de superfície varia com a composição da superfície urbana, com uma relação positiva quando explicada por elementos construídos e negativa quando relacionada com a vegetação, especialmente a vegetação arbórea. Os modelos de estatística não espacial mostraram-se pouco explicativos da relação entre as variáveis enquanto os modelos espaciais apontaram que há uma forte autocorrelação e dependência espacial dos dados analisados e seriam mais adequados para estudos desse tipo de relação. A partir de análises exploratórias foi possível identificar que áreas urbanas densamente ocupadas por edifícios de baixa altura e sem presença de vegetação, além de áreas de grandes equipamentos ou com grandes extensões de solo exposto foram aquelas que apresentaram maiores registros de ΔT_s e que a presença de vegetação arbórea contribui significativamente para os baixos valores de ΔT_s . A metodologia desenvolvida, por sua vez, pode ser aplicada em outras áreas de estudo como um procedimento padronizado e controlado, possibilitando a comparabilidade de resultados, apresentando-se como uma contribuição inovadora da pesquisa.

Palavras-chave: Temperatura de superfície. Superfície urbana. Estatística espacial. Ferramentas de geoprocessamento.

ABSTRACT

This research aimed to present a methodology and analyze data to determine how parameters that describe the urban surface relate to the surface temperature derived from satellite. The urban surface was represented by ratios of area of buildings and vegetation, while the surface temperature was represented by the parameter surface temperature intensity (ΔT_s). The case study was the city of Belo Horizonte. The climatic condition chosen was representative of the dry period and was limited to the evaluation of ΔT_s at the time of capture of images of the Landsat 8 satellite, which corresponds to a time in the morning. Spatial and non-spatial statistical methods, as well as exploratory analyses were applied to evaluate the relationship between the variables. The results showed that the intensity of surface temperature varies with the composition of the urban surface, with a positive relationship when explained by constructed elements and negative when related to vegetation, especially tree vegetation. The non-spatial statistical models were little explanatory of the relationship between the variables while the spatial models indicated that there is a strong autocorrelation and spatial dependence of the analyzed data and would be more suitable for studies of this type of relationship. From exploratory analyses it was possible to identify that the urban areas densely occupied by low-height buildings with no vegetation, in addition to large equipment areas or with large areas of exposed soil were those that presented higher ΔT_s records and that the presence of tree vegetation contributes significantly to the low values of ΔT_s . The methodology developed can be applied in other areas of study as a standardized and controlled procedure, enabling the comparability of results, presenting itself as an innovative contribution of the research.

Keywords: Surface temperature. Urban surface. Spatial statistics. Geoprocessing tools.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Escalas dos fenômenos atmosféricos - (a) escalas espaciais e temporais e (b) escalas espaciais e camadas verticais.	20
Figura 2: Parâmetros utilizados para descrever a superfície urbana.....	25
Figura 3: Ilustração esquemática de diferentes definições de superfície urbana a partir de uma representação simplificada do sistema urbano.	26
Figura 4: Representação esquemática da variação da temperatura do ar (T_a) e da temperatura de superfície (T_0) durante o dia e a noite em áreas urbanas e rural.....	30
Figura 5: Esquema da (a) variação temporal da temperatura de superfície urbana completa ($T_{0,c}$), da temperatura de superfície urbana plana ($T_{0,p}$) e da temperatura de superfície rural, (b) taxas de aquecimento / resfriamento urbano e rural associadas, (c) evolução temporal da UHI_{Sur} para a superfície plana e para a superfície completa	31
Figura 6: Divisão administrativa de Belo Horizonte e localidades de referência na cidade	57
Figura 7: Topografia de Belo Horizonte e localização de ponto de referência para cálculo de ΔT_s	58
Figura 8: Síntese do processo metodológico	61
Figura 9: Representação de A_p (a), A_f (b) e A_c (c), destacadas em vermelho para os edifícios, e A_v (d), destacada em verde para vegetação.	66
Figura 10: Temperatura de superfície (T_s) - período entre 2014 e 2016	75
Figura 11: Intensidade de temperatura de superfície (ΔT_s), mediana e média de todas as imagens..	77
Figura 12: Gráfico dos parâmetros estatísticos de ΔT_s	78
Figura 13: Mapas representativos do cálculo de cada parâmetro da superfície urbana.....	80
Figura 14: Mapas representativos da classificação de cada parâmetro da superfície urbana	82
Figura 15: Gráficos de dispersão resultantes da análise de regressão linear	83
Figura 16: Mapas resultantes da aplicação do Índice de Moran (<i>clusters</i> e <i>outliers</i>).....	85
Figura 17: Gráficos de dispersão e de <i>boxplot</i> por agrupamento espacial.....	88
Figura 18: GWR (R^2 local)	90
Figura 19: GWR (resíduos padronizados).....	92

Figura 20: Mapas com representação de agrupamentos de baixos valores ΔT_s , associados a presença de vegetação arbórea (a), parques e lagoa (b)	94
Figura 21: Mapas com representação de agrupamentos de altos valores ΔT_s , associados a áreas densamente urbanizadas e assentamentos informais(a); tipologia de ocupação (b)	95
Figura 22: Valores mínimos e máximos de ΔT_s por tipologia de ocupação urbana.....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Informações dos satélites e características das bandas termais.....	33
Tabela 2: Estudos que apresentam métodos de cálculo de parâmetros de superfície urbana em modelo SIG	47
Tabela 3: Classificação dos parâmetros de superfície urbana	68
Tabela 4: Parâmetros estatísticos de ΔT_s para cada imagem selecionada e para as imagens correspondente à mediana e à média	78
Tabela 5: Tempo de execução das rotinas e de processamento dos dados.....	79
Tabela 6: Índices de autocorrelação espacial global (Índice Global de Moran).....	84
Tabela 7: Média e desvio padrão de ΔT_s ($^{\circ}\text{C}$) para os <i>clusters</i> espaciais.....	87
Tabela 8: Resumo estatístico para os modelos GWR.....	91

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔQ_A	advecção horizontal de calor sensível e latente
ΔQ_S	fluxo de energia estocado pela estrutura urbana
ΔT_s	intensidade de temperatura de superfície
A_f	área frontal total dos elementos a barlavento
A_L	fator de escala aditivo da radiância para a banda do satélite
A_p	área dos elementos construídos em planta
A_T	área total da superfície em planta
A_v	área de vegetação e corpos d'água em planta
C	capacidade térmica
E	densidade de fluxo radiante
ε	emissividade
H	altura dos edifícios
H/W	razão de aspecto do <i>canyon</i> (relação entre a altura do <i>canyon</i> e a largura das ruas)
h_m	altura média dos edifícios
K	radiação de onda curta
K_1 e K_2	constantes de conversão térmica para a banda do satélite
L	radiação de onda longa
L_λ	radiância espectral
M_L	fator de escala multiplicativo da radiância para a banda
P_0	ponto de referência em área rural para cálculo de ΔT_s
Q^*	fluxo de radiação
Q_{cal}	número digital
Q_E	fluxo turbulento de calor latente
Q_F	fluxo de energia antropogênica introduzido no sistema
Q_G	densidade de fluxo de calor sensível para o substrato
Q_H	densidade de fluxo de calor sensível
Q_{Ht}	fluxo turbulento de calor sensível
t	tempo
T	temperatura
T_0	temperatura de superfície
T_s	temperatura de superfície terrestre derivada de satélite (<i>land surface temperature</i>)
T_{sr}	temperatura de superfície de referência para a área rural

z	espessura de camada
λ_c	razão de área completa dos edifícios
λ_f	razão de área frontal
λ_p	razão de área plana de edifícios
λ_v	razão de área plana de vegetação
λ_{va}	razão de área plana de vegetação arbórea
λ_{vr}	razão de área plana de vegetação rasteira
σ	constante de Stefan-Boltzmann

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1.	A representação da superfície urbana	23
2.2.	A temperatura de superfície e a superfície urbana	28
2.2.1.	A temperatura de superfície e o sensoriamento remoto: fundamentos e limitações	31
2.2.2.	Estudos internacionais sobre temperatura de superfície e diferentes representações da superfície urbana	37
2.2.3.	Estudos de caso da temperatura de superfície no Brasil	40
2.3.	Métodos de descrição e análise de parâmetros utilizando plataformas SIG	46
2.3.1.	Descrição da superfície urbana	46
2.3.2.	Métodos estatísticos e análise espacial	51
3.	METODOLOGIA DE PESQUISA: área de estudo e procedimentos metodológicos	57
3.1.	Caracterização da área de estudo: a cidade de Belo Horizonte	57
3.2.	Procedimentos metodológicos	60
3.2.1.	Coleta e tratamento de dados.....	62
3.2.1.1.	<i>Temperatura de superfície</i>	62
3.2.1.2.	<i>Superfície urbana</i>	65
3.2.2.	Análise dos dados: métodos estatísticos e de correlação espacial.....	69
3.2.2.1.	<i>Autocorrelação espacial global - Índice Global de Moran</i>	70
3.2.2.2.	<i>Autocorrelação espacial local - Índice Local de Moran</i>	70
3.2.2.3.	<i>Análise de regressão - Regressão geograficamente ponderada (GWR)</i>	71
3.2.3.	Análises exploratórias associadas ao planejamento urbano	72
4.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	74
4.1.	Temperatura de superfície e intensidade de temperatura de superfície.....	74
4.2.	Superfície urbana	79
4.3.	Análises estatísticas	82
4.4.	Análises exploratórias associadas ao planejamento urbano	93
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
	REFERÊNCIAS.....	100
	APÊNDICE A: Caracterização de período seco e análise sinótica	108
	APÊNDICE B: Estimativa de radiação solar incidente	110
	APÊNDICE C: Código das rotinas	112

1. INTRODUÇÃO

A população urbana mundial e a extensão das áreas urbanas apresentaram crescimento nas últimas sete décadas (UNITED NATIONS, 2019). A maior parte dessa população está concentrada localizados na África, Ásia, Oceania, América Latina e Caribe e a previsão é que o maior crescimento populacional ocorra em regiões da África e da Ásia até 2050, principalmente em países menos desenvolvidos (UNITED NATIONS, 2015). Assim como a distribuição populacional entre os países em diferentes graus de desenvolvimento se distingue, os processos de urbanização, por estarem associados a aspectos econômicos, sociais e culturais, também se diferenciam, resultando em diferentes formas urbanas (ROMERO; PAIVA; OPAZO, 2019). Cidades da Ásia e da América Latina, por exemplo, tendem a ter uma forma urbana desordenada¹ se comparadas com o que ocorre em áreas urbanizadas nos Estados Unidos, Austrália e cidades europeias (HUANG; LU; SELLERS, 2007). Além disso, uma grande parte do crescimento dessas áreas em países em desenvolvimento ocorre de maneira informal e em assentamentos urbanos precários², ultrapassando as práticas de planejamento urbano existentes (UN-HABITAT, 2003; INOSTROZA, 2017). Especificamente na América Latina e no Caribe, apesar da tendência de desaceleração do crescimento demográfico urbano, o espaço edificado segue em contínua expansão (UNITED NATIONS, 2012).

Independentemente de como a forma urbana se apresenta, mais ou menos ordenada, é importante entender que as aglomerações urbanas fazem parte de um sistema maior, em que há interações entre os organismos (animais, plantas e microrganismos), o ambiente físico (ar, água e solo) e as estruturas construídas pelo homem (FORMAN, 2014). A atmosfera compõe parte desse ambiente físico com sua dinâmica e ritmos climáticos e, em escala local, recebe influência direta da cobertura e do uso do solo. O ambiente urbano, por sua vez, a partir das alterações que produz no sistema natural, altera o balanço de energia desse sistema, somando a este novos fatores de ganho e de armazenamento de energia que não faziam parte do balanço energético de um sistema não urbanizado (OKE, 1978; OKE et al., 2017).

Considerando que os processos de urbanização estão associados a fatores sócio-econômico-culturais que se diferenciam no território e a atmosfera urbana é resultado da interação com a superfície urbana produzida por diferentes grupos sociais, é preciso considerar que diferentes formas urbanas podem

¹ Os termos ordenamento ou desordenamento da forma urbana aqui utilizados foram definidos com base na comparação de métricas espaciais das formas urbanas presentes em diferentes países, definidas por meio de indicadores quantitativos de desenvolvimento socioeconômico e trajetórias históricas de desenvolvimento urbano (HUANG; LU; SELLERS, 2007).

² Em 2003, 32% da população mundial vivia em favelas, sendo que a maior parte delas concentrava-se em áreas em desenvolvimento (UN-HABITAT, 2003).

produzir diferentes relações com a atmosfera e com o clima (SANT’ANNA NETO, 2011). Os estudos da climatologia urbana, no entanto, concentram-se majoritariamente em explicações dos fenômenos físicos da atmosfera em realidades urbanas típicas de países desenvolvidos. Mesmo nesses países ainda há lacunas conceituais e de conhecimento na integração dos processos de desenvolvimento urbano em modelos de estudo do clima em escalas regional e global (OKE et al., 2017). Diante desse contexto, duas questões se apresentam: como a forma urbana poderia ser simplificada para tornar a solução dos problemas factível e modelável e em quais escalas climáticas estas simplificações poderiam ser aplicadas (BAKLANOV et al., 2018). Além dessas lacunas, há dificuldade em transferir o conhecimento científico adquirido sobre o clima urbano em práticas de planejamento e desenho urbanos (MILLS, 2014), muito em razão de que poucos estudos demonstram como essas práticas afetam o clima urbano (OKE et al., 2017).

Especificamente em países em desenvolvimento localizados em clima tropical, a escassez de informações climáticas é grande³ (ROTH, 2007; OKE et al., 2017). Ademais, poucos dados sobre o rápido crescimento que ocorre nesses locais estão disponíveis de forma sistematizada, o que demonstra a necessidade de investimento em pesquisa nessas regiões (MILLS, 2014), em especial na investigação do impacto das diferentes formas urbanas nas variáveis climáticas.

Uma possibilidade de investigação das características urbanas considerando a sua dinâmica de transformação, sua complexidade e a escassez de dados, seria, por exemplo, por meio de uso de imagens de sensores remotos como os satélites. Essas imagens são obtidas para toda a superfície terrestre, com registros periódicos, muitas delas de acesso gratuito e com a possibilidade de produzir informações atualizadas de grandes áreas em pouco tempo (HUANG; LU; SELLERS, 2007; MILLS, 2014; LORENZZETTI, 2015). Em investigações do clima urbano associados a cobertura do solo, vários trabalhos utilizam esse recurso no mundo e é crescente também seu emprego em países da Ásia e da África (EFFAT; HASSAN, 2014; MUSHORE et al., 2017; KOTHARKAR; RAMESH; BAGADE, 2018).

As imagens de satélite também permitem extrair informações sobre uma das variáveis que expressa a relação entre a superfície urbana e o clima urbano que é a temperatura de superfície (T_0). T_0 é a temperatura registrada na interface entre uma superfície e o ar (OKE et al., 2017). Esse parâmetro é responsável por modular a temperatura do ar das camadas mais baixas da atmosfera urbana por ser um limite comum entre o fluxo de calor sensível que é direcionado para a atmosfera e aquele que é conduzido para o substrato, sendo portanto uma variável fundamental para o equilíbrio energético da superfície (VOOGT; OKE, 2003; LI et al., 2013). T_0 é obtida pela medição da energia radiante emitida

³ Roth (2007) registrou que menos de 20% dos estudos em clima urbano, nas décadas passadas, foram realizados em regiões de clima tropical e subtropical.

pelas superfícies, podendo ser realizada por termometria infravermelha, em que o registro geralmente é realizado em pequenas extensões de área (VOOGT; OKE, 1997; MORRISON et al., 2018) ou por sensoriamento remoto, que tem a capacidade de captura de informações de todo o território terrestre.

No caso da obtenção de informações por sensoriamento remoto, a temperatura de superfície pode ser derivada a partir das imagens do canal termal. Devido às especificidades e limitações desse tipo de registro, diante da influência de efeitos atmosféricos, efeitos angulares (decorrentes da inclinação do sensor) e de emissividade das superfícies (DASH et al., 2002; CHEN et al., 2017), uma nomenclatura específica é geralmente apropriada para esta variável, que é temperatura de superfície terrestre - T_s (*land surface temperature*).

Em estudos urbanos, as imagens termais, associadas a informações dos diferentes tipos de superfície, podem ser utilizadas para a análise e o monitoramento das alterações da cobertura do solo e para a caracterização térmica das superfícies. Neste sentido, possibilitam a observação de uma parte dos efeitos da urbanização (associada às propriedades geométricas e dos materiais) no balanço de energia do ambiente urbano. Esse tipo de estudo tem sido implementado para verificar a variação da temperatura de superfície em diferentes escalas, que variam desde a local (ROTH; OKE; EMERY, 1989; VOOGT; OKE, 2003) até a escala global (BECHTEL, 2015). Apesar do crescente número de estudos sobre essa temática, ainda é um desafio a representação da rugosidade e da heterogeneidade das superfícies urbanas para se extrair relações com a temperatura de superfície.

Diante do contexto apresentado e das lacunas de conhecimento observadas, este trabalho teve como objetivo apresentar uma proposta metodológica e analisar dados para verificar como parâmetros que descrevem a superfície urbana se relacionam com a temperatura de superfície derivada de satélite, utilizando como caso a cidade de Belo Horizonte.

O problema da pesquisa se coloca diante de alguns questionamentos: a superfície urbana pode ser descrita em termos quantitativos por aspectos construídos e por tipo de vegetação existente? Esta descrição é capaz de representar a heterogeneidade do tecido urbano? Há uma relação estatística entre a variação da composição da superfície urbana e a variação da temperatura de superfície derivada de satélite?

A hipótese da pesquisa é que a temperatura de superfície, expressa em termos da intensidade da temperatura de superfície (ΔT_s), varia com a composição da superfície urbana, com uma relação positiva quando explicada por elementos construídos e negativa quando relacionada com a vegetação.

O recorte espacial, como mencionado, foi o município de Belo Horizonte. O recorte temporal escolhido foi representativo do período seco e, pela opção por utilização de imagens do satélite Landsat 8, cuja captura ocorre pela manhã, o estudo limitou-se à avaliação de ΔT_s nesse período do dia.

Os objetivos específicos da pesquisa foram:

- Descrever a superfície urbana a partir de parâmetros geométricos dos seguintes elementos construídos e da vegetação:
 - Elementos construídos: razão de área plana dos edifícios - λ_p , altura média dos edifícios - h_m , razão de área completa dos edifícios - λ_c .
 - Vegetação: razão de área plana de vegetação rasteira - λ_{vr} , razão de área plana de vegetação arbórea - λ_{va} razão de área plana de vegetação (vegetação rasteira e arbórea) - λ_v .
- Analisar as relações entre os parâmetros da superfície urbana e a intensidade de temperatura de superfície por meio de métodos estatísticos não espaciais e espaciais;
- Analisar a relação entre ΔT_s e as tipologias de uso e ocupação e a presença de vegetação por meio de métodos exploratórios.

As justificativas para o trabalho estão fundamentadas nos seguintes aspectos: a) na dificuldade de descrição da superfície urbana a partir de sua relação com os fenômenos físicos que ocorrem na atmosfera urbana, e b) na dinâmica urbana, que dificulta a manutenção de dados atualizados sobre a sua superfície e, conseqüentemente, prejudica a avaliação da resposta quanto aos seus efeitos no clima.

O estudo de uma cidade brasileira, por sua vez, mostra-se relevante pelo contexto em que se inserem as áreas urbanas do país enquanto lacuna de abordagem do clima urbano: mais de 80% da população brasileira é urbana (IBGE, 2010a), metade dessa população se concentra nos 25 maiores aglomerados urbanos distribuídos no país (IPEA, 2016), cerca de 5% do território de pesquisa do Censo de 2010 foi classificado como ocupado por assentamentos informais⁴ (IBGE, 2010b) e grande parte do território nacional está no domínio do clima tropical (IBGE, 2002). Belo Horizonte, por sua vez, é uma cidade em que todo a sua extensão administrativa configura-se como área urbana⁵, tem a sexta maior população

⁴ No Censo, os assentamentos informais são denominados aglomerados subnormais. Entende-se como aglomerado subnormal um conjunto constituído por um certo número de unidades habitacionais caracterizada, em diversos graus, por limitada oferta de serviços públicos essenciais e por irregularidade no padrão urbanístico (ocupação de terreno de propriedade alheia - pública ou particular - e edificações dispostas, em geral, de forma desordenada e/ou densa (IBGE, 2010b).

⁵ O zoneamento urbano municipal instituído pelo Plano Diretor (Anexo 1) apresenta diferentes classificações de zonas urbanas e não apresenta zona correspondente a área rural, sendo todo o território administrativo caracterizado por ocupação urbana (BELO HORIZONTE, 2019).

do país e clima classificado como Tropical Brasil Central, semi-úmido (IBGE, 2002). Assim, a escolha do estudo de caso, pela sua tipologia de urbanização e a caracterização climática, é relevante no contexto brasileiro e mundial de investigação do clima urbano, o que mostra a representatividade da pesquisa e a tentativa de abordar uma das lacunas dessa área de conhecimento.

A relevância e a originalidade da pesquisa estão na exploração de métodos de descrição da superfície urbana para cidades cuja forma urbana é heterogênea, em contraste com os modelos amplamente adotados na literatura que consideram que o tecido urbano é composto por áreas homogêneas (como centros urbanos adensados, áreas residenciais e subúrbios, por exemplo).

O trabalho está organizado em cinco capítulos, sendo o primeiro esta introdução. O capítulo 2 apresenta a revisão da literatura e a fundamentação teórica do estudo, com enfoque na representação da superfície urbana, na relação entre a temperatura de superfície e a superfície urbana e nos métodos de representação e avaliação das variáveis em plataforma SIG. O terceiro capítulo contém a metodologia utilizada, organizado inicialmente com a apresentação e contextualização da cidade de Belo Horizonte como estudo de caso e, em sequência, com o detalhamento dos métodos e das técnicas empregados na coleta, tratamento e análise de dados. O quarto capítulo reúne os resultados obtidos e sua discussão com base nas premissas e objetivos propostos. No capítulo 5 são apresentadas as conclusões, identificando as limitações e a aplicabilidade dos resultados obtidos, além de recomendações para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O processo de urbanização produz transformações no espaço, dentre elas a alteração do tipo de cobertura do solo a partir da substituição de elementos naturais por elementos construídos. Essas alterações podem ser resultado de processos de planejamento urbano ou decorrentes do desenvolvimento urbano informal. Independentemente de como a cidade se desenvolve, o resultado é uma forma urbana tridimensional que produz efeitos na atmosfera. Como a abordagem deste trabalho é interdisciplinar, mostra-se importante apresentar alguns entendimentos sobre os vocábulos “forma” e “urbano”, tentando associá-los à compreensão e aplicação na temática do clima urbano.

Um dos significados para o termo forma é “uma relação ou um conjunto de relações (ordem) que pode conservar-se constante com a variação dos termos entre os quais se situa” (ABBAGNANO, 2007, p. 469). Lefebvre (2000, p. 208–209) aponta que o uso do termo forma, quando aplicado como um conceito da análise espacial, geralmente implica “a descrição de contornos, a determinação de fronteiras, de envoltórios, áreas ou volumes”. Esses significados nos aproximam do objeto de estudo: no estudo do clima urbano, a forma pode ser tratada como um conjunto de informações tridimensionais das superfícies (características dimensionais e do tipo de material dos elementos constituintes tais como edifícios, ruas e vegetação; tipo de cobertura do solo; relação de espaços vazios etc.) que apresentam uma relação (ordem) com o clima em suas diversas escalas (OKE et al., 2017). Ou seja, inclui a estrutura tridimensional onde atua a atmosfera e os espaços (planos horizontais e verticais) necessários à compreensão do fenômeno urbano (MONTEIRO, 2003). Deste ponto de vista, a descrição da cidade estaria voltada para suas características geométricas e físicas, o que representaria a superfície urbana.

Outra definição importante seria do vocábulo urbano. Uma noção desse termo, talvez mais aplicável a área das ciências sociais, seria “uma forma especial de ocupação do espaço por uma população, a saber o aglomerado resultante de uma forte concentração e de uma densidade relativamente alta, tendo como correlato previsível uma diferenciação funcional e social maior” (CASTELLS, 1983, p. 17). Na ecologia urbana, um dos entendimentos possíveis para áreas urbanas é de que essas são mosaicos em que ocorrem interações entre os organismos, as estruturas construídas e o ambiente físico onde as pessoas estão concentradas (FORMAN, 2014). Enquanto o primeiro conceito perpassa pelo entendimento do espaço e das relações sociais nele produzidas – o que não necessariamente envolve uma visão tridimensional –, o segundo conceito parece apresentar uma visão mais holística, pois integra as relações entre os diversos organismos que habitam a cidade com os elementos naturais e construídos, o que indica uma provável percepção tridimensional do espaço.

Da perspectiva meteorológica, o ambiente urbano poderia ser percebido como aquele que causa

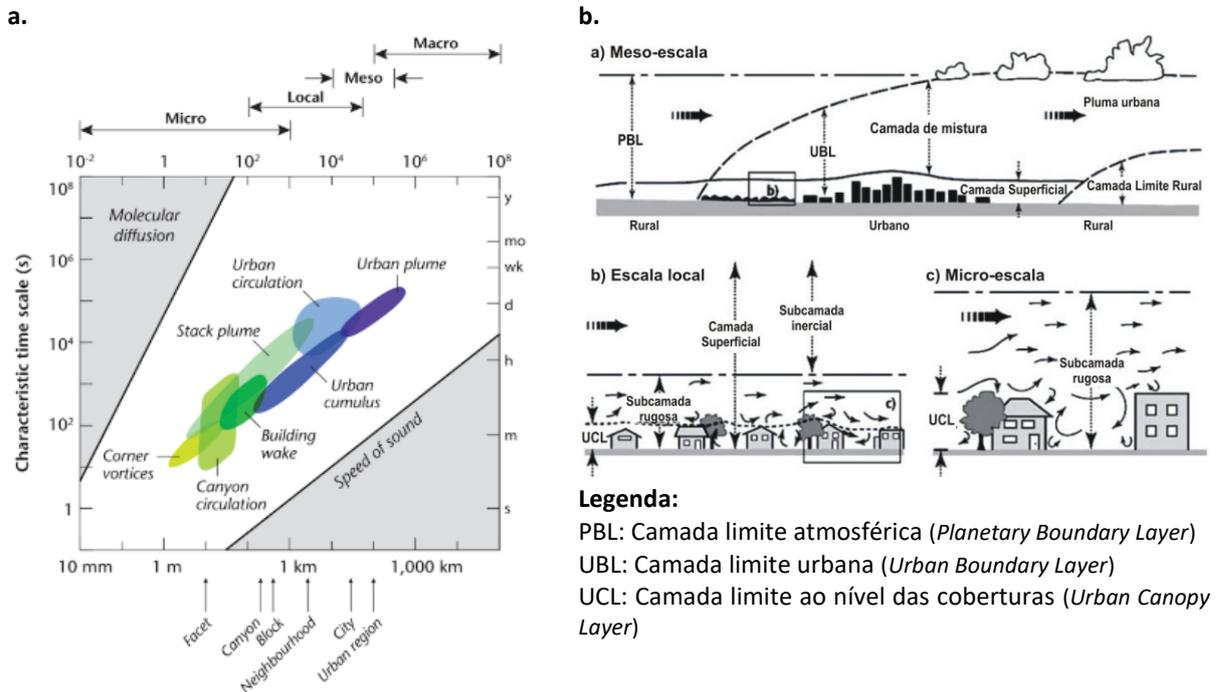
anomalia na atmosfera que está acima da cidade, aquilo que altera “o ar acima dela” (MONTEIRO, 2003)⁶, em uma acepção restrita do conceito. Neste sentido, é uma abordagem do “distúrbio” causado pelo ambiente urbano na atmosfera. Ampliando-se esse conceito, pode-se entender que a alteração causada na atmosfera é provocada pelas atividades humanas que têm impacto tanto na natureza como no homem e pode ser estudada a partir dos seus subsistemas (termodinâmico, físico-químico e hidrometeorológico) e seus respectivos canais de percepção do clima urbano (conforto térmico, qualidade do ar e impacto meteorológico) (MONTEIRO, 2003). Essa abordagem sistêmica amplia a questão climática para além da análise dos fenômenos físicos, aproximando-a da abordagem da ecologia urbana.

Nessa perspectiva sistêmica, entende-se que a atmosfera é caracterizada por fenômenos de diversas escalas associadas ao tempo de duração dos fenômenos e à extensão espacial que atingem (OKE, 1978; OKE et al., 2017). Portanto, além da tridimensionalidade da superfície em que a cidade é um dos componentes, há que se considerar também a dimensão temporal e espacial dos fenômenos atmosféricos. Uma possibilidade de interpretação da interação entre as escalas é representada na Figura 1a. Na Figura 1b são representadas as escalas espaciais e as camadas verticais com diferentes fluxos turbulentos controlados por processos da macro ou microescala, que em função da hora do dia e da condição de estabilidade atmosférica sofrem alteração de altura (OKE, 1978).

Estudos com abrangência espacial de uma cidade, que é o foco deste trabalho, seriam condizentes com a escala local do ponto de vista da extensão territorial, mas dependendo do detalhamento em que os dados são apresentados, podem ser condizentes com a escala microclimática. Quanto aos fenômenos atmosféricos, considerando aqui a temperatura de superfície derivada de imagem de satélite, que é captada em uma data e horário específicos, essa variável teria uma representatividade associada à escala microclimática, contudo é preciso entender as condições sinóticas estabelecidas no período da captura, já que o clima urbano é apenas uma parte do espectro completo de escalas atmosféricas (OKE et al., 2017). Assim, considera-se que mais do que classificar o estudo em alguma escala de abordagem específica, é importante entender a representatividade das variáveis de estudo e qual escala seria compatível com os fenômenos atmosféricos, mas também perceber sua interação com fenômenos da macroescala, relacionados com os sistemas atmosféricos atuantes em determinado período, que explicariam em parte o comportamento dos parâmetros climáticos no contexto urbano.

⁶ Este autor faz referência à contribuição de Landsberg (LANDSBERG, H. E. The climate of towns. In THOMAS, W. E. (ed.). *Man's role in changing the face of the earth*. Chicago, 1956) e apresenta uma crítica particular a esse conceito.

Figura 1: Escalas dos fenômenos atmosféricos - (a) escalas espaciais e temporais e (b) escalas espaciais e camadas verticais.



Fonte: Oke et al. (2017, p. 29) e adaptado de Oke (2006).

Especificamente quanto à relação dos tipos de ocupação e cobertura do solo e sua interação com a atmosfera, os primeiros estudos climatológicos buscaram particularizar a diferença das medições meteorológicas realizadas na área urbana e seu espaço circundante (MONTEIRO, 2003), em uma abordagem que seria representativa da mesoescala. Esse espaço circundante seria o ambiente rural, oposto ao urbano, onde seria possível registrar o ar livre da interferência urbana. Alguns estudiosos do clima urbano consideram que esta terminologia urbano e rural não seria mais suficiente para descrever um determinado local e seu entorno quanto a suas características, visto que a cidade e o campo poderiam ser descritos como um *continuum* (STEWART; OKE, 2012). A alteração da cobertura do solo, seja pela prática de atividades agrícolas, por uma ocupação por pequenos núcleos urbanos ou por cidades já não permitiriam mais a diferenciação entre o natural e o modificado. Independentemente da nomenclatura atribuída ao tipo de cobertura do solo, é importante que a superfície em contato com o ar seja representada para a compreensão e avaliação de seus efeitos na atmosfera.

Nota-se que a heterogeneidade e complexidade das cidades dificultam a formulação de teorias e modelos capazes de explicar a influência dessa superfície no clima. Vários mecanismos e processos físicos ainda são uma lacuna no conhecimento, pois seus efeitos em diferentes escalas são desconhecidos, o que dificulta o acoplamento de modelos em escalas distintas (BAKLANOV et al., 2018). Por isso não há uma teoria única e passível de comparabilidade que seja aplicável a toda e

qualquer área urbana. Dentre as pesquisas existentes, algumas têm estudos mais voltados para a descrição dos fenômenos em uma abordagem quantitativa, enquanto outras mostram-se mais qualitativas e voltadas para aplicações.

Uma das vertentes de investigação tem como princípio básico estudos da climatologia física (OKE, 1978; OKE et al., 2017). Considera que o sistema Terra-Atmosfera compreende ciclos de energia e água, os quais envolvem processos de transferência, conversão e estoque de energia e há um equilíbrio entre a energia que entra na atmosfera e aquela que sai (princípio da conservação da energia - 1ª Lei da Termodinâmica). De modo geral, o balanço de energia em ambiente urbano seria determinado por fatores de ganho, perda e armazenamento de energia. A Equação 1 definiria o balanço de energia da superfície:

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (1)$$

Onde:

Q^* = fluxo de radiação

Q_F = fluxo de energia antropogênica introduzido no sistema

Q_H = fluxo turbulento de calor sensível

Q_E = fluxo turbulento de calor latente

ΔQ_S = fluxo de energia estocado

ΔQ_A = advecção horizontal de calor sensível e latente

Os fluxos de radiação, calor sensível e calor latente estariam presentes no balanço de energia em qualquer ambiente, enquanto os demais termos seriam associados à atividade humana, com exceção de ΔQ_A . Q_F estaria relacionado com emissões provenientes de combustão, que também pode ser entendido como calor artificial emitido (KANDA, 2007). ΔQ_S seria decorrente da alteração da cobertura do solo em ambiente urbano (calor acumulado pela estrutura urbana). ΔQ_A seria um termo de transporte de calor pelo vento⁷. Nesse balanço, pressupõe-se que a soma de todos os termos, incluindo seu sinal, é zero (OKE et al., 2017).

Uma das formas geralmente utilizadas para mensurar o calor estocado pelas superfícies (ΔQ_S) é pelo resíduo dos outros termos do balanço que podem ser diretamente observados (Q^* , Q_H e Q_E). Contudo, valores obtidos de ΔQ_S podem conter o termo de desequilíbrio de energia ou as contribuições das emissões de calor antropogênico (KANDA, 2007), o que altera a forma de abordagem dos termos referentes à contribuição da cidade no balanço de energia. Apesar da parcial divergência entre estas abordagens, ambas se utilizam de modelos físicos, dados medidos em campo e modelos numéricos

⁷ Os estudos de campo e modelos numéricos geralmente ignoram ΔQ_A do balanço de energia por assumirem que as superfícies são extensas e relativamente homogêneas e as diferenças de fluxos horizontais seriam insignificantes.

em seus estudos, isto é, têm um caráter quantitativo (PLATE, 1999; GRIMMOND et al., 2011; BARLOW, 2014; MILLS, 2014;).

A Equação 1 também poderia ser transcrita a partir dos mecanismos de trocas térmicas (GARTLAND, 2010):

$$\text{Saldo de Radiação} + \text{Calor Antropogênico} = \text{Convecção} + \text{Evaporação} + \text{Armazenamento de Calor}$$

A convecção é um mecanismo de troca térmica seca entre uma superfície sólida e um fluido (ar, água) e está associada a velocidade dos ventos em ambientes urbanos. A evaporação é um mecanismo de troca térmica úmida em que há mudança do estado líquido da água para o gasoso, ou seja, é a energia transmitida a partir da superfície terrestre em forma de vapor d'água e esse termo também se refere à evapotranspiração (perda de água para atmosfera por evaporação e transpiração). O armazenamento de calor depende das propriedades dos materiais e quanto mais calor armazenado, maior é a temperatura do material. O saldo de radiação é a somatória da radiação de ondas longas e ondas curtas incidente e refletida. O calor antropogênico é o calor produzido pelo homem. (GARTLAND, 2010; OKE et al., 2017)

Em uma abordagem qualitativa, alguns estudos desenvolvem análises do impacto das cidades no clima considerando seus efeitos quanto aos aspectos térmicos, na ventilação e na poluição do ar. Geralmente utilizam-se do reconhecimento de climatopos no território de estudo, que seriam áreas relativamente homogêneas quanto a características microclimáticas e, a partir disso, elaboram recomendações para atuação no planejamento e no desenho urbano (SCHERER et al., 1999; REN; NG; KATZSCHNER, 2011; VDI, 2015). Utilizam dados medidos em campo e modelos numéricos (simulações computacionais), além de dados de uso e ocupação do solo fornecidos pelos governos locais por serem estudos desenvolvidos em áreas urbanas reais. Empregam técnicas de análise multicritério para ponderar a contribuição dos parâmetros avaliados no clima (FEHRENBACH; SCHERER; PARLOW, 2001; NG; REN, 2015).

Verifica-se que os estudos em clima urbano envolvem tanto modelos teóricos como avaliações de cidades reais, assim como métodos quantitativos e qualitativos na tentativa de explicar a influência da urbanização no clima. Apesar dos avanços nessa área, ainda não há uma representação da superfície urbana capaz de lidar com todas as trocas que ocorrem nas superfícies (BAKLANOV et al., 2018). Além disso, os limites do entendimento atual dessa área do conhecimento estão sendo desafiados pelo aumento da complexidade dos arranjos urbanos, em especial, o aumento da altura e dimensão dos edifícios, o que ainda pouco investigado, e pelo aumento da resolução dos modelos computacionais (BAKLANOV et al., 2018), os quais permitem maior detalhamento da superfície, mas, ao mesmo tempo, demandam o entendimento dos fenômenos em uma escala mais detalhada.

A partir dessa constatação, considera-se que é possível e necessária a apropriação de diferentes abordagens e métodos para avançar na explicação de fenômenos complexos como esses. E é esse direcionamento que se pretende dar a este trabalho. A integração de diferentes métodos e técnicas de descrição da superfície urbana possibilitou avaliar sua relação com uma variável que contribui para o balanço de energia e, conseqüentemente, com o comportamento da atmosfera acima dessa superfície.

2.1. A representação da superfície urbana

Um sistema urbano é composto por um número quase ilimitado de elementos naturais e construídos que fazem trocas de energia com o ambiente circundante e com a atmosfera. Como já mencionado, a representação desses elementos está associada à camada atmosférica que se pretende analisar e dos fenômenos físicos associados às diferentes escalas de abordagem do clima urbano. Em alguns casos essa representação ocorre a partir de classificação de tipos de uso e ocupação do solo ou como uma relação geométrica das superfícies, dentre outras. Alguns tipos de representação urbana e sua aplicação em estudos de clima urbano serão discutidos a seguir.

A classificação de cobertura do solo parte do princípio de que existem áreas homogêneas quanto ao uso e à tipologia de edifícios. As classes seriam definidas por características, tais como a altura dos edifícios, o espaçamento entre eles, os tipos de materiais de revestimento e de cobertura. Um dos modelos de classificação de cobertura do solo utilizado é denominado “*local climate zones - LCZ*” (STEWART; OKE, 2012). Nesse modelo foram definidas classes de áreas urbanas e rurais em que características como cobertura da superfície, estrutura, materiais e atividades humanas seriam uniformes em termos de temperatura do ar em um determinado território que se estende em escala horizontal, considerando os efeitos climáticos da escala local. O modelo partiu do reconhecimento de classificações anteriores realizadas para aplicação em estudos de características aerodinâmicas das superfícies (GRIMMOND; OKE, 1999; SCHERER et al., 1999). Atualmente vem sendo amplamente empregado com o objetivo de criar uma base de dados mundial de informações urbanas, cuja construção é colaborativa e os resultados são validados e disponibilizados na internet⁸ (CHING et al., 2018). Grandes extensões territoriais foram classificadas utilizando esse método, como é o caso da Europa (DEMUZERE et al., 2019) e dos Estados Unidos (DEMUZERE et al., 2020). No Brasil, os locais que têm classificações validadas pelo portal WUDAPT são Aracaju, Vitória, Rio de Janeiro e São Paulo. A

⁸ O portal que agrega as informações de dados urbanos é o *World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT)*. Disponível em: <<http://www.wudapt.org/>>. Acesso em 26 set. 2020.

Região Metropolitana de Belo Horizonte foi classificada por esse método (CARVALHO, 2019), contudo os resultados não estão disponíveis no portal.

