



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE – SP

ALINE PEREIRA LIMA

**TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE E DIMENSÃO SOCIAL NA
GÊNESE DO CLIMA URBANO DE PRESIDENTE PRUDENTE-SP**

Presidente Prudente – SP

2022



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE – SP

ALINE PEREIRA LIMA

**TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE E DIMENSÃO SOCIAL NA
GÊNESE DO CLIMA URBANO DE PRESIDENTE PRUDENTE-SP**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Presidente Prudente, para obtenção do título de Doutora em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. João Lima
Sant'Anna Neto

Presidente Prudente – SP

2022

FICHA CATALOGRÁFICA

L732t	Lima, Aline Pereira Temperatura de superfície e dimensão social na gênese do clima urbano de Presidente Prudente - SP / Aline Pereira Lima. -- Presidente Prudente, 2022 182 f. : il. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente Orientador: João Lima Sant'Anna Neto 1. Climatologia Urbana. 2. Climatologia Geográfica. 3. Sensoriamento Remoto. 4. Planejamento Urbano. 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.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO DA TESE: TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE E DIMENSÃO SOCIAL NA GÊNESE
DO CLIMA URBANO DE PRESIDENTE PRUDENTE-SP**

AUTORA: ALINE PEREIRA LIMA

ORIENTADOR: JOÃO LIMA SANTANNA NETO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em
GEOGRAFIA, área:

Produção do Espaço Geográfico pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JOÃO LIMA SANTANNA NETO (Participação Presencial)
Programa de Pós-graduação em Geografia / Unesp/FCT - Câmpus de Presidente Prudente

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

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

Profa. Dra. ANA MONTEIRO (Participação Virtual)
UNIVERSIDADE DO PORTO-PORTUGAL

Prof. Dr. JAVIER MARTIN-VIDE (Participação Virtual)
Universidade de Barcelona

Presidente Prudente, 18 de julho de 2022



DEDICATÓRIA

Ao Universo, pela oportunidade e pelos “recursos”.

À minha família, Vera, Hélio, Andréia, Renan, Ayane e Rodrigo, pelo suporte e apoio.

AGRADECIMENTOS

Sem dúvida agradeço primeiramente ao Prof. João Lima Sant’Anna Neto, pela orientação, paciência, confiança e amizade que partilhou comigo em todas as etapas do desenvolvimento desse trabalho. Muito obrigada pelo privilégio de ser a “última orientanda”, e por me ajudar com seu brilhantismo a despertar para questões da relação sociedade-natureza e para a dimensão social e humana da climatologia, bem como a vencer com leveza tantos desafios desse ciclo.

Um agradecimento especial aos membros da banca do exame de qualificação e defesa, professores Margarete Amorim, Vincent Dubreuil, Ana Monteiro e Javier Martin-Vide, pela leitura atenta do trabalho, falas construtivas e considerações sempre muito pertinentes.

Não poderia deixar de agradecer aos professores João Osvaldo Nunes, Tadeu Tommaselli e Miriam Silvestre da FCT-Unesp, por suas contribuições de tantas naturezas - fornecimento de dados, esclarecimentos sobre metodologias e compartilhamento de experiências e angústias, entre outras -, nesta jornada do doutorado.

Muito obrigada aos colegas da pós-graduação em Geografia e do grupo de pesquisa GAIA pela parceria e troca de conhecimentos e reflexões ao longo desses anos: Gustavo, Tiago, Guilherme, Lidiane, Luís, Mari, Carol, Marco, Camila, Karime, Lindberg, Larissa, Renata, Janaína, Mariana, Dani, Washington e Ari. Com cada um de vocês tive pelo menos uma conversa que construiu um degrau na trajetória desta pesquisa (e da pesquisadora) do ponto de vista teórico, técnico, crítico, mas sobretudo do ponto de vista humano.

Agradeço a minha família, Vera, Hélio, Andréia, Renan, Ayane e Rodrigo, por terem me apoiado nesse caminho, tanto quanto outros familiares como a Rita e a tia Elvira. Eles souberam compreender meu estresse, minha falta de tempo e energia para outras atividades, tanto quanto torcido por mim e proporcionado momentos de descontração e lazer.

Não poderia deixar de ressaltar que as “batalhas” também foram dele, Rodrigo, meu companheiro e parceiro, que passou pelos mesmos desafios que os anteriores, só que

mais de perto e intensamente, mostrando sabedoria, carinho e maturidade pra me ajudar a equilibrar as dezenas de ideias dentro da minha mente.

Dedico agradecimentos aos amigos de longa data: Marcito, Allan, Iza, Carol, Massumi, Thaís e Kléber, também pela compreensão com minha ausência e pelo apoio aos meus planos e sonhos.

Sou muito grata aos colegas do Núcleo de Perícias Criminalísticas de Presidente Prudente, pela troca de informações, empatia em momentos complicados e de humor duvidoso, e colaboração nos problemas do dia-a-dia; especialmente ao Camilo e a Márcia (*in memoriam*), verdadeiros heróis, cuja fé na Educação, a honestidade e a bondade foram e sempre serão inspiradoras todos os dias da minha vida.

Muito obrigada aos funcionários da seção de pós-graduação, principalmente Aline, Cinthia e Anderson, que sempre prestaram atendimento e esclarecimentos com eficácia, simpatia e prestatividade.

Agradeço ainda às funcionárias da Biblioteca Alessandra e Micheli, pelas orientações bibliográficas para a tese.

Meu imenso agradecimento aos moradores das residências que cederam, gentilmente, seus dados de consumo de energia elétrica para concluir a última fase da pesquisa.

Por fim, mas não menos importante, minha gratidão imensurável ao Universo, que mesmo sendo vítima da exploração predatória e desinteligente das recentes “civilizações”, continua oferecendo vida, paz e luz a todos, e me concedeu generosamente a oportunidade e “recursos naturais” para desenvolver o doutorado.

Obrigada!

ALINE.

EPÍGRAFE

*“O correr da vida embrulha tudo, a vida é
assim: esquentada e esfria, apertada e daí
afrouxa, sossega e depois desinquieta.
O que ela quer da gente é coragem.”*

(Grande Sertão: Veredas – João Guimarães
Rosa, 1956)

TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE E DIMENSÃO SOCIAL NA GÊNESE DO CLIMA URBANO DE PRESIDENTE PRUDENTE-SP

RESUMO

Os estudos de clima urbano em sua maioria têm se concentrado na gênese do fenômeno sob a perspectiva física. Entretanto, os distintos segmentos socioeconômicos possuem diferentes formas de receber, de se defender e adaptar aos efeitos adversos do clima. Por isso, a presente pesquisa partiu da hipótese de que não apenas os elementos da forma urbana contribuem para a construção de um clima próprio das cidades, mas também os atributos socioeconômicos de sua população (dimensão social), relacionados com seu conteúdo. Os procedimentos metodológicos fundamentaram-se no uso de produtos e técnicas do Sensoriamento Remoto. O objetivo principal consistiu em identificar e compreender o potencial de alteração térmica das superfícies nos períodos diurno e noturno para a área urbana de Presidente Prudente/SP - cidade média de clima tropical continental -, bem como seus fatores explicativos do ponto de vista físico e social. Destaca-se a utilização de imagens termais noturnas do satélite Landsat 8, disponibilizadas recentemente e ainda pouco exploradas. Partiu-se de uma escala de análise temporal e espacial mais ampla, para caracterizar o campo térmico diurno e noturno, sendo o perímetro urbano e seu entorno próximo estudados por meio do ciclo anual (jun/2019 até mai/2020) da variável térmica relativa (diferença de temperatura alvo-ar: ΔT). Os fatores físicos foram explorados de forma episódica, inicialmente através de análise quantitativa com gráficos de dispersão e o coeficiente de Spearman, para verificar as relações (positiva/negativa e forte/fraca) dos índices de vegetação (NDVI), água (NDWI) e área construída (NDBI e BUI) com ΔT . Em seguida, na escala espacial mais fina apenas com o perímetro urbano, os fatores físicos foram analisados de modo qualitativo por meio de três trajetórias (L-O, N-S e NE-SO) com a incorporação de aspectos do relevo e tipos de coberturas (vegetação, telhados e pavimentos). Uma vez identificadas duas datas próximas, de períodos opostos (dia/noite) e após a constatação da estabilidade atmosférica (com cartas sinóticas e registros meteorológicos), prosseguiu-se na investigação de áreas representativas das características socioeconômicas agregando-se informações de renda, exclusão-inclusão e vulnerabilidade social e consumo de energia elétrica, e valeu-se da metodologia de LCZs (Zonas Climáticas Locais) para sintetizar suas tipologias construtivas. Verificou-se que o padrão construtivo da cidade responde bem às condições do mês de maio, com a maior parte da área dotada de ΔT s próximos de zero; já de agosto até outubro há agravamento das condições naturalmente quentes. As relações entre os índices e a diferença de temperatura apresentaram intensidades maiores com o NDVI (negativa) e o BUI (positiva), bem como, correlações mais fortes para o dia do que para a noite. Observou-se que posição relativa dentro da área urbana e a orientação das vertentes são relevantes para o entendimento do aquecimento/resfriamento das superfícies. Dentre os materiais construtivos estudados (cerâmica, fibrocimento, metal, asfalto e concreto), a cerâmica revelou exclusivamente alterações de ΔT negativas, o que sugere que suas propriedades termodinâmicas desfavorecem o aquecimento. As variações espaciais e temporais da variável térmica demonstraram a necessidade dos planejadores urbanos avaliarem onde e quando (dia/noite) desejam aplicar estratégias de mitigação do calor. Constatou-se que os níveis de aquecimento/resfriamento urbano são distribuídos de forma desigual em relação aos aspectos socioeconômicos: ΔT s maiores, carência de vegetação e materiais construtivos inadequados associados ao segmento dotado de pouca/nenhuma condição de segurança, adaptação e resiliência climática. Assim, nota-se ainda que o papel das superfícies urbanas se estende para além das questões climáticas, tem efeitos na saúde, eficiência energética e conservação de recursos naturais, e portanto, pode auxiliar no atendimento aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030, e na construção de cidades sustentáveis e saudáveis.

Palavras-chave: Clima Urbano; Dimensão física e social; Cidades Médias; Sensoriamento Remoto.

SURFACE TEMPERATURE AND SOCIAL DIMENSION IN GENESIS OF URBAN CLIMATE OF PRESIDENTE PRUDENTE-SP

ABSTRACT

Most urban climate studies have focused on the genesis of the phenomenon from a physical perspective. However, the different socioeconomic segments have different ways of receiving, defending and adapting to the adverse effects of the climate. Therefore, the present research started from the hypothesis that not only the elements of the urban form contribute to the construction of a city's own climate, but also the socioeconomic attributes of its population (social dimension), related to its content. The methodological procedures were based on the use of products and techniques of Remote Sensing. The main objective was to identify and understand the potential for thermal alteration of the surfaces during the day and night for the urban area of Presidente Prudente/SP - medium sized city with continental tropical climate -, as well as its explanatory factors from the physical and social point of view. The use of night thermal images from the Landsat 8 satellite, recently available and still underexplored, is highlighted. A broader temporal and spatial analysis scale was used to characterize daytime and nighttime thermal field, with urban perimeter and its near surroundings being studied through the annual cycle (Jun/2019 to May/2020) of the relative thermal variable (target-air temperature difference: ΔT). The physical factors were explored in an episodic method, initially through quantitative analysis with scatter plots and Spearman coefficient, to verify the relationships (positive/negative and strong/weak) of the vegetation (NDVI), water (NDWI) and built-up area (NDBI and BUI) indices with ΔT . Then, in the more refined spatial scale with only urban perimeter, physical factors were analyzed in a qualitative way through three paths/profiles (L-W, N-S and NE-SW) with the incorporation of relief aspects and types of coverage (vegetation, roofs and pavements). Once two close dates were identified, from opposite periods (day/night) and after verification of atmospheric stability (with synoptic charts and meteorological records), the investigation of representative areas of socioeconomic characteristics was continued, adding information on income, social exclusion-inclusion and vulnerability and consumption of electric energy, and used the LCZs (Local Climatic Zones) methodology to synthesize their constructive typologies. It was found that the construction pattern of the city responds well to the conditions of the month of May, with most of the area exhibiting ΔT s close to zero; from August to October there is a worsening of naturally hot conditions. The relationships between the indices and the temperature difference showed higher intensities with the NDVI (negative) and BUI (positive), as well as stronger correlations for day than for night. It was observed that the relative position within the urban area and the orientation of the slopes are relevant to the understanding of the heating/cooling of surfaces. Among the construction materials studied (ceramic, fiber cement, metal, asphalt and concrete), ceramics showed exclusively negative ΔT changes, which suggests that its thermodynamic properties are unfavorable to heating. The spatial and temporal variations of the thermal variable demonstrated the need for urban planners to assess where and when (day/night) they deserve to apply heat mitigation strategies. It was found that levels of urban heating/cooling are unevenly distributed in relation to socioeconomic aspects: higher ΔT s, lack of vegetation and inadequate construction materials associated with the segment with little/no condition of safety, adaptation and climate resilience. Thus, it is also noted that the role of urban surfaces extends beyond climate issues, has effects on health, energy efficiency and conservation of natural resources, and therefore, can assist in attending the Sustainable Development Goals of the 2030 Agenda, and in building sustainable and healthy cities.

