



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**

Faculdade de Ciências e Tecnologia - Câmpus de Presidente Prudente

Renata dos Santos Cardoso

**MODELAGEM DO MICROCLIMA E ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO
DO CALOR URBANO EM ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS**

Presidente Prudente-SP
2021



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**

Faculdade de Ciências e Tecnologia - Câmpus de Presidente Prudente

MODELAGEM DO MICROCLIMA E ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO DO CALOR URBANO EM ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, câmpus de Presidente Prudente, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Geografia.

Área de concentração: Produção do Espaço Geográfico.

Orientadora: Profa. Dra. Margarete Cristiane de Costa Trindade Amorim

C268m Cardoso, Renata dos Santos
Modelagem do microclima e estratégias de mitigação do calor urbano em zonas climáticas locais / Renata dos Santos Cardoso. -- Presidente Prudente, 2021
154 p. : il., tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente
Orientadora: Margarete Cristiane de Costa Trindade Amorim

1. Modelagem microclimática. 2. Zona Climática Local. 3. Estratégias de mitigação do calor. 4. ENVI-met. 5. Presidente Prudente. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Presidente Prudente

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: MODELAGEM DO MICROCLIMA E ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO DO CALOR URBANO EM ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS

AUTORA: RENATA DOS SANTOS CARDOSO

ORIENTADORA: MARGARETE CRISTIANE DE COSTA TRINDADE AMORIM

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em GEOGRAFIA, área:
Produção do Espaço Geográfico pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra MARGARETE CRISTIANE DE COSTA TRINDADE AMORIM (Participação Virtual)
Departamento de Geografia / FCT/UNESP - Câmpus de Presidente Prudente

Prof. Dr. LEONARDO MARQUES MONTEIRO (Participação Virtual)
Departamento de Tecnologia da Arquitetura / USP

Profa. Dra. ERIKA COLLISCHONN (Participação Virtual)
Instituto de Ciências Humanas / UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS

Prof. Dr. JOSÉ TADEU GARCIA TOMMASELLI (Participação Virtual)
Departamento de Geografia / FCT/UNESP - Câmpus de Presidente Prudente

Prof. Dr. VINCENT DUBREUIL (Participação Virtual)
UNIVERSIDADE DE RENNES 2

Presidente Prudente, 28 de junho de 2021

AGRADECIMENTOS

A realização dessa tese não seria possível sem o apoio e a colaboração de diferentes pessoas e instituições.

Agradeço à UNESP e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia pela oportunidade de formação acadêmica, profissional e pessoal.

À Profa. Dra. Margarete Amorim, que demonstrou apoio ao projeto desde o início e ofereceu conselhos e oportunidades que permitiram superar os desafios dessa pesquisa. As contribuições da sua orientação, ensino e amizade se estendem além da vida acadêmica.

Ao Prof. Dr. James Voogt pela dedicada supervisão durante o doutorado sanduíche na *University of Western Ontario* (UWO) e colaboração após a visita. Suas contribuições com a modelagem microclimática foram fundamentais para o desenvolvimento da tese.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (processo: 141424/2017-6), e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (processos: 2017/03514-6 e 2019/23517-5) pelo financiamento da pesquisa.

À CAPES pela concessão da bolsa de Doutorado Sanduíche no Exterior – PDSE (processo: 88881.188727/2018-01). O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, e do projeto CAPES/COFECUB – Cidades, clima e vegetação: modelagem e políticas públicas ambientais (processo: 88881.191765/2018-01).

Aos Profs. Dr. José Tadeu Garcia Tommaselli, Dr. Leonardo Marques Monteiro, Dra. Erika Collischonn e Dr. Vincent Dubreuil por comporem a banca e pelas relevantes considerações.

À Carolina Gusson pela disponibilidade em trocar ideias e esclarecer dúvidas no uso do ENVI-met.

Aos funcionários da Seção Técnica de Pós-Graduação, em especial à Aline Muniz, pela assistência com documentos e compromissos do Programa de Pós-Graduação em Geografia.

À Tamae Otsuka e demais funcionários do Escritório de Pesquisa pelo suporte com os processos de solicitação de bolsa de estudo e prestação de contas da FAPESP.

À Lori Johnson, do escritório de Pós-Graduação do departamento de Geografia da UWO, pela ajuda com o processo burocrático durante o estágio de pesquisa no exterior.

Ao Gustavo, Luis, Guilherme, Tiago, Marco, Leandro, Danielle e demais colegas do GAIA pela convivência no grupo de pesquisa, pelas conversas e trocas de experiência.

À Mary, Stuart, Juliana, Laura, Sally e Mark pelos momentos especiais e encorajamento, sobretudo durante as fases finais da pesquisa.

A amizade e o carinho de pessoas queridas que se fazem presentes nas alegrias e inquietações da pesquisa e da vida... muito obrigada Aninha, Larissa, Maryna, Janaína, Meire, Paulinha, Liriane, Suelen, Carla e Priscila.

À minha mãe Marisa, com quem tenho a felicidade de compartilhar essa trajetória.

RESUMO

Modelos numéricos de microescala, capazes de simular as condições térmicas de ambientes urbanos complexos, são cada vez mais utilizados para projetar cenários climáticos de adaptação e avaliar os benefícios de medidas de mitigação do calor. Nesta tese, foram avaliados os impactos de resfriamento de estratégias de mitigação de calor urbano em Zonas Climáticas Locais (LCZs) de Presidente Prudente-SP utilizando o ENVI-met, com a hipótese de que LCZs requerem diferentes estratégias que considerem as condições de cada paisagem para a redução das temperaturas urbanas. Em primeiro lugar, investigou-se a formação de ilhas de calor em bairros compactos de baixa e média elevação durante dias típicos de inverno e verão. Para os cenários base, a calibração e validação do ENVI-met foram conduzidas por meio de observações *in situ* para melhorar o desempenho das simulações e avaliar as tendências do modelo e a confiabilidade dos resultados. As simulações de estratégias de mitigação de calor urbano enfatizaram a avaliação sistemática dos impactos de resfriamento absoluto e normalizado das implementações de telhados e pavimentos reflexivos. Os impactos dessas estratégias na temperatura do ar foram analisados por meio da métrica de eficácia de resfriamento do albedo (ACE), que é baseada na fração da superfície modificada (λ_s) e intensidade da implementação de mitigação de calor ($\Delta\alpha_s$). Os resultados demonstraram que as implementações de albedo geram mais resfriamento para as condições diurnas de verão, sendo que os pavimentos reflexivos são mais eficazes na redução da temperatura do ar no nível dos pedestres do que o aumento do albedo dos telhados. A implementação de pavimentos reflexivos resultou na diminuição de até 0,45°C (LCZ 2: $\Delta\alpha_s = 0,20$ e $\lambda_s = 0,34$) por aumento médio de 0,10 no albedo, enquanto os telhados de alta refletividade ofereceram resfriamento de 0,14°C (LCZ 3: $\Delta\alpha_s = 0,36$ e $\lambda_s = 0,47$) em condições típicas de uma tarde de verão sem nebulosidade. A eficácia das estratégias de mitigação é influenciada por vários fatores, incluindo condições meteorológicas, características da área modelada, intensidade das implementações e a capacidade do modelo em representar processos físicos. Isso ressalta a importância da avaliação apropriada do modelo e da implementação de estratégias de redução de calor que levem em consideração o contexto de cada local para projetar cenários de adaptação que sejam os mais efetivos possíveis.

Palavras-chave: modelagem microclimática; zona climática local; estratégias de mitigação do calor; ENVI-met; Presidente Prudente.

ABSTRACT

Microscale numerical models that are able to simulate the thermal conditions of complex urban environments are increasingly being used to plan scenarios for climate adaptation and assess the benefits of heat mitigation measures. In this thesis, the cooling impacts of urban heat mitigation strategies in Presidente Prudente-SP Local Climate Zones (LCZs) are evaluated using ENVI-met, with the hypothesis that LCZs require different heat reduction strategies that consider the conditions of each landscape to reduce urban temperatures. First, the formation of heat islands in compact low- and mid-rise neighborhoods during typical winter and summer days are addressed. For the base case scenarios, calibration and validation of ENVI-met are conducted through *in situ* observations to improve the performance of the simulations and assess the model biases and reliability of the results. The simulations of urban heat mitigation strategies focus on the assessment of absolute and normalized cooling impacts of reflective roofs and pavements. Their effects on air temperature are analyzed using the albedo cooling effectiveness metric (ACE), which is based on the fraction of the modified surface (λ_s) and intensity of the heat mitigation implementation ($\Delta\alpha_s$). The data demonstrate that albedo-based implementations generate more cooling for daytime summer conditions. They also show that reflective pavements are more effective in reducing the pedestrian-level air temperature compared to the roof-level albedo increase. The implementation of the reflective pavements yields cooling of up to 0.45°C (LCZ 2: $\Delta\alpha_s = 0.20$ and $\lambda_s = 0.34$) per 0.10 albedo increase, whereas high-reflectivity roofs offer 0.14°C of cooling (LCZ 3: $\Delta\alpha_s = 0.36$ and $\lambda_s = 0.47$) for summer afternoon conditions. The efficacy of mitigation strategies is affected by several factors, including meteorological conditions, neighborhood characteristics, intensity of implementation, and the model's ability to represent physical processes. This highlights the importance of appropriate model evaluation and implementation of heat reduction strategies that account for the context of each site to design scenarios with the most effective adaptation measures.

Keywords: microclimate modeling; local climate zone; heat mitigation strategies; ENVI-met; Presidente Prudente.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Sistema de classificação da paisagem através de zonas climáticas locais (LCZs)	25
Figura 2.2 Estrutura do modelo ENVI-met	31
Figura 2.3 Diferentes métodos de construção de camadas de grade vertical	33
Figura 3.1 Fluxograma dos procedimentos da pesquisa	37
Figura 3.2 Ilustração das zonas climáticas locais (LCZs).....	38
Figura 4.1 Localização da área de estudo	41
Figura 4.2 Área central de Presidente Prudente	42
Figura 4.3 Área residencial de Presidente Prudente	44
Figura 4.4 Área rural de Presidente Prudente	45
Figura 4.5 Climograma de Presidente Prudente (1969–2019)	46
Figura 4.6 Mapa hipsométrico de Presidente Prudente.....	48
Figura 4.7 Mapa de orientação de vertentes de Presidente Prudente.....	49
Figura 5.1 Mapas de cobertura da terra e materiais construtivos nas LCZs em Presidente Prudente	54
Figura 5.2 Razão do aspecto do cânion urbano H/W	56
Figura 5.3 Planta baixa dos edifícios e vegetação arbórea nas LCZs	57
Figura 5.4 LCZ 2 – Compacta de média elevação	59
Figura 5.5 LCZ 3 – Compacta de baixa elevação	60
Figura 5.6 LCZ B – Vegetação arbórea esparsa	61
Figura 5.7 Frequência da direção e velocidade dos ventos em junho de 2015	64
Figura 5.8 Temperatura do ar, $\Delta T_{LCZ\ X-Y}$, RSG, umidade relativa e umidade específica nas LCZs em 11 de junho de 2015	65
Figura 5.9 Frequência da direção e velocidade dos ventos em dezembro de 2015	67
Figura 5.10 Temperatura do ar, $\Delta T_{LCZ\ X-Y}$, RSG, umidade relativa e umidade específica nas LCZs em 17 de dezembro de 2015.....	69
Figura 6.1 Visualização 2D e 3D da área do modelo das LCZs	76

Figura 6.2 Comparação entre as variáveis registradas na LCZ 2 e simuladas pelo ENVI-met.....	79
Figura 6.3 Comparação entre as variáveis registradas na LCZ 3 e simuladas pelo ENVI-met.....	82
Figura 6.4 Comparação entre as variáveis registradas na LCZ B e simuladas pelo ENVI-met	84
Figura 7.1 Áreas de domínio com diferentes tamanhos	89
Figura 7.2 LCZs 2 e 3 com áreas de domínio de 300 m de diâmetro	90
Figura 7.3 Distribuição da temperatura do ar a 2 m da superfície na LCZ 2.....	93
Figura 7.4 Distribuição da temperatura do ar a 2 m da superfície na LCZ 3.....	95
Figura 8.1 Áreas dos domínios delimitadas para aplicação de telhados e pavimentos reflexivos.....	99
Figura 8.2 Diferença de temperatura do ar entre o cenário base e o cenário de telhados reflexivos na LCZ 2	101
Figura 8.3 Diferença de temperatura dos telhados entre o cenário base e o cenário de telhados reflexivos na LCZ 2	102
Figura 8.4 Diferença de temperatura do ar entre o cenário base e o cenário de pavimentos reflexivos na LCZ 2	103
Figura 8.5 Variação da temperatura da superfície entre o cenário base (CB) e o cenário com pavimentos reflexivos (PR) na LCZ 2.....	104
Figura 8.6 Diferença de temperatura do ar entre o cenário base e o cenário de telhados reflexivos na LCZ 3	105
Figura 8.7 Diferença de temperatura dos telhados entre o cenário base e o cenário de telhados reflexivos na LCZ 3	106
Figura 8.8 Diferença de temperatura do ar entre o cenário base e o cenário de pavimentos reflexivos na LCZ 3	107
Figura 8.9 Variação da temperatura da superfície entre o cenário base (CB) e o cenário com pavimentos reflexivos (PR) na LCZ 3.....	108
Figura A.1 Imagens da LCZ 2 com a câmera termográfica FLIR E5 em 6 de julho de 2019	135

Figura A.2 Imagens da LCZ 3 com a câmera termográfica FLIR E5 em 6 de julho de 2019	136
Figura A.3 Imagens da LCZ B com a câmera termográfica FLIR E5 em 6 de julho de 2019	137
Figura B.1 Tabelas de diferenças de temperatura por pares de LCZ ($\Delta T_{LCZ\ X-Y}$) às 21:00 h em junho de 2015.....	139
Figura B.2 Tabelas de diferenças de temperatura por pares de LCZ ($\Delta T_{LCZ\ X-Y}$) às 21:00 h em dezembro de 2015.....	140
Figura C.1 Correlação entre os dados observados na LCZ 2 e simulados com as forçantes ASOS e INMET no processo de calibração do modelo ENVI-met	142
Figura C.2 Correlação entre os dados observados na LCZ 3 e simulados com as forçantes ASOS e INMET no processo de calibração do modelo ENVI-met	143
Figura C.3 Correlação entre os dados observados na LCZ B e simulados com as forçantes ASOS e INMET no processo de calibração do modelo ENVI-met	144
Figura E.1 Distribuição da temperatura do ar a 2 m da superfície na LCZ 2	147
Figura E.2 Distribuição da temperatura do ar a 2 m da superfície na LCZ 3	148
Figura D.I Diagrama solar para Presidente Prudente.....	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Albedo (α) e emissividade (ϵ) de materiais naturais e urbanos.....	22
Tabela 2.2 Valores de propriedades da superfície para zonas climáticas locais	26
Tabela 2.3 Características dos diferentes tipos de modelos urbanos.....	30
Tabela 5.1 Porcentagem das propriedades de cobertura da superfície e materiais construtivos nas LCZs em Presidente Prudente	54
Tabela 5.2 Valores das propriedades de cobertura da superfície das LCZs em Presidente Prudente em comparação com os intervalos estabelecidos por Stewart e Oke (2012).....	55
Tabela 5.3 Dados meteorológicos de junho de 2015 em Presidente Prudente	62
Tabela 5.4 Dados meteorológicos de dezembro de 2015 em Presidente Prudente	63
Tabela 6.1 Propriedades físicas e térmicas dos materiais	72
Tabela 6.2 Características da vegetação rasteira e arbórea	74
Tabela 6.3 Parâmetros utilizados para configurar o domínio do modelo nas LCZs em Presidente Prudente.....	75
Tabela 6.4 Parâmetros utilizados para configurar os dados meteorológicos de entrada nas LCZs em Presidente Prudente.....	77
Tabela 6.5 Índices estatísticos para as simulações na LCZ 2.....	80
Tabela 6.6 Índices estatísticos para as simulações na LCZ 3.....	82
Tabela 6.7 Índices estatísticos para as simulações na LCZ B.....	85
Tabela 6.8 Resultados da avaliação do modelo ENVI-met em estudos anteriores.....	87
Tabela 7.1 Parâmetros utilizados para configurar o domínio de 300 m de diâmetro nas LCZs em Presidente Prudente	90
Tabela 7.2 Índices estatísticos para as simulações com área de domínio de 300 m de diâmetro	91

Tabela 7.3 Valores de temperatura do ar a 2 m da superfície no cenário base da LCZ 2	92
Tabela 7.4 Valores de temperatura do ar a 2 m da superfície no cenário base da LCZ 3 ...	94
Tabela 8.1 Configuração das propriedades dos materiais para os diferentes cenários	100
Tabela 8.2 Cobertura da superfície na área do plano de implementação das estratégias de mitigação.....	109
Tabela 8.3 Área e intensidade da implementação de telhados e pavimentos reflexivos nas LCZs em Presidente Prudente	110
Tabela 8.4 Eficácia de resfriamento do albedo de telhados e pavimentos reflexivos na LCZ 2	110
Tabela 8.5 Eficácia de resfriamento do albedo de telhados e pavimentos reflexivos na LCZ 3	111
Tabela B.I Propriedades da cobertura da superfície e dos solos	151
Tabela B.II Propriedades dos perfis de solo.....	151

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 Programas do modelo ENVI-met.....	34
Quadro 3.1 Equipamentos utilizados nas medições.....	40
Quadro 6.1 Esquemas dos elementos construtivos e coberturas da superfície.....	73
Quadro A.1 Características dos pontos de medição das LCZs	133
Quadro A.2. Características dos pontos das estações meteorológicas	134
Quadro A.I Especificações gerais da câmera FLIR E5.....	150

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Estrutura da tese	20
2	MODELAGEM DO CLIMA URBANO	21
2.1	Clima urbano	21
2.2	Modelagem numérica	27
2.3	Tipologias de modelos aplicados nos estudos de clima urbano	28
2.4	O modelo microclimático tridimensional ENVI-met	31
3	PROCEDIMENTOS DA PESQUISA	37
4	CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO	41
4.1	Centro da cidade: LCZ 2	42
4.2	Bairro residencial: LCZ 3	43
4.3	Área rural: LCZ B	44
4.4	Características do clima e do relevo	45
5	BASE DE DADOS CLIMÁTICOS E DE SUPERFÍCIE DAS ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS EM PRESIDENTE PRUDENTE	51
5.1	Mapeamento da cobertura da terra e dos materiais construtivos	51
5.1.1	Propriedades da superfície	53
5.2	Estimativa da geometria	55
5.3	Fichas técnicas	58
5.4	Definição dos episódios representativos de inverno e verão	61
5.4.1	Características das variáveis climáticas em junho de 2015	64
5.4.2	Características das variáveis climáticas em dezembro de 2015	67
6	CALIBRAÇÃO DO MODELO ENVI-MET	71
6.1	Edição de banco de dados	71
6.2	Configuração do domínio do modelo	74
6.3	Configuração geral da simulação	76

6.4	Avaliação do desempenho do modelo.....	78
6.4.1	Validação dos resultados da calibração para a LCZ 2	78
6.4.2	Validação dos resultados da calibração para a LCZ 3	81
6.4.3	Validação dos resultados da calibração para a LCZ B.....	83
6.4.4	Avaliação geral da calibração do modelo.....	85
7	SIMULAÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES ORIGINAIS.....	89
7.1	Cenários base das zonas climáticas locais.....	91
7.1.1	Cenário base da temperatura do ar na LCZ 2.....	92
7.1.2	Cenário base da temperatura do ar na LCZ 3.....	94
8	ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO DO CALOR URBANO	97
8.1	Projeções de medidas mitigadoras.....	98
8.2	Impactos de resfriamento absoluto das medidas mitigadoras.....	100
8.2.1	Efeitos dos telhados reflexivos na LCZ 2	100
8.2.2	Efeitos dos pavimentos reflexivos na LCZ 2	102
8.2.3	Efeitos dos telhados reflexivos na LCZ 3	104
8.2.4	Efeitos dos pavimentos reflexivos na LCZ 3	106
8.3	Eficácia de resfriamento do albedo (ACE).....	108
8.3.1	Eficácia de resfriamento do albedo de telhados e pavimentos reflexivos	109
8.4	Discussão dos resultados.....	112
9	CONCLUSÕES	115
9.1	Desafios e limitações.....	116
9.2	Trabalhos futuros	118
	REFERÊNCIAS	121
	APÊNDICES.....	131
	APÊNDICE A – Caracterização dos pontos de medição.....	132
	APÊNDICE B – Tabelas de diferenças de temperatura por pares de LCZ ($\Delta T_{LCZ X-Y}$) em junho e dezembro de 2015.....	138

APÊNDICE C – Gráficos de dispersão dos dados observados nas LCZs e simulados com as forçantes ASOS e INMET no processo de calibração do modelo ENVI-met	141
APÊNDICE D – Configuração das áreas de domínio com diferentes tamanhos	145
APÊNDICE E – Mapas dos cenários base da temperatura do ar nas LCZs 2 e 3 com legenda padronizada	146
ANEXOS.....	149
ANEXO A – Câmera termográfica FLIR E5.....	150
ANEXO B – Propriedades da cobertura da superfície e dos solos	151
ANEXO C – Descrição das estatísticas de desempenho	152
ANEXO D – Diagrama solar.....	154

1 INTRODUÇÃO

As transformações decorrentes do processo de urbanização proporcionam mudanças radicais nas superfícies naturais e nas propriedades atmosféricas da cidade. Isso envolve a transformação das características aerodinâmicas, radiativas, térmicas e de umidade, o que conseqüentemente perturba os balanços energéticos e hidrológicos naturais (OKE et al, 2017).

A densidade de materiais construtivos faz do sistema urbano um grande armazenador de calor e impermeabiliza a superfície. A geometria das edificações forma superfícies rugosas, com a possibilidade de interceptação da radiação e a estagnação do ar, e o calor e a água liberados como resíduos das atividades humanas suplementam as fontes naturais desses elementos no sistema urbano, provocando um desequilíbrio (OKE, 1987).

As propriedades radiativas, térmicas e hidráulicas dos materiais urbanos diferem significativamente daquelas da rocha, solo, vegetação e água. Somado a isso, em muitas cidades, embora não em todas, as áreas cobertas pela vegetação são suprimidas, reduzindo a fração de energia solar que conduz a evapotranspiração (o fluxo de calor latente) e aquecendo o tecido urbano e o ar (o fluxo de calor sensível) (GRIMMOND, 2007).

Os efeitos das mudanças atmosféricas locais associadas à construção e ao funcionamento das cidades são profundos e têm sido documentados há muito tempo (EVELYN, 1661; HOWARD, 1818; CHANDLER, 1965; LOWRY, 1977; MONTEIRO, 1976; OKE, 1976; AUER, 1978; LANDSBERG, 1981). No estudo das alterações no clima provocadas pela urbanização, Oke (1976) propôs a classificação da atmosfera em duas camadas: uma governada pelos processos atuantes na microescala (*Urban Canopy Layer – UCL*) e outra pelos processos locais ou de mesoescala (*Urban Boundary Layer – UBL*).

A camada do dossel urbano (UCL) se estende da superfície até o nível médio das coberturas dos edifícios e compreende o ar contido entre os elementos da rugosidade, por isso o seu clima é dominado pela natureza das imediações, como os materiais e a geometria do local. A camada de limite urbana (UBL), situada diretamente acima da UCL, se refere à parte da camada limite planetária. Oke (1976) destaca que suas características são afetadas pela presença de uma área urbana no seu limite mais baixo, sendo que sua altura média pode variar em função da capacidade da superfície em provocar a movimentação do ar.

Ambas as camadas correspondem a fenômenos locais e suas características são definidas pela forma como o processo de urbanização altera as propriedades da superfície. Nesse sentido, pode-se citar a alteração do balanço energético como produto das transformações na superfície da cidade e um dos fatores que produzem condições climáticas que diferem das áreas circunvizinhas e contribuem para o aquecimento urbano e a formação das ilhas de calor.

A abordagem convencional do fenômeno ilhas de calor consiste em medir temperaturas na camada do dossel através de registros em pontos fixos e/ou a partir de transectos móveis. Os locais são tipicamente classificados como urbano ou rural, e suas diferenças de temperatura são tomadas para indicar a intensidade ou magnitude das ilhas de calor (STEWART; OKE, 2012).

No entanto, Stewart (2007, 2011) demonstra que o uso tradicional do termo “urbano-rural” limita o avanço nos métodos e a comunicação dos resultados, e propõe o sistema de classificação da paisagem denominado zona climática local (*Local Climate Zone – LCZ*). Através desse sistema, a paisagem é dividida de acordo com as propriedades da superfície que influenciam a temperatura no nível dos pedestres: morfologia (altura e densidade dos elementos urbanos) e cobertura da terra (permeável ou impermeável).

Nessa proposta, a intensidade das ilhas de calor é definida pela diferença de temperatura entre LCZs ($\Delta T_{LCZ\ X-Y}$), abordagem que favorece as análises por ser baseada em uma estrutura que destaca a forma construída e a superfície comum dos locais de campo comparados (STEWART; OKE, 2012).

Com base na adaptação das diretrizes de Stewart (2011), Cardoso (2015) identificou potenciais LCZs na cidade de Presidente Prudente-SP, cujas paisagens heterogêneas em áreas reduzidas, superfícies construídas com pouca cobertura vegetal e atividades antropogênicas colaboraram para o desenvolvimento de ilhas de calor de grande magnitude ($\Delta T_{LCZ\ X-Y} > 5^{\circ}\text{C}$) (CARDOSO; AMORIM, 2017, 2018).

A existência desses contrastes térmicos elevados, associada aos eventos mais frequentes e intensos de ondas de calor, indica a necessidade de planejamento e gestão pautados nas condições climáticas para diminuir o aquecimento urbano e garantir um ambiente mais agradável e saudável para os habitantes.

A complexidade encontrada nas cidades e o desafio em mensurar as interações e correlações não-lineares entre os diferentes aspectos do clima, dificultam o desenvolvimento de diretrizes gerais para um planejamento urbano que considere as características climáticas locais. Por outro lado, as observações de campo são cada vez mais utilizadas com modelos numéricos para avaliar o impacto do ambiente urbano no microclima e simular cenários de adaptação (MASSON, 2000; HUTTNER, 2012).

De acordo com Huttner (2012), os modelos numéricos precisam atender alguns requisitos para simular com precisão a física da camada atmosférica de uma área urbana: tamanho da grade da área do modelo suficientemente pequeno para simular edifícios; implementação do balanço energético de diferentes superfícies; inclusão das propriedades físicas e fisiológicas das plantas; e cálculo prognóstico e transiente dos processos atmosféricos.

O modelo tridimensional ENVI-met¹ é um dos poucos de microescala que apresentam todos os critérios referidos acima. Seu desenvolvimento foi iniciado em 1995 por Michael Bruse e sua equipe da *Johannes Gutenberg University*, na cidade de Mainz, Alemanha, e consiste em um modelo de Dinâmica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics* – CFD) que utiliza as equações de médias de Reynolds (*Reynolds Averaged Navier-Stokes* – RANS) para resolver o fluxo atmosférico e a transferência de calor no ambiente urbano (BRUSE; FLEER, 1998; HUTTNER, 2012; CRANK et al., 2018).

O ENVI-met já foi utilizado em investigações em diferentes locais: Hedquist et al. (2009), Chow (2011) e Middel et al. (2014) na cidade de Phoenix-AZ, Estados Unidos; Shinzato (2009, 2014) e Gusson (2014, 2020) em São Paulo-SP, Brasil; Carfan (2011) em Ourinhos-SP, Brasil; Nogueira (2011) em Maceió-AL, Brasil; Elnabawi et al. (2013) no Cairo, Egito; Bennet e Ewenz (2013) em Adelaide, Austrália; Ambrosini et al. (2014) em Téramo, Itália; Magliocco e Perini (2014) em Milão, Gênova e Roma, Itália; Mendes et al. (2014) em Piracicaba-SP, Brasil; Schmitz (2014) em Curitiba-PR, Brasil; Bozonnet et al. (2015) em Nantes, França; Maleki e Mahdavi (2016) em Viena, Áustria, dentre outros.

No Brasil, sua aplicação se concentra, sobretudo, em estudos de arquitetura e urbanismo, desde simulações para analisar o impacto da vegetação (SHINZATO, 2009, 2014) e os efeitos dos edifícios sobre o microclima urbano (GUSSON, 2014; GUSSON; DUARTE, 2016), até simulações mais específicas, com enfoque na qualidade microclimática de loteamentos (NOGUEIRA, 2011). No exterior, o modelo também é utilizado em estudos microclimáticos voltados à investigação e mitigação dos efeitos das ilhas de calor (HEDQUIST et al., 2009; CHOW, 2011; MAGLIOCCO; PERINI, 2014; MIDDEL; CHHETRI; QUAY, 2015; MALEKI; MAHDAVI, 2016).

Nesse sentido, a escala de aplicação e as funcionalidades do ENVI-met são adequadas à abordagem das LCZs. Além da sua estrutura abrangente para a investigação das ilhas de calor, o sistema pode fornecer dados de entrada para o modelo sobre a morfologia, a cobertura da superfície e os efeitos térmicos na camada do dossel. Em conjunto, o ENVI-met e as LCZs constituem uma ferramenta robusta para o planejamento, já que permitem utilizar o conhecimento da superfície e do clima urbano para simular cenários com estratégias de mitigação.

A diversidade de superfícies e elementos urbanos que compõem as LCZs geram microclimas específicos com dinâmicas que influenciam a formação de ilhas de calor e intensificam seus efeitos no intraurbano. Por promoverem diferentes interações entre a superfície, a vegetação, os edifícios e a atmosfera, a hipótese desse estudo é a de que as LCZs requerem estratégias distintas para cada arranjo de paisagem com o intuito de reduzir

¹ ENVI-met ® is a registered trademark in Germany under n. 304 73 896.

as temperaturas urbanas.

Portanto, o objetivo principal consiste em avaliar o desempenho de estratégias de mitigação do calor urbano em LCZs de Presidente Prudente através da modelagem numérica com o ENVI-met. Para alcançar o objetivo proposto, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- 1) Analisar os impactos da configuração urbana na formação e intensificação das ilhas de calor;
- 2) Propor medidas de mitigação com base na alteração das propriedades da superfície;
- 3) Avaliar os impactos de resfriamento das estratégias aplicadas.

1.1 Estrutura da tese

A tese está dividida em mais oito capítulos. O capítulo 2 aborda os temas centrais da pesquisa referentes ao clima urbano e à modelagem numérica, e o capítulo 3 sintetiza as etapas dos procedimentos desenvolvidos na tese.

No capítulo 4, tem-se a descrição das características gerais de Presidente Prudente e das LCZs estudadas, e no capítulo 5 são apresentadas a base de dados climáticos e de superfície e a análise dos episódios selecionados para a modelagem.

O capítulo 6 expõe o processo de calibração do modelo ENVI-met e a validação dos resultados, seguido dos testes de sensibilidade e das simulações dos cenários base no capítulo 7.

O capítulo 8 aborda as projeções de estratégias de mitigação e a avaliação dos impactos de resfriamento nas LCZs, e no capítulo 9 são descritas as conclusões da tese, os desafios e limitações, e os apontamentos para trabalhos futuros.

2 MODELAGEM DO CLIMA URBANO

2.1 Clima urbano

Os climas das cidades estão sempre sob a influência de eventos sinóticos em escalas atmosféricas maiores, que em escalas de tempo mais longas também determinam o clima típico de um lugar. No entanto, as cidades são compostas por uma diversidade de formas e funções urbanas cujas propriedades constituem controles relevantes sobre o clima urbano: diferentes padrões de cobertura da superfície; materiais naturais e de construção que formam os elementos urbanos; estrutura geométrica complexa e metabolismo urbano associado às emissões de calor, água e poluentes atmosféricos (OKE et al., 2017).

Às vezes, as condições climáticas em grande escala são as influências dominantes e, em outras, as condições locais são predominantes, embora ambas estejam sempre presentes. Como regra geral, pode-se afirmar que durante um forte padrão de fluxo sinótico, caracterizado por ventos fortes, nuvens e, às vezes, precipitação, as influências locais são amplamente suprimidas. No entanto, quando os ventos são fracos e o céu está limpo, com sol durante o dia e sem nuvens à noite, os efeitos locais controlam a camada mais baixa da atmosfera (LANDSBERG, 1981, p. 17–18, tradução nossa)².

As propriedades da superfície, por meio da absorção, reflexão e emissão de radiação; da transformação de energia e massa; da interceptação de precipitação e poluentes atmosféricos; e da alteração do fluxo de vento, controlam muitas das características da camada limite da atmosfera. Próximo à superfície, a camada de dossel urbano é o local de intensa atividade humana, troca/transformação de energia, momentum e água, e onde se encontra grande variabilidade nos microclimas (OKE et al., 2017).

As superfícies urbanas são multifacetadas e seus atributos contrastam não só com a relativa simplicidade de superfícies planas e homogêneas, mas também com o entorno rural. Enquanto o ambiente rural é caracterizado pela presença de vegetação, solo pouco compactado e permeável, a área urbana apresenta uma superfície altamente compactada e impermeável, rápido escoamento após a precipitação, diminuição do armazenamento de água e da evapotranspiração e maior absorção da energia solar pelos materiais de construção (LANDSBERG, 1981; OKE et al., 2017).

A variedade de materiais urbanos com refletividades e emissividades distintas, e a

² Sometimes the large-scale weather conditions are the dominant influences and at others the local conditions are prevalent, although both of them are always present. As a general rule one can state that during a strong synoptic flow pattern, characterized by brisk winds, clouds, and, at times, precipitation, local influences are largely suppressed. However, when winds are weak and the sky is clear, with sunshine during the day and cloudless conditions at night, the local effects control the lowest layer of the atmosphere.

configuração dos cânions com facetas de diferentes inclinações e orientações também favorecem trocas radiativas entre as fachadas dos edifícios, entre os edifícios e as superfícies (aumento na absorção) ou até mesmo o bloqueio da radiação (OKE et al., 2017; LANDSBERG, 1981).

Nesse sentido, considerar as propriedades radiativas dos materiais é fundamental para compreender os efeitos do tecido e da estrutura urbana na camada do dossel. O albedo e a emissividade (Tabela 2.1), por exemplo, são propriedades relevantes para o planejamento e a construção de edifícios ou outras estruturas, uma vez que a escolha dos materiais afeta o balanço de radiação.

Tabela 2.1 Albedo (α) e emissividade (ϵ) de materiais naturais e urbanos*

Superfície	Albedo (α)		Emissividade (ϵ)
<i>Superfícies Naturais</i>			
<i>Solo exposto^a</i>			
Solo (escuro, úmido → claro, seco)	0,05–0,30	Solo (claro, seco → escuro, úmido)	0,89–0,98
<i>Vegetação baixa</i>			
Gramíneas (alta → baixa)	0,16–0,26		0,90–0,98
Plantações	0,18–0,25		0,90–0,99
<i>Florestas</i>			
Decíduas (sem folhas → com folhas)	0,13–0,20		0,90–0,99
Pomares	0,07–0,15		—
Coníferas	0,11–0,13		0,97–0,99
<i>Água^b</i>			
Ângulo da altura do sol (β) > 60°	0,03–0,10	Água ^c	0,92–0,97
10° < β < 60°	0,10–0,50		—
<i>Materiais da superfície urbana</i>			
<i>Vias</i>			
Asfalto (novo → intemperizado)	0,05–0,27		0,89–0,96
Concreto ^d	0,10–0,35		0,85–0,97
<i>Paredes</i>			
Concreto	0,10–0,35		0,85–0,97
Tijolo (cor, vermelho → branco)	0,20–0,60		0,90–0,92
Madeira	0,22		0,90
<i>Telhados^e</i>			
Telhas (cerâmica, envelhecida → nova)	0,10–0,35	Telhas ^c	0,90
Aço corrugado	0,10–0,16		0,13–0,28
Aço galvanizado (intemperizado → novo)	0,37–0,45		0,25
<i>Janelas</i>			
Vidro transparente	0,08	Vidro transparente (não revestido)	0,87–0,95
β > 50°	0,09–0,52	Vidro (tingido, com filme e revestido)	0,05–0,30
10° < β < 50°	0,40–0,80		—
<i>Pinturas</i>			
Branco, cal	0,50–0,90		0,85–0,95

Superfície	Albedo (α)	Emissividade (ϵ)
Vermelho, marrom, verde	0,20–0,35	0,85–0,95
Preto	0,02–0,15	0,90–0,98
<i>Metais</i>		
Metais polidos	0,50–0,90	0,02–0,06

* Valores dados como um intervalo ou média.

^a Menor se for áspero, arado.

^b Menor se a superfície estiver agitada.

^c Depende da rugosidade da superfície.

^d Intervalo devido aos agregados e sujeira.

^e Telhados com materiais de alta refletância aumentam os valores na faixa de 0,4 a 0,8.

Fonte: Adaptado de Oke et al. (2017, tradução nossa).

Pinturas externas, pavimentos e coberturas de telhado com albedo elevado, ou alta refletividade no espectro infravermelho, podem ser utilizados para minimizar a absorção de calor e reduzir as temperaturas urbanas. Os materiais frios reduzem a temperatura da superfície, diminuem a transferência de calor por convecção da superfície para o ar e proporcionam temperaturas do ar mais amenas do que as superfícies tradicionais (MCPHERSON, 1994; SANTAMOURIS, 2014).

Por sua vez, a estrutura urbana, com superfícies organizadas em configurações de tamanhos e formas distintas (ruas, quadras e bairros), tem uma composição única de elementos que contribuem para a geração de microclimas nessas escalas.

A menor unidade da paisagem urbana é uma faceta, como uma parede ou telhado, que possui propriedades consistentes, incluindo material, inclinação e orientação. As facetas podem ser combinadas para criar um elemento urbano, como um edifício ou uma árvore. A combinação de elementos cria feições urbanas, como cânions e quadras. A diversidade desses elementos torna a paisagem urbana espacialmente heterogênea na microescala, mas áreas extensas (> 1 km²) das cidades tendem a apresentar uma mistura semelhante dessa diversidade; essas são os bairros, que representam um tipo de homogeneidade em escala maior. A cidade como um todo é composta por bairros de extensão e composição variadas que refletem o desenvolvimento histórico do local (OKE et al., 2017, p. 42, tradução nossa)³.

Embora essa diversidade implique em um cenário complexo de escalas de superfície e propriedades, a classificação da paisagem estabelece uma certa ordem e possibilita descrever e quantificar a cobertura da superfície, os materiais, a estrutura e o metabolismo.

³ The smallest unit of the urban landscape is a facet like a wall or roof, which has consistent properties, including material, slope and aspect. Facets may be combined to create an urban element such as a building or a tree. The combination of elements creates urban features such as canyons and blocks. The diversity of these elements makes the urban landscape spatially heterogeneous at a microscale, however, large areas (> 1 km²) of cities tend to have similar mix of such diversity; these are neighbourhoods, which represent a type of homogeneity at a larger scale. The city as a whole is comprised of neighbourhoods of varying extent and makeup that reflects the historical development of the settlement.

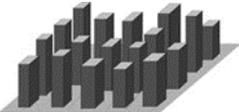
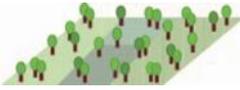
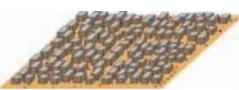
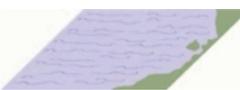
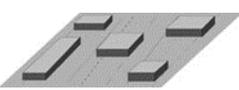
Geralmente, há uma correspondência espacial desses controles na formação das paisagens. Áreas densamente construídas, por exemplo, apresentam superfície edificada e impermeável, materiais que armazenam mais calor, fluxo elevado de pessoas e veículos, e intensa atividade antropogênica (emissão de calor, umidade e poluentes). Por outro lado, nos locais com baixa densidade construída, pode haver maior cobertura vegetal e superfície permeável, baixo fluxo de pessoas e veículos, e emissões derivadas das atividades humanas relativamente baixas.

A ocorrência desses arranjos fundamenta o sistema de classificação de zonas climáticas locais, cujas classes são definidas pela capacidade de suas propriedades de modificar os aspectos do clima (temperatura, umidade e vento) nas escalas micro e local. A estrutura das LCZs tem como base dados observacionais e de modelagem numérica e sua representação compreende 17 classes: 10 relacionadas aos tipos de construções e 7 referentes aos tipos de cobertura da terra (STEWART, 2011; STEWART; OKE, 2012) (Fig. 2.1).

As LCZs são propícias para os estudos de clima urbano pois expressam as propriedades físicas do local que controlam suas respostas climáticas (Tabela 2.2), o que demonstra a importância de quantificá-las para estabelecer relações entre as modificações na atmosfera local e os tipos de paisagem.

Dessa forma, o sistema possibilita a construção de bancos de dados sobre morfologia e cobertura da superfície, assim como os efeitos térmicos associados, e pode fornecer dados de entrada para modelos numéricos que incorporam parâmetros do dossel urbano em suas formulações, possibilitando a simulação de diferentes condições e variáveis climáticas.

Figura 2.1 Sistema de classificação da paisagem através de zonas climáticas locais (LCZs)

TIPOS CONSTRUÍDOS		TIPOS DE COBERTURA DA TERRA	
	LCZ 1 – Compacta de alta elevação		LCZ A – Vegetação arbórea densa
	LCZ 2 – Compacta de média elevação		LCZ B – Vegetação arbórea esparsa
	LCZ 3 – Compacta de baixa elevação		LCZ C – Vegetação arbustiva
	LCZ 4 – Aberta de alta elevação		LCZ D – Vegetação rasteira
	LCZ 5 – Aberta de média elevação		LCZ E – Rocha exposta / pavimentada
	LCZ 6 – Aberta de baixa elevação		LCZ F – Solo exposto / areia
	LCZ 7 – Compacta pouco consolidada de baixa elevação		LCZ G – Água
	LCZ 8 – Grandes construções de baixa elevação		
	LCZ 9 – Construções esparsas		
	LCZ 10 – Indústria pesada		

PROPRIEDADES VARIÁVEIS DE COBERTURA DA TERRA

- b.* árvores sem folhas
- s.* superfície coberta de neve
- d.* solo seco
- c.* solo úmido

Fonte: Adaptado de Stewart e Oke (2012, tradução nossa)

Tabela 2.2 Valores de propriedades da superfície para zonas climáticas locais

LCZ	Fator de visão do céu ^a , ψ_{sky}	Razão do aspecto ^b , $\lambda_s = H/W$	Fração da superfície edificada ^c , λ_b (%)	Fração da superfície impermeável ^d , λ_i (%)	Fração da superfície permeável ^e , λ_v (%)	Altura média dos elementos ^f , z_H (m)	Classe de rugosidade do terreno ^g	Admitância térmica da superfície ^h , μ ($J m^{-2} s^{-1/2} K^{-1}$)	Albedo ⁱ , α	Densidade do fluxo de calor antropogênico ^j , Q_F ($W m^{-2}$)
LCZ 1	0,2–0,4	>2	40–60	40–60	<10	>25	8	1.500–1.800	0,10–0,20	50–300
LCZ 2	0,3–0,6	0,75–1,5	40–70	30–50	<20	8–20	6–7	1.500–2.200	0,10–0,20	<75
LCZ 3	0,2–0,6	0,75–1,5	40–70	20–40	<30	3–8	6	1.200–1.800	0,10–0,20	<75
LCZ 4	0,5–0,7	0,75–1,25	20–40	30–40	30–40	>25	7–8	1.400–1.800	0,12–0,25	<50
LCZ 5	0,5–0,8	0,3–0,75	20–40	30–50	20–40	8–20	5–6	1.400–2.000	0,12–0,25	<25
LCZ 6	0,6–0,9	0,3–0,75	20–40	20–40	30–60	3–8	5–6	1.200–1.800	0,12–0,25	<25
LCZ 7	0,2–0,5	1–2	60–90	<10	<30	2–4	4–5	800–1.500	0,15–0,35	<35
LCZ 8	>0,7	0,1–0,3	30–50	40–50	<20	3–10	5	1.200–1.800	0,15–0,25	<50
LCZ 9	>0,8	0,1–0,25	10–20	<20	60–80	3–8	5–6	1.000–1.800	0,12–0,25	<10
LCZ 10	0,6–0,9	0,2–0,5	20–30	20–40	40–50	5–15	5–6	1.000–2.500	0,12–0,20	>300
LCZ A	<0,4	>1	<10	<10	>90	3–30	8	—	0,10–0,20	0
LCZ B	0,5–0,8	0,25–0,75	<10	<10	>90	3–15	5–6	1.000–1.800	0,15–0,25	0
LCZ C	>0,9	0,25–1,0	<10	<10	>90	<2	4–5	700–1.500	0,15–0,30	0
LCZ D	>0,9	<0,1	<10	<10	>90	<1	3–4	1.200–1.600	0,15–0,25	0
LCZ E	>0,9	<0,1	<10	>90	<10	<0,25	1–2	1.200–2.500	0,15–0,30	0
LCZ F	>0,9	<0,1	<10	<10	>90	<0,25	1–2	600–1.400	0,20–0,35	0
LCZ G	>0,9	<0,1	<10	<10	>90	—	1	1.500	0,02–0,10	0

^a Razão entre a quantidade de hemisfério do céu visível do nível da superfície e a de hemisfério desobstruído.

^b Razão média entre altura e largura dos cânions (LCZs 1–7), espaçamento entre edifícios (LCZs 8–10) e espaçamento entre árvores (LCZs A–G).

^c Fração da superfície cobertura por edifícios.

^d Fração da superfície com cobertura impermeável (rocha, pavimentada).

^e Fração da superfície com cobertura permeável (solo exposto, vegetação, água).

^f Média geométrica da altura dos edifícios (LCZs 1–10) e altura das árvores / plantas (LCZs A–F).

^g Classificação de Davenport et al. (2000) de rugosidade efetiva do terreno (z_0) para paisagens urbanas e rurais.

^h Capacidade da superfície de receber ou liberar calor. Os valores são intervalos típicos para superfícies em cada LCZ (por exemplo, edifícios, estradas, solos). Varia com a umidade do solo e a densidade do material.

ⁱ Razão entre a quantidade de radiação solar refletida por uma superfície e a quantidade recebida por ela. Varia com a cor da superfície, umidade e rugosidade.

^j Densidade média anual do fluxo de calor antropogênico na escala local. Varia significativamente com a latitude, estação e densidade populacional.

Fonte: Adaptado de Stewart e Oke (2012, tradução nossa)

2.2 Modelagem numérica

Estudos do clima urbano são registrados desde o século XVII, e com o propósito de aumentar o entendimento das causas do fenômeno ilhas de calor, muitos utilizaram métodos observacionais, teóricos e de modelagem (OKE, 1982). De acordo com Mills (2014), seis períodos distintos de estudos de clima urbano podem ser definidos com base na metodologia de pesquisa:

1900 Observação e descrição dos efeitos urbanos utilizando equipamentos meteorológicos convencionais (termômetros, higrômetros, etc.)

1960 Avanço para a medição das variáveis de 'processo' – radiação, trocas de calor sensível e latente. Utilização de métodos estatísticos para resumir e generalizar resultados.

1970 Aplicação da teoria (micro) meteorológica convencional aos climas urbanos. Uso do orçamento energético como uma estrutura para explicar o efeito urbano. Observação de variáveis de processo (radiação, fluxos estimados). Uso de técnicas de modelagem computacional. Definição mais rigorosa da 'superfície' urbana, escalas urbanas e observação dos efeitos urbanos.

1980 Adoção de abordagens experimentais [...]. Uso de modelos físicos e medição direta dos fluxos.

1990 Relações entre formas urbanas reais e efeito climático. Projetos de campo urbano examinados por equipes de pesquisa. Generalizações baseadas em uma variedade de locais.

2000 Desenvolvimento de modelos climáticos urbanos realistas. Aplicação de novas técnicas para a análise do clima urbano (MILLS, 2014, p. 481, tradução nossa)⁴.

Historicamente, as abordagens observacionais, como as técnicas de medições de campo, de sensoriamento remoto ou modelagem física de pequena escala (testes de túnel de vento da camada de limite atmosférica), constituíram a base principal da análise do microclima urbano. Por outro lado, com o avanço dos recursos computacionais nas últimas décadas, as simulações numéricas tornaram-se cada vez mais populares, sem excluírem a necessidade

⁴ 1900 Observation and description of urban effects using conventional meteorological equipment (thermometers, hygrometers, etc.).

1960 Move toward measurement of 'process' variables – radiation, sensible and latent heat exchanges. The use of statistical methods to summarise and generalise results.

1970 Application of conventional (micro-)meteorological theory to urban climates. Use of energy budget as a framework to explain the urban effect. Observation of process variables: radiation, estimated fluxes. Use of computer modelling techniques. More rigorous definition of urban 'surface', urban scales and observing urban effects.

1980 Adoption of an experimental approach: Select common urban forms (streets become canyons). Use of scaled-physical models and direct measurement of fluxes.

1990 Relationships between real urban forms and climate effect. Urban field projects examined by research teams. Generalizations based on a range of settlements.

2000 Development of realistic urban climate models. Employment of novel techniques for examining urban climate.

de dados observacionais, visto que esses são imprescindíveis para sua validação (ARNFIELD, 2006; SOUCH; GRIMMOND, 2006; TOPARLAR et al., 2017).

A principal vantagem da modelagem numérica é a oportunidade de realizar análises baseadas em diferentes cenários. Além disso, enquanto as observações são geralmente realizadas em um número limitado de pontos no espaço, as simulações podem fornecer informações sobre a variável investigada em todo o domínio da área modelada (TOPARLAR et al., 2017).