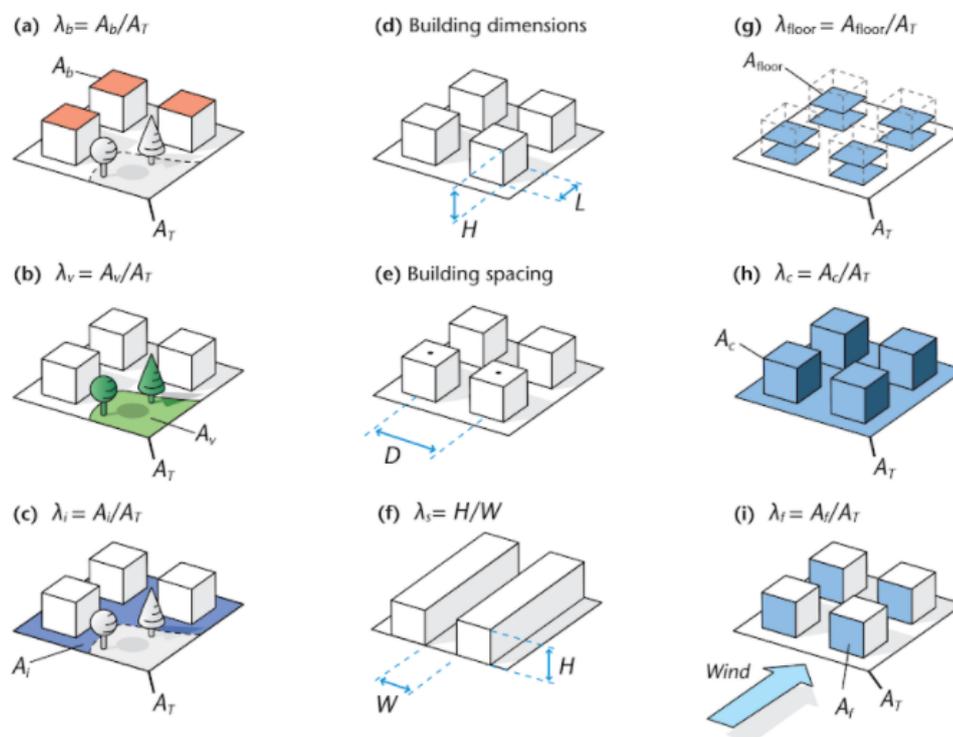
Em estudo da aplicação dessa metodologia, Bechtel et al. (2015) compararam as classificações realizadas em 18 cidades localizadas na África, Ásia, Europa e Américas do Norte e do Sul, as quais foram realizadas utilizando imagens do satélite Landsat. Os autores apontaram a dificuldade de classificação no caso da cidade Khartoum (Sudão), em que as áreas áridas no entorno urbanizado tinham assinatura espectral semelhante de área urbana, ou seja, havia pouca diferenciação entre as classes urbanas e não urbanas. Esse apontamento sugere que é preciso cautela no uso do método em regiões áridas, por exemplo. Além disso, o estudo indicou a necessidade de se analisar as amostras extraídas utilizando medidas mais sofisticadas que representam as relações da forma urbana. Essas conclusões sinalizam dificuldades de aplicação de um modelo interpretativo decorrente de classificação de imagem de satélite em realidades urbanas diversas. Além disso, Stewart e Oke (2012) consideraram que a diferenciação entre classes em termos de temperatura é mais evidente em áreas de relevo simples, em superfícies secas e em condições de calma, o que poderia impossibilitar seu uso em áreas de relevo complexo e em diferentes condições climáticas.

Outra possibilidade de representação da forma urbana, neste caso utilizada para relacioná-la com o ganho de carga térmica em ambientes urbanos e mensuração da densidade construída, é por meio do parâmetro volume construído, estimado a partir da área em planta das edificações multiplicado pela sua altura. Em estudos em que se utiliza a metodologia de mapas climáticos (VDI, 2015) aplica-se uma relação empírica de ganho de carga térmica diante do aumento da densidade construída (REN; NG; KATZSCHNER, 2011; NG, 2015). Nesses casos, a relação entre as variáveis urbanas e climáticas é estabelecida por meio de pesos, definidos por especialistas, e por aplicação de método de análise multicritério, sendo que não há uma avaliação estatística da influência desse parâmetro urbano na variação de ganho de carga térmica. Esse método foi implementado para o caso de Belo Horizonte (FERREIRA; ASSIS; KATZSCHNER, 2017).

Considerando ainda o princípio de ganho de carga térmica pelas edificações, alguns estudos propõem o emprego da massa construída das edificações como representação da forma urbana, considerando que o volume de material constituinte do edifício (o concreto, por exemplo) representaria o armazenamento de energia térmica. Tso et al. (1990) demonstraram que, ao incluir o termo de armazenamento de calor associado à massa construída das edificações em modelo de balanço de energia houve melhora na previsão da variação diurna de temperatura do ar. Vilela et al. (2009), por sua vez, verificaram baixa correlação linear entre a massa construída e a temperatura do ar para Belo Horizonte.

Quanto às dimensões e à estrutura do tecido urbano, algumas relações geométricas dos elementos urbanos (edificações e vegetação) são usualmente estabelecidas a fim de caracterizar o arranjo espacial desses elementos. Algumas medidas utilizadas são a altura, o comprimento e o espaçamento entre os elementos da estrutura urbana (Figura 2). A partir dessas medidas, são extraídas relações tais como a razão de aspecto do canyon urbano (relação entre a altura do canyon e a largura das ruas – H/W), a razão de área plana - λ_p (razão entre a área dos elementos - A_p e a área total da superfície - A_T), a razão de área frontal - λ_f (razão entre a soma das áreas de todos os elementos a barlavento - A_f e a área total da superfície - A_T), dentre outras (GRIMMOND; OKE, 1999).

Figura 2: Parâmetros utilizados para descrever a superfície urbana.



Fonte: Oke et al. (2017, p. 21).

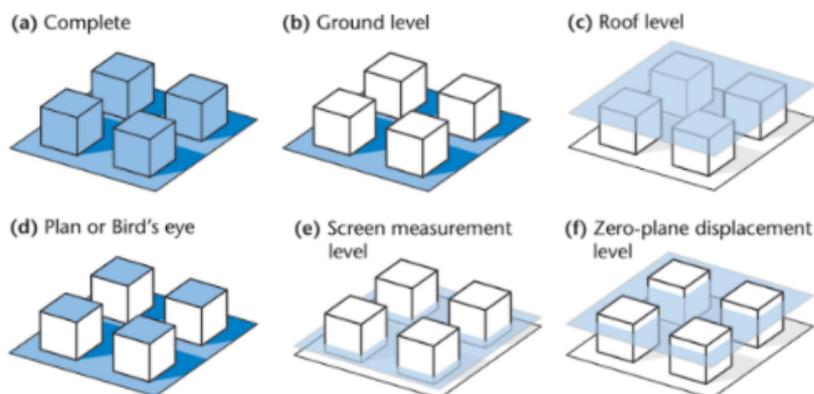
Nos casos citados anteriormente, geralmente se estabelece uma relação entre os parâmetros representativos da forma urbana e a temperatura do ar para avaliar o impacto dos elementos construídos no clima. No entanto, alguns autores consideram que a melhor correlação com o uso do solo – ou seja, com as características da forma urbana –, ocorre com a temperatura de superfície e não com a temperatura do ar durante o dia (ROTH; OKE; EMERY, 1989). A temperatura de superfície seria responsável por modular a temperatura do ar das camadas mais baixas da atmosfera urbana e, por isso, seria um fator central para o equilíbrio energético da superfície (VOOGT; OKE, 2003). Assim, uma

possibilidade de representação da forma urbana seria por meio da sua superfície ativa, que seria aquela que interage diretamente com a atmosfera.

A superfície aqui é entendida no sentido estrito da palavra, que é a parte exterior e visível dos corpos, suas faces (“Superfície”, 2015). Assim, esse conceito diferencia-se dos anteriores de massa e volume construídos, pois considera apenas as faces externas bidimensionais que compõem os elementos tridimensionais construídos ou naturais. Em termos da climatologia, a superfície ativa ideal ou completa seria aquela que compreende o limite entre o sistema da superfície e o ar (VOOGT; OKE, 1997). Como é difícil representar todas essas superfícies em ambientes urbanos, são feitas simplificações dependendo do tipo de coleta de dados ou da escala de abordagem.

Voogt e Oke (1997) e Oke et al. (2017) especificaram seis diferentes formas de definir a superfície urbana associando-as, quando possível, às formas de coleta de dados (Figura 3). São cortes em planos horizontais que representariam o que é visto ou percebido pela instrumentação ou quais parâmetros podem ser calculados naquele nível.

Figura 3: Ilustração esquemática de diferentes definições de superfície urbana a partir de uma representação simplificada do sistema urbano.



Fonte: Oke et al. (2017, p. 15).

A primeira descrição é a superfície ideal ou tridimensional completa (Figura 3a), em que todos os detalhes da interface das superfícies seriam considerados. Em princípio, não seria possível mensurar todas as propriedades da superfície, sendo necessárias simplificações para tentar uma aproximação desse modelo ideal (VOOGT; OKE, 1997). A Figura 3b representa a superfície no nível do solo. Essa representação ignora os elementos verticais, os quais têm propriedades bastante diferentes do terreno, o que torna esse modelo bastante incompleto. A superfície no nível das coberturas (Figura 3c) considera o sistema urbano como uma “caixa preta” e ignora a complexidade das superfícies, sendo estimado o resultado do agrupamento de processos e propriedades em escalas menores que ocorrem

nessa caixa. A superfície plana ou vista aérea (Figura 3d) corresponde ao plano de observação de um sensor remoto, direcionado em sentido vertical para baixo, o que não permite a visualização das superfícies verticais. A superfície no nível da medição (Figura 3e) é aquela calculada no nível em que as medições meteorológicas são feitas, geralmente a 1,5 ou 2,0 m acima do solo. O nível do “deslocamento plano zero” ou nível da rugosidade aerodinâmica (Figura 3f) relaciona-se com o perfil vertical de entidades atmosféricas (como o vento acima do dossel urbano).

Dessas representações, aquelas que realmente representariam as superfícies ativas seriam as Figura 3a, 3b e 3d, sendo que 3b e 3d seriam visões parciais da superfície. A representação da forma urbana por uma superfície ativa completa (Figura 3a), por sua vez, parece ser a que expressa de modo mais exato os elementos em contato com a atmosfera se comparada às demais técnicas. Além da exatidão da informação que pode ser extraída, uma outra vantagem é que pode ser aplicada a qualquer tipo de área urbana, já que não exige uma representatividade de áreas homogêneas, como é o caso das classificações de uso e cobertura do solo. Em cidades como as brasileiras, os métodos de cálculo das superfícies ativas poderia ser melhor aplicado diante da heterogeneidade do tecido urbano decorrente do modelo de urbanização, tendo em vista que áreas homogêneas e usos setorializados, que determinam os métodos de classificação de cobertura do solo, parecem ser mais condizentes com realidades urbanas encontradas em maior vulto em cidades do hemisfério norte⁹. Mesmo as cidades com modelos de ocupação mais homogêneo estão exibindo novas formas, especialmente em áreas de alto crescimento urbano (WENTZ et al., 2018), o que demonstra a importância de se desenvolver melhores modelos para sua representação.

Partindo-se do princípio de representação da forma urbana como uma superfície ativa, passa-se ao entendimento de como ocorre sua interação com a atmosfera e quais variáveis seriam representativas dessa relação em estudos de clima urbano.

⁹ No hemisfério norte vários países precisaram se reconstruir no período pós Segunda Guerra Mundial. Vários tipos soluções urbanas foram explorados neste período, em sua maioria baseados na produção em massa e nas ideias modernistas de distribuição de funções no território urbano, o que produziu uma renovação do tecido urbano existente (HARVEY, 2006). Esse tecido constituiu-se por setorização dos usos, o que criou, de certa forma, áreas homogêneas na cidade. Contudo, o período posterior à década de 1970, encaminha-se para uma apropriação mais caótica de cidade. Harvey (2006, p. 96) aponta que “fragmentação, colagem e ecletismo, todos infundidos de um sentido de efemeridade e de caos, são, talvez, os temas que dominam as atuais práticas da arquitetura e do projeto urbano”, o que pode ser rebatido no território como áreas urbanas mais heterogêneas do que aquelas propostas pelo modernismo e, conseqüentemente, uma diversidade de ocupação do tecido urbano.

2.2. A temperatura de superfície e a superfície urbana

Cada superfície possui um balanço de energia único para o qual há uma única temperatura na sua interface com o ar, que é a temperatura de superfície (T_0). T_0 é o limite comum nos gradientes de temperatura que geram densidade de fluxo de calor sensível (Q_H) para a atmosfera e similarmente conduz o fluxo de calor sensível para o substrato (Q_G). Essa temperatura satisfaz a combinação entre os fluxos radiativos, condutivos e turbulentos do balanço de energia da superfície (Equação 1). Alterações nos termos do balanço de energia ou nas propriedades térmicas dos materiais afetam T_0 , como demonstrado na Equação 2 (OKE et al., 2017).

$$C \frac{\partial T_0}{\partial t} z = Q^* - Q_H - Q_E - Q_G \quad (2)$$

Onde:

C = capacidade térmica

t = tempo

z = camada de espessura

Os fenômenos físicos associados às propriedades das superfícies urbanas, por serem complexos, algumas vezes são analisados por meio de modelos computacionais diversos de balanço de energia (GRIMMOND et al., 2011). Outras vezes os processos climáticos envolvidos são tratados individualmente considerando as camadas atmosféricas, as escalas e os fenômenos relacionados (ARNFIELD, 2003).

As propriedades das superfícies que exercem forte controle em T_0 são as propriedades geométricas, radiativas, térmicas, de umidade e aerodinâmicas (OKE et al., 2017). As propriedades geométricas estão associadas à orientação (ângulo de inclinação da superfície e azimute) e à abertura ao sol e ao céu (que está relacionada com o espaçamento entre os elementos naturais ou construídos), dentre outras. As propriedades radiativas controlam a habilidade das superfícies de refletir a radiação de onda curta (K) e a radiação de onda longa (L), devido ao albedo e à emissividade das superfícies, respectivamente. As propriedades térmicas orientam a capacidade de conduzir e difundir calor do e para o material. As propriedades de umidade e aerodinâmicas relacionam-se com fluxos de calor latente e fluxos turbulentos (OKE et al., 2017).

Especificamente quanto às propriedades radiativas das superfícies, alguns campos de estudo perpassam, por exemplo, pela determinação do albedo urbano (AIDA, 1982; CHIMKLAI; HAGISHIMA; TANIMOTO, 2004), pela avaliação das múltiplas reflexões que ocorrem entre as superfícies, em especial nos *canyons* urbanos (ARNFIELD, 1982), outros utilizam-se de imagens de satélite para avaliar a temperatura das superfícies (ROTH; OKE; EMERY, 1989; VOOGT; OKE, 2003). Os estudos do albedo e de reflexões das superfícies geralmente são feitos para modelos que envolvem uma pequena fração

do território (algumas quadras) e analisa o fenômeno na escala microclimática, enquanto os trabalhos que utilizam imagens de satélite podem se estender por grandes áreas (cidades inteiras e regiões metropolitanas) devido à extensão territorial que o satélite é capaz de captar. Contudo, a resolução dos dados coletados por sensores remotos é menos precisa, o que não permite uma análise do fenômeno na escala microclimática.

Quanto ao uso de sensoriamento remoto para avaliação de fenômenos do clima urbano, uma das análises possíveis é de mensuração de diferenças no campo térmico das superfícies, mais especificamente da diferença entre a temperatura das superfícies urbanas e da temperatura da superfície em áreas rurais. Essa variação de temperatura das superfícies é definida como ilha de calor urbana superficial¹⁰ (OKE et al., 2017; AMORIM, 2019). A forma e o tamanho da ilha de calor variam no tempo e no espaço, sendo que sua magnitude ou intensidade (ΔT_{u-r}) definiria um valor que poderia ser utilizado para fins de comparação do fenômeno entre cidades, por exemplo (OKE, 1978; OKE et al., 2017). Para fins comparativos, é importante que a definição da temperatura de referência para a área rural (T_{sr}) considere os tipos de superfície, a umidade do solo, as sombras e a configuração topográfica (por exemplo, elevação, declive, proximidade de corpos d'água) (OKE et al., 2017).

A diferença entre o ambiente urbano e o rural estaria relacionada, portanto, às propriedades dos materiais de cobertura do solo. O rural geralmente é representado por áreas vegetadas, em que albedo e a emissividade dos materiais poderiam contribuir para um aquecimento diferenciado das superfícies ao longo do dia se comparado com as características dos materiais que compõem o ambiente urbano. O ambiente urbano, por sua vez, também apresenta aquecimento diferenciado durante o dia decorrente da diversidade de tipos de ocupação urbana, sendo que as características geométricas e radiativas das superfícies contribuem para a variação da temperatura. Isto pode ser observado na representação esquemática da variação da temperatura do ar e das superfícies durante o dia e a noite (Figura 4), em que se verifica maior evidência no período noturno.

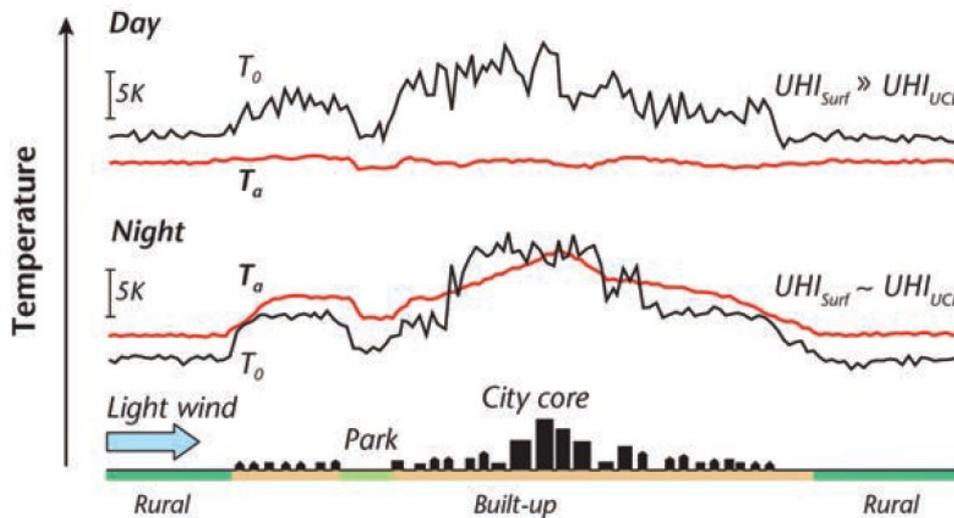
Um modelo esquemático da evolução da temperatura de superfície desenvolvido por simulação para um dia de verão é mostrado na Figura 5, considerando uma tipologia construtiva compacta, com edifícios de altura média e densamente construído (LCZ 2 – médio-compacto). Observa-se que as temperaturas urbanas são maiores que as rurais durante todo o dia (Figura 5a), sendo que as

¹⁰ Esse conceito vem de uma definição mais ampla de ilha de calor, que seria a diferença de temperatura entre áreas urbanas e seu entorno. A ilha de calor urbana, mais especificamente, seria definida como o calor característico de uma cidade, muitas vezes aproximado por diferenças de temperatura entre áreas urbanas e rurais (OKE et al., 2017) e que se manifesta com maior magnitude após o pôr do sol. A ilha de calor superficial, por sua vez, é um dos três tipos de ilhas de calor urbanas, referenciada na literatura internacional geralmente como *surface urban heat island* (SUHI ou UHI_{surf}). Os outros tipos seriam a ilha de calor atmosférica inferior e a ilha de calor da atmosfera urbana superior (AMORIM, 2019).

temperaturas para as superfícies planas exibem maiores valores no meio do dia. Valores mais altos também ocorrem para as ilhas de calor baseadas em superfícies planas (Figura 5c) devido ao intenso aquecimento das coberturas das edificações e dos pavimentos entre os edifícios (cânions). O aquecimento das superfícies completas, por sua vez, ocorrem de forma mais lenta por causa das propriedades térmicas dos materiais e pelo sombreamento parcial das paredes dos prédios e dos pisos dos cânions (OKE et al., 2017).

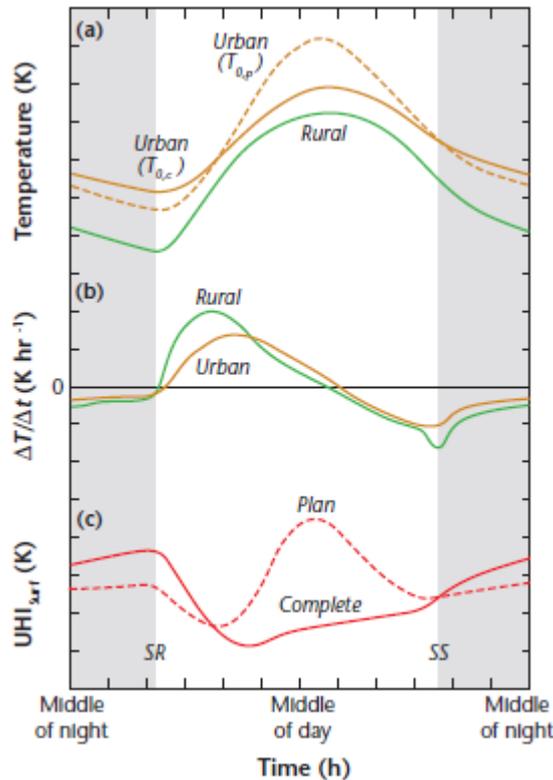
A partir da compreensão de que há variação da temperatura de superfície no território de uma cidade e em seu entorno rural e que as propriedades geométricas e radiativas têm forte controle em T_0 , é preciso entender como essa temperatura é registrada por sensores remotos e qual a sua relação com as propriedades da superfície, o que será tratado a seguir. O que se pretende aqui é que o estudo tenha interface com a escala de planejamento urbano. Assim, o sensoriamento remoto seria uma ferramenta para a avaliação da temperatura de superfície e por isso a ênfase nessa forma de representação de T_0 .

Figura 4: Representação esquemática da variação da temperatura do ar (T_a) e da temperatura de superfície (T_0) durante o dia e a noite em áreas urbanas e rural



Fonte: Oke et al. (2017, p. 200).

Figura 5: Esquema da (a) variação temporal da temperatura de superfície urbana completa ($T_{0,c}$), da temperatura de superfície urbana plana ($T_{0,p}$) e da temperatura de superfície rural, (b) taxas de aquecimento / resfriamento urbano e rural associadas, (c) evolução temporal da UHI_{sur} para a superfície plana e para a superfície completa



Fonte: Oke et al. (2017, p. 209).

2.2.1. A temperatura de superfície e o sensoriamento remoto: fundamentos e limitações

Uma das técnicas possíveis de se avaliar a temperatura das superfícies é por imagens captadas por sensoriamento remoto. O sensoriamento remoto é uma tecnologia de aquisição de dados sobre a superfície terrestre que ocorre por meio da captação e do registro da energia refletida ou emitida pela superfície, sem o contato do objeto com o sensor. Ou seja, a obtenção da imagem é feita pela detecção e pela medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres (FLORENZANO, 2011; MENESES; ALMEIDA, 2012). A captação das imagens é feita em diferentes intervalos espectrais, os quais correspondem às bandas do espectro eletromagnético (faixas do visível, infravermelho e micro-ondas). A região do infravermelho termal é aquela em que a radiação emitida pelos objetos é função da temperatura verdadeira da superfície e da sua emissividade (JENSEN, 2011), sendo que os sensores capazes de captar essa informação são projetados para receber prioritariamente a energia emitida pelo alvo (LORENZZETTI, 2015).

A temperatura de superfície derivada de sensoriamento remoto é baseada na lei de Planck, que relaciona a energia radiante emitida por um corpo negro com sua temperatura. A maioria dos objetos

do mundo real, no entanto, não tem o comportamento de um corpo negro. A emissividade (ϵ) é a variável que representa o comportamento dos objetos reais. ϵ é a razão entre a energia radiante emitida por um objeto a um dado comprimento de onda e aquela emitida por um corpo negro a mesma temperatura (DASH et al., 2002). Assim, o conhecimento do valor da emissividade de um objeto possibilita modificar a lei de Stefan-Boltzmann, originalmente aplicável a corpos negros ($\epsilon=1$), para se ajustar o fluxo radiante espectral total dos materiais do mundo real (Equação 3) (JENSEN, 2011; OKE et al., 2017).

$$E = \epsilon \sigma T^4 \quad (3)$$

Onde:

E = densidade de fluxo radiante

σ = constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

T = temperatura

O canal termal dos satélites mede a quantidade de energia radiante infravermelha emitida das superfícies (JENSEN, 2011) e não a temperatura real da superfície. A incapacidade de captar a temperatura real das superfícies decorre das interferências atmosféricas existentes, que provocam efeitos de absorção e espalhamento¹¹ da radiação eletromagnética, além da presença de gases e particulados, que podem causar efeito aditivo de radiação captada pelo sensor (MENESES; ALMEIDA, 2012). Assim, três efeitos devem ser considerados na obtenção de temperatura de superfície por satélite: os efeitos atmosféricos, os efeitos angulares (decorrentes da inclinação do sensor) e de emissividade das superfícies (DASH et al., 2002).

Diante das limitações da captação da informação pelos sensores remotos, tem-se que o registro na banda termal corresponde à temperatura radiante da superfície. Essa temperatura refere-se apenas às superfícies vistas pelo sensor e é resultado do cálculo da média da área de um pixel (ROTH; OKE; EMERY, 1989; DASH et al., 2002), já que o pixel é a menor unidade da imagem de satélite. Para cada pixel há um valor associado, denominado valor de brilho ou número digital. Esse valor é função da resolução espacial da imagem, que corresponde à dimensão, em metros, do campo de visada instantâneo (IFOV) do sensor projetado no terreno (JENSEN, 2011).

Atualmente, vários satélites dispõem de sensores capazes de captar imagens no canal termal com diferentes resoluções espaciais e intervalo entre as capturas de imagens (Tabela 1). A resolução espacial das imagens está diretamente associada a escala dos fenômenos investigada e, no caso dos

¹¹ Lorenzetti (2015) coloca que o efeito de espalhamento atmosférico na faixa do infravermelho termal é muito reduzido se comparado ao observado na faixa do visível.

estudos urbanos, quanto menor a resolução, melhor a capacidade do sensor em reproduzir as características das diferentes superfícies.

Tabela 1: Informações dos satélites e características das bandas termais

Satélite	Banda termal	Início - fim da operação	Resolução espacial	Intervalo entre visitas
Aster	Bandas 10 a 14 (8,12 - 11,65 μm)	Dez./1999 - em operação	90 m	16 dias
CBERS-4	Banda TIR (10,4 - 12,5 μm)	01/01/2015 - em operação	80 m	26 dias
Landsat 5	Banda 6 - TIR (10,4 - 12,5 μm)	01/03/1984 - 22/11/2011	120 m	16 dias
Landsat 7	Banda 6 - TIR (10,4 - 12,5 μm)	15/04/1999 - em operação Em 31/05/2003 interrompeu recepção no Brasil	60 m	16 dias
Landsat 8	Banda 10 - TIR1 (10,6 - 11,19 μm) Banda 11 - TIR2 (11,5 - 12,51 μm)	fev./2013 - em operação	100 m (reamostrada para 30 m)	16 dias
Sentinel 3	Bandas S8 e S9 (10,4 - 12,5 μm)	16/02/2016 - em operação	1 km	27 dias
Terra (Modis)	Banda 31 (10,78 - 11,28 μm) Banda 32 (11,77 - 12,27 μm)	18/12/1999 - em operação	1 km	1 - 2 dias

Fonte: As informações foram extraídas dos manuais dos respectivos satélites¹².

Em áreas urbanas, as superfícies vistas pelo sensor são, principalmente, os topos e coberturas das edificações, topo das árvores e áreas planas livres de obstáculos (ruas, lotes vagos, áreas gramadas etc.), o que seria a representação da superfície plana ou vista aérea indicada na Figura 3d. As faces verticais dos objetos tridimensionais não são captadas assim como não há registro da superfície abaixo das árvores. Contudo, dependendo do horário da captura da imagem, as áreas de sombra produzidas

¹² Aster: Disponível em:

<https://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03_data/04_Documents/aster_user_guide_v2.pdf>. Acesso em 08 fev. 2020.

CBERS: Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/index.php>>. Acesso em 08 fev. 2020.

Landsat: Disponível em: <https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/LSDS-1574_L8_Data_Users_Handbook-v5.0.pdf>. Acesso em 08 fev. 2020.

Sentinel: Disponível em: <http://esamultimedia.esa.int/multimedia/publications/SP-1322_3/offline/download.pdf>. Acesso em 08 fev. 2020.

Terra (Modis): Disponível em: <<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod11.php>>. Acesso em 08 fev. 2020.

pelas faces verticais interferem na temperatura de superfície e essa influência da tridimensionalidade das superfícies se reflete na temperatura registrada pelo sensor.

O sensor remoto, portanto, não capta todas as superfícies ativas existentes no ambiente, sendo uma representação parcial e com restrições das superfícies. Além disso, a imagem é captada em diferentes planos horizontais – dependendo da altura do alvo em relação ao solo e ao sensor – e em diferentes níveis no sistema urbano. Assim, é preciso considerar que a imagem final é um registro de ambientes urbanos turbulentos muito diferentes (ROTH; OKE; EMERY, 1989) e que estão em diferentes níveis da camada urbana ao nível das coberturas (no topo dessa camada ou em níveis inferiores, como no nível do solo, por exemplo) (Figura 1b e Figura 3d). Nesse sentido, é importante o entendimento do dado registrado pelo satélite, pois configura uma climatologia própria e uma temperatura característica da cidade que não pode ser simplesmente transposta ou equiparada a outros sistemas¹³.

A utilização de imagens de satélite aplicadas ao estudo do clima urbano teve início na década de 1970, com sua aplicação na observação de ilhas de calor urbana (ROTH; OKE; EMERY, 1989). Até o ano de 1989, em que se registrou uma primeira revisão sobre trabalhos nessa temática, poucos estudos foram desenvolvidos com essa abordagem – das 12 publicações citadas, a maior parte delas foram desenvolvidas em cidades dos Estados Unidos, duas em cidades europeias e uma na cidade de São Paulo (ROTH; OKE; EMERY, 1989).

No início dos anos 2000, uma outra revisão da literatura (VOOGT; OKE, 2003), complementar àquela realizada em 1989, apresentou novos avanços ocorridos nessa área de conhecimento, incluindo outras temáticas. Os temas de aplicação de sensoriamento remoto termal citados pelos autores foram: 1) na análise da estrutura espacial de padrões térmicos urbanos e sua relação com as características da superfície urbana; 2) no estudo dos balanços de energia da superfície urbana e 3) no estudo da relação entre as ilhas de calor atmosféricas e as ilhas de calor da superfície urbana (UHI_{Sur}).

Os dois estudos que se dedicaram à revisão da literatura mostram-se importantes, pois o primeiro deles (ROTH; OKE; EMERY, 1989) aponta questionamentos metodológicos sobre a interpretação e a aplicação das imagens termais em estudos do clima urbano e o segundo (VOOGT; OKE, 2003) faz uma revisão desses questionamentos a luz dos progressos empreendidos durante mais de uma década. As questões discutidas em ambos os estudos foram as seguintes:

¹³ Dash et al. (2002) consideram que apenas para superfícies isotérmicas homogêneas há equivalência entre temperaturas radiométrica (temperatura de superfície) e termodinâmica (temperatura medida por um termômetro). Como a superfície da terra não é homogênea, a temperatura de superfície terrestre não está confinada a superfícies isotérmicas homogêneas, não sendo possível aplicar uma relação de equivalência entre estes dados.

- 1) Quais são as características da superfície urbana vistas pelos sensores remotos térmicos?
- 2) Qual é a relação entre a temperatura radiométrica da superfície, observada pelo sensor remoto, e a temperatura real da interface entre o urbano e a atmosfera?
- 3) Como as ilhas de calor da superfície urbana podem estar relacionadas às ilhas de calor urbana atmosférica?
- 4) Como o sensoriamento remoto térmico das superfícies urbanas pode contribuir para modelos de clima urbano?

Como a presente pesquisa pretende abordar especificamente a relação entre a superfície urbana e a temperatura de superfície, serão apontadas aqui apenas as conclusões obtidas nos dois primeiros questionamentos.

Quanto às características da superfície urbana, Roth, Oke e Emery (1989) indicaram que a superfície vista pelo satélite consistiria em um subconjunto das faces da superfície urbana ativa com a qual a atmosfera está em contato. No entanto, acrescentaram que, dependendo da posição do ângulo de elevação do satélite, algumas superfícies verticais são captadas pelo sensor remoto – quanto menor o ângulo de elevação, maior é a quantidade de superfície vertical vista – o que deve ser verificado na interpretação das imagens. Neste sentido, os autores recomendaram que os estudos fizessem menção a esta característica do satélite para que fosse possível avaliar a origem da informação fornecida pelo sensor remoto. Voogt e Oke (2003), comparando seu momento à realidade apresentada para a década de 1980, apontaram um avanço na descrição da superfície urbana enquanto uma superfície tridimensional a partir de estudos associados principalmente a análises morfométricas para fins de caracterização da rugosidade aerodinâmica das superfícies (GRIMMOND; OKE, 1999). No entanto, essa caracterização ainda constituiria uma representação grosseira da complexidade do tecido urbano real e a descrição combinada de vegetação e elementos construídos ainda seria deficiente, o que representava uma lacuna nos estudos.

No que se refere ao segundo questionamento, que é a relação entre a temperatura radiométrica da superfície derivada do sensor remoto e a temperatura real, Roth, Oke e Emery (1989) sinalizaram que a geometria da superfície novamente seria um problema na avaliação da relação entre essas temperaturas quando são desconsiderados erros evidentes de medição do sensor relativos à atenuação atmosférica e à variação da emissividade da superfície. A não visibilidade das superfícies verticais e, conseqüentemente, dos seus materiais constituintes, acarretariam uma média imprecisa da verdadeira temperatura da superfície ativa. A combinação das características térmicas dos materiais das coberturas (que geralmente têm baixo albedo, são bons absorvedores da radiação solar e têm baixa inércia térmica) poderia conduzir a uma variação anômala da temperatura de superfície e

a erros se comparada com o valor real da temperatura da superfície ativa. Voogt e Oke (2003) consideraram que não seria possível extinguir tais erros, contudo estudos de campo poderiam contribuir para a avaliação da sua magnitude e explicação do fenômeno.

Voogt e Oke (2003) entenderam que no início do século XXI as técnicas para correções atmosféricas já estariam estabelecidas na prática do sensoriamento remoto, contudo ainda não estaria definido o papel desempenhado pelas variações espaciais da transmissividade atmosférica sobre as áreas urbanas que poderiam influenciar no registro exato das temperaturas de superfície (efeito da anisotropia¹⁴). Li et al. (2013), no entanto, avaliando a produção científica sobre a temperatura de superfície derivada de satélite, apontaram que o problema da recuperação do dado de temperatura e sua validação ainda não estaria resolvido, especialmente em superfícies heterogêneas e não-isotérmicas, pois não haveria clareza do significado físico da temperatura derivada do satélite. Voogt e Oke (2003), a partir de observações realizadas, apontaram que a anisotropia é maior em áreas residenciais com edificações baixas e muita vegetação, considerando que as causas prováveis para esse efeito estariam associadas aos telhados inclinados e aos padrões de sombreamento criados pelo dossel das árvores.

Voogt e Oke (2003) e Li et al. (2013) concordam que a rugosidade e a heterogeneidade da superfície urbana tornam difícil a determinação da temperatura de superfície por sensor de satélite, confirmando o já exposto por Roth, Oke e Emery (1989), sem grandes avanços em áreas urbanas e que ainda permanece como um desafio nessa área de pesquisa (CHEN et al., 2017).

Krayenhoff e Voogt (2016), procurando avançar em algumas lacunas apontadas nas revisões da literatura de 1989 e 2003, por meio de modelos teóricos representativos de superfícies urbanas e um modelo de sensor remoto termal, fizeram uma avaliação da anisotropia causada pela variação da geometria. Simulações de sensibilidade consideraram a variação de ângulos de elevação do satélite e seis diferentes latitudes. Concluíram que a anisotropia urbana depende fortemente da geometria dos edifícios, em especial da razão entre a altura dos elementos e o espaçamento entre eles, assim como de fatores solares, principalmente da densidade de radiação de ondas curtas. Também apontaram que, comparando diferentes tipos de cobertura do solo – representadas por classes de LCZ – em duas diferentes latitudes (30° e 60°), a forma e a densidade dos edifícios, ou seja, a morfologia urbana, modulam mais fortemente a anisotropia do que as propriedades radiativas e térmicas do material.

¹⁴ Entende-se que uma superfície rugosa não reflete igualmente a energia nela incidente em todas as direções, sendo que vários fatores afetam a distribuição da reflexão (JENSEN, 2011). Assim, há uma dependência entre o ângulo de observação do sensor e a temperatura registrada pelo satélite, além do ângulo de incidência e de azimute solar. A variabilidade do ângulo solar e de visada do sensor torna extremamente difícil a determinação da anisotropia (LORENZZETTI, 2015).

Embora seja um estudo recente, utiliza modelo simplificado de representação urbana, considerando que há uma dificuldade expressiva em avaliar a complexidade da superfície real e extrair conclusões do seu comportamento.

Também é importante ressaltar outras limitações do emprego de imagens de satélite termais em estudos de climatologia urbana quanto à representatividade do dado coletado. A captura de imagens ocorre em uma hora constante do dia, o que restringe a avaliação a um horário que pode não ser o ideal quanto ao ciclo diário de variação da temperatura de superfície. A presença de nuvens, por sua vez, inviabiliza o uso da imagem porque as nuvens impedem que a radiação de onda longa da superfície chegue no sensor. As condições sinóticas antecedentes à captura da imagem também são relevantes nos registros (OKE et al., 2017).

Apesar da falta de exatidão da informação captada pelos sensores remotos e das diversas limitações apontadas, as imagens termais ainda são o único dado disponível de temperatura de superfície para toda a extensão de uma cidade e para todo o território mundial, muitas delas disponíveis em plataformas gratuitas, o que indica que é importante seu emprego para estudos nessa escala a fim de avançar nas lacunas do conhecimento. Além disso, apresenta uma periodicidade de captura que permite uma avaliação contínua do território.

Tendo em vista os benefícios do uso desse tipo de imagem e os avanços no processamento de grande volume de dados, observa-se que há um esforço para a criação de repositórios de dados e de códigos para tratamento e uso das informações por usuários de forma mais ampla. É o caso de códigos criados para utilização no programa Google Earth Engine - GEE (ERMIDA et al., 2020), que permitem a conversão das imagens de satélite Landsat em temperatura de superfície. A plataforma online possibilita a análise de inúmeros dados de sensoriamento remoto sem aumentar a demanda por recursos computacionais, enquanto os códigos desenvolvidos podem ser usados livremente para calcular a temperatura de superfície como parte de qualquer análise dentro do GEE. É nesse sentido que se pretendeu desenvolver a metodologia deste trabalho, de forma a auxiliar e melhorar o processamento de informações disponíveis mundialmente e de livre acesso.

2.2.2. Estudos internacionais sobre temperatura de superfície e diferentes representações da superfície urbana

Os estudos da relação entre a temperatura de superfície e a superfície urbana têm avançado a partir da possibilidade de uso combinado de imagens termais com imagens de satélite de melhor resolução ou outras formas de representação da superfície urbana. A seguir são apresentados alguns trabalhos

desenvolvidos em diferentes tipos climáticos no contexto internacional, a fim de mostrar vantagens e limites de sua aplicação.

Gelectic, Lehnert e Dobrovolný (2016) utilizaram o método de classificação de cobertura do solo LCZ para duas cidades na República Checa (Praga e Brno). Para a definição das classes de LCZ, foi aplicado um algoritmo em plataforma SIG para quantificação dos seguintes parâmetros físicos urbanos, baseado nas definições de Stewart e Oke (2012): fração de superfície construída, fração de superfície permeável, fração de superfície impermeável, altura de elementos de rugosidade, complementado pelo número de edifícios. Os parâmetros foram calculados para uma área equivalente a 100 x 100m. A partir de amostras de áreas, foi feita uma classificação da área de estudo e a imagem classificada foi comparada com as temperaturas de superfície derivadas do satélite Landsat-8 e do sensor ASTER. Análises estatísticas foram feitas para avaliar a relação entre LCZ e a distribuição espacial da temperatura de superfície. Apesar do conceito de LCZ ter sido definido para a classificação de medições de temperatura do ar, observou-se uma relação entre essa classificação de cobertura do solo com a temperatura de superfície. Identificaram que as áreas mais quentes correspondiam à zona industrial, regiões densas com baixos edifícios e edifícios compactos de altura média, enquanto as áreas mais frias eram representadas por corpos d'água e áreas de vegetação densa. Contudo, também apontaram que em algumas classes de cobertura do solo de média e baixa densidade de construção com edificações esparsas, não houve uma clara diferenciação de temperatura. Ou seja, esse método ainda não seria suficiente para representar a complexidade do tecido urbano associada à temperatura de superfície. Outra conclusão extraída do estudo é que as temperaturas de superfície do satélite Landsat diferenciaram-se melhor entre as várias classes de LCZ se comparado com aquelas do sensor ASTER, apesar da resolução da captura das imagens de ambos os satélites ser semelhante.