Keywords: Urban Climate; Physical and social dimension; Medium sized Cities; Remote sensing.

TEMPERATURA SUPERFICIAL Y DIMENSIÓN SOCIAL EN LA GÉNESIS DEL CLIMA URBANO DE PRESIDENTE PRUDENTE-SP

RESUMEN

La mayoría de los estudios sobre el clima urbano se han centrado en la génesis del fenómeno desde una perspectiva física. Sin embargo, los distintos grupos socioeconómicos tienen diferentes formas de recibir, defender y adaptarse a los efectos adversos del clima. Por tanto, la presente investigación partió de la hipótesis de que no sólo los elementos de la forma urbana contribuyen a la construcción de un clima propio de las ciudades, sino también los atributos socioeconómicos de su población (dimensión social), relacionados con su contenido. Los procedimientos metodológicos se basaron en el uso de productos y técnicas de Teledetección. El objetivo principal fue identificar y comprender el potencial de alteración térmica de las superficies durante el día y la noche para el área urbana de Presidente Prudente/SP, una ciudad intermedia, ubicada en el sureste de Brasil, con clima tropical continental, así como sus factores explicativos desde el punto de vista físico y social. Destaca el uso de imágenes térmicas nocturnas del satélite Landsat 8, recientemente puesto a disposición y aún poco explorado. Se utilizó una escala de análisis temporal y espacial más amplia para caracterizar el campo térmico diurno y nocturno, siendo estudiado el perímetro urbano y su entorno inmediato a través del ciclo anual (junio/2019 a mayo/2020) de la variable térmica relativa (diferencia de meta -temperatura del aire: ΔT). Los factores físicos fueron explorados de forma episódica, inicialmente a través de análisis cuantitativos con diagramas de dispersión y coeficiente de Spearman, para verificar las relaciones (positiva/negativa y fuerte/débil) de la vegetación (NDVI), agua (NDWI) y área construida (NDBI y BUI) con ΔT . Luego, en la escala espacial más fina con solo el perímetro urbano, se analizaron los factores físicos de forma cualitativa a través de tres trayectorias (L-W, N-S y NE-SW) con la incorporación de aspectos de relieve y tipos de cubiertas (vegetación, techos y pavimentos). Una vez identificadas dos fechas de cierre, de periodos opuestos (día/noche) y luego de la verificación de la estabilidad atmosférica (con cuadros sinópticos y registros meteorológicos), se continuó con la investigación de áreas representativas de características socioeconómicas, agregando información sobre ingresos, exclusión-inclusión y vulnerabilidad social y consumo eléctrico, y utilizó la metodología de LCZs (Zonas Climáticas Locales) para sintetizar sus tipologías constructivas. Se verificó que el patrón constructivo de la ciudad responde bien a las condiciones del mes de mayo, con la mayor parte del área dotada de ΔT s cercano a cero; de agosto a octubre hay un empeoramiento de las condiciones de calor natural. Las relaciones entre los índices y la diferencia de temperatura mostraron mayores intensidades con el NDVI (negativo) y el BUI (positivo), así como correlaciones más fuertes para el día que para la noche. Se observó que la posición relativa dentro del área urbana y la orientación de las laderas son relevantes para la comprensión del calentamiento/enfriamiento de las superficies. Entre los materiales de construcción estudiados (cerámica, fibrocemento, metal, asfalto y hormigón), la cerámica mostró exclusivamente cambios negativos de ΔT , lo que sugiere que sus propiedades termodinámicas son desfavorables al calentamiento. Las variaciones espaciales y temporales de la variable térmica demostraron la necesidad de que los urbanistas evalúen dónde y cuándo (día/noche) desean aplicar estrategias de mitigación del calor. Se encontró que los niveles de calefacción/refrigeración urbana están desigualmente distribuidos en relación con los aspectos socioeconómicos: Mayores ΔT s, falta de vegetación y materiales de construcción inadecuados asociados al segmento con pocas/ningunas condiciones de seguridad, adaptación y resiliencia climática. Así, también se advierte que el rol de las superficies urbanas va más allá de las cuestiones climáticas, tiene efectos sobre la salud, la eficiencia energética y la conservación de los recursos naturales y, por lo tanto, puede ayudar en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030, y en la construcción de las ciudades saludable sostenible.

Palabras clave: Clima Urbano; Dimensión física y social del clima; Ciudades Intermedias; Detección Remota.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da área de estudo, à oeste do estado São Paulo.....	20
Figura 2: Escopo da pesquisa.	21
Figura 3: Representação das escalas climáticas e camadas verticais de áreas urbanas. .	25
Figura 4: Fluxos envolvidos no balanço de radiação e balanço de energia de um local ideal, (a) de dia e (b) à noite	30
Figura 5: Fluxos no balanço de energia de superfície de (a) um volume rural e (b) um urbano edifício-solo-ar	31
Figura 6: Interações radiativas e energéticas diurnas (A e B) e noturnas (C e D) do microclima urbano para um ambiente construído com (B e D) e sem (A e C) presença de vegetação.....	33
Figura 7: Esquema com a variação das temperaturas do ar (T_a) e da superfície (T_0) em uma cidade plana. a) Mapa de isotermas com padrões típicos da UHI. b) Variação diurna e noturna das temperaturas do ar e da superfície ao longo do trajeto A-B.....	36
Figura 8: Albedo nos diferentes alvos urbanos.....	40
Figura 9: Temperaturas superficiais de diferentes coberturas urbanas.....	43
Figura 10: Inércia térmica (amortecimento e retardo/atraso).	46
Figura 11: Termografia de infravermelho: (a) Fotografia termográfica e (b) Fotografia normal.....	50
Figura 12: Temperatura radiante diária de materiais típicos durante o ciclo diário.	56
Figura 13: Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030.	60
Figura 14: Roteiro metodológico da pesquisa.	68
Figura 15: Trajetos escolhidos para detalhamento: L-O, N-S, NE-SO.	80
Figura 16: Carta de hipsometria da área urbana e entorno de Presidente Prudente.....	84
Figura 17: Carta de declividade da área urbana e entorno de Presidente Prudente.	85
Figura 18: Carta de orientação de vertentes da área urbana e entorno de Presidente Prudente.....	86
Figura 19: Trajetos preferenciais das massas de ar atuantes na região.....	88
Figura 20: Climograma de Presidente Prudente:1969-2015.....	88
Figura 21: Expansão da malha urbana de Presidente Prudente/SP (1917-2017).....	91
Figura 22: Exemplos de bairros da zona urbana de Presidente Prudente.	91
Figura 23: Mapa de caracterização do uso da terra de Presidente Prudente, com legenda destacada	93
Figura 24: Carta de temperatura da superfície da zona urbana de P. Prudente do ano de 2001.....	94
Figura 25: Cartas de diferença de temperatura para as datas diurnas de 22/ago/2019 a 20/mar/2020.	98
Figura 26: Cartas de diferença de temperatura para as datas noturnas de 25/jun/2019 a 26/mar/2020.	103
Figura 27: Comparação entre diferenças de temperatura mínima e máxima para os períodos diurno e noturno.....	105
Figura 28: Comparação entre temperatura de superfície mínima e máxima para os períodos diurno e noturno.....	106
Figura 29: Distribuição dos pixels nas faixas de diferenças de temperatura para os episódios diurnos e noturnos	110
Figura 30: Cartas de NDVI, NDWI, NDBI e BUI dos episódios diurnos e noturnos. .	114
Figura 31: Gráficos de dispersão dos índices versus ΔT para os episódios.....	120
Figura 32: Histogramas das variáveis para todos os episódios.....	123
Figura 33: Variável térmica e índices nos três perfis dos episódios diurno e noturno. .	129
Figura 34: Variável térmica nos três perfis dos episódios diurnos e noturnos.	132

Figura 35: Diferenças de temperatura em relação aos aspectos de relevo e cobertura no perfil L-O do episódio crítico diurno.....	135
Figura 36: Diferenças de temperatura em relação aos aspectos de relevo e cobertura no perfil N-S do episódio crítico diurno.	136
Figura 37: Diferenças de temperatura em relação aos aspectos de relevo e cobertura no perfil NE-SO do episódio crítico diurno.....	137
Figura 38: Diferenças de temperatura em relação aos aspectos de relevo e cobertura no perfil L-O do episódio crítico noturno.....	138
Figura 39: Diferenças de temperatura em relação aos aspectos de relevo e cobertura no perfil N-S do episódio crítico noturno.	139
Figura 40: Diferenças de temperatura em relação aos aspectos de relevo e cobertura no perfil NE-SO do episódio crítico noturno.....	140
Figura 41: Cartas sinóticas dos episódios de 01 até 10 de maio de 2020 (18h).	149
Figura 42: Variação temporal dos elementos climáticos e sistemas atmosféricos atuantes entre 01 e 10 de maio de 2020.	150
Figura 43: Cartas de ΔT de 04 (diurno) e 10 de maio (noturno) de 2020, considerando ciclo diário.....	152
Figura 44: Carta de renda da área urbana de Presidente Prudente.....	155
Figura 45: Carta de Exclusão/Inclusão Social da área urbana de Presidente Prudente.....	155
Figura 46: Carta do SoVI® da área urbana de P. Prudente.....	155
Figura 47: Localização das áreas do perímetro urbano de Presidente Prudente escolhidas: A1 até A8.	159
Figura 48: Painel síntese com tipologias e materiais construtivos, respostas diurna e noturna da variável térmica e atributos socioeconômicos em A1 até A8.....	160

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Escalas Geográficas do clima e estratégias de abordagem.....	24
Quadro 2: Características das ilhas de calor urbana superficial e atmosférica.....	36
Quadro 3: Temperatura superficial e propriedades dos materiais para condições climáticas pré-estabelecidas.....	48
Quadro 4: Intervalo espectral das bandas do satélite Landsat 8.	54
Quadro 5: Síntese dos índices radiométricos.....	57
Quadro 6: Metas dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) 11 e 13.	63
Quadro 7: Datas da série diurna e noturna e respectivos dados meteorológicos.....	72
Quadro 8: Variáveis térmicas e ocorrência de precipitação para as datas diurnas.	100
Quadro 9: Variáveis térmicas e ocorrência de precipitação para as datas noturnas.	104
Quadro 10: Classes de ΔT e distribuição dos pixels.....	111
Quadro 11: Relação espaço-temporal entre os índices e ΔT apontada pelos coeficientes de correlação de Pearson e Spearman (formato da data: DDMesAA).	122
Quadro 12: Teste de normalidade Shapiro-Wilk para ΔT nos episódios.....	124
Quadro 13: Síntese das alterações significativas de ΔT observadas nos períodos diurno (25out) e noturno (12ago).....	141
Quadro 14: Síntese das características das áreas escolhidas.....	158
Quadro 15: Valores de temperatura de superfície: médias e diferença entre dia e noite.	161
Quadro 16: Consumo de energia elétrica mensal de residências e total do município, registros de temperatura do ar da Estação Meteorológica do INMET.	163

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1. CLIMA URBANO	23
2.1.1. Urbanização e seus efeitos no clima	27
2.1.2. Balanço de energia	29
2.1.3. Ilha de Calor.....	34
2.1.4. Fatores Explicativos do Clima	37
2.1.5. Vegetação Urbana	42
2.1.6. Materiais Construtivos	44
2.2. SENSORIAMENTO REMOTO.....	51
2.2.1. Temperatura de Superfície.....	51
2.2.2. Índices Radiométricos.....	57
2.3. PLANEJAMENTO E GESTÃO URBANA: OS CLIMAS DAS CIDADES NA PERSPECTIVA DOS ODS	59
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	65
1.1. TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE	71
3.2. ÍNDICES RADIOMÉTRICOS.....	76
3.3. RELEVO E COBERTURA DA TERRA	79
3.4 ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA, CARACTERÍSTICAS SOCIOECONÔMICAS E CONSUMO ENERGÉTICO	82
4. ÁREA DE ESTUDO	84
5. CAMPO TÉRMICO.....	96
5.1. DIURNO	96
5.2. NOTURNO	101
5.3. COMPARAÇÃO DIURNO-NOTURNO	104
6. FATORES EXPLICATIVOS DO CLIMA FÍSICO: ÁGUA, VEGETAÇÃO E ÁREA CONSTRUÍDA.....	109
6.1. DISTRIBUIÇÃO DAS DIFERENÇAS DE TEMPERATURA	109
6.2. A SUPERFÍCIE A PARTIR DOS ÍNDICES (NDVI, NDWI, NDBI E BUI).....	112
6.3. RELAÇÃO ENTRE DIFERENÇA DE TEMPERATURA E ÍNDICES (NDVI, NDWI, NDBI E BUI)	118
7. FATORES EXPLICATIVOS DAS INTERAÇÕES DO CLIMA: RELEVO E TIPOS DE COBERTURA.....	127
7.1. DIFERENÇA DE TEMPERATURA NOS EPISÓDIOS DIURNO E NOTURNO	128
7.2. COMPARAÇÃO DE ΔT ENTRE OS PERÍODOS (DIURNO X NOTURNO)	131
7.3. RELAÇÃO ENTRE ΔT, RELEVO E TIPOS DE COBERTURA NOS EPISÓDIOS CRÍTICOS.....	134

8. A DIMENSÃO SOCIAL NA ANÁLISE CLIMÁTICA.....	147
8.1. ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA	148
8.2. CARACTERÍSTICAS SOCIOECONÔMICAS	154
8.3. A PERSPECTIVA DO CONTEÚDO	157
CONSIDERAÇÕES FINAIS	167
REFERÊNCIAS.....	173

1. INTRODUÇÃO

O impacto das ações humanas sobre o meio natural é inerente ao processo de produção do espaço, que se dá em função das técnicas que a sociedade utiliza para transformar a natureza através do seu trabalho (SANTOS, 2002). No contexto urbano, a expansão territorial e o crescimento das cidades têm sido marcados por transformações no uso da terra associados com a degradação ambiental e a queda da qualidade de vida.