Apesar do grande volume de estudos sobre clima urbano com enfoque nas ilhas de calor, o entendimento de suas causas permanece incompleto. Isso se deve, em parte, à interação complexa dos diversos fatores que levam à sua formação e à complexidade exigida em sua modelagem numérica (ATKINSON, 2003).

A maioria dos estudos que utilizam abordagem numérica é realizada, ainda, em grandes cidades nas latitudes médias. De acordo com Roth (2007), os estudos de clima urbano conduzidos em regiões tropicais ou subtropicais constituíam menos de 20%, proporção que diminuiu para apenas 8% (15 de 183 estudos) em estudo mais recente de Toparlar et al. (2017).

Tais fatos apontam para a necessidade de avançar na investigação das interações superfície-vegetação-edifícios-atmosfera que geram microclimas urbanos, principalmente nas cidades de clima tropical, onde as temperaturas elevadas são presentes na maior parte do ano e interferem na qualidade de vida da população. As diferentes interações que ocorrem entre o ambiente urbano e a atmosfera podem ser melhor compreendidas através das simulações numéricas, contribuindo para a resolução ou amenização dos problemas identificados e recomendações de políticas em escalas maiores (ARNFIELD, 2006).

2.3 Tipologias de modelos aplicados nos estudos de clima urbano

De acordo com Grimmond et al. (2010), os modelos foram desenvolvidos para incorporar características urbanas em diferentes aplicações, que incluem desde a modelagem climática global até a previsão numérica do tempo. No âmbito das simulações numéricas na escala do clima urbano, pode ser feita uma distinção entre os modelos que calculam o balanço de energia da superfície (*Surface Energy Balance – SEB*) e as simulações com equações ou modelos CFD, frequentemente utilizadas em análises do microclima por resolverem transferências de calor e massa e a interação com edifícios (TOPARLAR et al. 2017).

Com relação à simulação do balanço de energia da superfície, variável intrínseca à produção do clima urbano, “o acoplamento dos modelos SEB aos modelos atmosféricos permite simular e eventualmente prever o clima das cidades, em particular as ilhas de calor e

as circulações induzidas pela cidade na camada limite” (SOUCH; GRIMMOND, 2006, p. 273, tradução nossa)⁵.

Existem diversos modelos na literatura, que podem ser classificados nas seguintes categorias principais: modelos empíricos; modelos de vegetação, com ou sem os termos de arrasto, adaptados e modificados para se adequar à física do dossel urbano; e um grupo recente de modelos do dossel urbano, que pode ser classificado em modelos de camada única ou de multicamadas (MASSON, 2006, p. 36).

Os modelos empíricos são baseados, principalmente, em dados meteorológicos (radiação solar, temperatura e velocidade do vento), informações da superfície construída e vegetada e da morfologia dos edifícios. Têm como objetivo simular o fluxo de SEB, reproduzindo a energética do dossel por meio de relações estatísticas derivadas das observações (MASSON, 2006; SOUCH; GRIMMOND, 2006).

Os modelos de vegetação se referem aos esquemas de vegetação adaptados para incluir um dossel urbano. A maneira mais comum de simular o SEB urbano é adaptar um esquema de transferência solo-vegetação-atmosfera (*Soil Vegetation Atmosphere Transfer Scheme* – SVAT) existente. Ao utilizar um esquema urbano apropriado, ou adicionar uma força de arrasto nas equações de movimentos do modelo atmosférico até a altura dos edifícios, ocorre a incorporação dos efeitos dinâmicos da superfície urbana no fluxo de ar médio, alterando o comprimento de rugosidade (MASSON, 2006; SOUCH; GRIMMOND, 2006).

Por sua vez, os modelos do dossel urbano englobam novos conceitos de modelagem de superfície, desenvolvidos para simular o dossel urbano com maior precisão física. Tais modelos são mais complexos, pois incorporam a forma tridimensional dos edifícios, resolvem balanços de energia separados para telhado, rua e parede, e parametrizam interações radiativas entre ruas e paredes. Apesar de se basearem em uma geometria simplificada, esses modelos são compostos por superfícies horizontais e verticais com uma capacidade maior de captar o comportamento energético especial do dossel urbano, o que os aproximam da realidade que pretendem representar (MASSON, 2006).

Os modelos do dossel urbano podem ser separados em duas categorias, sendo a primeira referente aos modelos de camada única, como o esquema *Town Energy Balance* (TEB) de Masson (2000). Recebem tal nomenclatura porque há interação direta com apenas uma camada atmosférica, acima do nível mais alto do telhado. Já a segunda categoria é chamada de modelos de multicamadas, porque várias camadas de ar são explicitamente influenciadas pelos edifícios da área urbana até à superfície da rua (MASSON, 2006; SOUCH; GRIMMOND, 2006).

⁵ The coupling of SEB models to atmospheric models makes it possible to simulate and eventually forecast city climates, in particular the UHI and city induced circulations in the boundary layer.

A Tabela 2.3 sintetiza os aspectos gerais dos modelos urbanos descritos acima, como a capacidade de reproduzir o SEB urbano e a rugosidade, a capacidade de simular diretamente as características do ar do dossel, e a possibilidade de acoplamento e portabilidade dos esquemas.

De maneira geral, quanto mais processos físicos são reproduzidos, mais tempo computacional é necessário e mais complexo e difícil é acoplar o modelo de dossel a um modelo atmosférico. Enquanto os SVATs precisam de dados médios sobre a área urbana, que nem sempre são fáceis para definir, como, por exemplo, as características térmicas de todo o dossel, os modelos urbanos de nova geração são mais fáceis de inicializar, uma vez que podem usar as características dos materiais obtidos em levantamentos de campo ou de bancos de dados (MASSON, 2006).

Tabela 2.3 Características dos diferentes tipos de modelos urbanos

Modelos	SEB urbano + rugosidade	Perfis do ar do dossel	Tempo computacional	Acoplamento a modelos atm.
Modelos empíricos	Sim	–	Mais rápido	Muito fácil
SVATs* (modificados, sem arrasto)	Aprox.	–	Rápido	Fácil/moderado
SVATs* (modificados, com arrasto)	Aprox.	Sim	Moderado	Moderado
Modelos urbanos de camada única**	Sim	–	Rápido/dispêndioso	Moderado
Modelos urbanos de multicamadas**	Sim	Sim	Dispêndioso	Difícil

* Grande background, parâmetros médios necessários

** Inicialização a partir de um SIG e propriedades dos materiais

Fonte: Adaptado de Masson (2006, p. 41, tradução nossa)

Compreender os processos e as dinâmicas na camada do dossel urbano é relevante para questões que envolvam a qualidade de vida e do ambiente, como o conforto dos habitantes, o uso de energia nas cidades e a poluição do ar (SOUCH; GRIMMOND, 2006). Nesse sentido, os modelos CFD ou os que resolvam tais tipos de equações, como o ENVI-met, têm sido utilizados em estudos climáticos urbanos para simular fluxos entre a superfície, vegetação e atmosfera, permitindo análises dos efeitos das mudanças no ambiente urbano no microclima.

2.4 O modelo microclimático tridimensional ENVI-met

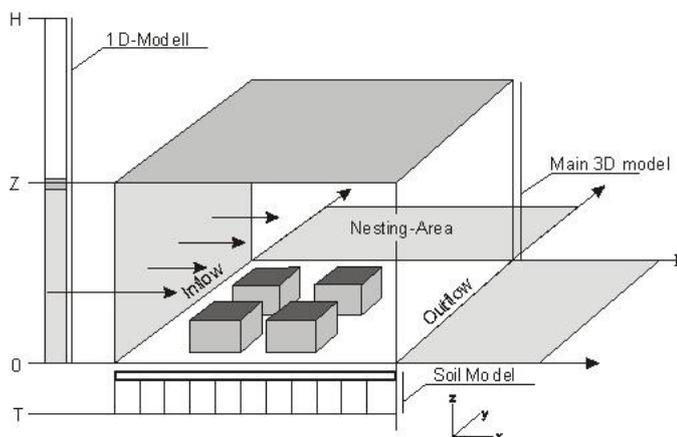
As características detalhadas do modelo, referentes à sua estrutura e às equações matemáticas resolvidas nos submodelos da atmosfera, do solo e da vegetação, são fornecidas por Huttner (2012). Nesta seção, uma visão geral do modelo é apresentada com base nas informações técnicas disponíveis no site oficial do ENVI-met (BRUSE, 2019, tradução nossa).

O ENVI-met é um sistema holístico de modelagem microclimática, baseado nas leis fundamentais da dinâmica de fluidos e termodinâmica. O modelo foi projetado para simular as interações superfície-planta-ar e ambientes urbanos e possibilita analisar interações em pequena escala entre edifícios, superfícies e plantas individuais.

Os cálculos do modelo incluem diversos processos físicos, tais como: (a) fluxos de radiação de ondas curtas e ondas longas; (b) transpiração, evaporação e fluxo de calor sensível da vegetação para o ar; (c) cálculo dinâmico da temperatura da superfície e da temperatura da parede para cada elemento de fachada e telhado; (d) troca de água e calor dentro do sistema do solo, incluindo a captação de água da planta; (e) dispersão de gases e partículas; (f) cálculo de índices biometeorológicos.

A Figura 2.2 ilustra a estrutura básica do ENVI-met. O modelo de solo é necessário para calcular a transferência de calor das superfícies para o solo e vice-versa. Além disso, a parte hidrológica desse modelo fornece informações sobre a água disponível no solo, importantes para estimar a transpiração máxima da vegetação e a água disponível na superfície do solo.

Figura 2.2 Estrutura do modelo ENVI-met



Fonte: Bruse (2019)

O modelo principal é projetado em 3D com 2 dimensões horizontais (x e y) e uma dimensão vertical (z), no qual são inseridos os elementos típicos que representam a área de

interesse, como os tipos de superfície, edifícios e vegetação.

Para representar a área de interesse, esta deve ser reduzida em células de grade. Quanto menor for uma única célula de grade, melhor será a resolução do modelo. No entanto, ao utilizar células da grade pequenas, será necessária uma quantidade maior de células para cobrir determinada área. Conseqüentemente, o tempo de processamento e a capacidade de armazenamento necessária também serão maiores.

No plano horizontal, pode ser necessário adicionar grades de aninhamento (*nesting area* ou *nesting grids*), que não contêm edifícios/objetos, para diminuir a interferência das bordas na dinâmica interna do modelo. O tamanho dessas células aumenta à medida que se afastam do núcleo do modelo, o que permite mover as bordas para longe do núcleo, reduzindo a ocorrência de problemas numéricos (instabilidades) durante a simulação.

Na dimensão vertical, é preciso estender o modelo até a altura mínima de 2.500 m para uma simulação precisa dos processos da camada limite. No entanto, como não é possível e também não é necessário estender o modelo 3D completo até essa altura, o modelo 1D assume o cálculo do topo do modelo 3D até o topo total do modelo a 2.500 m.

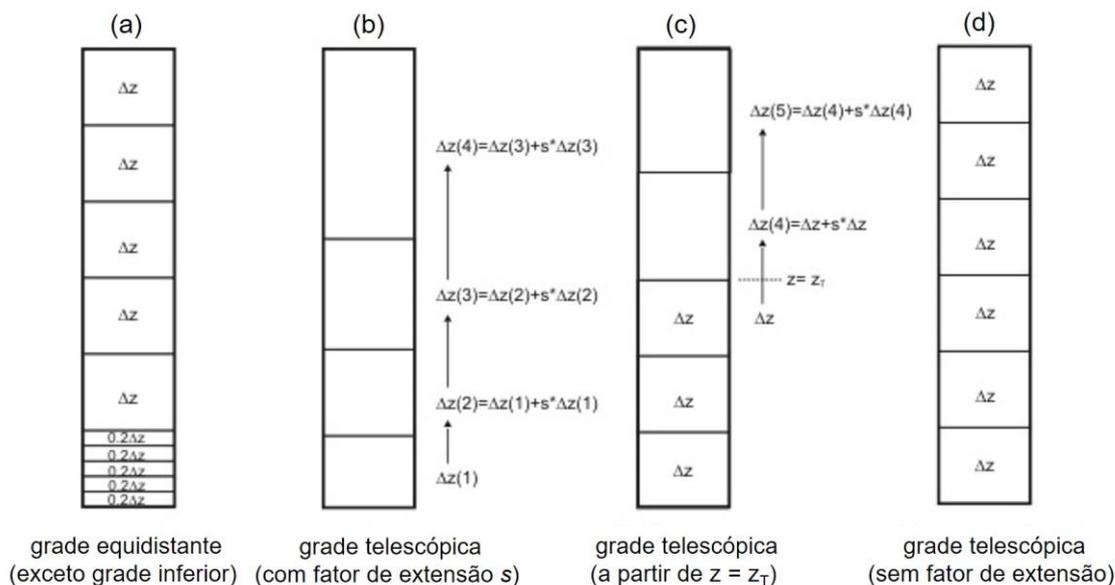
Para representar o perfil vertical do modelo, sugere-se, como regra geral, que a área deve ter pelo menos duas vezes a altura do objeto mais alto, a fim de obter resultados de simulação mais rápidos e evitar divergências. Em relação ao método para gerar esse perfil, há quatro tipos diferentes de grades verticais, que devem ser definidos de acordo com as especificidades da área a ser modelada.

A grade equidistante é indicada quando o domínio do modelo tem altura limitada e os processos em todas as camadas são do mesmo interesse. Essa opção apresenta o mesmo espaçamento em todas as camadas verticais, sendo que a grade mais baixa pode ser dividida em 5 subcamadas com $\Delta z_s = 0,2 \Delta z$. A divisão permite uma melhor resolução em direção à superfície da área de simulação e resultados mais precisos (Fig. 2.3(a)).

Por outro lado, a grade telescópica é indicada para domínios com objetos elevados, como arranha-céus, nos quais os processos nas camadas superiores do modelo são de menos interesse. Esse tipo de grade vertical possibilita alcançar uma altura geral da área do modelo elevada sem adicionar muitas grades, mas é importante ser aplicada em uma altura maior ou igual à do objeto mais elevado, de modo que ainda esteja com a grade correta.

Na grade telescópica com fator de extensão, por exemplo, é possível especificar o tamanho da grade da camada acima da superfície e a porcentagem de aumento para a próxima grade (Fig. 2.3(b)). Também há a opção de definir uma determinada altura a partir da qual será aplicado o fator extensão (Fig. 2.3(c)), ou escolher a grade telescópica sem fator de extensão, similar à grade equidistante, mas sem a subdivisão da camada inferior (Fig. 2.3(d)).

Figura 2.3 Diferentes métodos de construção de camadas de grade vertical



Fonte: Bruse (2019, tradução nossa).

Atualmente, o modelo ENVI-met está disponível em 4 versões. A versão gratuita *Lite* inclui o núcleo de simulação básico para aplicações não comerciais, mas o tamanho do domínio é limitado e as opções de saída e análise dos resultados são reduzidas. Por outro lado, as versões licenciadas *Business*, *Science* e *Student* não possuem restrição em relação ao tamanho do domínio e incluem recursos avançados de modelagem⁶.

No que se refere à execução do modelo, não há nenhum aplicativo central realizando todo o trabalho. O ENVI-met consiste em uma coleção de vários aplicativos independentes para diferentes estágios e tarefas do fluxo de trabalho. No Quadro 2.1 é possível encontrar uma visão geral dos aplicativos que pertencem ao sistema e estão disponíveis em todas as versões, exceto a *Lite*.

De maneira geral, tem-se acesso a todos os aplicativos utilizados para a modelagem no *Headquarter*, desde a configuração inicial do projeto e digitalização da área de estudo, até o início do processo de simulação, a visualização dos resultados e o pós-processamento. O aplicativo *Manage Projects and Workspaces*, por exemplo, é utilizado para criar nova área de trabalho e projeto.

Para projetar a área do modelo, o usuário necessita de informações dos elementos, materiais e superfícies que constituem a paisagem da área de estudo. Esse conjunto de dados encontra-se disponível no *Albero*, utilizado para criar ou editar as propriedades das plantas

⁶ Detalhes dos recursos disponíveis em cada versão: ENVI-met Software Features. Disponível em: https://www.envi-met.com/wp-content/uploads/2019/12/ENVI_MET_Hp_Software_Features_english.pdf. Acesso em: dez 2019.

3D existentes, e no *Database Manager*, no qual é possível editar e utilizar informações sobre diferentes itens, como solo e perfis do solo, materiais, paredes, plantas, fontes de poluentes e estruturas verdes.

A digitalização da área do modelo pode ser feita através do aplicativo *Monde*, no qual é possível utilizar base vetorial. No *Spaces* há a possibilidade de finalizar o modelo depois de usar o *Monde* ou construir a área de modelagem desde o início, com a definição das configurações geográficas (localização e coordenadas) e geométricas (número e tamanho das grades).

Quadro 2.1 Programas do modelo ENVI-met

 <p>Headquarter</p>	<p>Acesso ao conjunto de programas dentro do ENVI-met, desde a configuração do projeto, a criação de banco de dados de materiais, a digitalização da área do modelo, o início da simulação e a avaliação dos resultados. É dividido em quatro guias: ENVI-met, dados e configurações, sistema e ajuda.</p>
 <p>Workspace Manager</p>	<p>Permite configurar o espaço de trabalho no ENVI-met, ou seja, o caminho do diretório no qual as pastas do projeto estão localizadas. Dentro das pastas do projeto, os respectivos arquivos de simulação, banco de dados do projeto e resultados da simulação serão salvos.</p>
 <p>Database Manager</p>	<p>Programa central que fornece uma visão geral e acesso aos dados armazenados no sistema. É possível visualizar, editar e adicionar conjuntos de dados referentes aos elementos utilizados na área do modelo, como solos, materiais, paredes, plantas simples, fontes de poluentes, etc.</p>
 <p>Albero</p>	<p>Programa de modelagem de plantas 3D, no qual é possível ter acesso ao catálogo de vegetação arbórea existente no sistema, personalizar ou criar novas árvores.</p>
 <p>Monde</p>	<p>Editor mundial do ENVI-met baseado em vetor, no qual é possível digitalizar um ambiente, importar OpenData ou shapefiles e exportá-lo para um arquivo raster * INX.</p>
 <p>Spaces</p>	<p>Utilizado para criar e editar a área de modelo na estrutura baseada em célula típica (grid) para o ambiente ENVI-met. É possível digitalizar a área do modelo baseado em raster diretamente no programa ou otimizar a área do modelo previamente criada no Monde ou outros programas.</p>
 <p>Forcing Manager</p>	<p>Permite criar arquivos <i>full forcing</i> a partir de dados medidos ou arquivos climáticos comuns, como arquivos *.EPW ou *.TRY. O arquivo criado pode ser usado na simulação ao definir o <i>full forcing</i> como uma condição de contorno lateral no arquivo *SIMX. Essa opção permite um forçamento de todos os perfis pré-definidos para o modelo principal, incluindo temperatura do ar, umidade, velocidade e direção do vento, radiação ou cobertura de nuvens e precipitação.</p>

 ENVI-guide	Orienta o processo de criação de um arquivo *SIMX que será utilizado para iniciar a simulação. As configurações de simulação podem ser definidas com base em três níveis diferentes. O nível iniciante permite ajustar as condições meteorológicas iniciais, enquanto os níveis intermediário e avançado permitem ajustar uma variedade de configurações (<i>simple</i> ou <i>full forcing</i> , solo, poluentes, nuvens, plantas, etc.).
 ENVI-core	Módulo central de cálculo, a partir do qual a simulação é executada dependendo das opções definidas nos outros programas. Os resultados deste programa são salvos no formato de arquivo EDX / EDT.
 Leonardo	Programa de pós-processamento que permite criar mapas 2D ou 3D e analisar os resultados do modelo escritos durante a simulação.
 BIO-met	Programa de pós-processamento que fornece opções para calcular os índices de conforto térmico humano a partir dos arquivos de saída do modelo ENVI-met.

* Dentre os módulos apresentados, apenas o BIO-met não foi utilizado nessa pesquisa.

Fonte: Adaptado do site oficial do modelo ENVI-met (BRUSE, 2019, tradução nossa).

Como o ENVI-met simula apenas uma parte da atmosfera, são necessárias condições de contorno para as bordas laterais e verticais do modelo 3D. Até o lançamento da versão mais atual do modelo (ENVI-met V4), havia três opções de condições de contorno:

- 1) Condições de contorno lateral aberta: os valores do próximo ponto da grade próximo à borda são copiados para a borda a cada etapa;
- 2) Condições de contorno lateral cíclico: os valores da borda do modelo a jusante são copiados para a borda do modelo a montante;
- 3) Condições simples de contorno lateral forçado (*simple forcing*): um ciclo de 24 horas de temperatura do ar e umidade relativa definido pelo usuário que pode ser usado para executar o modelo.

A partir do desenvolvimento do *Forcing Manager* e do método *full forcing*, é possível definir ciclos diurnos de condições de contorno para vários parâmetros meteorológicos: temperatura do ar (K); umidade relativa do ar (%); velocidade (m s^{-1}) e direção do vento ($^{\circ}$); radiação solar (W m^{-2})⁷; nebulosidade (octas) e precipitação (mm).

De maneira geral, na inicialização e durante a simulação com forçantes, o ENVI-met verifica entre quais etapas de forçantes a simulação está no momento, interpola os valores de

⁷ Os valores referentes à radiação incluem: radiação direta e difusa de ondas curtas, e radiação de ondas longas recebida. Muitas vezes, apenas a radiação solar global é medida nas estações meteorológicas, e sem a disponibilidade de medições adicionais, Huttner (2012) recomenda forçar a nebulosidade em vez da radiação.

forma temporal e espacial adequada, e registra os valores no perfil 1D da entrada. Com exceção da velocidade do vento, que é interpolada logaritmicamente, o modelo utiliza uma interpolação linear entre as etapas de tempo para as demais variáveis selecionadas:

$$\Phi_{t1} = \Phi_{t1} + (\Phi_{t2} - \Phi_{t1}) * ((t - t1) / (t2 - t1)) \quad (2.1)$$

sendo t o tempo atual simulado, $t1$ o passo anterior, $t2$ o passo seguinte para o qual os dados são fornecidos e Φ a variável nos respectivos passos de tempo (HUTTNER, 2012).

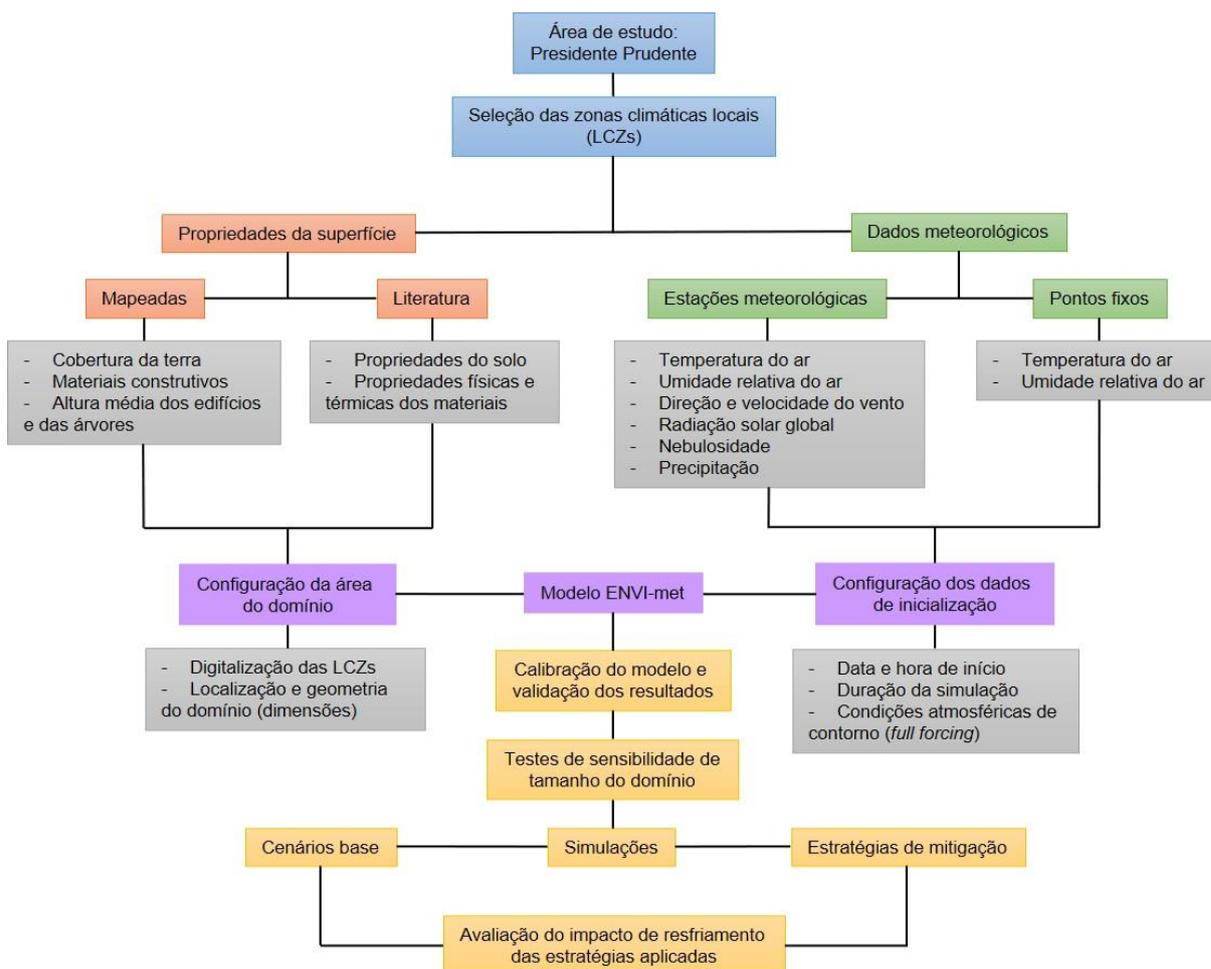
Após a elaboração dos arquivos básicos de entrada da área do domínio e dos parâmetros atmosféricos, utiliza-se o *ENVI-guide*, recurso cujo principal objetivo é criar e editar arquivos de simulação. Primeiramente, são definidas as configurações gerais da simulação, como início, duração da execução do modelo e estrutura do arquivo. Em seguida, seleciona-se o arquivo de área, criado anteriormente no *Monde* ou *Spaces*, e se inicia a configuração das condições meteorológicas de contorno lateral.

Ao utilizar a opção *full forcing*, é preciso selecionar o arquivo (*forcing file*) criado no *Forcing Manager*, decidir quais parâmetros forçar, salvar o arquivo de simulação criado no *ENVI-guide*, e iniciar a modelagem com o *ENVI-core*. Os resultados podem ser visualizados e editados no aplicativo *Leonardo* para criar mapas 2D ou 3D e analisar os dados, ou no *BIO-met*, ferramenta de pós-processamento que fornece opções para calcular índices de conforto térmico.

3 PROCEDIMENTOS DA PESQUISA

A primeira etapa dessa pesquisa consistiu na definição das áreas de interesse, seguida da construção de uma base de dados da superfície e variáveis meteorológicas necessárias para o processo de modelagem do microclima (Fig. 3.1).

Figura 3.1 Fluxograma dos procedimentos da pesquisa



A seleção dos locais de estudo teve como referência o aporte metodológico de Stewart e Oke (2012), no qual definem um conjunto de diretrizes para a utilização do sistema de classificação de zonas climáticas locais (LCZs) nas investigações sobre as ilhas de calor. De forma geral, os autores recomendam a execução de três etapas ao classificar as áreas de estudo em LCZs:

- 1) obter dados para quantificar as propriedades da superfície (geometria das construções, cobertura da terra, relevo, fluxo de tráfego) por meio de pesquisas de campo ou fontes secundárias (fotografias aéreas, imagens de satélite, etc.);
- 2) definir a área de influência para a medição de temperatura, ou seja, a área da

superfície na qual a temperatura se origina e é transportada até o sensor através fluxo de vento;

3) selecionar uma LCZ que melhor corresponda com o local de estudo, levando em consideração as propriedades da superfície. Caso não seja possível encontrar uma correspondência adequada, deve-se reconhecer esse fato e destacar as principais diferenças entre o local e a LCZ equivalente mais próxima.

Devido à disponibilidade de dados climáticos de sensores instalados em diferentes pontos da cidade, no período de junho a dezembro de 2015 (AMORIM, 2017, 2020), a seleção das áreas de estudo ocorreu de forma que o entorno dos sensores instalados (em um raio de 200 m) fosse relativamente homogêneo em relação à forma construída e cobertura da terra.

A princípio, com base na interpretação visual dos diferentes tipos de construções e de cobertura da terra representativos das paisagens típicas de Presidente Prudente, decidiu-se trabalhar com as seguintes áreas: LCZ 2 – compacta de média elevação (área central da cidade), LCZ 3 – compacta de baixa elevação (bairro residencial popular densamente construído) e LCZ B – vegetação arbórea esparsa (Fig. 3.2).

Figura 3.2 Ilustração das zonas climáticas locais (LCZs)



Fonte: Imagens reproduzidas a partir de Stewart e Oke (2012)

Para obter as propriedades da superfície dos locais selecionados, utilizou-se a técnica de vizinho mais próximo (*Nearest Neighbor* – NN) baseada em objetos para classificar imagens de satélite de alta resolução espacial no eCognition™⁸ (CARDOSO et al., 2018). A partir dos mapas de cobertura da terra e dos principais materiais construtivos, calculou-se o percentual da superfície edificada, impermeável e permeável nas áreas delimitadas, para comparar com os valores padrões de cada categoria definidos por Stewart e Oke (2012).

Posteriormente, foram realizados levantamentos para quantificar os pavimentos e estimar a altura média dos edifícios. Esses dados, em conjunto com a largura média das vias, foram essenciais para o cálculo da razão do aspecto *H/W* (*Height/Width*) (OKE, 1988),

⁸ Copyright © Trimble Inc. Trimble eCognition Software.

parâmetro escolhido para caracterizar a geometria do cânion urbano em Presidente Prudente.

Os dados das superfícies foram organizados em fichas técnicas (STEWART, 2011; 2018; STEWART; OKE, 2012), com a descrição das principais características relacionadas à forma construída, cobertura da terra, fluxo de tráfego, função e localização das LCZs. Além de contribuir para a caracterização das áreas, o conjunto de dados foi essencial para digitalizar as LCZs no ENVI-met e atribuir informações dos elementos que compõem as paisagens.

Na etapa seguinte foram trabalhados os dados meteorológicos, fundamentais na escolha dos episódios para modelagem, na análise das condições originais de inicialização do modelo ENVI-met e avaliação dos resultados.

Dados de direção e velocidade do vento, precipitação na área urbana (Estação: Presidente Prudente-A707, Instituto Nacional de Meteorologia – INMET), precipitação na área rural (*Davis Vantage Pro2*), nebulosidade (*The Automated Surface Observing Systems – ASOS*)⁹ e sistemas atmosféricos atuantes (AMORIM, 2017, 2020), referentes ao período de junho e dezembro de 2015, foram analisados para selecionar episódios representativos de inverno e verão.

Esse critério deve-se ao fato de as características atmosféricas exercerem grande controle nas diferenças térmicas intraurbanas e rurais, sendo que em situações ideais de calmaria ou ventos fracos e ausência de nuvens, a intensidade das ilhas de calor noturnas é maximizada.

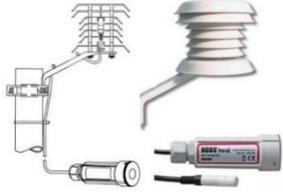
Durante esse período, sensores instalados nas LCZs monitoraram a temperatura e a umidade relativa do ar. Os dados horários foram registrados por *data loggers* HOBO (U23-002) com abrigos de radiação solar RS3 nas LCZs 2 e B, e por uma estação meteorológica *Davis Vantage Pro2* na LCZ 3 (Quadro 3.1)¹⁰.

Após identificar as condições sinóticas ideais com os dados das estações meteorológicas e analisar os registros nas LCZs, foi possível identificar os episódios com maior intensidade das ilhas de calor ($\Delta T_{LCZ\ x-y}$). Estes foram 11 de junho de 2015 e 17 de dezembro de 2015, selecionados para a análise dos padrões de aquecimento e resfriamento nas LCZs e inicialização das simulações no modelo ENVI-met.

⁹ Iowa State University. Iowa Environmental Mesonet: ASOS Network / ASOS-AWOS-METAR Data Download. Disponível em: <https://mesonet.agron.iastate.edu/request/download.phtml>.

¹⁰ A caracterização dos pontos de medição e a especificação geral do equipamento utilizado estão disponíveis no Apêndice A e Anexo A, respectivamente.

Quadro 3.1 Equipamentos utilizados nas medições

Equipamento	Variável registrada
 <p><i>HOBO (U23-002) com abrigo de radiação solar RS3</i></p>	<p><i>Temperatura do ar</i> Acurácia: $\pm 0,21^{\circ}\text{C}$ de 0° a 50°C Resolução: $0,02^{\circ}\text{C}$</p> <p><i>Umidade relativa do ar</i> Acurácia: $\pm 2,5\%$ de 10% a 90% Resolução: 0,05%</p>
 <p><i>Davis Vantage Pro2</i></p>	<p><i>Temperatura do ar</i> Acurácia: $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ Resolução: $0,1^{\circ}\text{C}$</p> <p><i>Umidade relativa do ar</i> Acurácia: $\pm 2\%$ Resolução: 1%</p>

Fonte: Davis Instruments (2019) e HOBO Data Loggers (2017)

O processo de simulação teve início com a realização de testes de calibração baseados nas condições climáticas do período definido e nas características existentes em cada LCZ. O ENVI-met *Student*, versão 4.4.4, foi executado em um notebook *Inspiron 15 Série 5000*, processador Intel® Core™ i5-8265U 8ª geração (1.60GHz/1.80GHz), sistema operacional *Windows 10 Home Single Language*, com 8GB de memória RAM e disco rígido de 1TB.

A análise da calibração envolveu comparar os dados observados nas LCZs com os resultados da modelagem e calcular estatísticas de validação. Após o ajuste do modelo à realidade simulada, foram executados testes para verificar a sensibilidade do ENVI-met ao aumento das áreas de domínio.

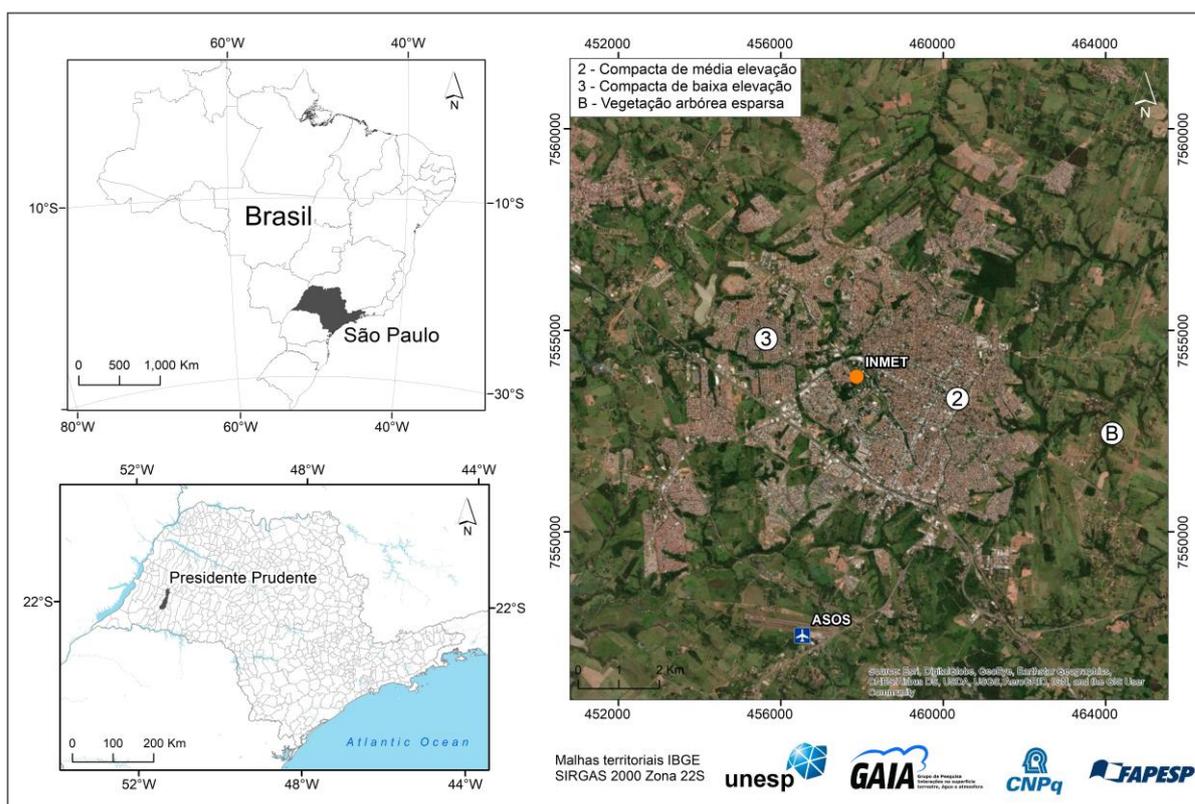
Os testes de sensibilidade foram realizados com o ENVI-met *Student*, versão 4.4.5 no referido notebook e em um desktop *OptiPlex 7070 UFF BTX*, BCC, Intel® Core™ i5-8365U (1.6 Hz/4.1 GHz, 8ª geração), RAM de 8GB, SSD de 512GB, disco rígido de 500GB e sistema operacional *Windows 10 Pro*.

A partir da definição do tamanho ideal das áreas de domínio, os cenários base foram simulados e utilizados como referência nas projeções com superfícies reflexivas, o que permitiu avaliar o impacto de resfriamento de telhados e pavimentos frios como estratégias de mitigação do calor nas LCZs urbanas.

4 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO

Presidente Prudente está situada no extremo oeste do estado de São Paulo (Fig. 4.1), latitude: 22° 7' 39" Sul e longitude: 51° 23' 8" Oeste, com área urbana de aproximadamente 60 km² e população estimada de 228.743 habitantes (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 2019).

Figura 4.1 Localização da área de estudo



A área urbana apresenta uma mistura complexa de paisagens heterogêneas em espaços reduzidos e vegetação dispersa. O núcleo urbano central corresponde a áreas densamente construídas com poucas ou nenhuma árvore, enquanto os bairros residenciais que se estendem a oeste do centro da cidade apresentam edifícios mais espaçados e cobertura vegetal.

Em direção à periferia oeste, lotes densamente construídos, com pouco ou nenhum espaço livre para a vegetação, caracterizam a maioria dos bairros residenciais. Esse padrão espacial compacto também ocorre na porção norte, onde os edifícios apresentam características construtivas que aumentam a temperatura ambiente (por exemplo, paredes finas e coberturas com telhas de fibrocimento) (CARDOSO; AMORIM, 2018).

Verifica-se, também, a implantação e consolidação de grandes aglomerados

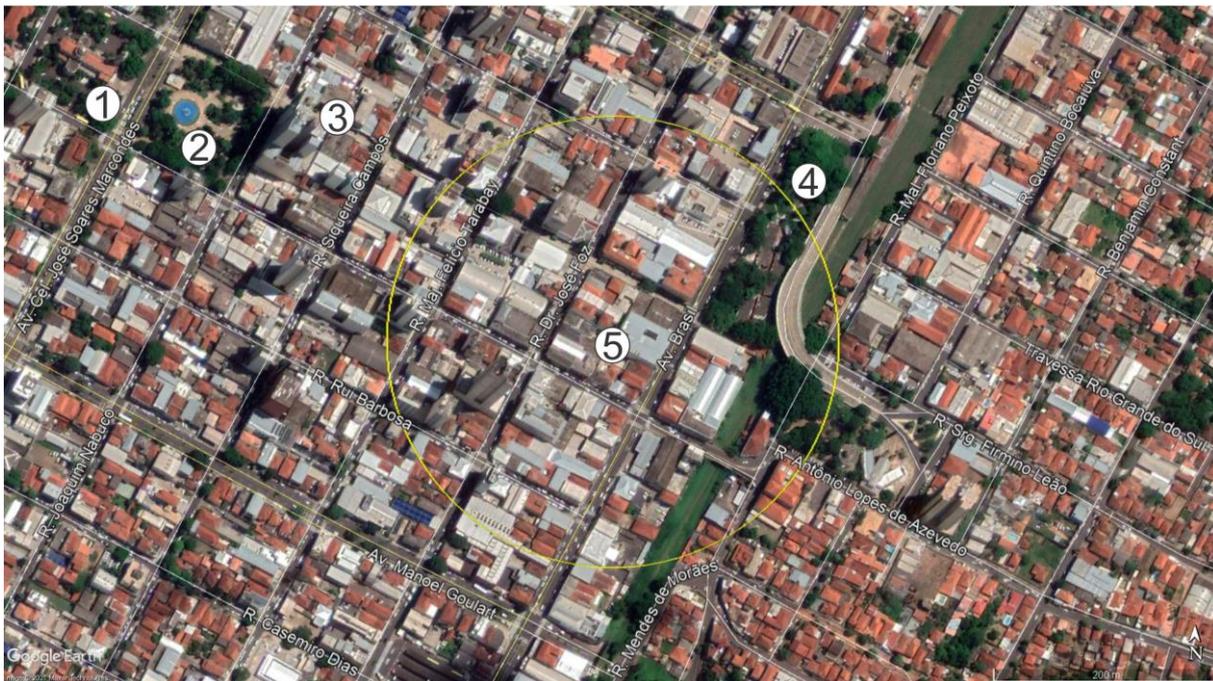
habitacionais, onde o predomínio de lotes pequenos e impermeabilizados, e um padrão construtivo aquém do adequado às condições climáticas da cidade, comprometem o conforto térmico dos habitantes (CARDOSO, 2015; CARDOSO; AMORIM, 2015).

O entorno próximo à malha urbana é composto por propriedades rurais, vegetação arbórea esparsa, superfície coberta por pastagem e poucas construções. Essa configuração da paisagem tipicamente rural tem relação com as diferentes fases da atividade agropecuária em Presidente Prudente (HESPANHOL, 2017), além das transformações decorrentes da expansão territorial urbana e dos empreendimentos imobiliários.

4.1 Centro da cidade: LCZ 2

A LCZ 2 representa o centro de Presidente Prudente e corresponde a uma porção do quadrilátero delimitado pelas quatro avenidas: Coronel José Soares Marcondes, Washington Luiz, Brasil e Manoel Goulart (Fig. 4.2).

Figura 4.2 Área central de Presidente Prudente



Fonte: *Google Earth Pro* (2020). Eye altitude: 933 m. (1) Praça Monsenhor Sarrion; (2) Praça Nove de Julho; (3) Calçadão; (4) Praça da Bandeira e (5) LCZ 2 – área circular com raio de 200 m

A área central apresenta grande fluxo de pessoas e veículos, com destaque para esses locais caracterizados por maior circulação: a Praça da Bandeira, cujo espaço abriga o camelódromo; o Calçadão na Rua Tenente Nicolau Maffei, voltado ao comércio formal com lojas de diversos segmentos; a Praça Nove de Julho e a Praça Monsenhor Sarrion, pontos de

encontro por parte da população (GONCALVES; FERREIRA; VALENTIM, 2015).

O Calçadão, inaugurado em 1979, constitui uma área de comércio popular cujos edifícios são resultado de adaptações de antigas residências. Há a presença do setor financeiro, lojas de departamento, escritórios e diversos estabelecimentos comerciais que não se limitam à Rua Tenente Nicolau Maffei, incluindo ruas adjacentes (GOES; SPÓSITO, 2016).

As Praças Nove de Julho (1933) e Monsenhor Sarrion (1942) passaram por diferentes processos de transformação ao longo tempo e, atualmente, representam áreas de encontro e lazer da cidade. Na Praça Monsenhor Sarrion, por exemplo, ainda se localiza a Catedral de São Sebastião e pontos de destino das linhas de transporte coletivo (GONCALVES; FERREIRA; VALENTIM, 2015).

O centro de Presidente Prudente passou por algumas obras de revitalização nas últimas décadas. Em 2001, por exemplo, a prefeitura instalou um posto policial e retirou os camelôs da Praça Nove de Julho; em 2011, o Calçadão passou por reforma na pavimentação, bancos, iluminação e paisagismo; e em 2013 houve manutenção do piso de pedra portuguesa na Praça Nove de Julho, mudança do mobiliário e retirada de pontos de ônibus (GONCALVES; FERREIRA; VALENTIM, 2015; GOES; SPÓSITO, 2016).

No entanto, essa área ainda é caracterizada por uma morfologia densamente construída, constituída por elementos urbanos com diferentes geometrias, materiais construtivos e fontes de calor antropogênico que contribuem para o aquecimento da camada do dossel. Esses fatores levaram à preocupação em investigar as interações microclimáticas nesse recorte espacial para buscar alternativas que possam garantir um ambiente confortável para o fluxo de pessoas que circulam ao ar livre.

4.2 Bairro residencial: LCZ 3

A área de abrangência da LCZ 3 compreende três bairros residenciais localizados na porção oeste da cidade (Fig. 4.3), implantados nas décadas de 1980 e 1990 como parte do Plano Municipal de Habitação de Interesse Social – PMHIS de Presidente Prudente.

O conjunto habitacional Bartholomeu Bueno de Miranda foi construído em 1978 pela Companhia de Habitação Popular (COHAB) de Bauru, com o total de 1.017 casas. Na época de sua implantação, o bairro não estava contínuo à malha urbana e apresentava vazios que induziram a especulação imobiliária e posterior ocupação (SILVA, R.B., 2008; NEGRELOS; CUCATO; SCATALON, 2019).

Nas suas proximidades foram construídos novos loteamentos, como o Cecap (1982), com 776 unidades habitacionais (Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano do Estado de São Paulo – CDHU), e o Jardim Santa Paula (1992), com 74 unidades (Companhia

Regional de Habitações de Interesse Social – CRHIS) (SILVA, R.B., 2008; NEGRELOS; CUCATO; SCATALON, 2019).

Figura 4.3 Área residencial de Presidente Prudente



Fonte: *Google Earth Pro* (2020). Eye altitude: 933 m. (1) Bairro Cecap; (2) Jardim Santa Paula; (3) Núcleo Bartholomeu Bueno de Miranda – Cohab; (4) LCZ 3 – área circular com raio de 200 m

Esses conjuntos habitacionais são caracterizados por alta densidade construtiva e populacional, cuja distância em relação ao centro da cidade favoreceu a instalação de diversos estabelecimentos comerciais e de serviços para atender às necessidades básicas dos moradores locais (PEREIRA, 2006).

De forma geral, apresentam uma configuração espacial compacta, com pouca ou nenhuma superfície permeável para cobertura vegetal nos quintais ou calçadas. Essas características, associadas ao perfil socioeconômico da população residente, justificam a escolha do local para a modelagem microclimática, com o objetivo de testar alternativas para mitigar a temperatura urbana elevada e melhorar o conforto térmico e a qualidade de vida.

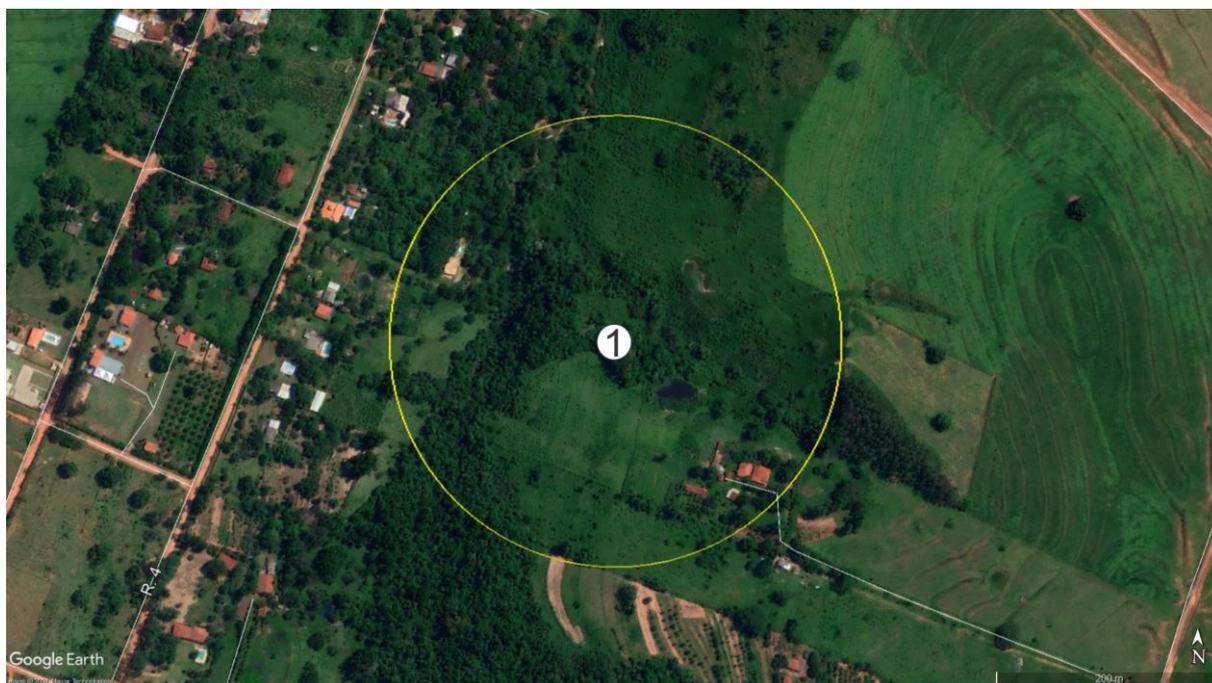
4.3 Área rural: LCZ B

A área rural selecionada para o estudo está a aproximadamente 2 km de distância da malha urbana de Presidente Prudente, e corresponde a uma propriedade rural com vegetação arbórea esparsa, superfície coberta por pastagem e poucas construções no entorno (Fig. 4.4).