Xiao et al. (2018), em um estudo comparativo entre as cidades de Viena (Áustria) e Madri (Espanha), verificaram a relação entre a temperatura de superfície e a cobertura do solo. A temperatura de superfície foi extraída de imagens de satélite Landsat 8 (banda 10), em período de verão, enquanto a classificação de cobertura do solo disponível no Atlas Urbano Europeu foi utilizada aplicando-se uma agregação de classes (27 categorias foram transformadas em sete tipos de cobertura, sendo três tipos de áreas urbanas, três tipos de vegetação e uma classe de água). Métodos estatísticos como correlação de *Pearson* e regressão local Loess foram utilizados para quantificação da relação entre as variáveis. Além disso, diferentes escalas de análise, que variaram entre 90 a 990 m em um intervalo de 180 m, foram testadas para verificar em qual delas houve melhor correlação entre as variáveis. Os resultados apontaram baixas correlações entre a temperatura de superfície e a cobertura do solo no caso de Madri e correlações positivas entre temperatura de superfície e classes urbanas em Viena. As melhores correlações ocorreram em diferentes escalas para cada cidade, o que pode indicar uma dificuldade de

aplicação do método e sua baixa capacidade explicativa da relação entre as variáveis, mas demonstra uma tentativa de quantificação dessa relação.

Em uma revisão de trabalhos realizados em cidades do sul da Ásia desde os anos 2000 sobre ilhas de calor urbana (KOTHARKAR; RAMESH; BAGADE, 2018), verificou-se que o uso de imagens de satélite baseado em mapeamento termal foi o método predominante de estudo desse fenômeno climático e vários deles estavam associados a comparações com diferentes tipos de cobertura do solo. O uso de técnicas que envolvem imagens de satélite na maioria dos estudos é atribuído pelos autores pela facilidade de se obter resultados e pela abundância de dados de acesso livre. Essa região da Ásia, em que ocorrem diferentes tipos climáticos (dentre as cidades estudadas estavam aquelas localizadas em clima equatorial, tropical, subtropical, mediterrâneo e semi-árido, considerando a classificação de Köppen), concentra cerca de um quarto da população mundial e é composta por países em desenvolvimento. O número de estudos realizados nessa área ainda é considerado pequeno se comparado aos climas temperados, contudo, pela expressividade de sua população e das condições de urbanização, aponta uma necessidade de maior investimento (ROTH, 2007; OKE et al., 2017) e a tecnologia de sensoriamento remoto seria uma ferramenta de mais fácil implementação e acessível.

Em cidades da África o sensoriamento remoto termal também tem sido utilizado em análises do clima urbano como no Cairo (Egito), para detecção de alterações de cobertura do solo e sua relação com as ilhas de calor urbana (EFFAT; HASSAN, 2014), na região metropolitana de Harare (Zimbabwe), para verificar a alteração de uso e cobertura do solo e avaliar as alterações térmicas de longo prazo (entre 1984 e 2015) a partir da temperatura de brilho derivada de satélite (MUSHORE et al., 2017).

Bechtel (2015), diferentemente dos autores anteriores que realizaram seus estudos em áreas específicas, propôs um método para derivar a temperatura de superfície anual para todo o globo, com base em imagens do satélite MODIS/Terra, de 1 km de resolução espacial. Apesar da resolução espacial ser insuficiente para estudos em micro ou mesoescala, aponta-se uma possibilidade de mapeamento de toda a superfície terrestre quanto a sua característica térmica e a atualização constante das informações em uma escala global.

Cai et al. (2018), a partir de uma análise estatística utilizando modelos de regressão linear simples e múltipla, verificaram a relação entre a forma urbana e a temperatura de superfície em uma área urbana sob a influência de corpos d'água na cidade chinesa de Chongqing. A temperatura de superfície foi derivada de imagem do satélite Landsat 8 em período de verão, a qual foi correlacionada com quatro fatores da forma urbana (fator de visão do céu, densidade construída, média de altura das edificações e razão de área dos pavimentos dos edifícios) e com a distância em relação aos corpos d'água. Uma contribuição desse estudo que pode ser relevante para a presente pesquisa é a aplicação

de vários métodos estatísticos para explicação da relação entre a temperatura de superfície e os parâmetros descritos da forma urbana¹⁵, além da restrição da sua influência dos corpos d'água a um raio inferior a 1 km.

Alguns dos estudos mencionados acima utilizam-se de classificação de cobertura do solo para fazer relações com a temperatura de superfície. Esse tipo de classificação, apesar de em alguns casos utilizar parâmetros quantitativos para a sua estimativa, é resultado de uma representação qualitativa da superfície urbana. Voogt e Oke (2003) consideraram que descritores mais fundamentais da superfície (parâmetros quantitativos) seriam mais adequados para a sua representação. Assim, mostra-se necessário avançar na integração do sensoriamento remoto com a descrição quantitativa da superfície urbana na tentativa de se obter melhores relações entre essas variáveis. Uma possibilidade para o avanço nessa abordagem combinada seria por meio da parametrização de elementos da superfície urbana em uma menor escala para ser aplicada em análises de variáveis do sensoriamento remoto observadas em uma resolução inferior, de menor detalhamento (VOOGT; OKE, 2003). A dificuldade está na transição entre as escalas, o que deve ser considerado do ponto de vista climatológico. Trabalhos que tratam da descrição da superfície serão tratados em capítulo subsequente.

2.2.3. Estudos de caso da temperatura de superfície no Brasil

Este capítulo apresenta algumas pesquisas realizadas no Brasil com a utilização de imagens termais em estudos do clima urbano. Não se pretende aqui um levantamento histórico do que foi realizado, mas uma contextualização da temática no país e um foco maior em pesquisas mais recentes.

O primeiro estudo que utilizou imagem de sensor remoto termal aplicado ao estudo de ilha de calor urbana foi realizado por Lombardo (1985), na cidade de São Paulo (SP). É um dos 12 trabalhos pioneiros no mundo naquele período, citado por Roth, Oke e Emery (1989) em sua revisão sobre essa temática. A autora utilizou imagem termal do satélite meteorológico NOAA-6 para derivar a temperatura de superfície da cidade. A resolução espacial das imagens do satélite era de 1,1 km, o que propiciou pouco detalhamento da área de estudo. As imagens termais foram integradas a mapa de tipos de uso do solo e confrontados com dados de temperatura do ar, temperatura radiométrica, umidade relativa e velocidade do vento medidos em campo. As imagens foram capturadas em período de estabilidade atmosférica, caracterizada por céu claro, ausência de nebulosidade e baixo teor de vapor d'água (meses de junho a setembro de 1982). O mapa dos tipos de usos do solo foi elaborado por meio de

¹⁵ Outros trabalhos que se utilizam de métodos estatísticos para avaliar a relação entre variáveis serão descritos em capítulo a seguir, com enfoque em estatística espacial.

classificação de imagem do satélite Landsat 3 utilizando-se o método Máxima Verossimilhança. Áreas amostrais da cidade foram selecionadas para analisar a relação entre classes de uso do solo e a emissividade. Esses métodos e técnicas foram integrados para a compreensão da dinâmica do fenômeno da ilha de calor e na avaliação da contribuição dos diferentes usos do solo nas variações de temperatura.

A autora produziu outros trabalhos semelhantes para a cidade de São Paulo (SP), mas sem grandes avanços metodológicos em relação ao seu primeiro estudo. Um deles utilizou imagem do satélite Landsat 7 para avaliar ilhas de calor e mudanças climáticas, comparada com classificação de uso e ocupação do solo da cidade (LOMBARDO, 2011). A imagem do canal termal (banda 6, resolução espacial de 60 m), foi tratada no programa Spring pela transformação do sinal em radiância e posteriormente em temperatura, aplicando-se as equações descritas no manual para usuários do satélite Landsat 7. Não houve correção atmosférica no caso da imagem termal. As condições meteorológicas do dia de coleta da imagem (dia 25/05/2003) eram de estabilidade atmosférica, céu sem nebulosidade e a circulação atmosférica em mesoescala dominada pela massa de ar polar atlântica (mPa). Observou-se que as temperaturas tiveram variação com o tipo de cobertura do solo sendo que em áreas de vegetação densa (florestas) a temperatura chegava a 16°C, no centro de São Paulo atingia até 28°C, ou seja, observou-se uma amplitude de cerca de 12°C entre áreas densamente vegetadas e urbanizadas.

Para a cidade de Belo Horizonte, ainda no final do século XX, estudo realizado por Assis (1990), seguindo um pouco a metodologia da pesquisa realizada em São Paulo (LOMBARDO, 1985), também realizou análise de imagens termais para verificação da relação entre as áreas construídas e as áreas verdes urbanas, apesar de todas as limitações de recursos tecnológicos do período. Utilizou imagens termais do Landsat 5 de um dia típico (ou crítico) de verão e um dia típico de inverno, selecionados a partir de uma série histórica de dados meteorológicos de cinco anos, considerando a análise de dados de temperatura do ar. Também foram verificadas as condições meteorológicas do dia da captura das imagens e dos dias anteriores quanto à ocorrência de chuva e nebulosidade. As áreas construídas foram representadas por classes de uso e ocupação do solo (centro comercial, área de uso misto verticalizada, área residencial horizontal, vegetação rasteira, vegetação arbórea), resultantes de classificação de imagens de satélite pelo método de Máxima Verossimilhança. Para verificar a vegetação, aplicou-se uma combinação das bandas 3 e 4 das imagens, obtendo-se um índice de vegetação. No caso desse estudo, não houve uma transformação do sinal do satélite (pixels com valores entre 0 e 255, representando a radiância) em temperatura de superfície, mas sim uma interpretação do resultado do processamento das imagens e da reflectância dos materiais. Identificou-se um pequeno núcleo de ilha de calor próximo ao aeroporto da cidade (Pampulha), um núcleo

principal sobre as áreas de uso misto verticalizada com baixa cobertura vegetal e sobre as áreas densas de ocupação horizontal, também com pouca vegetação. Observou ainda que áreas verticalizadas do centro urbano, onde ocorrem as máximas noturnas de temperatura do ar, não estavam entre as regiões mais quentes pela manhã (horário da passagem do satélite), o que indica a variação do comportamento da ilha de calor durante o dia (Figura 5).

Nascimento e Oliveira (2011) fizeram um estudo da evolução das ilhas de calor na cidade de Goiânia (GO) no período de 1986 a 2010. Utilizaram imagens termais do satélite Landsat 5 (banda 6, resolução espacial de 120 m), representativas de um dia dos anos de 1986, 1996, 2006 e 2010, extraídas nos meses de maio, com exceção da última que foi tirada em março. As condições meteorológicas eram de ventos calmos, sem precipitação e com temperaturas do ar semelhantes entre as diferentes datas, de acordo com os registros da estação meteorológica local. O tratamento das imagens foi feito no programa IDRISI. O trabalho comparou a evolução das faixas de temperatura de superfície nos diferentes anos simplesmente extraíndo relações diretas entre a porcentagem de área correspondente às faixas de temperatura estabelecidas pelos autores e por uma comparação visual das imagens. A intensidade da ilha de calor, representada pela diferença entre o maior e o menor valor de T_s , registrado, teve aumento significativo nos anos: em 1986 foi de 10°C e em 2010 foi de 17°C, contudo em todos os anos os menores valores de T_s foram iguais a 19°C e apenas o valor máximo de temperatura teve variação nas datas analisadas.

Outro estudo que vai ao encontro dos anteriores, conduzido na cidade de Presidente Prudente (SP), avaliou a intensidade da ilha de calor (UHI_{Sur}) entre fevereiro de 2013 e janeiro de 2016 e comparou resultados para períodos secos e períodos chuvosos (AMORIM, 2018). Foram analisadas 24 imagens do satélite Landsat 8 em condição de céu claro. Um diferencial nesse estudo com relação a determinação da intensidade de T_s , é que se utilizou um ponto de referência em área densamente vegetada para cálculo de ΔT_s . Para verificação da relação com a cobertura do solo, selecionou-se 26 pontos em áreas urbanas e rurais por meio de análise qualitativa de densidade de edificações e árvores, tipos de telhado, altitude e localização no contexto urbano. A identificação de período seco ou úmido partiu da avaliação da precipitação nos 30 dias anteriores à captura da imagem e por mapas de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) identificou-se a densidade de vegetação. Como resultados, verificou-se que as áreas rurais tiveram menores intensidades de UHI_{Sur} , variando majoritariamente entre 2°C e 4°C, contudo variações entre 0°C e 8°C foram observadas em pontos representativos de áreas rurais. Os pontos em bairros de habitação social periférica, com lotes pequenos e densamente construídos, apresentaram as maiores temperaturas dentre os demais, apesar de apresentarem vegetação nas calçadas e interior dos lotes, provavelmente por causa dos tipos de material dos telhados (maior contribuição do albedo e da emissividade dos materiais em T_s).

Nos períodos úmidos foram identificadas as maiores intensidades de UHI_{sur} ; nos períodos secos, por sua vez, a intensidade foi menor em relação às áreas rurais, mas as diferenças intraurbanas aumentaram.

É preciso ressaltar que os estudos que utilizam de imagens de satélite se restringem a investigações de registros de T_s em um horário específico, que no caso do Brasil ocorre pela manhã para o satélite Landsat, não sendo possível avaliar o ciclo diário em que a ilha de calor se desenvolve (OKE et al., 2017). Nesse horário, a intensidade da ilha de calor é menor se comparada a outras horas do dia e T_s sofre influência de sombreamento das superfícies (Figura 5c).

Em outro estudo, com foco na cidade de Vitória (ES), Coelho e Correa (2013) utilizaram imagem do satélite Landsat 8 relacionando a temperatura de superfície com uma classificação de cobertura do solo e com a topografia. A imagem da banda 10 do dia 04/08/2013 foi convertida no programa ArcGIS a partir das equações do manual do Landsat 8. De acordo com os autores, a validação da temperatura de superfície foi feita a partir do registro da temperatura do ar da estação meteorológica local¹⁶. Constatou-se que a variação da cobertura do solo e a inclinação da vertente (fator topográfico), influenciaram na variação da temperatura de superfície. Essa análise foi feita visualmente e por estatística básica de faixas de temperatura por tipo de cobertura do solo, semelhante ao método utilizado por Nascimento e Oliveira (2011).

Santos et al. (2017b) avaliaram a relação entre a cobertura do solo composta por vegetação e a temperatura de superfície derivada do satélite Landsat 8 (banda 10) para a cidade de Salvador (BA) no período de março a outubro de 2016. Para a seleção das imagens termais, o único critério descrito era a restrição quanto à quantidade de nuvens (cobertura de 10 a 20%), sendo escolhidas quatro cenas para análise. As imagens selecionadas foram processadas no programa QGIS para conversão do número digital da imagem em valores de temperatura. Foi feita uma comparação entre temperatura de superfície e tipos de cobertura do solo em 15 pontos amostrais onde havia variação do tipo de cobertura vegetal, as quais foram categorizadas em três classes, além das classes área urbana e água. A comparação entre as cenas foi realizada apenas por uma comparação entre os valores calculados de temperatura de superfície para cada ponto amostral, indicando que áreas de parques cobertas por vegetação tiveram registros de menores valores de temperatura de superfície em todas as imagens analisadas.

¹⁶ Os autores destacam que há uma diferença entre a temperatura de superfície e a temperatura do ar, que já é apontada na bibliografia. Contudo, informam que essa diferença não interfere nos resultados, pois a temperatura registrada pelo satélite é diferente da temperatura do ar. Ou seja, a validação do tratamento da temperatura de superfície pela temperatura do ar não ocorreu efetivamente.

Pinto et al. (2016) fizeram um estudo comparativo entre temperatura de superfície derivada do satélite Landsat 5 (banda 6) e dados de temperatura do ar coletados em campo em Belo Horizonte (MG) no ano de 2008. A temperatura de superfície foi convertida utilizando o programa IDRISI. Os dados de campo utilizados para o estudo comparativo corresponderam ao dia 27/08/2008, mesmo dia da aquisição da imagem de satélite. Esse dia caracterizou-se por condição de céu claro, ventos fracos e tempo estável. Foi feita uma interpolação dos dados coletados em pontos amostrais entre 12h e 15h para se extrair o que seria o valor correspondente à temperatura do ar no momento da passagem do satélite. Os dados de temperatura do ar foram então interpolados para toda a área do município por meio do método de krigagem ordinária. Realizou-se uma análise estatística dos resultados e os autores concluíram que houve erro médio relativo entre as temperaturas do ar e de superfície entre 34 e 27%. Algumas considerações sobre esse estudo parecem ser relevantes: como observado no item de revisão bibliográfica não há uma relação direta entre temperatura do ar e temperatura de superfície derivada de sensor remoto (ROTH; OKE; EMERY, 1989). Assim, o estudo comparativo realizado por Pinto et al. (2016) parece não se atentar à climatologia do fenômeno atmosférico e ao significado da temperatura registrada pelo satélite, incorrendo em erro quando impõe uma comparação de variáveis que não podem ser diretamente associadas. Contudo, mostra-se importante a análise desse estudo enquanto um exemplo do tipo de metodologia já aplicada para a cidade de Belo Horizonte, com suas limitações e incoerências, mas também para apontar como esse campo de estudo está sendo conduzido por pesquisadores da área da geografia.

Santos et. al. (2017a), em estudo sobre a distribuição espacial e temporal da ilha de calor urbana na cidade de Vila Velha (ES), utilizaram 16 imagens do satélite Landsat 5 (banda 6) captadas no período entre 2008 e 2011 em diferentes estações do ano e sem interferência de nuvens. A temperatura de superfície (T_s) foi obtida das imagens de satélite a partir da aplicação do algoritmo *mono-window*, que corrige efeitos referentes a emissividade das superfícies, a transmitância da atmosfera devido ao vapor d'água e a radiação térmica da atmosfera. Também calcularam um índice de diferença normalizada de área construída, utilizado para identificar áreas urbanas e construídas, índice esse que foi correlacionado com a temperatura de superfície (coeficiente de correlação de *Pearson*), além de identificar áreas verdes a partir de fotointerpretação de imagens do satélite GeoEye. Observou-se uma significativa flutuação anual e mensal da temperatura de superfície na cidade. Em termos de valores médios de T_s , as menores diferenças entre áreas urbanas e não urbanizadas ocorreram durante o verão (2,34°C), enquanto as maiores diferenças ocorreram no outono (7,19°C). Os menores valores de temperatura tiveram uma relação direta com a vegetação nas áreas metropolitanas, contudo não houve diferenças significativas de temperatura entre as áreas urbanas e rurais. Diferentemente dos trabalhos brasileiros citados anteriormente, este utiliza dados de diferentes anos e em diferentes

estações do ano, aplica métodos de correção atmosférica das imagens, aponta a variabilidade do comportamento da T_s , mas também verifica sua relação estatística com a presença de áreas verdes e com a diferença de ocupação urbano x rural.

Em direção semelhante de investigação, Peres et al. (2018) estudaram o efeito da ilha de calor urbana na área metropolitana do Rio de Janeiro (RJ) por um período de 32 anos entre os anos de 1984 e 2015. A partir de imagens TM dos satélites Landsat 5, 7 e 8, usadas para identificar os padrões de cobertura do solo (urbano, rural/urbano de baixa densidade, vegetação, corpos d'água), e das bandas termiais (TIRS) para derivar a temperatura de superfície, os autores fizeram comparação das médias dos valores de T_s compostas pelos períodos de 1984 a 1999 e 2000 a 2015, sem distinção da sazonalidade das imagens, pois não havia número de imagens com qualidade suficiente (condição de céu claro) para esse tipo de agrupamento. As imagens termiais foram tratadas pelo algoritmo *single-channel*, que considerou a influência atmosférica e de emissividade da superfície. Os métodos estatísticos utilizados foram o teste t de Student (paramétrico) e o teste U de Mann-Whitney (não paramétrico), os quais mostraram a existência de diferentes áreas onde T_s é menor para o período de 1984-1999 do que para o período de 2000-2015. A diferença de médias de T_s entre áreas urbanas e vegetadas variou entre 5,1°C e 7,1°C entre esses períodos, enquanto a diferença entre áreas urbanas e de baixa densidade foi de 3,3°C e 4,4°C, respectivamente. Também observaram que os mapas de cobertura do solo são essenciais para confirmar o efeito da urbanização na T_s . Apontaram uma diferença quanto as áreas de subúrbio da área metropolitana do Rio de Janeiro. Devido a sua condição quanto ao tipo de ocupação – áreas densamente povoadas, com moradias precárias, como as favelas –, em oposição ao que ocorre nos subúrbios norte-americanos, por exemplo – definidos como locais de menor adensamento urbano e com maiores extensões de áreas verdes (ARNFIELD, 2003) –, registraram valores altos de temperatura e, em alguns casos, maiores que a área central.

Também em uma avaliação temporal (período de 2002 a 2017) da temperatura de superfície para a Região Metropolitana de São Paulo, avaliando imagens termiais diurnas e noturnas do satélite *Aqua-MODIS* (resolução espacial de 1km), Ferreira (2019) verificou a relação dessa variável com a vegetação e a morfologia urbana. As imagens de satélite foram agrupadas por estação seca e chuvosa, correspondentes respectivamente a primavera-verão e outono-inverno. A morfologia urbana foi representada por classes de LCZ, com classificações elaboradas para os anos de 2003, 2010 e 2017 e a vegetação representada por índices de vegetação (NDVI e EVI – *Enhanced Vegetation Index*). Dentre as várias relações obtidas entre essas variáveis, observou-se que nas imagens diurnas, a maior variação de T_s ocorreu nas estações chuvosas (22°C a 43°C), enquanto nas estações secas essa variação ficou entre 18°C e 34°C. As áreas urbanas verticalizadas apresentaram T_s inferior às áreas com tipologia de edificação horizontal, compacta e com pouca cobertura vegetal, o que indica a influência do

sombreamento dos edifícios nos padrões diurnos de T_s . Além disso, a correlação entre T_s e os índices de vegetação foi alto e negativo em todo o período analisado. Esse é o único trabalho apresentado neste capítulo que utilizou imagem de satélite diferente do Landsat, mas mostrou-se relevante por ser uma pesquisa recente, realizada no campo da arquitetura, diferentemente de outros que envolveram outras áreas de conhecimento.

Este capítulo pretendeu mostrar alguns estudos realizados no Brasil que forneceram suporte ao desenvolvimento do processo metodológico da pesquisa. O foco em casos brasileiros se deve à condição climática do país, predominantemente localizado em clima tropical, o que o difere de estudos realizados em maior número no hemisfério norte. O contexto climático poderia ter reflexos, por exemplo, na sazonalidade e na escolha das imagens termais, o que é apontado por Assis (1990), Santos et. al. (2017a) e Ferreira (2019), por exemplo. O tipo de ocupação urbana é outro fator que diferencia o território brasileiro e de outros países em desenvolvimento de localidades citadas em capítulo anterior. Assim, considera-se que a descrição da superfície urbana e as condições atmosféricas são importantes fatores a serem considerados para a análise das imagens termais no âmbito do clima urbano.

2.3. Métodos de descrição e análise de parâmetros utilizando plataformas SIG

O estudo das variáveis proposto neste trabalho tem como suporte para o tratamento e a análise de dados a aplicação de ferramentas de sistema de informação geográfica (SIG). Neste sentido, o que se pretende neste item é identificar e analisar trabalhos que foram desenvolvidos utilizando programas computacionais do tipo SIG, quais suas vantagens e limites e como podemos avançar para atingir o objetivo da tese. Este item está subdividido em outros dois conforme as ferramentas a serem implementadas e as fases do trabalho a que se relacionam, quais sejam, a descrição da superfície urbana e os métodos estatísticos.

2.3.1. Descrição da superfície urbana

A análise de estudos que abordam a descrição da superfície urbana tridimensional em plataformas SIG será tratada sob alguns aspectos como: o tipo de base de dados utilizada (vetorial ou raster), o programa utilizado, os parâmetros urbanos calculados, a escala de representação dos resultados (lote, quadra, pontos, resolução do raster) e se a área urbana utilizada é real ou um modelo teórico, os quais estão sintetizados na Tabela 2.

Tabela 2: Estudos que apresentam métodos de cálculo de parâmetros de superfície urbana em modelo SIG

Autor(es), ano	Cidade, País	Base de dados	Parâmetros de superfície urbana	SIG	Modelo utilizado	Representação dos resultados
(GÁL; UNGER, 2009)	Szeged	vetor	altura média dos edifícios razão entre altura e volume dos edifícios razões de área (λ_p , λ_f) parâmetros de rugosidade (z_0 , z_d) porosidade urbana	ArcGIS (ArcView 3.2)	cidade real	polígonos de lotes
(BURGHARDT, 2014)	Cidades alemãs	vetor	volume dos edifícios altura média dos edifícios razões de área (λ_p , λ_f) parâmetros de rugosidade (z_0 , z_d) porosidade urbana	ArcGIS (plugin)	cidade real	polígonos de lotes e pontos (volume de edificação)
(XU et al., 2017)	Hong Kong	vetor / raster	altura dos edifícios densidade de volume construído razão de cobertura das edificações índice de área frontal índice da área frontal fator de visão do céu (SVF) comprimento da rugosidade	ArcGIS	cidade real	raster (resolução de 100, 200, 300, 400, 500 e 600 m)
(DARMANTO; VARQUEZ; KANDA, 2017)	Tóquio, Japão Jacarta, Indonésia Istambul, Turquia	vetor / raster	altura média dos edifícios altura máxima do elemento dos edifícios desvio padrão de altura dos edifícios razões de área (λ_p , λ_f)	QGISs	cidade real	raster (resolução de 1 km)
(NAKATA-OSAKI; SOUZA; RODRIGUES, 2018)	São José do Rio Preto e Bauru, Brasil	vetor	altura média dos edifícios área média ocupada por cada edifício áreas médias de fachada voltadas para a rua razão H/W	ArcGIS (plugin)	modelo teórico	pontos distribuídos ao longo de eixos de rua
(LINDBERG et al., 2018)	Vários	raster	altura média dos edifícios razão H/W razões de área (λ_p , λ_f) parâmetros de rugosidade (z_0 , z_d) fator de visão do céu (SVF)	QGIS (plugin)	cidade real	raster (resolução pode variar)

A escolha desses itens para avaliação refere-se à aplicabilidade dos modelos de cálculo, suas limitações quanto aos dados utilizados e aos resultados obtidos, considerando que os estudos foram feitos para outras finalidades que não a comparação com os dados de temperatura de superfície.

Entende-se que a plataforma SIG permite a representação com precisão dos elementos urbanos construídos. Assim, seria possível calcular os parâmetros que definiriam a superfície urbana ativa, composta por planos verticais e horizontais. Como os trabalhos nessa área envolvem utilização de programas e tecnologias digitais que se desenvolvem rapidamente, buscou-se fazer um apanhado de estudos mais recentes, mas trazendo também aqueles que parecem ser pioneiros e que ainda são a base de pesquisas atuais.

Vários desses estudos foram desenvolvidos para fins de cálculo de parâmetros de rugosidade da superfície, os quais requerem uma estimativa de áreas de superfícies horizontais e, algumas vezes, planos verticais, para derivação da parcela de área que poderia influenciar no deslocamento de ar em recintos urbanos. É o caso, por exemplo, do estudo de Gál e Unger (2009), realizado para a cidade de Szeged, na Hungria, em que determinaram parâmetros de rugosidade da superfície a partir de uma base de dados vetorial com os polígonos das edificações existentes e dos lotes utilizando o programa ArcView 3.2. As variáveis calculadas foram: altura média e volume dos edifícios, razões de área (A_p , A_f , A_T , λ_p , λ_f), dentre outros parâmetros específicos da rugosidade urbana relacionadas ao fluxo dos ventos. Os parâmetros, determinados a partir de uma razão em relação à área total A_T , foram estimados considerando A_T como a área de um polígono que poderia conter mais de uma edificação. Dessa forma, o dado final obtido refere-se a uma relação de áreas considerando a unidade mínima de análise uma área de um lote, mas que não tinha um tamanho constante.

Burghardt (2014) desenvolveu uma extensão do programa ArcGIS para modelar os fatores urbanos que influenciam o clima das cidades, de forma a facilitar a construção de mapas climáticos urbanos e possibilitar a comparabilidade do método entre diferentes cidades. Utilizou uma base de dados vetorial disponível para cidades europeias como dado de entrada para os cálculos. Algumas das variáveis para descrever a superfície urbana foram o volume e altura média dos edifícios, além de parâmetros de rugosidade urbana (A_p , A_f , A_T , λ_p , λ_f). As rotinas de cálculo foram desenvolvidas com base no trabalho de Gál e Unger (2009), mas com o diferencial de utilização de uma versão mais recente do programa ArcGIS e implementando a função *ModelBuilder*¹⁷. Os resultados dos parâmetros de rugosidade foram estimados para a área de um lote, enquanto o volume dos edifícios foi estimado

¹⁷ Esta função permite criar rotinas e fluxos de trabalho por meio de um modelo que integra uma sequência de ferramentas no programa ArcGIS.

por pontos representativos destes edifícios e por análises estatísticas (Kernel) para melhor representatividade dos dados¹⁸.

Xu et al. (2017), a partir de estudo de caso na Península de Kowloon (Hong Kong), desenvolveram um método para a detecção de informações tridimensionais da morfologia urbana (área da edificação e altura) utilizando imagens de satélite de alta resolução e validando com base de dados vetoriais existente. Os parâmetros urbanos calculados pelos dois métodos (vetorial e raster) foram¹⁹: altura das edificações, densidade de volume construído de edificações, razão de cobertura das edificações (o que se aproxima do conceito de λ_p), índice de área frontal (semelhante a λ_f) e outros parâmetros de rugosidade. A área dos lotes estipulada para o cálculo correspondeu a quadrados de 100, 200, 300, 400, 500 e 600 metros de face, o que corresponde a diferentes resoluções de matriz de um raster. Assim, esse estudo diferencia-se dos demais tanto na forma de extrair os dados vetoriais a partir de imagens de satélite – o que é de grande valia quando não há uma base de dados vetorial para a área de estudo –, nas equações aplicadas e no tipo de dado resultante, que é uma matriz e não mais um vetor. Uma das conclusões extraídas é de que resoluções espaciais entre 200 e 300 m seriam recomendadas para a geração de parâmetros morfológicos. Contudo, também concluiu que a extração de dados por satélite tende a subestimar a área das construções em áreas urbanas de alta densidade e superestima a altura de edificações baixas, o que pode levar a incertezas na estimativa de algumas variáveis em áreas de alta densidade.

Darmanto et al. (2017) desenvolveram um método para estimar os parâmetros da rugosidade urbana a partir de dados de satélite disponíveis globalmente, a fim de utilizá-los para acoplamento em modelos de mesoescala. Imagens dos satélites Landsat 8 e ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), modelo global de elevação (*Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 - GMTED2010*) e de luz noturna (*DMSP Operational Linescan System*) foram utilizados para calcular índices de área de parâmetros da superfície urbana (λ_p e λ_f) e variáveis associadas à altura dos edifícios, aplicando equações empíricas derivadas de ajustes lineares, cujos resultados foram comparados com valores reais. Os parâmetros de áreas planas foram calculados e derivados das imagens para as cidades de Istambul (Turquia), Tóquio (Japão) e Jakarta (Indonésia) com uma resolução de 1 km. Já o cálculo de altura dos edifícios e sua estimativa a partir de imagens ASTER e de luz noturna foram feitos para as cidades de Tóquio e Nagoya, também com resolução de 1 km, e

¹⁸ O autor aponta que outra possibilidade de cálculo do volume dos edifícios seria pela aplicação de uma grade de cálculo (grid) que corresponderia a toda a área de estudo. Contudo, essa grade resultava em uma divisão dos edifícios e uma subestimação do seu volume, perdendo sua relação com a realidade.

¹⁹ O artigo original apresenta as equações aplicadas para cada parâmetro, sendo que os conceitos e denominações utilizados pelos autores diferenciam-se dos aplicados por outros estudos aqui apresentados.

posteriormente o modelo de cálculo foi aplicado em Jakarta. As estimativas de áreas planas tiveram uma boa correlação com os dados derivados de imagens de satélite para todas as cidades, contudo, quanto à altura dos edifícios, detectou-se valores superestimados para áreas com muitos edifícios altos (altura média $\geq 30\text{m}$) na cidade de Tóquio. Concluiu-se que os parâmetros estimados pelo método proposto poderiam ser utilizados em modelos de mesoescala em substituição às informações reais, que muitas vezes não estão disponíveis.

Enquanto o método de Xu et al. (2017) resultou em valores superestimados para a altura de edificações baixas, o modelo de Darmanto et al. (2017) superestima valores para áreas de edifícios altos, o que pode apontar que ainda é imprecisa a derivação de valores de altura de edifícios por imagens de satélite. A utilização de dados vetoriais, neste caso, ainda se mostra uma ferramenta mais precisa de cálculo dos parâmetros das superfícies urbanas, contudo é preciso atenção para a relação com a área total do terreno que é adotada nos cálculos.

Nakata-Osaki, Souza e Rodrigues (2018), com enfoque diferente dos trabalhos citados anteriormente, mas com uma proposta de avaliação da geometria urbana para cálculo da intensidade da ilha de calor urbana, realizaram um estudo comparativo de duas cidades brasileiras utilizando modelo teórico de áreas urbanas a partir da implementação de uma extensão no programa ArcGIS. Para isso, definiu-se um método de cálculo de parâmetros urbanos a partir de dados vetoriais capaz de calcular a altura média dos edifícios em uma quadra, a área média ocupada por cada edifício em uma quadra, as áreas médias de fachada voltadas para a rua, a razão H/W, dentre outros. Os resultados dos cálculos foram registrados em pontos de eixos paralelos às quadras. Essa é uma limitação do método, pois os cálculos dos parâmetros estão associados a eixos, o que altera a espacialidade da informação.

Lindberg et al. (2018), por sua vez, desenvolveram na plataforma QGIS uma ferramenta de clima para cidades que combina modelos para simulações climáticas (plug-in UMEP). Esse modelo, por ter código aberto, permite atualizações constantes. Dentre os parâmetros urbanos calculados pelo programa em sua ferramenta de pré-processamento de dados de superfície estão: altura média dos edifícios, H/W, λ_p , λ_f . Os dados de entrada utilizados são modelos de terreno e modelos de elevação das edificações em formato raster, mesmo formato dos dados de saída. A vantagem do método é sua disponibilidade em plataforma livre, o que o diferencia de todos os demais trabalhos até então citados nesta seção. No entanto, a entrada e saída de dados em formato raster pode ser um fator limitador para sua aplicação, já que o dado raster, dependendo do tamanho do pixel, não representa as estruturas urbanas com a acurácia da representação do dado vetorial. Além disso, quanto maior a resolução da imagem raster (menor o tamanho do pixel), maior poder de processamento computacional seria necessário para o cálculo dos parâmetros.

Esses estudos demonstram uma diversidade de métodos de cálculo de parâmetros da superfície urbana desenvolvidos para diferentes aplicações. Verifica-se que a nomenclatura dos parâmetros (Tabela 1) e até mesmo os métodos de cálculo que parecem estar estabelecidos na literatura (como os parâmetros de rugosidade), são objeto de novas formas de derivação em plataformas SIG. A representação dos resultados é outro ponto a ser mencionado. Alguns estudos consideraram os lotes como referência da unidade individual para fazer os cálculos, e em outros o resultado é em um formato de grade. Nos métodos com representação de lotes (GÁL; UNGER, 2009; BURGHARDT, 2014), não é possível comparar os resultados de cálculo entre diferentes áreas de estudo, visto que há variação da área de referência utilizada. Os resultados como uma matriz que tem valor fixo para a área de referência permitem a comparabilidade entre os resultados e a variação da resolução espacial. A variação do tamanho da matriz permite uma diversidade de aplicações de resultados, a sua associação com a escala espacial dos fenômenos físicos investigados e pode ser adequada para os dados de entrada necessários de cada modelo climático ou meteorológico.

A partir dos estudos apresentados e das considerações apontadas, nota-se que a representação da superfície urbana ainda é um campo aberto a investigações. Isso porque as tecnologias estão em constante alteração, mas também os modelos existentes muitas vezes não se adequam à diversidade de estudos do clima urbano e à heterogeneidade da forma urbana das cidades reais. Os programas computacionais do tipo SIG são importantes ferramentas nesse campo de estudo. Assim como podem ser utilizados para a representação da superfície, também possuem algoritmos que possibilitam a investigação de relações estatísticas entre variáveis considerando a especialidade dos fenômenos, o que será discutido a seguir.

2.3.2. Métodos estatísticos e análise espacial

A investigação da relação entre a superfície urbana e a temperatura de superfície pode ser realizada por meio da aplicação de métodos estatísticos, os quais buscam extrair uma relação quantitativa entre as variáveis. Partindo-se do entendimento de que esses parâmetros têm grande variação no espaço que compreende uma cidade, parece pertinente que a compreensão dessa relação considere a distribuição e a localização espacial das variáveis. As análises espaciais podem ser realizadas em plataformas SIG, as quais tem grande capacidade de processamento de dados. Para melhor contextualização desses métodos estatísticos, a seguir são apresentados alguns conceitos e relações com a estatística não espacial e, em seguida, serão analisados trabalhos que empregaram diferentes métodos estatísticos para análise de variáveis urbanas e climáticas.

Métodos de estatística tradicional (não espacial) e espacial podem ser aplicados na tentativa de explicação da relação entre os parâmetros, sendo que os primeiros são majoritariamente usados em estudos que relacionam variáveis climáticas e a superfície urbana. Contudo, apenas quando há pouca ou nenhuma variação nas observações locais é que as observações não espaciais ou globais fornecem informações confiáveis sobre áreas específicas dentro de uma região de estudo. Conforme a variação espacial das observações locais aumenta, a confiabilidade da observação global como representativa das condições locais diminui (FOTHERINGHAM; BRUNSDON; CHARLTON, 2002).

A análise espacial de dados é uma das técnicas que se pode aplicar para entender a relação entre variáveis com distribuição espacial distinta. Esse tipo de análise tem como foco a mensuração de propriedades das variáveis e seus relacionamentos considerando a localização espacial do fenômeno de forma explícita (CÂMARA et al., 2004a). A estatística espacial, que é o conjunto de métodos que possibilita esse tipo de análise, tem a vantagem de poder apontar relações que ocorrem em diferentes regiões do espaço, enquanto a estatística global ou não espacial retorna um valor único para todo o conjunto de dados. Neste sentido, a estatística espacial pode ser útil na verificação de exceções, com ênfase no desenvolvimento de hipóteses a partir dos dados, em oposição aos tipos de análise confirmatórios mais tradicionais, em que os dados são usados para testar hipóteses já determinadas (FOTHERINGHAM; BRUNSDON; CHARLTON, 2002). A estatística espacial, portanto, pode ser mais eficiente na explicação de fenômenos que são não estacionários e dependentes de escala de análise do que as análises globais e não espaciais (FOTHERINGHAM; BRUNSDON; CHARLTON, 2002; LI et al., 2010; ZHAO; REN; TAN, 2018).

Um conceito importante na análise de dados espaciais é a dependência espacial. Parte-se da premissa de que a maior parte das ocorrências, sejam elas naturais ou sociais, está relacionada entre si, mas que elementos mais próximos possuem relação mais forte. A autocorrelação espacial expressa esse conceito, sendo que valores significativos de índices de autocorrelação espacial evidenciam a dependência espacial do fenômeno. Nesses casos, demonstra-se que modelos de inferência estatística, que tem como objetivo fazer afirmações para uma população a partir de uma amostra, não são válidos ou são pouco eficientes, devendo-se considerar o espaço nas formulações de hipóteses (CÂMARA et al., 2004a).

Estatísticas globais e locais podem ser úteis para testar hipóteses em que a estatística tradicional não é eficiente e para medir o grau de autocorrelação espacial. Quando se verifica um forte padrão espacial global (alta correlação espacial), há uma tendência de que valores altos estejam próximos uns dos outros assim como valores baixos tendem a estar próximos (ROGERSON, 2012). Os índices locais, então, podem ser utilizados para esse teste de hipótese.