Atualmente, de acordo com relatório da ONU (2020)¹, 56,2% da população mundial (4,3 bilhões de pessoas) vive em áreas urbanas, e a expectativa é de que esta proporção aumente para 60,4% até 2030 (5,1 bilhões de pessoas). No Brasil, a fração de população urbana é ainda maior, sendo 87,1% (186,2 milhões de pessoas) com previsão de atingir 89,3% em 2030 (201,2 milhões de pessoas). O relatório aponta ainda que independentemente do tipo de crescimento - se espalhamento horizontal, urbanização dispersa ou peri-urbanização - a extensão física das áreas urbanas cresce mais rápido do que sua população, consumindo assim, mais terra para a expansão territorial urbana.

A urbanização é um fenômeno que, entre outros fatores, é representado pela substituição de áreas verdes/permeáveis por áreas construídas/impermeáveis, que acarreta alterações no sistema climático e gera um clima local específico, de tal modo que estudos clássicos e pioneiros sobre o tema – como aqueles aplicados na cidade de Londres - datam do início do século XIX (HOWARD, 1833 *apud* AMORIM, 2017). Isto porque, as áreas urbanas são formadas por um mosaico de tipos de coberturas, cujos diferentes tipos e configurações espaciais alteram o balanço de energia superfície-atmosfera, e podem gerar mais ou menos calor, influenciando o conforto térmico, a eficiência energética e a qualidade de vida das pessoas.

O clima das cidades segundo Monteiro (1976) é: “um sistema que abrange o clima de um dado espaço terrestre e sua urbanização”, ou seja, “um sistema singular que abrange um clima local (fato natural) e a cidade (fato social)”. Ele pode ser considerado um indicador das alterações da qualidade ambiental e de vida (LOMBARDO, 2009), pois constitui-se numa das dimensões do ambiente urbano, e seu estudo tem oferecido relevantes contribuições ao equacionamento da questão ambiental das cidades (MENDONÇA, 2000). Assim, a incorporação do conhecimento do clima urbano no

¹ https://unhabitat.org/sites/default/files/2020/10/wcr_2020_report.pdf.

processo de planejamento das cidades torna-se crucial para o alcance de uma urbanização sustentável, na perspectiva das cidades saudáveis.

Em ambientes tropicais, como a maior parte do território brasileiro, dotados de características climáticas que naturalmente resultam em temperaturas elevadas, tal preocupação torna-se ainda maior. Isto porque, conforme Voogt e Oke (2003), modificações na superfície e na atmosfera devido à urbanização geralmente levam a um quadro térmico mais quente que as áreas não urbanizadas ao redor, principalmente à noite. Outro potencial agravante da questão térmica são os problemas de subdesenvolvimento, que ampliam as condições negativas da qualidade ambiental urbana (SEZERINO E MONTEIRO, 1990), que resultam em diferenciações socioespaciais em que os grupos mais vulneráveis são particularmente muito mais afetados.

As escalas geográficas também se revelam como importantes elementos de diferenciação, pois no contexto do crescente processo de urbanização, a maior parte da população citadina vive em cidades de pequeno e médio porte, que produzem climas urbanos diferentes daqueles das grandes cidades.

Dentre as características que afetam a temperatura pode-se citar: latitude, distância do oceano, presença de corpos aquáticos (rios, lagos, represas), aspectos do relevo, intensidade e velocidade dos ventos, configuração e composição das áreas urbanas (rugosidade, densidade de construções e geometria), especialmente aquelas associadas com a vegetação e com os materiais construtivos (telhados de cerâmica/fibrocimento/metálico e pavimentos de asfalto/concreto). A influência das coberturas das edificações nos fluxos de energia se dá principalmente em decorrência de suas propriedades termodinâmicas como albedo, emissividade e inércia térmica; enquanto o papel da vegetação está relacionado com os mecanismos de evapotranspiração e sombreamento (ALAVIPANAH *et al.*, 2015).

Segundo EPA (2008), pesquisas realizadas no Arizona/EUA (clima desértico) revelam que os telhados convencionais podem ser 31-47°C mais quentes do que o ar durante o dia, enquanto os telhados frios tendem a ficar entre 6 e 11°C da temperatura do ar externo. Já o estudo realizado por Ferreira e Prado (2003), feito em laboratório no Brasil, obteve temperaturas de superfície até 32,6°C mais quentes que o ar em telhados de fibrocimento, e 0,6°C mais frias que o ar em telhas de cerâmica branca. Desta maneira, a implantação de áreas verdes e de materiais de cobertura “frios”² são iniciativas

² São aqueles que têm elevado albedo para radiação de ondas curtas e elevada emissividade para radiação de ondas longas.

fundamentais para mitigar o calor nas cidades, como afirma Landsberg (1979), consideradas além de viáveis, de baixo custo (FERREIRA e PRADO, 2003).

A estrutura térmica urbana constitui-se de três dimensões, que são representadas: a) pela temperatura do ar, aferida por aparelhos e instrumentos meteorológicos; b) pela temperatura efetiva ou sensação térmica, medida do conforto humano que contempla aspectos mais subjetivos e verificada por meio de questionários aplicados à população; e c) pela temperatura de superfície (TS ou *Land Surface Temperature* – LST, ou temperatura dos alvos), obtida a partir de produtos e técnicas do Sensoriamento Remoto.

A investigação do ambiente térmico urbano e sua relação com a superfície por meio de técnicas do Sensoriamento Remoto consiste no uso de imagens termais para estimar temperaturas dos alvos. A temperatura da superfície tem papel importante no entendimento do sistema climático, pois ela modula a temperatura do ar das camadas mais baixas da atmosfera urbana, é central para o balanço energético da superfície (VOOGT e OKE, 2003), e corresponde intimamente à distribuição das características de uso e cobertura da terra (WENG, 2003).

Assim, os estudos baseados na utilização de imagens termais de satélites, por exemplo, podem fornecer informações e orientar gestores, a fim de gerenciar a distribuição do calor pelas superfícies urbanas. Algumas das vantagens que podem ser colocadas nesse sentido são: o fornecimento de uma visão contínua e simultânea de toda a cidade (WENG, 2009) e visões em diferentes escalas (POLIZEL, 2009; WENG, 2003), além de dados e ferramentas de livre acesso/custo viável e rapidamente disponíveis para apoiar os processos de tomada de decisão (COUTTS *et al.*, 2016). Considerando a questão climática em específico, Mendonça (2000) destaca que o detalhamento cartográfico permite identificar a heterogeneidade do espaço urbano e levantar hipóteses referentes a possíveis diferenças de ambientes climáticos urbanos.

Entretanto, de acordo com Amorim (2018) e Coutts *et al.* (2016), uma das limitações para estes tipos de estudo era a indisponibilidade de imagens noturnas, de tal forma que as pesquisas sobre temperaturas de superfície noturnas eram realizadas por meio de imagens termais registradas por sensores em aeronaves ou satélites com resolução espacial baixa, conforme mostram os estudos de Nichol (2005), Quattrochi e Ridd (1998), Mathew *et al.* (2018) e Coutts *et al.* (2016). Em abril de 2019 houve a disponibilização de imagens termais noturnas do canal infravermelho termal do satélite Landsat 8, o que possibilitou iniciar investigações acerca de ambos os períodos (dia e noite).

Embora os estudos de clima urbano em sua maioria tenham se concentrado na investigação da gênese do fenômeno sob a dimensão física, quais sejam os elementos da forma; alguns trabalhos constataram relação entre a questão térmica e a socioeconômica. Janerette *et al.* (2007) por exemplo verificaram que em Phoenix (EUA), cada aumento de US\$10.000 na renda familiar média anual estava associado a uma diminuição de 0,28°C na temperatura da superfície. Se o campo térmico urbano expressa espacialmente os processos sociais que ocorrem no meio urbano, numa perspectiva crítica, a análise da relação entre o clima e a sociedade deve contemplar os elementos de seu conteúdo – a dimensão social -, e considerar as diferenças nas formas de receber e na capacidade de defesa e adaptação aos efeitos adversos do clima pelos distintos segmentos socioeconômicos.

Tendo em vista que a sociedade produz o espaço geográfico de maneira desigual conforme os interesses dos agentes sociais, e que o clima é proveniente da interação entre os processos dinâmicos da atmosfera e das ações desses agentes, consequentemente, os diversos grupos sociais não experimentam nem percebem o tempo e o clima da mesma forma (SANT'ANNA NETO, 2012). Assim, os espaços desiguais potencializam os efeitos do clima, tornando-o uma construção social.

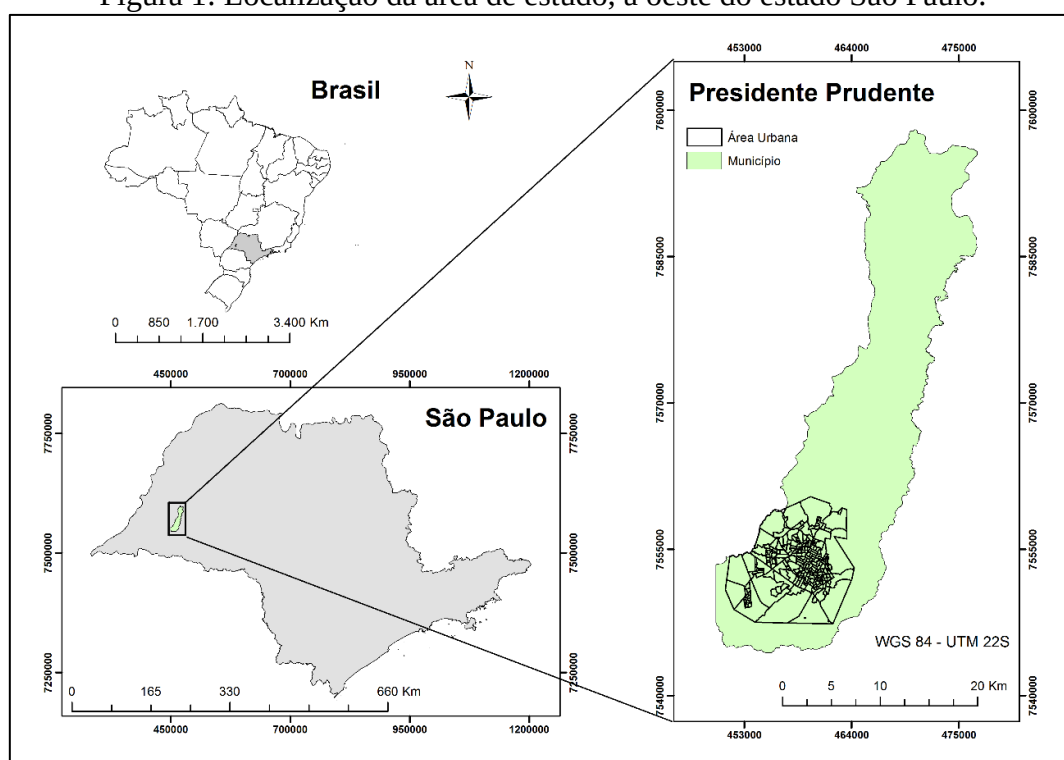
No sentido de orientar dentre outras, a dinâmica urbana, para produzir cidades sustentáveis e saudáveis, vários acordos têm sido adotados internacionalmente entre os países, como a Agenda 2030 estabelecida em 2015, constituída de um plano de ação com 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS). O papel das cidades é tratado mais diretamente no ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis; enquanto a abordagem acerca do clima está inserida no ODS 13 – Ação contra a Mudança Global do Clima.

Uma vez que influenciam diretamente as de trocas de calor entre a superfície da Terra e a atmosfera, as propriedades termodinâmicas das superfícies despertam especial interesse em vários temas dessa agenda, tais como o próprio Aquecimento Global - fenômeno associado às Mudanças Climáticas – e a Eficiência Energética. Nesse sentido, de acordo com Akbari *et al.* (2009), estudos demonstraram economias de energia de resfriamento de edifícios superiores a 20% ao aumentar o albedo dos telhados de 10-20% para cerca de 60%. O consumo de energia da edificação, que também reflete a capacidade de defesa e adaptação aos elementos climáticos, depende do seu desempenho térmico e das estratégias de condicionamento de ambientes internos, que majoritariamente se baseiam mecanismos ativos. Considerando que o uso de tais equipamentos está ligado a emissão de gases de efeito estufa e a outros problemas de poluição do ar, aumentar o

albedo das superfícies urbanas pode melhorar a qualidade do ar urbano, e contrariar em certa medida, os efeitos do aquecimento global (AKBARI *et al.*, 2009). Portanto, ações voltadas à adequação dos materiais construtivos podem contribuir para o atendimento às metas da Agenda 2030.