Pode-se dizer que essa configuração da paisagem tipicamente rural é resultado do

processo de ocupação da região e das sucessivas atividades econômicas: cafeicultura, produção de oleaginosas, expansão das pastagens para a criação de gado e expansão da lavoura de cana-de-açúcar (ABREU, 1972; HESPANHOL, 2017).

Figura 4.4 Área rural de Presidente Prudente



Fonte: *Google Earth Pro* (2020). *Eye altitude*: 933 m. (1) LCZ B – área circular com raio de 200 m

O entorno próximo à cidade também foi alterado devido ao crescimento da malha urbana e dos empreendimentos imobiliários, não sendo possível investigar uma área estritamente natural, sem interferência antrópica. Apesar disso, o recorte representativo do rural constitui uma amostra significativa para compreender o papel das superfícies permeáveis e da vegetação arbórea nas trocas de energia com atmosfera e na diminuição da temperatura do ar.

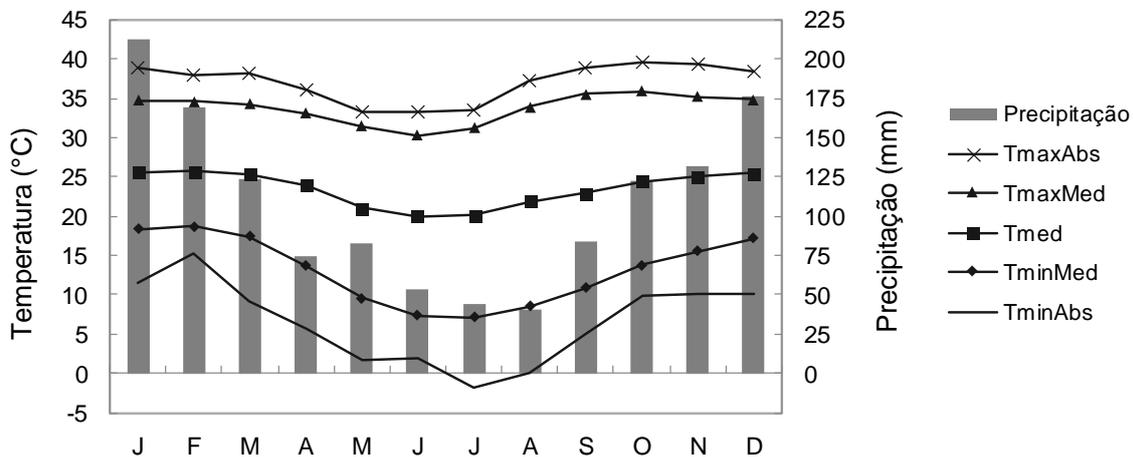
4.4 Características do clima e do relevo

A cidade encontra-se sob um regime de clima tropical com estação seca de inverno (Aw), segundo a classificação de Köppen (DUBREUIL et al., 2018). Ao longo da série histórica de 1969 a 2019 (Fig. 4.5), houve o registro de temperaturas médias máximas do ar acima de 30°C ao longo dos meses, e valores máximos diários próximos de 40°C durante a primavera e o verão, período tipicamente mais chuvoso.

As temperaturas médias atingiram cerca de 26°C nos meses de verão e oscilaram entre 20°C e 23°C durante o outono e o inverno. As temperaturas mínimas diárias atingiram

valores próximos ou abaixo de zero no período entre os meses de maio e agosto, período caracterizado por baixos totais pluviométricos.

Figura 4.5 Climograma de Presidente Prudente (1969–2019)



Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Dados da estação meteorológica Presidente Prudente-A707.

Os processos físicos e fenômenos observados na atmosfera urbana são influenciados por uma série de controles, sendo os mais habituais relacionados ao processo de urbanização e às alterações na estrutura e no funcionamento (metabolismo) ao longo do tempo, por meio do planejamento e de novas construções. Por outro lado, existem controles extrínsecos ao clima urbano que contribuem com o clima geral de uma região (latitude, proximidade de um corpo d'água, altitude e relevo) (OKE et al., 2017).

A latitude, por exemplo, influencia diretamente os padrões diurnos e sazonais da luz do dia, assim como a quantidade de radiação solar incidente, principal forçante na geração dos climas na superfície. Apesar do total anual e sua distribuição sazonal e diurna mudarem com a latitude, as áreas na zona tropical são as que mais recebem radiação, com uma variabilidade mensal de apenas 12% no recebimento de ondas curtas em relação à média anual (OKE et al., 2017). Devido à localização latitudinal de Presidente Prudente, a média diária de radiação solar global pode variar de cerca de 180 W m^{-2} em um mês típico de inverno a 280 W m^{-2} em um mês de verão (INPE, 2019b).

Por estar distante do oceano ou de grandes massas de água, Presidente Prudente também sofre influência da continentalidade. Esse controle geográfico está relacionado à ocorrência de valores relativamente menores de umidade do ar e índices pluviométricos, e maior amplitude térmica em decorrência da superfície terrestre se aquecer e resfriar mais rápido do que a água.

Em escalas de tempo menores, outros controles extrínsecos governam a dinâmica do clima urbano, como é o caso da condição sinótica predominante, em especial a dinâmica das massas de ar e as condições de vento, nebulosidade e precipitação resultantes, que caracterizam os tipos de tempo nas cidades (OKE et al., 2017).

Por se localizar em uma área de transição climática, o clima em Presidente Prudente é influenciado pela maioria dos sistemas atmosféricos que atuam na América do Sul: massa de ar tropical atlântica (mTa); tropical continental (mTc); equatorial continental (mEc); polar atlântica (mPa) e polar tropicalizada; Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Zona de Convergência de Umidade (ZCOU).

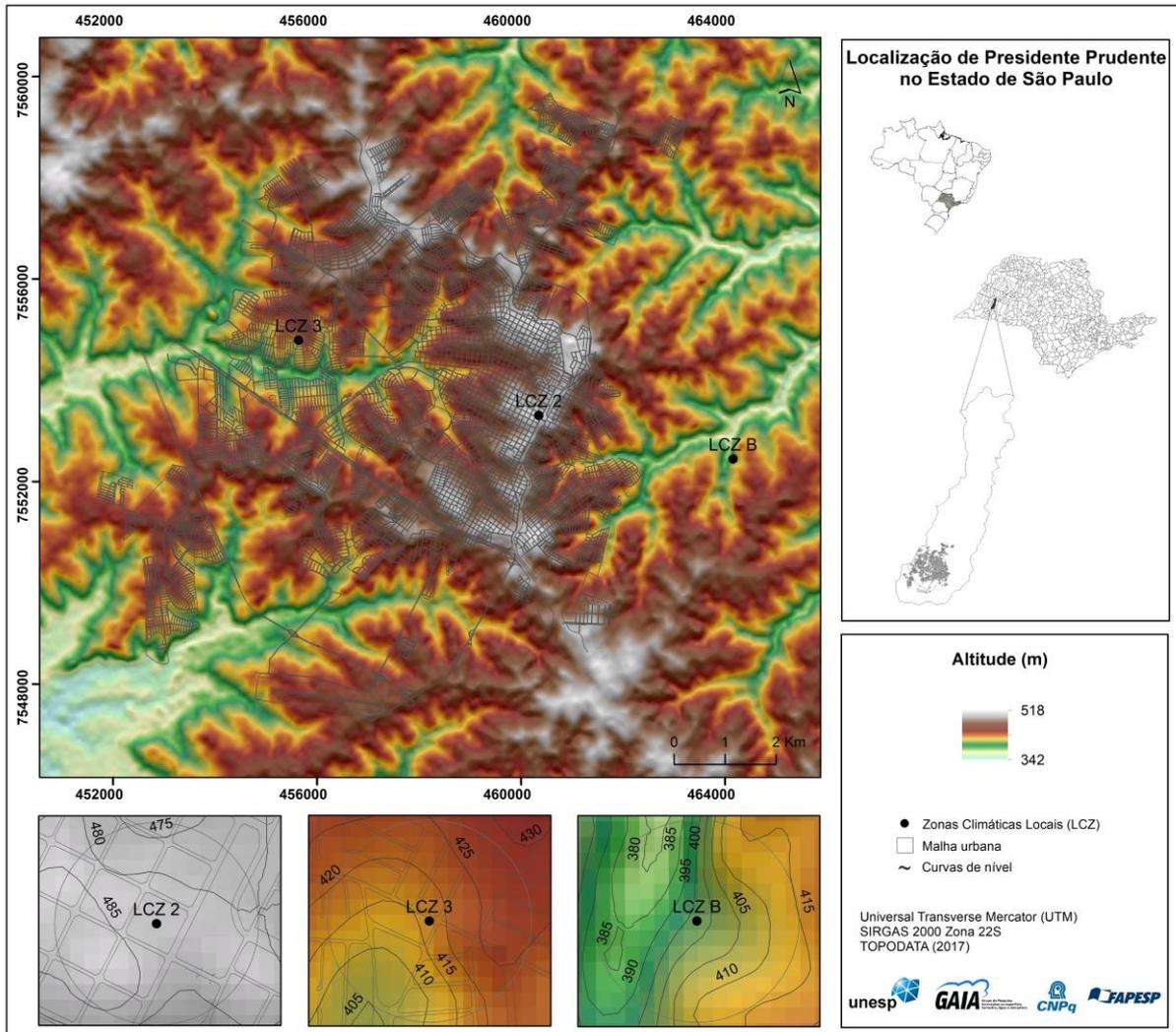
Destaca-se ainda a influência do El Niño - Oscilação Sul (ENOS), um fenômeno de interação oceano-atmosfera que ocorre no oceano Pacífico Equatorial e na atmosfera adjacente. O ENOS diz respeito às situações nas quais o oceano está mais quente (El Niño) ou mais frio (La Niña) do que a média normal histórica, sendo que o ano de 2015 foi caracterizado por evento muito forte de El Niño, com tendência ao aumento das temperaturas médias e alteração no regime de chuvas na região (INPE, 2019a).

Além desses fenômenos sinóticos responsáveis pelos padrões de tempo, as feições de relevo nas quais a cidade se situa podem influenciar os fluxos de vento, a temperatura e a qualidade do ar. A configuração topográfica pode fornecer abrigo (ou exposição) de ventos fortes; favorecer a dispersão ou acúmulo de poluentes do ar; e o maior aquecimento da superfície e do ar adjacente em decorrência da orientação das vertentes em direção ao sol (OKE, et al. 2017).

No que se refere ao relevo da área de estudo, as formas predominantes são os morrotes alongados, espigões e as colinas médias (NUNES, 2011). A cota altimétrica de maior valor verificada na malha urbana foi de aproximadamente 495 m, observada principalmente ao longo do topo do espigão na zona leste da cidade, enquanto a cota de menor valor foi de aproximadamente 380 m, localizada, sobretudo, nas planícies de córregos e fundos de vale no setor oeste (Fig. 4.6).

A variação altimétrica máxima encontrada dentro da malha urbana foi de 115 m, valor significativo a ser considerado nas análises climáticas relacionadas ao balanço de energia, circulação do vento, dispersão e concentração de poluente, entre outros. Entre as zonas climáticas locais selecionadas, a LCZ 2 apresentou a maior altitude, com 482 m no ponto central, seguida da LCZ 3 com 416 m e LCZ B com 396 m.

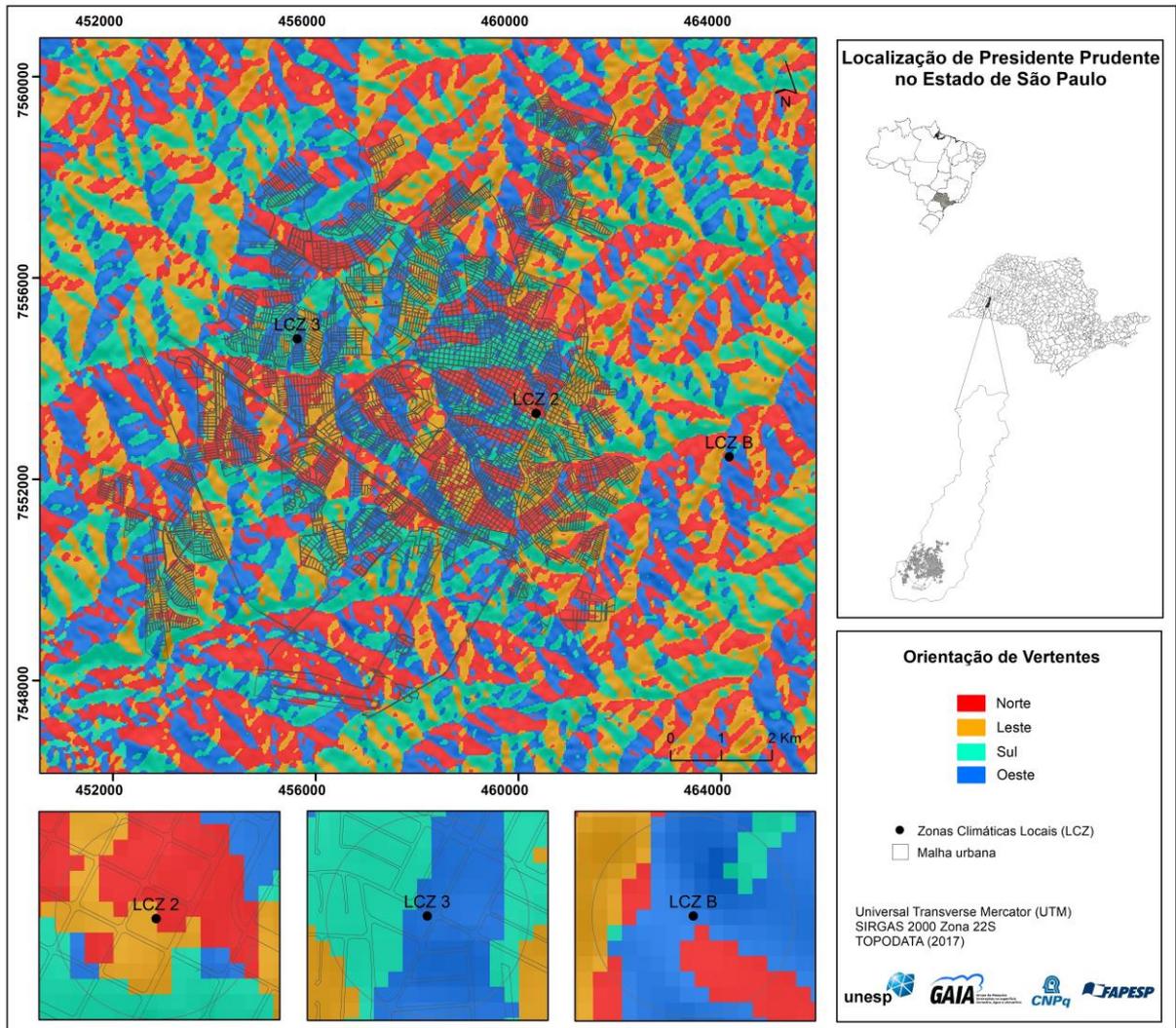
Figura 4.6 Mapa hipsométrico de Presidente Prudente



Em conjunto com as informações hipsométricas, o conhecimento da orientação das vertentes também é importante, pois ajuda a identificar áreas potencialmente mais aquecidas, tendo em vista que, no hemisfério sul, as vertentes voltadas para o norte recebem maior quantidade de radiação solar do que as voltadas para sul. Além disso, as vertentes voltadas para oeste recebem radiação durante todo o período da tarde e, em consequência, apresentam maior aquecimento noturno em relação às vertentes a leste, que deixaram de receber radiação direta há mais tempo.

As LCZs apresentaram orientações variadas, sendo que na LCZ 2 houve o predomínio de vertentes voltadas para o norte, leste e sul. As vertentes observadas na LCZ 3 possuem orientação oeste e sul, enquanto na LCZ B são voltadas para o norte e oeste (Fig. 4.7).

Figura 4.7 Mapa de orientação de vertentes de Presidente Prudente



5 BASE DE DADOS CLIMÁTICOS E DE SUPERFÍCIE DAS ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS EM PRESIDENTE PRUDENTE

Com o intuito de caracterizar as áreas de estudo com mais propriedade e obter uma base de dados suficiente para realizar as simulações, realizou-se uma série de procedimentos para mensurar as propriedades físicas da superfície que influenciam o campo térmico e selecionar os dados meteorológicos que melhor representam a dinâmica da atmosfera local.¹¹

Inicialmente, foram elaborados os mapas de cobertura da terra e materiais construtivos, através dos quais foi possível calcular a fração da superfície edificada e as frações da superfície impermeável e permeável. Em seguida, estimou-se a geometria das LCZs com as medidas de altura média dos edifícios/árvores, largura média das vias e espaçamento médio das árvores.

Essas informações foram sintetizadas nas fichas técnicas propostas por Stewart (2011) Stewart e Oke (2012). Além de contribuir para a caracterização das áreas, o conjunto de dados foi essencial para digitalizar as LCZs no ENVI-met e atribuir informações dos elementos que compõem as paisagens.

O procedimento seguinte consistiu na definição dos dias representativos do verão e do inverno a serem simulados. Nessa etapa foram utilizados os dados meteorológicos de junho e dezembro de 2015 para elaborar gráficos, tabelas e selecionar os episódios com condições sinóticas ideais (calmaria, sem nebulosidade e precipitação) que maximizaram a intensidade das ilhas de calor entre as LCZs.

5.1 Mapeamento da cobertura da terra e dos materiais construtivos

Imagens do satélite GeoEye-1, adquiridas em 5 de março de 2013, foram utilizadas para mapear a cobertura da terra e os materiais de construção nas LCZs em Presidente Prudente. O conjunto de dados é constituído por uma banda pancromática (450–800 nm) com resolução espacial de 0,5 m e quatro bandas multiespectrais com resolução espacial de 2 m: azul (450–510 nm), verde (510–580 nm), vermelho (655–690 nm) e infravermelho próximo (780-920 nm).

A dimensão das áreas a serem classificadas foi definida com o cálculo de 200 m de raio a partir do local onde os sensores foram instalados. Nesse procedimento, levou-se em consideração o diâmetro mínimo de 400–1.000 m para que o ar de 1–2 m acima do solo seja ajustado à superfície subjacente, dependendo das propriedades da superfície e da

¹¹ Versões desse capítulo foram publicadas nos anais do evento 10th International Conference on Urban Climate & 14th Symposium on the Urban Environment (CARDOSO et al., 2018) e na Revista Brasileira de Climatologia (CARDOSO; AMORIM, 2021).

estabilidade atmosférica (OKE, 1987, 2004).

Nessa pesquisa, utilizou-se a classificação baseada em objetos, técnica que envolve a segmentação da imagem de satélite e incorpora um conjunto de variáveis espectrais, texturais e contextuais que ajudam a distinguir objetos com respostas espectrais semelhantes (LALIBERTE et al., 2006; LIU; XIA 2010; MA et al., 2017). O procedimento foi realizado no eCognition™ e consistiu na segmentação das imagens, seleção de amostras de treinamento, definição de estatísticas, execução de algoritmos e edição manual.

O software permite atribuir pesos diferentes às bandas da imagem e personalizar os parâmetros de escala, forma e compactação para definir o tamanho e a forma dos objetos segmentados. Em geral, a escala define o tamanho do objeto e cria objetos homogêneos maiores na medida em que um valor mais alto é aplicado. O critério de forma define a influência da cor ao segmentar a imagem, enquanto a compactação determina como os objetos de imagem podem ser compactos.

Após realizar diversos testes de combinações de parâmetros durante a segmentação, os valores para os LCZs foram definidos como: escala = 75, forma = 0,3 e compactação = 0,5. Também foi definido peso maior nas bandas pancromática e infravermelho próximo para obter limites de objetos mais definidos nos edifícios e para ajudar a criar segmentos de vegetação distintos, respectivamente.

O próximo passo consistiu em criar classes e selecionar amostras de treinamento para a classificação. As propriedades de cobertura da terra e os principais materiais construtivos identificados incluíram: superfícies pavimentadas (ruas, calçadas e estacionamentos), telhados de cerâmica, fibrocimento e metálicos (zinco e alumínio), coberturas de concreto, árvores, grama, solo exposto e água.

Depois de selecionar as amostras para cada classe, foram adicionadas estatísticas ao algoritmo do vizinho mais próximo padrão (*Standard Nearest Neighbor – SNN*). Com base nos valores médios dos objetos em cada banda espectral, no brilho, na geometria e no Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index – NDVI*), o algoritmo SNN atribuiu valores de classe aos objetos segmentados.

Os resultados precisaram ser corrigidos, adicionando mais amostras ao conjunto de treinamento e atribuindo objetos à classe correta, até que a classificação fosse satisfatória e apresentasse precisões gerais >80%.

Primeiramente, aplicou-se uma abordagem de tentativa e erro para corrigir de forma automática os objetos classificados incorretamente. Em seguida, devido aos componentes misturados, especialmente nas zonas dos tipos construídos (LCZs 2 e 3), foi mais efetivo atribuir as classes corretas manualmente com o auxílio de um conjunto de características dos objetos (por exemplo, brilho, área e NDVI).

Observou-se confusão espectral entre a classe de solo exposto e as coberturas dos prédios, como telhados de cerâmica e metálicos. Superfícies pavimentadas, telhados de fibrocimento e coberturas de concreto também apresentaram significativa confusão de assinatura espectral, que foi corrigida por interpretação visual.

Além disso, algumas sombras no entorno dos prédios na área comercial central (LCZ 2) foram classificadas erroneamente como árvores. No entanto, por haver poucos prédios altos nessa área de estudo, optou-se por editar manualmente os objetos de sombra em vez de adicionar uma nova classe.

Diferentes elementos urbanos dispostos em áreas reduzidas caracterizam os padrões de paisagem nas LCZs. Apesar de compartilharem respostas espectrais semelhantes, que nem sempre são bem separadas, foi possível distinguir a cobertura da terra e os materiais construtivos predominantes ao aplicar a técnica do vizinho mais próximo baseada em objetos.

Os produtos finais foram exportados como polígonos suavizados em formato vetorial para calcular as áreas e porcentagens de cada classe mapeada no ArcMap™¹².

5.1.1 Propriedades da superfície

A abordagem de classificação adotada nessa pesquisa gerou mapas de cobertura da terra para as LCZs em Presidente Prudente, com os materiais construtivos predominantes (Fig. 5.1). Os valores percentuais dessas propriedades estão descritos na Tabela 5.1.

¹² Copyright © Esri. ArcGIS® and ArcMap™ software.

Figura 5.1 Mapas de cobertura da terra e materiais construtivos nas LCZs em Presidente Prudente

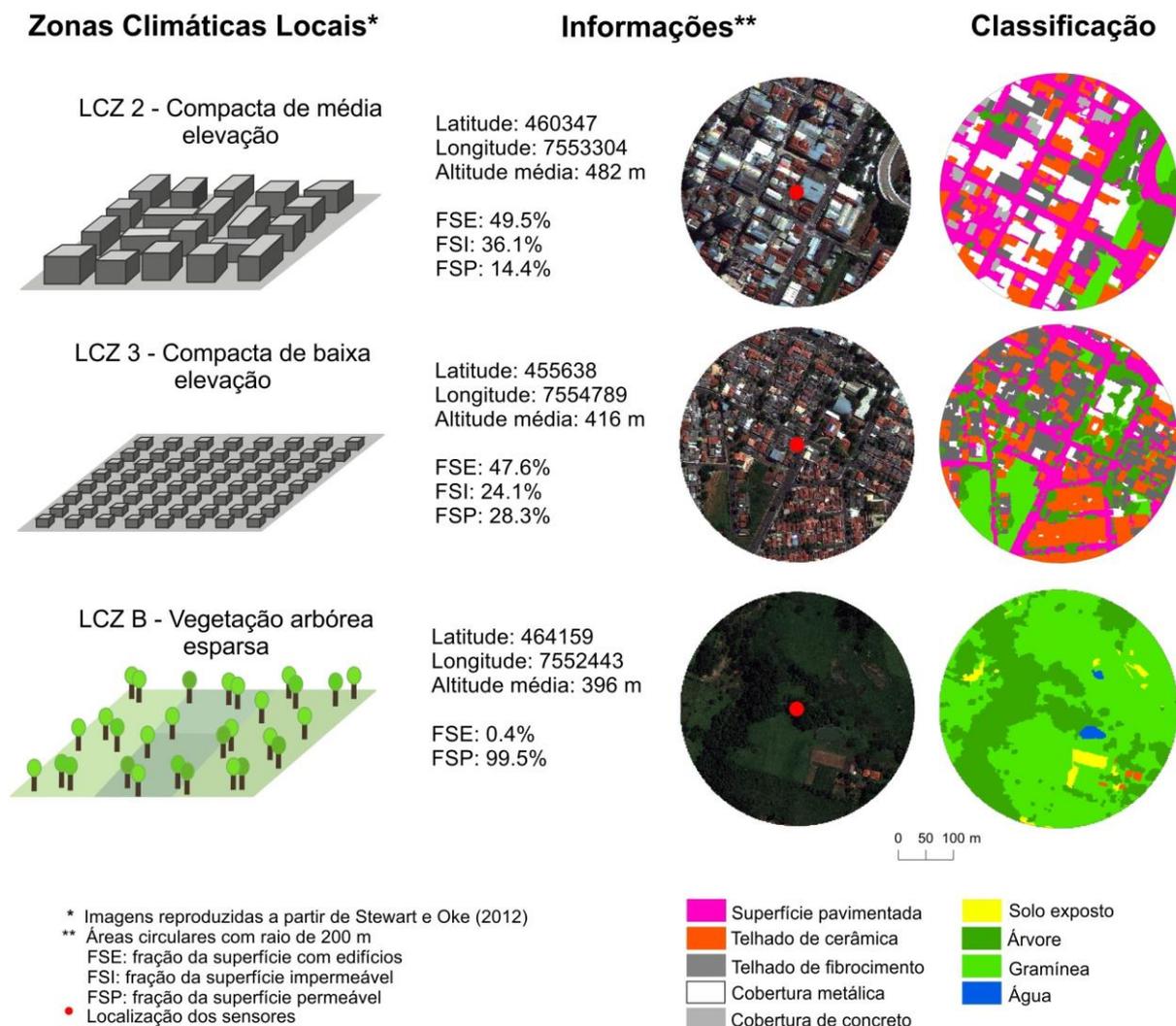


Tabela 5.1 Porcentagem das propriedades de cobertura da superfície e materiais construtivos nas LCZs em Presidente Prudente

Cobertura da superfície	Propriedades	LCZ 2 (%)	LCZ 3 (%)	LCZ B (%)
Edifícios	Telhado de cerâmica	15,4	21,5	0,4
	Telhado de fibrocimento	10,1	20,8	–
	Cobertura metálica	20,5	5,2	–
	Cobertura de concreto	3,5	–	–
Superfície impermeável	Pavimento	36,1	24,1	–
	Solo exposto	–	–	2,9
Superfície permeável	Árvore	8,9	17,8	33,6
	Gramínea	5,5	10,6	62,3
	Água	–	–	0,7

* Os percentuais de superfície permeável com vegetação arbórea nas LCZs 2 e 3 podem estar superestimados, tendo em vista que a informação foi obtida a partir do mapeamento da copa das árvores.

Com base nas porcentagens das propriedades extraídas dos mapas (Tabela 5.1), foram calculadas as frações de superfícies edificadas, impermeáveis e permeáveis para cada LCZ (Tabela 5.2).

Tabela 5.2 Valores das propriedades de cobertura da superfície das LCZs em Presidente Prudente em comparação com os intervalos estabelecidos por Stewart e Oke (2012)

Propriedades	LCZ 2		LCZ 3		LCZ B	
	Presidente Prudente	Stewart e Oke (2012)	Presidente Prudente	Stewart e Oke (2012)	Presidente Prudente	Stewart e Oke (2012)
<i>Fração da superfície edificada (%)</i>	49,5	40–70	47,6	40–70	0,4	<10
<i>Fração da superfície impermeável (%)</i>	36,1	30–50	24,1	20–50	–	<10
<i>Fração da superfície permeável (%)</i>	14,4	<20	28,3	<30	99,5	>90

Tais valores apresentaram correlação com os intervalos definidos por Stewart e Oke (2012), uma vez que a fração da superfície edificada e da cobertura impermeável diminui a partir das zonas urbanas compactas (LCZs 2 e 3) em direção à zona com árvores esparsas (LCZ B).

5.2 Estimativa da geometria

A superfície urbana é composta por uma grande diversidade de materiais naturais e fabricados, com refletividades e emissividades distintas, dispostos em uma estrutura 3D. O resultado é uma composição multifacetada, com superfícies de inclinações e orientações únicas, que podem emitir ou refletir umas às outras ou bloquear essas trocas, gerando diferentes balanços de radiação (OKE et al., 2017).

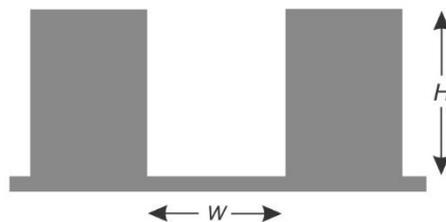
As diferentes configurações urbanas influenciam nas condições térmicas do ambiente, fato demonstrado por Oke (1988) através das relações entre a geometria e o microclima dos cânions urbanos. De acordo com o autor, a geometria afeta a dispersão de poluentes na cidade, uma vez que a rugosidade da superfície influencia a turbulência mecânica, a forma do perfil vertical do vento e a profundidade da camada de mistura urbana. Além disso, a circulação e turbulência associadas aos cânions também produzem efeitos de microescala entre os edifícios e logo acima deles.

Com relação ao aquecimento urbano, Oke (1981, 1988) destaca que as formas compactas na cidade promovem o calor devido ao aumento da absorção de ondas curtas, ao aprisionamento dentro de cânions, à diminuição da perda de calor por turbulência devido à estagnação em cânions profundos e à diminuição da perda de radiação de ondas longas dos cânions devido à redução do fator de visão do céu. Somado a isso,

Pode-se esperar que grandes densidades sejam acompanhadas por maiores quantidades de cobertura impermeável, materiais com maior admitância térmica e aumento da densidade do fluxo de calor antropogênico. Por sua vez, essas características favorecem o calor sensível em vez do latente, o armazenamento de calor em vez da troca de calor e a disponibilidade de energia extra (OKE, 1988, p. 109, tradução nossa)¹³.

Geralmente, os estudos que utilizam a geometria urbana como parâmetro de análise do ambiente térmico realizam levantamentos de duas medidas: o fator de visão do céu (ψ_{sky}) e a razão entre a altura média das edificações e a largura da via (H/W) (Fig. 5.2). Nessa situação, o cânion urbano pode ser considerado uma unidade geométrica básica que caracteriza um conjunto de edificações dispostas lado a lado, separados por uma rua (OKE, 1988).

Figura 5.2 Razão do aspecto do cânion urbano H/W



O ψ_{sky} , ou ângulo de obstrução do horizonte, está relacionado à quantidade de céu visível de determinado local. Esse parâmetro varia entre 0 (zero) e 1 (um), sendo que valores próximos a 0 são representativos de áreas com maior obstrução do céu, enquanto 1 correspondente às áreas sem obstáculos entre o ponto escolhido e o céu. Por sua vez, a razão do aspecto H/W apresenta valores de 0 a <1 , caracterizando desde ambientes rurais até áreas de baixa a alta densidade, respectivamente (OKE, 1988; NAKATA-OSAKI, 2016).

O parâmetro escolhido para caracterizar a geometria nas áreas de estudo foi H/W , cujos valores podem ser $<0,1$ em LCZs com arranjos abertos de cobertura da terra; >1 com

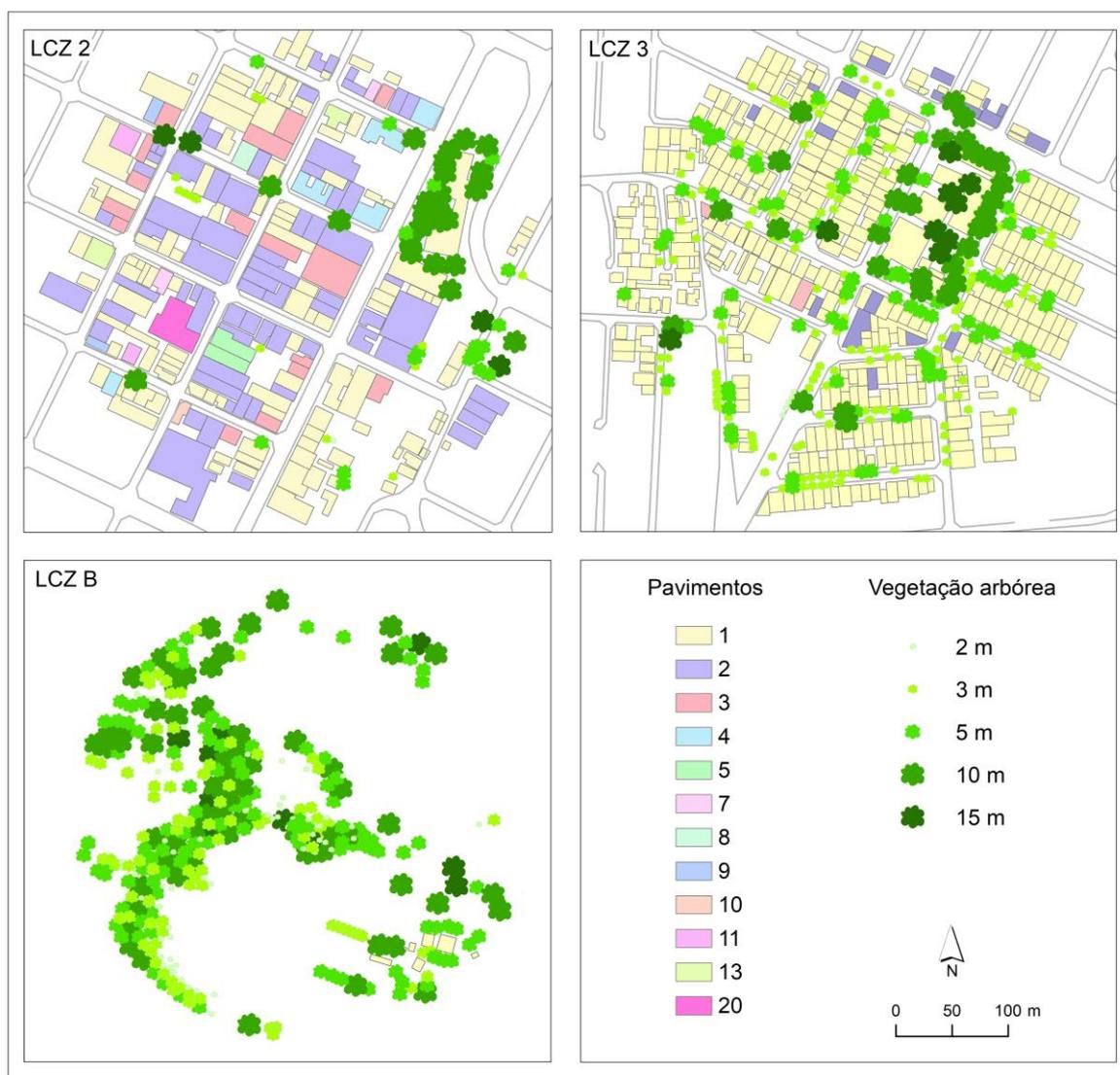
¹³ Greater densities can be expected to be accompanied by greater amounts of impermeable cover, materials with higher thermal admittance, and increased anthropogenic heat flux density. In turn these features will favour sensible rather than latent heat, heat storage rather than heat exchange and extra energy availability.

vegetação arbórea densa; 0,3 a 1,25 em áreas construídas espaçadas; e 0,75 a >2 em áreas construídas compactas (STEWART; OKE, 2012).

Para estimar a altura média das construções (H), foram realizados levantamentos referentes ao número de pavimentos dos edifícios nas LCZs¹⁴. Com o auxílio de uma planta baixa das edificações impressa em papel, a contagem foi realizada *in situ*, incluindo os pavimentos térreos e sobrelojas, e a quantidade foi anotada no polígono de cada construção.

Em seguida, os dados foram importados para o ArcMap e cadastrados na tabela de atributos dos respectivos arquivos vetoriais das LCZs (Fig. 5.3). No cálculo da altura média, adotou-se a medida de 3 m para cada pavimento padrão e 5 m para os pavimentos térreos com o pé-direito alto (NEUFERT, 2013; PRESIDENTE PRUDENTE, 2018; SILVA et al., 2018).

Figura 5.3 Planta baixa dos edifícios e vegetação arbórea nas LCZs



¹⁴ A altura média da vegetação arbórea foi estimada com base no levantamento dos edifícios.

Para medir a largura das vias (W), utilizou-se o aplicativo *Google Earth Pro*¹⁵ para obter as distâncias entre os edifícios separados pelas ruas e calçadas. Levando em consideração as diferenças de largura das vias no interior das LCZs urbanas, optou-se por medir todas as distâncias nas áreas delimitadas (400 m de diâmetro) e calcular a largura média para cada LCZ.

Na LCZ B, H correspondeu à altura média da vegetação arbórea, enquanto W foi definido a partir do espaçamento médio entre as árvores.

Dessa forma, as razões H/W médias foram estimadas e os valores utilizados para preencher as fichas técnicas das LCZs com mais detalhes das áreas de estudo. O valor médio de H/W na LCZ 2 foi de 0,7, dentro do limite mínimo esperado para essa classe na proposta de Stewart e Oke (2012).

Por outro lado, a LCZ 3 apresentou $H/W = 0,3$, valor pouco abaixo do intervalo proposto pelos autores para áreas densamente construídas. Isso pode ser relacionado ao predomínio de edifícios baixos (3 m), enquanto o espaçamento médio entre as vias foi de 11 m. Na LCZ B foi estimada $H = 10$ m, $W = 16,5$ e razão do aspecto $H/W = 0,6$, valor dentro da faixa esperada para a classe de vegetação arbórea esparsa (0,25–0,75).

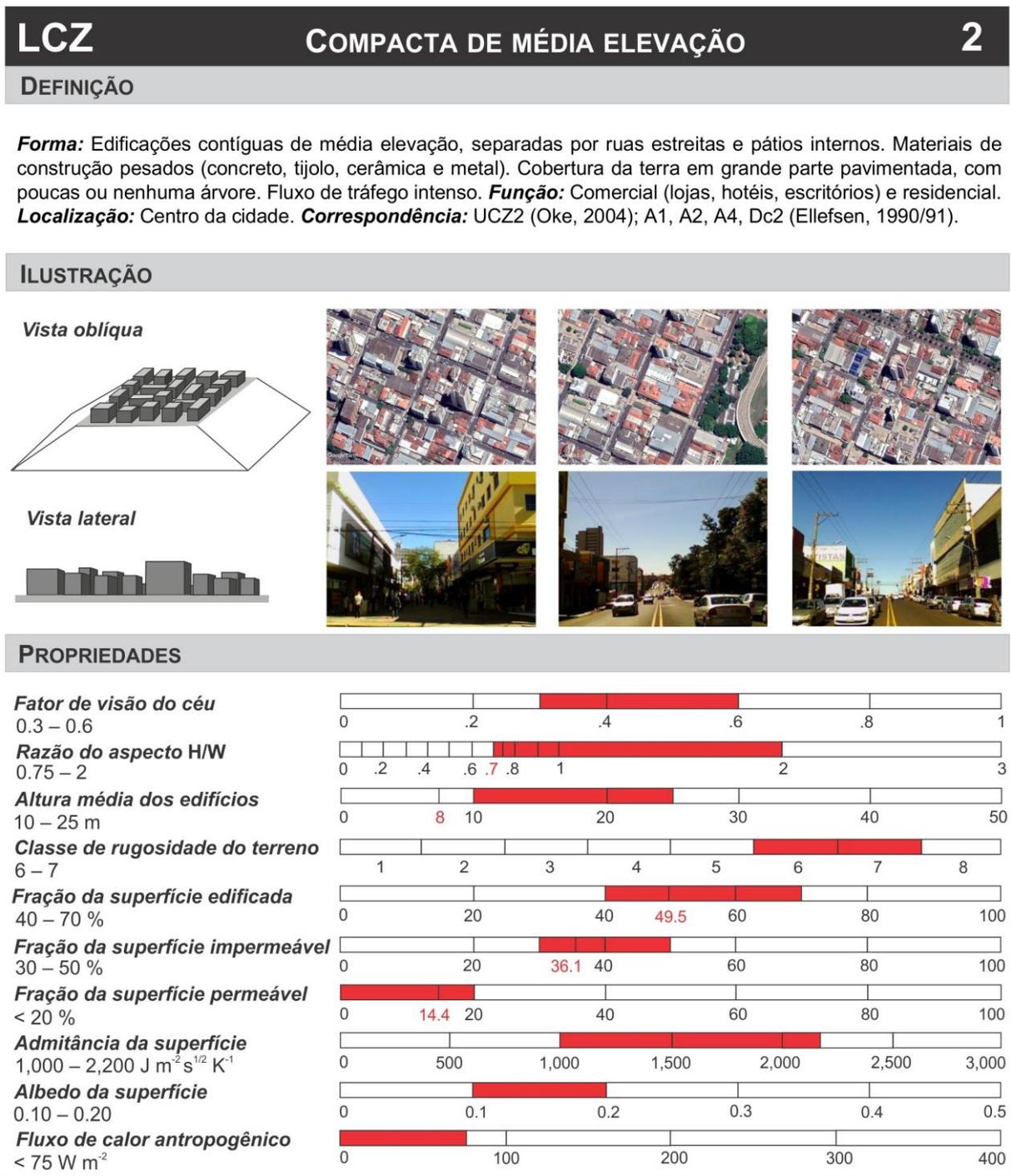
5.3 Fichas técnicas

O *layout*, as ilustrações e as propriedades das LCZs foram baseadas nos materiais propostos por Stewart (2011, 2018) e Stewart e Oke (2012), sendo que os dados das propriedades representativas das LCZs em Presidente Prudente estão escritos em vermelho. As figuras ilustrativas da vista oblíqua foram obtidas no *Google Earth Pro*, com altitude média (*eye altitude*) de 800 m, enquanto as da vista lateral foram fotografadas durante os levantamentos de dados nas áreas de estudo.

A LCZ 2 representa a área comercial no centro da cidade, onde o fluxo de tráfego é intenso e as ruas estreitas separam uma densa mistura de edifícios de média elevação. A proporção de superfície edificada chega a 49,5%, e os principais materiais de construção são o concreto, o telhado de cerâmica e a cobertura metálica. Grande parte da cobertura da terra é pavimentada (36,1%), com poucas árvores e plantas baixas que correspondem a 14,4% da superfície permeável (Fig. 5.4).

¹⁵ GOOGLE. Google Earth. Version 7.3.2.5776. 2019. Presidente Prudente-SP. Disponível em: <https://www.google.com/earth/>. Acesso em: fev. 2019.

Figura 5.4 LCZ 2 – Compacta de média elevação



Fonte: Elaborado pela autora. Adaptado de Stewart (2011, 2018) e Stewart e Oke (2012)

A LCZ 3, localizada na periferia oeste da cidade, apresenta edifícios residenciais de baixa elevação pouco espaçados, dispostos em ruas estreitas, e fluxo de tráfego baixo a moderado. Aproximadamente 48% da sua superfície é coberta por edifícios, e os materiais construtivos incluem concreto, telhados de cerâmica e fibrocimento. A superfície pavimentada compreende cerca de 24% da área, com algumas árvores esparsas nas quadras (Fig. 5.5).

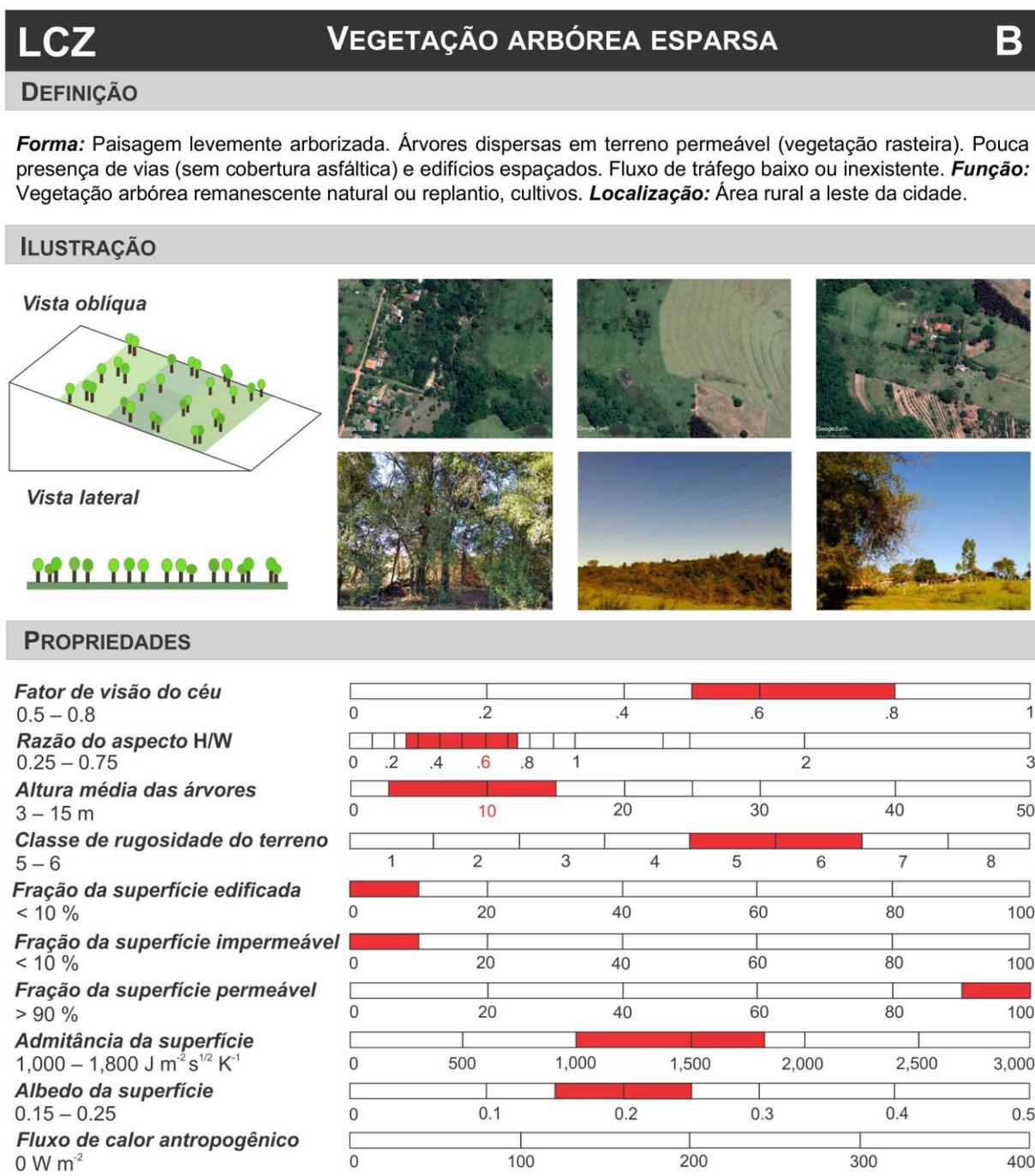
Figura 5.5 LCZ 3 – Compacta de baixa elevação



Fonte: Elaborado pela autora. Adaptado de Stewart (2011, 2018) e Stewart e Oke (2012)

A LCZ B corresponde a uma área com floresta natural remanescente no entorno rural próximo, a leste da malha urbana, caracterizada por paisagem arborizada de árvores perenes, dispersas em superfície com vegetação rasteira. Existem poucas estradas com baixo fluxo de tráfego e menos de 0,5% da superfície está coberta com construções (Fig. 5.6).

Figura 5.6 LCZ B – Vegetação arbórea esparsa



Fonte: Elaborado pela autora. Adaptado de Stewart (2011, 2018) e Stewart e Oke (2012)

5.4 Definição dos episódios representativos de inverno e verão

As variáveis meteorológicas das estações INMET, ASOS, *Davis Vantage Pro2* e os sistemas atmosféricos atuantes em junho e dezembro de 2015 (AMORIM, 2017, 2020) foram analisados com o objetivo de selecionar episódios típicos de inverno e verão para as simulações numéricas (Tabelas 5.3 e 5.4).

A partir da distribuição das precipitações e da nebulosidade, principalmente, foram escolhidos os dias para calcular a intensidade das ilhas de calor entre as LCZs ($\Delta T_{LCZ\ X-Y}$) às 21:00 h. Através das tabelas de diferenças por pares de LCZs (Apêndice B) foi possível identificar os dias nos quais as intensidades noturnas foram mais expressivas e selecioná-los para a análise diária: 11 de junho e 17 de dezembro de 2015.