Um indicador local de associação espacial (*local indicator of spatial association* - LISA) pode ser definido como qualquer estatística que satisfaça a dois requisitos: a) o LISA para cada observação dá uma indicação da extensão do agrupamento espacial significativo de valores semelhantes em torno dessa observação; b) a soma de LISAs para todas as observações é proporcional a um indicador global de associação espacial (ANSELIN, 1995).

Outro método de análise de dados espaciais é por um modelo de regressão. Diferentemente da correlação, utilizada para medir a força da associação linear entre as variáveis, o modelo de regressão avalia o relacionamento entre uma variável dependente e um conjunto de variáveis explicativas, com o objetivo de quantificar a relação linear entre essas variáveis (CÂMARA et al., 2004b; ROGERSON, 2012). A aplicação de um método de regressão tem como pressuposto alcançar dois objetivos: encontrar um bom ajuste entre os valores preditos pelo modelo e os valores observados da variável dependente; descobrir quais das variáveis explicativas contribuem de forma significativa para o relacionamento linear entre as variáveis (CÂMARA et al., 2004b).

Para a análise de dados espaciais, assim como para outros modelos estatísticos, os modelos de regressão tradicionais parecem não ser confiáveis. Alguns modelos de regressão espacial foram desenvolvidos e estão disponíveis para aplicação, sendo que alguns deles são utilizados para modelar fenômenos não-estacionários, representados de forma contínua no espaço, partindo de duas hipóteses: existência de uma variação suave em larga escala, sem efeitos locais significativos, ou existência de variações locais contínuas, sem uma forte tendência global. Esse modelo é estimado por uma equação de regressão linear para cada ponto geográfico com a atribuição de pesos para as observações vizinhas, sendo que pesos relativamente grandes são atribuídos a pontos próximos da localização e pesos menores são atribuídos a observações distantes do local (ROGERSON, 2012). Esse método é denominado regressão geograficamente ponderada (*geographically weighted regression* – GWR).

Há uma disponibilidade significativa de métodos para análise estatística de dados geográficos em plataformas SIG. Especificamente quanto a análise da relação entre superfície urbana e variáveis climáticas ou do balanço de energia da superfície, não há uma metodologia claramente definida para a análise dessas relações estatísticas. A seguir são apresentados alguns trabalhos que avaliaram essas relações, comparando o emprego de métodos de estatística não espacial e espacial para explicação da relação entre a superfície urbana, variáveis climáticas ou do balanço de energia da superfície.

Li et al. (2010), para a cidade de Shenzhen (China), verificaram relações estatísticas entre a temperatura de superfície e determinantes ambientais, tais como distância entre a cidade e a rodovia, densidade de áreas de florestas, áreas urbanizadas e terrenos não utilizados, fatores topográficos

dentre outros. Aplicaram método de regressão geograficamente ponderada (GWR) e técnica de regressão global (OLS – mínimos quadrados ordinários) utilizando o programa ArcGIS a fim de avaliar qual método teria melhor resposta. Os resultados indicaram que o modelo GWR teve um ajuste melhor se comparado ao modelo OLS, mas também forneceu informações detalhadas locais sobre a variação espacial da T_s , o que não é possível extrair dos resultados da OLS.

Ivajnsič, Kaligarič e Žiberna (2014) avaliaram a intensidade e a morfologia da ilha de calor em cidade de pequeno porte (Ljutomer, Eslovênia), testando a utilidade do método GWR na análise da relação entre temperatura média do ar e fatores urbanos que teriam influência nesta variável, utilizando o programa ArcGIS. Os dados representativos da cobertura da superfície (urbana e rural) integrados na análise foram o volume construído por área e a diversidade de cobertura do solo, parâmetros derivados de uma base vetorial, mas que o resultado foi transformado em um raster de matriz de 40x40 m. Variáveis características da morfologia da topografia como direção da inclinação do relevo e um índice de posição topográfica (elevação relativa) também foram consideradas. Com base em dados medidos de temperatura do ar, a análise de regressão confirmou a importância de variáveis explicativas locais (distância da área urbana, posição topográfica e diversidade de cobertura do solo) e globais (volume construído e direção da inclinação do relevo) na explicação da variação da temperatura média do ar, o que produziu um ajuste geral do modelo de 91%.

Lobo, Fonseca e Garcia (2015), em uma avaliação da relação entre a altura média de edifícios (denominada como verticalização construtiva) e o nível de impermeabilização do solo, aplicaram métodos de estatística espacial (GWR) e inferencial (classificação por cluster e k-means) utilizando o programa ArcGIS. O estudo foi feito para o município de Belo Horizonte e a unidade de análise empregada foram os setores censitários da cidade. A altura dos edifícios foi extraída de imageamento a laser e atribuída a cada polígono, sendo calculada a média para cada setor censitário. O indicador de impermeabilidade foi derivado por várias técnicas, dentre elas a classificação de imagem de satélite *RapidEye* e cruzamento com dados vetoriais (logradouros públicos, áreas de preservação ambiental etc.), extraíndo-se as áreas impermeabilizadas em formato vetorial e, posteriormente calculada sua proporção para cada setor censitário. Concluiu-se que os resultados do modelo de regressão linear local não retornaram níveis significativos de determinação da impermeabilização do solo devido à altura das edificações, contudo, na classificação por clusters, verificou-se que aqueles com alto nível de verticalização corresponderam a maiores níveis de impermeabilização. Uma questão que se coloca sobre esse método é em relação à unidade espacial utilizada, que pode ter comprometido a observação da relação entre as variáveis. Cabe ressaltar que esse estudo não foi feito para fins de avaliação do clima urbano.

Também com recorte espacial para Belo Horizonte, Ferreira, Lobo e Assis (2019) analisaram a relação da temperatura do ar em um período seco (mês de agosto) com a densidade de volume construído de edificações e com a altitude. As variáveis foram representadas para as unidades administrativas correspondentes aos bairros do município. As relações estatísticas foram estabelecidas utilizando modelo de regressão linear e o método GWR. Os resultados indicaram que na regressão linear a relação entre a temperatura do ar e a densidade de volume construído foi extremamente baixa e insignificante, enquanto a relação com a altitude foi um pouco melhor, mas ainda baixa. O desempenho do modelo GWR foi um pouco melhor se comparado ao método não espacial, contudo para a maior parte do território o R^2 local foi baixo. A melhor correlação foi observada no modelo GWR para altitude e temperatura, apontando o efeito do relevo como atenuador da temperatura do ar e um predomínio da atuação de fatores geocológicos naturais na configuração climática do município. Além disso, verificou-se uma melhor predição dos modelos estatísticos em áreas de menor densidade construída, maiores altitudes e menores temperaturas.

Zhao, Ren e Tan (2018), para a cidade de Zhengzhou (China), verificaram a relação entre a temperatura de superfície derivada do satélite Landsat 8 e seis indicadores que explicitavam a abundância de vegetação, área construída, variáveis sociais e ecológicas e a diversidade e tamanho de tipos de cobertura do solo na explicação do fenômeno de ilha de calor urbana. Aplicaram os métodos OLS e GWR e testaram a variação de múltiplas resoluções espaciais. Assim como Li et al. (2010), concluíram que o GWR possui uma melhor capacidade de analisar as relações entre T_s e seus fatores de impacto considerando as relações de variação espacial de diferentes parâmetros. Quanto à escala de análise, os autores verificaram que entre 30 e 480 m de resolução espacial o GWR tem melhor resposta, enquanto em escalas entre 720 e 1200 m os resultados do modelo foram fracos. Essa variação de escala indica que não há uma escala correta para representação dos dados, mas sim um modelo que melhor representa o que se deseja esclarecer do fenômeno em estudo: correlações mais fracas, mas com maior homogeneidade de representação, ou correlações mais fortes e com distribuição heterogênea em grandes áreas (CÂMARA et al., 2004b).

Azhdari, Soltani e Alidadi (2018), na cidade de Shiraz (Irã), caracterizada por clima semiárido, analisaram o efeito da morfologia urbana na temperatura de superfície extraída de quatro imagens da banda 6 do satélite Landsat 5, representativas das diferentes estações do ano. As variáveis morfológicas avaliadas foram: parâmetros relacionados à densidade (densidade de estradas, densidade de residências e densidade de parcelas), razão de área útil de pavimentos dos edifícios, razão de área de espaços abertos, distância do centro e tipos de uso do solo. Os métodos estatísticos de correlação de Pearson, regressão linear (OLS) e regressão exploratória foram utilizados para avaliar a relação bilateral entre as variáveis, a partir dos dois primeiros métodos, e a relação de causalidade,

com a aplicação do último método, que corresponde a estatística espacial. Os programas SPSS, Excel e ArcGIS, respectivamente, foram empregados para extrair as relações estatísticas. Diante das características climáticas da cidade estudada, alguns resultados apresentados no trabalho contrariaram relações encontradas em outras condições climáticas, como a relação entre a expansão horizontal da cidade e a redução de T_s , verificada também em climas tropicais, mas que não ocorrem em climas temperados. Outras constatações estariam relacionadas à densidade de residências e intensidade de área urbanizada, as quais teriam uma correlação negativa com T_s , enquanto a presença de espaços abertos aumentaria a temperatura de superfície. Os métodos estatísticos espaciais e não espaciais, nesse caso, foram utilizados de forma complementar para a análise dos resultados.

Portela et al. (2020), para a cidade de São José dos Campos (SP), compararam a temperatura de superfície derivada dos satélites Landsat 5 e 8 do período de 2010 a 2018 com a cobertura do solo e a vegetação. A cobertura do solo foi extraída de classificação supervisionada de imagens de 2010 e 2018, composta por cinco classes que se distinguem por presença ou ausência de vegetação, áreas cultivadas, corpos d'água e superfícies artificiais (áreas urbanas). As análises entre as variáveis foram realizadas aplicando-se métodos de autocorrelação espacial global e local (Índice de Moran). Verificou-se que as áreas com maiores intensidades de temperatura de superfície estavam concentradas em áreas urbanas e com vegetação esparsa. Áreas industriais e de estacionamentos foram identificados como pontos quentes (com maiores valores de T_s) indicando que os tipos de materiais usados nessas áreas parecem ser o motivo das altas temperaturas.

Os trabalhos demonstram uma variedade na aplicação de métodos estatísticos não espaciais e espaciais e as diferentes possibilidades de interpretação das relações entre variáveis. Não há uma definição de melhor metodologia a ser adotada e por isso é importante entender os fenômenos físicos a serem analisados, as escalas de análise e os métodos estatísticos que melhor se adequariam às associações pretendidas. É nesse sentido que se desenvolveu o trabalho a partir da metodologia apresentada a seguir.

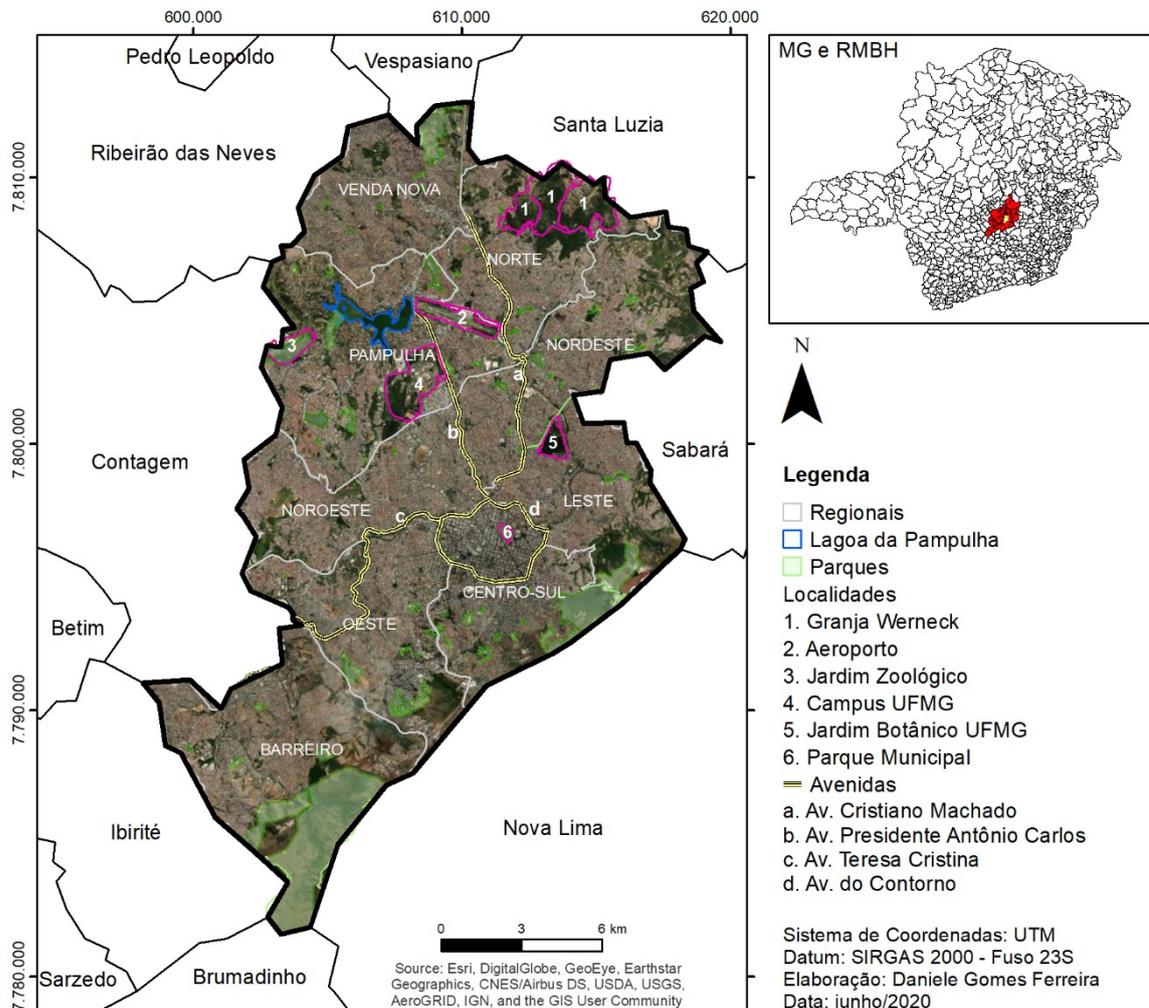
3. METODOLOGIA DE PESQUISA: área de estudo e procedimentos metodológicos

Este capítulo apresenta a área de estudo e sua contextualização como estudo de caso da pesquisa. Em seguida são detalhados os métodos e técnicas empregados na coleta, tratamento e análise de dados.

3.1. Caracterização da área de estudo: a cidade de Belo Horizonte

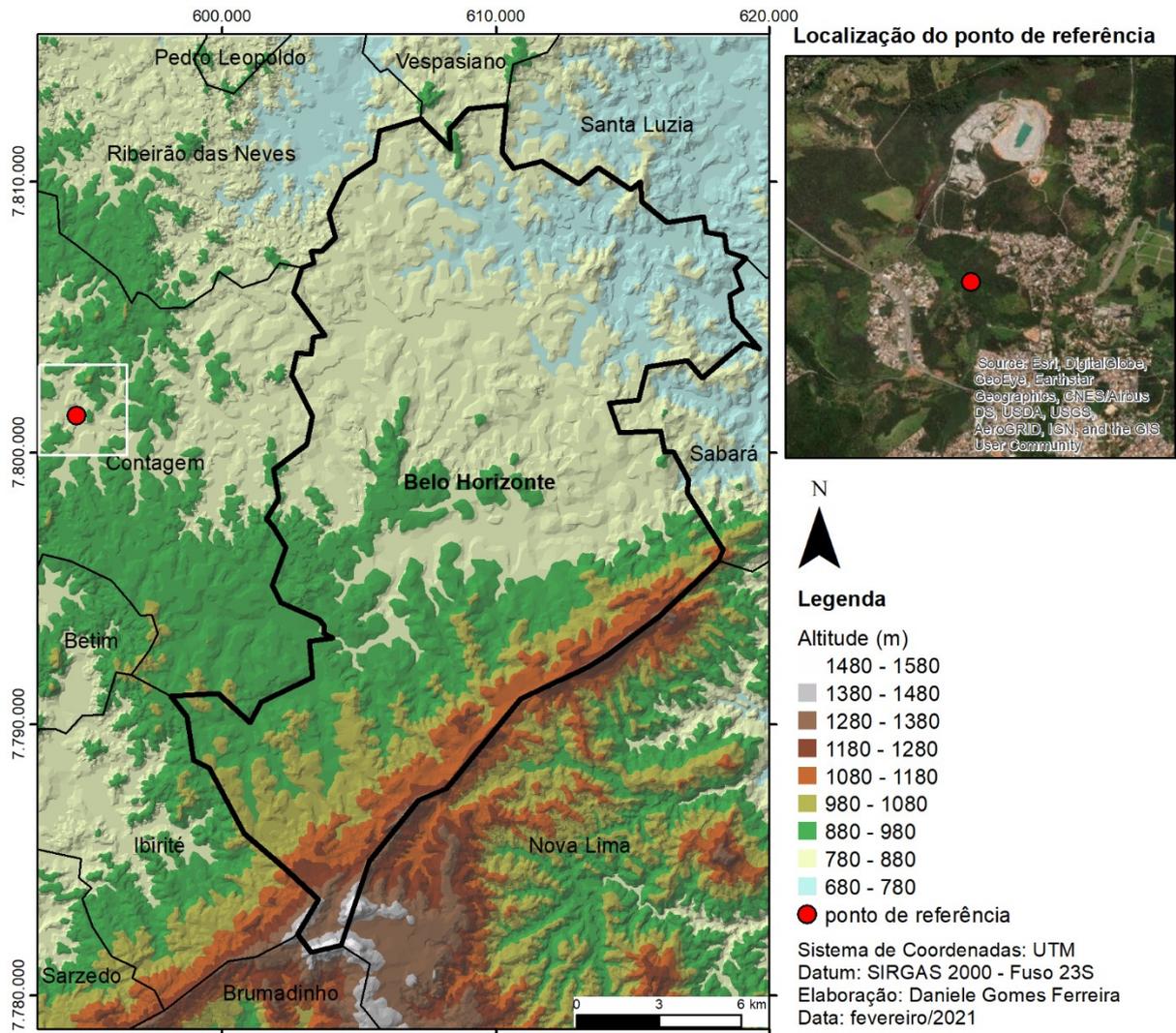
A cidade de Belo Horizonte foi definida como a área de estudo da pesquisa (Figura 6). Localiza-se na região centro-sul do estado de Minas Gerais, compreende uma área de 331,4 km², tem densidade demográfica de 7.167 hab/km² e apresenta a sexta maior população entre as cidades brasileiras (IBGE, 2010a). Surgiu como uma cidade planejada para ser a capital do Estado, inaugurada em 1897, seguindo princípios urbanísticos da modernização urbana brasileira na passagem do século XIX para o XX (SEGAWA, 2002).

Figura 6: Divisão administrativa de Belo Horizonte e localidades de referência na cidade



Fonte da base vetorial: PRODABEL (BH Map), Mapa base de municípios (IGA, 2007). Produzida pela autora

Figura 7: Topografia de Belo Horizonte e localização de ponto de referência para cálculo de ΔT_s .



Fonte: Modelo de Terreno cedido pelo IGC/UFMG, 2008; Mapa base de municípios – IGA, 2007.

Produzida pela autora

O município é caracterizado por dois domínios geológicos: o Domínio do Complexo Belo Horizonte e o Domínio das Sequências Metassedimentares (BELO HORIZONTE, 1995). O primeiro domínio representa cerca de 70% da área total da cidade, está localizado predominantemente na região norte e central e tem altitudes entre 680 e 980 m (Figura 7). O segundo domínio apresenta topografia acidentada, cujas maiores altitudes são encontradas na Serra do Curral, limite sul e sudeste do município, com variações entre 1.100 e 1.500 m. Essa variação topográfica influencia as condições climáticas do município, com uma tendência de temperaturas do ar mais baixas nas áreas de maior altitude (ASSIS, 2010). Tal diferenciação das condições de clima existente se reflete na classificação climática apresentada para a cidade por diferentes autores (IBGE, 2002; ASSIS, 2010; ALVARES et al., 2013; DUBREUIL et al., 2017;), podendo apresentar variações dependendo dos tipos de elementos climáticos analisados e da escala de coleta e tratamento desses dados.

Considerando o sistema de classificação climática de Köppen, a cidade de Belo Horizonte foi classificada predominantemente como Cwb (DUBREUIL et al., 2017), mas também houve regiões classificadas como Cwa, localizadas na porção norte, quando o método de classificação avaliou, além de dados de temperatura do ar e precipitação, a altitude como um dos elementos climáticos (ALVARES et al., 2013). Essas classificações correspondem a climas subtropicais com inverno seco e verão chuvoso, ou seja, com duas estações definidas quanto à precipitação, mas que se diferenciam por verão com temperatura do ar maior que 22°C (Cwa) ou verão com temperatura entre 4 e 22°C (Cwb). A classificação do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2002), por sua vez, classifica o clima zonal de Belo Horizonte como Tropical Brasil Central, semi-úmido com 4 a 5 meses seco. A estação úmida começaria na primavera e a estação seca teria início no outono (SALGADO et al., 2019). A diferença entre estação seca e chuvosa presente nas classificações climáticas foi relevante para a definição do recorte temporal do presente estudo. Contudo, é importante ressaltar que essas classificações são globais e não consideram especificidades do território em escala local ou microclimática, que são as escalas que mais se aproximam do objeto de estudo, mas são uma referência para a compreensão de fenômenos associados a atmosfera em escalas mais ampliadas.

Quanto à climatologia, os valores médios anuais para o período de 1981 a 2010 para Belo Horizonte foram os seguintes: temperatura média do ar de 21,8°C, com temperaturas máximas e mínimas de 17,8°C e 27,2°C, respectivamente, umidade relativa média de 67,2%, velocidade média do vento equivalente a 1,7 m/s, com direção predominante de leste e precipitação acumulada média de 1.602,6 mm (INMET, 2018).

As condições meteorológicas observadas na cidade são determinadas pelos sistemas de circulação atmosféricos global e regional e que marcam a diferença entre as estações do ano e as condições de estabilidade. Durante o inverno predomina a influência do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), também denominado como Massa Tropical Atlântica (mTa), que causa forte estabilidade atmosférica. As características de tempo que caracterizam esse fenômeno são condições de céu claro (pouca ou nenhuma nebulosidade), ventos fracos, baixos valores de umidade, ausência de precipitação (LUCAS, 2007; ASSIS; ABREU, 2010). No verão, as linhas de instabilidade (LI) ocorrem com maior frequência e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), configurada como um amplo eixo de intensa atividade convectiva de orientação NW-SE, contribui para altas taxas de precipitação (MOREIRA, 1999) com dias consecutivos de chuva.

Para este estudo, considera-se importante apresentar elementos significativos e localidades de referência no município que serão mencionados ao longo das análises, principalmente no que se refere à divisão administrativa, ocupação do solo, eixos viários, áreas pavimentadas, entre outras (Figura 7).

Quanto à divisão administrativa, o município é dividido em nove regionais, sendo que a regional Centro-Sul é a que apresenta maior verticalização. É nessa regional também que está localizada a área originalmente planejada pela Comissão Construtora de Belo Horizonte, delimitada pela Avenida do Contorno, e que apresenta traçado viário geométrico e regular. Na regional Pampulha, destaca-se a presença do Aeroporto de Belo Horizonte/Pampulha, com extensa área pavimentada correspondente à pista de pouso e áreas anexas a ela, e da Lagoa da Pampulha, corpo d'água mais expressivo do município, com cerca de 2 km² de área. Os demais corpos e cursos d'água apresentam-se, em sua maioria, em canais fechados revestidos.

No traçado viário, é importante ressaltar avenidas de grandes extensões e pavimentadas: as Avenidas Cristiano Machado e Presidente Antônio Carlos, que se estendem da região Centro-Sul em direção ao Norte da cidade; as Avenidas Teresa Cristina e do Contorno, localizadas na porção central do município e que seguem no sentido oeste, ao longo do Ribeirão Arrudas, que se encontra parcialmente canalizado.

As áreas de parques e unidades de conservação, concentradas majoritariamente ao longo do limite sul/sudeste da cidade, representam as maiores extensões de área verde. Contudo é importante destacar a presença de outras áreas verdes nas regionais Centro-Sul (Parque Municipal), Leste (Museu de História Natural e Jardim Botânico da UFMG), Pampulha (área de preservação do Campus da UFMG e Jardim Zoológico de Belo Horizonte) e Norte (bairro Granja Werneck).

3.2. Procedimentos metodológicos

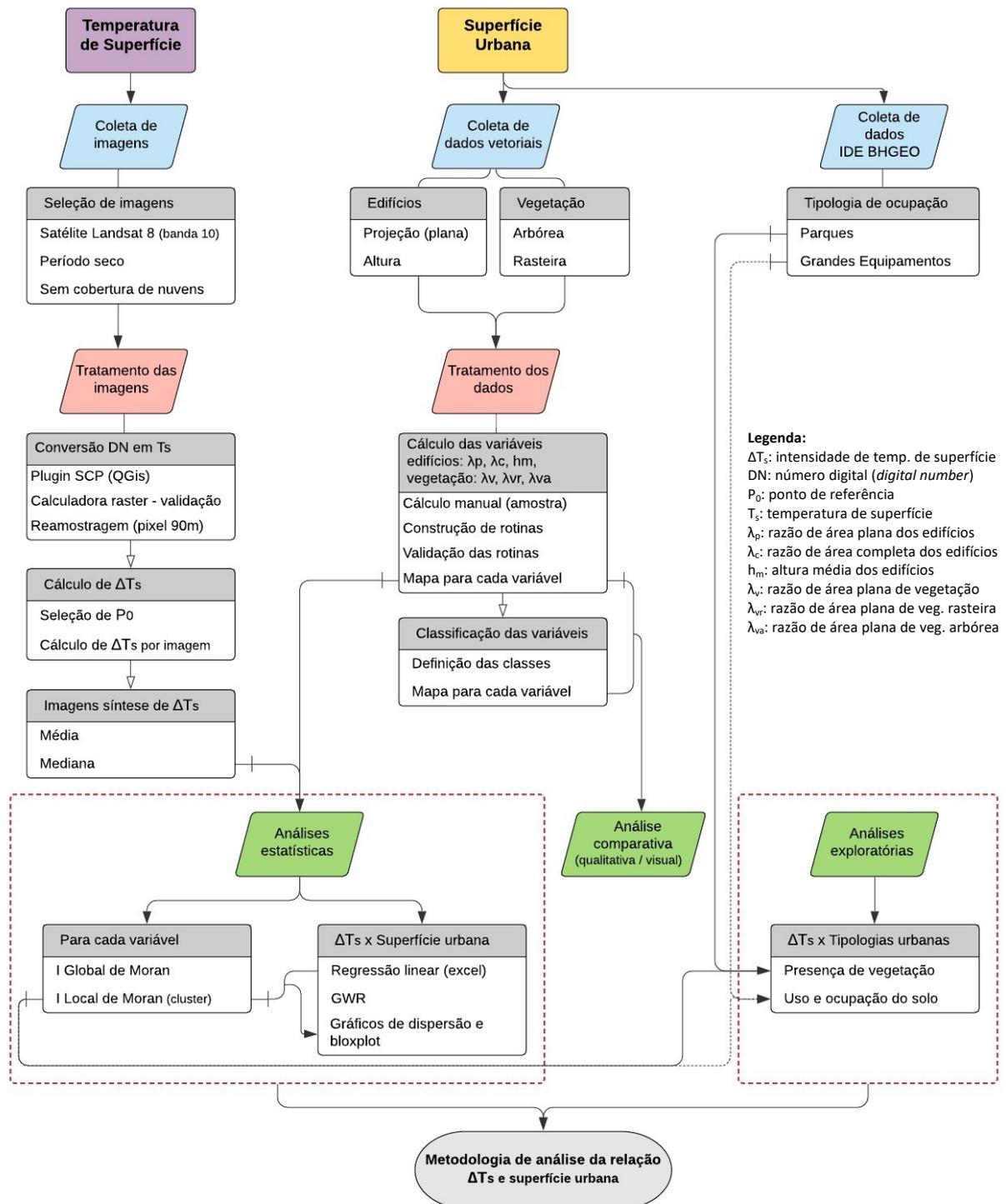
O método utilizado neste trabalho partiu do princípio de que é possível analisar as relações entre os parâmetros da superfície urbana e a intensidade da temperatura de superfície por meio de modelos estatísticos e exploratórios. Para isso, utilizou-se como estudo de caso a cidade de Belo Horizonte. Como foram utilizados dados específicos de um estudo de caso para tentar explicar a relação entre as variáveis e extrair conclusões mais amplas, o método utilizado é o indutivo.

A temperatura de superfície foi estimada por imagens captadas por sensoriamento remoto (satélite Landsat), as quais são registradas pela manhã. Assim, todos os resultados e observações são restritos a esse horário. Além disso, como os sensores registram informações principalmente dos planos horizontais, isto é, não são capazes de captar a temperatura de todas as superfícies urbanas em contato com a atmosfera, mas que no horário da captura da imagem há influência de sombreamento causada pelos edifícios, a superfície urbana foi representada por parâmetros horizontais e verticais dos elementos construídos, a fim de verificar se a descrição tridimensional da superfície tem melhor

poder explicativo da variação da intensidade da temperatura de superfície. Também foi feita uma relação da intensidade da temperatura de superfície com a vegetação, elemento considerado como atenuador de T_s .

A síntese do processo metodológico é representada na Figura 8 e descrita nos itens seguintes.

Figura 8: Síntese do processo metodológico



Fonte: Produzida pela autora

3.2.1. Coleta e tratamento de dados

A seguir são apresentados os métodos e técnicas utilizados para a coleta e tratamento de dados de temperatura de superfície e da superfície urbana.

3.2.1.1. Temperatura de superfície

A temperatura de superfície é a variável chave e que determinou a forma de abordagem dos demais parâmetros. A partir de levantamento dos satélites que dispõem de informações do canal termal, seu período de operação e sua respectiva resolução espacial (Tabela 1), definiu-se pelo uso das imagens da banda 10 do Landsat 8 por esse satélite estar em operação, por ter produtos disponíveis com a melhor resolução espacial (reamostrados para 30 m), pela gratuidade das imagens e por ser amplamente aplicado em estudos urbanos (LOMBARDO, 2011; COELHO; CORREA, 2013; GELETIČ; LEHNERT; DOBROVOLNÝ, 2016; SANTOS et al., 2017b; CAI; HAN; CHEN, 2018; PERES et al., 2018; XIAO et al., 2018). O Landsat apresenta outra vantagem que é o maior período de operação dentre todos os satélites aqui descritos.

Para o caso de Belo Horizonte, as imagens desse satélite já foram utilizadas para classificação de uso e cobertura do solo, demonstrando a heterogeneidade da superfície urbana nessa escala de análise (FERREIRA, 2009; FERREIRA; ASSIS, 2010). Assim, imagens com menor precisão seriam incompatíveis com a escala de análise pretendida neste trabalho.

As imagens da banda 10 do satélite Landsat 8 foram coletadas no site da *United States Geological Survey* (USGS - *Landsat Collection 1 Level 1*)²⁰. No caso de Belo Horizonte, a passagem do satélite e a captura das imagens ocorre às 9:57 (hora local). A captura em um horário específico do dia reflete uma única condição da temperatura de superfície, nesse caso no período da manhã, em que houve aquecimento parcial das superfícies por um período curto do dia. Nesse sentido, as análises relativas à temperatura no presente estudo são sempre restritas a esse horário do dia, o que não é o ideal para a verificação de ciclos diários de desenvolvimento da temperatura (OKE et al., 2017) e, conseqüentemente, é uma limitação do trabalho. Outra limitação é o efeito de sombreamento das superfícies e do relevo devido à posição do sol no horário da manhã, o que não é possível eliminar das imagens.

A seleção das imagens foi feita considerando, primeiramente, o período em que foi realizado o último aerolevante para cadastro imobiliário pela Prefeitura Municipal de Belo Horizonte, que

²⁰ Disponível em: < <https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em 21 set. 2019.

correspondeu ao ano de 2015. Devido à dinâmica urbana e à constante alteração da sua forma e cobertura do solo, foram verificadas as imagens disponíveis no período entre janeiro de 2014 e dezembro de 2016, um ano antes e um ano depois da execução do aerolevante, para que a relação entre as variáveis urbanas e de temperatura de superfície pudesse ser o mais fidedigna possível.

Em seguida foram selecionadas as imagens em que a condição era de céu claro em Belo Horizonte, sem ocorrência de nuvens, sendo descartadas as imagens que apresentavam cobertura de nuvens no território municipal. Esse procedimento também foi adotado por outros autores brasileiros (LOMBARDO, 1985; SANTOS et al., 2017a; AMORIM, 2018). Essa escolha se justifica, pois o valor de temperatura de superfície registrado em locais com nuvens seria do topo das nuvens, ou seja, não corresponderia à energia radiante da superfície urbana, que é o objeto de estudo.

A partir dessa seleção, verificou-se a condição climatológica do período de captura das imagens. Optou-se por um recorte temporal representativo de período seco. Isso porque a presença de umidade na atmosfera poderia causar interferências na captura da imagem, como absorção e espalhamento da radiação atmosférica, alterando a radiação captada pelo sensor (MENESES; ALMEIDA, 2012). No período seco, os efeitos da atmosfera poderiam ser minimizados e o registro da temperatura de superfície poderia ser mais próximo do real.

A caracterização do período seco foi feita com base na definição de Salgado et al. (2019) de estação seca para o clima tropical semi-úmido, que começaria no outono e se estenderia até a primavera, compreendendo, portanto, os meses de março a outubro. Ao mesmo tempo foi feita uma verificação se esses meses corresponderiam aos critérios de mês seco estabelecidos por Bagnouls e Gausson (1962), e também aplicados por Assis (2010) para Belo Horizonte, utilizando acumulado de precipitação e temperatura média do ar. Utilizando essas mesmas variáveis, verificou-se também as condições climáticas para um intervalo de sete dias anteriores à captura da imagem, considerando que há uma relação entre as escalas temporais e espaciais dos fenômenos atmosféricos (OKE et al., 2017) e que o período de análise de uma semana poderia ser mais adequado às escalas espaciais microclimática e local (

Figura 1), sendo esse o critério que indicou o período seco adotado. Também foi feita a análise da condição sinótica para cada dia de captura das imagens, para verificar possíveis efeitos de macroescala na temperatura de superfície (Apêndice A).

Com as imagens selecionadas, a etapa seguinte correspondeu ao seu tratamento, que equivale à conversão do número digital de cada pixel em um dado de temperatura. Essa operação foi realizada utilizando o programa QGIS (ferramenta Calculadora Raster). Aplicou-se as equações disponíveis no

manual para usuários do satélite Landsat 8 (USGS, 2016), mesmo método utilizado por Lombardo (2011), Coelho e Correa (2013) e Amorim (2018). Inicialmente o dado da imagem foi convertido em radiância espectral utilizando os fatores de escala de radiância fornecidos no arquivo de metadado (MTL) das imagens selecionadas (Equação 4). Em seguida, o valor de radiância foi transformado em temperatura de superfície (T_s) em graus Celsius (Equação 5).

$$L_\lambda = M_L \times Q_{cal} + A_L \quad (4)$$

Onde:

L_λ = radiância espectral

M_L = fator de escala multiplicativo da radiância para a banda

Q_{cal} = número digital

A_L = fator de escala aditivo da radiância para a banda

$$T_s = \left(\frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_\lambda} + 1\right)} \right) - 273,15 \quad (5)$$

Onde:

$K1$ e $K2$ = constantes de conversão térmica para a banda

Também foi feito teste de conversão do número digital em temperatura utilizando o plugin *Semi-Automatic Classification - SCP*²¹ (versão 5.4.1) e os resultados foram iguais àqueles obtidos com a aplicação das Equações 4 e 5 na ferramenta Calculadora Raster, o que validou a aplicação do plugin para a conversão das imagens selecionadas, permitindo aplicar essa técnica a todas as imagens de satélite selecionadas. As imagens foram reamostradas, modificando-se a resolução espacial inicial de 30 m para 90 m, para melhor aproximação da resolução da captura da imagem pelo satélite, que é de 100 m (Tabela 1).

A etapa subsequente consistiu no cálculo da intensidade de temperatura de superfície (ΔT_s)²² para cada imagem, método semelhante ao utilizado por Amorim (2018). ΔT_s é a diferença entre a temperatura registrada para cada pixel e a temperatura do ponto de referência com características de área rural (T_{sr}) (Equação 6). A Equação 6 foi aplicada para cada imagem selecionada. O ponto de

²¹ A vantagem de uso do plugin é que as equações estão incorporadas em uma única ferramenta e esta é capaz de identificar os valores indicados em arquivo .txt para cada imagem (M_L , $K1$ e $K2$), o que permite maior controle do tratamento dos dados. Além disso, há a possibilidade de processamento em lote das imagens, executando o processo uma única vez para todo o conjunto de imagens.

²² Optou-se pela nomenclatura “intensidade de temperatura” e não “intensidade de ilha de calor”, como utilizado em muitos estudos, pois a análise se restringiu a um único horário do dia, não sendo possível observar a evolução temporal do fenômeno da ilha de calor. Além disso, a maior magnitude da ilha de calor urbana (maior diferença entre a temperatura urbana e rural) ocorre após o pôr do sol.

referência (P_0) na área rural foi selecionado considerando dois critérios (OKE et al., 2017): a) tipo de cobertura de solo equivalente a vegetação densa e b) altitude representativa de um intervalo médio encontrado em Belo Horizonte - entre 780 e 870 m. P_0 está localizado no município de Contagem (Figura 7), fora da área de estudo, pois em Belo Horizonte não foi encontrado local que atendesse aos critérios apontados, principalmente porque praticamente toda sua extensão tem ocupação urbanizada e as áreas verdes densas estão concentradas em altitudes extremas da cidade. O ponto é caracterizado por presença de vegetação perene (classificada como floresta estacional semidecidual montana) e está a cerca de 870 m de altitude²³.

$$\Delta T_s = T_{s(\text{pixel})} - T_{sr} \quad (6)$$

Para análise dos dados de ΔT_s foram calculados parâmetros de estatística descritiva (valores mínimos e máximos, amplitude, média, mediana e média dos desvios padrão) para cada imagem. Além disso, foram produzidas duas imagens correspondentes ao cálculo da mediana e da média de todas as imagens utilizadas no estudo, o que seriam mapas síntese do período analisado. Optou-se pela utilização do mapa de mediana nas análises de estatística espacial.

3.2.1.2. Superfície urbana

A descrição da superfície urbana baseou-se na representação da sua forma a partir de relações geométricas dos elementos urbanos, aqui caracterizados pelas edificações e pela vegetação²⁴. Seis parâmetros foram calculados, sendo três referentes às edificações (razão de área plana, altura média e razão de área completa) e três para vegetação (razões de áreas planas para vegetação rasteira, para vegetação arbórea e para ambos os tipos de vegetação em um único parâmetro), pois entendeu-se que o foco principal do trabalho é a relação da temperatura de superfície com os elementos construídos, mas que o efeito da vegetação poderia ser relevante na explicação da sua variação.

As razões de área foram derivadas de relações geométricas dos elementos, enquanto a altura média é um parâmetro estatístico. A área plana e a altura média seriam variáveis complementares, ambas

²³ Os dados de vegetação e altitude foram extraídos, respectivamente, de mapas de cobertura florestal e de curvas de nível com intervalos de 30 m, ambos disponíveis na Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente (IDE-Sisema). Disponível em: <<http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br>>. Acesso em: 14 jul. 2019.

²⁴ O relevo seria outro elemento importante na análise, em especial na cidade de Belo Horizonte, mas não foi contemplado nesse momento, indicando uma limitação do estudo. Foram feitos alguns testes com modelos digitais de elevação e estudos de radiação para verificar o aquecimento diferenciado do terreno (Apêndice B). Contudo não se identificou uma forma de representação que tivesse uma associação com a temperatura de superfície. Entende-se que trabalhos futuros poderão cumprir com essa lacuna.

bidimensionais, mas que utilizadas em conjunto poderiam expressar a tridimensionalidade dos objetos. A razão de área completa dos edifícios, por sua vez, seria a sua representação tridimensional em uma única variável. A vegetação foi representada apenas como uma razão de área plana, pela ausência de dados de altura dos elementos, contudo a diferenciação entre vegetação rasteira e arbórea seria um indicador de relação diferenciada da temperatura de superfície com a densidade de cobertura vegetal.