Assim, esta pesquisa beneficiou-se do recente acesso as imagens termais noturnas, e fundamentada nos temas e interfaces relatados anteriormente, teve como recorte territorial a área urbana e o entorno próximo da cidade de Presidente Prudente (SP/Brasil). Referida escolha se deu em decorrência da área contemplada pelas imagens de satélite noturnas, que permitiram a exploração deste novo recurso; bem como, por tratar-se de uma típica cidade de porte médio de clima tropical continental, localizada no centro-sul do Brasil, na porção oeste do estado de São Paulo (Figura 1), cuja ampla quantidade existente de estudos anteriores sobre clima urbano, proporcionam e facilitam a análise ora proposta.

Figura 1: Localização da área de estudo, à oeste do estado São Paulo.



Fonte: Dados IBGE, 2010. Elaborado pela autora.

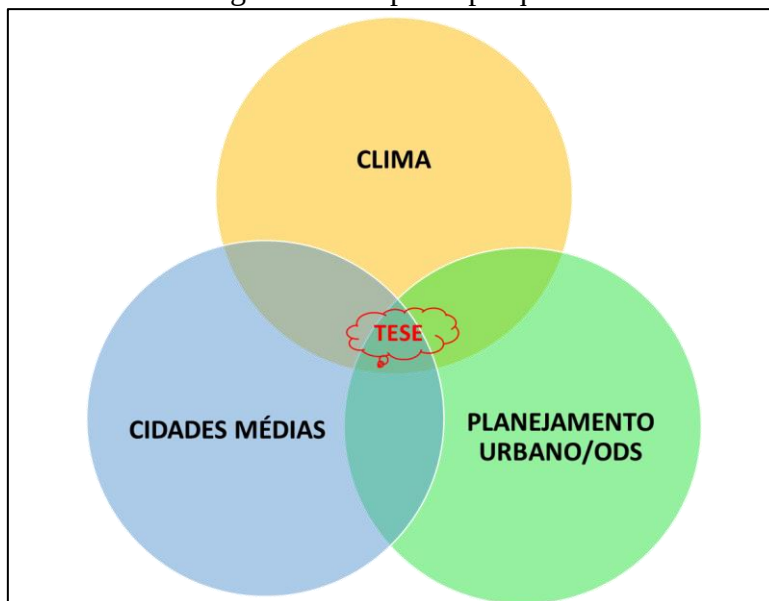
O município surgiu e cresceu no cenário de expansão da Estrada de Ferro Sorocabana, associado ao avanço inicialmente da agricultura - de 1917 até 1960 - e em seguida da pecuária extensiva. A estrada de ferro orientou o processo de expansão territorial (SPOSITO, 2011), marcado pela diferenciação socioespacial, sendo a produção

do espaço urbano a partir de 1970 motivada pela especulação imobiliária (CAMARGO, 2007). Assim, a paisagem urbana configura-se atualmente pela grande diversidade de uso e ocupação da terra, com os bairros mais antigos densamente construídos e com cobertura vegetal arbórea, marcadamente nas calçadas e quintais; e com as áreas residenciais mais recentes, em sua maioria constituídas de conjuntos habitacionais e loteamentos destinados a população de baixa renda, com terrenos menores e materiais construtivos pouco adequados ao conforto térmico e ambiental (paredes finas e coberturas de fibrocimento).

Hipótese e objetivos

Com base no escopo apresentado e sintetizado na Figura 2, a pesquisa partiu da hipótese de que não apenas os elementos de forma urbana (composição e estrutura) que alteram as trocas energéticas entre superfície-atmosfera, contribuem para a construção de um clima próprio das cidades, mas também os atributos socioeconômicos de sua população, relacionados com seu conteúdo.

Figura 2: Escopo da pesquisa.



Fonte: elaborado pela autora.

Nesse sentido, o objetivo principal desta tese foi, com recursos e ferramentas do sensoriamento remoto, identificar e compreender o potencial de variação térmica das superfícies nos períodos diurno e noturno para a área urbana de Presidente Prudente/SP, bem como seus fatores explicativos do ponto de vista físico e social. E com isso, gerar

resultados cujas informações direcionem ações e estratégias de planejamento urbano voltadas ao clima local e ao desenvolvimento de cidades sustentáveis e saudáveis.

Para tanto, trabalhou-se com os seguintes objetivos específicos:

- a) identificar e caracterizar o campo térmico de superfície, em termos de diferenças de temperatura (ΔT^3), para os períodos diurno e noturno e um ciclo anual;
- b) analisar de modo episódico e quantitativo os fatores explicativos do ponto de vista físico - tipos e condições da cobertura por meio de índices radiométricos de vegetação, água e área construída -, e suas relações com as variações térmicas;
- c) analisar de modo episódico e qualitativo os fatores explicativos do ponto de vista físico, agregando informações do relevo e dos materiais construtivos, e suas relações com a variável térmica (ΔT) por meio de trajetos/perfis (L-O, N-S e NE-SO);
- d) analisar os fatores explicativos do ponto de vista social - atributos demográficos e socioeconômicos -, e seu potencial de contribuição para a construção de cidades sustentáveis e saudáveis na perspectiva dos ODS e da Agenda 2030, por meio de áreas representativas e considerando um ciclo diário.

Assim, a presente tese foi estruturada e organizada em 9 capítulos, contemplando inicialmente a apresentação da hipótese e dos objetivos, seguido pelo referencial teórico que embasou a construção da pesquisa e as discussões, pelas ferramentas e técnicas para atingir os objetivos, pela exibição e análise dos resultados obtidos, e finalizando com considerações e discussões sobre o significado e alcance dos resultados, como contribuição ao conhecimento sobre o clima urbano de cidades médias tropicais em países com forte desigualdades sociais.

³ Variável térmica adotada no trabalho, que consiste na diferença entre a temperatura do alvo e a temperatura do ar da estação meteorológica (ponto “neutro”), cujo detalhamento está no Capítulo 3.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. CLIMA URBANO

O processo de urbanização consiste na transformação do meio físico natural para o assentamento humano, resultando em mudanças do uso da terra e gerando uma nova configuração da superfície (OKE, 1987). Esta interferência provoca alterações na qualidade ambiental das cidades de forma geral - inclusive no aspecto climático -, e consequentemente na qualidade de vida de seus cidadãos. Todavia, são modificações nem sempre positivas, e nos últimos anos as cidades vêm atendendo cada vez menos às necessidades de qualidade de vida e bem-estar para os que nelas trabalham e/ou residem (MONTEIRO, 1997; AMORIM e MONTEIRO, 2011).

Segundo Santos (2002), trata-se de um processo decorrente da dinâmica do modo de produção capitalista, realizado por forças sociais em detrimento das forças naturais, e intensificado pelo emprego das técnicas que o homem passa a dispor. Nesse sentido, Monteiro (1997) acrescenta que a intensificação da urbanização é fator fundamental para a compreensão das conjunturas e organização das cidades no que se refere a mudanças na dinâmica natural da atmosfera, sejam elas temporárias e/ou permanentes e evidentes em várias escalas espaciais.

A nova composição e configuração da superfície, por sua vez, caracterizadas pela substituição de materiais rurais e naturais (campo, fazendas e florestas) por materiais urbanos (tijolo, concreto e vidro), além da introdução de gases e material particulado na atmosfera, gerado pelas atividades econômicas, produz um clima urbano (CHANDLER, 1965). Apontado por Monteiro (2003) como “um sistema que abrange o clima de um dado espaço terrestre e sua urbanização”, ou ainda, “um sistema singular que abrange um clima local (fato natural) e a cidade (fato social)”, o Sistema Clima Urbano (S.C.U.) deve ser entendido numa perspectiva integradora, como um sistema aberto, adaptativo, dinâmico, integrado, evolutivo e passível de autorregulação.

Assim, a compreensão do clima urbano é essencial para a construção de uma relação sociedade-natureza mais harmônica, dado o potencial, muitas vezes agressivo, da ação dos sujeitos e atores sociais e sua respectiva manifestação nos processos climáticos, bem como suas implicações em aspectos tanto de ordem natural quanto humana.

Os estudos sobre clima urbano têm se concentrado na investigação de questões atmosféricas, sobretudo relacionadas as diferenças termohigrométricas e de poluição do

ar. Segundo Sant'Anna Neto (2012), existe ainda a necessidade de se avançar e enriquecer as análises nesses estudos incorporando-se a dimensão social na interpretação, pois a repercussão dos fenômenos atmosféricos na superfície terrestre ocorre em um território, transformado e produzido pela sociedade, de maneira desigual e apropriado conforme os interesses dos agentes sociais.

A escala do clima é um instrumento de análise fundamental para a compreensão das relações temporais e espaciais entre o clima e a superfície terrestre, cujas interações pressupõem a concepção das escalas enquanto processos dinâmicos (SANT'ANNA NETO, 2013). A estratégia de abordagem deve ser escolhida em função da escala do clima, bem como associada a unidades territoriais determinadas. O Quadro 1 sistematiza a articulação das escalas do clima com as escalas cartográficas e com as estratégias de abordagem.

Quadro 1: Escalas Geográficas do clima e estratégias de abordagem.

Ordem de grandeza	Unidades de superfície	Escalas cartográficas	Espaços climáticos	Espaços rurais	Espaços urbanos	Estratégias de abordagens		
						Meios de observação	Fatores de organização	Técnicas de análise
I	Milhões de km ²	1:50.000.000 1:10.000.000	Global Zonal	Grandes biomas	Megalópole Metrópole Grandes áreas urbanas	Satélites	Latitudes, centros de pressão	Caracterização, comparação, classificação
II	Milhares de km ²	1:10.000.000 1:1.000.000	Macro Regional	Conjuntos vegetacionais		Satélites, modelagem, cartas sinóticas, Nefanálise, rede de superfície, postos de observação	Circulação atmosférica	
III	Centenas de km ²	1:1.000.000 1:250.000	Meso regional Micro regional	Grandes unidades naturais			Fatores geográficos do clima	Redes e transectos espaciais e temporais.
IV	Dezenas de km ²	1:250.000 1:100.000	Local mesoclima	Unidades de paisagem grande propriedade rural	Cidades de porte grande e médio		Geoecologia Ação antrópica (uso do solo)	Mapeamento sistemático, estatística aplicada
V	Milhares e Centenas de m ²	1:100.000 1:10.000	Topoclima	Feições da paisagem, pequena e média propriedade rural	Cidades de porte médio e pequeno. Zonas, bairros e aglomeração	Postos de observação, Registros móveis	Urbanismo, economia, agronomia	Análise espacial, análise sistêmica
VI	Dezenas de m ²	1:10.000 1:1.000	Microclima	Planta, espécie	Quarteirões Edificações	Detalhe, forma, instrumentos especiais	Arquitetura Meteorologia agrícola	Análises especiais

Fonte: Sant'Anna Neto, 2013 adaptado de Monteiro, 1976.

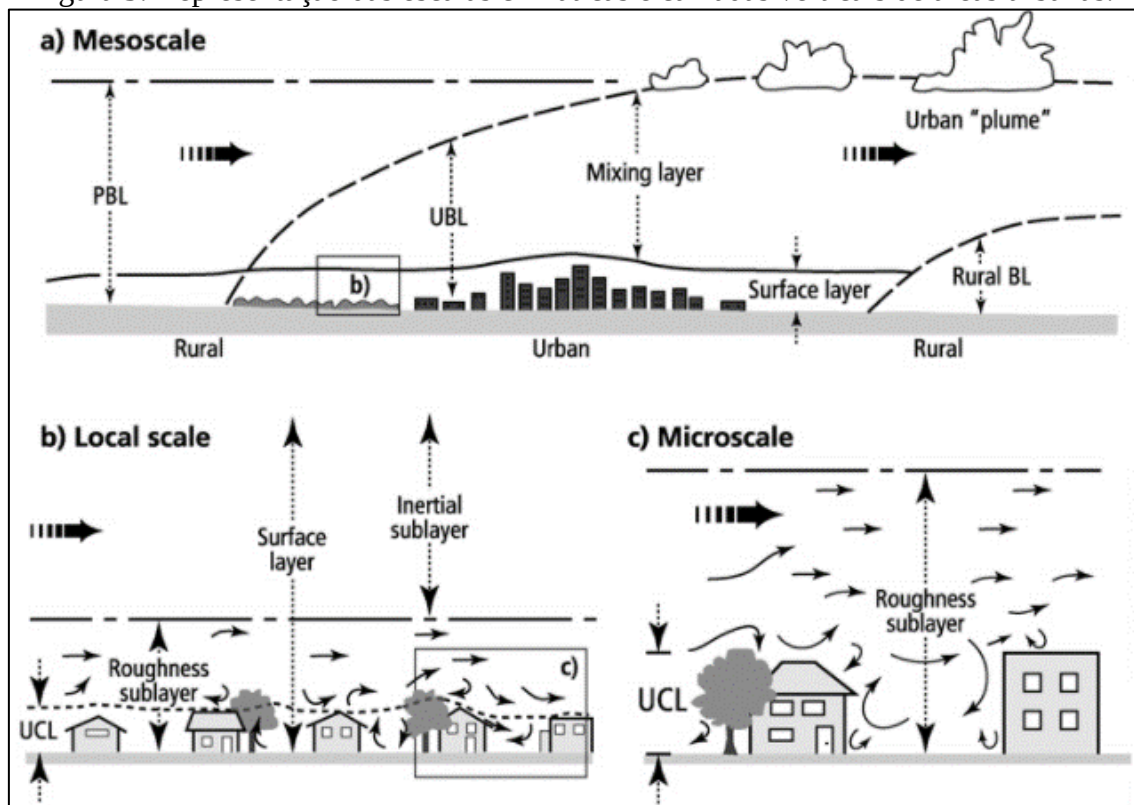
As escalas globais permitem a generalização dos elementos e processos, enquanto que as regionais possibilitam a compreensão das suas formas de organização, cuja verificação pode ser realizada de maneira mais especializada e complexa nas escalas locais. Os aspectos que mostram detalhes mais particulares das paisagens exigem a utilização de

técnicas mais diretas no nível dos topoclimas, como registros móveis dos elementos meteorológicos ou instalação de estações automáticas. Já as escalas finas, que contemplam os climas locais (mesoclimas e topoclimas) e os microclimas, estão ligados ao próprio cotidiano da sociedade e alguns dos ciclos do mundo natural (SANT'ANNA NETO, 2013).