Tabela 5.3 Dados meteorológicos de junho de 2015 em Presidente Prudente

Dia	Velocidade média do vento ($m\ s^{-1}$) ^a	Direção predominante do vento ^a	Precipitação área urbana (mm) ^a	Precipitação área rural (mm) ^b	Cobertura de nuvens (octas) ^c	Sistemas atmosféricos ^d
1	0,5	E	5,4	-	6	FPA
2	1,3	E	0,4	1,01	7	FPA
3	0,9	E	-	0,5	8	mPa
4	1,3	SE	-	0,25	2	mPa
5	1,2	E	-	0,25	4	mPa
6	1,1	E	-	-	4	mTa
7	0,7	E	-	-	2	mTa
8	0,6	E	-	-	4	mTa
9	0,6	E	-	-	2	mTa
10	0,7	E	-	-	2	mTa
11	1,2	NE	-	-	2	mTa
12	0,6	NW	-	-	4	mTa
13	1,0	ENE	-	-	2	mTa
14	1,6	NNE	-	-	4	mTa
15	1,6	SW	2,4	5,83	8	FPA
16	1,2	E	-	0,5	6	mPa
17	1,1	E	-	-	6	mPa
18	1,9	W	-	-	4	mPa
19	2,3	SW	-	-	6	mPa
20	2,4	E	-	-	2	mPa
21	1,6	E	-	-	2	mPa
22	1,0	E	-	0,25	2	mTa
23	0,6	SE	-	-	2	mTa
24	2,5	E	-	-	4	FPA
25	3,0	E	-	-	4	mPa
26	2,6	E	-	-	4	mPa
27	1,8	E	-	-	2	mPa
28	1,2	E	-	-	6	mPa
29	1,3	E	-	-	4	mTa
30	1,9	NE	13,0	53,08	4	FPA

* Células com realce correspondem aos dias selecionados para comparar a intensidade das ilhas de calor ($\Delta T_{LCZ\ X-Y}$) e célula com bordas externas corresponde ao dia selecionado para a análise diária.

Fonte: (a) INMET; (b) *Davis Vantage Pro2*; (c) ASOS; (d) Amorim (2017, 2020)

Tabela 5.4 Dados meteorológicos de dezembro de 2015 em Presidente Prudente

Dia	Velocidade média do vento (m s ⁻¹) ^a	Direção predominante do vento ^a	Precipitação área urbana (mm) ^a	Precipitação área rural (mm) ^b	Cobertura de nuvens (octas) ^c	Sistemas atmosféricos ^d
1	1,2	E	2,0	0,51	3	FPA
2	1,1	E	-	-	3	mTa
3	0,7	E	17,8	16	4	I
4	0,7	E	5,6	24,62	4	I
5	0,8	SW	0,2	-	3	FPA
6	0,7	W	7,2	18,28	5	FPA
7	0,5	W	-	-	4	mPa
8	0,7	E	8,2	2,03	7	I
9	0,9	NE	1,6	7,87	5	FPA
10	1,5	NW	11,4	13,97	3	FPA
11	0,7	N	-	-	2	FPA
12	0,8	E	17,8	29,96	7	I
13	2,1	N	-	0,5	3	mTa
14	1,3	N	-	-	2	mTa
15	0,7	E	-	-	2	FPA
16	0,7	NE	1,0	-	7	FPA
17	1,3	E	-	-	2	mTa
18	1,0	NE	3,0	22,86	4	mTa
19	0,6	NE	7,2	10,15	3	FPA
20	0,3	E	5,0	2,02	2	FPA
21	0,9	E	-	-	5	mPa
22	1,4	E	1,0	-	5	mTa
23	0,9	NE	1,2	-	7	mTa
24	0,8	E	-	-	4	mTa
25	0,7	SW	-	-	4	mTa
26	0,4	ENE	13,6	25,65	7	FPA
27	0,5	NE	-	26,41	2	mPa
28	1,3	N	8,2	22,1	7	ZCOU
29	1,1	ENE	65,2	54,85	7	ZCOU
30	2,0	N	25,8	6,86	7	FE
31	2,0	W	0,2	0,25	5	mTa

* Células com realce correspondem aos dias selecionados para comparar a intensidade das ilhas de calor ($\Delta T_{LCz_{x-y}}$) e célula com bordas externas corresponde ao dia selecionado para a análise diária.

Fonte: (a) INMET; (b) *Davis Vantage Pro2*; (c) ASOS; (d) Amorim (2017, 2020)

Em seguida, os dados horários de direção e velocidade do vento foram trabalhados no WRPLOT View¹⁶, um programa operacional que fornece gráficos visuais de rosa dos ventos, para analisar a distribuição típica dessas variáveis nos episódios selecionados. O comprimento de cada “raio” ao redor do círculo se refere à frequência do tempo (%) em que os ventos sopram de uma direção específica e em determinadas faixas de velocidade.

Para observar a evolução horária da temperatura do ar nas LCZs e a intensidade das ilhas de calor, foram elaborados gráficos junto aos dados de radiação solar global (RSG)¹⁷. Os gráficos também incluem dados de umidade relativa registrados nas LCZs e a umidade

¹⁶ Copyright © 1995-2019 Lakes Environmental Software.

¹⁷ A radiação solar global é a quantidade total de energia solar (direta e difusa) recebida pela superfície da Terra, geralmente expressa em W m⁻² (OKE, 1987; AMS, 2019). Devido ao sombreamento na estação Presidente Prudente-A707 no período da manhã, optou-se por utilizar os dados de RSG da estação meteorológica de Rancharia-SP (A718, Código OMM: 86864), a aproximadamente 60 km de distância de Presidente Prudente.

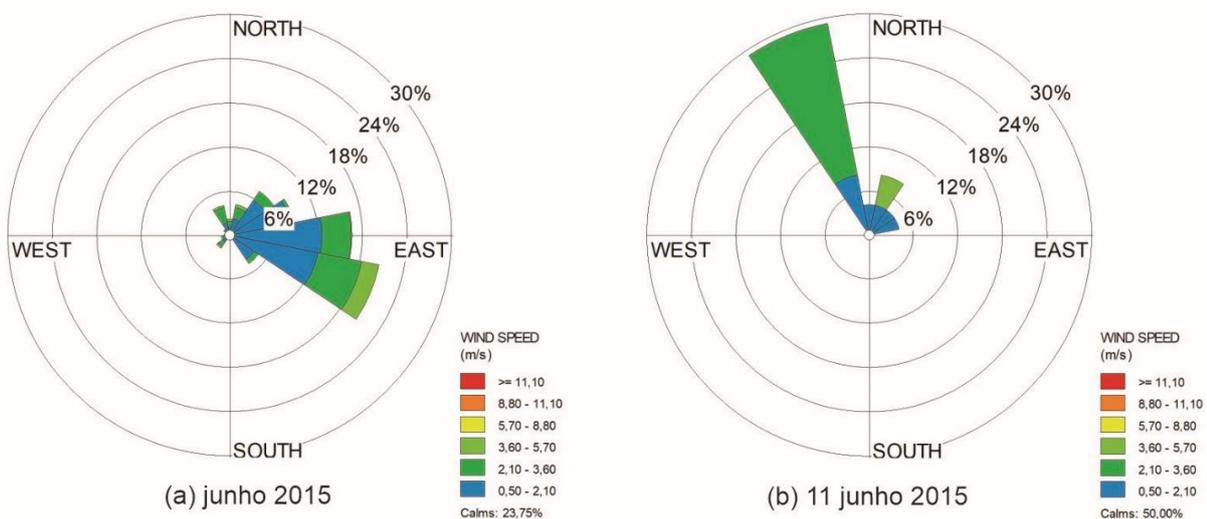
específica do ar calculada para cada área.

5.4.1 Características das variáveis climáticas em junho de 2015

O mês de junho apresentou temperatura média do ar de 21,1°C, máxima de 30,6°C e mínima de 11,6°C. A média diária de RSG foi de 153,6 W m⁻², a umidade relativa do ar média foi de 66% e o total de precipitação foi de 21,2 mm. Os ventos apresentaram velocidade média de 1,4 m s⁻¹, com direções predominantes de ESE, E, ENE e NE, respectivamente. As situações de calmaria totalizaram 23,8%, enquanto ventos de até 2,1 m s⁻¹ ocorreram em 52,9% do tempo e em apenas 4,7% foram classificados entre 3,6 e 5,7 m s⁻¹ (Fig. 5.7(a)).

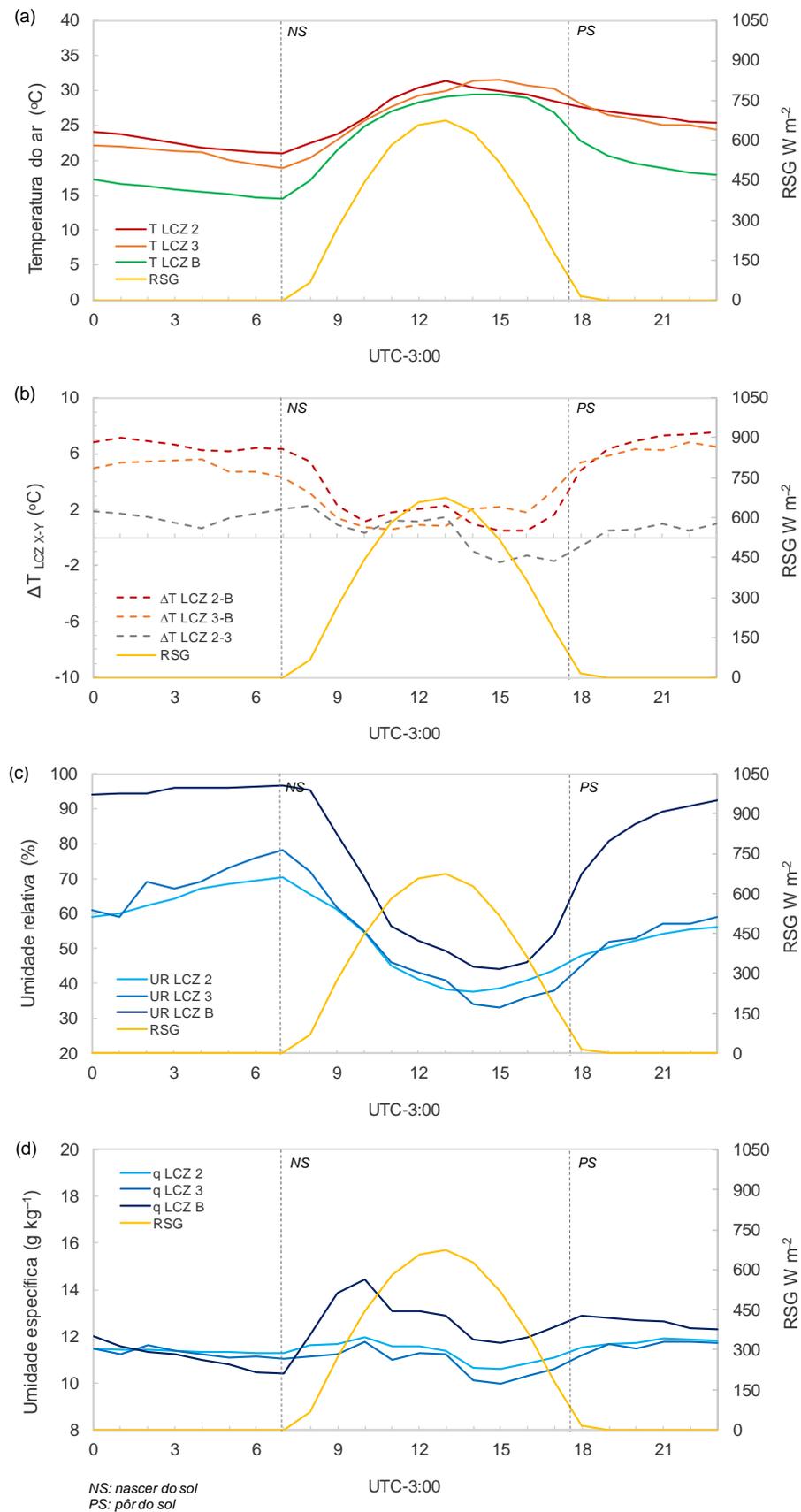
No dia 11 de junho a temperatura máxima atingiu 29,9°C, com média de 24,5°C e mínima de 19,7°C, e média da RSG de 183,3 W m⁻². A umidade relativa do ar média foi de 56%, com mínima de 37% e máxima de 72%. Os ventos sopraram do quadrante norte, predominantemente, com velocidade média de 1,2 m s⁻¹ e máxima registrada de 3,8 m s⁻¹. Durante 50% do tempo ocorreu situação de calmaria, em 20,8% as velocidades variaram entre 2,1 e 3,6 m s⁻¹, e em 4,2% os ventos foram de 3,6 e 5,7 m s⁻¹ (Fig. 5.7(b)).

Figura 5.7 Frequência da direção e velocidade dos ventos em junho de 2015



Observa-se na Figura 5.8(a) que as variações de temperatura do ar nas LCZs acompanharam a curva de radiação solar, com o aumento dos valores no nascer do sol, temperaturas mais elevadas no período de maior incidência de raios solares e diminuição após o pôr do sol.

Figura 5.8 Temperatura do ar, $\Delta T_{LCZ\ X-Y}$, RSG, umidade relativa e umidade específica nas LCZs em 11 de junho de 2015



Nesse episódio representativo do inverno, as temperaturas nas LCZs apresentaram um padrão similar ao aquecimento e resfriamento das áreas urbanas e rurais descritas por Oke et al. (2017) em condições de tempo estáveis. Apesar da proximidade dos valores de temperatura máxima do ar nesses ambientes, a mínima é menor na área rural, o que resultou na maior amplitude térmica verificada na LCZ B.

Próximo ao nascer do sol, a área rural estava com temperaturas mais frias, mas em seguida os valores aumentaram rapidamente. Embora o sensor tenha sido instalado abaixo da copa das árvores, muitas perdem folhas nesse período com menor pluviosidade, o que deixa a superfície natural mais exposta ao sol e seus efeitos no aquecimento em comparação com a superfície urbana.

O aquecimento da camada do dossel urbano é mais lento no início do dia, pois os cânions estão geralmente sombreados e as temperaturas da superfície aquecem menos rapidamente devido à alta admitância térmica dos materiais construtivos. Próximo ao meio-dia, as temperaturas urbanas e rurais se aproximam de modo que é comum observar diferenças térmicas ΔT_{u-r} negativas, ou seja, temperatura mais elevada na área rural; caracterizando uma ilha de frescor.

No final da tarde e no início da noite, as temperaturas começam a diminuir em ambos os ambientes, sendo que as taxas de resfriamento do rural podem atingir 3°C h^{-1} e as taxas urbanas são tipicamente inferiores a 1°C h^{-1} . A diferença nas taxas pode ser relacionada ao maior fator de visão do céu e à menor admitância térmica dos solos secos na área rural, enquanto no urbano há emissões de calor antropogênico, o horizonte é mais restrito e o calor armazenado é liberado lentamente (OKE et al., 2017).

Essa sequência diária se repete após o amanhecer e constitui a essência do efeito das ilhas de calor na camada do dossel, fenômeno noturno que se origina porque as áreas urbanas não conseguem resfriar tão rapidamente quanto o ambiente rural (OKE, et al., 2017).

No que diz respeito às intensidades das ilhas de calor, verificou-se que quanto mais distintas as características construtivas e de cobertura da terra, maiores as intensidades observadas entre as LCZs. Enquanto $\Delta T_{LCZ\ 2-3}$ variou de $-1,7^{\circ}\text{C}$ a $2,2^{\circ}\text{C}$, por exemplo, $\Delta T_{LCZ\ 3-B}$ foi de $0,6^{\circ}\text{C}$ a $6,8^{\circ}\text{C}$ e $\Delta T_{LCZ\ 2-B}$ apresentou valores entre $0,5^{\circ}\text{C}$ e $7,5^{\circ}\text{C}$ (Fig. 5.8(b)).

Com relação à umidade relativa, por ser dependente da temperatura do ar, apresentou estreita relação inversa com o padrão das curvas de aquecimento e resfriamento (Fig. 5.8(c)). Os percentuais mais elevados ocorreram no período noturno e os mínimos no período de maior aquecimento diurno, com diferença máxima de umidade entre as LCZs de até -36% ($\Delta UR_{LCZ\ 2-B}$).

Os valores de umidade específica expressaram maior quantidade de vapor d'água na LCZ B em relação às LCZs urbanas (Fig. 5.8(d)). Por outro lado, a LCZ 2 apresentou maior conteúdo de umidade do que a LCZ 3 ($\Delta q_{LCZ\ 2-3} = 0,6\ \text{g kg}^{-1}$), especialmente durante o dia, o

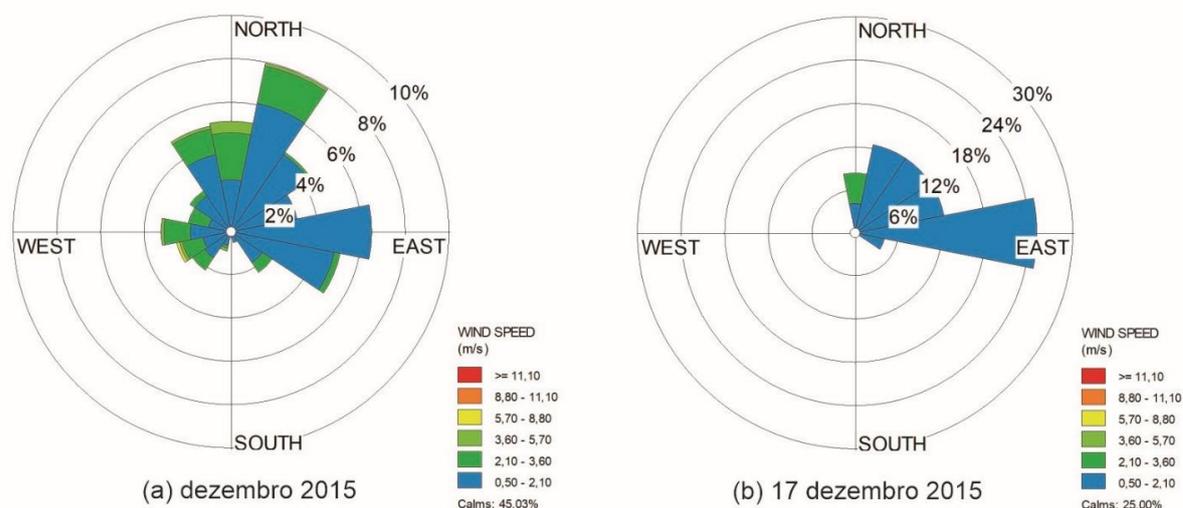
que pode ser associado à adição de água na atmosfera pelas atividades humanas (sistemas de ar condicionado e combustão de combustível, por exemplo).

5.4.2 Características das variáveis climáticas em dezembro de 2015

O mês de dezembro apresentou temperatura média do ar de 25,9°C, máxima de 35,8°C e mínima de 18,2°C. A umidade relativa do ar foi em média 75%, a precipitação totalizou 203,2 mm e a média diária de RSG atingiu 217,2 W m⁻². Com velocidade média dos ventos de 1 m s⁻¹, as direções predominantes foram NNE, E, ESE, NE, N e NW, respectivamente. Durante 45% do tempo houve calmaria e em 42% as velocidades variaram entre 0,5 e 2,1 m s⁻¹ (Fig. 5.9(a)).

No dia 17 de dezembro a temperatura máxima foi de 33,9°C, com média de 27,2°C e mínima de 21,9°C. A RSG média foi de 335,1 W m⁻² e a umidade relativa do ar foi de 64%, com mínima de 44% e máxima de 85%. Por sua vez, a velocidade média do vento foi de 1,3 m s⁻¹ e a máxima atingiu 2,8 m s⁻¹. Os ventos sopraram da direção E com velocidades entre 0,5 e 2,1 m s⁻¹ durante 25% do tempo, enquanto das direções ENE, NE e NNE totalizaram 39% nessa mesma classe de velocidade (Fig. 5.9(b)).

Figura 5.9 Frequência da direção e velocidade dos ventos em dezembro de 2015



As variações térmicas nas LCZs no dia 17 de dezembro (Fig. 5.10(a)) também acompanharam os valores de radiação solar global incidente, com temperaturas máximas acima de 34°C nas LCZs urbanas e mínima de 21,6°C na LCZ B. Diferente do ocorrido em 11 de junho, a LCZ B registrou temperaturas um pouco mais próximas das verificadas nas áreas

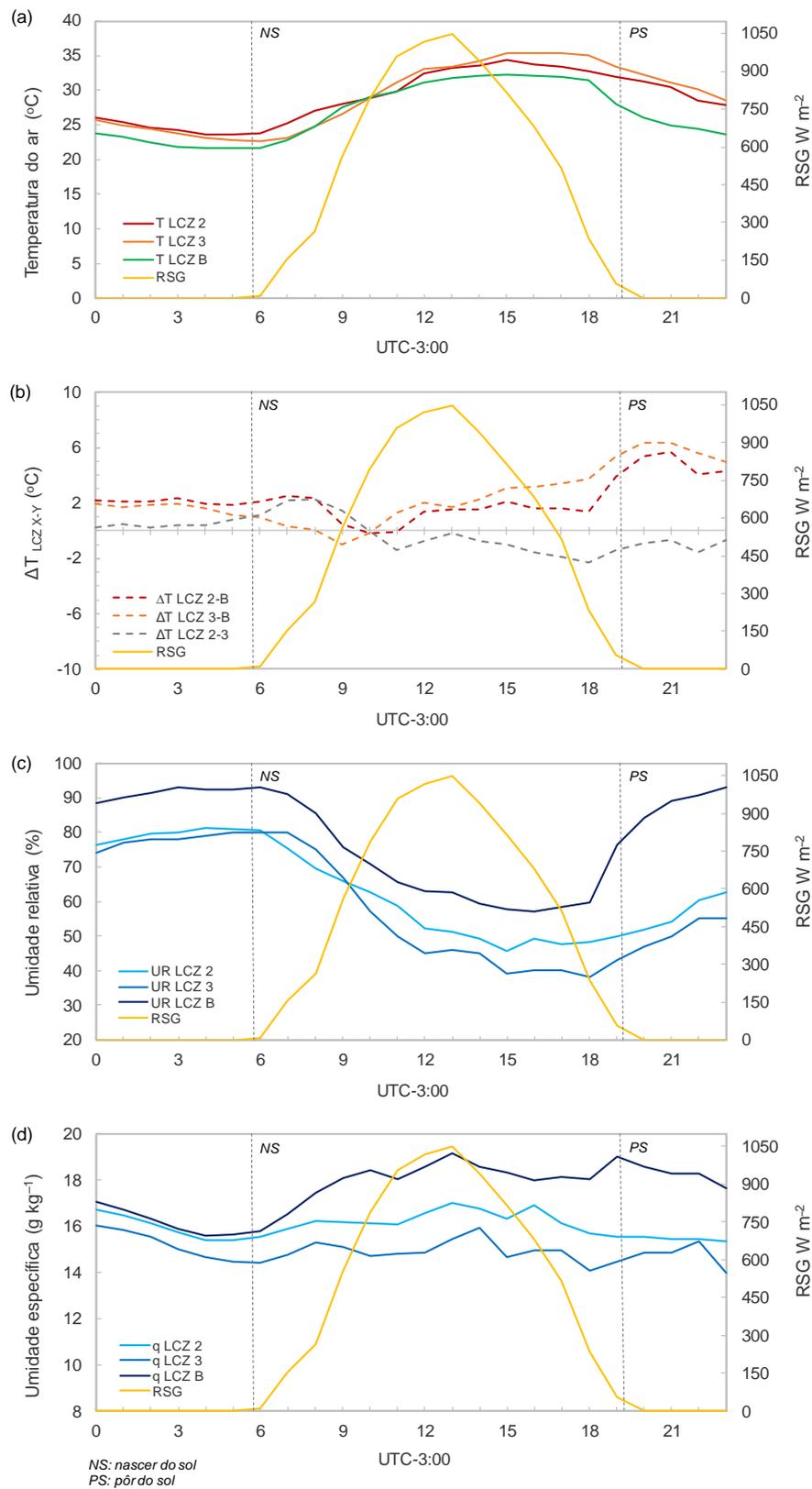
urbanas, o que pode estar relacionado à maior admitância térmica dos solos úmidos, em decorrência do aumento no total pluviométrico.

Em relação às intensidades das ilhas de calor, $\Delta T_{LCZ\ 2-B}$ variou de $-0,2^{\circ}\text{C}$ a $5,7^{\circ}\text{C}$ e $\Delta T_{LCZ\ 3-B}$ de $-1,0^{\circ}\text{C}$ a $6,4^{\circ}\text{C}$. Nesses casos, as diferenças na morfologia e cobertura da terra entre as LCZs urbanas e a LCZ B resultaram não apenas em valores máximos de ilhas de calor noturnas, mas também na formação de ilhas de frescor diurnas (Fig. 5.10(b)).

Nesse episódio representativo do verão, as diferenças térmicas foram relativamente menores do que as verificadas no inverno. No entanto, observou-se um padrão similar de aquecimento e resfriamento das áreas urbanas e da rural, sobretudo a capacidade da LCZ B em se resfriar com maior rapidez no final da tarde e início da noite, o que resultou em intensidades $\Delta T_{LCZ\ X-B}$ de até $6,4^{\circ}\text{C}$.

Consequentemente, a curva de umidade relativa da LCZ B apresentou um crescimento acentuado no final da tarde, com $\Delta UR_{LCZ\ 3-B}$ máxima de aproximadamente -40% no período noturno (Fig. 5.10(c)). Além disso, os valores de umidade específica foram menores nas LCZs 2 e 3, e verificou-se o aumento das diferenças em relação à LCZ B, com $\Delta q_{LCZ\ 2-B}$ máximo de $-3,4\ \text{g kg}^{-1}$ e $\Delta q_{LCZ\ 3-B} = -4,5\ \text{g kg}^{-1}$ (Fig. 5.10(d)).

Figura 5.10 Temperatura do ar, $\Delta T_{LCZ\ X-Y}$, RSG, umidade relativa e umidade específica nas LCZs em 17 de dezembro de 2015



6 CALIBRAÇÃO DO MODELO ENVI-MET

O modelo ENVI-met constitui uma ferramenta promissora para melhorar a compreensão dos cenários microclimáticos e projetar condições de vida mais sustentáveis. No entanto, por ter sido desenvolvido inicialmente para climas temperados, suas configurações básicas não corresponderem necessariamente aos climas tropicais.

Para superar essa limitação e garantir boas condições de inicialização, foram realizados vários testes de calibração para obter um maior grau de semelhança entre os dados simulados e os observados nas LCZs em Presidente Prudente.

A calibração do modelo se refere ao processo de ajustar os parâmetros de entrada para que ele represente a realidade observada de forma coerente, e a execução desse processo ocorreu conforme as seguintes etapas: (a) edição do banco de dados; (b) configuração do domínio do modelo; (c) configuração geral da simulação para os testes de calibração; e (e) validação dos resultados.

6.1 Edição de banco de dados

Por meio da ferramenta *Database Manager*, optou-se por organizar um único banco de dados com os elementos identificados nas LCZs de estudo. Inicialmente, foram elaborados e editados os materiais cujas propriedades físicas e térmicas (Tabela 6.1) se basearam em Ferreira e Prado (2003), Morishita et al. (2010), Gusson (2014), Oke et al. (2017), Coelho (2017) e Silva M.P. (2019). Posteriormente, tais materiais foram utilizados para elaborar as paredes e os telhados (Quadro 6.1)¹⁸.

Para a seleção dos tipos de solo, levou-se em consideração a classe predominante, segundo Antonio (2017), nas áreas representativas das LCZs. Nas LCZs 2 e 3, por exemplo, houve o predomínio de Latossolo, enquanto na LCZ B predominou o Argissolo. Ao relacionar com o banco de dados do ENVI-met, verificou-se correspondência com os solos *Sandy loam* (franco-arenoso) e *Sandy clay loam* (franco argilo arenosa), utilizados para criar perfis com coberturas de asfalto e pavimento (Quadro 6.1) (FROTA; SCHIFFER, 2012; OKE et al., 2017).

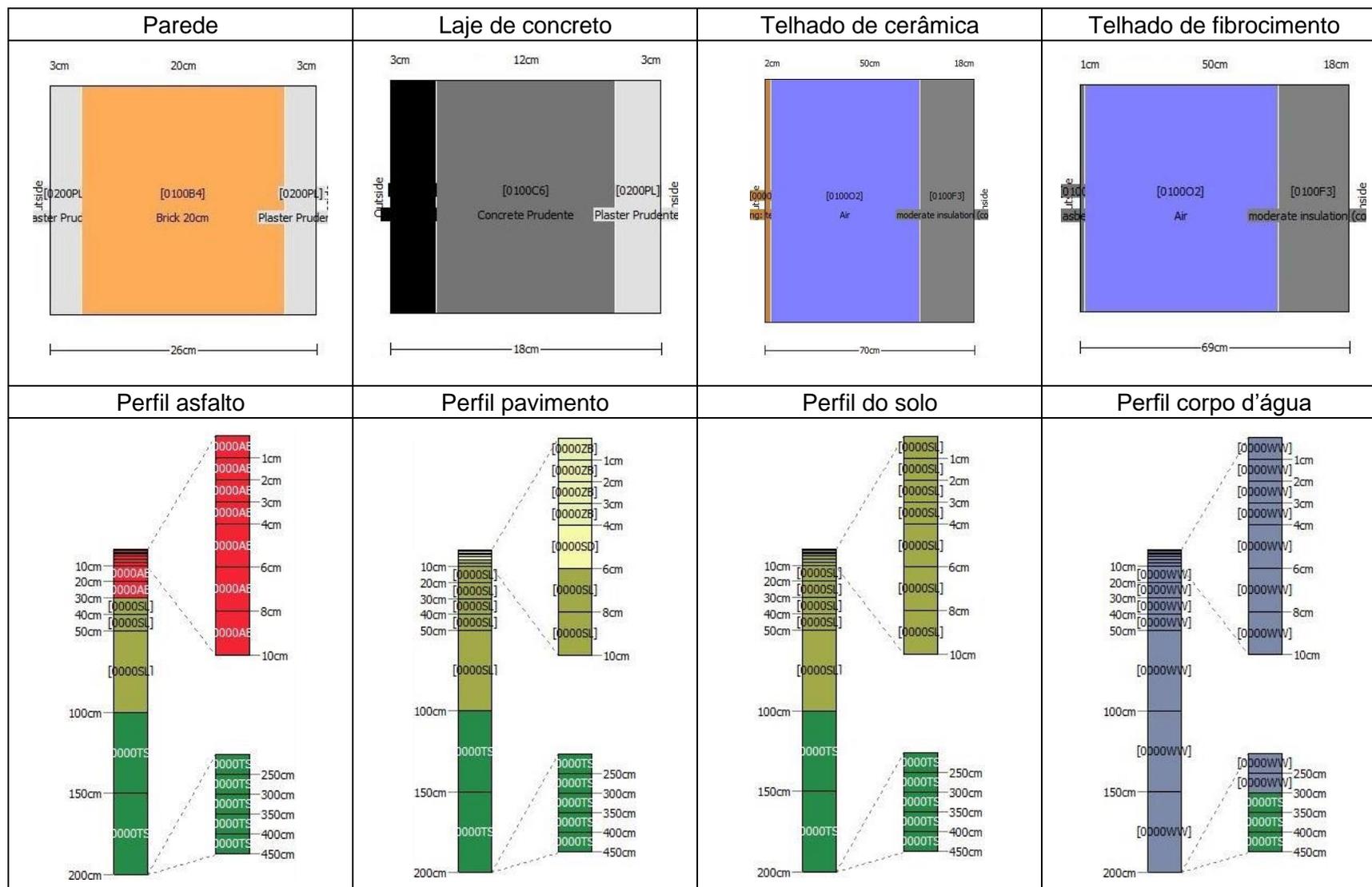
¹⁸ As propriedades da cobertura da superfície e dos tipos e perfis de solo foram sintetizadas nas tabelas do Anexo B.

Tabela 6.1 Propriedades físicas e térmicas dos materiais

Código ENVI-met	Espessura padrão (m)	Absorção (frac)	Transmissão (frac)	Reflexão (frac)	Emissividade (frac)	Calor específico (J / (kg*K))	Condutividade térmica (W / (m*K))	Densidade (kg/m ³)
Tijolo [0100B4]	0,200	0,650	0,000	0,350	0,900	1005,000	0,910	1700,000
Reboco [0200PL]	0,025	0,500	0,000	0,500	0,850	754,000	0,850	1800,000
Reboco telhado [0100PR]	0,025	0,650	0,000	0,350	0,900	650,000	0,500	1500,000
Concreto [0100C6]	0,100	0,770	0,000	0,230	0,900	1005,000	1,750	2400,000
Fibrocimento [0100R3]	0,008	0,700	0,000	0,300	0,900	840,000	0,950	1900,000
Cerâmica [0100R4]	0,020	0,650	0,000	0,350	0,900	840,00	0,840	1700,000
Telhado metal [0100ST]	0,020	0,550	0,000	0,450	0,100	4800,000	45,000	800,000
Forro [0100F3]	0,100	0,420	0,130	0,450	0,900	1032,800	1,000	1686,880
Ar [0100O2]	0,010	0,000	1,000	0,000	0,960	1006,000	0,025	1,204

Fonte: a autora, com base nos dados do ENVI-met e da literatura

Quadro 6.1 Esquemas dos elementos construtivos e coberturas da superfície



Fonte: Modelos do ENVI-met, editados de acordo com os elementos predominantes nas LCZs em Presidente Prudente

Em relação à cobertura vegetal, as plantas simples (gramíneas) e 3D (árvores) foram editadas de acordo com os elementos e suas dimensões aproximadas, observados durante os levantamentos de campo nas LCZs (Tabela 6.2).

Tabela 6.2 Características da vegetação rasteira e arbórea

Código ENVI-met	Altura (m)	Diâmetro (m)
<i>Plantas simples</i>		
[0200XX] <i>Grass 5 cm aver.</i> Grama 5 cm	0,05	—
[0300XX] <i>Grass 10 cm aver.</i> Grama 10 cm	0,1	—
[0100XX] <i>Grass 25 cm aver. dense.</i> Grama 25 cm densa	0,25	—
<i>Plantas 3D</i>		
[02SSSP] <i>Spherical, small trunk, sparse, xsmall (2m)</i> Esférica, tronco pequeno, copa esparsa, pequena	2	3
[02SMSS] <i>Spherical, medium trunk, sparse, small (3m)</i> Esférica, tronco médio, copa esparsa, pequena	3	3
[02SSSS] <i>Spherical, small trunk, sparse, small (3m)</i> Esférica, tronco pequeno, copa esparsa, pequena	3	3
[02SMSR] <i>Spherical, small trunk, sparse, regular (5m)</i> Esférica, tronco pequeno, copa esparsa, regular	5	3
[02SMSR] <i>Spherical, medium trunk, sparse, regular (5m)</i> Esférica, tronco médio, copa esparsa, regular	5	3
[02SSSM] <i>Spherical, small trunk, sparse, medium (10m)</i> Esférica, tronco pequeno, copa esparsa, média	10	9
[02SMSM] <i>Spherical, medium trunk, sparse, medium (10m)</i> Esférica, tronco médio, copa esparsa, média	10	9
[02SMSL] <i>Spherical, small trunk, sparse, large (15m)</i> Esférica, tronco pequeno, copa esparsa, grande	15	11
[02SMSL] <i>Spherical, medium trunk, sparse, large (15m)</i> Esférica, tronco médio, copa esparsa, grande	15	11
[02PMDS] <i>Palm, medium trunk, dense, small (5m)</i> Palmeira, tronco médio, copa densa, pequena	5	3

* Vegetação com perfil sazonal correspondente ao hemisfério sul (árvores perdem parte das folhas durante o inverno). Principais espécies encontradas na arborização das vias dos bairros: Oiti (*Licania tomentosa*) e Sibipiruna (*Caesalpinia pluviosa*).

Fonte: a autora, com base no banco de dados do ENVI-met

6.2 Configuração do domínio do modelo

Na etapa de calibração, as áreas de estudo foram digitalizadas no aplicativo *Spaces*, tendo em vista a extensão espacial relativamente reduzida. Nesse processo, foram definidas

as configurações geográficas gerais (localização e coordenadas) e a geometria do modelo (extensão da área nos eixos x, y e z, dimensão das células da grade e rotação).

Para a grade vertical, optou-se pela equidistante e a divisão da camada inferior em cinco subcamadas para gerar resultados mais precisos próximos à superfície. As áreas dos domínios das LCZs urbanas foram rotacionadas para alinhá-las às grades e reduzir bordas irregulares nos edifícios, e *nesting grids* foram adicionadas nas bordas horizontais do modelo para aumentar a estabilidade numérica da simulação.

A Tabela 6.3 sintetiza os parâmetros adotados para definir os domínios do modelo nas LCZs em Presidente Prudente. As dimensões do plano horizontal se basearam em áreas de amostras das LCZs, enquanto a grade vertical foi definida de acordo com a altura do edifício mais alto em cada área, ou da árvore mais alta no caso da LCZ B.

Tabela 6.3 Parâmetros utilizados para configurar o domínio do modelo nas LCZs em Presidente Prudente

LCZ	Dimensão da grade x, y e z (células)	Dimensão das células da grade (m)	Dimensão da área do domínio (m) ^a	Rotação (°)	<i>Nesting grids</i> ^{b, c}
LCZ 2	47 x 45 x 25	2,09 x 2 x 3	98,23 x 90 x 75	25,79	4
LCZ 3	50 x 50 x 25	2 x 2 x 3	100 x 100 x 75	26,52	4
LCZ B	50 x 50 x 25	2 x 2 x 3	100 x 100 x 75	–	4

^a Grade vertical equidistante (célula inferior dividida em 5 camadas)

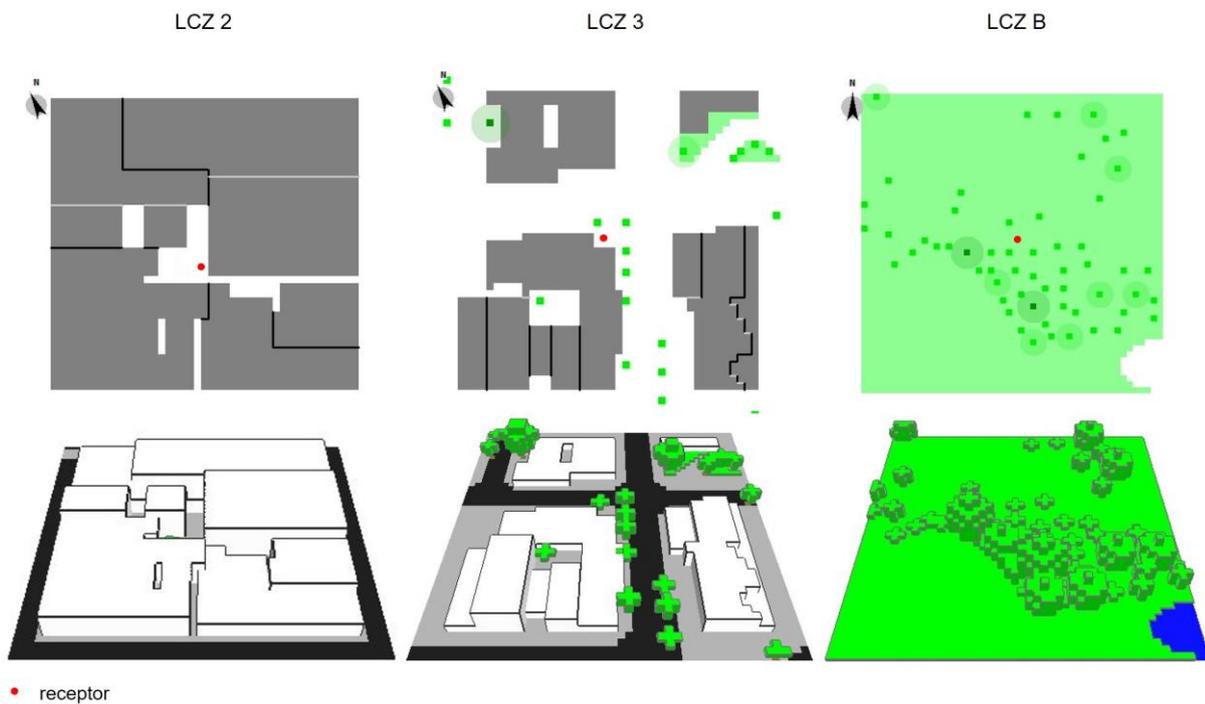
^b Espaço extra entre os edifícios e a borda do modelo adicionado pelos *nesting grids*: LCZ 2 = 29,26 m e LCZ 3 = 28 m.

^c Distância total entre os edifícios e a borda do modelo: LCZ 2 = 33,44 m e LCZ 3 = 36 m.

Após o ajuste dessas configurações básicas, iniciou-se a etapa de representação digital das LCZs com o auxílio de arquivos de entrada das áreas (*bitmap* com planta baixa dos edifícios e suas respectivas alturas, materiais construtivos e cobertura da superfície) e do inventário da vegetação realizado em campo e a partir de imagens do *Google Earth Pro* (Fig. 6.1).

Durante a digitalização das áreas também foram inseridos os receptores, posicionados nos mesmos pontos das LCZs onde os sensores registraram os dados de temperatura e umidade relativa do ar. Esses pontos são essenciais na etapa de calibração, pois permitem comparar os resultados do modelo com os dados climáticos reais.

Figura 6.1 Visualização 2D e 3D da área do modelo das LCZs



6.3 Configuração geral da simulação

A qualidade dos resultados da simulação com o ENVI-met depende da precisão das condições de contorno da atmosfera utilizadas como arquivos forçantes. Portanto, “o local onde os dados para a criação dos perfis forçantes são coletados deve estar próximo à área do modelo e livre de influências de estruturas locais, terreno e vegetação” (HUTTNER, 2012, p. 68, tradução nossa)¹⁹.

Seguindo as recomendações de Huttner (2012) e da equipe do ENVI-met (fórum online)²⁰ sobre os dados ideais das condições atmosféricas de contorno, foram elaborados quatro arquivos para Presidente Prudente: dois referentes aos episódios representativos do inverno e do verão com dados da estação do INMET e outros dois com dados da estação meteorológica do aeroporto (ASOS). O objetivo dessa abordagem foi comparar os resultados de calibração do modelo para a configuração original das áreas de estudo sob influência de condições de contorno distintas, em virtude da localização das estações meteorológicas.

Dessa forma, utilizou-se a opção *full forcing*, cujo formato de entrada para esses dados corresponde a um arquivo de texto, no qual os valores das variáveis meteorológicas são

¹⁹ [...] the site where the data for the creation of the forcing profiles is collected should be close to the model area and free from influences of local structures, terrain and vegetation.

²⁰ ENVI-met Board: The ENVI-met User Forum. Disponível em: <http://www.envi-hq.com/index.php>.

listados cronologicamente de acordo com o intervalo temporal da simulação²¹.

Após criar os arquivos necessários para executar as simulações, iniciou-se o *ENVI-guide* para indicar ao modelo qual projeto seria utilizado (LCZ 2, LCZ 3 ou LCZ B). Nesse aplicativo foram definidos a data, hora de início e a duração da simulação, o nome dos arquivos de saída e a forçante das condições de contorno lateral (Tabela 6.4).

Tabela 6.4 Parâmetros utilizados para configurar os dados meteorológicos de entrada nas LCZs em Presidente Prudente

Parâmetro	LCZ 2		LCZ 3		LCZ B	
	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão
Data da simulação	10.06.2015	16.12.2015	10.06.2015	16.12.2015	10.06.2015	16.12.2015
Hora de início	00:00	00:00	00:00	00:00	00:00	00:00
Total de horas de simulação	70	70	70	70	70	70
Condições de contorno	INMET/ ASOS	INMET/ ASOS	INMET/ ASOS	INMET/ ASOS	INMET/ ASOS	INMET/ ASOS
Forçar temperatura	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Forçar umidade	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Forçar vento	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Forçar radiação/nuvem	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Forçar precipitação	X	X	X	X	X	X

* Diferentes testes de calibração foram realizados com alterações nos parâmetros listados na tabela. Esses correspondem aos testes cujos resultados apresentaram melhor correspondência com os dados medidos nas LCZs.

Em seguida, as simulações foram executadas no *ENVI-core*, com tempo médio de processamento de 45 h e armazenamento médio de 5GB para cada teste. Os resultados foram visualizados no aplicativo de pós-processamento *Leonardo* e exportados para planilhas do Excel²².

As primeiras 24 h de cada simulação foram destinadas ao tempo de rotação do modelo, ou seja, à repetição completa do ciclo diurno de forçamento térmico do sistema para ajustar os perfis de temperatura. Essa abordagem requer mais tempo de execução, mas aumenta o desempenho geral do modelo (MIDDEL et al., 2014; KRAYENHOFF et al., 2021).

Assim, os dados horários de temperatura do ar, umidade relativa e umidade específica, referentes ao segundo dia dos períodos simulados, foram selecionados para avaliar o desempenho do modelo.

²¹ Os dados horários das duas estações meteorológicas foram interpolados para gerar arquivos com intervalos de tempo de 30 minutos.

²² Microsoft Excel® é marca registrada da Microsoft Corporation.

6.4 Avaliação do desempenho do modelo

A validação dos resultados das simulações envolve a comparação entre os dados medidos e os simulados. Segundo Willmott (1981), esse procedimento deve ser realizado de maneira quantitativa e significativa, com a apresentação de estatísticas de validação para realizar avaliações informadas.

Em geral, o coeficiente de Pearson (r) e o coeficiente de determinação (r^2) são escolhidos como medidas de desempenho de modelo (Apêndice C), mas fornecem pouca informação adicional, uma vez que suas magnitudes não são constantemente relacionadas à precisão da previsão, definida como o grau em que os valores previstos pelo modelo (P) se aproximam dos observados na realidade (O) (WILLMOTT, 1982).

Portanto, outros cálculos estatísticos foram incluídos na análise: a raiz do erro quadrático médio (*Root Mean Square Error* – RMSE) e seus componentes sistemáticos (RMSE_s) e não sistemáticos (RMSE_u); o erro absoluto médio (*Mean Absolute Error* – MAE); o viés médio (*Mean Bias Error* – MBE) e o índice de concordância (*Index of Agreement* – d) (Anexo C), sugeridos por Willmott (1981, 1982) como indicadores superiores de comparação entre P e O , e de desempenho de modelos.

O RMSE informa sobre o tamanho real do erro produzido pelo modelo, o RMSE_s indica erros sistemáticos nas observações de campo, nos parâmetros de inicialização ou na representação do domínio, e valores de RMSE_u próximos de RMSE significam maior precisão (ROTH; LIM, 2017; TSOKA; TSIKALOUDAKI; THEODOSIOU, 2018).

O MAE indica o tamanho médio de um erro que se pode esperar de uma previsão, enquanto o MBE quantifica a tendência geral da previsão. Um viés ou erro positivo representa que os dados estão superestimados e vice-versa.

Por sua vez, d mede o grau em que os valores simulados são livres de erros. O índice varia de 0,0 a 1,0, e $d = 1,0$ indica perfeita concordância entre P e O (WILLMOTT, 1981, 1982; MIDDEL et al., 2014).

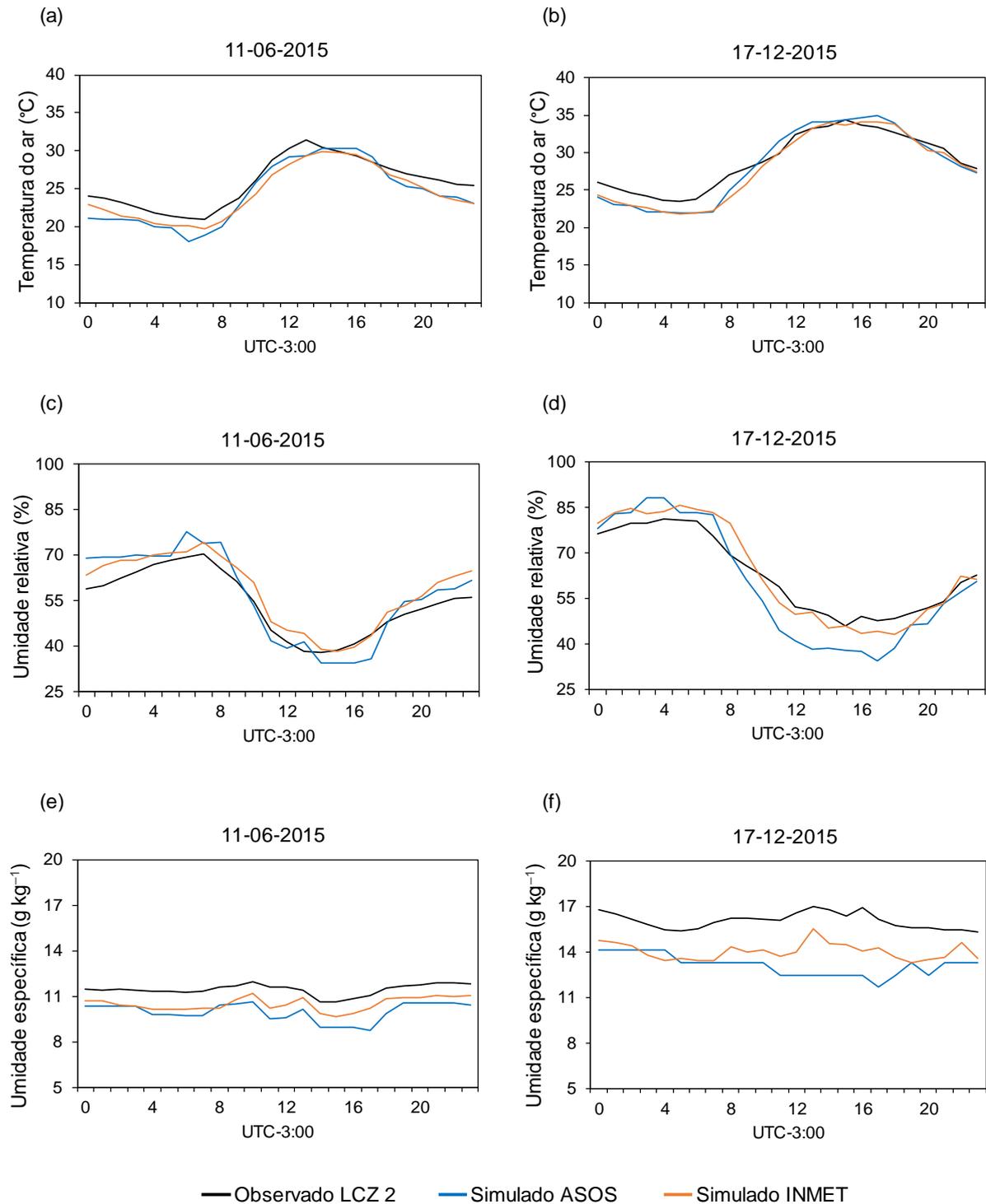
Com base nessas medidas, a avaliação dos resultados do ENVI-met considerou os valores de temperatura do ar (T), umidade relativa (UR) e umidade específica (q) a 2 m da superfície. A validação de cada variável foi baseada em 24 pares (n) de valores previstos pelo modelo e registrados nas LCZs nos dias 11 de junho e 17 de dezembro de 2015.