Para as variáveis razão de área plana, apenas os planos horizontais foram considerados como superfície ativa, enquanto para a razão de área completa dos edifícios, considerou-se além da área plana, a área das fachadas para a composição das superfícies ativas. A razão de área (λ_x) foi definida, de forma genérica, como o somatório de áreas do elemento considerado (A_x) dividido pela área total (A_T), que equivale a área do pixel (90 m) (Equação 7) (Figura 9).

$$\lambda_x = \frac{\sum_{i=1}^n A_{xi}}{A_T} \quad (7)$$

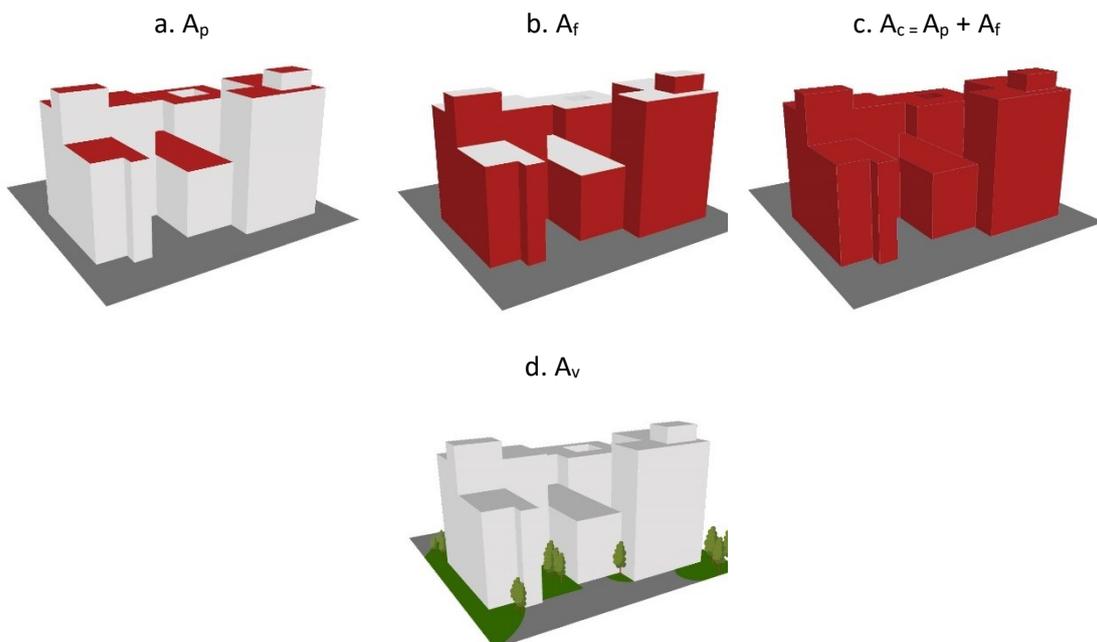
Onde:

λ = razão de área da variável

x = variável representada

A_T = área total

Figura 9: Representação de A_p (a), A_f (b) e A_c (c), destacadas em vermelho para os edifícios, e A_v (d), destacada em verde para vegetação.



Fonte: Produzida pela autora

Para o cálculo das áreas dos edifícios, utilizou-se a projeção dos prédios, sendo que a área em planta (A_p) é a porção de área dos edifícios que está contida no polígono. A área de fachada é a soma das áreas de fachadas expostas ao ar, excluindo-se as áreas sobrepostas entre os edifícios (A_f). A área completa dos edifícios (A_c) é a soma de A_p e A_f .

Para o cálculo das áreas de vegetação, utilizou-se as áreas de projeção de vegetação (A_v) contidas no pixel, sendo que esse parâmetro foi subdividido em vegetação arbórea e rasteira.

As variáveis de razão de área calculadas foram λ_p (razão de área plana dos edifícios), λ_{vr} (razão de área plana de vegetação rasteira), λ_{va} (razão de área plana de vegetação arbórea), λ_v (razão de área plana de vegetação, que inclui vegetação rasteira e arbórea) e λ_c (razão de área completa dos edifícios)²⁵.

A altura média (h_m) foi calculada como a média das alturas (H) das edificações em cada pixel (Equação 8).

$$h_m = \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{n} \quad (8)$$

Os cálculos dos parâmetros foram executados no programa QGIS, versão 3.4, usando a ferramenta *Graphical Modeler*. Foi desenvolvida uma rotina para cálculo de cada parâmetro (Apêndice C). Os dados de entrada para o desenvolvimento dos cálculos foram disponibilizados pela Prefeitura Municipal de Belo Horizonte (aerolevanteamento do ano de 2015), em formato vetorial, correspondentes aos polígonos dos edifícios com suas respectivas alturas²⁶ e polígonos das áreas de vegetação existentes no município, também derivadas do aerolevanteamento.

Foi feito um tratamento prévio dos arquivos disponibilizados pela Prefeitura Municipal para extrair os polígonos representativos dos perímetros das edificações ou da vegetação, eliminando-se linhas sobrepostas. Para os cálculos das áreas planas (λ_p e λ_v) e altura média, o dado de entrada foi um arquivo contendo os polígonos dos edifícios ou da vegetação. Para λ_c , o dado de entrada foi um arquivo de linhas correspondentes às faces das edificações que estariam expostas à radiação e o arquivo de grid correspondeu ao resultado obtido no cálculo de λ_p .

As áreas de vegetação foram agrupadas como rasteira e arbórea, sendo que o agrupamento foi feito por comparação visual dos tipos de classes com imagens do Google Earth²⁷. Optou-se por utilizar o dado de vegetação classificado pela Prefeitura de Belo Horizonte por ser um dado disponível para a

²⁵ A área completa de superfície foi definida por Voogt and Oke (1997) considerando a área de vegetação e de superfície horizontal, além da área dos edifícios. Aqui consideramos apenas a área dos edifícios.

²⁶ A altura dos edifícios foi derivada da diferença entre dois atributos do mapa: MODA_MDE e MODA_MDT.

²⁷ As classes agrupadas como rasteira foram: cultura, macega, pasto e pomar. As demais foram agrupadas como arbórea.

cidade e que pode ter outras interfaces com ações municipais²⁸. Assim, as análises realizadas neste trabalho poderiam contribuir com a base de dados da prefeitura, evitando-se a criação de novas camadas de dados para uma mesma categoria de informação já existente.

O resultado dos cálculos dos parâmetros foi um mapa em formato vetorial para cada variável correspondente a uma malha de tamanho de 90x90 m, equivalente ao tamanho do pixel das imagens de intensidade de temperatura de superfície.

A partir desses mapas, foi feita uma classificação dos valores calculados, considerando três classes para cada variável: baixo, médio e alto (Tabela 3).

Tabela 3: Classificação dos parâmetros de superfície urbana

	Intervalo de valores	Classe	Definição das classes (justificativas)
λ_p	$\lambda_p \leq 0,2$	baixo	Taxas de ocupação da LUOS entre 0,2 e 0,5 para a maioria dos zoneamentos. Valores superiores a 0,5 poderiam afetar valores de ΔT_s (pixel majoritariamente representado por edificação).
	$0,2 < \lambda_p < 0,5$	médio	
	$\lambda_p \geq 0,5$	alto	
λ_c	$\lambda_c \leq 1,0$	baixo	Avaliação visual de áreas com características mais homogêneas de ocupação e altura de edifícios (conhecimento prévio de ocupação de bairros)
	$1,0 < \lambda_c < 2,0$	médio	
	$\lambda_c \geq 2,0$	alto	
$\lambda_v, \lambda_{vr}, \lambda_{va}$	$\lambda_v \leq 0,2$	baixo	Percentual de área permeável dos lotes entre 10 e 20% para a maioria dos zoneamentos. Valores superiores a 0,5 poderiam afetar valores de ΔT_s (pixel majoritariamente representado por vegetação).
	$0,2 < \lambda_v < 0,5$	médio	
	$\lambda_v \geq 0,5$	alto	
h_m	$h_m \leq 7$	baixo	Avaliação visual de áreas mais homogêneas quanto à altura de edifícios. Altura utilizada por pavimento = 3,0m (+ altura de telhado). A classe de altura média seria até 4 pav. (prédios sem elevador).
	$7 < h_m < 17$	médio	
	$h_m \geq 17$	alto	

Fonte: Produzida pela autora

A definição das classes levou em consideração classificações definidas arbitrariamente com base em parâmetros utilizados por outros autores tais como as classificações de LCZ (STEWART; OKE, 2012), internacionalmente utilizadas, e densidade construída, presente em estudos brasileiros que se utilizaram de parâmetros urbanísticos para definição das classes (MORAIS, 2011; GUSSON; DUARTE, 2016). Contudo, como entende-se que não há uma classificação globalmente aplicável devido à heterogeneidade da forma urbana, construiu-se um modelo próprio para a cidade de Belo Horizonte, baseado em parâmetros urbanísticos da lei de uso e ocupação do solo - LUOS (BELO HORIZONTE, 2010), mas também em dados observacionais, de conhecimento prévio da evolução urbana da cidade e de

²⁸ Em pesquisa anterior para a cidade de Belo Horizonte (FERREIRA, 2009), foi feita a classificação de imagens de satélite Landsat, com classes de vegetação rasteira e arbórea. Em comparação com os dados disponibilizados pela Prefeitura de Belo Horizonte, verificou-se uma melhor resolução espacial desses dados em relação à classificação de imagem, o que também justificou o emprego da base de dados da PBH neste estudo.

estudos realizados anteriormente com classificações de uso do solo urbano de Belo Horizonte (FERREIRA, 2009; ASSIS, 2010; FERREIRA; ASSIS; KATZSCHNER, 2017). Os intervalos de cada classe e as justificativas de escolha são apresentados na Tabela 3, considerando que o objetivo é comparar a classificação com a temperatura de superfície.

Os mapas com valores absolutos e classificados foram comparados para verificar se a classificação é um resultado mais representativo e consegue apontar áreas homogêneas quanto à ocupação e forma urbana da cidade.

3.2.2. Análise dos dados: métodos estatísticos e de correlação espacial

Para avaliar o comportamento das variáveis abordadas no presente estudo, relativas aos parâmetros de superfície urbana e a intensidade de temperatura de superfície, foram utilizados métodos de estatística descritiva, assim como métodos de análise de padrões espaciais, correlação e regressão. Considerou-se a intensidade de temperatura de superfície (ΔT_s) como variável dependente e os parâmetros de superfície urbana (λ_p , λ_c , h_m , λ_v , λ_{vr} , λ_{va}) como variáveis independentes, explicativas da variação de ΔT_s . Como se constatou anteriormente que a mediana de ΔT_s seria representativa do período analisado, esse foi o dado utilizado para representar a temperatura de superfície nas análises subsequentes.

Foram utilizados métodos estatísticos (não espaciais), além de modelos estatísticos espaciais globais e locais a fim de verificar a diferença entre esses métodos e suas vantagens para explicação da relação entre as variáveis. A avaliação de vários métodos e técnicas estatísticas se justifica pois não há um procedimento único para análise da relação entre essas variáveis e a disponibilidade cada vez maior de SIGs e modelos espaciais conduzem a uma exploração dessas técnicas buscando uma melhor explicação dos fenômenos. Além disso, verifica-se que os parâmetros urbanos e a temperatura de superfície podem variar significativamente no território de uma cidade, o que conduz à premissa de que há uma dependência espacial entre essas variáveis.

Inicialmente verificou-se se existia uma relação linear entre a variável dependente (ΔT_s) e cada variável independente (λ_p , λ_c , h_m , λ_v , λ_{vr} , λ_{va}), por meio de análise de regressão não espacial, realizada no programa Excel, o que configurou uma primeira tentativa de descrição dessa relação e que é amplamente utilizada em estudos que relacionam parâmetros climáticos e de superfície (LI et al., 2010; IVAJNŠIČ; KALIGARIČ; ŽIBERNA, 2014; AZHDARI; SOLTANI; ALIDADADI, 2018; CAI; HAN; CHEN, 2018; XIAO et al., 2018; FERREIRA, 2019). O modelo de regressão linear global é calculado aplicando-se a Equação 9 (ROGERSON, 2012).

$$y_i = a + bx_i + e_i = \hat{y}_i + e_i \quad (9)$$

Onde:

y_i = valor observado da variável dependente

\hat{y}_i = valor predito da variável da variável dependente

a = intercepto (ponto onde a linha intercepta o eixo vertical)

b = inclinação da reta

x_i = variável independente

e_i = resíduo ou erro aleatório

As etapas seguintes, detalhadas abaixo, consistiram na aplicação de métodos de estatística espacial global e local, utilizando o programa ArcGIS, na tentativa de explicar a relação entre as variáveis considerando sua dependência espacial, a autocorrelação espacial do conjunto de dados e o relacionamento entre uma variável dependente e um conjunto de variáveis explicativas.

3.2.2.1. Autocorrelação espacial global - Índice Global de Moran

O método estatístico Índice Global de Moran foi aplicado para os valores absolutos de cada variável e para os valores classificados dos parâmetros de superfície urbana, com o objetivo de caracterizar a dependência espacial na área de estudo. A comparação dos resultados para os valores absolutos e classificados seria para verificar se o método de classificação utilizado melhoraria a representação espacial das variáveis.

Utilizou-se os algoritmos de função *Inverse Distance* e *Contiguity Edges Only* para verificar se haveria diferença entre as funções. De acordo com as definições constantes no programa ArcGIS, a primeira função testa a relação entre os vizinhos próximos com o polígono que se quer avaliar, enquanto a segunda função testa a relação entre os polígonos vizinhos que compartilham um limite ou sobreposição com o polígono avaliado.

3.2.2.2. Autocorrelação espacial local - Índice Local de Moran

O Índice Local de Moran foi aplicado para avaliar a ocorrência de diferentes regimes de associação espacial na área de estudo e regiões em que a dependência espacial é mais evidente. Na aplicação do método, a função *Inverse Distance* foi utilizada para estabelecer a relação espacial entre os polígonos.

A partir do conjunto de dados de valores absolutos de cada variável, identificou-se os *clusters* e os *outliers*, ou seja, agrupamentos de valores altos (pontos quentes) e baixos (pontos frios) e áreas em que os vizinhos mais próximos têm valores discrepantes (*outliers* – alto-baixo, baixo-alto) (ANSELIN,

1995). Os valores considerados significativos foram aqueles com nível de confiança acima de 95% (p -value < 0,05 e z -score > 2,5²⁹).

Para verificar a relação da intensidade de temperatura com cada tipo de agrupamento por variável analisada, os dados resultantes do LISA foram representados em gráficos de dispersão e *boxplot*. Além disso, foram calculadas a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação (razão entre o desvio padrão e a média) de ΔT_s para cada tipo de agrupamento, por variável.

3.2.2.3. Análise de regressão - Regressão geograficamente ponderada (GWR)

A regressão geograficamente ponderada foi utilizada para avaliar o relacionamento entre a variável dependente, ΔT_s , e as variáveis explicativas da variação da intensidade de temperatura. A aplicação do método teve como objetivo verificar se os modelos tinham bom ajuste entre os valores calculados e os valores observados da variável dependente e verificar quais das variáveis explicativas contribuem de forma mais significativa para o relacionamento linear entre as variáveis.

Inicialmente os modelos foram calculados para cada variável em relação a ΔT_s para testar a capacidade de resposta de cada variável independente diante da hipótese de existência de variações locais contínuas de intensidade de temperatura, sem uma tendência global forte de temperatura. Posteriormente avaliou-se se parâmetros construtivos associados à vegetação poderiam, em conjunto, explicar melhor a relação entre as variáveis. Para cada modelo foi representado o índice de regressão local (R^2 local) e identificados os padrões de distribuição espacial dos resíduos (*Std. Residual*) para visualização e comparação dos resultados.

O modelo GWR é uma derivação do modelo de regressão linear global (Equação 9), modelado como descrito na Equação 10 (ROGERSON, 2012).

$$y_i = b_{i0} + \sum_i^n b_{ij} x_{ij} + \varepsilon_i \quad (10)$$

Onde:

y_i = valor observado da variável dependente

x_{ij} = valor observado da variável independente j no local i

b = coeficientes locais

ε_i = erro aleatório

²⁹ O z -score é um teste de significância estatística, derivado de medidas de desvio padrão, que auxilia na decisão de rejeitar ou não a hipótese nula (a hipótese nula afirma que não existe um padrão espacial entre os valores associados às características em análise). O p -value indica a probabilidade de se ter rejeitado falsamente a hipótese nula. Ambas as estatísticas estão associadas à distribuição normal padrão. Essa distribuição relaciona os desvios-padrão com as probabilidades e permite que a significância e a confiança sejam atribuídas aos z -scores e aos p -values.

3.2.3. Análises exploratórias associadas ao planejamento urbano

A partir das análises estatísticas e dos resultados obtidos, foram feitas análises exploratórias relacionando os resultados do Índice Local de Moran (clusters) de ΔT_s com as variáveis λ_p , λ_c e λ_{va} , buscando ampliar a compreensão dos resultados e identificar o que representaria os altos e baixos valores de ΔT_s em termos de ocupação urbana e vegetação. Além disso, os agrupamentos de ΔT_s foram confrontados com dados disponíveis em banco de dados espaciais da Prefeitura de Belo Horizonte – IDE BHGEO (PREFEITURA DE BELO HORIZONTE, 2020) para verificar como os resultados estatísticos estão relacionados com as áreas verdes públicas e com os tipos de uso do solo urbano. Como se trata de análises exploratórias, além da interpretação dos resultados estatísticos, também foram feitas análises visuais e qualitativas dos dados.

Primeiramente verificou-se a relação dos agrupamentos de baixos valores de ΔT_s com a vegetação. Para isso, foram feitas seleções cruzadas entre mapas para analisar a relação entre os baixos valores de ΔT_s (mapa de cluster) e a presença de vegetação arbórea (mapa de λ_{va}). Considerou-se como presença de vegetação valores de λ_{va} iguais ou superiores a 0,1. Também foi verificada a quantidade de área arborizada com baixos valores de ΔT_s que se localizam em parques públicos, delimitados na camada “Parque” da IDE BHGEO. Além disso, os baixos valores de ΔT_s foram relacionados com a presença do corpo d’água existente no município, a Lagoa da Pampulha, pela sua expressividade quanto a sua extensão.

Em etapa posterior foram feitas análises dos agrupamentos de altos valores de ΔT_s com a ocupação urbana. As relações entre altos valores de ΔT_s e resultados do LISA para λ_p e λ_c foram extraídas buscando identificar áreas densamente ocupadas por edificações de alturas baixas. Para definir essa tipologia de ocupação, foram selecionados os polígonos com altos valores de ΔT_s correspondentes a altos valores de λ_p , mas excluindo-se as áreas que tinham altos valores de λ_c , por representarem majoritariamente áreas com edifícios altos [$(\lambda_p = HH) - (\lambda_c = HH)$].

Verificou-se ainda a relação de altos valores de ΔT_s com a presença de assentamentos informais e classes específicas de uso de edificações, identificadas respectivamente nas camadas “Vila e Favela” e “Tipologia de uso e ocupação por lote” da IDE BHGEO. Neste último mapa, as tipologias selecionadas foram: aterro sanitário, cemitério, clubes esportivos, estação de transporte coletivo, galpão, indústria, instituição de ensino, lote vago e shopping center. Essa seleção se justifica, pois, em uma análise visual verificou-se que são áreas extensas ocupadas por grandes equipamentos ou com grandes extensões de solo exposto, cujos materiais de cobertura das edificações ou do solo parecem contribuir para as altas temperaturas de superfície, conforme já verificado por Portela et al. (2020). Os assentamentos

informais, por sua vez, foram analisados por serem áreas densamente ocupadas e por terem uma tipologia própria de ocupação, com edificações precariamente construídas.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia descrita no capítulo 3. Inicialmente foram analisados os dados de temperatura (T_s) e de intensidade de temperatura de superfície (ΔT_s), em seguida os parâmetros de superfície urbana e, por último, as análises estatísticas e relações entre as variáveis.

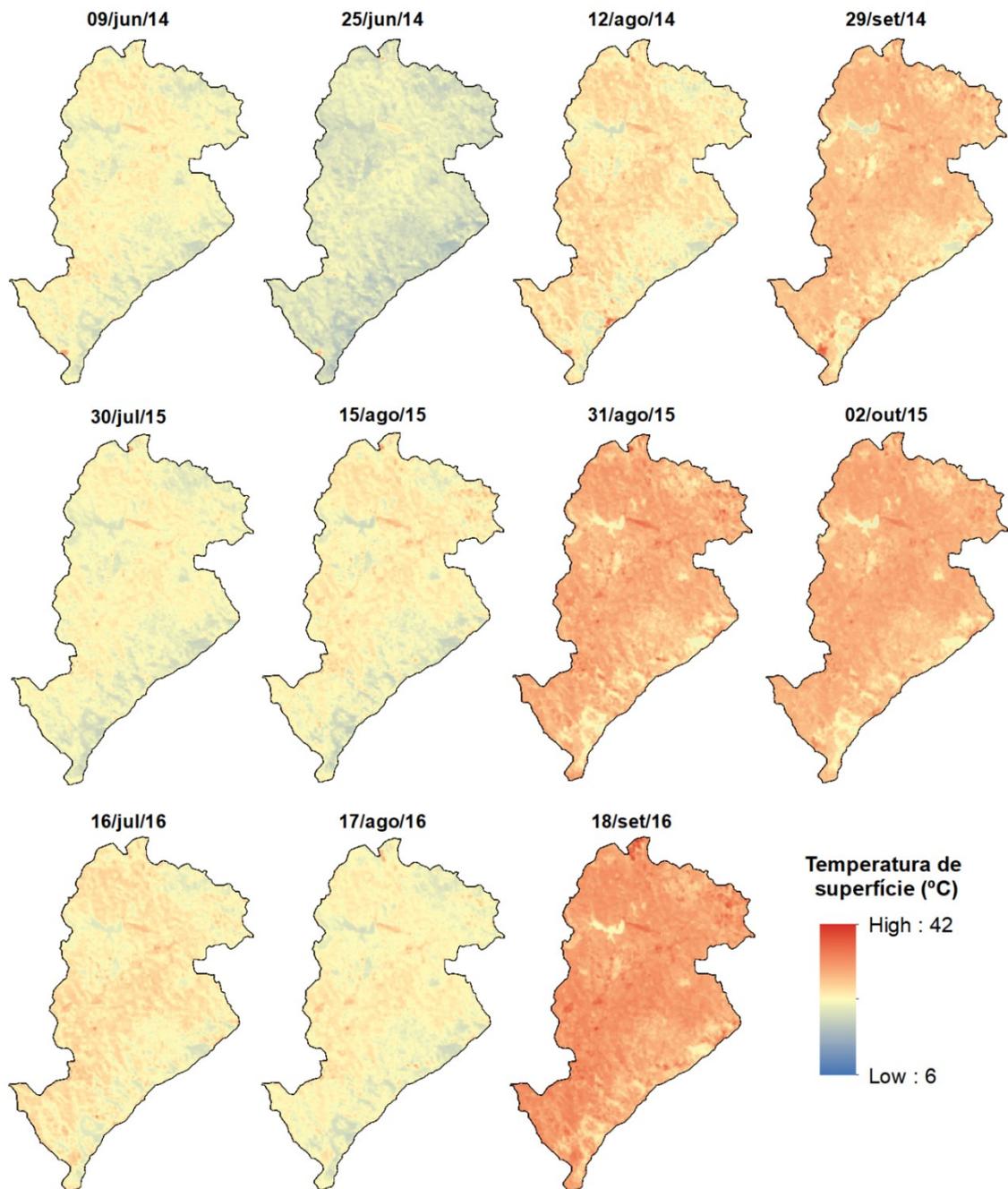
4.1. Temperatura de superfície e intensidade de temperatura de superfície

As imagens para o período entre janeiro de 2014 e dezembro de 2016 do satélite Landsat 8 (banda 10), disponíveis no site da *United States Geological Survey*, corresponderam a um total de 68. Desse total, a cidade de Belo Horizonte não apresentava cobertura de nuvens apenas em 13 imagens, sendo que destas, 11 foram consideradas representativas de período seco (Apêndice A). Reitera-se que a captura de todas as imagens ocorreu às 9:57 (hora local), ou seja, no período da manhã. Assim, todas as análises consideram apenas esse recorte temporal, representativo do aquecimento parcial das superfícies em um período curto do dia.

A Figura 10 apresenta as imagens resultantes da conversão do número digital captado pelo satélite em temperatura de superfície (T_s). As condições meteorológicas para todos os dias selecionados eram de céu claro e de estabilidade atmosférica, tendo em vista os sistemas atmosféricos atuantes que são característicos do período seco (Apêndice A). Nota-se uma variação de T_s nesse conjunto de imagens. Como a captura das imagens é sempre em um mesmo horário, fica evidente a associação dessa variação com a trajetória aparente do sol, contudo essa variação não pode ser explicada somente pela altura solar. É perceptível um aumento progressivo de T_s no período entre o solstício de inverno (21/06) e o equinócio (23/09) em todos os anos. Em data anterior ao solstício de inverno, na imagem de 09/jun/14, os valores de T_s foram mais altos, enquanto na imagem de 02/out/15, os valores de T_s foram mais baixos, comportamento que não seria o esperado, apontando que outros fatores, além da altura solar, podem ter causado interferência nessa variação.

No ano de 2016 há uma diferenciação quanto ao aumento gradativo de temperatura na imagem do dia 17/ago/16. Considerando que os dias de captura das imagens desse ano estavam sob a influência dos mesmos sistemas atmosféricos (Apêndice A), essa redução de T_s pode estar associada à precipitação e presença de umidade na superfície. De acordo com os dados diários da Estação Meteorológica de Belo Horizonte (OMM: 83587) (INMET, 2019a), houve acumulado de precipitação equivalente a 0,4 mm no dia 16/ago/16, ou seja, no dia anterior à captura da imagem.

Figura 10: Temperatura de superfície (T_s) - período entre 2014 e 2016



Fonte: Produzida pela autora

Esse volume pode ser considerado baixo do ponto de vista meteorológico³⁰, contudo pode ter contribuído para redução de T_s . Apresentamos aqui apenas uma hipótese para essa ocorrência, mas

³⁰ A partir das Notas Técnicas do Instituto Nacional de Meteorologia que definem dias secos como aqueles em que o total diário de chuva é inferior a 5 mm e os dias chuvosos são aqueles cujo total acumulado é igual ou superior a 5 mm (INMET, 2017, 2019b), entende-se que o dia 16/ago/16, anterior à captura da imagem, é caracterizado como um dia seco.

que precisa ser mais bem avaliada. Apesar dessas considerações, essa imagem não foi descartada da amostra por apresentar o mesmo comportamento quanto à variabilidade de T_s ao longo do território e por não ter grandes diferenças de temperatura em relação às demais.

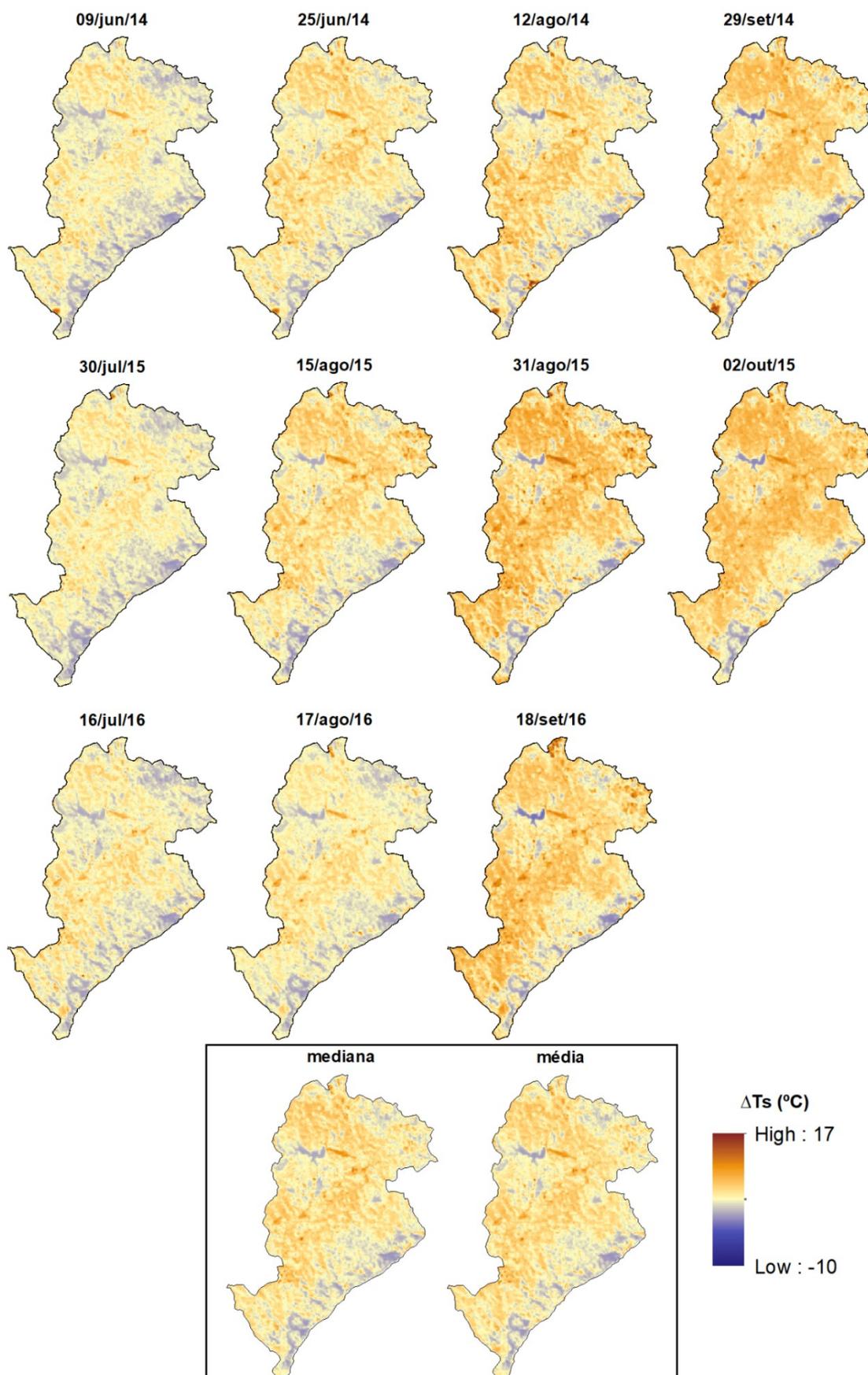
O resultado do tratamento e cálculo da intensidade de temperatura de superfície (ΔT_s) das 11 imagens, além dos mapas síntese da mediana e da média das imagens analisadas é representado na Figura 11. O comportamento da variação de T_s (Figura 10) e de ΔT_s (Figura 11) é o mesmo, corroborando a alteração da quantidade de radiação que chega às superfícies ao longo do período avaliado. Contudo, quando se analisa as imagens de ΔT_s , alguns efeitos específicos ficam mais evidentes, como o efeito do relevo, a presença de vegetação e corpos d'água.

Nas regiões de maiores altitudes, localizadas na Serra do Curral, ao longo do limite sul/sudeste do município, os valores de ΔT_s são mais baixos e geralmente negativos, ou seja, apresentam T_s menores do que aquelas registradas no ponto de referência (P_0), o qual está localizado em uma altitude média e com cobertura do solo representativa de vegetação densa. ΔT_s mais baixas ou negativas também ocorrem na região Nordeste, onde as altitudes são mais baixas em relação a P_0 , contudo há presença de vegetação mais densa. O mesmo ocorre nas áreas de parques nas regionais Pampulha, Leste e Centro-Sul, localizados em diferentes altitudes, mas que quando há presença de vegetação densa, ΔT_s também foi negativa em todas as imagens.

Os valores mais altos de ΔT_s , por sua vez, são observados na pista de pouso do aeroporto. Nas regionais Noroeste, Leste e Venda Nova os valores de ΔT_s também são altos. Essa distribuição da temperatura de superfície parece ir ao encontro dos resultados obtidos por Assis (1990), em que também foram observadas maiores temperaturas no aeroporto e em áreas urbanas com pouca vegetação.

Em uma análise visual das imagens de T_s (Figura 10) e de ΔT_s (Figura 11) é possível perceber a influência de propriedades geométricas da superfície, tais como ângulo de inclinação da superfície e exposição ao sol, na variação dos parâmetros de temperatura principalmente relacionada ao relevo, o que fica mais evidente na Figura 11, em que é possível perceber que áreas sombreadas ou com menor exposição ao sol no horário da captura das imagens têm T_s e ΔT_s mais baixos. As propriedades radiativas dos materiais, diante da variação do albedo e da emissividade de superfícies vegetadas e construídas, por exemplo, também exercem forte influência nessa variação.

Figura 11: Intensidade de temperatura de superfície (ΔT_s), mediana e média de todas as imagens



Fonte: Produzida pela autora

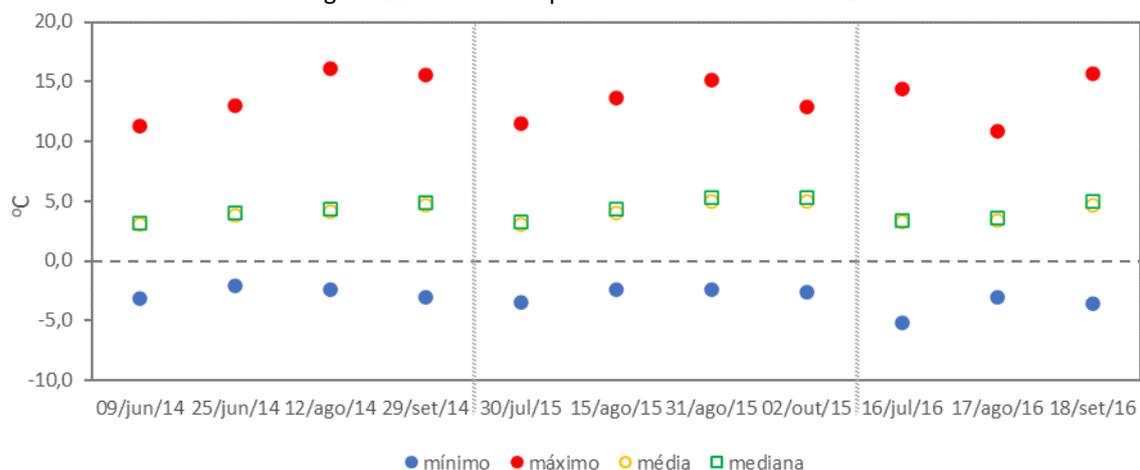
Quanto aos parâmetros estatísticos calculados para cada imagem e para o conjunto de dados (Tabela 4, Figura 12), verifica-se que a amplitude de ΔT_s foi entre 13 e 19°C. Esses valores foram maiores que os registrados em estudos para as cidades de São Paulo e Presidente Prudente (LOMBARDO, 2011; AMORIM, 2018), mas mais próximo de intervalos de T_s apontados para Goiânia no ano de 2010 (NASCIMENTO; OLIVEIRA, 2011), e em estudo mais recente na cidade de São Paulo (FERREIRA, 2019). Possivelmente a topografia de Belo Horizonte contribui para uma maior amplitude de ΔT_s se comparada às outras cidades mencionadas.

Tabela 4: Parâmetros estatísticos de ΔT_s para cada imagem selecionada e para as imagens correspondente à mediana e à média

data	Intensidade de temperatura de superfície (ΔT_s) - °C					
	mínimo	máximo	amplitude (máx - mín)	média	mediana	média dos desvios padrão
09/jun/2014	-3,2	11,3	14,5	3,0	3,2	1,2
25/jun/2014	-2,1	13,0	15,1	3,8	4,0	1,2
12/ago/2014	-2,4	16,1	18,5	4,1	4,3	1,4
29/set/2014	-3,1	15,6	18,7	4,6	4,9	1,3
30/jul/2015	-3,5	11,5	15,0	3,1	3,3	1,1
15/ago/2015	-2,4	13,6	15,9	4,0	4,3	1,3
31/ago/2015	-2,4	15,1	17,5	5,0	5,3	1,5
02/out/2015	-2,6	12,9	15,4	5,0	5,3	1,3
16/jul/2016	-5,2	14,4	19,6	3,3	3,4	1,2
17/ago/2016	-3,0	10,9	13,8	3,4	3,6	1,1
18/set/2016	-3,6	15,7	19,4	4,7	5,0	1,4
mediana	-2,1	11,5	13,6	3,9	4,1	1,2
média	-2,1	12,0	14,1	4,0	4,2	1,2

Fonte: Produzida pela autora

Figura 12: Gráfico dos parâmetros estatísticos de ΔT_s



Fonte: Produzida pela autora

Com relação à média e à mediana calculadas para cada imagem, observa-se sua pouca representatividade enquanto um valor absoluto. Contudo, é importante pontuar que a variação entre elas é de no máximo 0,3°C, o que demonstra que a média dos valores de ΔT_s e o número central desses valores são praticamente idênticos. Além disso, praticamente não houve variação entre os valores médios dos desvios padrão, estando próximos de um, o que indica que os valores de ΔT_s tem pouca dispersão em relação à média. Assim, as imagens resultantes do cálculo da média e da mediana para todas as imagens são semelhantes, bem como os valores mínimos e máximos. Na aplicação de métodos de estatística para análise da relação entre as variáveis de superfície e temperatura optou-se pelo uso da mediana como imagem síntese do período analisado, pois representa um valor central da série de dados, enquanto a média poderia conter distorções pontuais influenciada pelos valores extremos do período analisado.

4.2. Superfície urbana

As variáveis da superfície urbana foram calculadas utilizando três rotinas no programa QGIS (Apêndice C). Por questões de limitação de processamento de computador, foram parcialmente realizadas também no programa ArcGIS³¹. Utilizando um processador Core i7, 2.7 GHz e 8 GB RAM, o tempo de execução da rotina para cálculo de cada parâmetro é indicado na Tabela 5. O tempo de execução mostra o rápido processamento das informações para toda a extensão de um município em um computador doméstico, o que demonstra a viabilidade da aplicação das rotinas.

Tabela 5: Tempo de execução das rotinas e de processamento dos dados

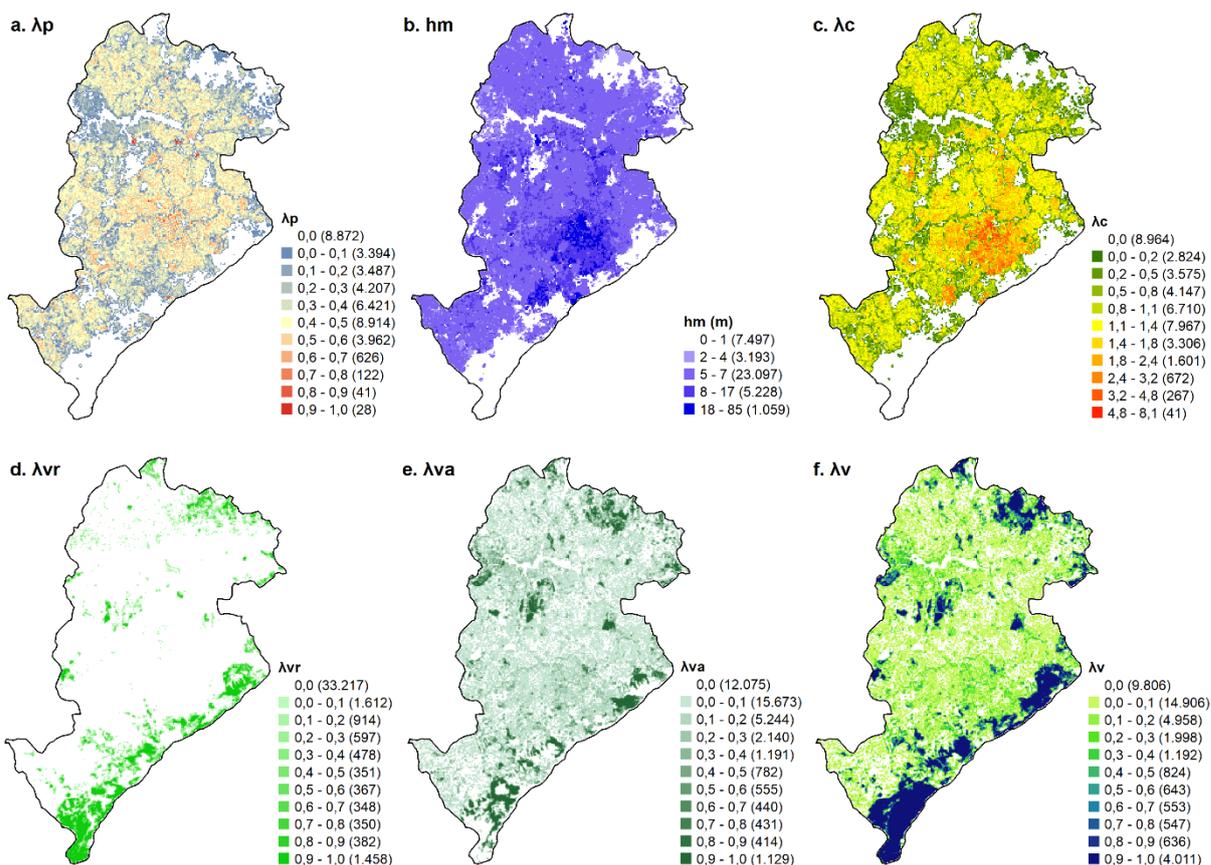
Parâmetro	Rotina no QGIS	Processamento no ArcGIS	Tempo total de cálculo
λ_p	30 min	2 min	32 min
h_m	1 h 02 min	-	1 h 02 min
λ_c	6 h 16 min	2 min	6 h 18 min
λ_v	09 min	-	09 min

Fonte: Produzida pela autora

³¹ Por limitações de processamento do computador, para os cálculos de λ_p e λ_c , a preparação das bases de dados foi executada no programa ArcGIS. Para λ_p a rotina constante no Apêndice C foi executada a partir do segundo. A execução do comando “Dissolve” foi realizada no programa ArcGIS, o que levou cerca de dois minutos para finalização. As rotinas completas para todas as variáveis foram executadas para uma área de 5km x 5km, o que demonstra que estão operando corretamente.