Para pesquisas sobre o clima urbano, Monteiro (1990b) recomenda a associação de diferentes escalas geográficas do clima em virtude da notável variação de distintos fatores em cada escala. Além disso, Sant'Anna Neto (2013) especifica que a densidade de edificações e as características das áreas verdes interferem na ventilação e na umidade, gerando inércia térmica; de tal forma que essa estreita relação entre a estrutura e a forma urbana com os climas locais e suas interações somente podem ser reveladas nesta ordem escalar.

Nesse sentido, Oke (2006) sugere para áreas urbanas três escalas de especial interesse na perspectiva horizontal e três na vertical, conforme ilustra a Figura 3, sendo: meso-escala, escala local e micro-escala; e camada limite (*urban boundary layer* – UBL), camada superficial (constituída das subcamadas de rugosidade (RSL) e inercial (ISL)) e camada do dossel (*urban canopy layer* - UCL), respectivamente.

Figura 3: Representação das escalas climáticas e camadas verticais de áreas urbanas.



Fonte: Oke, 2006.

A camada limite urbana (UBL) está situada acima da camada do dossel urbano (UCL) e pode ter 1 km ou mais em espessura durante o dia, alcançando centenas de metros à noite. Já a UCL é a camada de ar mais próxima da superfície nas cidades, estendendo-se verticalmente até a altura média das construções, e está contida na camada mista (*Mixing layer*), onde as trocas urbanas da "superfície" são misturadas na atmosfera mais espessa e transportadas pela ação do vento. Por fim, na camada superficial (*Surface layer*), enquanto a atmosfera na ISL tem características de ajuste à paisagem urbana subjacente, de forma que os fluxos de energia, massa e circulação representam uma síntese dos microclimas (criados pelos jardins, asfalto, telhados, paredes, corpos d'água, etc.) que compõem a escala local; os elementos na RSL são orientados por processos microclimáticos individuais presentes na camada intraurbana das ruas que formam "canyons" entre as edificações.

O modelo clássico de estrutura e forma urbana de Oke (1987) é amplamente apresentado em muitos trabalhos, e assim como a maioria das pesquisas acerca do tema, faz referência a cidades de grande porte e/ou metrópoles. Para muitas cidades brasileiras de porte médio (como é o caso de Presidente Prudente) e pequeno, todavia, tal modelo não é totalmente representativo, pois são localidades cujo processo de produção do espaço foi caracterizado pela fragmentação, descontinuidade e geração de polinúcleos urbanizados (SPOSITO, 1983).

A escala local é a dimensão na qual predominantemente são sentidas e diagnosticadas as alterações climáticas, e as cidades de pequeno e médio porte também precisam ser consideradas nas análises de clima urbano porque além de interferirem na escala local do clima, nelas reside grande parte das pessoas em escalas nacional e planetária (AMORIM, 2019).

Nesse sentido, Monteiro (1976) propôs organizar os estudos de clima urbano -aqui considerado como um sistema – Sistema Clima Urbano (S.C.U.)-, baseado nos canais de percepção humana e conforme três subsistemas: o termodinâmico (conforto térmico), o físico-químico (qualidade do ar) e o hidrometeorológico (meteoros de impactos), centralizado desta forma, nas características presentes na atmosfera que interferem na vida cotidiana das pessoas.

a) o Sistema Termodinâmico é associado ao Conforto Térmico e se expressa por meio do calor, da ventilação e da umidade. Sua responsabilidade está vinculada a uma coparticipação do homem e da natureza. Trata-se de um canal significativo, cujas implicações termodinâmicas repercutem decisivamente nos demais canais.

b) o Sistema Físico-Químico é associado à Qualidade do Ar e seu produto antropogênico - a poluição do ar - que pode causar efeitos diretos como problemas sanitários e doenças respiratórias, oftalmológicas e etc., com responsabilidade vinculada às ações antrópicas.

c) o Sistema Hidrometeorológico é associado ao Impacto Meteorológico, abrange todas as formas meteorológicas, principalmente as chuvas e o vento e pressupõe a dinâmica dos estados atmosféricos extremos e violentos do ritmo climático, que provocam ataques à integridade urbana, e cuja responsabilidade está ligada a fenômenos da natureza.

2.1.1. Urbanização e seus efeitos no clima

A urbanização, notadamente marcada pela substituição de áreas verdes ou campestres por áreas impermeáveis e pelo desenvolvimento de atividades antrópicas, afeta a interação de trocas energéticas do sistema superfície-atmosfera e portanto, modifica o balanço de energia como apontam Landsberg (1981), Oke (1987), Monteiro (1997), e Arnfield (2003). Em linhas gerais, seus efeitos podem ser resumidos principalmente no aumento do escoamento superficial, na diminuição da evapotranspiração e no aumento do armazenamento de calor no ambiente construído.

Especificamente, pode-se citar entre outras, alterações na temperatura do ar, na umidade relativa, na radiação solar, na concentração de poluentes, no regime de precipitação e na direção e velocidade dos ventos. Landsberg (1981) quantificou alguns desses efeitos para cidades grandes e do mundo temperado, sendo:

- Radiação solar global nas cidades reduzida de 15 a 20% e raios ultravioletas de 5 a 30%, além de radiação solar direta também inferior à área rural;
- Temperatura média anual e a temperatura mínima de inverno superiores à área rural cerca de 0,5°C a 1,0°C e 1,0°C a 2,0°C, respectivamente;
- Fluxo de calor latente (através da evapotranspiração) maior no meio rural, enquanto na cidade predomina o calor sensível;
- Albedo⁴ médio das cidades de 0,15, enquanto nas áreas rurais é de 0,18 a 0,25;
- Maior concentração de aerossóis nas cidades aumenta cerca de 50 vezes o total de núcleos de condensação, elevando a nebulosidade urbana em relação à área rural e natural;

⁴ O albedo representa a porção da radiação solar incidente que é refletida pelo material (quociente fluxo refletido/fluxo incidente) (PRADO e FERREIRA, 2005; EPA, 2008), sendo um coeficiente (de reflexão) expresso por valor entre 0 e 1 ou valor percentual.

- Precipitação urbana de 5 a 10% superior às de áreas rurais, enquanto a umidade relativa se comporta de maneira inversa (média anual é inferior a 6%);
- Alteração na movimentação do ar e redução de 10 a 30% a velocidade do vento.

Além desses, cabe destacar a contribuição para o aumento de doenças relacionadas à qualidade do ar (problemas respiratórios), ao aumento da temperatura (doenças cardiovasculares) e às precipitações mais curtas e volumosas que provocam enchentes e inundações (doenças de veiculação hídrica), além da demanda energética para condicionamento térmico. A primeira vinculada ao transporte de poluentes atmosféricos e de material particulado para áreas mais quentes e densamente edificadas - onde situa-se a maioria da população – causado por movimentos advectivos do ar em função de diferenciais de intensidades de temperaturas entre as áreas construídas e não construídas (AMORIM, 2019).

Já acerca do consumo de energia, a elevação da temperatura em áreas urbanas gera impacto direto nos custos de refrigeração (GARTLAND, 2010; MASCARÓ e MASCARÓ, 2010), devido ao uso acentuado de equipamentos de condicionamento ativo com o intuito de melhorar o conforto térmico. Nesse sentido, Lamberts *et al.* (2014) apontam que no Brasil, embora a maior parte do consumo de energia elétrica em residências destine-se a geladeiras, chuveiros e lâmpadas, recentemente o ar condicionado têm alcançado 20% da média nacional, e tal contribuição tende a crescer em decorrência da falta de adequação das edificações aos climas locais.

Por outro lado, as condições climáticas do ambiente tropical – naturalmente quentes – aliadas a padrões inadequados de habitação e moradia resultam em perda de qualidade de vida para uma parte significativa da sociedade (SANT'ANNA NETO e RAMPAZZO, 2016), que é menos favorecida e desprovida de condições financeiras para investir em recursos de tal tipo. Nesse sentido, Monteiro (2009) acrescenta que as relações entre sociedade e o sistema climático dependem da capacidade de absorção, de resistência e da elasticidade da estrutura social existente, e conseqüentemente, cada tipo de unidade de exposição – organização social, suporte biogeofísico – identifica e reage à variabilidade climática de modo distinto.

2.1.2. Balanço de energia

A urbanização modifica os fluxos e trocas energéticas, e consequentemente, o balanço de energia do sistema atmosfera-superfície, de modo a criar um clima local específico. Uma das formas de transferência de energia ocorre pela radiação⁵, por meio das ondas eletromagnéticas (INPE, 2021), sendo a radiação solar, a energia eletromagnética de onda curta emitida pelo Sol. A intensidade da radiação solar muda conforme as atividades solares e a distância da Terra ao Sol, e o balanço de radiação, de acordo com Pillar (1995), é variável ao longo do dia (em função da trajetória do sol) e do ano (em função da declinação solar).

De toda radiação proveniente do sol, uma parcela passa pela atmosfera, onde é parcialmente refletida e parcialmente absorvida pelas partículas atmosféricas e pelas nuvens. A outra parcela da radiação atinge diretamente a superfície terrestre, que por sua vez, também reflete parte dessa radiação direta e absorve o restante. Finalmente, a radiação absorvida pela superfície é emitida para o meio sob a forma de radiação de onda longa. Desta forma, o balanço de radiação e energia superficial pode ser resumido como segue:

$$Q^* = K \downarrow - K \uparrow + L \downarrow - L \uparrow, \text{ e}$$

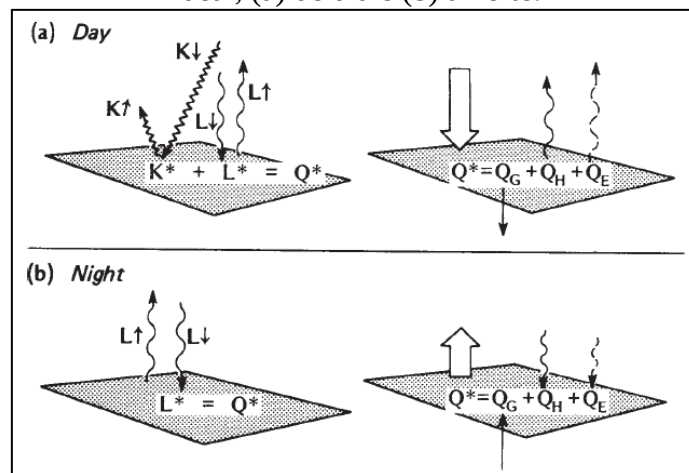
$$Q^* = Q_H + Q_E + Q_G,$$

onde $K \uparrow$ e $K \downarrow$ são radiações de ondas curtas ascendentes e descendentes, $L \uparrow$ e $L \downarrow$ radiações de ondas longas ascendentes e descendentes e, Q^* (Wm^{-2}), Q_H , Q_E e Q_G são radiação líquida, fluxo de calor sensível, fluxo de calor latente e fluxo de calor no solo, que transfere calor sensível por condução ao substrato, respectivamente.

De acordo com Oke (1987), para uma dada entrada de energia solar ($K \downarrow$), o albedo regula a absorção de ondas curtas na superfície (K^*), e isso, por sua vez, domina o balanço líquido de radiação diurna (Q^*) e define o limite para o balanço de energia da superfície e o balanço hídrico inter-relacionado. Desta forma, o albedo controla o clima térmico e úmido da superfície e as camadas adjacentes de ar e solo. A Figura 4 ilustra esses fluxos para os períodos diurno e noturno.

⁵ A troca de energia dentro do sistema Terra-Atmosfera é possível de três modos: condução, convecção e radiação. A radiação é uma forma de energia devido às rápidas oscilações dos campos eletromagnéticos, sendo transferida por fótons, ou feixes de energia que têm propriedades semelhantes às partículas e às ondas. A condução é o processo pelo qual o calor é transmitido dentro de uma substância pela colisão de moléculas que se movem rapidamente, e geralmente é eficaz em meios sólidos, menos importante em líquidos e em gases. O processo de convecção envolve o intercâmbio vertical de massas de ar e só pode ocorrer em líquidos e gases. A convecção transporta calor de e para a atmosfera em ambas as suas formas sensíveis e latentes. A convecção fornece os meios de transporte e mistura (OKE, 1987).