6.4.1 Validação dos resultados da calibração para a LCZ 2

A Figura 6.2 ilustra os gráficos com as curvas de T , UR e q registradas na LCZ 2 em comparação com os valores previstos pelo modelo ENVI-met com as forçantes ASOS e

INMET nos episódios de inverno e verão.

Figura 6.2 Comparação entre as variáveis registradas na LCZ 2 e simuladas pelo ENVI-met



De maneira geral, o modelo foi capaz de simular os padrões de aquecimento e resfriamento semelhantes ao observado na realidade. No episódio de inverno, os picos de temperatura simulada com ambas as forçantes ocorreram 1 h após o da observada na LCZ 2

e tiveram duração de até 3 h. Enquanto isso, houve diminuição relativamente rápida de temperatura no local, que pode ser atribuída ao sombreamento na LCZ 2 provocado pelos edifícios no entorno do receptor.

Além das diferenças nos picos de aquecimento, o modelo subestimou os valores mínimos de T nos dois episódios, e dadas as configurações da área de estudo e as condições de contorno lateral, o desempenho na previsão de UR e q foi inferior ao de temperatura, principalmente com a forçante ASOS.

As diferenças máximas entre os dados observados e previstos ocorreram com a forçante ASOS no dia 17 de dezembro. A diferença de T atingiu $-3,2^{\circ}\text{C}$ às 7:00 h, ΔUR foi de aproximadamente -14% às 11:00 h, e os valores previstos de q apresentaram maior discrepância em relação aos observados, com até $4,5 \text{ g kg}^{-1}$ a menos de umidade.

Os indicadores estatísticos demonstram que o modelo apresentou melhor desempenho na simulação da temperatura do ar, com valores de $\text{RMSE} = 1,42^{\circ}\text{C}$ a $1,49^{\circ}\text{C}$, $\text{MBE} = -0,90^{\circ}\text{C}$ a $-1,33^{\circ}\text{C}$, e $d = 0,95$ a $0,97$ com a forçante INMET, e $\text{RMSE} = 1,47^{\circ}\text{C}$ a $1,81^{\circ}\text{C}$, $\text{MBE} = -0,60^{\circ}\text{C}$ a $-1,45^{\circ}\text{C}$ e $d = 0,94$ a $0,97$ com a forçante ASOS (Tabela 6.5).

Tabela 6.5 Índices estatísticos para as simulações na LCZ 2

Data	Forçante	Variável	RMSE	RMSE _s	RMSE _u	MAE	MBE	d	r	r^2
11-06-2015	ASOS	T	1,81	1,59	0,86	1,62	-1,45	0,94	0,98	0,95
		UR	5,33	4,00	3,53	4,61	2,16	0,95	0,97	0,94
		q	1,50	1,46	0,31	1,46	-1,46	0,36	0,84	0,71
	INMET	T	1,49	1,33	0,66	1,33	-1,33	0,95	0,98	0,96
		UR	4,59	3,95	2,33	4,04	3,86	0,96	0,98	0,96
		q	0,96	0,94	0,22	0,94	-0,94	0,47	0,86	0,74
17-12-2015	ASOS	T	1,47	1,25	0,78	1,24	-0,60	0,97	0,99	0,97
		UR	7,73	6,86	3,56	6,53	-3,37	0,94	0,98	0,97
		q	3,08	3,01	0,64	2,93	-2,93	0,21	-0,24	0,06
	INMET	T	1,42	1,21	0,74	1,12	-0,90	0,97	0,99	0,97
		UR	4,33	3,39	2,69	3,62	0,73	0,98	0,99	0,97
		q	2,05	2,01	0,36	2,01	-2,01	0,34	0,73	0,54

* RMSE, RMSE_s, RMSE_u, MAE e MBE são expressos em $^{\circ}\text{C}$ para T , em g kg^{-1} para q e em % para UR .

No episódio de verão, com exceção da UR e q , os erros entre os conjuntos de dados observados e simulados foram inferiores aos verificados no inverno. Já os valores predominantemente negativos de MBE para as variáveis simuladas indicam a tendência do modelo em subestimar os valores.

O índice de concordância apresentou valores próximos a 1 ($0,94 \leq d \leq 0,97$) nas

simulações de T e UR , o que significa boa concordância entre as variáveis medidas na LCZ 2 e as previstas pelo modelo, mas valores de $d \leq 0,47$ para a umidade específica, indicando maior grau de erro.

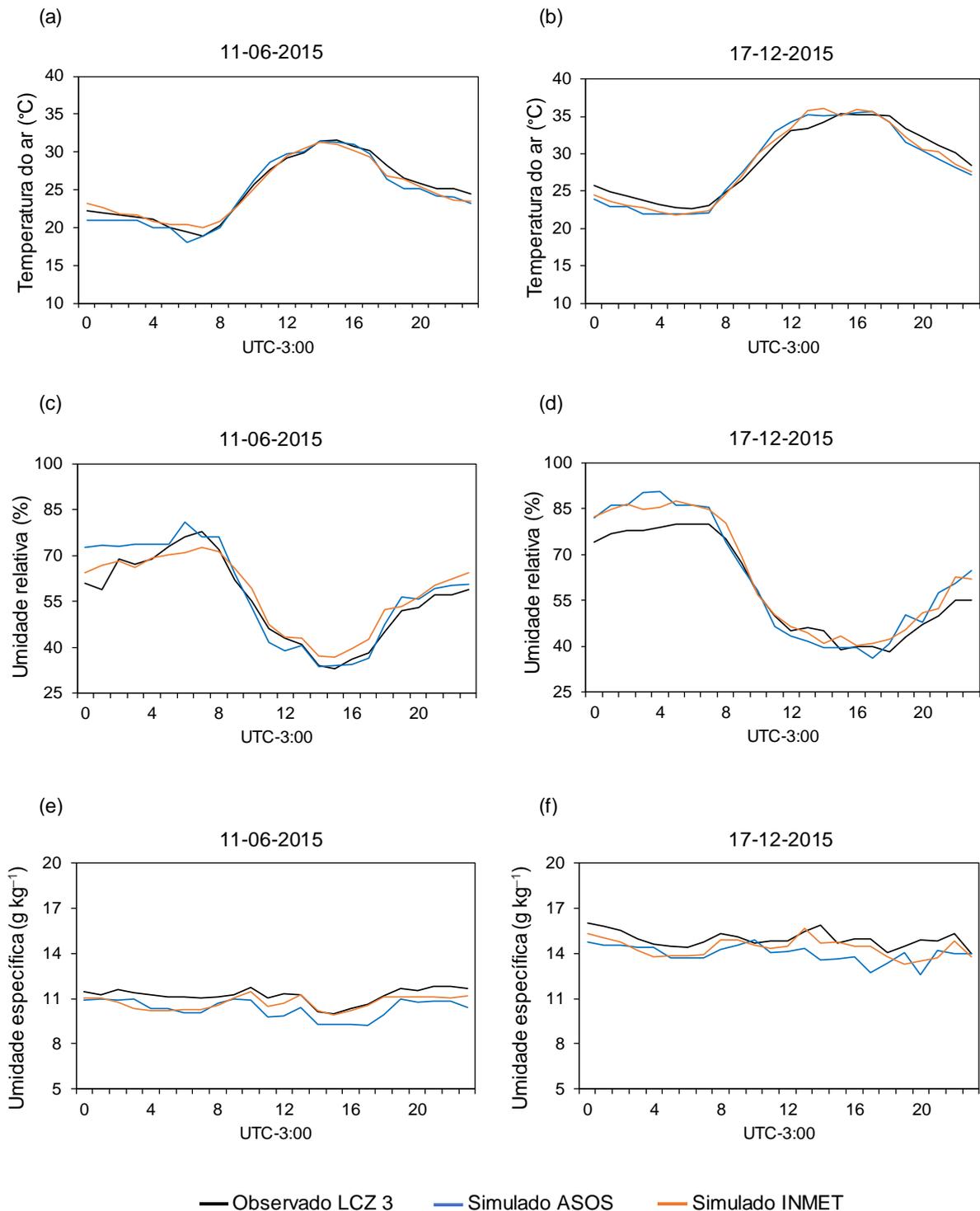
6.4.2 Validação dos resultados da calibração para a LCZ 3

Os gráficos com os resultados da calibração do ENVI-met para a LCZ 3 (Figura 6.3) ilustram curvas com melhores ajustes do modelo para T , UR e q em relação aos verificados na LCZ 2.

Apesar do modelo subestimar os valores de T noturnos nos episódios de inverno e verão com ambas as forçantes, a concordância entre dados previstos e observados foi, em geral, melhor do que a de umidade. Esse padrão foi evidente com a forçante ASOS, que apresentou tendência a subestimar os percentuais de UR durante o dia, e os valores de q nos ciclos diurno e noturno.

As diferenças máximas entre as variáveis T e q observadas na LCZ 3 e as previstas pelo modelo ocorreram no episódio de verão ($\Delta T = 2,4^\circ\text{C}$ e $\Delta q = -2,4 \text{ g kg}^{-1}$) com as forçantes INMET e ASOS, respectivamente. Por outro lado, a maior diferença de umidade relativa ($\Delta UR = 14,3\%$) foi verificada na simulação de inverno com a forçante ASOS.

Figura 6.3 Comparação entre as variáveis registradas na LCZ 3 e simuladas pelo ENVI-met



A análise dos indicadores de desempenho para as simulações na LCZ 3 indica que o modelo foi capaz de prever as variáveis T , UR e q com mais precisão (Tabela 6.6). Os resultados com base na forçante INMET apresentaram valores de RMSE = 0,70°C a 1,10°C, MBE = -0,10°C a -0,30°C e $d = 0,99$, enquanto os obtidos com a forçante ASOS derivaram RMSE = 0,85°C a 1,34°C, MBE = -0,47°C a -0,49°C e $d = 0,98$ a 0,99.

Tabela 6.6 Índices estatísticos para as simulações na LCZ 3

Data	Forçante	Variável	RMSE	RMSE _s	RMSE _u	MAE	MBE	<i>d</i>	<i>r</i>	<i>r</i> ²
11-06-2015	ASOS	<i>T</i>	0,85	0,51	0,68	0,71	-0,47	0,99	0,99	0,97
		<i>UR</i>	4,88	2,87	3,94	3,64	2,28	0,97	0,97	0,94
		<i>q</i>	0,91	0,85	0,32	0,85	-0,85	0,61	0,84	0,71
	INMET	<i>T</i>	0,70	0,39	0,59	0,59	-0,10	0,99	0,99	0,97
		<i>UR</i>	3,91	2,83	2,69	3,32	2,04	0,98	0,97	0,95
		<i>q</i>	0,58	0,50	0,29	0,48	-0,47	0,69	0,74	0,55
17-12-2015	ASOS	<i>T</i>	1,34	0,67	1,17	1,21	-0,49	0,98	0,97	0,95
		<i>UR</i>	6,22	4,61	4,17	5,16	3,36	0,97	0,98	0,95
		<i>q</i>	1,15	1,02	0,53	0,98	-0,96	0,41	0,33	0,11
	INMET	<i>T</i>	1,10	0,53	0,96	0,97	-0,30	0,99	0,98	0,97
		<i>UR</i>	5,15	4,49	2,52	4,39	3,87	0,98	0,99	0,98
		<i>q</i>	0,71	0,59	0,40	0,61	-0,58	0,67	0,75	0,56

* RMSE, RMSE_s, RMSE_u, MAE e MBE são expressos em °C para *T*, em g kg⁻¹ para *q* e em % para *UR*.

O modelo apresentou melhor desempenho nas simulações de junho, especialmente com a forçante INMET. No entanto, verificou-se desempenho inferior ao simular *UR* e *q*, com RMSE_s elevados e *d* muito próximo de zero.

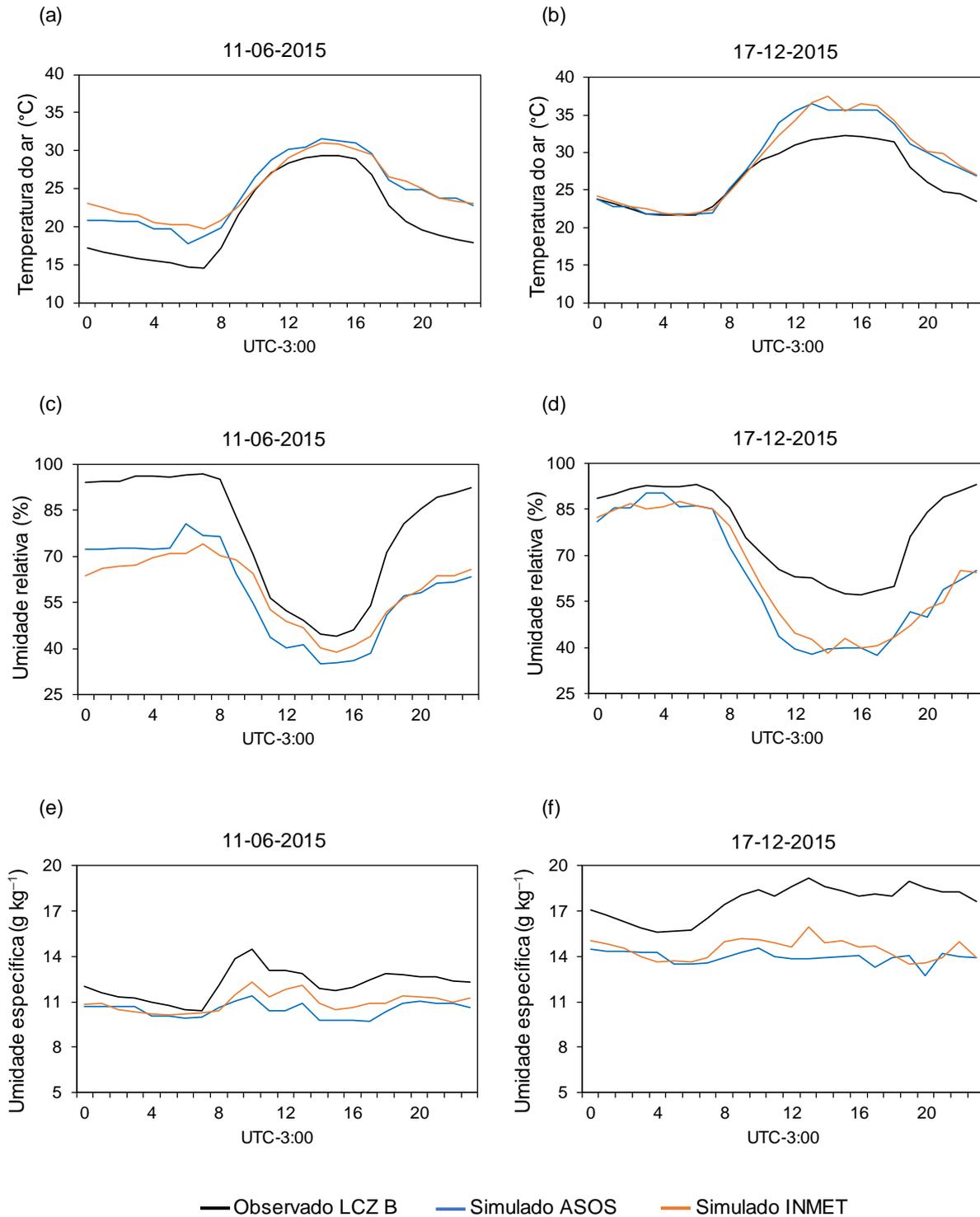
6.4.3 Validação dos resultados da calibração para a LCZ B

A Figura 6.4 apresenta os gráficos de comparação entre as variáveis observadas e preditas pelo modelo na LCZ B, cujas curvas evidenciam ajuste inferior ao verificado nas LCZs urbanas.

De maneira geral, o modelo superestimou os valores de temperatura do ar e subestimou os de umidade nos episódios analisados. No inverno, as maiores diferenças de *T* e *UR* ocorreram no período noturno com a forçante INMET ($\Delta T = 5,9^\circ\text{C}$ e $\Delta UR = -30,4\%$), enquanto as diferenças máximas de *q* ($\Delta q = -3 \text{ g kg}^{-1}$) ocorreram do período da tarde com a forçante ASOS.

No episódio de verão, as simulações de *T* com as duas condições de contorno lateral apresentaram correspondência significativa com os dados da LCZ entre 00:00 h e 10:00 h ($\Delta T = <1^\circ\text{C}$), mas atingiram diferenças de até $5,4^\circ\text{C}$ durante a tarde e à noite. Esse padrão também foi perceptível nas variáveis *UR* e *q*, cujas diferenças máximas foram $\Delta UR = -34,4\%$ (ASOS) e $\Delta q = -5,8 \text{ g kg}^{-1}$ (INMET), respectivamente.

Figura 6.4 Comparação entre as variáveis registradas na LCZ B e simuladas pelo ENVI-met



De acordo com os indicadores de desempenho, o modelo foi capaz de prever as variáveis T e q com mais precisão do que a UR (Tabela 6.7). Os melhores resultados de T ocorreram nas simulações com a forçante ASOS no verão (RMSE = 2,76°C, MBE = 2,05°C e $d = 0,92$), enquanto UR e q apresentaram erros menores com a forçante INMET.

Tabela 6.7 Índices estatísticos para as simulações na LCZ B

Data	Forçante	Variável	RMSE	RMSE _s	RMSE _u	MAE	MBE	<i>d</i>	<i>r</i>	<i>r</i> ²
11-06-2015	ASOS	<i>T</i>	3,62	3,51	0,86	3,37	3,37	0,88	0,98	0,96
		<i>UR</i>	20,18	19,85	3,65	19,14	-19,14	0,77	0,97	0,94
		<i>q</i>	1,87	1,83	0,38	1,69	-1,69	0,47	0,60	0,37
	INMET	<i>T</i>	4,16	4,03	1,03	3,61	3,61	0,83	0,96	0,92
		<i>UR</i>	21,05	20,74	3,59	18,49	-18,49	0,72	0,94	0,89
		<i>q</i>	1,33	1,30	0,27	1,22	-1,22	0,62	0,89	0,79
17-12-2015	ASOS	<i>T</i>	2,76	2,45	1,29	2,15	2,05	0,92	0,97	0,94
		<i>UR</i>	18,78	16,63	8,72	16,27	-16,27	0,76	0,89	0,80
		<i>q</i>	3,83	3,81	0,40	3,64	-3,64	0,32	-0,10	0,01
	INMET	<i>T</i>	2,96	2,56	1,49	2,27	2,21	0,91	0,96	0,93
		<i>UR</i>	17,68	15,18	9,07	15,03	-15,03	0,77	0,87	0,76
		<i>q</i>	3,27	3,22	0,57	3,12	-3,12	0,39	0,43	0,19

* RMSE, RMSE_s, RMSE_u, MAE e MBE são expressos em °C para *T*, em g kg⁻¹ para *q* e em % para *UR*.

Com base nos resultados da LCZ B, verificou-se que o ENVI-met demonstrou desempenho inferior ao modelar a área representativa do rural, o que pode estar relacionado à configuração inicial do domínio e/ou às forçantes ASOS e INMET. Nesse sentido, o refinamento dos parâmetros de inicialização relacionados à vegetação arbórea e à umidade do solo, por exemplo, associado a condições de contorno típicas de ambiente rural vegetado, podem melhorar os resultados da calibração.

6.4.4 Avaliação geral da calibração do modelo

As simulações das LCZs urbanas apresentaram resultados mais precisos com a forçante INMET, sendo que a melhor relação entre dados medidos e modelados foi verificada com a variável temperatura do ar.

A análise dos ciclos diurnos e noturnos da LCZ 2 revelou a tendência do modelo em subestimar a temperatura do ar na simulação de inverno, enquanto no verão os valores de *T* foram superestimados no período diurno e subestimados no período noturno e pela manhã.

Para a LCZ 3, o ENVI-met superestimou *T* em parte do período noturno e da manhã e subestimou no restante do dia de inverno. No verão, o padrão foi semelhante ao da LCZ 2, no qual o modelo superestimou os valores de *T* durante o dia e subestimou à noite e no início da manhã.

Essa variação nas tendências do modelo também foi verificada em outros estudos que avaliaram a performance do ENVI-met. Enquanto alguns estudos indicaram que o modelo

tende a subestimar T no período diurno e superestimar no noturno (EMMANUEL; FERNANDO, 2007; JÄNICKE et al., 2015; GUSSON; DUARTE, 2016), outros relataram a ocorrência do padrão contrário (CHOW et al., 2011; MIDDEL et al., 2014).

Além disso, houve situações nas quais o modelo geralmente superestimou T (LEE; MAYER; CHEN, 2016; WANG; BERARDI; AKBARI, 2016) ou subestimou essa variável durante o período de simulação (ACERO; ARRIZABALAGA, 2018).

Ao analisar os indicadores de desempenho das LCZs urbanas com a forçante INMET, houve a tendência geral do modelo subestimar a temperatura do ar e umidade específica, enquanto os valores de umidade relativa foram geralmente superestimados.

Na LCZ 2, o ENVI-met apresentou melhor desempenho para T em dezembro (RMSE = 1,42°C) e pior em junho (RMSE = 1,49°C), com erros sistemáticos maiores do que os não sistemáticos. Apesar de o modelo subestimar T em ambas as estações, essa tendência foi menor no episódio de verão (MBE = -0,90°C), para o qual o índice de concordância atingiu 0,97. Para a variável umidade do ar, verificou-se melhor performance nas simulações de UR , principalmente em dezembro (RMSE = 4,33%, MBE = 0,73%, $d = 0,98$), enquanto os menores erros para q ocorreram no episódio de inverno (RMSE = 0,96 g kg⁻¹, MBE = -0,94 g kg⁻¹, $d = 0,47$).

As simulações na LCZ 3 foram mais precisas do que as da LCZ 2 em ambas as estações, e o melhor desempenho ocorreu em junho. Os valores de RMSE para T variaram entre 0,70°C no inverno e 1,10°C no verão, com erros sistemáticos menores que os não sistemáticos (RMSE_s = 0,39°C e RMSE_s = 0,53°C, respectivamente). O modelo também foi capaz de simular UR com pouco mais de precisão (RMSE = 3,91%, MBE = 2,04% e $d = 0,98$) do que q (RMSE = 0,58 g kg⁻¹, MBE = -0,47 g kg⁻¹ e $d = 0,69$), mas as duas variáveis apresentaram RMSE_s > RMSE_u.

Embora os erros sistemáticos indiquem que ajustes nos parâmetros de inicialização ou correções na representação dos domínios poderiam melhorar a concordância entre o modelo e as observações (ROTH; LIM, 2017; TSOKA; TSIKALOUDEAKI; THEODOSIOU, 2018), os valores dos demais indicadores estão dentro da faixa de estatísticas de desempenho relatadas anteriormente para o ENVI-met (Tabela 6.8).

Tabela 6.8 Resultados da avaliação do modelo ENVI-met em estudos anteriores

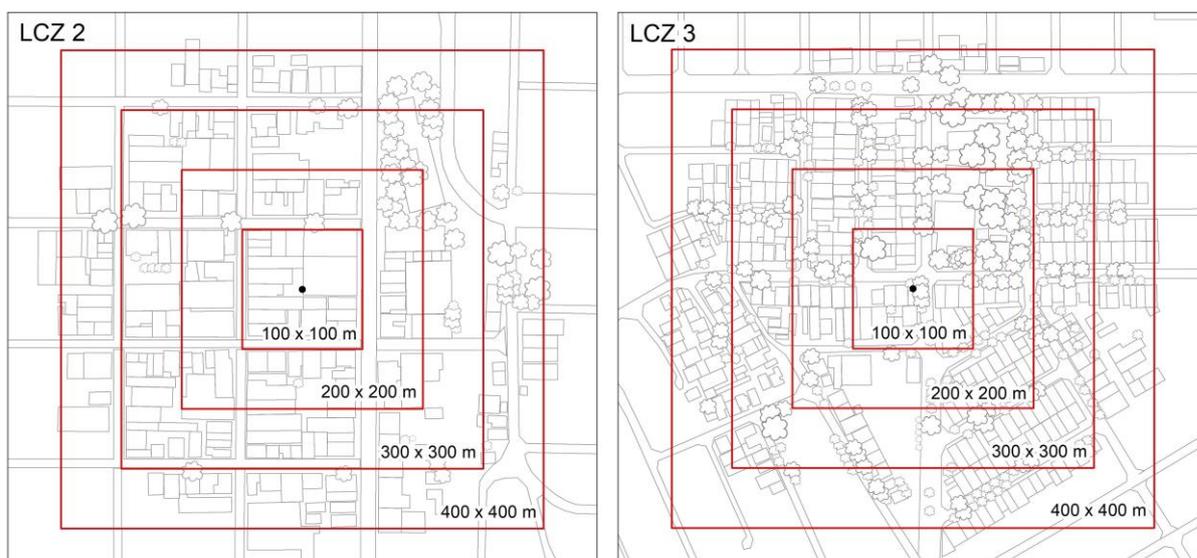
Referência	Localização	Período de validação	Modelo	Variável	RMSE	RMSE _s	RMSE _u	MAE	MBE	<i>d</i>	<i>r</i> ²
Yang et al. (2013)	Guangzhou, China	29 ago. a 2 set. 2010	ENVI-met 4	$T_{1,5m}$	1,01	0,62	0,79	–	–	0,97	0,94
				$q_{1,5m}$	0,84	0,55	0,64	–	–	0,78	0,52
Middel et al. (2014)	Phoenix, AZ, USA	23 jun. 2011	ENVI-met 3.1	T_{2m}	1,41–2,00	0,30–1,62	1,44–3,42	1,18–1,74	-0,02–1,20	0,97–0,99	–
Gusson e Duarte (2016)	São Paulo, Brasil	27 abr. 2013	ENVI-met 4	$T_{1,5m}$	1,60–1,90	–	–	1,40–1,80	–	0,85–0,92	–
Lee et al. (2016)	Freiburg, Alemanha	4 ago. 2003; 27 jul. 2009	ENVI-met 4	$T_{1,5m}$	0,66	0,19	0,62	–	–	0,95	0,85
				T	1,64	–	–	1,28	-0,01	0,99	–
Battista et al. (2016)	Roma, Itália	16 jul. 2014	ENVI-met 4	UR	8,77	–	–	7,78	-1,57	0,90	–
				T_{2m}	0,52–1,41	0,20–1,37	0,22–0,83	0,40–1,21	-0,51–1,20	0,87–0,98	0,77–0,98
Roth e Lim (2017)	Telok Kurau, Singapura	1, 8, 15 out. 2012; 29 jan. 2013; 2 fev. 2013; 21, 24, 28 jul. 2013	ENVI-met 3.1	T_{2m}	0,52–1,41	0,20–1,37	0,22–0,83	0,40–1,21	-0,51–1,20	0,87–0,98	0,77–0,98
Acero e Arrizabalaga (2018)	Bilbao, Espanha	6–8 ago. 2010	ENVI-met 4	T_{1m}	1,00–2,07	0,81–2,05	0,28–0,66	0,83–1,82	-0,17–(-1,54)	0,83–0,94	–
Tsoka et al. (2018)	Thessaloniki, Grécia	22 jul. 2016	ENVI-met 4	T	1,02	0,86	0,61	0,82	-0,83	0,94	–
				UR	10,24	9,60	3,40	7,70	-9,10	0,97	–
Crank et al. (2020)	Tempe, AZ, USA	24 out. 2014; 18 fev. 2015; 23 mar. 2015; 20 jun. 2015; 21 jun. 2017	ENVI-met 4.3	$T_{1,2m}$	1,45–2,68	0,92–2,36	1,12–1,27	1,22–2,10	-1,77–0,92	0,89–0,96	0,84–0,90

* RMSE, RMSE_s, RMSE_u, MAE e MBE são expressos em °C para T , em g kg⁻¹ para q e em % para UR .

7 SIMULAÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES ORIGINAIS

Após obter boa concordância entre os dados observados e previstos durante a calibração do ENVI-met, testes de sensibilidade foram realizados com áreas de domínio maiores (Apêndice D) para verificar o quanto o modelo é sensível ao tamanho do domínio das LCZs urbanas (Fig. 7.1).

Figura 7.1 Áreas de domínio com diferentes tamanhos



Se os resultados das simulações com áreas de domínio maiores são semelhantes aos das áreas menores utilizadas na calibração, significa que a área de domínio foi bem representada e é realmente representativa da área de interesse. No caso das LCZs, as simulações podem ser feitas com um domínio menor do que a área de estudo inicial (400 m de diâmetro) para reduzir o tempo de simulação e a capacidade computacional requerida.

Para verificar a influência do tamanho da área modelada nas variáveis T , UR e q analisadas, todos os outros parâmetros de entrada foram mantidos constantes. Entretanto, as condições de contorno lateral foram definidas apenas pela forçante INMET, já que essa apresentou as melhores estatísticas de validação.

Além disso, houve alteração na resolução das grades dos domínios. Uma resolução horizontal de 2 m foi testada, mas resultou em instabilidades e mais de 10 dias de processamento, enquanto as grades de 3 m (LCZ 3) e 4 m (LCZ 2) levaram em média 6 dias, sem diferenças significativas nos resultados em relação à resolução mais fina.

Portanto, as dimensões das células da grade (Tabela 7.1) representam o ajuste entre o tamanho do domínio das LCZs, a resolução necessária para representar os elementos e o tempo de computação.

Tabela 7.1 Parâmetros utilizados para configurar o domínio de 300 m de diâmetro nas LCZs em Presidente Prudente

LCZ	Dimensão da grade x, y e z (células)	Dimensão das células da grade (m)	Dimensão da área do domínio (m) ^a	Rotação (°)	Nesting grids ^{b, c}
LCZ 2	75 x 75 x 45	4 x 4 x 3	300 x 300 x 135	25,79	4
LCZ 3	100 x 100 x 25	3 x 3 x 3	300 x 300 x 75	26,52	4

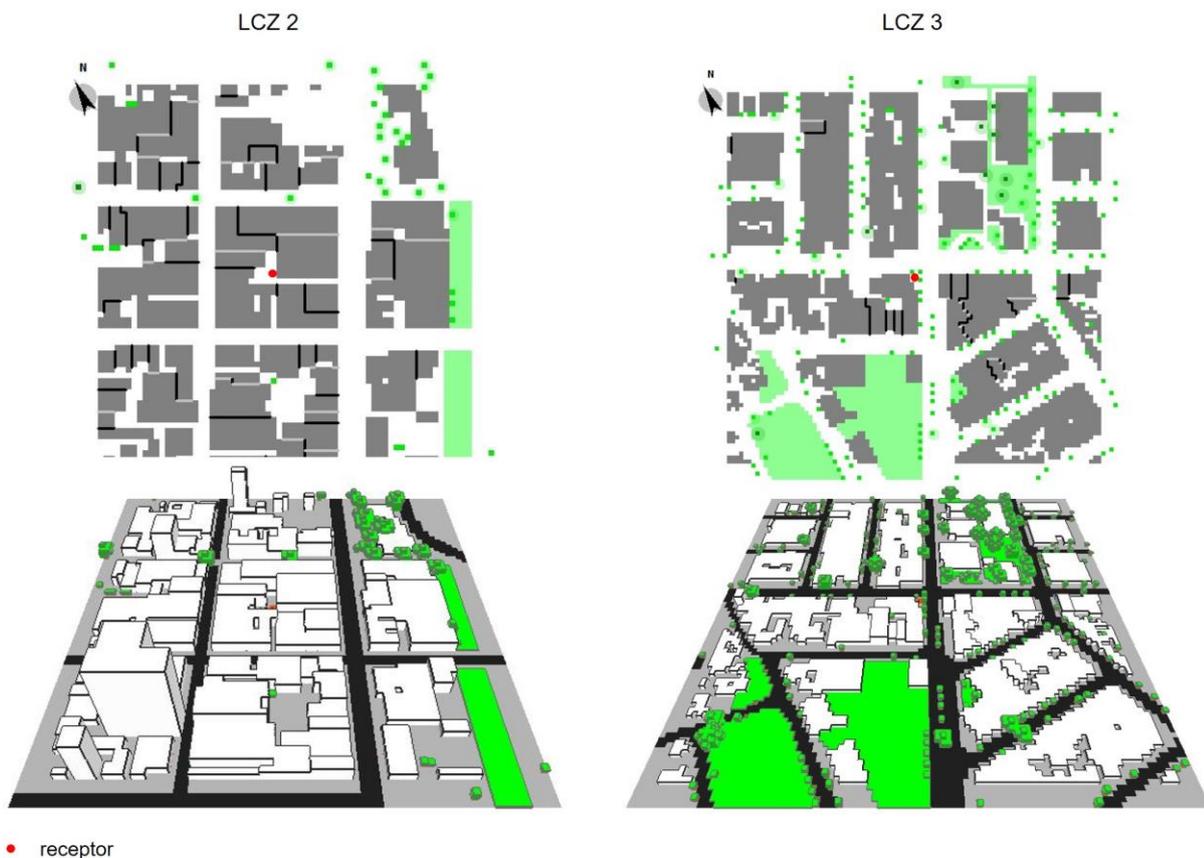
^a Grade vertical equidistante (célula inferior dividida em 5 camadas)

^b Espaço extra entre os edifícios e a borda do modelo adicionado pelos *nesting grids*: LCZ 2 = 56 m e LCZ 3 = 42 m.

^c Distância total entre os edifícios e a borda do modelo: LCZ = 72 m e LCZ 3 = 54 m.

Os resultados demonstraram que o aumento da área de domínio provocou pequenas alterações nas variáveis de análise, e que, de maneira geral, houve melhoria nas simulações com domínios de 300 m de diâmetro (Fig. 7.2) em relação aos domínios relativamente menores da calibração.

Figura 7.2 LCZs 2 e 3 com áreas de domínio de 300 m de diâmetro



A diferença média de RMSE e MBE para a temperatura do ar entre os domínios de tamanhos diferentes foi de 0,21°C e -0,35°C para a LCZ 2 (RMSE = 1,24°C, MBE = -0,76°C e $d = 0,97$) e 0,12°C e -0,04°C para a LCZ 3 (RMSE = 0,78°C, MBE = -0,24°C e $d = 0,99$), respectivamente (Tabela 7.2).

Tabela 7.2 Índices estatísticos para as simulações com área de domínio de 300 m de diâmetro

LCZ	Data	Variável	RMSE	RMSE _s	RMSE _u	MAE	MBE	d	r	r^2
LCZ 2	11-06-2015	T	1,25	1,06	0,67	1,13	-1,03	0,97	0,98	0,96
		UR	3,41	2,68	2,12	2,99	2,48	0,98	0,98	0,97
		q	1,04	1,02	0,20	1,02	-1,02	0,44	0,87	0,76
	17-12-2015	T	1,23	0,98	0,74	1,00	-0,49	0,98	0,99	0,97
		UR	4,46	3,50	2,77	3,79	-1,05	0,98	0,99	0,97
		q	2,15	2,12	0,37	2,11	-2,11	0,32	0,66	0,43
LCZ 3	11-06-2015	T	0,67	0,33	0,58	0,55	-0,02	0,99	0,99	0,98
		UR	3,09	1,97	2,37	2,59	0,57	0,98	0,98	0,96
		q	0,76	0,73	0,23	0,71	-0,71	0,61	0,82	0,67
	17-12-2015	T	0,89	0,50	0,73	0,75	-0,46	0,99	0,99	0,98
		UR	3,52	2,73	2,23	3,02	2,49	0,99	0,99	0,98
		q	1,03	0,98	0,32	0,97	-0,97	0,52	0,77	0,60

* RMSE, RMSE_s, RMSE_u, MAE e MBE são expressos em °C para T , em g kg⁻¹ para q e em % para UR .

Isso indicou que os domínios de 300 m de diâmetro seriam suficientes para representar a área total das LCZs, e possibilitou sua escolha como cenário base para realizar os testes com medidas de mitigação da temperatura urbana.

7.1 Cenários base das zonas climáticas locais

Os resultados das simulações dos cenários base se referem à altura de 2 m da superfície, apresentados em mapas com a distribuição da temperatura do ar e tabelas resumindo os valores mínimos, máximos e médios sobre todo o domínio, calculados sem incluir dados de objetos (edifícios na cor preta).

Na discussão a seguir, o foco da análise será na variação das temperaturas do ar e na distribuição espacial às 15:00 h e às 21:00 h, selecionados como representativos dos horários de maior aquecimento diurno e de formação das ilhas de calor, respectivamente.

Os mapas dos cenários base apresentam paletas de cores individuais para permitir a visualização das variações espaciais de temperatura do ar de menor magnitude, sendo que

os episódios de análise com legenda padronizada podem ser consultados no Apêndice E.

7.1.1 Cenário base da temperatura do ar na LCZ 2

A temperatura média para área do domínio no inverno foi de 30,9°C às 15:00 h a 24,4°C às 21:00 h, com variação espacial intraurbana de 2,4°C no período da tarde e 1,1°C à noite. No episódio de verão, houve o aumento de 4,7°C na temperatura média às 15:00 h, e 5,9°C às 21:00 h em relação ao inverno, com variação espacial de até 3,4°C no horário da tarde (Tabela 7.3).

Tabela 7.3 Valores de temperatura do ar a 2 m da superfície no cenário base da LCZ 2

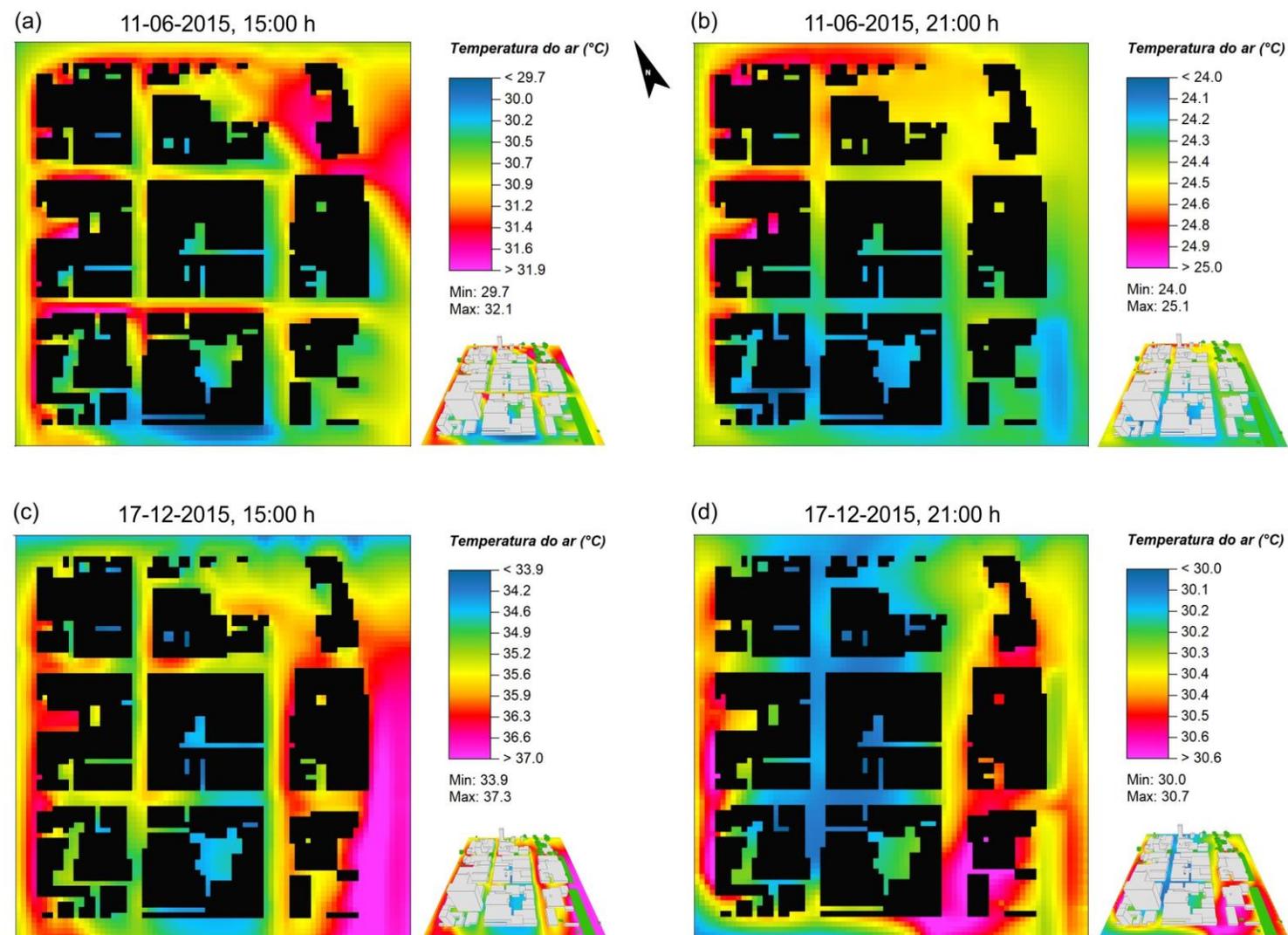
Data	Hora	T mínima (°C)	T máxima (°C)	T média (°C)
11-06-2015	15:00	29,7	32,1	30,9
	21:00	24,0	25,1	24,4
17-12-2015	15:00	33,9	37,3	35,6
	21:00	30,0	30,7	30,3

A variação espacial relativamente pequena da temperatura do ar no período noturno (0,7–1,1°C), em ambas as estações, reflete um padrão esperado, considerando a ausência de radiação solar e a relativa homogeneidade das construções e da superfície dentro da área de abrangência da LCZ.

A distribuição das temperaturas do ar na área do domínio apresentou relação com a posição do sol (Anexo D) e a direção do vento. No inverno, as temperaturas elevadas ocorreram no lado oeste e norte do bairro e as temperaturas amenas na área central, coincidindo com o efeito sombra dos edifícios, e na borda sul com presença de cobertura vegetal rasteira (Fig. 7.3(a) e (b)).

No verão, o padrão de distribuição das temperaturas elevadas foi diferente e apresentou relação com a direção predominante do vento do quadrante leste (Fig. 7.3(c) e (d)) e as condições de contorno do modelo, enquanto no interior da LCZ 2, as temperaturas menores nas laterais sul e sudeste dos edifícios são relacionadas ao sombreamento.

Figura 7.3 Distribuição da temperatura do ar a 2 m da superfície na LCZ 2



* Direção predominante do vento. 11-06-2015: N–NW. 17-12-2015: E–NE.

7.1.2 Cenário base da temperatura do ar na LCZ 3

No episódio de inverno, a temperatura média na área do domínio foi de 31°C no período da tarde e 24,5°C à noite, com variação espacial noturna relativamente pequena (0,6°C). No verão, verificou-se temperatura máxima diurna de 37,4°C e variação intraurbana de 3,4°C (15:00 h) a 0,6°C (21:00 h) (Tabela 7.4).

Tabela 7.4 Valores de temperatura do ar a 2 m da superfície no cenário base da LCZ 3

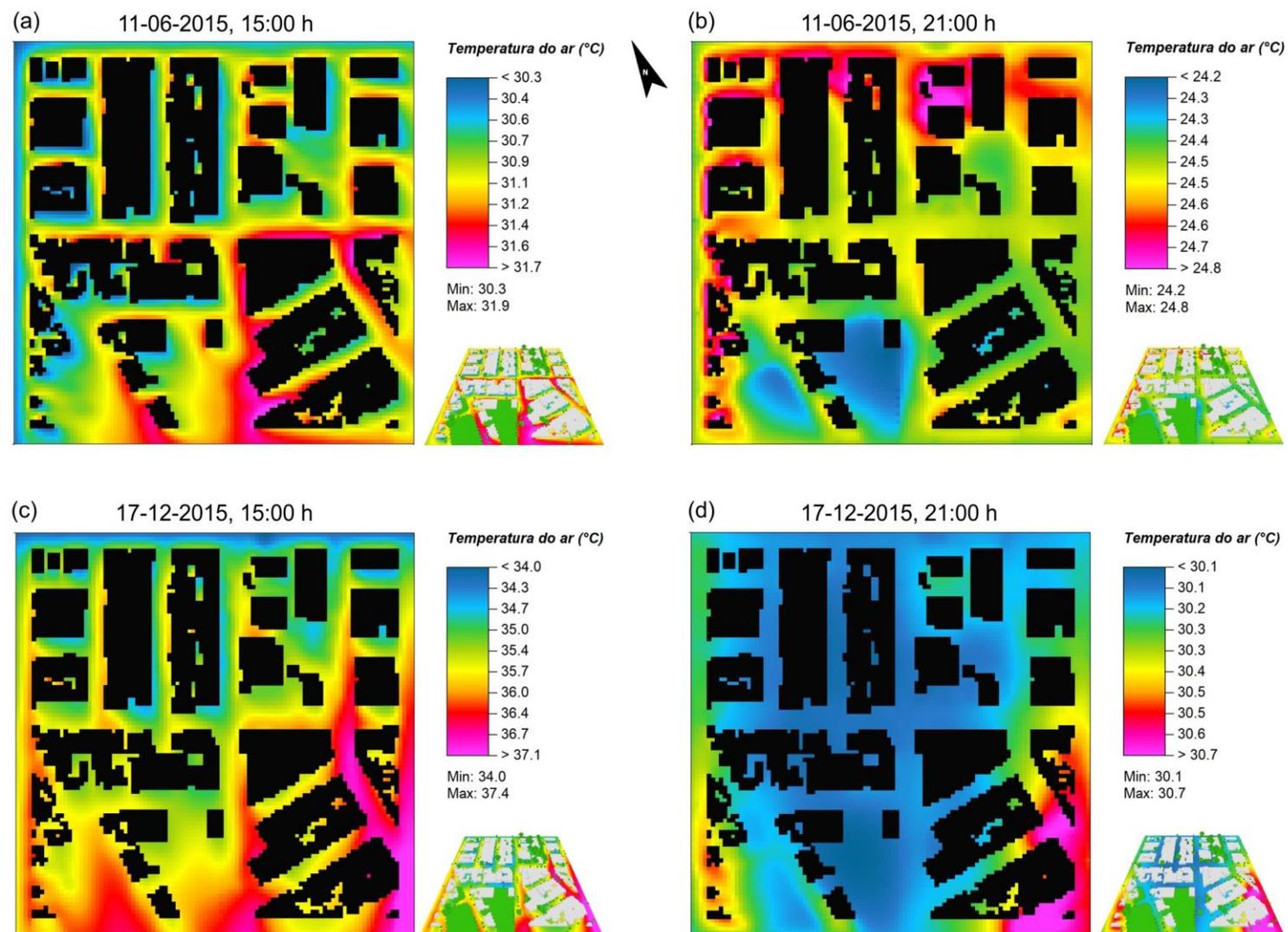
Data	Hora	T mínima (°C)	T máxima (°C)	T média (°C)
11-06-2015	15:00	30,3	31,9	31,0
	21:00	24,2	24,8	24,5
17-12-2015	15:00	34,0	37,4	35,7
	21:00	30,1	30,7	30,2

A distribuição espacial das temperaturas também foi coerente com a posição solar e a direção predominante do vento, com destaque para as áreas com cobertura vegetal. Na tarde de inverno (Fig. 7.4(a)), os entornos dos edifícios voltados para o norte apresentaram ar mais aquecido, enquanto nos entornos a sul ou sudeste a temperatura foi menor. A combinação de cobertura vegetal rasteira e arbórea resultou em temperaturas tão amenas quanto as das áreas sombreadas por edifícios, seguida dos gramados, cujo ar sobrejacente foi menos aquecido do que o das superfícies pavimentadas também expostas à radiação.

No período noturno (Fig. 7.4(b)), a variação da temperatura do ar na área do domínio foi menor do que a observada durante o dia. As laterais do modelo com ar mais aquecido coincidiram com a direção predominante do vento, enquanto as áreas livres de construções resfriaram o ar mais rapidamente.

Para o episódio de verão, as temperaturas elevadas na borda leste dos domínios podem ser associadas às condições de contorno do modelo (Fig. 7.4(c) e (d)). Durante a tarde, as áreas sombreadas por edifícios ou vegetação arbórea contribuíram para temperaturas do ar mais amenas. Às 21:00 h, a distribuição foi mais homogênea, sobretudo no interior da LCZ 3, onde superfícies construídas e vegetadas apresentaram temperaturas do ar próximas a 30°C.