O resultado dos cálculos para cada variável é representado na Figura 13. O tamanho da malha de cálculo foi de 90x90 m, equivalente ao tamanho do pixel das imagens de intensidade de temperatura de superfície, o que resultou em cálculos para 40.074 polígonos que representam toda a extensão da cidade.

Figura 13: Mapas representativos do cálculo de cada parâmetro da superfície urbana



Fonte: Produzida pela autora

Os valores mais altos de λ_p (Figura 13a), entre 0,8 e 1,0, referem-se a grandes equipamentos urbanos que são o Estádio do Mineirão (na extremidade inferior da Lagoa da Pampulha), a Central do Correios e galpões comerciais adjacentes (abaixo da extremidade leste do aeroporto), o Minas Shopping (na regional Nordeste) e o BH Shopping (no extremo sul da regional Centro-Sul), mas também estão majoritariamente concentrados na regional Centro-Sul. Contudo, observa-se que na maior parte do município predominam valores até 0,5, ou seja, em que até 50% do polígono de 90x90m é ocupado por construção.

Quanto às alturas médias dos edifícios, h_m (Figura 13b), nota-se a maior expressividade de alturas entre 2 e 7m, que seriam equivalentes a edificações de até 2 pavimentos, o que aponta para uma baixa verticalização na maior parte da cidade. As maiores alturas se concentram na regional Centro-Sul, mas

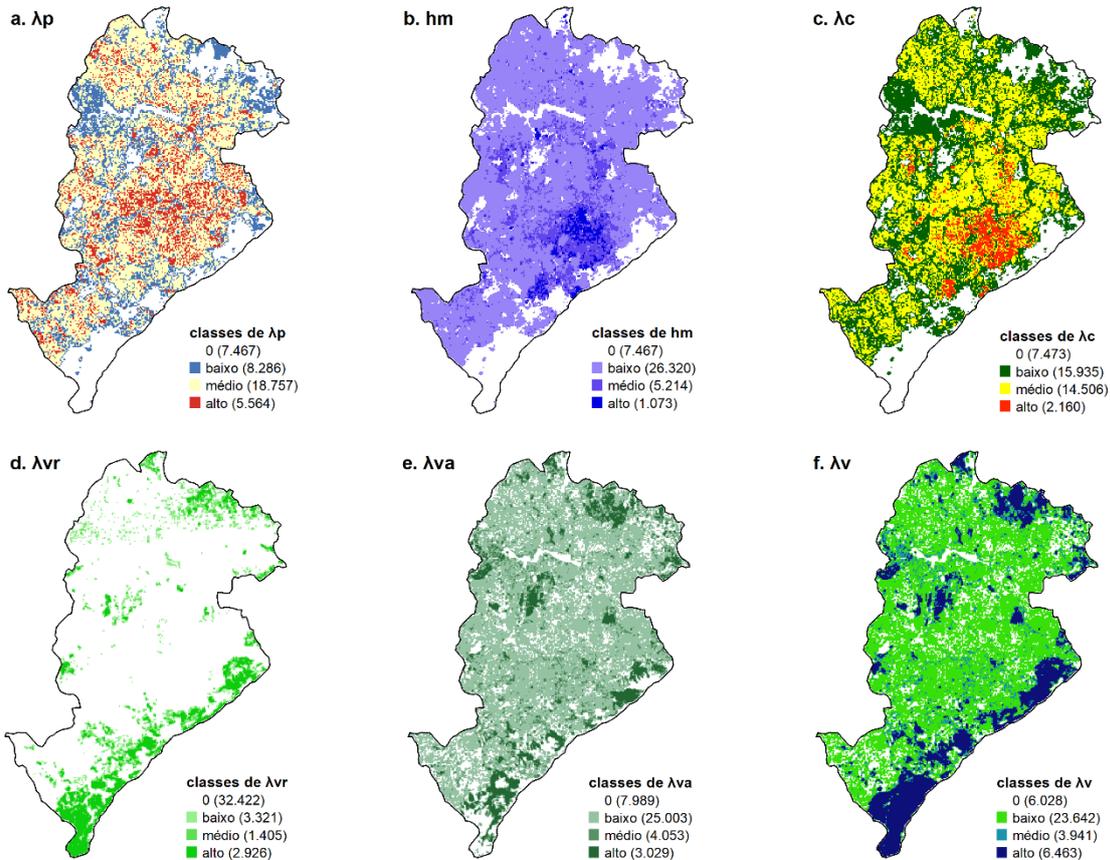
há uma maior dispersão de edifícios mais altos nas regionais Pampulha, Nordeste (ao longo da Av. Cristiano Machado) e Oeste.

O parâmetro λ_c (Figura 13c) parece confirmar essa verticalização verificada em h_m , mas que não se reflete em λ_p . Em λ_c não são mais evidenciados os pontos onde os valores de λ_p foram máximos, pois nesses locais as edificações possuem altura de até cinco pavimentos. E, por não terem grandes extensões e múltiplas fachadas como se observa em áreas com altos valores de λ_c , retornaram valores relativamente baixos desse parâmetro. Nas áreas em que há concentração das edificações mais altas é onde se observam os maiores valores de λ_c . Os menores valores, por sua vez, estão localizados onde há baixos intervalos de λ_p e h_m de um pavimento, que estão a oeste da regional Pampulha e ao longo da Lagoa da Pampulha, em parte das regionais Oeste e Barreiro e ao norte do município, na área da Granja Werneck e seu entorno imediato, principalmente.

Quanto à vegetação, verifica-se que a categoria rasteira λ_{vr} (Figura 13d) tem menor representatividade no território se comparada à vegetação arbórea λ_{va} (Figura 13e), contudo é evidente que os valores mais altos ocorrem em áreas contíguas para as duas categorias e representam majoritariamente as áreas de preservação ambiental e parques da cidade. No caso de λ_{va} , valores até 0,2 são os mais frequentes, o que parece refletir limites da lei de uso e ocupação do solo urbano, em que predominam valores entre 10% e 20% de permeabilidade para as áreas de lotes. Como não foi considerada a dimensão vertical da vegetação, como ocorreu no caso das edificações, não foi possível estabelecer uma relação tridimensional dessa variável. Contudo, como a vegetação rasteira tem menor representatividade em relação à arbórea e tem contiguidade espacial em relação a essa, a síntese dessas duas variáveis no parâmetro λ_v parece ser coerente.

A classificação dos parâmetros urbanos nas classes “baixo”, “médio” e “alto” é apresentada na Figura 14. Verifica-se que, apesar da tentativa de se encontrar áreas homogêneas quanto a esses parâmetros, para as representações de variáveis relacionadas às edificações (Figura 14a a 14c), ainda é visível a dispersão das classes no território municipal, sem uma configuração de regiões nitidamente homogêneas, como o que caracteriza, por exemplo, as LCZs (STEWART; OKE, 2012). Para a variável h_m nota-se maior homogeneidade de distribuição das classes, com áreas de altura “alta” concentradas principalmente na regional Centro-Sul, enquanto há um predomínio de altura “baixa” na maior parte do município. Nesse sentido, os resultados apontam, pela técnica aqui utilizada de classificação, a heterogeneidade do tecido urbano da cidade de Belo Horizonte. Quanto à representação da vegetação, praticamente não houve diferenciação entre os valores absolutos (Figura 13d a 13f) e as classificações (Figura 14d a 14f).

Figura 14: Mapas representativos da classificação de cada parâmetro da superfície urbana



Fonte: Produzida pela autora

Diante do resultado da classificação dos parâmetros urbanos, entende-se que é possível explorar outros métodos com agrupamentos espaciais e não apenas agrupamentos de valores absolutos para melhor identificar as relações entre as variáveis urbanas e sua relação com a temperatura de superfície.

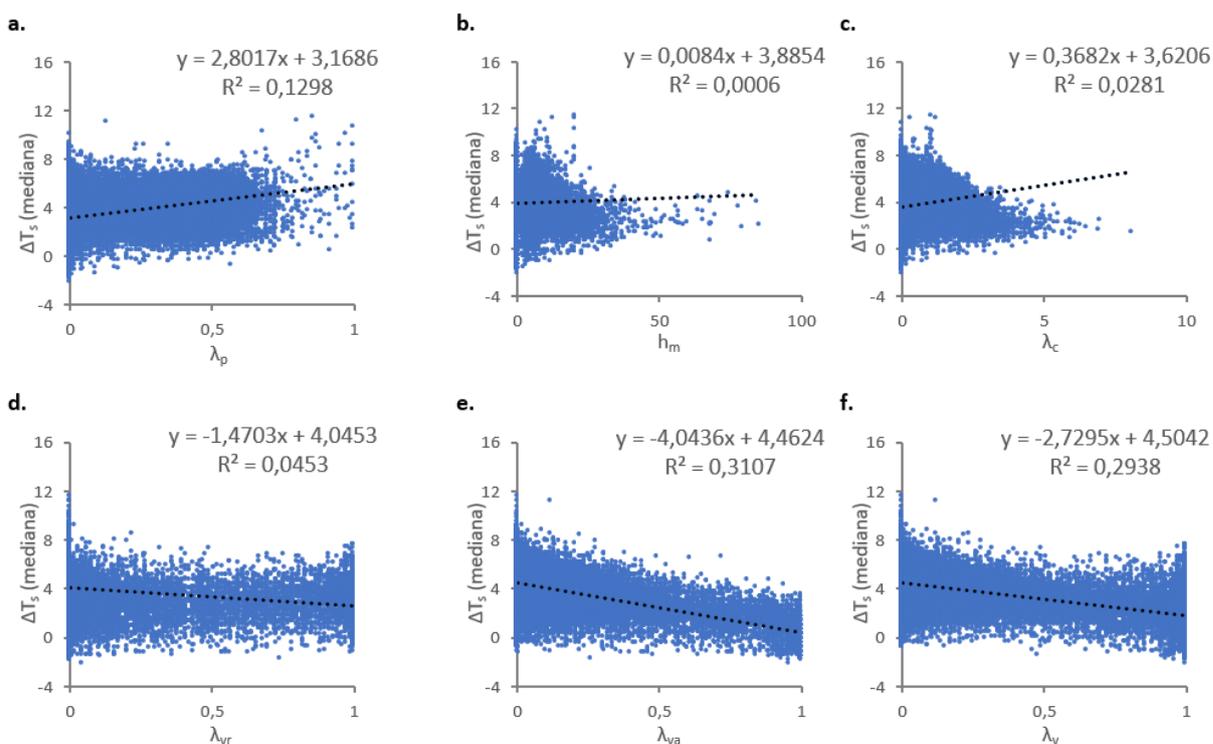
4.3. Análises estatísticas

Os resultados das análises estatísticas utilizando métodos não espaciais e espaciais são apresentados a seguir. Como já mencionado, a mediana da intensidade de temperatura de superfície (ΔT_s) foi utilizada como variável dependente e os parâmetros de superfície urbana (λ_p , λ_c , h_m , λ_v , λ_{vr} , λ_{va}) foram as variáveis explicativas da variação de ΔT_s .

A partir da aplicação do método de regressão linear, obteve-se os resultados mostrados na Figura 15. Nota-se que a dispersão do conjunto de dados observado é grande em todos os gráficos, o que retornou baixos valores de coeficiente de determinação (R^2) em todas as análises. Ou seja, a

variabilidade de ΔT_s é pouco explicada pelos parâmetros urbanos e a reta de regressão é pouco representativa do conjunto dos pontos. Apesar do baixo relacionamento linear entre as variáveis, verifica-se que a inclinação da reta foi positiva para as variáveis representativas dos edifícios (Figura 15a a 15c) e negativa para as variáveis que representam a vegetação (Figura 15d a 15f). Esses resultados indicam um aumento de ΔT_s com o aumento de λ_p , h_m e λ_c , sendo que a relação linear mais forte foi obtida com λ_p ($R^2=0,1298$). No caso da vegetação, o melhor ajuste do modelo de regressão linear ocorreu para a vegetação arbórea (λ_{va}), $R^2=0,3107$, indicando uma maior redução de ΔT_s com o aumento da razão de área plana para esse tipo de vegetação se comparado aos modelos resultantes para λ_{vr} e λ_v .

Figura 15: Gráficos de dispersão resultantes da análise de regressão linear



Fonte: Produzida pela autora

Diante da identificação da baixa correlação linear entre os parâmetros de superfície urbana e a intensidade de temperatura de superfície, partiu-se para a aplicação de técnicas de estatística espacial a fim de verificar se haveria exceções no conjunto de dados analisados e desenvolver hipóteses que não seriam possíveis testar por métodos estatísticos tradicionais (FOTHERINGHAM; BRUNSDON; CHARLTON, 2002).

Nesse sentido, primeiramente avaliou-se o nível de interdependência espacial para cada variável. A Tabela 6 apresenta os índices de autocorrelação espacial obtidos a partir da aplicação do método

Índice Global de Moran considerando os valores absolutos para cada variável e os valores classificados dos parâmetros de superfície urbana. Os resultados obtidos com a utilização dos algoritmos de função *Inverse Distance* e *Contiguity Edges Only* foram idênticos. Observa-se que para todas as variáveis o valor do índice de Moran é positivo e próximo de 1, o que indica forte padrão espacial e que há uma tendência de que valores altos estejam próximos uns dos outros assim como valores baixos tendem a estar próximos (ROGERSON, 2012). Comparando-se os índices de Moran calculados para os valores absolutos e valores classificados dos parâmetros urbanos, verifica-se que a autocorrelação espacial diminuiu para todos os parâmetros classificados, exceto para λ_p e h_m . As maiores reduções ocorreram para λ_v e λ_{va} , indicando que a classificação, da forma como foi proposta, diminuiu a autocorrelação espacial dessas variáveis. A tentativa de classificação manual, portanto, não resultou em maior homogeneidade dos dados ou aumento do relacionamento entre os dados (vizinhos) mais próximos.

Tabela 6: Índices de autocorrelação espacial global (Índice Global de Moran)

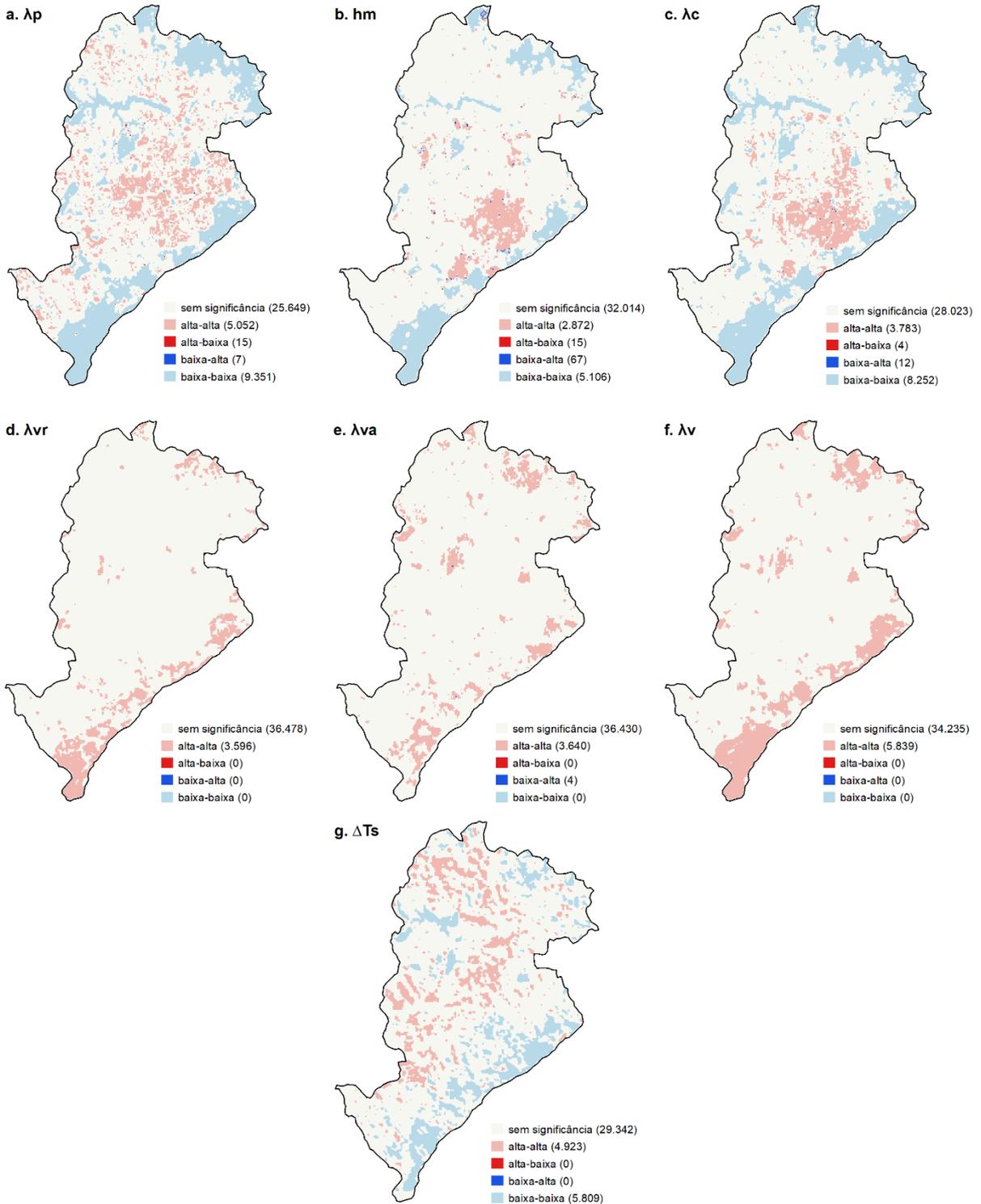
Parâmetro	Valores absolutos			Valores classificados		
	<i>I de Moran</i>	<i>z-score</i>	<i>p-value</i>	<i>I de Moran</i>	<i>z-score</i>	<i>p-value</i>
λ_p	0,770241	217,044819	0,000000	0,782203	220,415481	0,000000
h_m	0,715414	201,676852	0,000000	0,720449	203,020557	0,000000
λ_c	0,772519	217,698767	0,000000	0,741865	209,050414	0,000000
λ_{vr}	0,819234	230,878076	0,000000	0,815093	229,697634	0,000000
λ_{va}	0,742000	209,106649	0,000000	0,609027	171,622656	0,000000
λ_v	0,853949	240,639709	0,000000	0,724423	204,136757	0,000000
ΔT_s	0,908012	255,871597	0,000000			

Fonte: Produzida pela autora

Considerando que o teste global indicou um grau significativo de aglomeração espacial para todas as variáveis, a etapa seguinte consistiu na identificação de possíveis *clusters* e *outliers* com a aplicação do método Índice Local de Moran, com o objetivo de identificar agrupamentos dos valores absolutos para cada parâmetro. Os resultados estão representados na Figura 16.

Em uma análise geral, observa-se que, para todas as variáveis, praticamente não foram identificados *outliers*. Pequenas áreas em que os vizinhos mais próximos têm valores discrepantes foram identificadas nos parâmetros construtivos (Figura 16a a c), sendo que a maioria delas ocorreu na aplicação do método para h_m , mas que é insignificante no conjunto de dados analisado (0,6% do total de dados analisados).

Figura 16: Mapas resultantes da aplicação do Índice de Moran (*clusters e outliers*)



Fonte: Produzida pela autora

Ainda para os parâmetros construtivos, houve um predomínio de agrupamentos de valores baixos se comparados aos agrupamentos de valores altos. Os valores baixos são representados pela ausência de ocupação urbana, o que é expressivo em locais onde o cálculo de λ_p , h_m e λ_c não retornaram valores

(nulo ou zero) e conformam grandes áreas “homogêneas” em várias regiões do município. Os pontos quentes foram identificados em maior quantidade para λ_p (Figura 16a), em 12% do território, localizados em sua maioria na porção central do município, mas sem conformar nitidamente áreas homogêneas como ocorre para h_m e λ_c .

Em h_m (Figura 16b) é visível uma concentração de altos valores nas regionais Centro-Sul e Oeste e áreas menores nas regionais Pampulha e Nordeste, representando um total 7% da área do município. Para λ_c , os pontos quentes abrangem áreas maiores nas regionais Centro-Sul, Oeste, Pampulha e Nordeste e ainda se estende pela regional Leste, no sentido da Av. Cristiano Machado, indicando áreas densamente ocupadas não apenas quanto à verticalização, mas também quanto aos altos valores registrados de λ_p . Inclusive, em termos absolutos, os altos valores de λ_c , que totalizaram 10% do território municipal, correspondem a quase um “ponto médio” entre a área correspondente a altos valores de λ_p e h_m .

Para as variáveis representativas da vegetação (Figura 16d a f), apenas os valores altos formaram agrupamentos espaciais significativos, sendo que a vegetação rasteira (λ_{vr}) e a vegetação arbórea (λ_{va}) tiveram praticamente o mesmo quantitativo de agrupamentos (9% do total da área da cidade), no entanto estão distribuídas de forma diferenciada no território. Os altos valores de λ_v , por sua vez, totalizaram 15% da área municipal.

Na distribuição de ΔT_s (Figura 16g), os valores baixos estão agrupados em áreas de maiores altitudes na porção sudeste do município, na Lagoa da Pampulha e em áreas majoritariamente ocupadas por vegetação na porção norte da cidade, correspondendo a 15% do total da área do município. Quanto aos agrupamentos de valores altos de ΔT_s , não foi possível fazer uma associação direta com a ocupação urbana, vegetação ou relevo. Um local que se destaca como ponto quente é o Aeroporto da Pampulha, com sua extensa área pavimentada.

Os gráficos de dispersão e *boxplot* (Figura 17) indicam a distribuição da intensidade de temperatura por agrupamento espacial e a Tabela 7 apresenta a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação de ΔT_s , por variável, para os *clusters* observados.

Na Tabela 7, verifica-se que a média de ΔT_s para os agrupamentos dos parâmetros das edificações (λ_p , h_m e λ_c) é superior à média para os parâmetros de vegetação λ_{va} e λ_v . Os valores mais altos de λ_p , h_m e λ_c tem ΔT_s médio mais alto que os valores baixos desses agrupamentos. Em relação a λ_{vr} , a média da intensidade de temperatura foi superior à dos agrupamentos de baixos valores dos parâmetros edificados. O coeficiente de variação no conjunto de dados para todas as variáveis e em todos os tipos de agrupamento é alto ($CV > 0,25$), e revelam uma heterogeneidade significativa dos dados nos clusters de baixos valores para os parâmetros edificados e de altos valores para vegetação (λ_{va} e λ_v).

Tabela 7: Média e desvio padrão de ΔT_s (°C) para os *clusters* espaciais

Parâmetro	Média		Desvio padrão		Coeficiente de variação	
	alto-alto	baixo-baixo	alto-alto	baixo-baixo	alto-alto	baixo-baixo
λ_p	4,58	2,87	1,23	2,04	0,27	0,71
h_m	3,03	2,48	1,28	2,09	0,42	0,84
λ_c	3,37	2,79	1,20	2,08	0,36	0,75
λ_{vr}	2,90	-	1,51	-	0,52	-
λ_{va}	1,42	-	1,35	-	0,95	-
λ_v	2,06	-	1,65	-	0,80	-

Fonte: Produzida pela autora

Os gráficos de dispersão e principalmente os *boxplot* (Figura 17) evidenciam a heterogeneidade do conjunto dos dados e a dispersão dos valores de ΔT_s para todas as variáveis. É visível uma maior amplitude de ΔT_s para os valores baixos dos parâmetros construídos (Figura 17a a c). Em λ_p e h_m , os agrupamentos de pontos quentes (alto-alto) apresentam maior quantidade de valores externos e soltos (*outliers*) se comparado ao gráfico de λ_c . Quanto aos gráficos representativos de vegetação (Figura 17d a f), λ_{va} é o que tem menor mediana de ΔT_s e maior concentração dos pontos quentes em valores mais baixos de intensidade de temperatura.

A partir da constatação de que há agrupamentos espaciais para todas as variáveis avaliadas no estudo e que há diferença de comportamento de ΔT_s nesses agrupamentos, partiu-se para a identificação de possíveis relacionamentos entre a variável dependente, ΔT_s , e as variáveis explicativas da variação da intensidade de temperatura, por meio da aplicação do modelo de regressão geograficamente ponderada (GWR). O GWR representa o relacionamento entre as variáveis de forma contínua no espaço, pois considerou-se aqui que poderia existir variações locais contínuas de intensidade de temperatura.

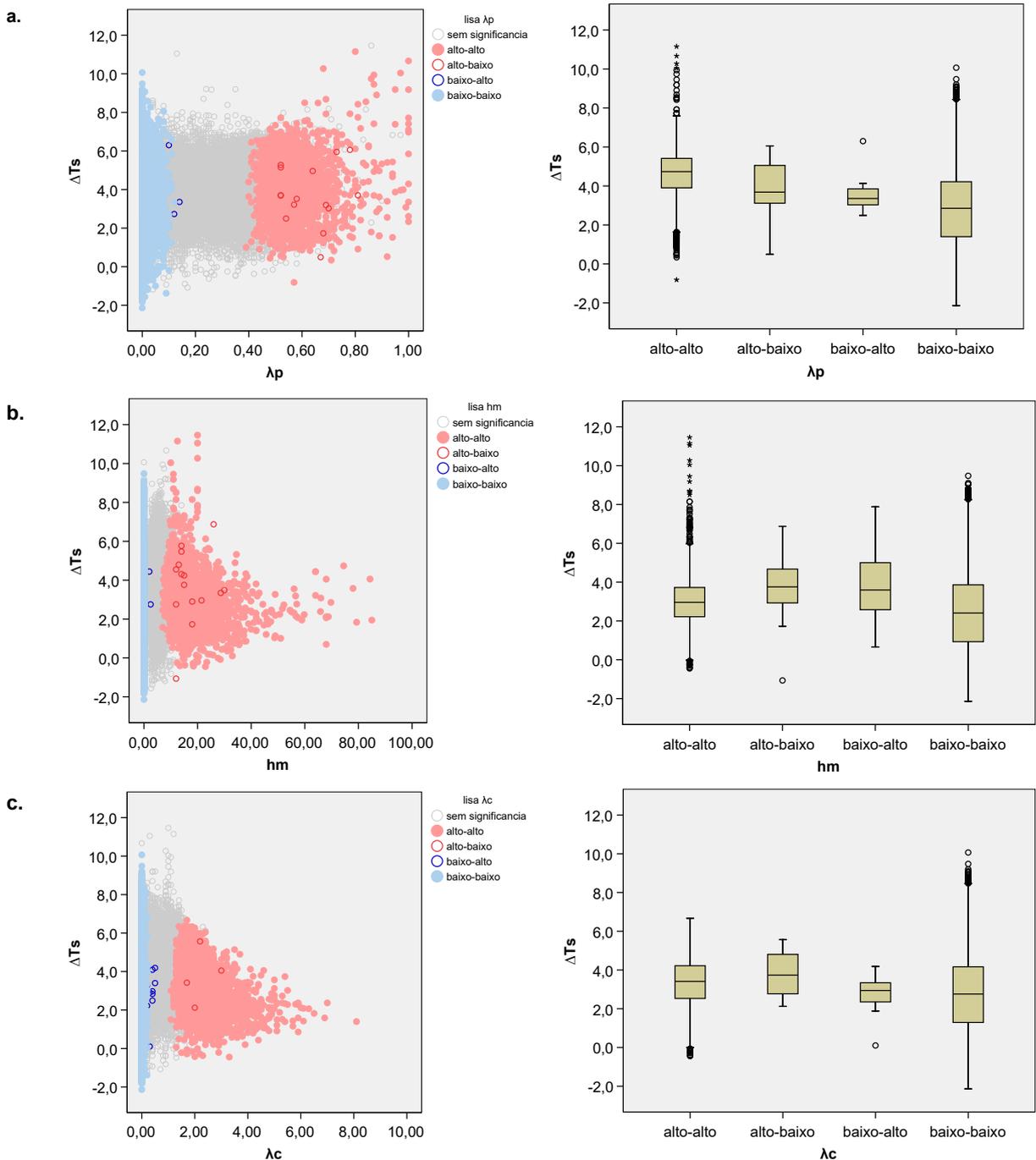
A Figura 18 representa os resultados dos escores de R^2 local. Inicialmente é preciso destacar que o modelo que teve a vegetação rasteira (λ_{vr}) como variável explicativa não retornou resultados devido a problemas de design do modelo, provavelmente porque as áreas com esse tipo de vegetação apresentam variações de intensidade de temperatura que estão associadas a outros parâmetros (por exemplo, às propriedades radiativas das superfícies).

Nos modelos em que os parâmetros construtivos foram utilizados para explicar a variação de ΔT_s (Figura 18a a c), verifica-se uma baixa predição da intensidade da temperatura, sendo que na maior parte do município o poder explicativo do método espacial foi praticamente nulo. Contudo, há uma região que se destaca pela melhor previsibilidade do modelo que é a Lagoa da Pampulha e seu entorno,

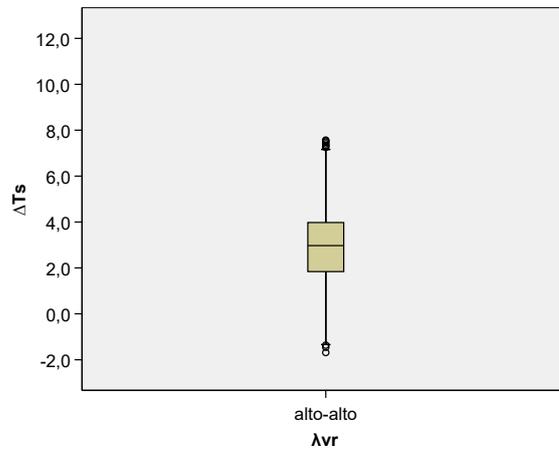
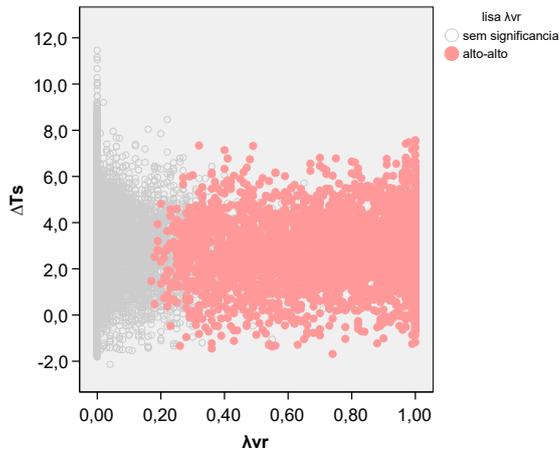
que tem baixos valores de λ_p , h_m e λ_c , e é uma área em que as intensidades de temperaturas são mais baixas.

Na análise de parâmetros isolados, o modelo que associa ΔT_s a λ_{va} (Figura 18e) foi o que teve maiores áreas com alto índice de regressão local (em cerca de 10% do território o R^2 foi superior a 0,53), sendo que os pontos de melhor ajuste do modelo ocorreram em áreas correspondentes aos agrupamentos de vegetação arbórea ($0,62 < R^2 < 0,90$).

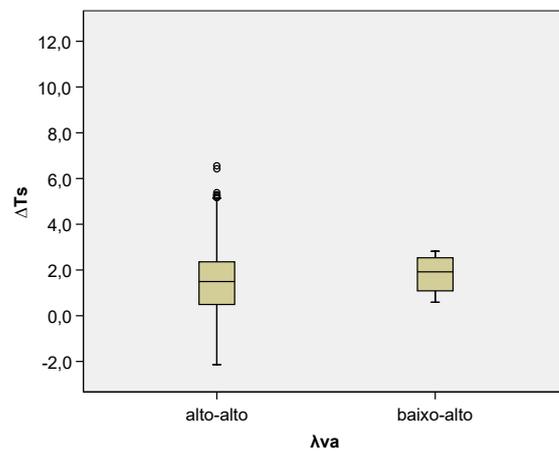
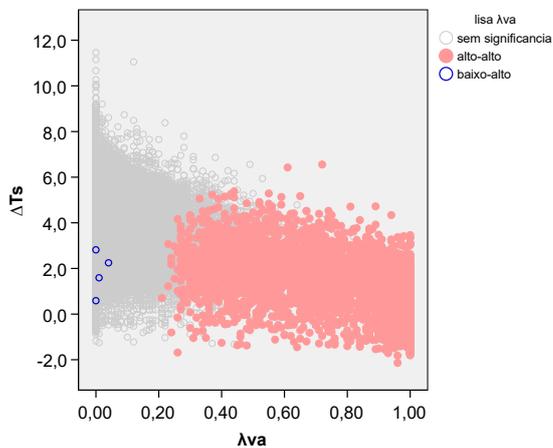
Figura 17: Gráficos de dispersão e de *boxplot* por agrupamento espacial



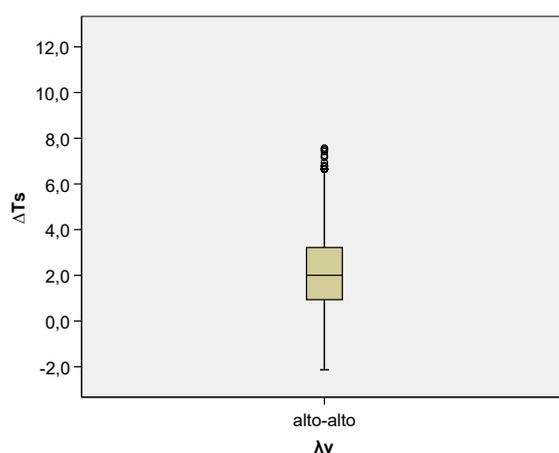
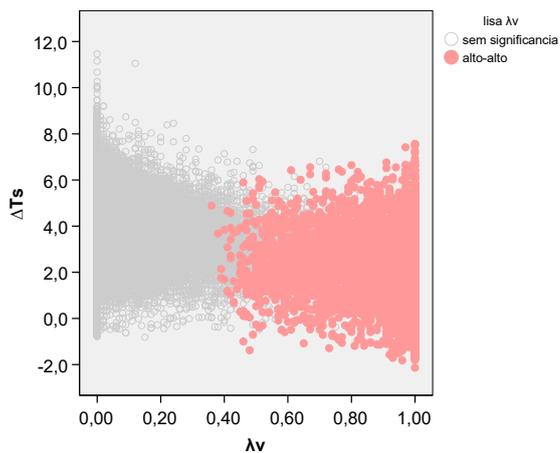
d.



e.

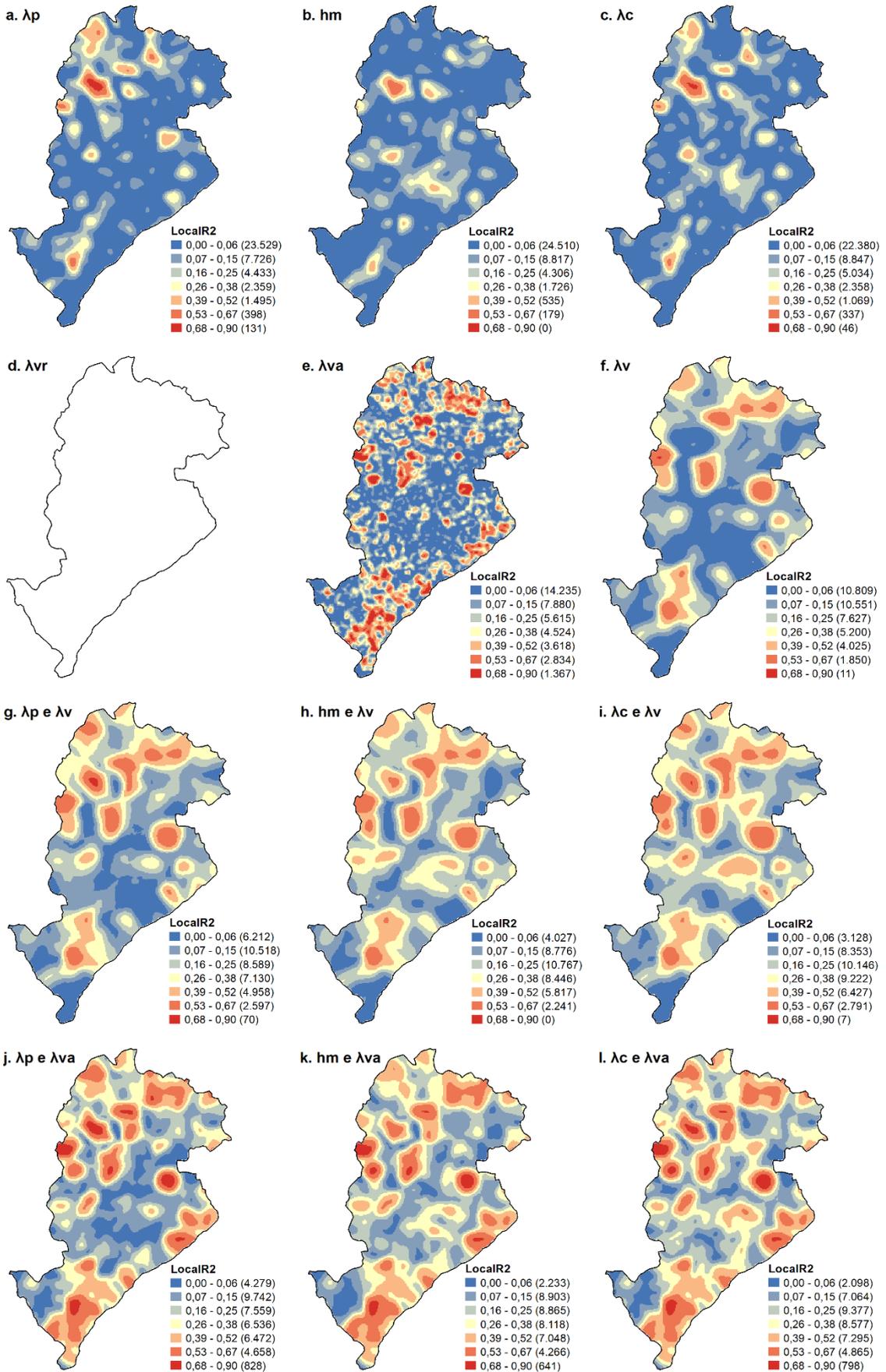


f.



Fonte: Produzida pela autora

Figura 18: GWR (R^2 local)



Fonte: Produzida pela autora

Passando para a análise da relação de ΔT_s com múltiplas variáveis (Figura 18g a l), nota-se que o modelo que utiliza as variáveis λ_c e λ_{va} como explicativas de ΔT_s (Figura 18l) foi o que retornou resultados mais satisfatórios se comparado aos demais. Verifica-se que o modelo consegue prever, de forma razoável, que as intensidades de temperatura variam em relação ao aumento de λ_c e à presença de λ_{va} . Assim, regiões de baixos valores de ΔT_s se destacam com boa previsibilidade na regional Centro-sul, em que λ_c é alto e praticamente não há vegetação, e na porção sudeste do município e na regional Norte, em que não há construções e λ_{va} é alto. Outras áreas que também retornaram altos valores de R^2 (maior que 0,62), foram o Jardim Zoológico, o Campus da UFMG e o Jardim Botânico da UFMG, áreas com baixos valores de λ_c e altos valores de λ_{va} .