Figura 4: Fluxos envolvidos no balanço de radiação e balanço de energia de um local ideal, (a) de dia e (b) à noite.



Fonte: Oke, 1987.

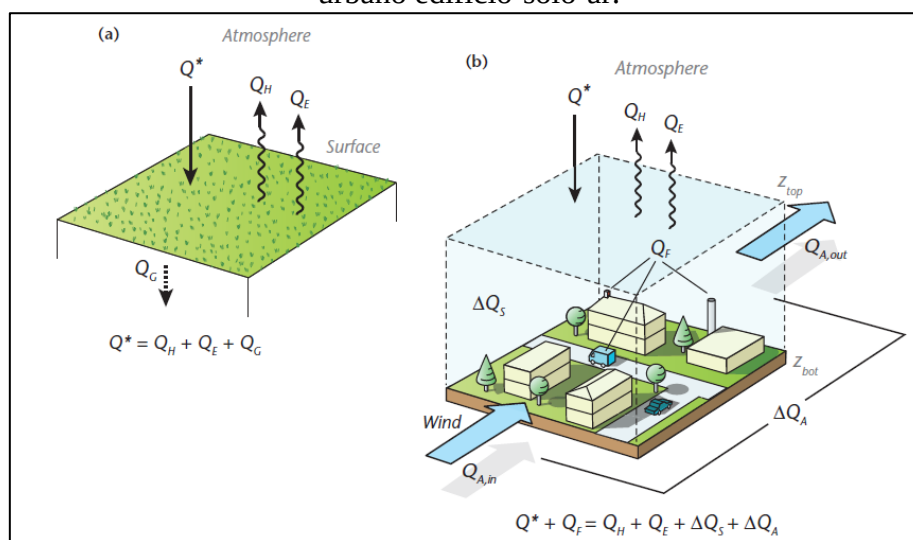
Durante o dia, o balanço de energia é conduzido pela radiação solar. As superfícies ganham calor por radiação solar (ondas curtas) no período diurno e perdem calor por ondas longas durante o dia e a noite num processo contínuo (BARBIRATO *et al.*, 2011). No período diurno, quando o balanço de radiação é positivo, a radiação absorvida determina o aquecimento dos corpos (PILLAR, 1995), parte desta energia é usada como calor latente na evaporação/evapotranspiração da água neles contida, reduzindo a elevação da sua temperatura; e o restante é transportado para suas camadas internas. Em contrapartida no período noturno, com a ausência da radiação solar direta, predomina a emissão de radiação de onda longa pelas superfícies e portanto, o balanço de radiação é negativo (PILLAR, 1995).

A Figura 4 ilustra a situação mais simples, no qual todas as densidades de fluxo de calor são restritas à vertical - essencialmente uma vista unidimensional numa extensa pastagem horizontal. Entretanto, o desenvolvimento urbano de um local anteriormente rural leva a perturbação significativa da geometria da superfície e de suas propriedades (OKE, 2007), e consequentemente provoca impacto nos componentes de ondas curta e longa do balanço de radiação (OKE, 1982). Por isso, Oke sugere para o balanço energético em escala maior de uma paisagem urbana, considerar um volume conceitual e contemplar outros componentes no modelo, representados pela equação a seguir e Figura 5:

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A ,$$

onde, Q_F é o calor liberado dentro o volume devido às atividades humanas associadas à vida, trabalho e viagens (chamado de fluxo de calor antropogênico), ΔQ_S corresponde a mudança no armazenamento de calor líquido por todo o tecido da cidade incluindo materiais construtivos, árvores, solo e ar contidos no volume e ΔQ_A é a energia líquida adicionada ou subtraída do volume pelo transporte do vento (advecção). Todavia, na prática os estudos procuram evitar ΔQ_A optando ou assumindo uma superfície urbana extensa e relativamente homogênea, onde as diferenças horizontais são insignificantes (OKE, 2007).

Figura 5: Fluxos no balanço de energia de superfície de (a) um volume rural e (b) um urbano edifício-solo-ar.



Fonte: Oke *et al.*, 2017.

Em áreas urbanas, o predomínio de superfícies impermeáveis permite/acelera o escoamento da água – ao invés da infiltração – que estaria disponível para evaporação. Assim, a radiação solar absorvida é rapidamente convertida em calor sensível, elevando a temperatura da superfície e, conseqüentemente, do ar de seu entorno (BARBIRATO *et al.*, 2011; PILLAR, 1995). Desta maneira, a noite o meio urbano dissipa parte da energia acumulada ao longo do dia, com este efeito do acúmulo de calor. Conforme Oke (1982), a geometria do local é outro parâmetro crucial nesse sentido, pois determina o recebimento e perda de radiação, sendo o acúmulo de calor potencializado pela geometria tridimensional da cidade que, à noite, limita o resfriamento do ar em comparação com o meio rural. A perda de calor para o espaço é maior em noites com céu descoberto do que em noites nubladas (PILLAR, 1995).

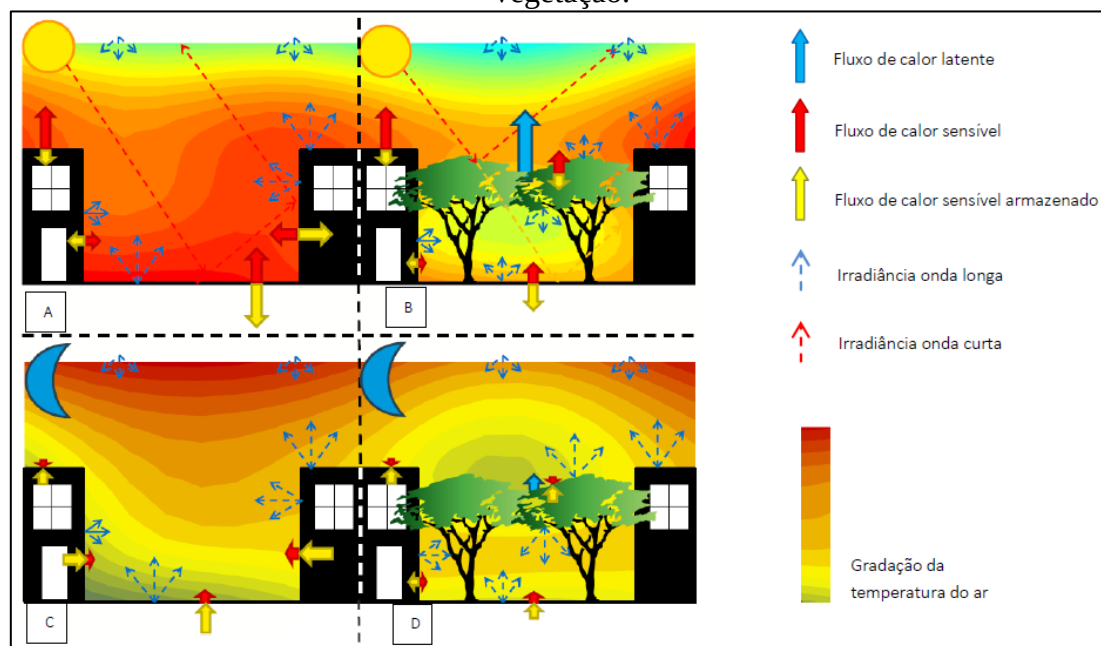
Além destes elementos, a quantidade de vapor d'água na atmosfera também interfere na dissipação do calor. Isto porque, o calor latente transmitido a uma parcela de ar úmido na evaporação da água na superfície é liberado para aquecer o ar quando o vapor de água condensa em nuvem (OKE, 1987). Tal mecanismo está relacionado ao processo de convecção, no qual o calor sensível é transportado de uma superfície mais quente para o ar mais frio acima por redemoinhos turbulentos e é liberado quando mistura com o ar ambiente. O transporte reverso ocorre quando o ar é mais quente que a superfície.

De acordo com Oke (1982), a intensidade da radiação de onda longa e a capacidade de armazenamento de calor das superfícies são os principais fatores que determinam as diferenças no balanço de energia e taxas de aquecimento/resfriamento entre os ambientes urbano e rural. Isto porque, os fluxos de calor na superfície acontecem em virtude das diferenças de temperatura -de locais mais frios para locais mais quentes-, em um esforço para alcançar um equilíbrio, o que influencia ainda nas movimentações de ar e nos fluxos de água. A reflexão ou a absorção da radiação incidente e seu armazenamento ou emissão dos tipos e materiais que compõem a superfície terrestre, por sua vez, dependem de suas propriedades termodinâmicas.

Assim, a radiação de onda longa proveniente das superfícies, edificações e seu entorno, contribui para o desenvolvimento de características climáticas locais específicas como temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. Cumpre salientar que além da composição, Lombardo (2009) aponta outros aspectos que interferem na absorção, reflexão e emissão de radiação nas cidades, como o a densidade das construções, a orientação das ruas, a circulação de veículos e as atividades humanas.

A Figura 6 ilustra a ocorrência desses mecanismos em ambos os períodos diurno (2A e 2B) e noturno (2C e 2D), com o detalhe da influência de alguns tipos de cobertura no nível intraurbano e as consequências para a temperatura do ar.

Figura 6: Interações radiativas e energéticas diurnas (A e B) e noturnas (C e D) do microclima urbano para um ambiente construído com (B e D) e sem (A e C) presença de vegetação.



Fonte: Coutts, 2015.

É possível observar que durante o dia, os processos energéticos em cânions urbanos (Figura 6A) se tornam mais complicados com a presença de árvores, por exemplo (Figura 6B). Dentro do cânion no período diurno, o sombreamento tem maior efeito sobre o resfriamento do que a evapotranspiração (COUTTS, 2015), pois funciona como barreira para a incidência de radiação solar direta sobre paredes e pavimentos, diminuindo os fluxos de calor sensível. Assim, há diminuição do aquecimento do ar abaixo do dossel.

Por outro lado, no período noturno, quando os materiais construtivos perdem o calor acumulado e aquecem o ar ao seu redor, a presença de vegetação (Figura 6D) causa obstrução do céu e diminuição da velocidade do vento, podendo dificultar a perda de calor das superfícies, e consequentemente promover menor diminuição da temperatura do ar abaixo do dossel, e diminuir a amplitude térmica em relação ao ambiente desprovido de vegetação.

Segundo Landsberg (1979), durante a noite, as várias propriedades do material de superfície levam a diferentes taxas de resfriamento. Já durante o dia, embora as superfícies sob insolação atinjam altas temperaturas, há pouco efeito sobre a temperatura do ar na altura convencional de 1,5 a 2m, e o aumento da temperatura do ar adjacente percebido no período noturno não é notado ao meio-dia, pois o excesso de calor é levado por convecção.

2.1.3. Ilha de Calor

Conforme Voogt e Oke (2003), as modificações superficiais e atmosféricas devido à urbanização geralmente levam a um clima que do ponto de vista térmico é mais quente do que as áreas não urbanizadas circundantes, notadamente à noite. Este fenômeno é conhecido como ilha de calor urbana (*Urban Heat Island* - UHI) e foi apontado por Sezerino e Monteiro (1990) como um dos atributos básicos do clima urbano. Assim, a ilha de calor configura-se como um fenômeno resultante do balanço de energia no espaço urbano, associado ao acúmulo de calor nas superfícies e coberturas da terra, com a consequente elevação da temperatura do ar.

Nesse sentido, segundo Oke (1982), trata-se de uma anomalia térmica que possui dimensões horizontais, verticais e temporais, cujo efeito está relacionado com o tamanho da cidade, a quantidade de construções, o uso da terra, e ainda com o clima e as condições meteorológicas do lugar.

A formação das Ilhas de Calor ou ICs é proveniente da interação de vários processos em diferentes escalas, cabendo destacar os seguintes (OKE, 1987):

- modificações no balanço radioativo devido à geometria urbana, aos materiais construtivos e às cores predominantes;
- emissão de calor de origem antropogênica;
- acumulação diurna de calor nas edificações pelos materiais construtivos, o qual é liberado durante a noite;
- mudanças na composição da atmosfera urbana;
- alterações na rugosidade da superfície devido à estrutura e morfologia urbanas, culminando na redução da velocidade média do vento;
- redução da evapotranspiração, devido à escassez de vegetação e ao predomínio de superfícies impermeabilizadas.