Figura 7.4 Distribuição da temperatura do ar a 2 m da superfície na LCZ 3



* Direção predominante do vento. 11-06-2015: N–NW. 17-12-2015: E–NE.

8 ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO DO CALOR URBANO

Enquanto em cidades de clima temperado os efeitos da ilha de calor podem ser benéficos, reduzindo a necessidade de aquecimento dos ambientes internos, nas áreas urbanas em regiões tropicais podem ter efeitos negativos no conforto térmico, na saúde da população e no consumo de energia para resfriar os ambientes.

Com o intuito de promover uma adaptação apropriada ao clima e diminuir a temperatura local, especialmente em condições de ondas de calor cada vez mais frequentes e duradouras, diversos estudos avaliam os efeitos climáticos de estratégias de redução do calor urbano por meio de simulação numérica.

As estratégias de mitigação do calor podem incluir materiais ou pinturas reflexivas (KRAYENHOFF; VOOGT, 2010; MIDDEL; CHHETRI; QUAY, 2015; ROTH; LIM, 2017), estruturas verdes (LEE; MAYER; CHEN, 2016; WANG; BERARDI; AKBARI, 2016) e irrigação (BROADBENT et al., 2018), que correspondem às medidas mais comuns para bairros existentes, ou seja, sem modificações estruturais.

De maneira geral, essas estratégias proporcionam o resfriamento ao refletir mais radiação solar, diminuindo o calor armazenado na superfície e transferido para o ar sobrejacente, e ao redirecionar a energia absorvida do calor sensível para calor o latente (OKE et al., 2017; KRAYENHOFF et al., 2021).

Pavimentos frios, por exemplo, constituídos de materiais ou revestimentos que possuem valores de albedo (α) relativamente altos, são capazes de diminuir a temperatura da superfície, principalmente no período da tarde. No entanto, o estudo realizado por Middel et al. (2020) demonstrou que pavimentos reflexivos aumentaram a temperatura radiante média (*Mean Radiant Temperature* – MRT), o que indica maior exposição térmica dos pedestres.

Outra desvantagem pode ser o incômodo visual causado pelo brilho das superfícies altamente reflexivas, mas que pode ser evitada ao aplicar essa estratégia no nível das coberturas. De acordo com Oke et al. (2017), os telhados reflexivos podem reduzir a temperatura da cobertura, o que diminui a transferência de calor para o edifício e o aquecimento do ar acima do telhado.

Além do aumento do albedo, os revestimentos também podem ser projetados para refletir radiação fora da faixa do visível, como o infravermelho próximo, o que diminui o brilho, mas permite telhados frios não brancos. Essa característica é vantajosa ao longo do tempo, pois o depósito de poluentes tende a diminuir a eficácia das superfícies brancas (OKE et al., 2017).

No que se refere às estruturas verdes, os telhados verdes possuem o benefício de resfriamento devido ao sombreamento ou isolamento que fornecem para a superfície

subjacente. Entretanto, seu desempenho depende do tipo de cobertura vegetal e do clima, já que em condições de alta temperatura, por exemplo, e sem irrigação, um telhado verde pode ser menos eficiente do que um telhado frio (OKE et al., 2017).

Em relação à vegetação arbórea, esta intercepta a radiação solar, contribui para a diminuição da temperatura da superfície através do sombreamento, e da temperatura do ar ao aumentar a troca de calor latente com o processo de evapotranspiração (MIDDEL; CHHETRI; QUAY, 2015; WANG; BERARDI; AKBARI, 2016).

Os corpos d'água naturais, e em especial a irrigação, mantêm a vegetação saudável e têm o potencial de resfriar as áreas urbanas no período diurno devido à água permanecer mais fria do que os materiais urbanos e fornecer uma fonte de evaporação. No entanto, é importante ressaltar que esses elementos aumentam as temperaturas noturnas devido à alta capacidade térmica, e o aumento significativo da umidade por evaporação pode ter efeito negativo no conforto térmico (BROADBENT et al. 2018; KRAYENHOFF et al., 2021).

Com base nesses exemplos, nota-se que não existe uma solução simples para mitigar o calor urbano e nem todas as intervenções são igualmente eficazes (MIDDEL; CHHETRI, 2014; OKE et al., 2017). Por isso, é fundamental considerar os benefícios e desvantagens das medidas de mitigação e em quais contextos são mais apropriadas para a viabilidade em longo prazo.

Nessa pesquisa, a modelagem de cenários futuros tem enfoque na avaliação do impacto de resfriamento de telhados e pavimentos frios como estratégias de mitigação. A utilização de superfícies reflexivas constitui uma das medidas mais comumente propostas e a análise aqui apresentada contribui para uma avaliação sistemática do seu potencial de resfriamento.

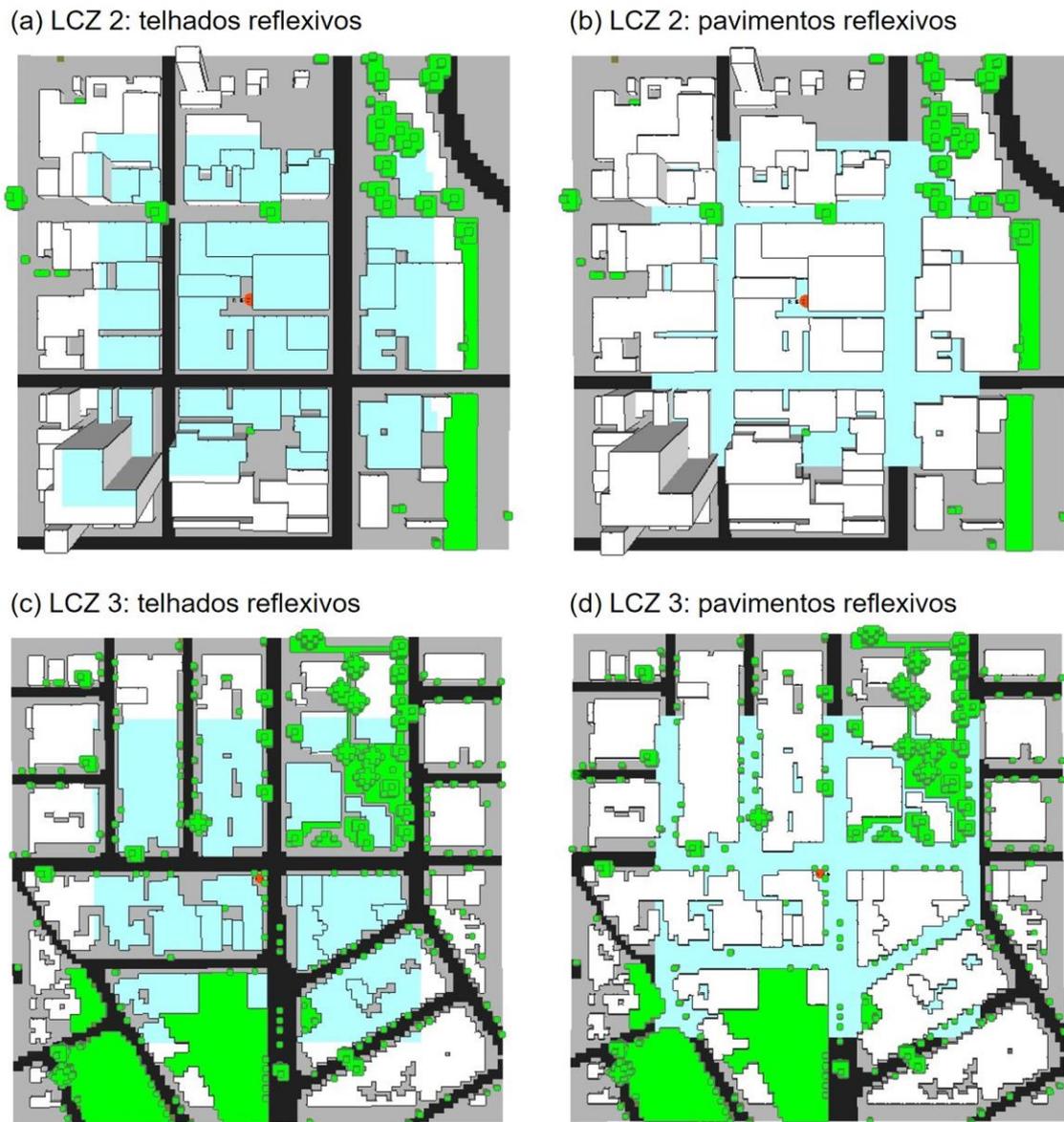
Além de investigar os efeitos absolutos, também é aplicada a métrica de eficácia de resfriamento do albedo (*Albedo Cooling Effectiveness – ACE*), que permite avaliar os impactos de resfriamento com base na fração da superfície construída e na alteração do albedo, e em quais paisagens urbanas e períodos de tempo as medidas são mais eficazes (BROADBENT; KRAYENHOFF; GEORGESCU, 2020; KRAYENHOFF et al., 2021).

8.1 Projeções de medidas mitigadoras

Os cenários das estratégias de mitigação nas LCZs têm como referência os domínios de 300 m de diâmetro (capítulo 7), dos quais uma área correspondente à 40.000 m² foi delimitada para aplicar telhados e pavimentos reflexivos. Esse procedimento foi adotado para criar um *buffer* entre a área principal e o limite horizontal do modelo com as características originais da superfície das LCZs, e diminuir a interferência dos efeitos de borda nos resultados.

Dessa maneira, as áreas em destaque na Fig. 8.1 indicam a extensão espacial das estratégias de mitigação, sendo que os resfriamentos relatados se referem à tais porções do domínio onde ocorreram as alterações no albedo.

Figura 8.1 Áreas dos domínios delimitadas para aplicação de telhados e pavimentos reflexivos



Para comparar os efeitos das medidas mitigadoras, foram considerados os seguintes cenários para cada LCZ (Tabela 8.1):

- (1) cenário de telhado reflexivo: albedo dos telhados de 0,70 (WANG; BERARDI; AKBARI, 2016; KRELLING et al., 2018, 2019; SILVA, M.P., 2019), o que é, em média, 0,40 maior do que no cenário base;
- (2) cenário de pavimento reflexivo: superfícies cobertas por asfalto e concreto são substituídas por pavimento de concreto com albedo elevado (WANG; BERARDI;

AKBARI, 2016). O albedo do pavimento frio é 0,40, aproximadamente 0,20 maior do que no cenário base, além de a capacidade térmica do pavimento de concreto ser inferior à da superfície asfaltada (concreto: 2,08 J/m³ K e asfalto: 2,25 J/m³ K).

Tabela 8.1 Configuração das propriedades dos materiais para os diferentes cenários

	Materiais	Albedo cenário base	Albedo cenário telhado reflexivo	Albedo cenário pavimento reflexivo
Telhado	Laje concreto	0,23		0,23
	Fibrocimento	0,30	0,70	0,30
	Cerâmica	0,35		0,35
	Metálico	0,45		0,45
Pavimento	Asfalto	0,16	0,16	0,40
	Concreto	0,23	0,23	

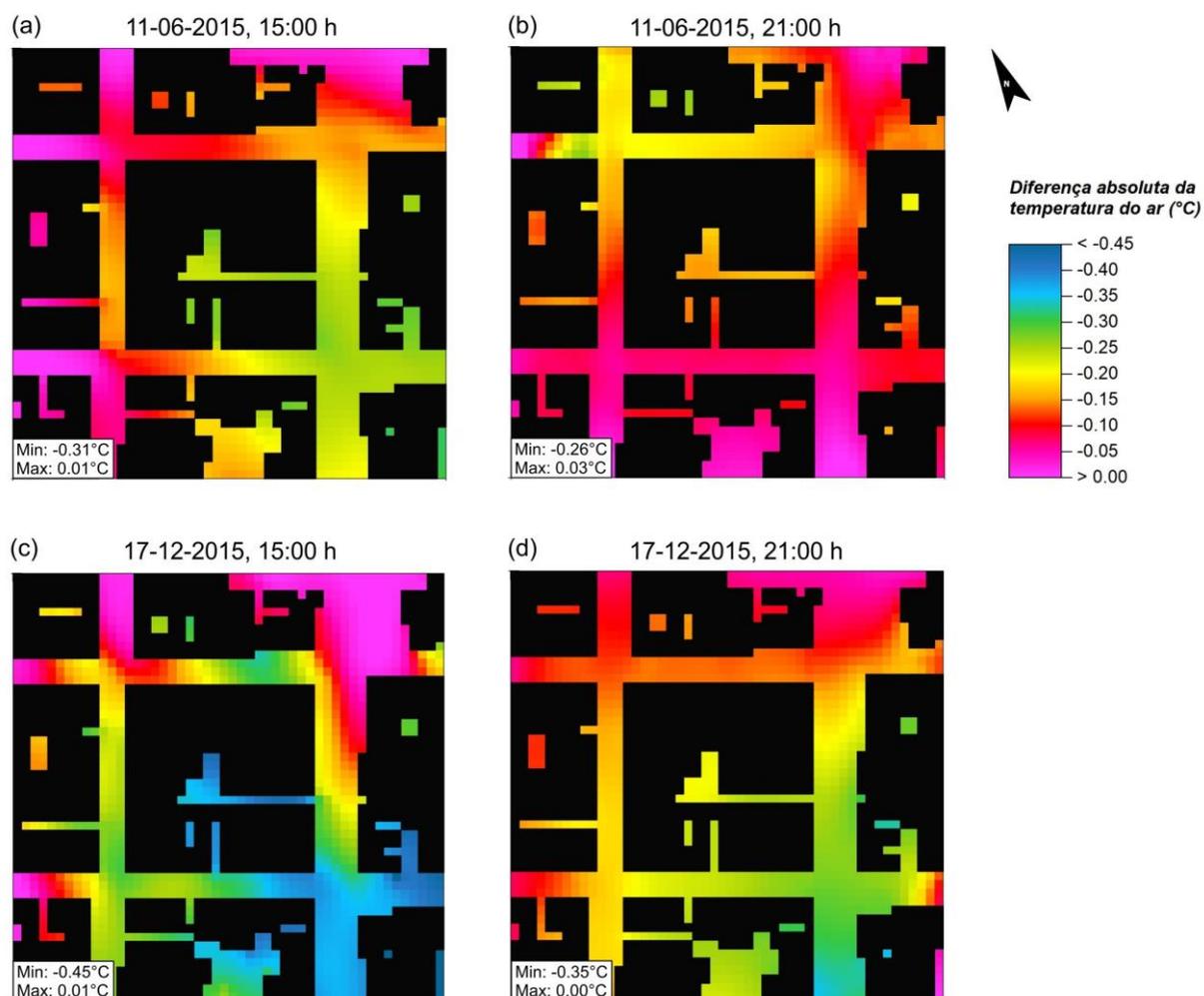
Com exceção do albedo elevado nos telhados ou pavimentos na área de interesse do domínio, todas as outras características permaneceram inalteradas em relação aos cenários base. Isso permitiu avaliar o impacto das estratégias de mitigação de forma isolada, sem interferência de outras variáveis nas simulações.

8.2 Impactos de resfriamento absoluto das medidas mitigadoras

8.2.1 Efeitos dos telhados reflexivos na LCZ 2

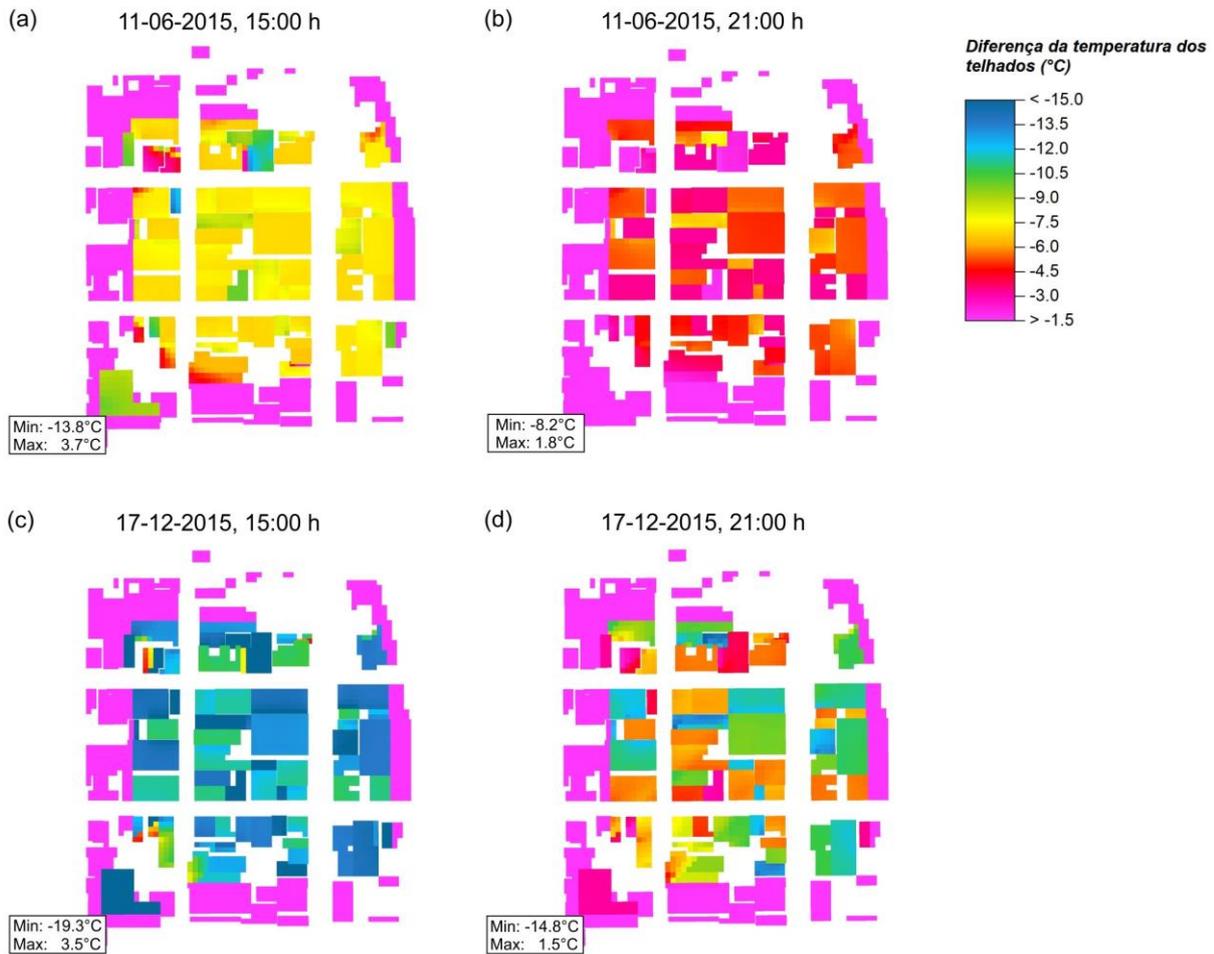
O impacto dos telhados reflexivos na temperatura do ar na LCZ 2 foi relativamente pequeno, mas significativo em proporcionar resfriamento diurno e noturno (Fig. 8.2). As diferenças diurnas máximas em relação ao cenário base variaram entre -0,31°C e -0,45°C nos episódios de inverno e verão, respectivamente, com diminuição de até -0,26°C na temperatura máxima noturna no inverno e -0,35°C no verão.

Figura 8.2 Diferença de temperatura do ar entre o cenário base e o cenário de telhados reflexivos na LCZ 2



Os efeitos na temperatura dos telhados foram expressivos e alcançaram resfriamentos diurnos máximos de aproximadamente -14°C no episódio inverno e -19°C no verão (Fig. 8.3), associados às lajes de concreto. Os resfriamentos noturnos também foram elevados nas duas estações, com diferenças predominantes de $<-4,5^{\circ}\text{C}$ e $<-6,0^{\circ}\text{C}$ nas temperaturas do inverno e do verão, respectivamente.

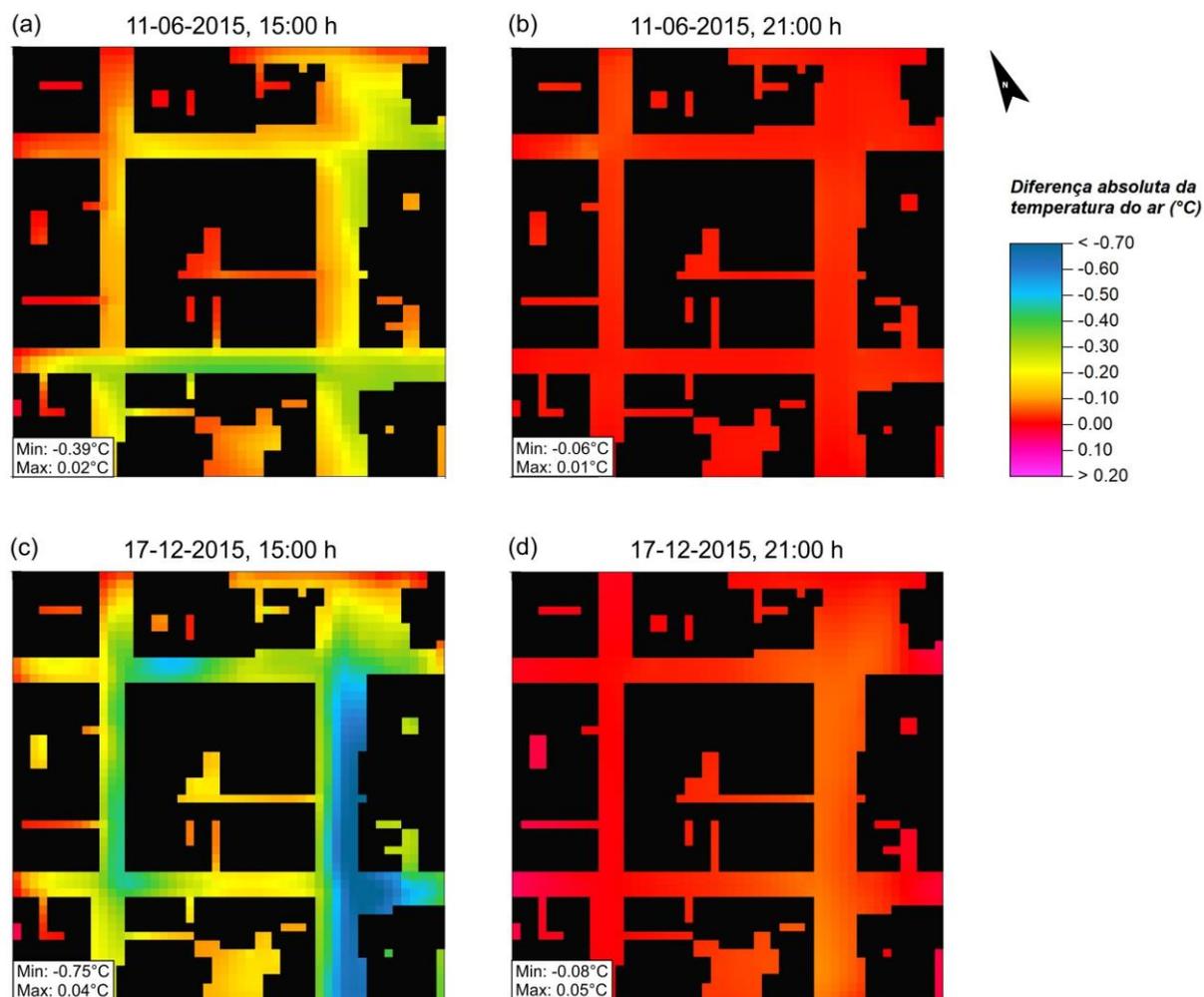
Figura 8.3 Diferença de temperatura dos telhados entre o cenário base e o cenário de telhados reflexivos na LCZ 2



8.2.2 Efeitos dos pavimentos reflexivos na LCZ 2

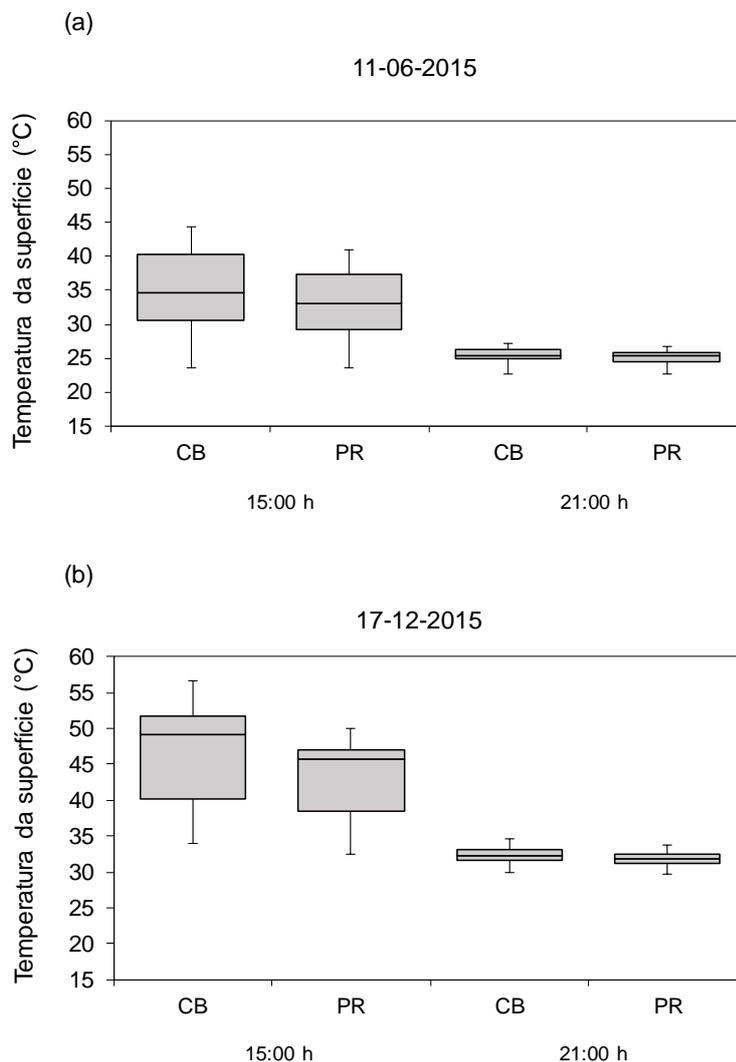
Os pavimentos reflexivos proporcionaram resfriamento diurno máximo da temperatura do ar de até $-0,39^{\circ}\text{C}$ no inverno e $-0,75^{\circ}\text{C}$ no verão, com diferença média de $-0,30^{\circ}\text{C}$ para a área do domínio na qual a medida foi implantada. No entanto, o impacto do resfriamento foi inferior no período noturno, com diferença máxima de aproximadamente $-0,10^{\circ}\text{C}$ no episódio de verão (Fig. 8.4).

Figura 8.4 Diferença de temperatura do ar entre o cenário base e o cenário de pavimentos reflexivos na LCZ 2



A diminuição na temperatura da superfície foi mais expressiva com o aumento do albedo nos pavimentos, sobretudo no período diurno. As diferenças máximas em relação aos cenários base foram de $-4,8^{\circ}\text{C}$ em junho e $-7,3^{\circ}\text{C}$ em dezembro, enquanto os resfriamentos noturnos atingiram $-0,65^{\circ}\text{C}$ e $-1,14^{\circ}\text{C}$, respectivamente (Fig. 8.5).

Figura 8.5 Variação da temperatura da superfície entre o cenário base (CB) e o cenário com pavimentos reflexivos (PR) na LCZ 2

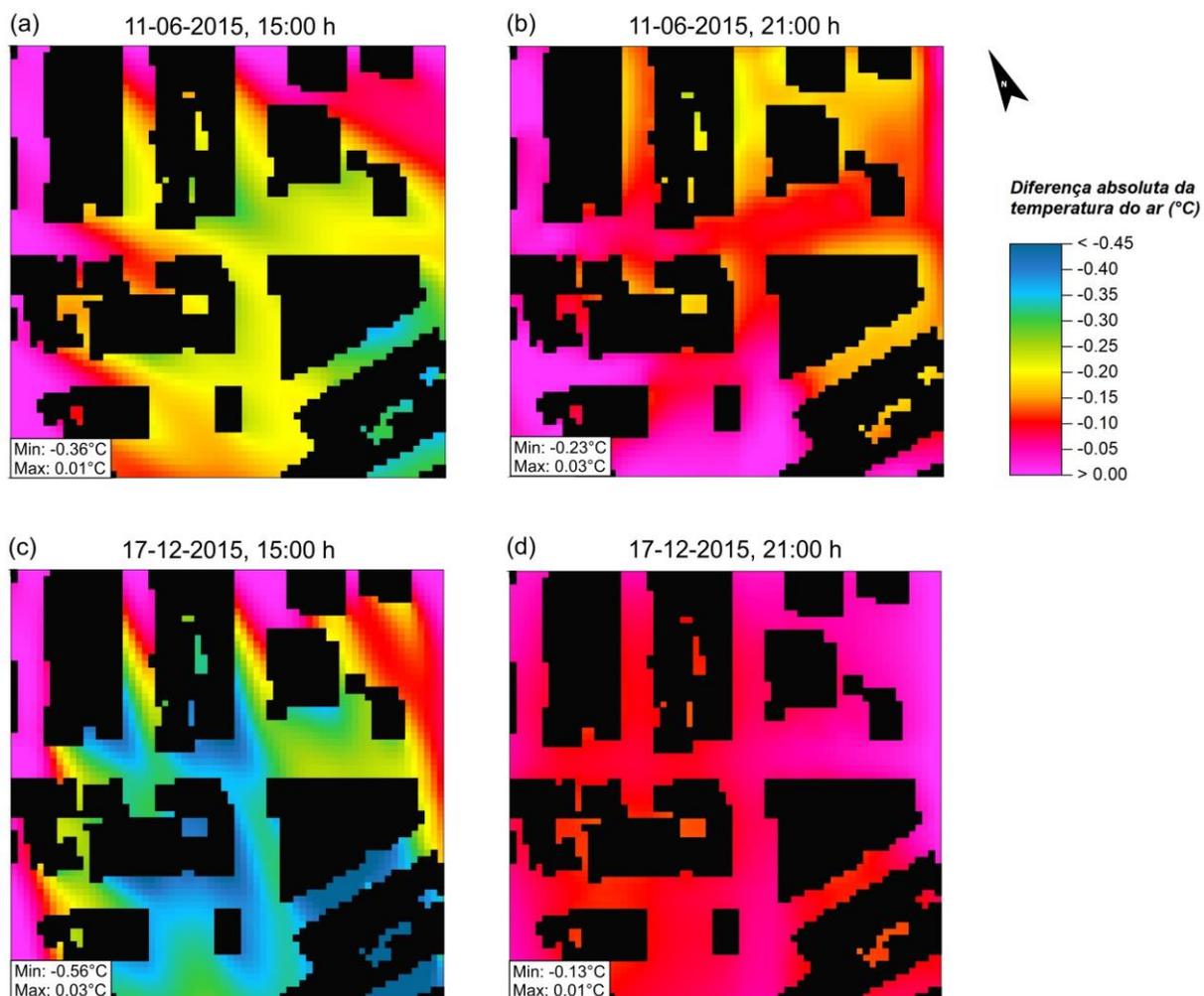


8.2.3 Efeitos dos telhados reflexivos na LCZ 3

A aplicação de telhados frios proporcionou resfriamento diurno máximo de até $-0,36^{\circ}\text{C}$ e noturno de $-0,23^{\circ}\text{C}$ no episódio de inverno (Fig. 8.6(a) e (b)). No verão, a diminuição na temperatura do ar atingiu $-0,56^{\circ}\text{C}$ no período da tarde e $-0,13^{\circ}\text{C}$ durante a noite (Fig. 8.6(c) e (d)).

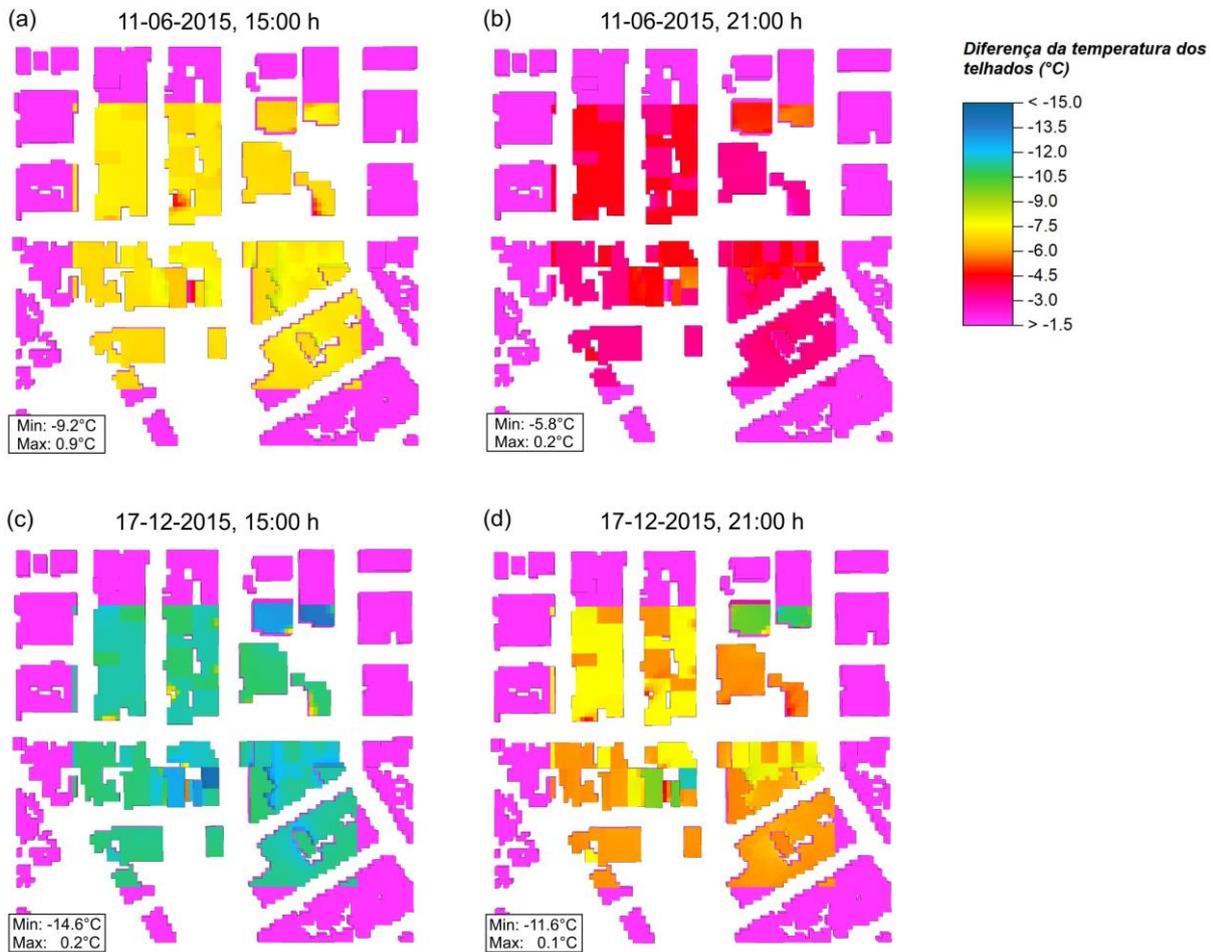
Os maiores efeitos foram verificados na diminuição das temperaturas mínimas em dezembro, com até $-0,4^{\circ}\text{C}$ de diferença às 15:00 h e $-0,12^{\circ}\text{C}$ às 21:00 h, e $-0,23^{\circ}\text{C}$ na média do domínio onde as alterações foram realizadas.

Figura 8.6 Diferença de temperatura do ar entre o cenário base e o cenário de telhados reflexivos na LCZ 3



Em relação à temperatura dos telhados, a maior diferença em relação aos cenários base no inverno foi de até $-9,2^{\circ}\text{C}$ no período diurno e predomínio de $-7,5^{\circ}\text{C}$ na área com implantação dos telhados reflexivos (Fig. 8.7(a)). No verão, o resfriamento máximo atingiu $-14,6^{\circ}\text{C}$ às 15:00 h e $-11,6^{\circ}\text{C}$ às 21:00 h, com diferença diurna predominante de $<-10,5^{\circ}\text{C}$ e noturna de $<-6^{\circ}\text{C}$ (Fig. 8.7(c) e (d)).

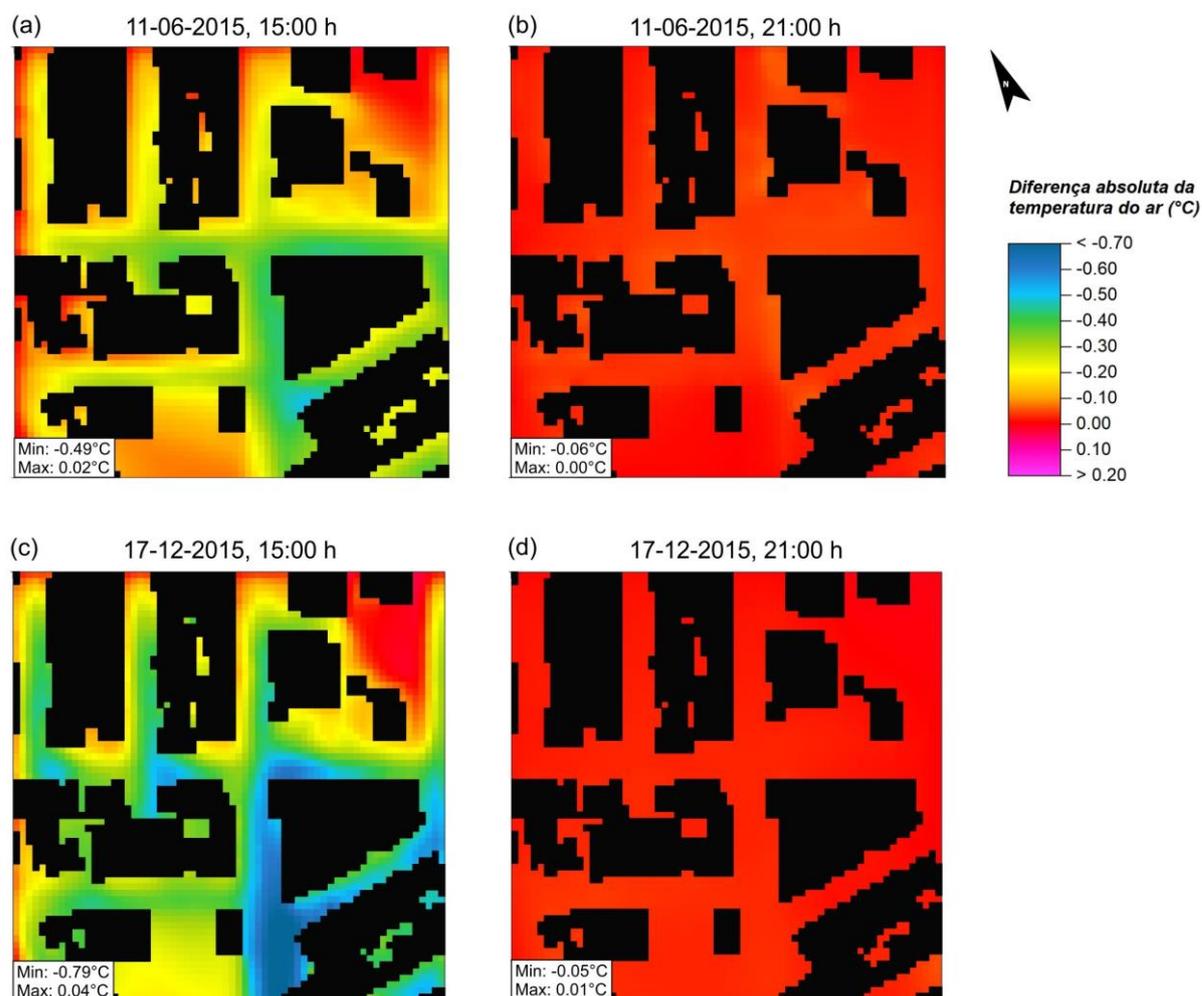
Figura 8.7 Diferença de temperatura dos telhados entre o cenário base e o cenário de telhados reflexivos na LCZ 3



8.2.4 Efeitos dos pavimentos reflexivos na LCZ 3

O impacto dos pavimentos reflexivos verificado na LCZ 3 foi maior no resfriamento das temperaturas do ar diurnas. Em junho, a diferença de temperatura do ar em relação ao cenário base foi de até $-0,49^{\circ}\text{C}$ às 15:00 h e $-0,06^{\circ}\text{C}$ às 21:00 h (Fig. 8.8(a) e (b)). No episódio de verão, os pavimentos frios proporcionaram resfriamento diurno máximo de $-0,79^{\circ}\text{C}$, enquanto o resfriamento noturno foi inferior à $-0,05^{\circ}\text{C}$ (Fig. 8.8(c) e (d)).

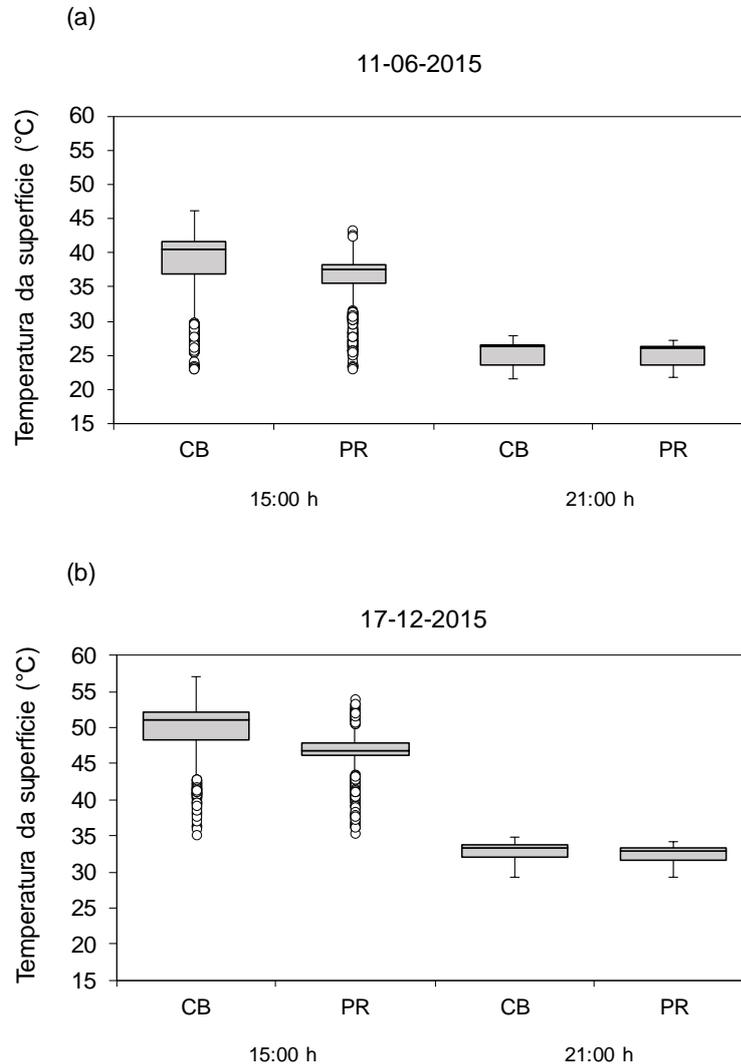
Figura 8.8 Diferença de temperatura do ar entre o cenário base e o cenário de pavimentos reflexivos na LCZ 3



No que se refere às diferenças absolutas de temperatura da superfície proporcionadas pelos pavimentos reflexivos, o episódio de inverno apresentou resfriamento máximo de até $-5,4^{\circ}\text{C}$ e médio de $-2,3^{\circ}\text{C}$ durante o dia, com diferença noturna de aproximadamente $-0,7^{\circ}\text{C}$ (Fig. 8.9(a)).

No verão, verificou-se diminuição máxima da temperatura da superfície de aproximadamente -7°C e média de $-3,5^{\circ}\text{C}$ no período da tarde. À noite, as diferenças diminuíram, com resfriamento máximo de até $-1,4^{\circ}\text{C}$ e média de $-0,4^{\circ}\text{C}$ (Fig. 8.9(b)).

Figura 8.9 Variação da temperatura da superfície entre o cenário base (CB) e o cenário com pavimentos reflexivos (PR) na LCZ 3



8.3 Eficácia de resfriamento do albedo (ACE)

A literatura sobre modelagem numérica da temperatura do ar resultante da implementação de estratégias de redução do calor urbano apresenta características distintas em relação ao clima local, à morfologia da superfície, ao tipo e à intensidade da implantação da medida de mitigação, e ao modelo numérico adotado (KRAYENHOFF et al., 2021).

Consequentemente, a faixa de intensidade de resfriamento decorrente de uma determinada estratégia varia amplamente entre os estudos, o que torna necessário avaliar os impactos de uma implementação para além do resfriamento absoluto.

Krayenhoff et al. (2021) definiram a métrica ACE, que calcula o impacto preciso das medidas de mitigação com base em dois dos principais fatores responsáveis pela variação da magnitude do resfriamento entre os estudos: a fração da área modificada e a intensidade da

implementação de mitigação.

Para avaliar a eficácia do resfriamento de implementações de albedo, os autores seguem a definição utilizada por Krayenhoff e Voogt (2010), denominada ACE:

$$ACE = -\frac{\Delta T}{\Delta \alpha_N} = -\frac{\Delta T}{\Delta \alpha_S \cdot \lambda_S} \quad (8.1)$$

onde ΔT é a alteração média na temperatura do ar; $\Delta \alpha_N$ é a alteração média do albedo na área do plano devido à implementação de pavimentos ou telhados frios na escala do bairro; $\Delta \alpha_S$ é a alteração no albedo da superfície modificada e λ_S é a área da superfície modificada dividida pela área do plano horizontal geral correspondente (fração da área de telhado ou pavimento).

O valor de ACE representa o resfriamento obtido a partir de um aumento do albedo de 0 para 1,0 na escala do bairro. Ao dividi-lo por 10, obtém-se o valor de resfriamento associado à uma mudança de 0,10 no albedo.

8.3.1 Eficácia de resfriamento do albedo de telhados e pavimentos reflexivos

Para obter a eficácia de resfriamento do albedo (ACE) nas LCZs, considerou-se a alteração média na temperatura do ar a 2 m acima da superfície, decorrente da implementação de telhados e pavimentos reflexivos, nos episódios de inverno e verão às 15:00 h e às 21:00 h.

Além disso, foram calculadas as propriedades de cobertura da superfície (%) na área de implementação das estratégias de mitigação (40.000 m²) (Tabela 8.2) para determinar a fração da área do plano destinada a cada medida.

Tabela 8.2 Cobertura da superfície na área do plano de implementação das estratégias de mitigação

Cobertura da superfície (%)	LCZ 2	LCZ 3
Edifícios	62,80	46,53
Asfalto	12,81	17,47
Pavimento	21,41	19,04
Árvores	2,98	9,46
Gramma	–	7,50

Em seguida, estimou-se a alteração média do albedo na superfície modificada (Tabela 8.3), subtraindo o albedo médio dos telhados e pavimentos originais do albedo dos telhados e pavimentos reflexivos.

Tabela 8.3 Área e intensidade da implementação de telhados e pavimentos reflexivos nas LCZs em Presidente Prudente

Local	Área e intensidade da implementação		LCZ 2	LCZ 3
Telhado	Fração da área dos telhados modificada	$[\lambda_s]$	0,63	0,47
	Albedo médio dos telhados	$[\alpha]$	0,37	0,34
	Albedo telhados reflexivos	$[\alpha]$	0,70	0,70
	Alteração média do albedo na superfície modificada	$[\Delta\alpha_s]$	0,33	0,36
Pavimento (asfalto e concreto)	Fração da área dos pavimentos modificada	$[\lambda_s]$	0,34	0,37
	Albedo médio dos pavimentos	$[\alpha]$	0,20	0,20
	Albedo pavimentos reflexivos	$[\alpha]$	0,40	0,40
	Alteração média do albedo na superfície modificada	$[\Delta\alpha_s]$	0,20	0,20

A partir dessas informações foi possível vincular o resfriamento médio da temperatura do ar à área do plano e à intensidade da implementação (λ_s e $\Delta\alpha_s$, respectivamente) das estratégias de mitigação do calor urbano.

Os valores de ACE obtidos com os pavimentos reflexivos na LCZ 2 foram mais significativos do que os derivados dos telhados frios, principalmente no período de maior aquecimento diurno. Por outro lado, a estratégia dos telhados reflexivos foi mais eficaz em resfriar as temperaturas noturnas (Tabela 8.4).

A implementação de albedo no nível dos telhados ($\Delta\alpha_s = 0,33$ e $\lambda_s = 0,63$) proporcionou ACE mínimo de $0,51^\circ\text{C}$ para a noite de inverno e máximo de $1,01^\circ\text{C}$ para a tarde de verão, com resfriamentos de $0,05^\circ\text{C}$ e $0,10^\circ\text{C}$, respectivamente, associados à mudança de 0,10 no albedo.

Os cenários com pavimentos reflexivos ($\Delta\alpha_s = 0,20$ e $\lambda_s = 0,34$) resultaram em ACE máximo diurno de $2,25^\circ\text{C}$ no inverno e $4,47^\circ\text{C}$ no verão, e ACE mínimo de $0,25^\circ\text{C}$ no período noturno do episódio de inverno. Com base nesses resultados, o aumento médio de 0,10 no albedo da superfície gerou reduções de $0,02^\circ\text{C}$ a $0,45^\circ\text{C}$ na temperatura do ar.