No relatório de resumo estatístico gerado pelo ArcGIS para cada modelo (Tabela 8) também é possível observar a melhora de performance dos modelos quando associadas os parâmetros construtivos e de vegetação na explicação da variação de ΔT_s . O R^2 ajustado para o modelo $\Delta T_s \times \lambda_c$ e λ_{va} foi de 0,69, sendo que para os parâmetros construtivos analisados de forma isolada foi de até 0,59.

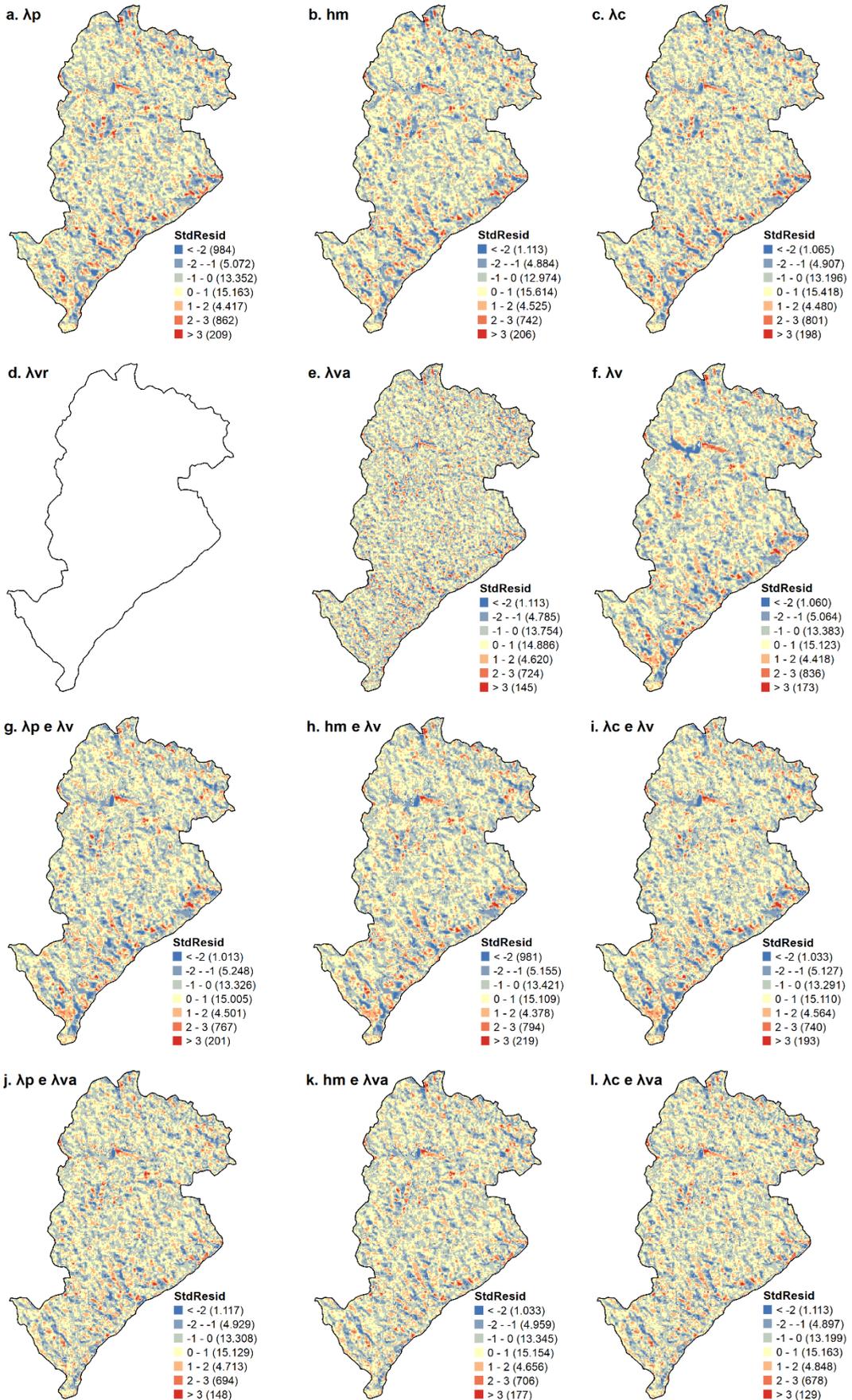
Tabela 8: Resumo estatístico para os modelos GWR

$\Delta T_s \times$ Parâmetro	<i>Residual Squares</i>	<i>Effective Number</i>	<i>Sigma</i>	<i>AICc</i>	R^2	R^2 Adjusted
λ_p	40.015,62	595,35	1,01	114.491,17	0,60	0,59
h_m	41.515,19	575,24	1,03	115.941,24	0,59	0,58
λ_c	40.281,89	589,23	1,01	114.747,89	0,60	0,59
λ_{vr}	-	-	-	-	-	-
λ_{va}	13.991,71	4.724,86	0,63	78.633,93	0,86	0,84
λ_v	41.891,27	308,64	1,03	115.938,07	0,58	0,58
λ_p e λ_v	39.531,26	403,15	1,00	113.755,78	0,61	0,60
h_m e λ_v	39.271,62	404,89	0,99	113.494,53	0,61	0,60
λ_c e λ_v	38.435,12	393,38	0,98	112.615,32	0,62	0,61
λ_p e λ_{va}	30.783,54	837,83	0,89	104.330,00	0,69	0,69
h_m e λ_{va}	31.010,66	818,27	0,89	104.600,41	0,69	0,68
λ_c e λ_{va}	30.047,49	832,18	0,88	103.351,70	0,70	0,69

Fonte: Produzida pela autora

Quanto aos resíduos padronizados (Figura 19), verifica-se que as estimativas de ΔT_s foram semelhantes em todos os modelos, sendo que cerca de 70% das estimativas retornaram resíduos entre -1 e 1 em todas as imagens.

Figura 19: GWR (resíduos padronizados)



Fonte: Produzida pela autora

Observa-se ainda que a intensidade de temperatura foi superestimada na área pavimentada do Aeroporto da Pampulha e subestimada, com diferentes variações, na Lagoa da Pampulha. Nos modelos representativos da relação de ΔT_s com as variáveis representativas dos parâmetros construtivos (Figura 19a a c), na porção sudeste do município, em áreas em que a topografia é mais complexa e há presença de vegetação, é visível uma dificuldade do modelo em prever a intensidade da temperatura, com áreas em que essas são sub ou superestimadas. Os modelos em que os parâmetros construtivos e a vegetação arbórea foram utilizados para explicar a variação de ΔT_s , (Figura 19j a l), por sua vez, tiveram as melhores predições dentre todos os modelos analisados.

A partir do conjunto de métodos estatísticos utilizados, verifica-se que é possível explicar a variação da intensidade da temperatura de superfície por parâmetros de superfície urbana. A razão de área completa associada à presença de vegetação arbórea foram as variáveis que melhor explicaram essa variação. Além disso, observa-se que os métodos de estatística espacial, cada um com sua capacidade explicativa, tiveram melhor desempenho que os métodos não espaciais, indicando a dependência espacial das variáveis. Para complementar esses resultados e com objetivo mais direcionado ao planejamento urbano, foram feitas análises exploratórias dos dados e resultados, apresentadas a seguir.

4.4. Análises exploratórias associadas ao planejamento urbano

As análises exploratórias de dados e resultados com foco específico no planejamento urbano foi realizada por meio de avaliações visuais, interpretações dos resultados estatísticos e conhecimento prévio do território municipal.

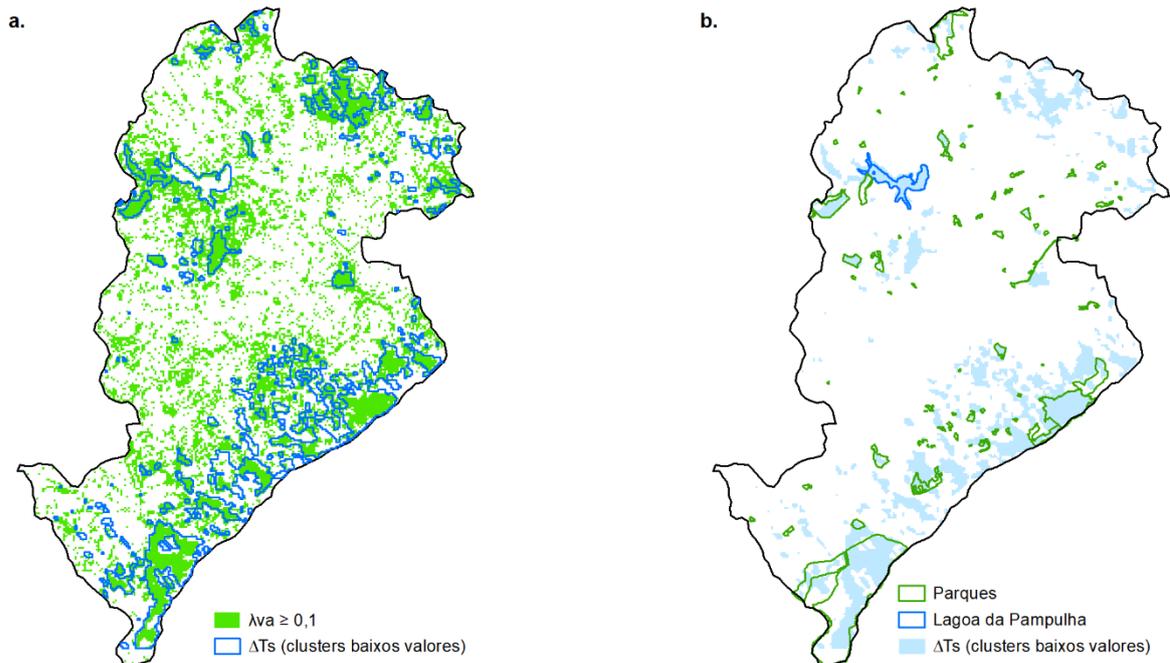
Para essas análises considerou-se como representação da intensidade da temperatura de superfície os agrupamentos de valores altos e baixos do mapa de clusters de ΔT_s (Figura 16g). Nesse mapa, dos 40.074 polígonos, 5.809 foram classificados como agrupamento de valores baixos (15% do total de polígonos) e 4.923 como agrupamento de valores altos (12% do total de polígonos).

Quanto a relação dos agrupamentos de baixos valores de ΔT_s com a vegetação (Figura 20), verificou-se que 68% desse conjunto de polígonos corresponde a áreas com presença de vegetação arbórea ($\lambda_{va} \geq 0,1$), sendo que 47% das áreas arborizadas e com ΔT_s baixo estão localizadas dentro dos limites de parques públicos ou unidades de conservação ambiental. A variação de ΔT_s nesse conjunto de dados foi de cerca de 5°C, com valores mínimo e máximo de -2,14 °C e 2,63°C, respectivamente.

Outra parcela de baixos valores de ΔT_s correspondeu a áreas onde as edificações são baixas, de uso predominantemente residencial e com presença de vegetação arbórea esparsa, verificada por meio

de análise visual. A presença de vegetação, nesses casos, não foi representada no mapa de vegetação, seja por erro ou pela acurácia utilizada no modelo de classificação aplicado pela Prefeitura Municipal, o que apontou uma limitação do dado de vegetação utilizado neste estudo. A área da Lagoa da Pampulha, por sua vez, correspondeu a 4% do total de polígonos de valores baixos de temperatura, com valores mínimo e máximo equivalentes a $-0,79^{\circ}\text{C}$ e $2,41^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

Figura 20: Mapas com representação de agrupamentos de baixos valores ΔT_s , associados a presença de vegetação arbórea (a), parques e lagoa (b)



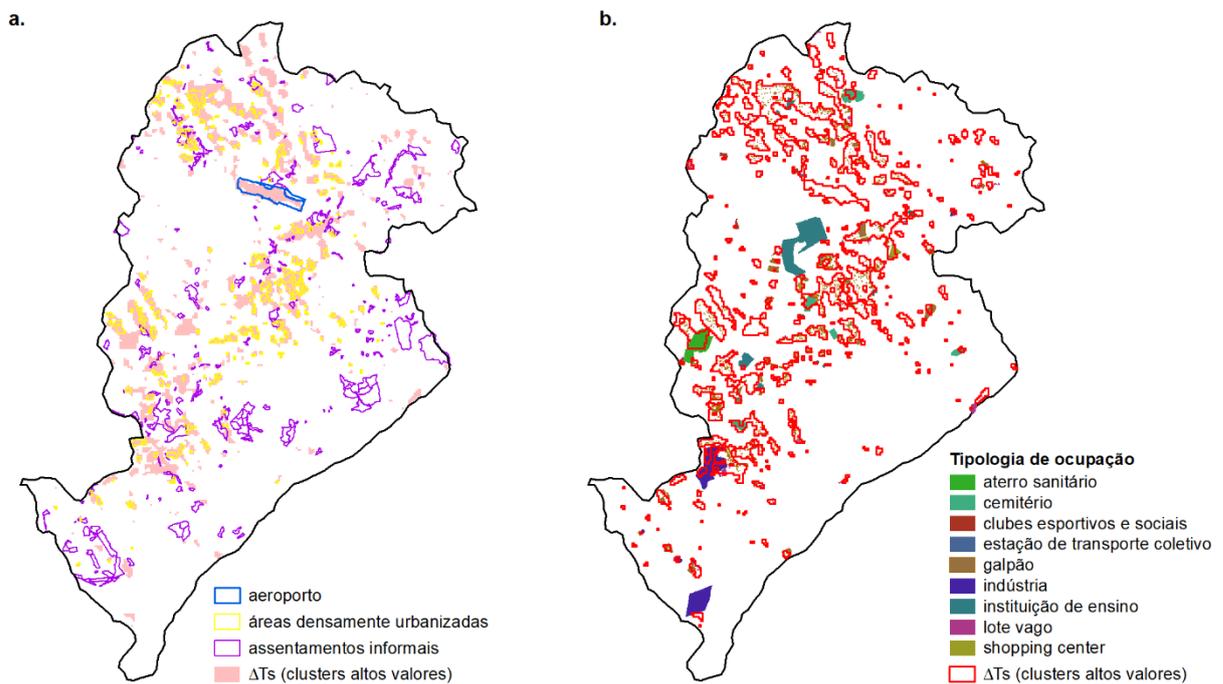
Fonte: Produzida pela autora

Em relação às análises dos agrupamentos de altos valores de ΔT_s com a ocupação urbana (Figura 21), verificou-se que 19% do total desse conjunto correspondeu a áreas densamente urbanizadas com altos valores de λ_p e onde não há altos valores de λ_c [$(\lambda_p = HH) - (\lambda_c = HH)$]. 7,5% desse total, por sua vez, correspondeu aos assentamentos informais. A pista do aeroporto da Pampulha, elemento que se destaca nas imagens de temperatura de superfície com altos valores, correspondeu a 3,7% dos polígonos desse agrupamento.

Quanto às tipologias de ocupação (Figura 21b), cerca de 60% dos polígonos de valores altos de ΔT_s tem como usos as tipologias de edificações selecionadas como áreas de grandes equipamentos ou com grandes extensões de solo exposto. Dessa seleção de usos, a tipologia que aparece de forma mais expressiva relacionada a altos valores de ΔT_s foram os galpões (43% do total de valores altos) e, em seguida, os lotes vagos (19% do total de valores altos). Os lotes ocupados por indústrias e instituições de ensino representaram cerca de 4% dos polígonos de alto ΔT_s , enquanto aterro sanitário e cemitérios

corresponderam a cerca de 2% do total de valores altos. As demais tipologias tiveram valores menores ou iguais a 1% de representatividade. Essas porcentagens correspondem a polígonos que possuíam alguma das tipologias selecionadas. É possível que um mesmo polígono tenha mais de uma tipologia e foi contabilizado mais de uma vez nesses percentuais. Portanto, as porcentagens não indicam áreas ocupadas, mas a relação da unidade espacial utilizada no estudo (polígono de 90 x 90m) com os usos classificados pela Prefeitura Municipal de Belo Horizonte.

Figura 21: Mapas com representação de agrupamentos de altos valores ΔT_s , associados a áreas densamente urbanizadas e assentamentos informais(a); tipologia de ocupação (b)



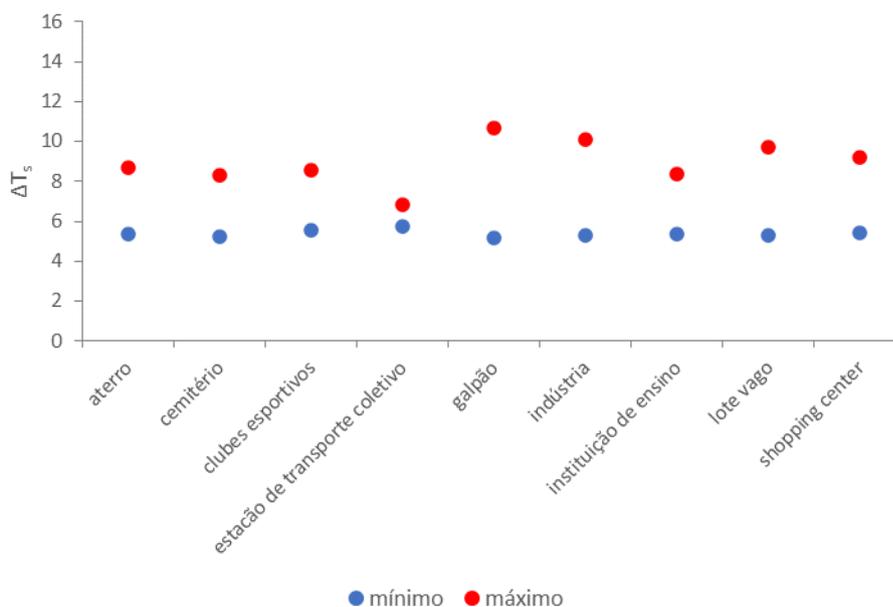
Fonte: Produzida pela autora

A variação de ΔT_s nas análises de agrupamentos de altos valores foi de até 6°C (Figura 22). A maior amplitude de temperatura por tipologia de ocupação foi registrada para os galpões que tiveram a maior representatividade de usos específicos selecionados e que provavelmente está associada à variedade de materiais de cobertura dessas edificações, que podem apresentar diferentes albedos e emissividades, o que consequentemente interfere na temperatura de superfície e no balanço de energia urbano (Equação 2).

A partir dessas análises, para o caso específico de Belo Horizonte, no período seco e limitado ao horário de captura da imagem de satélite, foi possível inferir que a presença de vegetação arbórea contribui significativamente para os baixos valores de ΔT_s , enquanto as áreas urbanas densamente ocupadas e sem presença de vegetação, além de áreas de grandes equipamentos ou com grandes extensões de solo exposto foram aquelas com maiores registros de ΔT_s . Esses resultados apontam grande

convergência com estudo anterior realizado para Belo Horizonte (ASSIS, 1990), mas avança diante da disponibilidade tecnológica para a análise de dados e a possibilidade de aplicação rápida e controlada da metodologia aqui definida. Também apresenta similaridade quanto aos resultados encontrados em outros estudos semelhantes realizados no mundo e no Brasil (GELETIČ; LEHNERT; DOBROVOLNÝ, 2016; FERREIRA, 2019; PORTELA et al., 2020).

Figura 22: Valores mínimos e máximos de ΔT_s por tipologia de ocupação urbana



Fonte: Produzida pela autora

Essas análises exploratórias, apesar de qualitativas e resultantes de interpretações visuais, apontam para um recorte mais específico do conjunto de dados analisados, mostrando com maior especificidade o que representam os extremos de valores ΔT_s em termos de ocupação urbana e vegetação. Por meio dessas análises foi possível qualificar uma parcela dos pontos dos gráficos de dispersão (Figura 17a, c e e) quanto aos seus atributos urbanos, demonstrando a importância da associação de técnicas diversas para análise da diversidade urbana. Além disso, indica que modelos esquemáticos de representação da variação da temperatura de superfície no tecido urbano (Figura 4) são indicativos, mas precisam ser melhor detalhados para diferentes tipos de cidades, em diferentes condições climáticas, tendo em vista principalmente a associação com as escalas climáticas e o objetivo a que se destina a análise de relação entre as variáveis.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma proposta metodológica que possibilitou analisar a relação entre os parâmetros da superfície urbana representativos das edificações e da vegetação na variação da intensidade da temperatura de superfície em período seco. A proposta metodológica pode ser reproduzida para outras áreas de estudo, o que amplia a sua aplicabilidade para além da área utilizada neste estudo. A análise se restringiu ao horário de captura de imagens do satélite Landsat na cidade de Belo Horizonte, que ocorre no período da manhã.

Quanto aos métodos utilizados de coleta e tratamento de dados, as técnicas aplicadas foram validadas em todas as suas etapas e se mostraram de fácil reprodutibilidade em especial pela utilização majoritariamente de plataforma SIG de acesso livre e gratuito (programa QGIS) e pela possibilidade de processamento em lote das informações (como no caso do tratamento das imagens de satélite). A implementação de rotinas de cálculo para os parâmetros urbanos também se mostrou eficiente para o processamento de um grande volume de informações de forma padronizada e em pouco tempo.

A metodologia mostrou-se uma contribuição inovadora da pesquisa, pois demonstra a capacidade de generalização do tratamento dos dados e obtenção de resultados, mas também uma alternativa para avaliação periódica e contínua do território, permitindo o monitoramento de áreas urbanas, por meio de um processo dinâmico e rápido. Além disso, por utilizar base de dados vetorial, permite a variação da escala de análise (tamanho e forma do polígono) e a aplicação dos parâmetros calculados em outros tipos de estudo e como dado de entrada em modelos de balanço de energia, por exemplo. Cálculos de parâmetros da superfície urbana utilizando diferentes formas de polígono para análise da superfície em entorno de estações meteorológicas foram feitas durante o desenvolvimento da tese (TUZANI; FERREIRA; ASSIS, 2018; OLIVEIRA et al., 2020), demonstrando a diversidade de aplicação da metodologia aqui desenvolvida.

Quanto à coleta e tratamento de dados, a seleção de imagens de satélite do canal termal para o período seco indicou um padrão de distribuição de T_s bastante semelhante em todas elas, sendo que as imagens síntese de média e mediana de ΔT_s retornaram valores semelhantes, indicando que o método de seleção das 11 imagens no intervalo de tempo de dois anos parece satisfatório e coerente com fenômenos atmosféricos associados tanto a macro como a microescala.

A representação da superfície urbana por meio de relações de áreas dos elementos construídos e da vegetação, além da altura das edificações se mostrou capaz de retratar a variabilidade de ocupação e densidade construída no território da cidade. A razão de área completa dos edifícios λ_c revelou-se como uma síntese dos parâmetros de área plana (λ_p) e altura (h_m) e melhor representativo da tridimensionalidade da superfície construída.

Em relação à hipótese inicial da pesquisa de relação entre os parâmetros da superfície urbana e a temperatura de superfície, confirmou-se que a variável climática, expressa em termos da intensidade da temperatura de superfície (ΔT_s), varia com a composição da superfície urbana, com uma relação positiva quando explicada por elementos construídos e negativa quando relacionada com a vegetação, especialmente a vegetação arbórea. Contudo, os modelos de regressão linear que apresentam essas relações são pouco explicativos, mostrando-se insuficientes para estabelecer uma relação linear entre as variáveis.

Os modelos estatísticos espaciais, por sua vez, apontaram que há uma forte autocorrelação e dependência espacial dos dados analisados e na relação entre as variáveis, indicando que as análises espaciais são mais adequadas no estudo da variação de ΔT_s associada à superfície urbana. Com o método Índice Local de Moran foi possível identificar os agrupamentos (*clusters*) de valores baixos e altos de ΔT_s e estabelecer várias relações com os parâmetros de superfície urbana, não apenas quantitativas, mas também qualitativas.

Já os modelos de regressão geograficamente ponderada (GWR) mostraram melhor desempenho se comparados aos modelos de regressão linear, mas ainda com uma baixa capacidade de predição de ΔT_s . Nos casos em que mais de uma variável da superfície urbana foi utilizada como explicativa da variação da temperatura, houve melhora na performance do modelo, sendo que o melhor ajuste ocorreu quando se utilizou as variáveis explicativas λ_c e λ_{va} de forma concomitante.

Nas análises específicas com foco no planejamento urbano e na tipologia de ocupação, verificou-se que as análises exploratórias, apesar de serem qualitativas e dependerem de uma interpretação visual dos resultados, apontaram para um recorte mais específico do conjunto de dados analisados, mostrando com maior especificidade o que representam os extremos de valores ΔT_s em termos de ocupação urbana e presença de vegetação, além da relação da variável dependente com os materiais das superfícies. Nessas avaliações foi possível identificar áreas específicas da cidade em que ocorrem os extremos de ΔT_s , corroborando com a explicação da hipótese da pesquisa de que a presença de vegetação arbórea contribui significativamente para os baixos valores de ΔT_s . Além disso, identificou-se que as áreas urbanas densamente ocupadas por edifícios de baixa altura e sem presença de vegetação, além de áreas de grandes equipamentos ou com grandes extensões de solo exposto foram aquelas que apresentaram maiores registros de ΔT_s .

Ressalta-se novamente limitações da pesquisa quanto ao horário de captura da imagem de satélite, em período da manhã, o que não representa a condição extrema da ilha de calor da superfície urbana e não consegue demonstrar sua variação durante todo o dia. Mesmo assim, as indicações de áreas de altas temperaturas nesse horário chamam a atenção para o tipo de ocupação urbana e, possivelmente,

da associação com os materiais utilizados nas coberturas das edificações, o que pode contribuir não só para o incremento da temperatura de superfície durante o dia, mas também alterar de forma mais significativa o balanço de energia na microescala. Essas constatações podem servir de suporte à decisão para o planejamento urbano e para a definição de recomendações quanto ao tipo de cobertura do solo em determinadas áreas da cidade.

Outra limitação do estudo refere-se a possíveis erros na identificação da vegetação arbórea esparsa ou indivíduos arbóreos, sendo necessário checar se é possível identificar esses indivíduos e suas respectivas áreas a partir dos dados disponíveis na Prefeitura de Belo Horizonte. Além disso, as áreas impermeáveis de ruas e lotes, também parecem ter influência na variação de ΔT_s , assim como a topografia, contudo não se chegou a modelos de representação suficientes dessas variáveis, o que demanda continuidade de estudos para cumprir essa lacuna.

A partir dos resultados e discussões apresentadas, alguns pontos norteadores e de possíveis avanços em trabalhos futuros são sugeridos a seguir:

- Avaliar a relação entre a temperatura de superfície e os parâmetros da superfície urbana ao longo do dia, principalmente à noite, e em período úmido;
- Definir um parâmetro para representação das áreas impermeáveis e avaliar sua influência na variação de ΔT_s ;
- Verificar a influência da topografia na variação de ΔT_s e integrar esse parâmetro às análises estatísticas para avaliar se há melhoria de performance dos modelos de regressão;
- Avaliar possíveis relações dos parâmetros urbanos e de temperatura de superfície com outras camadas de mapas disponíveis na IDE BHGEO, inclusive o índice de vulnerabilidade de Belo Horizonte, para proposição de recomendações ao planejamento urbano.

Diante de todo o trabalho desenvolvido, espera-se este seja uma contribuição para a ampliação do conhecimento da relação entre variável climática e parâmetros urbanos e que os métodos e técnicas apresentados auxiliem na solução de lacunas do conhecimento na área do clima urbano.

É importante destacar que esta pesquisa teve um caráter interdisciplinar, que integrou várias áreas de conhecimento e não apenas a de formação primeira na arquitetura e urbanismo. Buscou-se uma conexão do olhar das ciências sociais com as técnicas da geografia e das ciências exatas para a explicação dos fenômenos. Neste sentido, espera-se que também possa ter contribuído para uma reflexão sobre a prática do planejamento urbano, tendo em vista que o clima urbano é consequência da superfície que construímos cotidianamente.

REFERÊNCIAS

- ABBAGNANO, N. **Dicionário de filosofia**. São Paulo: Martins Fontes, 2007.
- AIDA, M. Urban albedo as a function of the urban structure - A model experiment. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 23, n. 4, p. 405–413, ago. 1982.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013.
- AMORIM, M. C. C. T. Spatial variability and intensity frequency of surface heat island in a Brazilian city with continental tropical climate through remote sensing. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 9, p. 10–16, jan. 2018.
- AMORIM, M. C. C. T. Ilhas de calor urbanas: métodos e técnicas de análise. **Revista Brasileira de Climatologia**, p. 22–46, 2019.
- ANSELIN, L. Local indicators of spatial association - LISA. **Geographical Analysis**, v. 27, p. 91–115, 1995.
- ARNFIELD, A. J. An approach to the estimation of the surface radiative properties and radiation budgets of cities. **Physical Geography**, v. 3, n. 2, p. 97–122, 1982.
- ARNFIELD, A. J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **International Journal of Climatology**, v. 23, n. 1, p. 1–26, jan. 2003.
- ASSIS, E. S. **Mecanismos de desenho urbano apropriados a atenuação da ilha de calor urbana: análise de desempenho de áreas verdes em clima tropical**. Dissertação (mestrado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1990.
- ASSIS, W. L. **O sistema clima urbano do município de Belo Horizonte na perspectiva tempo-espacial**. Tese (Doutorado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- ASSIS, W. L.; ABREU, M. O clima urbano de Belo Horizonte: análise tempo-espacial do campo térmico e hídrico. **Revista Ciências Humanas**, v. 10, n. 1, p. 47–63, 2010.
- AZHDARI, A.; SOLTANI, A.; ALIDADI, M. Urban morphology and landscape structure effect on land surface temperature: Evidence from Shiraz, a semi-arid city. **Sustainable Cities and Society**, v. 41, p. 853–864, ago. 2018.
- BAGNOULS, F.; GAUSSEN, H. Estação Sêca e Índice Xerotérmico. **Boletim Geográfico**, v. XX, n. 169, p. 337–369, 1962.
- BAKLANOV, A. et al. From urban meteorology, climate and environment research to integrated city services. **Urban Climate**, v. 23, p. 330–341, mar. 2018.
- BARLOW, J. F. Progress in observing and modelling the urban boundary layer. **Urban Climate**, v. 10, p. 216–240, dez. 2014.
- BECHTEL, B. et al. CENSUS of Cities: LCZ Classification of Cities (Level 0) – Workflow and Initial Results from Various Cities. (WMO et al., Eds.) ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate. **Proceedings...** Toulouse: 2015

BECHTEL, B. A New Global Climatology of Annual Land Surface Temperature. **Remote Sensing**, v. 7, n. 3, p. 2850–2870, 10 mar. 2015.

BELO HORIZONTE. **Plano Diretor de Belo Horizonte: Lei de Uso e Ocupação do Solo - estudos básicos**. Belo Horizonte: Prefeitura Municipal, 1995.

BELO HORIZONTE. **Lei 9.959, de 20 de julho de 2010. Altera as leis n. 7.165/96 e n. 7.166/96 - que estabelece normas e condições para parcelamento, ocupação e uso do solo urbano no Município**. Belo Horizonte: Prefeitura Municipal, 2010.

BELO HORIZONTE. **Lei nº 11.181, de 8 de agosto de 2019. Aprova o Plano Diretor do Município de Belo Horizonte e dá outras providências**. Belo Horizonte: Prefeitura Municipal, 2019.

BURGHARDT, R. **Development of an ArcGIS extension to model urban climate factors: a method of automatic and interactive analysis to capture the influencing factors on urban climate**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Fachbereich Architektur, Stadtplanung, Landschaftsplanung, Universität Kassel, 2014.

CAI, Z.; HAN, G.; CHEN, M. Do water bodies play an important role in the relationship between urban form and land surface temperature? **Sustainable Cities and Society**, v. 39, p. 487–498, maio 2018.

CÂMARA, G. et al. Análise espacial e geoprocessamento. In: DRUCK, S. et al. (Eds.). **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004a.

CÂMARA, G. et al. Análise espacial de áreas. In: DRUCK, S. et al. (Eds.). **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004b.

CARVALHO, A. N. M. **Avaliação e aplicação de esquema de dossel urbano no modelo meteorológico WRF**. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

CASTELLS, M. **A questão urbana**. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1983.

CHEN, F. et al. Challenges to quantitative applications of Landsat observations for the urban thermal environment. **Journal of Environmental Sciences**, v. 59, p. 80–88, set. 2017.

CHIMKLAI, P.; HAGISHIMA, A.; TANIMOTO, J. A computer system to support Albedo Calculation in urban areas. **Building and Environment**, v. 39, n. 10, p. 1213–1221, out. 2004.

CHING, J. et al. World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT), an urban weather, climate and environmental modeling infrastructure for the Anthropocene. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 26 mar. 2018.

COELHO, A. L. N.; CORREA, W. DE S. C. Temperatura de superfície do sensor TIRS/Landsat-8: metodologia e aplicações. **Rev. Geogr. Acadêmica**, v. 7, n. 1, p. 31–45, 2013.

DARMANTO, N. S.; VARQUEZ, A. C. G.; KANDA, M. Urban roughness parameters estimation from globally available datasets for mesoscale modeling in megacities. **Urban Climate**, v. 21, p. 243–261, set. 2017.

DASH, P. et al. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: Theory and practice-current trends. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 13, p. 2563–2594, jan. 2002.

DEMUZERE, M. et al. Mapping Europe into local climate zones. **PLOS ONE**, v. 14, n. 4, p. 1–27, 24 abr. 2019.

DEMUZERE, M. et al. Combining expert and crowd-sourced training data to map urban form and functions for the continental US. **Scientific Data**, v. 7, p. 1–13, 11 dez. 2020.

DUBREUIL, V. et al. Les types de climats annuels au Brésil : une application de la classification de Köppen de 1961 à 2015. **EchoGéo**, n. 41, 28 set. 2017.

EFFAT, H. A.; HASSAN, O. A. K. Change detection of urban heat islands and some related parameters using multi-temporal Landsat images; a case study for Cairo city, Egypt. **Urban Climate**, v. 10, p. 171–188, dez. 2014.

ERMIDA, S. L. et al. Google Earth Engine Open-Source Code for Land Surface Temperature Estimation from the Landsat Series. **Remote Sensing**, v. 12, n. 9, p. 1471, 6 maio 2020.

FEHRENBACH, U.; SCHERER, D.; PARLOW, E. Automated classification of planning objectives for the consideration of climate and air quality in urban and regional planning for the example of the region of Basel/Switzerland. **Atmospheric Environment**, v. 35, n. 32, p. 5605–5615, nov. 2001.

FERREIRA, D. G. **O uso do solo e os padrões de vento: o caso da cidade de Belo Horizonte**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

FERREIRA, D. G.; ASSIS, E. S. A influência da cidade sobre os padrões locais de vento analisada a partir de simulação dinâmica do clima. **Fórum Patrimônio**, v. 4, n. 2, p. 1–15, 2010.

FERREIRA, D. G.; ASSIS, E. S.; KATZSCHNER, L. Construção de um mapa climático analítico para a cidade de Belo Horizonte, Brasil. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 9, n. suppl 1, p. 255–270, out. 2017.

FERREIRA, D. G.; LOBO, C. F. F.; ASSIS, W. L. Temperatura do Ar, Densidade de Volume Construído e Topografia em Belo Horizonte/MG. **Revista do Departamento de Geografia - Universidade de São Paulo**, v. 37, p. 95–107, 8 jul. 2019.

FERREIRA, L. S. **Vegetação, temperatura de superfície e morfologia urbana: um retrato da região metropolitana de São Paulo**. Tese (Doutorado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, 2019.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

FORMAN, R. T. T. **Urban Ecology: Science of Cities**. New York: Cambridge University Press, 2014.

FOTHERINGHAM, A. S.; BRUNSDON, C.; CHARLTON, M. **Geographically weighted regression: the analysis of spatially varying relationships**. London: John Wiley & Sons Ltda, 2002.

GÁL, T.; UNGER, J. Detection of ventilation paths using high-resolution roughness parameter mapping in a large urban area. **Building and Environment**, v. 44, n. 1, p. 198–206, jan. 2009.

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

GELETIČ, J.; LEHNERT, M.; DOBROVOLNÝ, P. Land Surface Temperature Differences within Local Climate Zones, Based on Two Central European Cities. **Remote Sensing**, v. 8, n. 788, p. 2–18, 22 set.

2016.

GRIMMOND, C. S. B. et al. Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 2, p. 244–272, 2011.

GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. **Journal of Applied Meteorology**, v. 38, p. 1262–1292, 1999.

GUSSON, C. S.; DUARTE, D. H. S. Effects of Built Density and Urban Morphology on Urban Microclimate - Calibration of the Model ENVI-met V4 for the Subtropical Sao Paulo, Brazil. **Procedia Engineering**, v. 169, p. 2–10, 2016.

HARVEY, D. **Condição pós-moderna: uma pesquisa sobre as origens da mudança cultural**. 15. ed. São Paulo: Edições Loyola, 2006.

HUANG, J.; LU, X. X.; SELLERS, J. M. A global comparative analysis of urban form: Applying spatial metrics and remote sensing. **Landscape and Urban Planning**, v. 82, n. 4, p. 184–197, out. 2007.

IBGE. **Mapa de clima do Brasil**. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/tematicos.html>>. Acesso em: 31 mar. 2020.

IBGE. **Censo Demográfico 2010**. Rio de Janeiro: IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010a.

IBGE. **Censo Demográfico 2010: Aglomerados subnormais, Informações territoriais**. Rio de Janeiro, 2010b.

INMET. **Nota técnica 004.17 - Estação chuvosa em Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2017.

INMET. **Normais climatológicas do Brasil: 1981 - 2010**. Brasília, 2018.

INMET. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa - BDMEP**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 19 set. 2019a.

INMET. **Nota técnica 001.19 - Comportamento climatológico da estação seca em Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2019b.

INOSTROZA, L. Informal urban development in Latin American urban peripheries. Spatial assessment in Bogotá, Lima and Santiago de Chile. **Landscape and Urban Planning**, v. 165, p. 267–279, set. 2017.

IPEA. **Relatório brasileiro para o Habitat III**. Brasília: ConCidades, IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2016.

IVAJSIČ, D.; KALIGARIČ, M.; ŽIBERNA, I. Geographically weighted regression of the urban heat island of a small city. **Applied Geography**, v. 53, p. 341–353, set. 2014.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2011.

KANDA, M. Progress in Urban Meteorology: A Review. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 85B, p. 363–383, 2007.

KOTHARKAR, R.; RAMESH, A.; BAGADE, A. Urban Heat Island studies in South Asia: A critical review.

Urban Climate, jan. 2018.

KRAYENHOFF, E.; VOOGT, J. Daytime Thermal Anisotropy of Urban Neighbourhoods: Morphological Causation. **Remote Sensing**, v. 8, n. 12, p. 108, 30 jan. 2016.

LEFEBVRE, H. **A produção do espaço**. 4. ed. Paris: Éditions Anthropos, 2000.

LI, S. et al. Investigating spatial non-stationary and scale-dependent relationships between urban surface temperature and environmental factors using geographically weighted regression. **Environmental Modelling & Software**, v. 25, n. 12, p. 1789–1800, dez. 2010.

LI, Z.-L. et al. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. **Remote Sensing of Environment**, v. 131, p. 14–37, abr. 2013.

LINDBERG, F. et al. Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP): An integrated tool for city-based climate services. **Environmental Modelling & Software**, v. 99, p. 70–87, 1 jan. 2018.

LOBO, C.; FONSECA, D. F.; GARCIA, R. A. Verticalização e permeabilização do solo urbano nos setores censitários de Belo Horizonte/MG. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, v. 17, n. 3, p. 215–228, 20 dez. 2015.

LOMBARDO, M. A. **Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo: Hucitec, 1985.

LOMBARDO, M. A. O uso de geotecnologias na análise das mudanças climáticas na metrópole de São Paulo. **Revista Geográfica de América Central**, n. Número Especial EGAL, 2011-Costa Rica, p. 1–19, 2011.

LORENZZETTI, J. A. **Princípios físicos do sensoriamento remoto**. São Paulo: Blucher, 2015.

LUCAS, T. P. B. **Chuvas persistentes e ação da Zona de Convergência do Atlântico Sul na Região Metropolitana de Belo Horizonte**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (EDS.). **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: UNB, CNPq, 2012.

MILLS, G. Urban climatology: History, status and prospects. **Urban Climate**, v. 10, p. 479–489, dez. 2014.

MONTEIRO, C. A. F. Teoria e clima urbano. In: MENDONÇA, F.; MONTEIRO, C. A. F. (Eds.). **Clima Urbano**. São Paulo: Contexto, 2003.