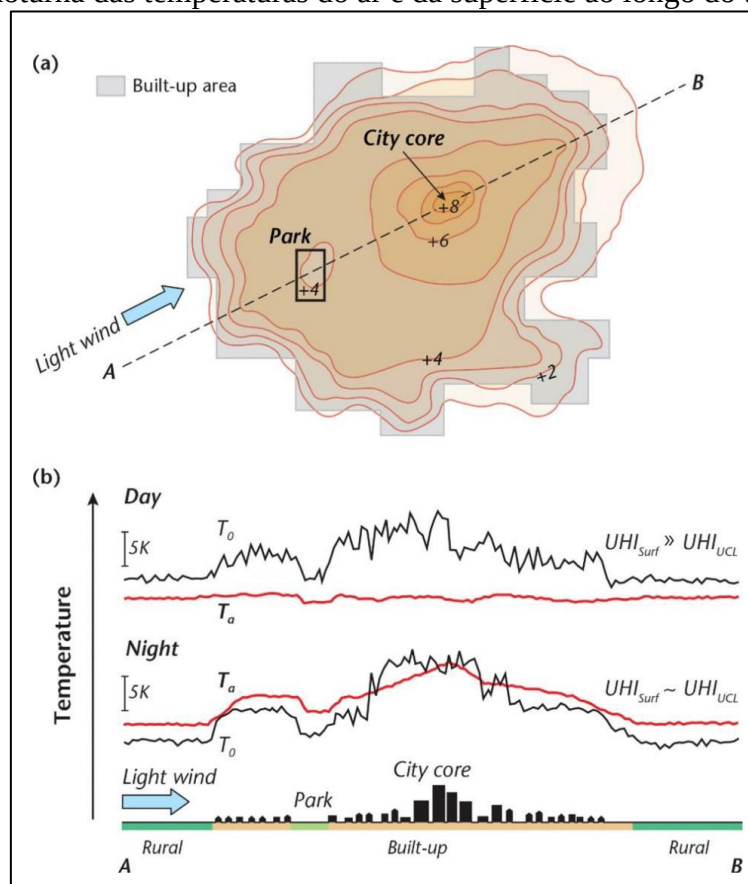
Sob a perspectiva da camada onde é observada, a ilha de calor urbana admite três tipos principais: 1) a ilha de calor superficial (ou SUHI) diagnosticada por meio do sensoriamento remoto, que permite a estimativa da temperatura dos alvos (OKE *et al.*, 2017); 2) a ilha de calor atmosférica inferior (*urban canopy layer*), cuja temperatura é registrada entre o nível do solo e o nível médio dos telhados por meio de diferentes procedimentos, tais como transectos móveis (medidas itinerantes com veículos) e pontos fixos (rede de sensores de temperatura na malha urbana e no ambiente rural); 3) a ilha de

calor da atmosfera urbana superior (*urban boundary layer*), que se sobrepõe à anterior e se estende por vezes até à atmosfera livre (OKE, 1987).

As ilhas de calor (*canopy layer*), conforme Stewart (2019), ocorrem ainda devido a taxas de resfriamento diferenciais em áreas urbanas e rurais, também especialmente em torno do pôr do sol, pois as áreas urbanas esfriam lentamente à noite devido à inércia térmica dos materiais construtivos, à retenção de radiação, à diminuição do fluxo de ar entre os edifícios e produção de calor de atividades humanas e industriais. Desta forma, o emprego de materiais apropriados e vegetação arbórea no ambiente urbano diminui a carga térmica da edificação, reduz o uso de ar-condicionado no verão - e a produção de calor antropogênico -, e portanto, diminui as ilhas de calor e melhora o conforto térmico.

Devido aos diferentes fatores que determinam sua formação, cada tipo de ilha de calor apresenta suas próprias características. A temperatura fornecida pelos satélites durante o dia é superior à temperatura do ar (WENG, 2003). Além disso, a SUHI diurna é normalmente observada como sendo de maior intensidade e maior variação do que a UHI, porque as temperaturas da superfície têm maior variabilidade espacial e temporal (no decorrer do dia) do que as temperaturas do ar, devido às características térmicas de diferentes coberturas da terra (BAPTISTA, 2012; GARTLAND, 2010; WENG, 2003; LOMBARDO, 1985; MENDONÇA; DUBREUIL, 2005). Durante a noite, as temperaturas do ar e da superfície se aproximam, e as ilhas de calor tem comportamentos mais semelhantes. A Figura 7 e o Quadro 2 mostram sinteticamente estas e outras características da ilha de calor de superfície e atmosférica.

Figura 7: Esquema com a variação das temperaturas do ar (T_a) e da superfície (T_0) em uma cidade plana. a) Mapa de isoterma com padrões típicos da UHI. b) Variação diurna e noturna das temperaturas do ar e da superfície ao longo do trajeto A-B.



Fonte: Oke et al., 2017.

Quadro 2: Características das ilhas de calor urbana superficial e atmosférica.

Características	SUHI	UHI (atmosférica)
Intensidade	Maior variação espacial e temporal Diurna: 10 a 15°C Noturna: 5 a 10°C	Menor variação Diurna: -1 a 3°C Noturna: 7 A 12°C
Desenvolvimento Temporal	Presente em todas as horas do dia e da noite Mais intensa durante o dia e no verão	Pode ser pequena ou inexistente durante o dia Mais intensa durante a noite e no inverno
Método de identificação	Medição indireta: Sensoriamento Remoto	Medição direta: Transectos e rede de estações móveis
Representação típica	Imagem termal	Mapa isotérmico Gráfico de temperatura

Fonte: Adptado de EPA, 2008.

É importante observar que os modelos de ilha de calor apresentados sempre se referem as grandes cidades ou áreas metropolitanas. No caso de cidades médias e

pequenas, as ilhas de calor são mais superficiais, ou seja, ocorrem pelas diferenças de temperatura provocadas pelos materiais urbanos. Entretanto, nas grandes cidades a ilha de calor também exibe uma composição vertical - que não ocorre nas pequenas - pois a poluição do ar modifica a temperatura em outros níveis verticais, produzindo a camada limite urbana. Como o processo de urbanização recente no Brasil (e em outros países em desenvolvimento) é marcado pela fragmentação e a existência de polinúcleos, o modelo clássico da ilha de calor na região central não é necessariamente observado nas cidades médias. Estas, a partir de seus atributos, apresentam mais um “arquipélago” com pequenas ilhas de calor em diferentes partes da cidade como destacado por Sezerino e Monteiro (1990), e constatado para a região metropolitana de Curitiba (Paraná) por Mendonça e Dubreuil (2005).

2.1.4. Fatores Explicativos do Clima

Os fatores que influenciam o clima podem ser divididos em globais, regionais e locais. Os globais se referem aos processos atmosféricos de grande escala, como a circulação geral e os centros de pressão, além de radiação solar, latitude, altitude, ventos, massas de água e terra. A escala regional é definida pelas células regionais do clima (massas de ar e sistemas perturbados) associadas as unidades do relevo e características das paisagens geográficas. Enquanto os fatores climáticos locais se referem a topografia, vegetação e a superfície da terra (natural e construída). A interação entre fatores climáticos globais e locais manifesta-se nos elementos climáticos, que são: temperatura, umidade do ar, precipitação e movimentos do ar (BUSTOS ROMERO, 2001; MENDONÇA e DANNI-OLIVEIRA, 2007).

A quantidade de radiação solar que um determinado local ou superfície recebe depende de sua latitude, sendo variável de acordo com a época (estações) do ano (LAMBERTS *et al.*, 2014). Mudanças na elevação e orientação do sítio provocam redução de temperatura do ar, em decorrência da alteração também da radiação solar incidente. Segundo Bustos Romero (2001), o gradiente térmico do ar é de aproximadamente 1°C para cada 200m de altitude, com pouca variação em relação à latitude e às estações. Além disso, o relevo acidentado pode ainda, servir como barreira ou potencializar a ventilação, e influenciar as condições de umidade e de temperatura do ar em escala regional.

No contexto local, Mendonça e Danni-Oliveira (2007) acrescentam que o relevo desempenha efeitos térmicos sob três aspectos: a posição (favorece ou dificulta os fluxos

de calor e umidade), a declividade (modifica a relação superfície/radiação incidente) e a orientação de vertentes (no hemisfério Sul, as vertentes mais quentes são aquelas voltadas para o norte, deixando à sombra aquelas voltadas para o Sul). E no caso do Brasil tropical atlântico, as vertentes a oeste, são mais quentes que as voltadas para leste, explicado pela direção predominante do vento (majoritariamente do quadrante leste) proveniente do oceano atlântico.

A respeito da superfície da terra, as relações e implicações causadas pela urbanização são mais complexas devido à heterogeneidade própria da escala urbana, tanto em termos de composição quanto de configuração. Conforme Oke (2006), para compreender o efeito do urbano na “camada do dossel”, que se estende do solo até o nível das coberturas dos edifícios, deve-se avaliar: a estrutura urbana (dimensão das edificações e espaçamento entre elas, largura das vias e espaçamento entre elas), a cobertura da superfície (construída, pavimentada, com cobertura vegetal, solo descoberto, água), o tecido urbano (resultante da expansão urbana, suas continuidades e descontinuidades) e o metabolismo urbano (água, calor e poluentes oriundos da atividade humana).

No ambiente urbano ocorre uma relação geométrica entre as superfícies (BARBIRATO *et al.*, 2011), determinante para as trocas de calor por radiação entre elas e dessas com o céu, cuja representação pode ser feita por meio de um parâmetro adimensional chamado de fator de visão do céu (*Sky View Factor* - SVF). Nesse sentido, quanto maior a capacidade de visão a partir de uma superfície para o céu, mais facilitadas são as trocas de calor entre superfícies e céu e portanto, maior o resfriamento. Em contrapartida, quanto maior a obstrução do céu – causada pelas morfologias urbanas –, maior será a troca de energia entre as superfícies, resultando no acúmulo de calor no entorno urbano.

Outro fenômeno típico da camada do dossel ocorre quando da presença de altas edificações, no qual suas paredes podem constituir corredores, denominados “*cânions urbanos*” (FERREIRA, 2014). Em seu interior a radiação é refletida várias vezes entre as paredes e vias, causando diferentes absorções, minimizando processos de convecção e diminuindo a velocidade dos ventos. A redução da velocidade dos ventos em função da rugosidade (altura, forma e distribuição dos elementos), por sua vez, corrobora para aumentar o armazenamento de calor durante o dia e a lenta liberação deste calor ao longo da noite, conforme as propriedades dos materiais construtivos. Por outro lado, em alguns casos, a configuração de vias e edifícios pode acelerar a velocidade do vento urbano por meio de efeitos aerodinâmicos tais como efeito de canalização de ruas.

No que se refere a cobertura da superfície, os principais tipos são: corpos d'água, solo descoberto, vegetação arbórea e rasteira e os revestimentos artificiais da urbanização (diversos materiais construtivos). As massas d'água estão relacionadas com o amortecimento das variações térmicas e com o aumento de umidade. Isto porque, a temperatura de um corpo d'água se altera mais lentamente do que a superfície terrestre pois a água reflete mais radiação, perde calor por evaporação, tem um calor específico alto, e redistribui o calor através do processo de convecção (PILLAR, 1995).

O comportamento térmico do solo, por sua vez, está ligado ao seu tipo (textura, densidade e matéria orgânica) e ao seu teor de umidade (SANDHOLT *et al.*, 2002). Desta forma, quanto mais úmido o solo, segundo Pillar (1995), mais lento é o fluxo de calor, porque o calor específico da água é maior do que o dos minerais do solo. Assim, solos secos, nus e de baixa densidade, por exemplo, tem sido associados a altas temperaturas de superfície (CARNAHAN e LARSON, 1990).

A presença de cobertura vegetal está associada, de forma geral, à diminuição da temperatura do ar, aumento da umidade relativa e à redução da amplitude térmica. Além do bloqueio da radiação direta pelo efeito do sombreamento, conforme Lamberts *et al.* (2014), uma superfície gramada ou arborizada exposta ao sol consome uma parte do calor recebido para realizar seus processos metabólicos, destacando-se nesse sentido, a parcela do calor absorvida para evaporar água (mecanismo de evapotranspiração) (MASCARÓ e MASCARÓ, 2010).

No caso dos materiais construtivos, as respostas térmicas variam em função de suas propriedades termodinâmicas - tais como albedo, emissividade e inércia térmica -, que por sua vez, dependem de suas características físicas como densidade, textura e cor (MENESES *et al.*, 2012).

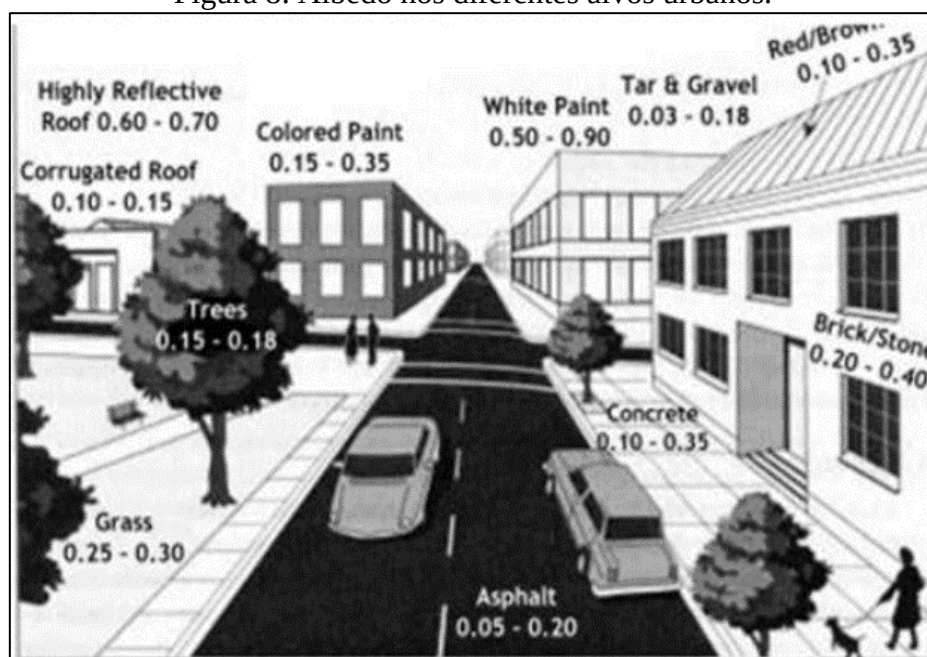
Tais propriedades podem ser categorizadas, conforme EPA (2008) e Oke *et al.* (2017), em “radiativas” ou “térmicas”. As propriedades radiativas controlam a capacidade de refletir radiação de ondas curtas (albedo - α) e ondas longas, e de emitir radiação de ondas longas (emissividade - ϵ). Já as propriedades térmicas (condutividade térmica - k e capacidade de calor - C , por exemplo) governam a capacidade de conduzir e difundir calor para dentro/para fora do material do substrato (OKE *et al.*, 2017).