Tabela 8.4 Eficácia de resfriamento do albedo de telhados e pavimentos reflexivos na LCZ 2

Data	Hora	Telhados reflexivos		Pavimentos reflexivos	
		$\Delta T_{2m} (^\circ\text{C})^*$	ACE ($^\circ\text{C}$)	$\Delta T_{2m} (^\circ\text{C})^*$	ACE ($^\circ\text{C}$)
11-06-2015	15:00	-0,14	0,68	-0,15	2,25
	21:00	-0,11	0,51	-0,02	0,25
17-12-2015	15:00	-0,21	1,01	-0,30	4,47
	21:00	-0,18	0,85	-0,02	0,31

* Alteração média na temperatura do ar na área do plano, a 2 m da superfície, decorrente da implementação das estratégias de mitigação.

Na LCZ 3, a eficácia de resfriamento do albedo dos telhados e pavimentos reflexivos também foi superior no período diurno, em ambos os episódios analisados. Com exceção do período noturno, o aumento do albedo da superfície pavimentada foi mais eficaz em resfriar

as temperaturas do ar do que a implementação dessa medida de mitigação no nível dos telhados (Tabela 8.5).

O ACE mínimo obtido nos cenários com telhados reflexivos ($\Delta\alpha_s = 0,36$ e $\lambda_s = 0,47$) foi de $0,40^\circ\text{C}$ durante a noite e o máximo de $1,40^\circ\text{C}$ no período diurno, verificados no episódio de verão. Dessa forma, os resfriamentos associados ao aumento de $0,10$ no albedo das coberturas dos edifícios foram de $0,04^\circ\text{C}$ a $0,14^\circ\text{C}$.

Já os pavimentos frios ($\Delta\alpha_s = 0,20$ e $\lambda_s = 0,37$) proporcionaram ACE máximo diurno de $2,67^\circ\text{C}$ em junho e $4,25^\circ\text{C}$ em dezembro, com resfriamento de até $0,42^\circ\text{C}$ por aumento de $0,10$ no albedo da superfície para as condições típicas do verão.

Tabela 8.5 Eficácia de resfriamento do albedo de telhados e pavimentos reflexivos na LCZ 3

Data	Hora	Telhados reflexivos		Pavimentos reflexivos	
		ΔT_{2m} ($^\circ\text{C}$)*	ACE ($^\circ\text{C}$)	ΔT_{2m} ($^\circ\text{C}$)*	ACE ($^\circ\text{C}$)
11-06-2015	15:00	-0,15	0,89	-0,20	2,67
	21:00	-0,09	0,52	-0,02	0,32
17-12-2015	15:00	-0,23	1,40	-0,31	4,25
	21:00	-0,07	0,40	-0,02	0,21

* Alteração média na temperatura do ar na área do plano, a 2 m da superfície, decorrente da implementação das estratégias de mitigação.

Em geral, os valores de ACE das LCZs indicam que os telhados e pavimentos reflexivos foram mais eficazes durante o período diurno, especialmente no episódio de verão, sendo que o aumento do albedo nas superfícies pavimentadas forneceu maior redução da temperatura do ar no nível dos pedestres do que a implementação de telhados frios.

Além de identificar os períodos de tempo nos quais as medidas são mais eficazes, considerar ACE no lugar do resfriamento absoluto permite avaliar a magnitude do resfriamento a partir da fração da área modificada e da intensidade da implementação de mitigação.

A definição desses fatores que geram variação na magnitude do resfriamento entre os estudos, associada aos metadados das LCZs e das estratégias de mitigação de calor, às condições meteorológicas e variações na temperatura do ar informadas, proporciona contextualização e aumenta a comparabilidade dos resultados.

No entanto, a comparação direta entre os valores de ACE das LCZs e os estimados por Krayenhoff et al. (2021) deve ser vista com cautela, pois não se teve acesso aos valores de $\Delta\alpha_s$ e λ_s utilizados nas estimativas, e não se fez distinção em relação a outros fatores, como a localização, clima, caracterização do domínio e a altura da temperatura do ar informada.

Somado a isso, os valores de ΔT relatados nos estudos se referem à alteração máxima na temperatura na área do plano, enquanto nas LCZs de Presidente Prudente foi adotada a

alteração média. Apesar dessas restrições, foi possível identificar semelhança em relação ao período no qual as medidas oferecem maior resfriamento e qual implementação se mostrou mais eficaz.

De maneira geral, os estudos que avaliaram o impacto de telhados reflexivos no verão com o ENVI-met 3.1 (MIDDEL; CHHETRI; QUAY, 2015; TALEGHANI et al., 2016; WANG; BERARDI; AKBARI, 2016; ROTH; LIM, 2017; SALATA et al., 2017) apresentaram ACE médio de 1,6°C, ou resfriamento de 0,16°C por aumento de 0,10 no albedo na escala de bairro (KRAYENHOFF et al., 2021). Em Presidente Prudente, a implantação dessa medida resultou em ACE de até 1,4°C (LCZ 3) no período diurno do episódio de verão.

Para pavimentos reflexivos, os estudos derivaram ACE de aproximadamente 5,7°C durante as tardes de verão (TALEGHANI; SAILOR; BAN-WEISS, 2016; WANG; BERARDI; AKBARI, 2016; MAKROPOULOU et al., 2017; SALATA et al., 2017), enquanto a eficácia de resfriamento do albedo para a LCZ 2 atingiu cerca de 4,5°C.

8.4 Discussão dos resultados

As estratégias de mitigação que envolvem o aumento do albedo são promissoras, pois a implantação pode fornecer resfriamento das temperaturas urbanas sem muita intervenção na forma urbana, através da substituição de telhados e pavimentos ou aplicação de pintura reflexiva nessas superfícies.

De maneira geral, as modificações do albedo no nível dos telhados resultaram em resfriamentos máximos da temperatura da superfície de cobertura entre -8°C e -19°C na LCZ 2, e valores entre -6°C e -15°C na LCZ 3, com o benefício de redução do calor absorvido pelos edifícios e a potencial diminuição do consumo energético para o resfriamento dos ambientes internos.

Por outro lado, os efeitos dos telhados reflexivos na temperatura do ar no nível dos pedestres foram menores do que os alcançados pelos pavimentos frios. A redução máxima de temperatura do ar decorrente dos telhados frios atingiu -0,45°C na LCZ 2 e -0,56°C na LCZ 3, enquanto o aumento do albedo dos pavimentos proporcionou resfriamentos absolutos máximos de -0,75°C e -0,79°C, respectivamente.

Essa condição pode estar relacionada ao fato de o ar mais frio no nível dos telhados não ser misturado de forma eficiente ao nível das ruas. Maggiotto et al. (2014), por exemplo, constataram que, embora o ENVI-met seja capaz de representar o efeito da geometria dos edifícios e da vegetação no padrão de fluxo de vento e na distribuição da temperatura, o modelo requer ajuste significativo para simular os processos de transferência de calor com precisão.

Por existirem vários fatores que influenciam as temperaturas nos cânions urbanos, é possível que a validação dos resultados apresente boa concordância entre as observações e a modelagem, sem que o transporte vertical seja simulado com precisão. Portanto, há a preocupação de que o ENVI-met não forneça uma boa representação da mistura vertical e das trocas de calor entre a superfície e o nível dos telhados, que são essenciais para avaliar os efeitos da implementação de medidas mitigadoras (CRANK et al., 2018).

A avaliação dos impactos dos pavimentos reflexivos também apresenta desafios, especialmente relacionados ao sombreamento das superfícies. Mesmo em condições sem alteração de albedo, as superfícies sombreadas apresentam temperaturas e processos de troca de calor diferentes das superfícies com incidência direta de radiação solar. Portanto, em locais onde o sombreamento é uma característica predominante, até mesmo o efeito do aumento do albedo do pavimento pode ser reduzido.

Na LCZ 2, a forma urbana compacta com edifícios de média elevação provoca o efeito sombra em parte das vias de circulação. Na LCZ 3, apesar do predomínio de edifícios baixos e vias mais amplas, há maior fração de superfície coberta por copas de árvores e o consequente sombreamento pela arborização. Tais características podem ter contribuído para efeitos de resfriamento absoluto semelhantes nas temperaturas do ar e da superfície nessas duas áreas distintas.

Além das diferenças decorrentes do tipo de mitigação adotado, verificou-se variação significativa do resfriamento absoluto das temperaturas de acordo com o período do dia e em estações diferentes. As maiores diferenças entre os cenários de mitigação e os cenários base ocorreram no período diurno do episódio de verão, o que pode ser atribuído à redução da radiação solar que atinge os telhados e pavimentos reflexivos durante o inverno.

Também houve variabilidade espacial dos resfriamentos, especialmente na temperatura do ar diurna, o que demonstra que os efeitos do resfriamento no nível de pedestres não são uniformes. Nesse sentido, a métrica ACE auxiliou no cálculo do impacto mais preciso das medidas de mitigação a partir da intensidade da alteração no albedo e da fração da superfície modificada em cada LCZ.

Os valores de ACE são influenciados por diferentes fatores, incluindo condições climáticas, características da forma urbana e até horários do dia. Logo, as magnitudes de ACE devem ser relatadas com metadados que descrevam seu contexto meteorológico, de vizinhança e temporal (KRAYENHOFF et al., 2021).

Esses pressupostos foram seguidos na avaliação da eficácia de resfriamento do albedo nas LCZs em Presidente Prudente, com resultados de ACE diferentes para cada situação analisada.

A partir do cálculo dessa métrica, verificou-se que a LCZ 3 apresentou eficácia de resfriamento dos pavimentos reflexivos ($ACE \approx 0,2^{\circ}\text{C}-4,3^{\circ}\text{C}$) inferior à obtida na LCZ 2 (ACE

≈ 0,3°C–4,5°C) durante o verão, enquanto no episódio de inverno ocorreu o padrão inverso.

Essa diferença de ACE entre as LCZs provavelmente se deve à maior quantidade de árvores na área residencial, cujo dossel influencia no impacto de resfriamento. No verão, as copas densas das árvores proporcionam o sombreamento das superfícies reflexivas. Porém, com a perda de parte das folhas da cobertura vegetal durante o inverno, as superfícies da LCZ 3 ficam mais expostas ao sol durante o dia do que as do centro da cidade.

De modo geral, os valores de ACE derivados dos telhados reflexivos foram maiores na LCZ 3, com eficácias de resfriamento diurno entre 0,9°C (inverno) e 1,4°C (verão), e ≤ 0,5°C no período noturno dos episódios analisados. Isso pode ser relacionado à menor distância entre o nível dos telhados e a superfície nessa área com edifícios de baixa elevação, onde o efeito dos telhados reflexivos são mais presentes no nível do pedestre.

Embora o aumento do albedo no nível dos telhados tenha proporcionado eficácias inferiores em relação aos pavimentos frios, sobretudo na LCZ 2, os telhados reflexivos podem contribuir para a melhoria do conforto térmico no ambiente interno, sem a desvantagem de aumentar a exposição térmica dos pedestres ou o incômodo visual causado por pavimentos altamente reflexivos.

Nesse contexto, a avaliação das medidas de mitigação do calor urbano demonstrou o benefício de utilizar ACE como uma métrica mais realista do potencial de resfriamento de cada estratégia, assim como a importância de considerar outras variáveis, como a temperatura dos telhados e das superfícies, e não limitar as análises à redução da temperatura do ar.

9 CONCLUSÕES

Investigar o clima urbano e buscar soluções para diminuir os efeitos das áreas construídas na atmosfera local é de grande interesse para a melhoria da qualidade de vida. A modelagem numérica pode ser utilizada para representar a complexidade encontrada nas cidades, simular as interações e correlações não-lineares entre os diferentes elementos do clima, e auxiliar nas diretrizes gerais para um planejamento urbano que considere as características climáticas locais.

Além de possibilitar a avaliação das configurações urbanas e seu impacto no clima, os modelos são capazes de projetar cenários climáticos de adaptação. Assim, o poder público local pode ter acesso ao conhecimento sobre as condições climáticas, as áreas que precisam de ação direcionada, e a eficácia da implantação de estratégias decorrentes das intervenções de planejamento.

Esta pesquisa teve como objetivo principal avaliar o desempenho de estratégias de mitigação do calor urbano nas LCZs de Presidente Prudente através de simulações com o modelo microclimático ENVI-met. Para tanto, realizou-se a análise inicial dos impactos da configuração urbana, a qual demonstrou a formação de ilhas de calor com intensidades máximas de $7,5^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T_{\text{LCZ 2-B}}$) em condições típicas de inverno e $6,4^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T_{\text{LCZ 3-B}}$) durante o verão.

A modelagem dos cenários com base nas configurações originais das LCZs envolveu a calibração do ENVI-met para as áreas de estudo e a validação a partir de observações *in situ*, fundamentais para melhorar o desempenho das simulações, avaliar as tendências do modelo e garantir a confiabilidade dos resultados.

O processo de validação indicou bom ajuste entre os dados observados e os previstos nas simulações, principalmente com a variável temperatura do ar. Para os cenários base da LCZ 2, as estatísticas de desempenho apresentaram $\text{RMSE} = 1,35^{\circ}\text{C}$ e índice de concordância de Willmott (d) = 0,96, enquanto os cenários base da LCZ 3 apresentou $\text{RMSE} = 0,78^{\circ}\text{C}$ e $d = 0,99$.

A projeção de cenários futuros enfatizou a avaliação de telhados e pavimentos reflexivos como estratégias de mitigação do calor urbano. Embora as intervenções baseadas no albedo sejam uma dentre muitas que podem ser adotadas, essa pesquisa apresentou uma análise sistemática do potencial de resfriamento absoluto e normalizado de medidas de adaptação que são amplamente propostas.

A análise dos efeitos dessas estratégias na temperatura urbana através da eficácia de resfriamento do albedo (ACE) (KRAYENHOFF et al., 2021) constituiu a primeira abordagem dessa métrica em cidade tropical brasileira, e permitiu avaliar os impactos de resfriamento com base na fração da superfície modificada (λ_s) e na intensidade da implementação de

mitigação ($\Delta\alpha_s$).

Além de fornecer uma estrutura padronizada para os estudos que avaliam o impacto do resfriamento de implementações de albedo, a utilização de ACE é vantajosa para o planejamento. Os profissionais podem ter acesso ao potencial de resfriamento das estratégias antes da implantação e aos locais onde as propostas fornecerão maior benefício para os pedestres.

De modo geral, os valores de ACE obtidos nas LCZs 2 e 3 foram menores durante a noite e no inverno, o que indica que as implementações de albedo geram mais resfriamento para condições diurnas de verão. Além disso, a estratégia dos pavimentos reflexivos pode oferecer maior redução da temperatura do ar no nível dos pedestres do que o aumento do albedo dos telhados.

Para a LCZ 2, um aumento médio de 0,10 no albedo dos telhados ($\Delta\alpha_s = 0,33$ e $\lambda_s = 0,63$) gerou uma redução diurna média da temperatura do ar de $0,10^\circ\text{C}$ ($\text{ACE} = 1,01^\circ\text{C}$), enquanto os pavimentos reflexivos resultaram na diminuição de $0,45^\circ\text{C}$ ($\text{ACE} = 4,47^\circ\text{C}$) ($\Delta\alpha_s = 0,20$ e $\lambda_s = 0,34$) para condições típicas de uma tarde de verão sem nebulosidade.

Na LCZ 3, os telhados de alta refletividade ($\Delta\alpha_s = 0,36$ e $\lambda_s = 0,47$) ofereceram resfriamento de $0,14^\circ\text{C}$ por aumento de albedo na vizinhança de 0,10 ($\text{ACE} = 1,40^\circ\text{C}$), e os pavimentos reflexivos ($\Delta\alpha_s = 0,20$ e $\lambda_s = 0,37$) proporcionam resfriamento de $0,42^\circ\text{C}$ ($\text{ACE} = 4,25^\circ\text{C}$) para condições de verão com céu claro à tarde.

Esses padrões identificados têm relação não só com o contexto climático das simulações e a capacidade do modelo em representar processos físicos, mas também com as características das áreas modeladas e das estratégias implementadas. Logo, as diferenças de ACE entre as LCZs possuem relação direta com a morfologia, materiais construtivos, cobertura da terra, o albedo médio das superfícies preexistentes e a intensidade das implementações de albedo em cada domínio.

As LCZs são compostas por uma diversidade de superfícies, elementos urbanos e naturais que geram microclimas específicos, e os resultados da modelagem dão suporte à hipótese inicial de que cada arranjo de paisagem necessita de estratégias distintas para reduzir as temperaturas urbanas e fornecer ambientes termicamente confortáveis aos habitantes.

9.1 Desafios e limitações

O modelo ENVI-met foi desenvolvido inicialmente para climas temperados e suas configurações básicas não correspondem necessariamente aos ambientes de clima tropical. Portanto, o modelo requer uma variedade de dados observacionais e de superfície

representativos da área de estudo para garantir boas condições de inicialização.

No que se refere aos dados de superfície, a ausência de informações 2D, e principalmente 3D, implicou na necessidade de realizar levantamentos de campo para conferir propriedades (materiais de construção e vegetação típica) e estimar a altura dos edifícios e das árvores.

Em relação aos dados meteorológicos, podem ser destacados dois desafios principais. Apesar da disponibilidade gratuita pelo INMET e sistema ASOS, há limitação na diversidade de variáveis e na continuidade dos registros. Além disso, os dados registrados nas LCZs, fundamentais para avaliar a calibração do modelo, se limitaram à temperatura e umidade do ar em um ponto fixo, o que não possibilitou a validação dos resultados para outras variáveis importantes (direção/velocidade do vento e MRT) e para as variações espaciais na área do domínio.

Embora o ENVI-met seja disponibilizado em uma versão gratuita, há limitações quanto a dimensão do domínio, as opções de simulação e análise dos resultados. Isso restringiu as possibilidades de uso do modelo para simular as LCZs, sendo necessário adquirir a versão licenciada para ampliar as áreas de interesse e ter acesso aos recursos avançados de modelagem.

Se por um lado a interface do ENVI-met facilita a sua utilização, por outro pode passar uma impressão equivocada de simplicidade. O modelo consiste em um sistema de simulação microclimática complexo, sendo fundamental adquirir conhecimento sobre o seu funcionamento, à quais variáveis é mais sensível, o tamanho adequado da área de domínio, a dinâmica atmosférica e os processos de troca entre a superfície e o ar sobrejacente, para executar as melhores práticas em modelagem.

Em decorrência da complexidade do modelo, sua execução também requer grandes recursos de computação. O ENVI-met pode levar dias para finalizar uma simulação, dependendo dos equipamentos utilizados, sendo que domínios maiores e complexos exigem mais tempo de processamento e capacidade de armazenamento.

Ao todo, foram realizadas mais de 100 simulações, sendo que as de calibração, por exemplo, tiveram duração média de 45 h e armazenamento de 5GB de dados em cada teste. O processamento dos cenários base e das medidas mitigadoras apresentou duração e armazenamento semelhantes, com tempo médio de execução de 118 h e espaço ocupado de aproximadamente 19GB.

Somado a isso, tem-se o desafio com a execução/processamento das simulações, uma vez que essas podem ser interrompidas devido à instabilidade no processamento do modelo, falha no sistema operacional do computador ou desligamento decorrente de interrupção/fornecimento de energia elétrica.

No que diz respeito à validação dos resultados, foi importante analisar os indicadores

de desempenho em conjunto. Valores isolados do índice de concordância d não revelam as variações reais dos ciclos diurnos e noturnos derivadas das simulações, mas associados às medidas de erros (RMSE, MAE e MBE) permitem avaliar os resultados com maior precisão.

Os índices estatísticos também podem revelar resultados pouco satisfatórios para determinadas variáveis, como ocorreu com a umidade do ar. Isso em si não invalida o uso do modelo, mas indica a necessidade de parâmetros mais refinados para melhorar o desempenho das simulações.

9.2 Trabalhos futuros

O ENVI-met foi calibrado para LCZs de Presidente Prudente, cidade de clima tropical, e verificou-se a necessidade de incluir parâmetros refinados para o solo e a vegetação em trabalhos futuros, assim como medições de outras variáveis meteorológicas para melhorar a validação do desempenho do modelo e, conseqüentemente, a avaliação de medidas de mitigação.

O desempenho de estratégias de mitigação do calor urbano foi avaliado a partir da eficácia de resfriamento do albedo de superfícies reflexivas (ACE). Essa métrica fornece uma estrutura padronizada para estudos de impactos de resfriamento de medidas de mitigação e contribui para análises mais consistentes, pois possibilita quantificar a capacidade de resfriamento a partir da fração da superfície adaptada e a intensidade da implementação de mitigação.

Nessa pesquisa, ACE foi determinada considerando a extensão das áreas nas quais as medidas de mitigação foram implantadas, o que possibilita a padronização da comunicação dos resultados e comparação entre estudos. No entanto, é importante investigar em que medida as alterações no albedo contribuem para o resfriamento da temperatura fora do domínio modificado e conhecer o alcance espacial dos efeitos das estratégias de mitigação.

Embora as superfícies reflexivas tenham demonstrado capacidade de resfriamento da temperatura urbana, simulações de estratégias que envolvam cobertura vegetal são necessárias. A vegetação arbórea, em especial, além de proporcionar resfriamento através da evapotranspiração, promove o sombreamento, que diminui a temperatura da superfície, a MRT e, conseqüentemente, a exposição térmica dos pedestres.

Como não existe uma única estratégia que atenda a todos os objetivos climáticos ou um *design* que seja apropriado para todas as áreas da cidade, considera-se relevante avançar na investigação dos efeitos individuais e combinados das estratégias em diferentes LCZs, considerando o uso dos espaços e o contexto climático.

Devido às mudanças climáticas, as ondas de calor são cada vez mais frequentes e de

maior intensidade em muitas cidades, o que leva ao aumento do estresse térmico, da demanda de energia e a piora da qualidade do ar. Nesse contexto, tão importante quanto investigar a eficácia das estratégias em diminuir o aquecimento urbano, será avaliar os efeitos microclimáticos no pedestre para propor cenários de adaptação que sejam os mais efetivos possíveis.

REFERÊNCIAS

- ABREU, D. S. **Formação histórica de uma cidade pioneira paulista**: Presidente Prudente. Presidente Prudente: Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, 1972. 339p.
- ACERO, J. A.; ARRIZABALAGA, J. Evaluating the performance of ENVI-met model in diurnal cycles for different meteorological conditions. **Theor. Appl. Climatol.**, 131, p. 455–469, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1971-y>
- AGUILAR, E.; AUER, I.; BRUNET, M.; PETERSON, T. C.; WIERINGA, J. Guidance on Metadata and Homogenization. WMO Technical Document No. 1186. 2003. World Meteorological Organization: Geneva.
- AMBROSINI, D.; GALLI, G.; MANCINI, B.; NARDI, I.; SFARRA, S. Evaluating Mitigation Effects of Urban Heat Islands in a Historical Small Center with the ENVI-Met® Climate Model. **Sustainability**, 6, p. 7013–7029, 2014. DOI:10.3390/su6107013.
- AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY. AMS. Global radiation. Glossary of Meteorology. 2019. Disponível em: https://glossary.ametsoc.org/wiki/Global_radiation. Acesso em: fev. 2019.
- AMORIM, M. C. C. T. **Teoria e método para o estudo das ilhas de calor em cidades tropicais de pequeno e médio porte**. 2017. Tese (Livre Docência) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2017.
- AMORIM, M. C. C. T. **Ilhas de calor em cidades tropicais de médio e pequeno porte: teoria e prática**. Curitiba: Appris, 2020. v. 1. 161p.
- ANTONIO, J. N. **Classificação de Antropossolos em áreas de antigos depósitos de resíduos sólidos urbanos em Presidente Prudente-SP**: contribuição metodológica. 2017. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2017.
- ARNFIELD, A. J. Micro- and mesoclimatology. **Prog. Phys. Geogr.**, 30, p. 677–89, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1191/030913398676485396>
- ATKINSON, B. W. Numerical Modelling of Urban Heat-Island Intensity. **Boundary-Layer Meteorology**, 109, p. 285–310, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:102582032>
- AUER, A. H. Correlation of Land Use and Cover with Meteorological Anomalies. **J. Appl. Meteor.**, 17, p. 636–643, 1978. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1978\)017<0636:COLUAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1978)017<0636:COLUAC>2.0.CO;2)
- BATTISTA, G.; CARNIELO, E.; VOLLARO, R. D. L. Thermal impact of a redeveloped area on localized urban microclimate: A case study in Rome. **Energy and Buildings**, 133, p. 446–454, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.004>
- BENNET, M. G.; EWENZ, C. M. Increased urban heat island effect due to building height increase. In: PIANTADOSI, J.; ANDERSSON, R. S.; BOLAND, J. (eds). MODSIM2013, 20th International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, December 2013, p. 2242–2247. ISBN: 978-0-9872143-3-1. DOI: <https://doi.org/10.36334/modsim.2013.K8.bennet>

BOZONNET, E.; MUSY, M.; CALMET, I.; RODRIGUEZ, F. Modeling methods to assess urban fluxes and heat island mitigation measures from street to city scale. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, 10, p. 62–77, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt049>

BROADBENT, A. M.; COUTTS, A. M.; TAPPER, N. J.; DEMUZERE, M.; BERINGER, J. The microscale cooling effects of water sensitive urban design and irrigation in a suburban environment. **Theor. Appl. Climatol.**, 134, p. 1–23, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2241-3>

BROADBENT, A. M.; KRAYENHOFF, E. S.; GEORGESCU, M. Efficacy of cool roofs at reducing pedestrian-level air temperature during projected 21st century heatwaves in Atlanta, Detroit, and Phoenix (USA). **Environ. Res. Lett.**, 15, p. 1–14, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6a23>

BRUSE, M. ENVI-MET. 2019. Decoding urban nature. Disponível em: <https://www.envi-met.com/>. Acesso em: jan. 2019.

BRUSE, M.; FLEER, H. Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. **Environmental Modelling & Software**, 13, p. 373–384, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00042-5)

CARDOSO, R. S. **Classificação de potenciais unidades climáticas em Presidente Prudente-SP**. 2015. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2015.

CARDOSO, R. S.; AMORIM, M. C. C. T. Análise do clima urbano a partir da segregação socioespacial e socioambiental em Presidente Prudente-SP, Brasil. **GEOSABERES: Revista de Estudos Geoeducacionais**, v. 6, p. 122–136, 2015.

CARDOSO, R. S.; AMORIM, M. C. C. T. Estimativa da distribuição espacial da temperatura do ar com base em zonas climáticas locais (LCZ) e modelos de regressão. **Revista de Geografia e Ordenamento do Território**, 12, p. 75–99, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.17127/got/2017.12.004>

CARDOSO, R. S.; AMORIM, M. C. C. T. Urban heat island analysis using the ‘local climate zone’ scheme in Presidente Prudente, Brazil. **Investigaciones Geográficas**, 69, p. 107–118, 2018. DOI: <https://doi.org/10.14198/INGEO2018.69.07>

CARDOSO, R. S.; AMORIM, M. C. C. T. Propriedades da superfície e variáveis climáticas para modelagem de zonas climáticas locais em Presidente Prudente. **Revista Brasileira de Climatologia**, 28, p. 808–829, 2021.

CARDOSO, R. S.; AMORIM, M. C. C. T.; LIU, D.; MONTENEGRO, A. Using high-resolution satellite imagery to characterize local climate zones in Presidente Prudente, Brazil. In: 10th International Conference on Urban Climate & 14th Symposium on the Urban Environment, August 6–10, 2018, New York City, USA.

CARFAN, A. C. **Análise do conforto térmico em áreas abertas no município de Ourinhos-SP**. 2011. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

CHANDLER, T. J. **The climate of London**. Hutchinson: London, 1965. Disponível em: http://urban-climate.org/documents/TonyChandler_TheClimateOfLondon.pdf. Acesso em: 23 out. 2016.

CHOW, W. T. L. **Microscale modeling of the canopy-layer urban heat island in Phoenix, Arizona: validation and sustainable mitigation scenarios.** 2011. Thesis (Doctor of Philosophy). Arizona State University, Tempe, 2011.

CHOW, W. T. L.; POPE, R. L.; MARTIN, C. A.; BRAZEL, A. J. Observing and modeling the nocturnal park cool island of an arid city: horizontal and vertical impacts. **Theor. Appl. Climatol.**, 103, p. 197–211, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-010-0293-8>

COELHO, T. C. C. **Efeitos do envelhecimento natural no desempenho térmico de telhas onduladas de fibrocimento sem amianto.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

DAVENPORT, A. G.; GRIMMOND, S. B.; OKE, T. R.; WIERINGA, J. Estimating the roughness of cities and sheltered country. In: 12th Conference on Applied Climatology, Asheville, NC, Amer. Meteor. Soc., 2000, p. 96–99.

CRANK, P. J.; SAILOR, D. J.; BAN-WEISSB, G.; TALEGHANI, M. Evaluating the ENVI-met microscale model for suitability in analysis of targeted urban heat mitigation strategies. **Urban Climate**, 26, p. 188–197, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.09.002>

DAVIS INSTRUMENTS. **Vantage Pro2 Console Manual.** 2019. Disponível em: https://www.davisinstruments.com/product_documents/weather/manuals/07395-234_IM_06312.pdf. Acesso em: mar. 2020.

DUBREUIL, V., FANTE, K. P., PLANCHON, O., SANT'ANNA NETO, J. L. Climate change evidence in Brazil from Koppen's climate annual types frequency. **International Journal of Climatology**, 39, p. 1446–1456, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5893>

ELNABAWI, M.H., HAMZA, N., DUDEK, S. Use and evaluation of the ENVI-met model for two different urban forms in Cairo, Egypt: measurements and model simulations. In: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, August 26-28, 2013, p. 2800–2806.

EMMANUEL, R.; FERNANDO, H. J. S. Urban heat islands in humid and arid climates: role of urban form and thermal properties in Colombo, Sri Lanka and Phoenix, USA. **Clim. Res.**, 34, p. 241–251, 2007. DOI: <https://doi.org/10.3354/cr00694>

EVELYN, J. **Fumifugium.** London, England: His Majesties Command, 1661. Disponível em: http://www.iaqm.co.uk/text/resources/reports/fumifugium_mmxi.pdf. Acesso em: 25 abr. 2015.

FERREIRA, F. L.; PRADO, R. T. A. **Medição do albedo e análise de sua influência na temperatura superficial dos materiais utilizados em coberturas de edifícios no Brasil.** São Paulo: EPUSP, 2003. Disponível em: http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00351.pdf. Acesso em: jan. 2019.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. T. **Manual de Conforto Térmico.** 8ed. reimpressão. São Paulo: Studio Nobel, 2012.

GOES, E. M.; SPÓSITO, M. E. B. Práticas espaciais, cotidiano e espaço público: o consumo como eixo da análise do calçadão de Presidente Prudente - SP. **Revista da ANPEGE**, v. 12, p. 39–65, 2016.

GONCALVES, A. K.; FERREIRA, H. M.; VALENTIM, G. A. Análise da paisagem do

Prudenshopping e do centro de Presidente Prudente, SP: uma contribuição para a proposta de intervenção. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 3, p. 139–152, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.17271/2318847232020151062>

GRIMMOND, S. Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming. **Geographical Journal**, 173, p. 83–88, 2007. DOI: 10.1111/j.1475-4959.2007.232_3.x

GRIMMOND, C. S. et al. The International Urban Energy Balance Models Comparison Project: First Results from Phase 1. **J. Appl. Meteor. Climatol.**, 49, p. 1268–1292, 2010. DOI: 10.1175/2010JAMC2354.1

GUSSON, C. S. **Efeito da densidade construída sobre o microclima urbano**: construção de diferentes cenários possíveis e seus efeitos no microclima para a cidade de São Paulo, SP. 2014. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

GUSSON, C. S. **O impacto da verticalização no microclima urbano e no conforto térmico na escala do pedestre**: o papel da geometria e da envoltória dos edifícios. 2020. Tese (Doutorado em Ciências) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

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**, 169, p. 2–10, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.001>

HEDQUIST, B. C.; DI SABATINO, S.; FERNANDO, H. J.S.; LEO, L. S.; BRAZEL, A. J. Results from the Phoenix Arizona urban heat island experiment. In: The seventh International Conference on Urban Climate, 29 June - 3 July 2009, Yokohama, Japan.

HESPANHOL, R. A. M. Espaço Rural. In: João Osvaldo Rodrigues Nunes; Isabel Cristina Moroz-Caccia Gouveia; José Mariano Caccia Gouveia. (Org.). **Atlas Ambiental Escolar de Presidente Prudente**. 1ed. Presidente Prudente: Faculdade de Ciências e Tecnologia, Unesp, 2017.

HOBODATA LOGGERS. **HOBO® Pro v2 (U23-00x) Manual**. 2017. Disponível em: <https://www.hobodataloggers.com.au/hobo-pro-v2-u23-002-external-temperaturerh-data-logger>. Acesso em: mar. 2020.

HOWARD, L. **The Climate of London**: Deduced from Meteorological Observations, Made at Different Places in the Neighbourhood of the Metropolis. 1 ed. Londres: W. Phillips, George Yard, Lombard Street, 1818, v.1. Disponível em: http://www.urbanclimate.org/documents/LukeHoward_Climate-of-London-V1.pdf. Acesso em: 25 abr. 2015.

HUTTNER, S. **Further development and application of the 3D micro climate simulation ENVI-met**. 2012. Thesis (Doctor of Science). Faculty of Chemistry, Pharmacy and Geosciences, Johannes-Gutenberg-University of Mainz, Mainz, 2012.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **População estimada [2019]**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/presidente-prudente/panorama>. Acesso em: 12 out. 2019.

INPE. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **El Niño e La Niña**. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/>. Acesso em: jun. 2019a.

INPE. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Radiação solar e terrestre**. Disponível em: <http://satelite.cptec.inpe.br/radiacao/>. Acesso em: jul. 2019b.

JÄNICKE, B.; MEIER, F.; HOELSCHER, M.; SCHERER, D. Evaluating the effects of facade greening on human bioclimate in a complex urban environment. **Advances in Meteorology**, p. 1–15, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/747259>

KRAYENHOFF, E. S.; VOOGT J. A. Impacts of urban albedo increase on local air temperature at daily–annual time scales: model results and synthesis of previous work. **J. Appl. Meteorol. Climatol.**, 49, p. 1634–1648, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2356.1>

KRAYENHOFF, E. S.; BROADBENT, A. M.; ZHAO, L.; GEORGESCU, M.; MIDDEL, A.; VOOGT, J. A.; MARTILLI, A.; SAILOR, D. J.; ERELL, E. Cooling hot cities: a systematic and critical review of the numerical modelling literature. **Environ. Res. Lett.**, 16, p. 1–29, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abdcf1>

KRELLING, A. F.; SILVA, M. P.; SOUZA, R. V.; MARINOSKI, D. L.; GÜTHS, S. Análise laboratorial de propriedades ópticas e térmicas de dezesseis amostras de telhas disponíveis no mercado brasileiro. In: XVII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC, 2018, Foz do Iguaçu. Desafios da Inovação no Ambiente Construído, 2018. p. 704–717.

KRELLING, A. F.; SILVA, M. P.; SOUZA, R. V.; MARINOSKI, D. L.; GÜTHS, S. Influência do envelhecimento, limpeza e pintura da superfície de telhas de fibrocimento sobre o desempenho térmico da cobertura. In: XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2019, João Pessoa. XV ENCAC e XI ELACAC: Mudanças climáticas, concentração urbana e novas tecnologias. Porto Alegre: ANTAC, 2019. p. 1917–1926.

LALIBERTE, A. S.; KOPPA, J.; FREDRICKSON, E. L.; RANGO, A. Comparison of nearest neighbor and rule-based decision tree classification in an object-oriented environment. In: Proc. IEEE International Geoscience and Remote Sensing, Denver, CO, USA, 2006.

LANDSBERG, H. E. **The urban climate**. Academic Press: New York, 1981.

LEE, H.; MAYER, H.; CHEN, L. Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg. Southwest Germany. **Landscape and Urban Planning**, 148, p. 37–50. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.12.004>

LIU, D.; XIA, F. Assessing object-based classification: advantages and limitations. **Remote Sensing Letters**, 4, p. 187–194, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161003743173>.

LOWRY, W. P. Empirical estimation of the urban effects on climate: A problem analysis. **J. Appl. Meteorol.**, 16, p. 129–135, 1977. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1977\)016<0129:EEOUEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1977)016<0129:EEOUEO>2.0.CO;2)

MA, L.; LI, M.; MA, X.; CHENG, L.; DU, P.; LIU, Y. A review of supervised object-based land-cover image classification. ISPRS J. Photogramm. **Remote Sens.**, 130, p. 277–293, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.06.001>.

MAGGIOTTO, G.; BUCCOLIERI, R.; SANTO, M. A.; LEO, L. S.; DI SABATINO, S. Validation of temperature-perturbation and CFD-based modelling for the prediction of the thermal urban environment: the Lecce (IT) case study. **Environ. Model. Softw.**, 60, p. 69–83, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.06.001>

MAGLIOCCO, A.; PERINI, K. Urban environment and vegetation: comfort and urban heat island mitigation. **TECHNE - Journal of Technology for Architecture and Environment**, 8, p. 155–162, 2014. DOI: <https://doi.org/10.13128/Techne-15070>

MALEKI, A.; MAHDAVI, A. Evaluation of urban heat islands mitigation strategies using 3dimensional urban microclimate model ENVI-met. **Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)**, 17 (3), p. 357–371, 2016.

MASSON, V. A Physically-Based Scheme for the Urban Energy Budget in Atmospheric Models. **Boundary-Layer Meteorology**, 94, p. 357–397, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1002463829265>

MASSON, V. Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities. **Theoretical and Applied Climatology**, 84, p. 35–46, 2006. DOI: [10.1007/s00704-005-0142-3](https://doi.org/10.1007/s00704-005-0142-3)

MCPHERSON, E. G. Cooling urban heat islands with sustainable landscapes. In: Platt, R. H; Rowntree, R. A.; Muick, P. C. (Eds.). **The Ecological City: Preserving and Restoring Urban Biodiversity**, University of Massachusetts Press, 1994.

MENDES, F.H.; ZANLORENZI, H.C.P.; DOBBERT, L.Y.; PRATA-SHIMOMURA, A.R.; SILVA FILHO, D.F. Alterações microclimáticas na Praça José Bonifácio em Piracicaba (SP). In: XVIII Congresso Brasileiro de Arborização Urbana, 2014, Rio de Janeiro. XVIII CBAU, 2014.

MIDDEL, A.; CHHETRI, N. City of Phoenix cool urban spaces project. **Urban forestry and cool roofs: Assessment of heat mitigation strategies in Phoenix**. 2014. Disponível em: https://www.phoenix.gov/parkssite/MediaAssets/NOAA_PHX_UrbanSpaces_HighRes_Rep.pdf. Acesso em: 23 ago. 2017.

MIDDEL, A.; CHHETRI, N.; QUAY, R. Urban forestry and cool roofs: Assessment of heat mitigation strategies in Phoenix residential neighborhoods. **Urban Forestry & Urban Greening**, 14, p.178–186, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2014.09.010>

MIDDEL, A.; HÄB, K.; BRAZEL, A. J.; MARTIN, C.; GUHATHAKURTA, S. Impact of urban form and design on microclimate in Phoenix, AZ. **Landsc. Urban Plan.**, 122, p. 16–28, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.004>

MIDDEL, A.; TURNER, V. K.; SCHNEIDER, F. A.; ZHANG, Y.; STILLER, M. Solar reflective pavements—A policy panacea to heat mitigation? **Environ. Res. Lett.**, 15, p. 1–8, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab87d4>

MILLS, G. Urban climatology: history, status and prospects. **Urban Clim.**, 10, p. 479–89, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2014.06.004>.

MONTEIRO, C. A. F. **Teoria e Clima Urbano**. São Paulo: USP, 1976.

MORISHITA, C.; SORGATO, M. J.; VERSAGE, R.; TRIANA, M. A.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS, R. **Catálogo de propriedades térmicas de paredes e coberturas**. Florianópolis: LabEEE, 2010. Disponível em: http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/catalogo_caixa_v4.PDF. Acesso em: jan. 2019.

NAKATA-OSAKY, C. M. **Adaptação de um modelo simplificado para verificação da influência da geometria urbana na formação de ilha de calor noturna**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.

NEGRELOS, E. P.; CUCATO, J. A.; SCATALON, A. P. Habitação e planejamento no estado de São Paulo de 1965 a 1992. Os casos de Presidente Prudente e Votuporanga como contribuição historiográfica sobre a produção das COHABs e dos PDDIs. In: XVIII ENANPUR - Encontro Nacional da ANPUR. Tempos em/de transformação - Utopias, 2019, Natal/RN.

NEUFERT, E. **Arte de projetar em arquitetura**. 18° ed. São Paulo: Gustavo Gili, 2013.

NOGUEIRA, A. M. P. **Configuração urbana e microclimas**: estudo em loteamento horizontal de Maceió-Alagoas. 2011. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2011.

NUNES, J. O. R. Caracterização dos aspectos ambientais da Região Administrativa de Presidente Prudente. In: WHITACKER, A. M.; MELAZZO, E. S. (coord.) **Conjuntura Prudente 2011**. Presidente Prudente, FCT/UNESP, 2011.

OKE, T. R. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. **Atmosphere**, 14:4, p. 268–277, 1976. DOI: 10.1080/00046973.1976.9648422

OKE, T. R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. **Journal of Climatology**, 1, 237–254. 1981. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.3370010304>

OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal Royal Meteorological Society**, 108, p. 1–24, 1982. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. London: Methuen & Co. 2nd edn. 1987, 435p.

OKE, T. R. Street Design and Urban Canopy Layer Climate. **Energy and Buildings**, 11, 103–113, 1988. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90026-6)

OKE, T. R. Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. **IOM Rep. 81, WMO/TD-No. 1250**, 47 pp., 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/265347633_Initial_guidance_to_obtain_representative_meteorological_observations_at_urban_sites.

OKE, T. R.; MILLS, G.; CHRISTEN, A.; VOOGT, J. A. **Urban Climates**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781139016476>

PEREIRA, S. R. Expansão e estruturação no espaço urbano de Presidente Prudente-SP. **Formação** (Presidente Prudente), Presidente Prudente-SP, v. 2, p. 55–72, 2006.

PRESIDENTE PRUDENTE. **Lei complementar nº 234, de 27 de dezembro de 2018**. Dispõe sobre a Lei de Normas para Edificações do Município, e dá outras providências. Presidente Prudente: Câmara Municipal, 2018. Disponível em: http://www.presidenteprudente.sp.gov.br/site/leis_decretos_detalhe.zxhtml?t=3&a=2018&n=234&c=. Acesso em: jan. 2019.

ROTH, M. Review of urban climate research in (sub)tropical regions. **Int. J. Climatol.**, 27, p. 1859–73, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1591>

ROTH, M.; LIM, V. H. Evaluation of canopy-layer air and mean radiant temperature simulations by a microclimate model over a tropical residential neighbourhood. **Building and Environment**, 112, p. 177–189, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.026>

SALATA, F.; GOLASI, J.; PETITTI, D.; VOLLARO, E. L.; COPPI, M.; VOLLARO, A. L. Relating microclimate, human thermal comfort and health during heat waves: An analysis of heat island mitigation strategies through a case study in an urban outdoor environment. **Sustainable Cities and Society**, 30, p. 79–96, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2017.01.006>

SANTAMOURIS, M. Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. **Solar Energy**, 103, p. 682–703, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>.

SCHMITZ, L. K. **Reestruturação Urbana e Conforto Térmico em Curitiba/PR:** diagnóstico, modelagem e cenários. 2014. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

SHINZATO, P. **O impacto da vegetação nos microclimas urbanos.** 2009. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SHINZATO, P. **Impacto da vegetação nos microclimas urbanos em função das interações solo-vegetação-atmosfera.** 2014. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

SILVA, M. C.; OLIVEIRA, T. A.; VIANA, Y. C. G.; FERREIRA, C. C. M. Campos térmicos urbanos: estudo de caso na zona sul da cidade de Juiz de Fora-MG, a partir de um modelo geoespacial. **Revista de Geografia**, 8 (2), p. 65–88, 2018.

SILVA, M. P. **Simulação termoenergética e análise econômica do uso de telhados de alta refletância solar em uma residência unifamiliar.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

SILVA, R. B. O programa de desfavelamento e loteamentos urbanizados em Presidente Prudente-SP. **Formação** (Presidente Prudente), v. 1, p. 129–146, 2008.

SOUCH, C.; GRIMMOND C. S. B. Applied climatology: urban climate. **Progress in Physical Geography**, 30, p. 270–279, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1191/0309133306pp484pr>

STEWART, I. D. Landscape representation and urban–rural dichotomy in empirical urban heat island literature, 1950–2006. **Acta Climatologica et Chorologica**, 40, p. 111–121, 2007.

STEWART, I. D. **Redefining the urban heat island.** 2011. Thesis (Doctor of Philosophy). The Faculty of Graduate Studies, The University of British Columbia, Vancouver, 2011.

STEWART, I. D. Developing a field guide to identify ‘local climate zones’ in cities. In: 10th International Conference on Urban Climate & 14th Symposium on the Urban Environment, August 6–10, 2018, New York City, USA.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local climate zones for urban temperature studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 93 (12), p. 1879–1900, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>

TALEGHANI, M.; SAILOR, D.; BAN-WEISS, G. A. Micrometeorological simulations to predict the impacts of heat mitigation strategies on pedestrian thermal comfort in a

Los Angeles neighborhood. **Environ. Res. Lett**, 11, p. 1–12, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/2/024003>

TOPARLAR, Y.; BLOCKENA, B.; MAIHEUB B.; VAN HEIJSTD, G. J. F. A review on the CFD analysis of urban microclimate. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 80, p. 1613–1640, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.248>

TSOKA, S.; TSIKALOUDAKI, A.; THEODOSIOU, T. Analyzing the ENVI-Met Microclimate Model 's Performance and Assessing Cool Materials and Urban Vegetation Applications – A Review. **Sustainable Cities and Society**, 43, p. 55–76, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.009>

TSOKA, S.; THEODOSIOU, T.; TSIKALOUDAKI, K.; FLOURENTZOU, F. Modeling the performance of cool pavements and the effect of their aging on outdoor surface and air temperatures. **Sustainable Cities and Society**, 42, p. 276–288, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.07.016>

WANG, Y.; BERARDI, U.; AKBARI, H. Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada. **Energy and Buildings**, 114, p. 2–19, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.046>

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, 2, p. 184–194, 1981.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 63(11), p. 1309–1313, 1982.

YANG, X.; ZHAO, L.; BRUSE, M.; MENG, Q. Evaluation of a microclimate model for predicting the thermal behavior of different ground surfaces. **Building and Environment**, 60, p. 93–104, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.008>

APÊNDICES

APÊNDICE A – Caracterização dos pontos de medição

A localização dos sensores nas LCZs se baseou nas recomendações de Oke (2004) e Stewart (2011). Segundo os autores, as diretrizes da Organização Meteorológica Mundial (*World Meteorological Organization – WMO*, 2006) que recomendam a instalação de sensores em locais abertos e gramados não são adequadas para as áreas urbanas, pois as influências de árvores, edifícios, carros e superfícies pavimentadas, evitadas na área rural, são as mesmas que os instrumentos no urbano pretendem capturar.

Com relação à instalação de sensores de temperatura em abrigos meteorológicos padronizados, a diretriz pode ser flexível no caso dos instrumentos urbanos, tendo em vista que a segurança em espaços públicos exige uma instalação discreta, geralmente em postes, placas de sinalização ou muros. No entanto, independentemente da localização, os sensores devem ser instalados em abrigos de radiação que permitam ventilação.

Além da recomendação de que os sensores na camada do dossel sejam instalados sobre superfícies relativamente uniformes em morfologia, cobertura da terra e atividade antrópica (STEWART, 2011), há a necessidade de se documentar os metadados do local e dos instrumentos com precisão. Essa descrição é fundamental “[...] para garantir que o usuário final dos dados não tenha dúvida sobre as condições em que os dados foram registrados, coletados e transmitidos, para tirar conclusões precisas de sua análise” (AGUILAR et al., 2003, p. 2, tradução nossa)²³.

²³ [...] to ensure that the final data user has no doubt about the conditions in which data have been recorded, gathered and transmitted, in order to extract accurate conclusions from their analysis.