MORAIS, J. D. M. **Análise exploratória de diferenças de conforto térmico entre dois padrões de ocupação urbana representados por ocupação espontânea e por ocupação planejada**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, 2011.

MOREIRA, A. A. M. **A influência da circulação de macro-escala sobre o clima de Belo Horizonte**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1999.

MORRISON, W. et al. A novel method to obtain three-dimensional urban surface temperature from ground-based thermography. **Remote Sensing of Environment**, v. 215, p. 268–283, set. 2018.

MUSHORE, T. D. et al. Linking major shifts in land surface temperatures to long term land use and land cover changes: A case of Harare, Zimbabwe. **Urban Climate**, v. 20, p. 120–134, jun. 2017.

NAKATA-OSAKI, C. M.; SOUZA, L. C. L.; RODRIGUES, D. S. THIS – Tool for Heat Island Simulation: A GIS extension model to calculate urban heat island intensity based on urban geometry. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 67, n. 1, p. 157–168, jan. 2018.

NASCIMENTO, D. T. F.; OLIVEIRA, I. J. DE. Análise da evolução do fenômeno de ilhas de calor no município de Goiânia-GO (1986-2010). **Boletim Goiano de Geografia**, v. 31, n. 2, p. 113–127, 12 jan. 2011.

NG, E. Y. Urban climatic map studies in China – Hong Kong. In: NG, E. Y.; REN, C. (Eds.). . **The Urban Climatic Map: A Methodology for Sustainable Urban Planning**. 1. ed. New York: Taylor & Francis Group, 2015. p. 92–120.

NG, E. Y.; REN, C. **The Urban Climatic Map: A Methodology for Sustainable Urban Planning**. 1. ed. New York: Taylor & Francis Group, 2015.

OKE, T. R. **Boundary layer climates**. London; New York: Methuen 7 Co Ltd, 1978.

OKE, T. R. Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. **IOM - WMO Report**, n. 81, 2006.

OKE, T. R. et al. **Urban Climates**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

OLIVEIRA, A. P. et al. Assessing urban effects on the climate of metropolitan regions of Brazil - Preliminary results of the MCITY BRAZIL project. **Exploratory Environmental Science Research**, v. 1, n. 1, p. 38–77, 2020.

PERES, L. DE F. et al. The urban heat island in Rio de Janeiro, Brazil, in the last 30 years using remote sensing data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 64, p. 104–116, fev. 2018.

PINTO, J. L. C. et al. Análise comparativa dos mapeamentos de temperaturas obtidos por imagens termais e medidas de campo em Belo Horizonte – MG. **Geografias**, v. Edição Esp, p. 107–118, 2016.

PLATE, E. J. Methods of investigating urban wind fields—physical models. **Atmospheric Environment**, v. 33, n. 24–25, p. 3981–3989, out. 1999.

PORTELA, C. I. et al. Impact of urban and industrial features on land surface temperature: Evidences from satellite thermal indices. **Sustainable Cities and Society**, v. 56, p. 1–13, maio 2020.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. **Infraestrutura de dados espaciais - BHGEO**. Disponível em: <<https://bhmap.pbh.gov.br/v2/mapa/idebhgeo>>.

REN, C.; NG, E. Y.; KATZSCHNER, L. Urban climatic map studies: a review. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 15, p. 2213–2233, dez. 2011.

ROGERSON, P. A. **Métodos estatísticos para geografia: um guia para o estudante**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

ROMERO, H.; PAIVA, J. C.; OPAZO, D. Geografia física crítica, topoclimatologia andina e o extrativismo mineiro no Salar de Atacama. **Revista Brasileira de Climatologia**, Edição Especial–XIII Simpósio

Brasileiro de Climatologia Geográfica-2018, p. 1–21, 2019.

ROTH, M. Review of urban climate research in (sub)tropical regions. **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 14, p. 1859–1873, 30 nov. 2007.

ROTH, M.; OKE, T. R.; EMERY, W. J. Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. **International Journal of Remote Sensing**, v. 10, n. 11, p. 1699–1720, out. 1989.

SALGADO, A. A. R. et al. Semi-humid: The Landscape of Central Brazil. In: SALGADO, A. A. R.; SANTOS, L. J. C.; PAISANI, J. C. (Eds.). **The Physical Geography of Brazil**. Geography of the Physical Environment. Cham: Springer International Publishing, 2019.

SANT'ANNA NETO, J. L. O clima urbano como construção social: da vulnerabilidade polissêmica das cidades enfermas ao sofisma utópico das cidades saudáveis. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 8, p. 45–60, 2011.

SANTOS, A. R. et al. Spatial and temporal distribution of urban heat islands. **Science of The Total Environment**, v. 605–606, p. 946–956, dez. 2017a.

SANTOS, R. et al. Vegetation Cover and Surface Temperature in Urban Areas: An Analysis Using Remote Sensing in the City of Salvador, Bahia, Brazil. (L. Brotas, S. Roaf, F. Nicol, Eds.) 33rd PLEA International Conference. **Proceedings...** Edinburgh: NCEUB, 2017b

SCHERER, D. et al. Improved concepts and methods in analysis and evaluation of the urban climate for optimizing urban planning processes. **Atmospheric Environment**, v. 33, n. 24–25, p. 4185–4193, 1999.

SEGAWA, H. **Arquiteturas no Brasil: 1900-1990**. São Paulo: Edusp, 2002.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local climate zones for urban temperature studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 12, p. 1879–1900, 2012.

Superfície. Dicionário etimológico da Língua Portuguesa. Melhoramentos Ltda, 2015.

TSO, C. P.; CHAN, B. K.; HASHIM, M. A. An Improvement to the Basic Energy Balance Model for Urban Thermal Environment Analysis. **Energy and Buildings**, v. 14, p. 143–152, 1990.

TUZANI, P. A. B.; FERREIRA, D. G.; ASSIS, E. S. Cálculo de parâmetros urbanos para caracterização do entorno de estação meteorológica. XIII Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica. **Anais...** Juiz de Fora: 2018

UN-HABITAT. **The Challenge of Slums: Global Report on Human Settlements 2003**. UK: Earthscan Publications Ltd, 2003.

UNITED NATIONS. **Estado de las ciudades de América Latina y el Caribe 2012: Rumbo a una nueva transición urbana**. Kenia / Brasil: UN-Habitat - United Nations, 2012.

UNITED NATIONS. **World Population Prospects: The 2015 Revision**. New York: United Nations Department of Economic and Social Affairs Population Division, 2015.

UNITED NATIONS. **World Population Prospects 2019: Highlights**. New York: Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2019.

USGS. **Landsat 8 (L8) Data Users Handbook - version 2.0**. Disponível em: <<https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>>. Acesso em: 19 mar. 2017.

VDI. **VDI-Guideline 3787: Part 1 - Environmental Meteorology, Climate and Air Pollution Maps for Cities and Regions**BerlinVDI - Verein Deutscher Ingenieure, , 2015.

VILELA, J. A.; ASSIS, E. S.; PAIVA, J. E. M. Variáveis do clima urbano: análise da situação atual e prognósticos para a região do Bairro Belvedere III, Belo Horizonte, MG. Encontro Nacional e Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...** Natal: 2009

VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Complete urban surface temperatures. **Journal of Applied Meteorology**, v. 36, p. 1117–1132, 1997.

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

WENTZ, E. A. et al. Six fundamental aspects for conceptualizing multidimensional urban form: A spatial mapping perspective. **Landscape and Urban Planning**, v. 179, p. 55–62, nov. 2018.

XIAO, H. et al. Responses of Urban Land Surface Temperature on Land Cover: A Comparative Study of Vienna and Madrid. **Sustainability**, v. 10, n. 2, p. 2–19, 23 jan. 2018.

XU, Y. et al. Urban morphology detection and computation for urban climate research. **Landscape and Urban Planning**, v. 167, p. 212–224, nov. 2017.

ZHAO, H.; REN, Z.; TAN, J. The Spatial Patterns of Land Surface Temperature and Its Impact Factors: Spatial Non-Stationarity and Scale Effects Based on a Geographically-Weighted Regression Model. **Sustainability**, v. 10, n. 7, p. 1–21, 29 jun. 2018.

APÊNDICE A: Caracterização de período seco e análise sinótica

A caracterização de período seco foi feita para as 13 imagens em que não havia presença de nuvens sobre a cidade de Belo Horizonte, conforme tabela a seguir. Assim, o mês de janeiro, apesar de ser classificado como período úmido (SALGADO et al., 2019), integrou o rol de dados analisados. Partiu-se dos critérios estabelecidos por Bagnouls e Gausсен (1962) para caracterização de “mês seco”:

Consideramos arbitrariamente, porém há necessidade de estabelecer critério para - "mês sêco", um mês no qual:

-Registram-se menos de 10 mm de chuva, a uma temperatura média inferior a 10°C.

-Registram-se menos de 25 mm de chuva, a uma temperatura média compreendida entre 10 e 20 °C.

-Registram-se menos de 50 mm de chuva, a uma temperatura média compreendida entre 20 e 30 °C.

-Registram-se menos de 75 mm de chuva, a uma temperatura média superior a 30 °C.

Esta definição descontínua exprime-se, no entanto, de forma contínua, aproximada e simples, por meio de uma curva: o mês sêco é aquele no qual o total mensal das precipitações, em milímetros, é igual ou inferior ao dôbro da temperatura média mensal, expressa em graus centígrados: $P \leq 2T$. (BAGNOULS; GAUSSEN, 1962, p. 340–341)

Para o cálculo da precipitação e da temperatura média, utilizou-se os dados disponíveis no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP-INMET) da Estação Belo Horizonte- MG (OMM: 83587) (Latitude: -19.93°, Longitude: -43.93 °, Altitude: 915 m) (INMET, 2019a). A precipitação (Prec.) correspondeu ao acumulado (mensal ou diário), em milímetros, e a temperatura do ar (Ta) utilizada foi a temperatura média compensada, em °C.

O método de Bagnouls e Gausсен (1962) foi aplicado considerando o mês de captura das imagens, como exposto pelos autores. Também foi feito um cálculo considerando um período de 30 dias anteriores à captura da imagem, o que corresponderia a uma aplicação modificada do método, mas correspondendo a uma caracterização mensal, por se entender que é o intervalo de tempo o critério de análise e não o mês em si. Além disso, considerou-se a aplicação da relação “ $P \leq 2T$ ” para um período de sete dias anteriores à captura da imagem, considerando que há uma relação entre as escalas temporais e espaciais dos fenômenos atmosféricos (OKE et al., 2017) e que o período de análise de uma semana poderia ser mais adequado às escalas espaciais microclimática e local, sendo esse o critério que indicou o período seco adotado.

A análise sinótica foi feita pelo prof. Wellington Lopes de Assis, utilizando dados meteorológicos da estação convencional de Lourdes (OMM 83587) e da estação automática da Pampulha (OMM 86800), localizadas em Belo Horizonte, além de cartas sinóticas cartas sinóticas (Hora: 00h UTC e 12h UTC) correspondentes aos dias de captura das imagens de satélite, fornecidas pela Marinha do Brasil.

Caracterização do período seco e análise sinótica

mês	Classificação mensal			Data captura da imagem	30 dias antes			7 dias antes			Sistema atmosférico
	Prec.	Ta			Prec.	Ta		Prec.	Ta		
abr-14	235,8	22,35	úmido	06/04/2014	193,6	23,1	úmido	141,8	22,6	úmido	mPat
jun-14	13,1	19,98	seco	09/06/2014	26,7	20,4	seco	12,9	20,4	seco	mPat
				25/06/2014	26,9	20,1	seco	0	19,0	seco	mPa
ago-14	3,3	20,52	seco	12/08/2014	47,9	18,2	úmido	0	18,4	seco	mPat
set-14	1,8	22,40	seco	29/09/2014	2	22,1	seco	0	23,5	seco	mTa
jan-15	103,8	25,58	úmido	03/01/2015	125,9	24,6	úmido	0,4	27,0	seco	mTa
jul-15	12,4	20,07	seco	30/07/2015	12,4	19,8	seco	12,4	20,6	seco	mPat
ago-15	0	20,84	seco	15/08/2015	12,4	20,0	seco	0	19,0	seco	mPa
				31/08/2015	0	20,7	seco	0	21,9	seco	mTa
out-15	67,5	25,57	seco	02/10/2015	43,5	24,6	seco	0	26,5	seco	LI
jul-16	0	20,19	seco	16/07/2016	0	19,3	seco	0	21,4	seco	mTa
ago-16	0,4	21,17	seco	17/08/2016	0,4	19,8	seco	0,4	21,0	seco	mTa
set-16	65,4	22,74	seco	18/09/2016	7,4	22,2	seco	0	23,8	seco	mTa

Fonte: Produzida pela autora

Legenda:

mPa = Massa Polar Atlântica

mPat = Massa Polar Atlântica Tropicalizada

mTa = Massa Tropical Atlântica

LI = Linha de Instabilidade

Obs.: De acordo com informações prestadas pelo prof. Wellington Lopes de Assis, os sistemas atmosféricos atuantes nos dias analisados têm semelhança quanto a sua caracterização. Na RMBH, a atuação da mTa proporciona estabilidade atmosférica com pouca ou nenhuma nebulosidade, ventos fracos e baixa umidade relativa do ar no período da tarde. A mesma caracterização se aplica para mPa, sendo que na atuação dessa massa as temperaturas diárias são menores se comparadas ao domínio da mTa. No dia 02/10/2015 a RMBH estava sob a influência de uma LI devido ao intenso aquecimento superficial.

APÊNDICE B: Estimativa de radiação solar incidente

A radiação solar incidente foi calculada como um acumulado de radiação no período anterior à captura das imagens de satélite sobre o relevo da cidade de Belo Horizonte. Para isso, foi utilizada a ferramenta *Area Solar Radiation* do programa ArcGIS, sendo que o cálculo de radiação foi feito para o horário de 3:00 às 9:00 para cada imagem. O modelo digital de terreno foi gerado a partir das curvas de nível disponibilizadas pela Prefeitura de Belo Horizonte (PRODABEL).

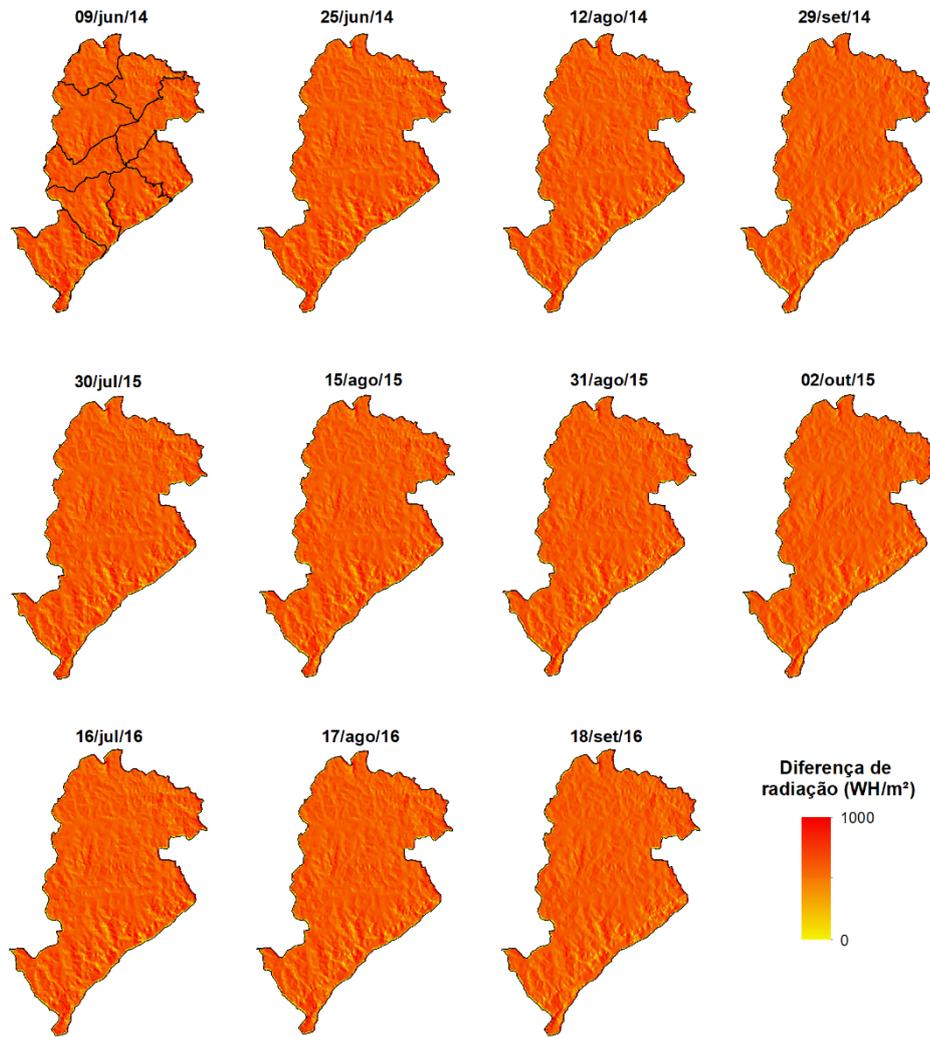
Após esse procedimento, foi feita uma operação utilizando a ferramenta Calculadora Raster, com a subtração da radiação mínima calculada na área de estudo pela radiação calculada para cada pixel, resultando em mapas de diferença de radiação correspondente a cada dia selecionado para análise. A Tabela B1 mostra os valores mínimo e máximo de radiação incidente e a Figura B1 contém os resultados da diferença de radiação.

Em seguida foi calculada a média da diferença de radiação, resultado em um mapa síntese da radiação para todo período (Figura B2). Também foi aplicado o método estatístico Índice Local de Moran para verificar os agrupamentos de valores altos e baixos e as áreas em que os vizinhos mais próximos têm valores discrepantes (*outliers* – alto-baixo, baixo-alto).

Tabela B1: Valores mínimo, máximo e amplitude de radiação solar incidente

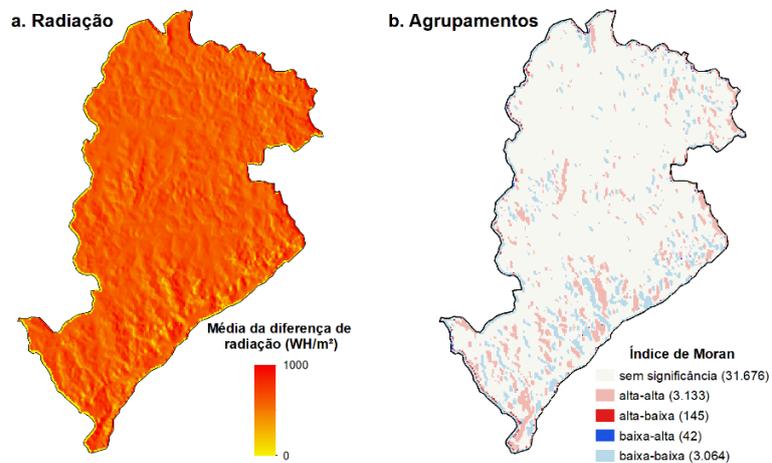
data	mínimo	máximo	amplitude (máx - mín)
09/jun/2014	8,7	439,0	430,3
25/jun/2014	8,5	429,9	421,4
12/ago/2014	12,4	594,9	582,5
29/set/2014	19,7	953,0	933,3
30/jul/2015	10,8	528,7	517,9
15/ago/2015	12,8	613,1	600,3
31/ago/2015	15,2	733,5	718,3
02/out/2015	20,2	972,3	952,1
16/jul/2016	9,5	474,6	465,1
17/ago/2016	13,2	623,2	610,0
18/set/2016	18,2	882,7	864,5

Figura B1: Diferença de radiação solar incidente acumulada calculada para o período de 3:00 às 9:00



Fonte: Produzida pela autora

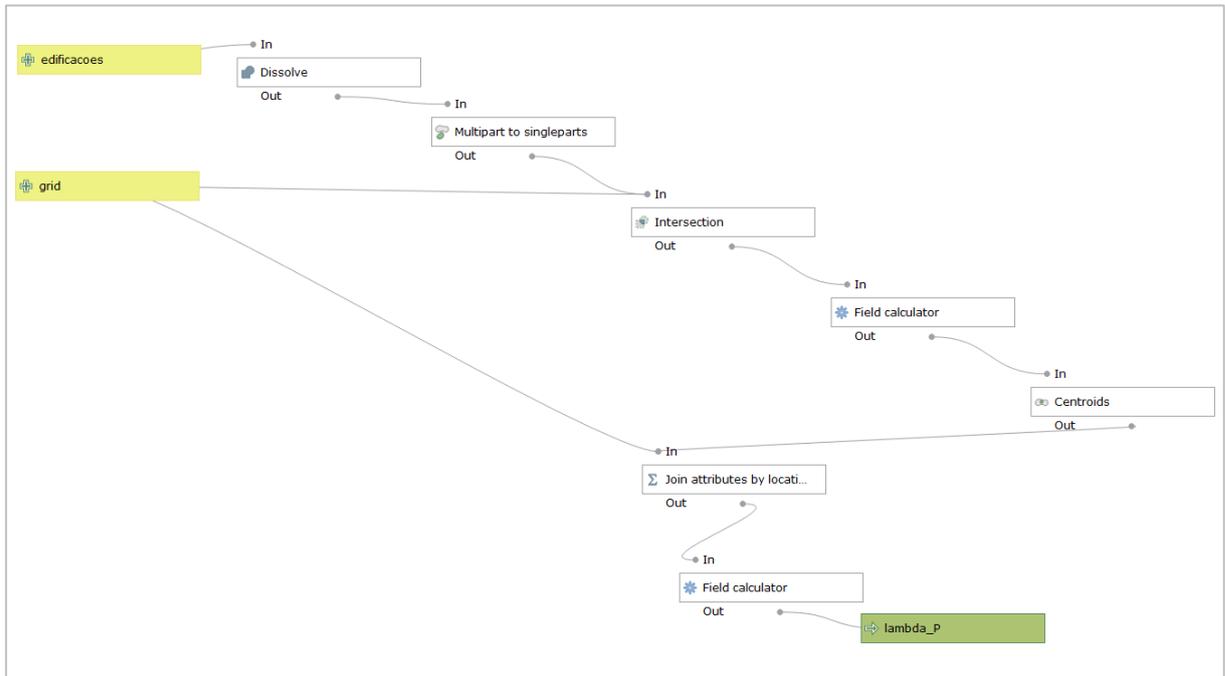
Figura B2: Média da diferença de radiação solar e agrupamentos resultantes da aplicação do Índice de Moran



Fonte: Produzida pela autora

APÊNDICE C: Código das rotinas

B.1) Rotina para cálculo de λ_p , λ_{vr} , λ_{va} e λ_v



```
from qgis.core import QgsProcessing
from qgis.core import QgsProcessingAlgorithm
from qgis.core import QgsProcessingMultiStepFeedback
from qgis.core import QgsProcessingParameterVectorLayer
from qgis.core import QgsProcessingParameterFeatureSink
import processing
```

```
class Lambdap(QgsProcessingAlgorithm):
```

```
    def initAlgorithm(self, config=None):
        self.addParameter(QgsProcessingParameterVectorLayer('edificacoes', 'edificacoes',
types=[QgsProcessing.TypeVectorPolygon], defaultValue=None))
        self.addParameter(QgsProcessingParameterVectorLayer('grid', 'grid',
types=[QgsProcessing.TypeVectorPolygon], defaultValue=None))
        self.addParameter(QgsProcessingParameterFeatureSink('Edifdissolve', 'edif-dissolve',
type=QgsProcessing.TypeVectorAnyGeometry, createByDefault=True,
defaultValue='C:/dani/doutorado/tese/lambdas/dissolve.shp'))
        self.addParameter(QgsProcessingParameterFeatureSink('Lambda_p', 'lambda_P',
type=QgsProcessing.TypeVectorAnyGeometry, createByDefault=True,
defaultValue='C:/dani/doutorado/tese/lambdas/lambdap.shp'))
```

```
    def processAlgorithm(self, parameters, context, model_feedback):
        # Use a multi-step feedback, so that individual child algorithm progress reports are adjusted for
the
        # overall progress through the model
        feedback = QgsProcessingMultiStepFeedback(7, model_feedback)
```

```

results = {}
outputs = {}

# Dissolve
alg_params = {
    'FIELD': None,
    'INPUT': parameters['edificacoes'],
    'OUTPUT': parameters['Edifdissolve']
}
outputs['Dissolve'] = processing.run('native:dissolve', alg_params, context=context,
feedback=feedback, is_child_algorithm=True)
results['Edifdissolve'] = outputs['Dissolve']['OUTPUT']

feedback.setCurrentStep(1)
if feedback.isCanceled():
    return {}

# Multipart to singleparts
alg_params = {
    'INPUT': outputs['Dissolve']['OUTPUT'],
    'OUTPUT': QgsProcessing.TEMPORARY_OUTPUT
}
outputs['MultipartToSingleparts'] = processing.run('native:multiparttosingleparts', alg_params,
context=context, feedback=feedback, is_child_algorithm=True)

feedback.setCurrentStep(2)
if feedback.isCanceled():
    return {}

# Intersection
alg_params = {
    'INPUT': outputs['MultipartToSingleparts']['OUTPUT'],
    'INPUT_FIELDS': None,
    'OVERLAY': parameters['grid'],
    'OVERLAY_FIELDS': None,
    'OUTPUT': QgsProcessing.TEMPORARY_OUTPUT
}
outputs['Intersection'] = processing.run('native:intersection', alg_params, context=context,
feedback=feedback, is_child_algorithm=True)

feedback.setCurrentStep(3)
if feedback.isCanceled():
    return {}

# Field calculator
alg_params = {
    'FIELD_LENGTH': 10,
    'FIELD_NAME': 'area',
    'FIELD_PRECISION': 1,
    'FIELD_TYPE': 0,
    'FORMULA': '$area',

```

```

        'INPUT': outputs['Intersection']['OUTPUT'],
        'NEW_FIELD': True,
        'OUTPUT': QgsProcessing.TEMPORARY_OUTPUT
    }
    outputs['FieldCalculator'] = processing.run('qgis:fieldcalculator', alg_params, context=context,
feedback=feedback, is_child_algorithm=True)

    feedback.setCurrentStep(4)
    if feedback.isCanceled():
        return {}

    # Centroids
    alg_params = {
        'ALL_PARTS': False,
        'INPUT': outputs['FieldCalculator']['OUTPUT'],
        'OUTPUT': QgsProcessing.TEMPORARY_OUTPUT
    }
    outputs['Centroids'] = processing.run('native:centroids', alg_params, context=context,
feedback=feedback, is_child_algorithm=True)

    feedback.setCurrentStep(5)
    if feedback.isCanceled():
        return {}

    # Join attributes by location (summary)
    alg_params = {
        'DISCARD_NONMATCHING': False,
        'INPUT': parameters['grid'],
        'JOIN': outputs['Centroids']['OUTPUT'],
        'JOIN_FIELDS': 'area',
        'PREDICATE': 0,
        'SUMMARIES': 5,
        'OUTPUT': QgsProcessing.TEMPORARY_OUTPUT
    }
    outputs['JoinAttributesByLocationSummary'] = processing.run('qgis:joinbylocationsummary',
alg_params, context=context, feedback=feedback, is_child_algorithm=True)

    feedback.setCurrentStep(6)
    if feedback.isCanceled():
        return {}

    # Field calculator
    alg_params = {
        'FIELD_LENGTH': 10,
        'FIELD_NAME': 'lambda_p',
        'FIELD_PRECISION': 2,
        'FIELD_TYPE': 0,
        'FORMULA': 'area_sum/8100',
        'INPUT': outputs['JoinAttributesByLocationSummary']['OUTPUT'],
        'NEW_FIELD': True,
        'OUTPUT': parameters['Lambda_p']
    }

```

```

    }
    outputs['FieldCalculator'] = processing.run('qgis:fieldcalculator', alg_params, context=context,
feedback=feedback, is_child_algorithm=True)
    results['Lambda_p'] = outputs['FieldCalculator']['OUTPUT']
    return results

def name(self):
    return 'lambda-P'

def displayName(self):
    return 'lambda-P'

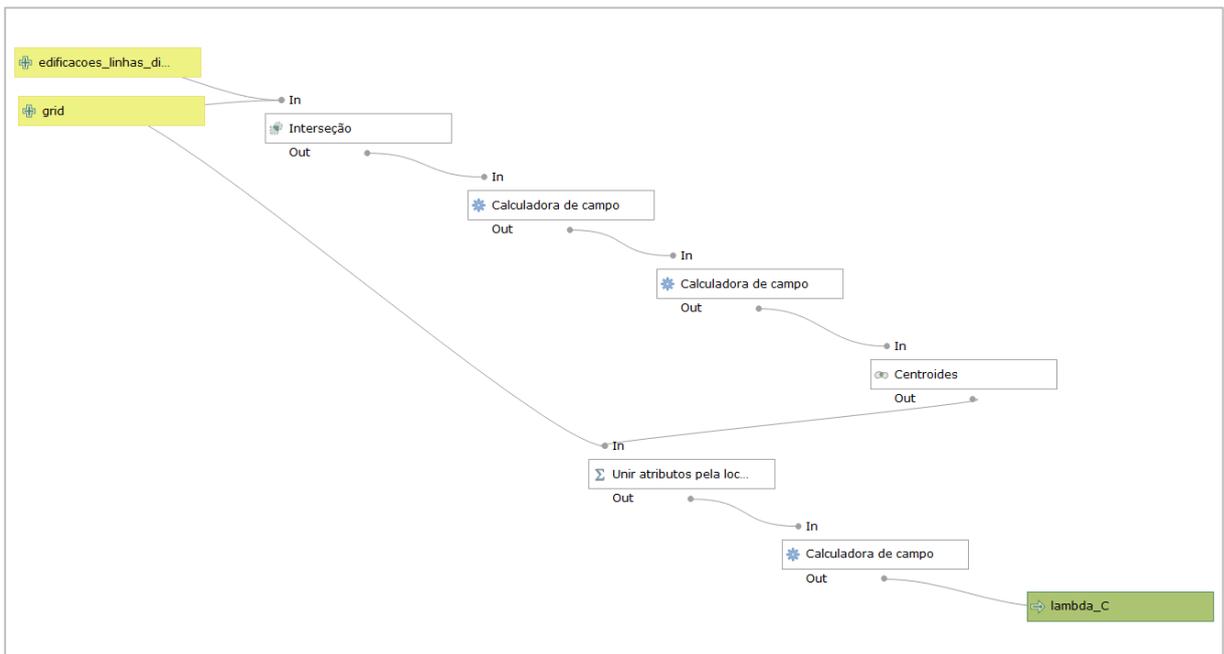
def group(self):
    return 'lambda'

def groupId(self):
    return 'lambda'

def createInstance(self):
    return Lambdap()

```

B.2) Rotina para cálculo de λ_c



```

from qgis.core import QgsProcessing
from qgis.core import QgsProcessingAlgorithm
from qgis.core import QgsProcessingMultiStepFeedback
from qgis.core import QgsProcessingParameterVectorLayer
from qgis.core import QgsProcessingParameterFeatureSink
import processing

```

```

class Lambdac(QgsProcessingAlgorithm):

    def initAlgorithm(self, config=None):
        self.addParameter(QgsProcessingParameterVectorLayer('edificacoeslinhasdissolve',
'edificacoes_linhas_dissolve', types=[QgsProcessing.TypeVectorLine], defaultValue=None))
        self.addParameter(QgsProcessingParameterVectorLayer('grid', 'grid',
types=[QgsProcessing.TypeVectorPolygon], defaultValue=None))
        self.addParameter(QgsProcessingParameterFeatureSink('Lenght', 'lenght',
type=QgsProcessing.TypeVectorAnyGeometry, createByDefault=True, defaultValue=None))
        self.addParameter(QgsProcessingParameterFeatureSink('Areac', 'area-C',
type=QgsProcessing.TypeVectorAnyGeometry, createByDefault=True, defaultValue=None))
        self.addParameter(QgsProcessingParameterFeatureSink('Lambda_c', 'lambda_C',
type=QgsProcessing.TypeVectorAnyGeometry, createByDefault=True, defaultValue=None))

    def processAlgorithm(self, parameters, context, model_feedback):
        # Use a multi-step feedback, so that individual child algorithm progress reports are adjusted for
the
        # overall progress through the model
        feedback = QgsProcessingMultiStepFeedback(6, model_feedback)
        results = {}
        outputs = {}

        # Interseção
        alg_params = {
            'INPUT': parameters['edificacoeslinhasdissolve'],
            'INPUT_FIELDS': None,
            'OVERLAY': parameters['grid'],
            'OVERLAY_FIELDS': None,
            'OUTPUT': QgsProcessing.TEMPORARY_OUTPUT
        }
        outputs['Interseo'] = processing.run('native:intersection', alg_params, context=context,
feedback=feedback, is_child_algorithm=True)

        feedback.setCurrentStep(1)
        if feedback.isCanceled():
            return {}

        # Calculadora de campo
        alg_params = {
            'FIELD_LENGTH': 10,
            'FIELD_NAME': 'lenght',
            'FIELD_PRECISION': 1,
            'FIELD_TYPE': 0,
            'FORMULA': '$length',
            'INPUT': outputs['Interseo']['OUTPUT'],
            'NEW_FIELD': True,
            'OUTPUT': parameters['Lenght']
        }
        outputs['CalculadoraDeCampo'] = processing.run('qgis:fieldcalculator', alg_params,
context=context, feedback=feedback, is_child_algorithm=True)

```

```

results['Lenght'] = outputs['CalculadoraDeCampo']['OUTPUT']

feedback.setCurrentStep(2)
if feedback.isCanceled():
    return {}

# Calculadora de campo
alg_params = {
    'FIELD_LENGTH': 10,
    'FIELD_NAME': 'area-C',
    'FIELD_PRECISION': 1,
    'FIELD_TYPE': 0,
    'FORMULA': '"altura"*"lenght"',
    'INPUT': outputs['CalculadoraDeCampo']['OUTPUT'],
    'NEW_FIELD': True,
    'OUTPUT': parameters['Areac']
}
outputs['CalculadoraDeCampo'] = processing.run('qgis:fieldcalculator', alg_params,
context=context, feedback=feedback, is_child_algorithm=True)
results['Areac'] = outputs['CalculadoraDeCampo']['OUTPUT']

feedback.setCurrentStep(3)
if feedback.isCanceled():
    return {}

# Centroides
alg_params = {
    'ALL_PARTS': False,
    'INPUT': outputs['CalculadoraDeCampo']['OUTPUT'],
    'OUTPUT': QgsProcessing.TEMPORARY_OUTPUT
}
outputs['Centroides'] = processing.run('native:centroids', alg_params, context=context,
feedback=feedback, is_child_algorithm=True)

feedback.setCurrentStep(4)
if feedback.isCanceled():
    return {}

# Unir atributos pela localização (sumário)
alg_params = {
    'DISCARD_NONMATCHING': False,
    'INPUT': parameters['grid'],
    'JOIN': outputs['Centroides']['OUTPUT'],
    'JOIN_FIELDS': 'area-C',
    'PREDICATE': 0,
    'SUMMARIES': 5,
    'OUTPUT': QgsProcessing.TEMPORARY_OUTPUT
}
outputs['UnirAtributosPelaLocalizacaoSumrio'] = processing.run('qgis:joinbylocationsummary',
alg_params, context=context, feedback=feedback, is_child_algorithm=True)

```

```

feedback.setCurrentStep(5)
if feedback.isCanceled():
    return {}

# Calculadora de campo
alg_params = {
    'FIELD_LENGTH': 10,
    'FIELD_NAME': 'lambda_C',
    'FIELD_PRECISION': 1,
    'FIELD_TYPE': 0,
    'FORMULA': '(\ "area_sum\ "+\ "area-C_sum\ ")/8100',
    'INPUT': outputs['UnirAtributosPelaLocalizacaoSumrio']['OUTPUT'],
    'NEW_FIELD': True,
    'OUTPUT': parameters['Lambda_c']
}
outputs['CalculadoraDeCampo'] = processing.run('qgis:fieldcalculator', alg_params,
context=context, feedback=feedback, is_child_algorithm=True)
results['Lambda_c'] = outputs['CalculadoraDeCampo']['OUTPUT']
return results

def name(self):
    return 'lambda-C'

def displayName(self):
    return 'lambda-C'

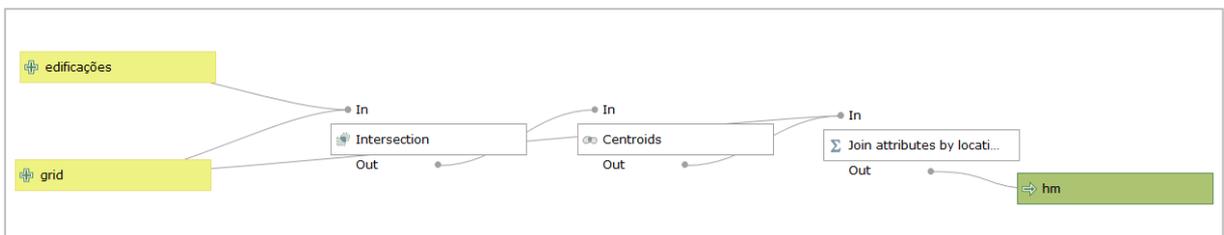
def group(self):
    return 'lambda'

def groupId(self):
    return 'lambda'

def createInstance(self):
    return Lambdac()

```

B.3) Rotina para cálculo de h_m



```

from qgis.core import QgsProcessing
from qgis.core import QgsProcessingAlgorithm
from qgis.core import QgsProcessingMultiStepFeedback
from qgis.core import QgsProcessingParameterVectorLayer
from qgis.core import QgsProcessingParameterFeatureSink

```

```

import processing

class Hm(QgsProcessingAlgorithm):

    def initAlgorithm(self, config=None):
        self.addParameter(QgsProcessingParameterVectorLayer('edificaes', 'edificações',
types=[QgsProcessing.TypeVectorPolygon], defaultValue=None))
        self.addParameter(QgsProcessingParameterVectorLayer('grid', 'grid',
types=[QgsProcessing.TypeVectorPolygon], defaultValue=None))
        self.addParameter(QgsProcessingParameterFeatureSink('Centroidehm', 'centroide-hm',
type=QgsProcessing.TypeVectorPoint, createByDefault=True, defaultValue=None))
        self.addParameter(QgsProcessingParameterFeatureSink('Hm', 'hm',
type=QgsProcessing.TypeVectorAnyGeometry, createByDefault=True, defaultValue=None))

    def processAlgorithm(self, parameters, context, model_feedback):
        # Use a multi-step feedback, so that individual child algorithm progress reports are adjusted for
the
        # overall progress through the model
        feedback = QgsProcessingMultiStepFeedback(3, model_feedback)
        results = {}
        outputs = {}

        # Intersection
        alg_params = {
            'INPUT': parameters['edificaes'],
            'INPUT_FIELDS': None,
            'OVERLAY': parameters['grid'],
            'OVERLAY_FIELDS': None,
            'OUTPUT': QgsProcessing.TEMPORARY_OUTPUT
        }
        outputs['Intersection'] = processing.run('native:intersection', alg_params, context=context,
feedback=feedback, is_child_algorithm=True)

        feedback.setCurrentStep(1)
        if feedback.isCanceled():
            return {}

        # Centroids
        alg_params = {
            'ALL_PARTS': False,
            'INPUT': outputs['Intersection']['OUTPUT'],
            'OUTPUT': parameters['Centroidehm']
        }
        outputs['Centroids'] = processing.run('native:centroids', alg_params, context=context,
feedback=feedback, is_child_algorithm=True)
        results['Centroidehm'] = outputs['Centroids']['OUTPUT']

        feedback.setCurrentStep(2)
        if feedback.isCanceled():
            return {}

```

```

# Join attributes by location (summary)
alg_params = {
    'DISCARD_NONMATCHING': False,
    'INPUT': parameters['grid'],
    'JOIN': outputs['Centroids']['OUTPUT'],
    'JOIN_FIELDS': 'altura',
    'PREDICATE': 0,
    'SUMMARIES': 6,
    'OUTPUT': parameters['Hm']
}
outputs['JoinAttributesByLocationSummary'] = processing.run('qgis:joinbylocationsummary',
alg_params, context=context, feedback=feedback, is_child_algorithm=True)
results['Hm'] = outputs['JoinAttributesByLocationSummary']['OUTPUT']
return results

def name(self):
    return 'hm'

def displayName(self):
    return 'hm'

def group(self):
    return ""

def groupId(self):
    return ""

def createInstance(self):
    return Hm()

```