Quadro A.1 Características dos pontos de medição das LCZs

LCZ 2		
	<p>Latitude: 460347 Longitude: 7553304 Altitude: 482 m Orientação: WNW-ESE Distância média entre os edifícios: 8 m Altura média dos edifícios: 11 m Razão H/W: 1,4 Tipo de edifício: prédios comerciais Material de construção: concreto Material de cobertura: telhados metálicos e de cerâmica</p>	
<p>O sensor HOBO (U23-002), com abrigo de radiação solar RS3, foi instalado em haste de alumínio a aproximadamente 1,70 m de altura da superfície pavimentada.</p>		
LCZ 3		
	<p>Latitude: 455638 Longitude: 7554789 Altitude: 416 m Orientação: WNW-ESE Largura da via urbana: 8 m Calçada: 1,5 m Altura média do edifício: 3 m Razão H/W: 0,31 Altura média das árvores: 6 m Tipo de edifício: residência Material de construção: concreto Material de cobertura: telhado de fibrocimento</p>	
<p>A estação meteorológica <i>Davis Vantage Pro2</i> foi instalada em uma barra de ferro para antena de televisão, anexada à fachada da residência a aproximadamente 2 m de altura da superfície pavimentada.</p>		
LCZ B		
		<p>Latitude: 464159 Longitude: 7552443 Altitude: 396 m Orientação: ENE-WSW Altura média das árvores: 8 m Espaçamento médio entre as árvores: 3 m Razão H/W: 2,6 Tipo de vegetação: rasteira, arbustiva e arbórea</p>
<p>O sensor HOBO (U23-002), com abrigo de radiação solar RS3, foi instalado em um tronco de árvore a aproximadamente 1,7 m de altura da superfície permeável.</p>		

Quadro A.2. Características dos pontos das estações meteorológicas

INMET	
	 <p>Latitude: 457865 Longitude: 7553849 Altitude: 432 m</p> <p>Características do entorno: estação instalada sobre superfície permeável com vegetação rasteira e árvores com cerca de 10 m de altura. Proximidade com bairro residencial.</p>
<p>A estação meteorológica de superfície automática (Presidente Prudente-A707, Código OMM: 86863) está localizada no campus da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, na malha urbana da cidade.</p>	
ASOS	
	<p>Latitude: 456987 Longitude: 7547372 Altitude: 450 m</p> <p>Características do entorno: superfície predominantemente permeável, cobertura vegetal rasteira e árvores esparsas, vias de acesso pavimentadas e construções esparsas.</p>
<p>Os dados meteorológicos foram coletados a partir da estação localizada no aeroporto estadual de Presidente Prudente [SBDN], que utiliza o sistema ASOS (<i>Automated Surface Observing System</i> – Sistema Automatizado de Observação de Superfície).</p>	

Figura A.1 Imagens da LCZ 2 com a câmera termográfica FLIR E5 em 6 de julho de 2019

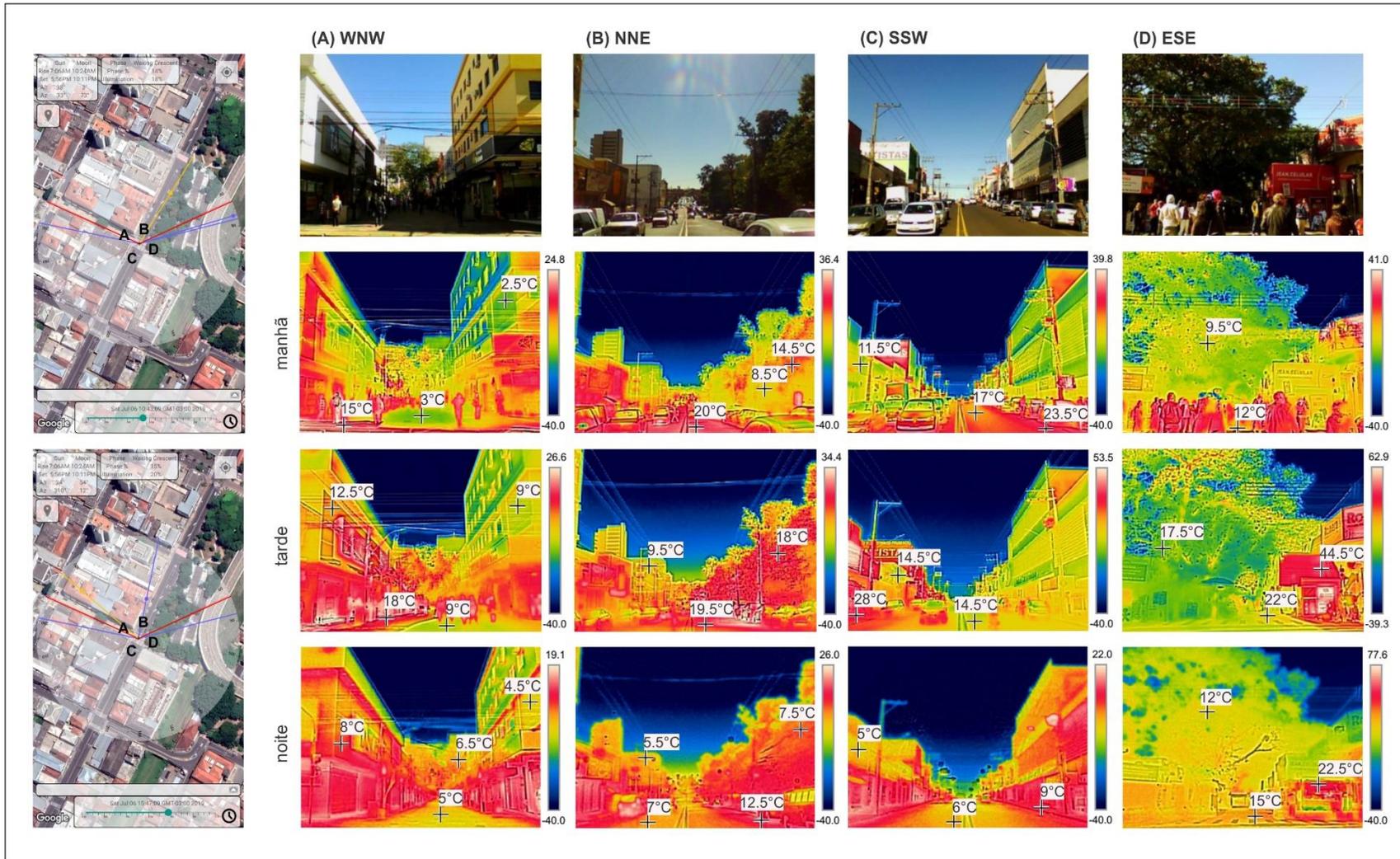


Figura A.2 Imagens da LCZ 3 com a câmera termográfica FLIR E5 em 6 de julho de 2019

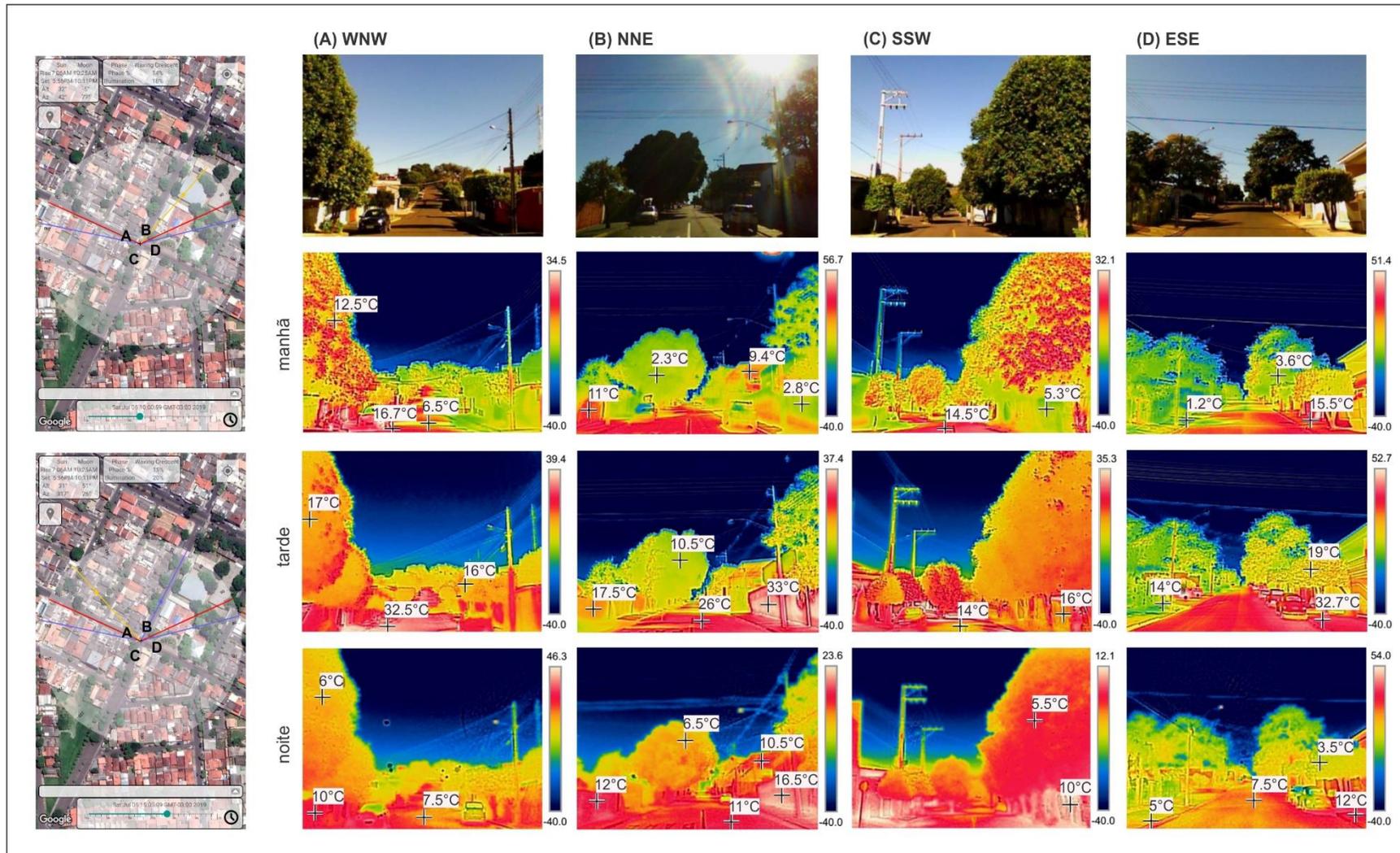
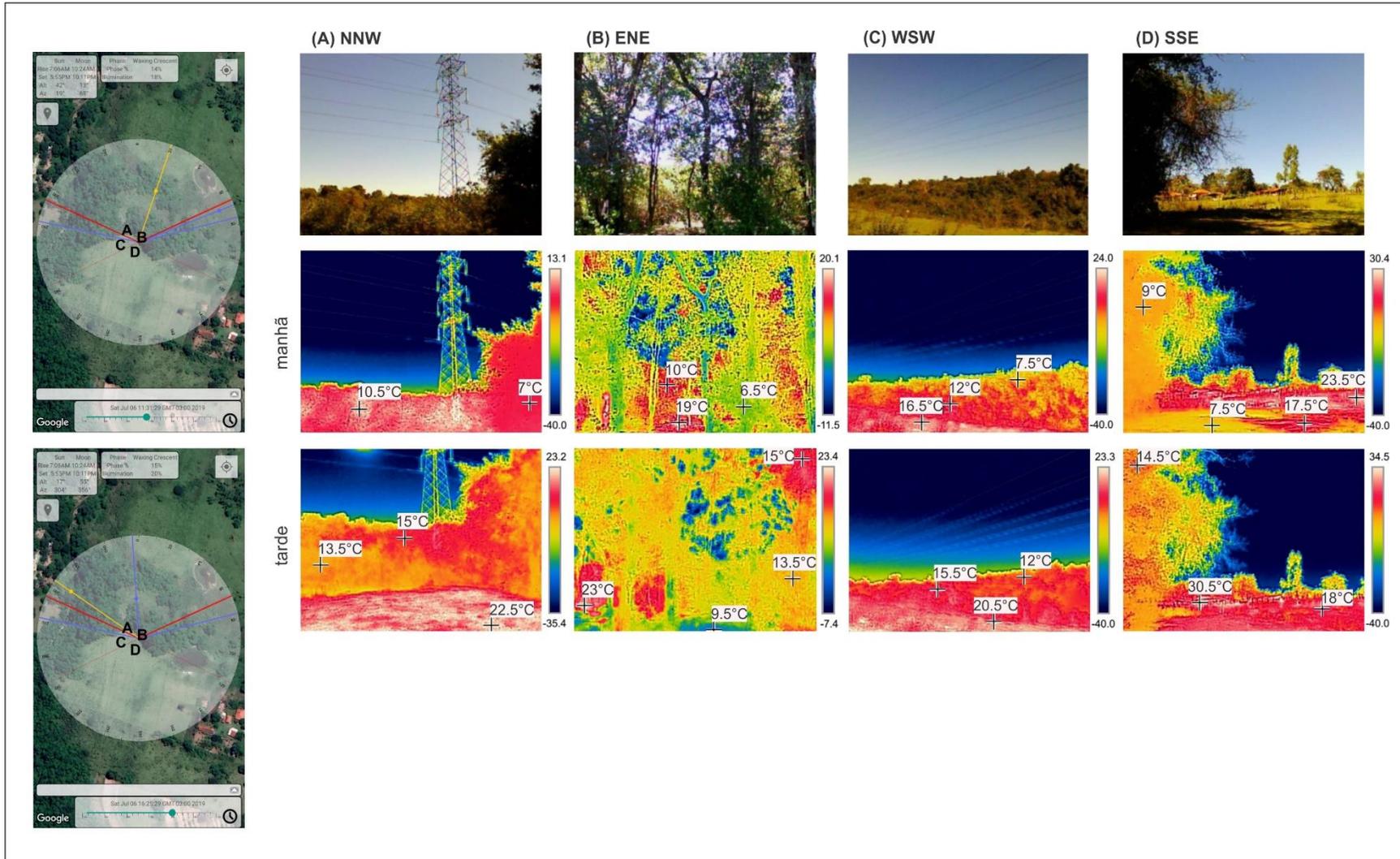


Figura A.3 Imagens da LCZ B com a câmera termográfica FLIR E5 em 6 de julho de 2019



APÊNDICE B – Tabelas de diferenças de temperatura por pares de LCZ ($\Delta T_{LCZ\ X-Y}$) em junho e dezembro de 2015

Figura B.1 Tabelas de diferenças de temperatura por pares de LCZ ($\Delta T_{LCZ\ X-Y}$) às 21:00 h em junho de 2015

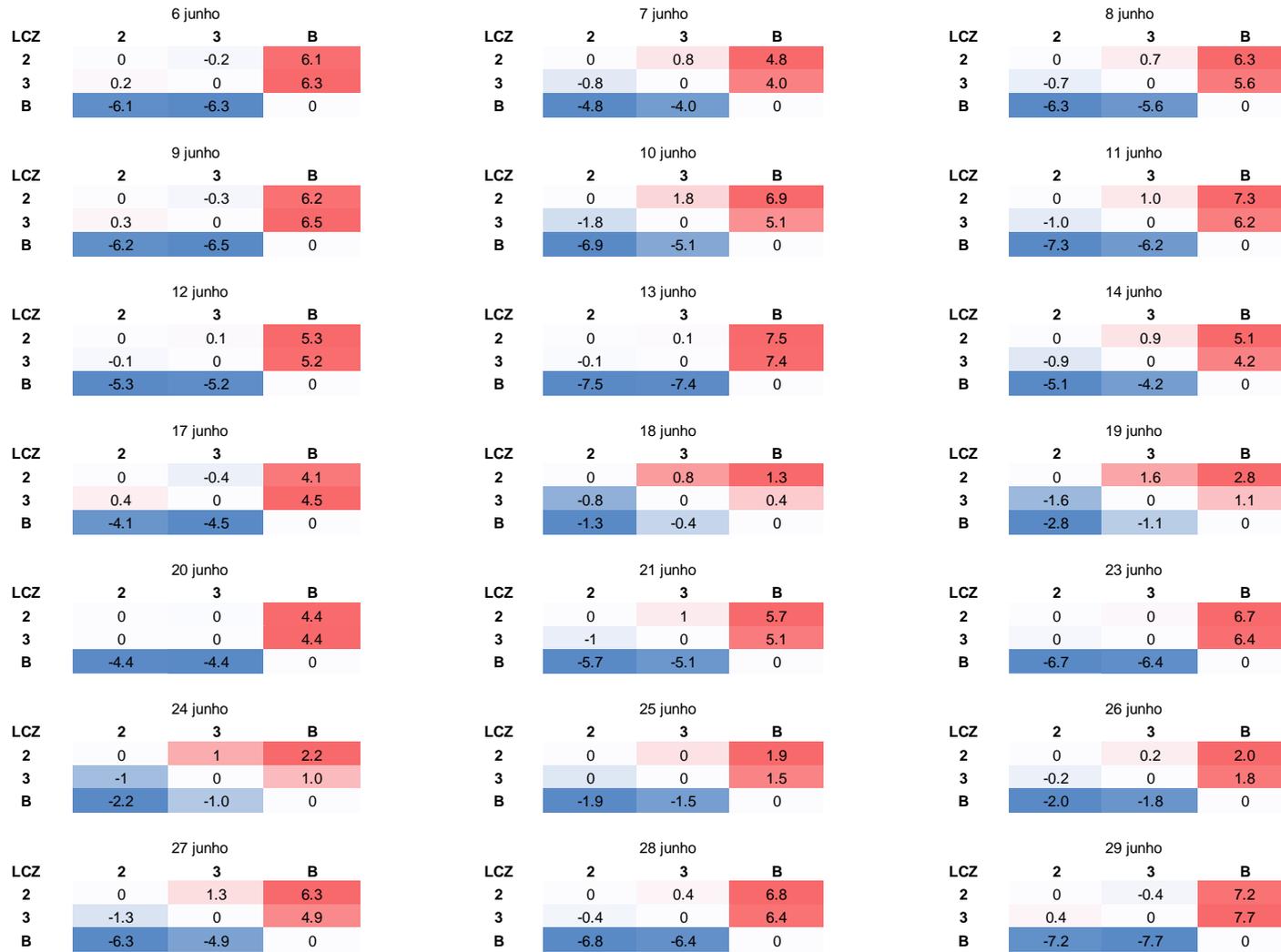
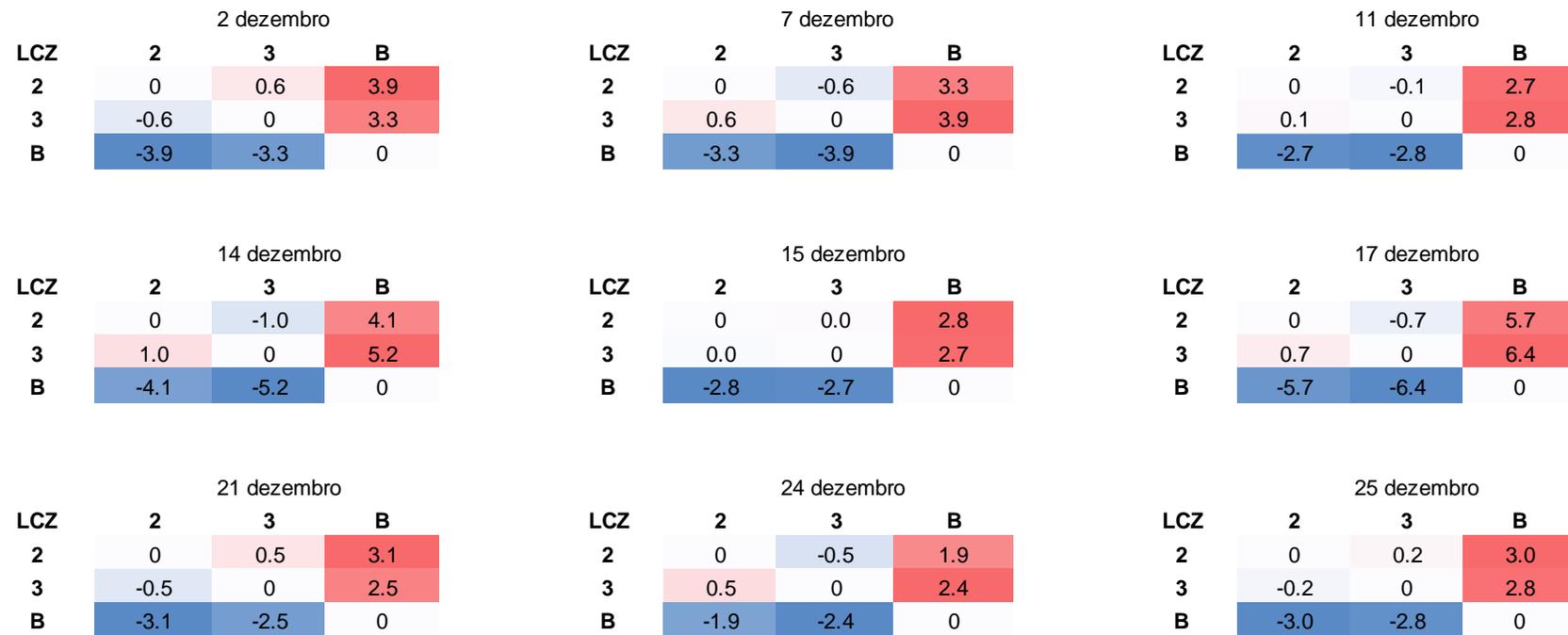


Figura B.2 Tabelas de diferenças de temperatura por pares de LCZ ($\Delta T_{LCZ \times Y}$) às 21:00 h em dezembro de 2015

APÊNDICE C – Gráficos de dispersão dos dados observados nas LCZs e simulados com as forçantes ASOS e INMET no processo de calibração do modelo ENVI-met

Figura C.1 Correlação entre os dados observados na LCZ 2 e simulados com as forçantes ASOS e INMET no processo de calibração do modelo ENVI-met

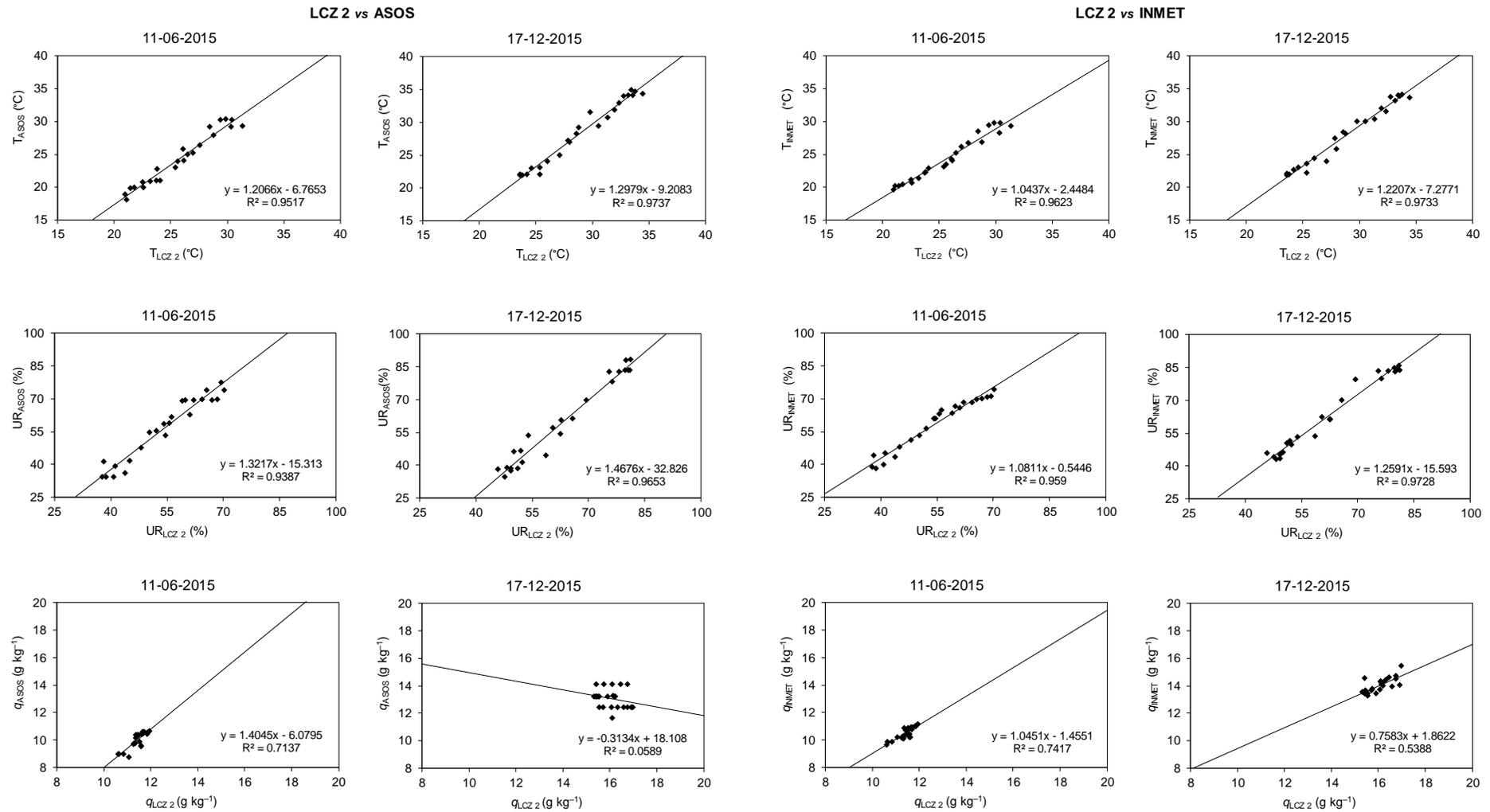


Figura C.2 Correlação entre os dados observados na LCZ 3 e simulados com as forçantes ASOS e INMET no processo de calibração do modelo ENVI-met

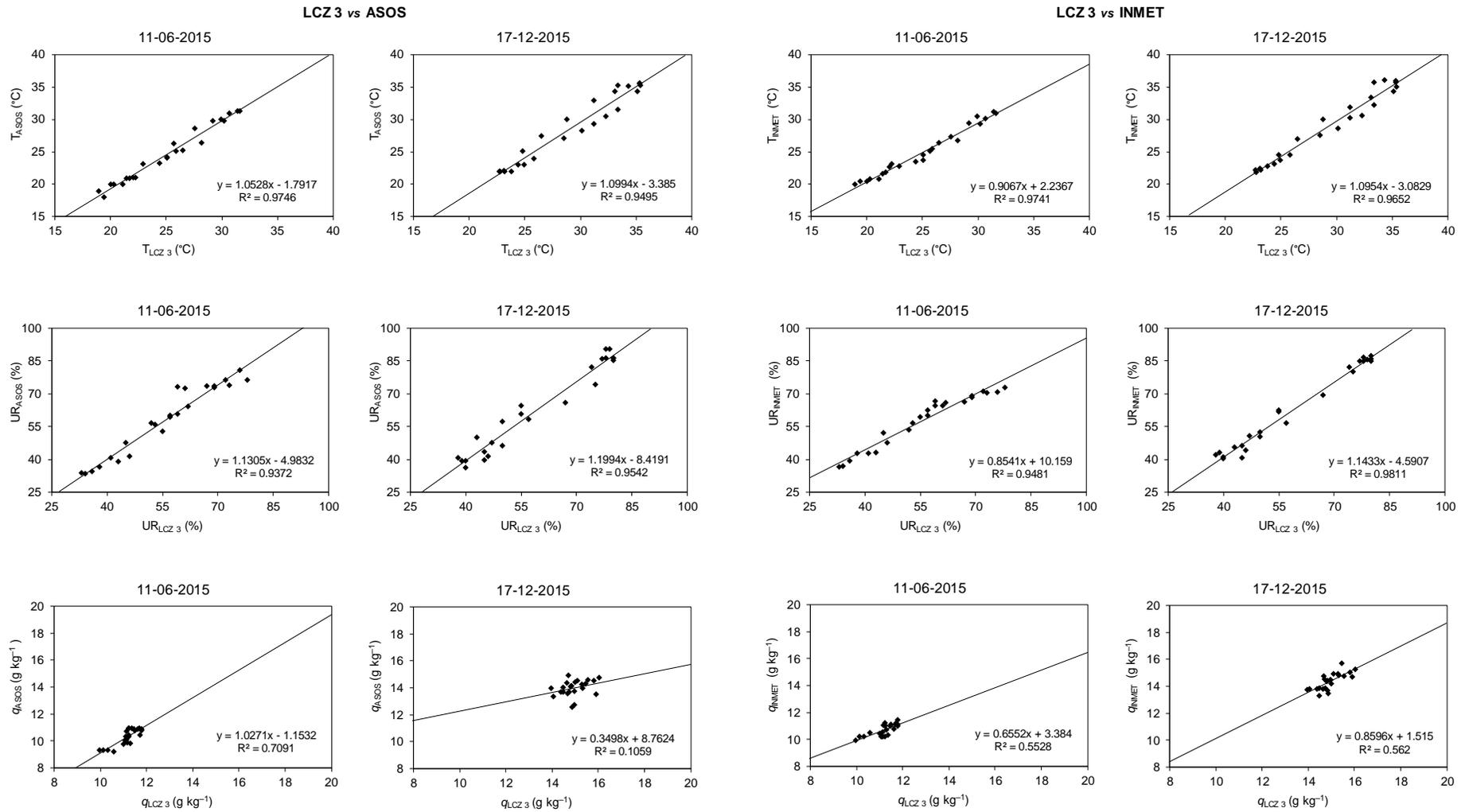
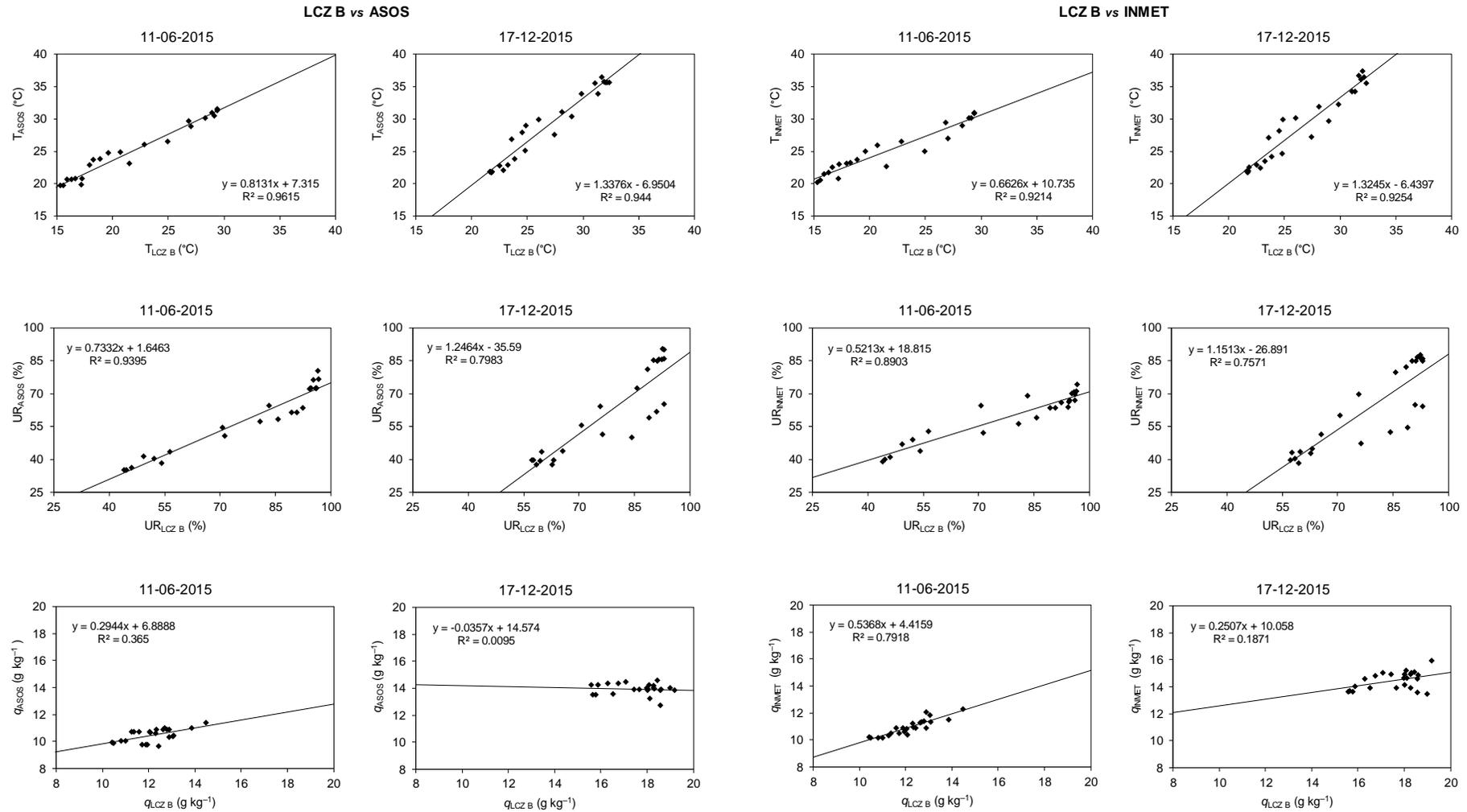


Figura C.3 Correlação entre os dados observados na LCZ B e simulados com as forçantes ASOS e INMET no processo de calibração do modelo ENVI-met



APÊNDICE D – Configuração das áreas de domínio com diferentes tamanhos

Os seguintes procedimentos foram realizados para otimizar a digitalização dos domínios maiores:

- 1) ArcMap (base vetorial das LCZs):
 - a. rotacionar os vetores *.shp* das LCZs para alinhar à grade do ENVI-met;
 - b. editar a tabela de atributos para atribuir códigos das superfícies, edifícios, materiais e plantas do *Database* aos elementos de cada LCZ;
 - c. criar *buffers* a partir do ponto das LCZs onde os sensores foram instalados.

- 2) Monde (arquivos de entrada da área das LCZs):
 - a. selecionar o projeto das LCZs, criar novo mapa e importar os vetores (*.shp* das LCZs e dos *buffers*);
 - b. exportar os vetores *.shp* das LCZs para as camadas de modelagem, atribuindo valores da tabela de atributos do ArcMap ao tipo de camada (superfície, edifício, vegetação);
 - c. editar subáreas a partir dos vetores *.shp* com os *buffers* de diferentes tamanhos;
 - d. criar área de modelo a partir da seleção das camadas de modelagem, da subárea de interesse e definição da resolução espacial das grades;
 - e. salvar arquivo da área do domínio *.INX*.

- 3) Spaces (edição dos arquivos de entrada da área das LCZs):
 - a. importar arquivo *.INX* da área de domínio elaborada no *Monde* e editar/ajustar geometria e outras configurações (*nesting grids*, grade vertical, etc.).

**APÊNDICE E – Mapas dos cenários base da temperatura do ar nas LCZs 2 e 3 com
legenda padronizada**

Figura E.1 Distribuição da temperatura do ar a 2 m da superfície na LCZ 2

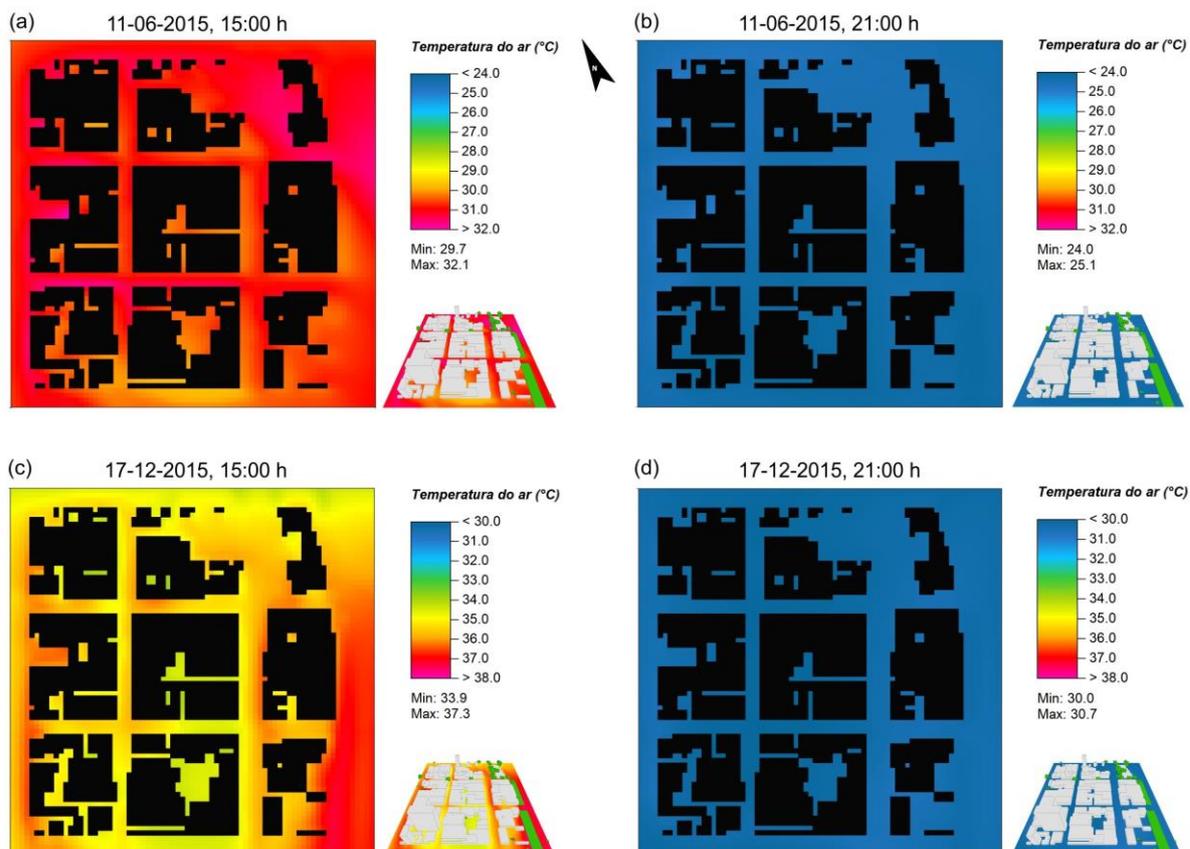
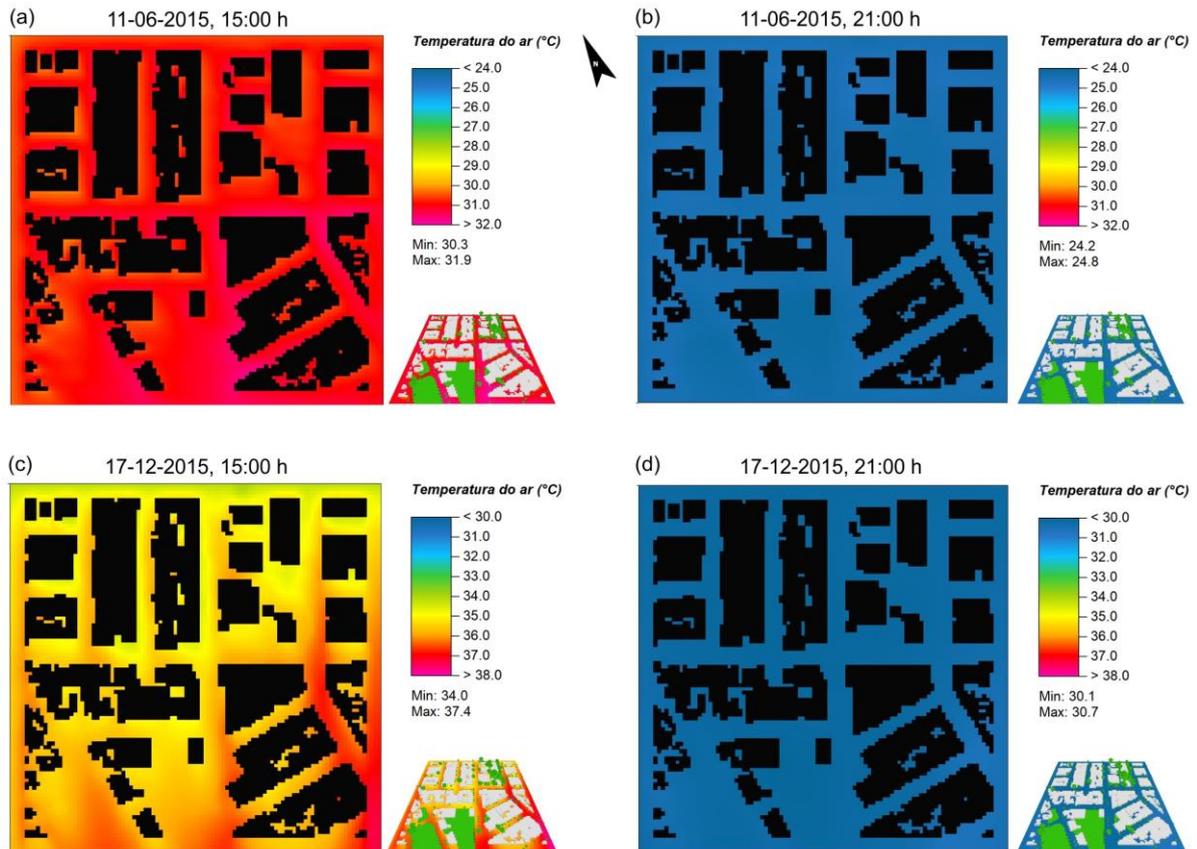


Figura E.2 Distribuição da temperatura do ar a 2 m da superfície na LCZ 3



ANEXOS

ANEXO A – Câmera termográfica FLIR E5

Quadro A.I Especificações gerais da câmera FLIR E5

	Precisão	$\pm 2^{\circ}\text{C}$ ($\pm 3,6^{\circ}\text{F}$) ou $\pm 2\%$ da leitura para temperatura ambiente 10°C a 35°C ($+50^{\circ}\text{F}$ a 95°F) e temperatura de objetos acima de $+0^{\circ}\text{C}$ ($+32^{\circ}\text{F}$)
	Tipo de detector	Microbolômetro não refrigerado
	Campo de visão (FOV)	$45^{\circ} \times 34^{\circ}$
	Resolução de infravermelho	120 x 90 pixels
	Imagens Dinâmicas Multiespectrais (MSX)	Imagem infravermelha melhorada com detalhe de câmera de luz visível
	Faixa de temperatura de objetos	-4°F a $+482^{\circ}\text{F}$ (-20°C a $+250^{\circ}\text{C}$)
	Sensibilidade térmica/NETD	$<0,10^{\circ}\text{C}$ ($0,27^{\circ}\text{F}$)/ $<100\text{ mK}$

Fonte: Teledyne FLIR. Disponível em: <https://prod.flir.com.br/products/e5/>. Acesso em: 14 out. 2019.

ANEXO B – Propriedades da cobertura da superfície e dos solos

Tabela B.I Propriedades da cobertura da superfície e dos solos

<i>Código ENVI-met</i>	<i>Teor de água na saturação (m³/m³)</i>	<i>Teor de água na capacidade de campo (m³/m³)</i>	<i>Teor de água no ponto de murcha (m³/m³)</i>	<i>Potencial matricial (m)</i>	<i>Condutivida de hidráulica (m/s 10⁻⁶)</i>	<i>Capacidade de calor volumétrico (J/(m³K) 10⁶)</i>	<i>Constante b*²⁴ Clapp e Hornberger</i>	<i>Condutivida de térmica (W/(mK))</i>
Asphalt with Basalt [0000AB]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,251	0,000	0,900
Cement Concrete [0000ZB]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,083	0,000	1,630
Sandy Loam [1000SL]	0,435	0,195	0,114	-0,218	34,100	1,320	4,900	0,000
Sandy Clay Loam [0000TS]	0,420	0,255	0,175	-0,299	6,300	1,175	7,120	0,000

*Constante na equação de Clapp e Hornberger que relaciona a saturação relativa do solo com a condutividade relativa do solo

Fonte: Default ENVI-met

Tabela B.II Propriedades dos perfis de solo

<i>Código ENVI-met</i>	<i>Rugosidade (z0)</i>	<i>Albedo</i>	<i>Emissividade</i>	<i>Superfície irrigada</i>
Asphalt road [0100ST]	0,010	0,160	0,900	falso
Pavement (concrete), used/ dirty [0100PP]	0,010	0,230	0,900	falso
Default Unsealed Soil (Sandy Loam) [010000]	0,015	0,200	0,980	falso
Water [0100WW]	0,010	0,000	0,960	falso

Fonte: Default ENVI-met

²⁴ CLAPP, R. B.; HORNBERGER, G. M. Empirical equations for some hydraulic properties. **Water Resour. Res.**, 14, p. 60–604, 1978.

ANEXO C – Descrição das estatísticas de desempenho

O coeficiente de Pearson (r) fornece informações sobre a magnitude da associação ou correlação, bem como a direção do relacionamento entre duas variáveis. Este coeficiente apresenta valores entre -1 (correlação perfeita negativa) e 1 (correlação perfeita positiva), sendo que 0 significa que não há dependência linear entre as duas variáveis.

$$r = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) (P_i - \bar{P})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (\text{C.1})$$

onde O_i é a variável observada, P_i é a variável prevista, \bar{O} é a média da variável observada e \bar{P} é a média da variável prevista pelo modelo.

Já o coeficiente de determinação (r^2), obtido ao elevar o coeficiente de Pearson ao quadrado, representa a proporção da variação de uma variável dependente que pode ser explicada pela variação de uma ou mais variáveis independentes. Em suma, esse coeficiente determina o quão bem os dados modelados se ajustam aos dados de observação.

O RMSE (*Root Mean Square Error*) informa sobre o tamanho real do erro produzido pelo modelo, resumindo a diferença média entre os valores observados e modelados:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (\text{C.2})$$

Além disso, é importante saber quanto do RMSE é sistemático ($RMSE_s$) e não sistemático ($RMSE_u$), porque as magnitudes desses erros podem melhorar a compreensão da capacidade preditiva de um modelo. Em um bom modelo, $RMSE_s$ deve se aproximar de zero, enquanto $RMSE_u$ se aproxima do RMSE (WILLMOTT, 1981, 1982):

$$RMSE_s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{P}_i - O_i)^2} \quad (\text{C.3})$$

e

$$RMSE_u = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - \hat{P}_i)^2} \quad (\text{C.4})$$

onde \hat{P}_i é derivado de $\hat{P}_i = a + bO_i$.

O MAE (*Mean Absolute Error*) corresponde à média dos erros absolutos, isto é, da diferença entre o valor previsto e o valor real, indicando o tamanho médio de um erro que se pode esperar de uma previsão.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad (C.5)$$

O MBE (*Mean Bias Error*) indica a tendência na previsão. Um viés ou erro positivo representa que os dados estão superestimados, enquanto valores negativos indicam o quanto o modelo está sendo subestimado.

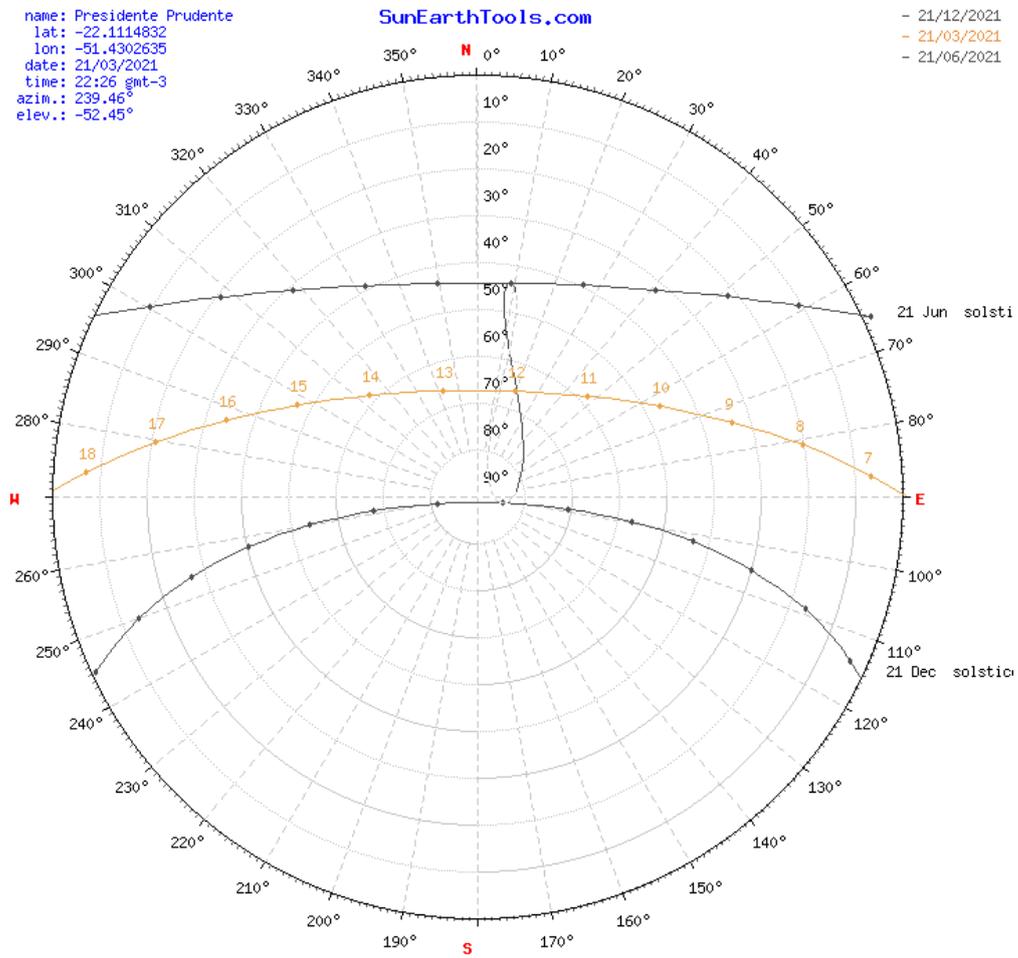
$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{P} - \bar{O}) \quad (C.6)$$

Por sua vez, d (*Index of Agreement*) é uma estatística descritiva para avaliação de modelo e mede o grau em que os valores simulados são livres de erros. O índice varia de 0,0 a 1,0, e $d = 1,0$ indica perfeita concordância entre os valores de O e P , complementando as informações do RMSE (WILLMOTT, 1981, 1982; MIDDEL et al., 2014).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (C.7)$$

ANEXO D – Diagrama solar

Figura D.I Diagrama solar para Presidente Prudente



Fonte: Sun Earth Tools. Disponível em: www.sunearthtools.com. Acesso em: mar. 2021.