O albedo ou reflectância dos materiais utilizados no ambiente construído é uma das variáveis responsáveis por seu ganho de calor, pois representa a porção da radiação solar incidente, que é refletida pelo material (quociente fluxo refletido/fluxo incidente) (PRADO e FERREIRA, 2005; EPA, 2008). Os valores medidos de albedo em áreas

urbanas variam de 0,10 a 0,27, com média próxima de 0,15 de acordo com Kanda (2007). Nesse sentido, Oke *et al.* (2017) especificam que, apesar da variedade de materiais, estrutura e localização geográfica das cidades, observa-se uma consistência notável nos valores registrados na cidade e escalas locais -que combinam o efeito de muitos telhados, árvores, cânions, espaços abertos e assim por diante -, sendo o albedo médio ligeiramente inferior das áreas urbanas (0,14) vs suburbanas (0,15).

A Figura 8 ilustra os valores de albedo de diferentes alvos que compõem o meio urbano.

Figura 8: Albedo nos diferentes alvos urbanos.



Fonte: Sant'Anna Neto, 2013.

Como mostrado na Figura 7, a transição de floresta e campo para concreto, asfalto e edificações em geral, produz uma mudança notável no albedo. Conforme Landsberg (1979), a superfície urbanizada tem um albedo 10 a 20% menor e, portanto, absorve mais energia. Nesse sentido, o autor afirma ainda que a energia é armazenada em uma camada mais profunda na área urbana do que na área rural e as temperaturas da superfície são mais elevadas. Segundo Kanda (2007), as complicadas geometrias da superfície urbana podem diminuir substancialmente o albedo da superfície em comparação com uma superfície horizontal devido aos múltiplos reflexos e “armadilhas” de radiação dentro dos espaços do cânion.

Como destacado por EPA (2008) e Prado e Ferreira (2005), embora a refletância solar seja determinante para a temperatura da superfície de um material, a emissividade também desempenha um papel importante nessa equação. A emitância térmica ou emissividade

representa a capacidade de uma superfície de liberar calor ou emitir radiação de onda longa (infravermelha) para seu entorno (EPA, 2008), sendo responsável por seu resfriamento radioativo. Qualquer superfície exposta à energia radiante ficará mais quente até atingir o equilíbrio térmico (ou seja, emite tanto calor quanto recebe). Quando exposta à luz solar, uma superfície com alta emitância atingirá o equilíbrio térmico a uma temperatura mais baixa do que uma superfície com baixa emitância, porque a superfície de alta emitância emite calor mais facilmente (EPA, 2008). Desta forma, superfícies com elevado albedo e emissividade permanecem mais frias quando expostas a radiação solar, pois além de absorverem menos, emitem mais radiação térmica para o espaço, e consequentemente transmitem menos calor para seu entorno (PRADO e FERREIRA, 2005).

Com relação às propriedades térmicas, na cidade predominam materiais de construção com maior condutividade térmica (k) e capacidade térmica (C), o que aumenta o armazenamento de calor no meio urbano (SIDIQUI *et al.*, 2016). O parâmetro apropriado que combina tais propriedades é a admitância térmica ($kC^{1/2}$), também conhecido como inércia térmica. Trata-se da medida da capacidade de resposta térmica de uma superfície para um determinado fluxo de calor (OKE, 1988; SIDIQUI *et al.*, 2016).

De acordo com Martin-Vide e Moreno-Garcia (2020), as cidades apresentam uma notável inércia térmica devido à alta capacidade calorífica dos materiais de construção. Superfícies com elevada inércia térmica devem receber (liberar) calor para (do) armazenamento com relativa facilidade e registrar mudanças de temperatura de superfície relativamente pequenas. Especialmente à noite, quando o armazenamento assume um papel mais importante no balanço energético total de ambientes urbanos e rurais, esse fator pode ser importante na manutenção de temperaturas urbanas mais quentes (OKE, 1982).

Por fim, existe a influência do metabolismo urbano com suas implicações no clima local. Nesse sentido, Taha (1997) e Oke *et al.* (2017) explicam que o calor sensível é liberado principalmente pelos processos industriais e pelo resfriamento/aquecimento de ambientes internos (fontes fixas), bem como pela queima dos combustíveis fósseis empregados no transporte urbano (fontes móveis). Além disso, tais processos lançam água em estado líquido e gasoso, assim como poluentes particulados e gasosos na atmosfera. Cumpre relatar que o calor antropogênico depende do padrão de consumo de energia e envolve ciclos diurnos e sazonais. Segundo Taha (1997), o calor antropogênico

tem efeito menor do que o albedo e a cobertura vegetal, sendo desprezível em áreas comerciais e residenciais.

O recorte espacial desta pesquisa contemplou uma cidade de médio porte, com reduzida atividade industrial e predomínio de áreas residenciais e de comércio e serviços, de tal forma que a influência do calor antropogênico nesse caso pode ser considerada pouco significativa. Não obstante, delimitou-se esta investigação na dimensão do dossel urbano, ou seja, na cobertura das superfícies. Assim, aspectos sobre a vegetação urbana e os materiais construtivos são detalhados a seguir.

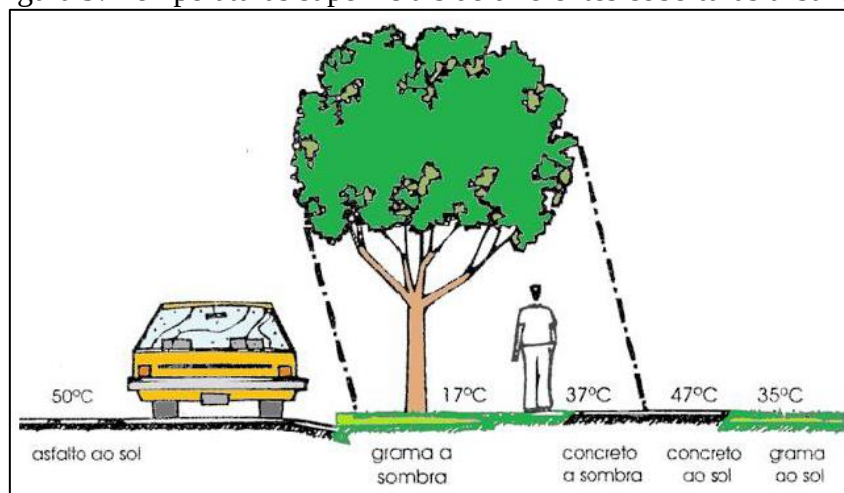
Cumprе salientar que na literatura consultada, os termos “cobertura” e “superfície” ora foram tratados como sinônimos, ora como distintos. Tendo em vista que os procedimentos metodológicos consistiram majoritariamente em técnicas do sensoriamento remoto, baseadas na “visão” bidimensional (plana) do satélite, para o presente trabalho optou-se por utilizá-los como sinônimos para representar alvos horizontais ou não. Portanto, ao longo desta pesquisa os termos “cobertura” e “superfície” referem-se igualmente a: pavimentos (asfalto, concreto), telhados (cerâmica, fibrocimento, metálico), corpos d’água, vegetação arbórea (copa de árvore), vegetação rasteira e solo exposto.

2.1.5. Vegetação Urbana

A eficácia das árvores - e da vegetação em geral - no controle da radiação solar absorvida pela interface cidade-atmosfera, e reemitida em parte como radiação de onda longa, depende de fatores como a densidade da folhagem, o formato da folha e a quantidade de água disponível para evapotranspiração (QUATTROCHI e RIDD, 1998). Sob essa perspectiva Labaki *et al.* (2011) acrescentam que a disposição, a densidade e a forma dos indivíduos são fatores relevantes devido aos arranjos resultantes, além de questões associadas a sazonalidade e a fenologia. Consequentemente, as interações solo-vegetação-atmosfera e suas implicações na temperatura de superfície e na temperatura do ar são complexas.

Nas cidades costumam predominar os pavimentos asfálticos e coberturas com baixo albedo e baixa emissividade, que tendem a acumular o calor na superfície, elevando sua temperatura de superfície e consequentemente, elevando a temperatura do ar no entorno. A Figura 9 mostra alguns tipos de superfícies urbanas e suas respectivas temperaturas.

Figura 9: Temperaturas superficiais de diferentes coberturas urbanas.



Fonte: Laurie, 1978 *apud* Mascaró e Mascaró, 2010.

No caso da vegetação arbórea, Mascaró e Mascaró (2010) explicam que as árvores resfriam o ambiente de forma direta mediante o sombreamento e, de forma indireta através da evapotranspiração. Na Figura 9 é possível observar o efeito do sombreamento, que conseguiu amortizar 10°C na superfície concretada e quase 20°C na superfície gramada. Sobre vegetação rasteira em áreas abertas, o estudo de Dodd (1979) revelou que assim como o solo nu, elas armazenam calor com menos eficiência do que superfícies totalmente vegetadas ou urbanizadas.

Mascaró e Mascaró (2010) afirmam que o sombreamento representa uma das funções mais importantes da arborização nos espaços urbanos, em especial para as cidades de clima tropical e subtropical úmido. As árvores, isoladas ou em grupos, amenizam grande parte da radiação incidente, impedindo que sua totalidade atinja o solo ou as construções. Trata-se, portanto, de uma estratégia de resfriamento passivo para a edificação, pois há atenuação da radiação solar incidente e do aquecimento das superfícies, reduzindo a emissão de radiação de onda longa para o meio (LABAKI *et al.*, 2011). Outro efeito importante apontado por Quattrochi e Ridd (1998) é a redução de parte do armazenamento de energia solar, que se espalha pelas folhas dentro da copa das árvores, além da extensão do dossel também resultar num efeito significativo na energia de onda longa da ressurgência, reduzindo o fator de visão do céu.

De acordo com Lambers (2008), os efeitos térmicos são em parte exercidos por meio das relações com a água porque as taxas de evaporação e transpiração são correlacionadas com a temperatura. Além disso, a própria inércia térmica, que influencia a temperatura superficial no caso de superfícies parcialmente vegetadas, é determinada pelo tipo de solo e muda com a umidade da superfície do solo (SHANDOLT *et al.*, 2002).

Enquanto a energia absorvida pelas plantas através da fotossíntese é geralmente pouco significativa (1%) em relação ao total da radiação incidente, sendo desprezada no balanço de radiação (PILLAR, 1995); a transpiração é o maior componente do balanço de energia das folhas, de modo que conforme a água evapora da superfície das células mesofílicas, ocorre resfriamento da folha (LAMBERS, 2008). A evapotranspiração consome assim, grande parte da radiação absorvida pelas folhas, aumentando o calor latente ao invés do calor sensível, acarretando o resfriamento das folhas e do ar ao redor delas (GIVONI, 1989; LABAKI *et al.*, 2011).

Tendo em vista que a intensidade da evapotranspiração está diretamente relacionada à disponibilidade de água no solo (GARTLAND, 2010; ERELL, 2008; SHINZATO, 2014), características do ambiente construído urbano como a redução de umidade em decorrência do predomínio de áreas impermeabilizadas, acompanhada muitas vezes pela presença de partículas de poluição e pela alta carga de calor, reduzem ou inibem a evapotranspiração (ERELL, 2008).

2.1.6. Materiais Construtivos

No ambiente construído as características térmicas dos materiais, expressas por suas propriedades termodinâmicas como albedo, emissividade e inércia térmica, são determinantes para a quantidade de energia térmica acumulada e irradiada para a atmosfera. Na maioria das áreas urbanas, segundo Akbari *et al.* (2009), os bairros residenciais e suburbanos constituem a maioria das superfícies e a fração de áreas com edifícios altos é bastante pequena. Assim, os materiais utilizados nessas áreas assumem papel decisivo para o campo térmico das cidades.

De modo geral, os materiais de construção têm características térmicas que os tornam bons condutores e/ou armazenadores de calor, e com exceção do metal, apresentam valores de emissividade elevados. Sob essa perspectiva, pavimentos asfálticos e telhados com baixo albedo e baixa emissividade tendem a ter a sua temperatura mais elevada, o que acarreta transferência de calor para o seu entorno e aumento na temperatura do ar. Por outro lado, superfícies com albedo e emissividade elevados se mantêm frias, mesmo quando expostas a radiação solar e consequentemente, transmitem menos calor para seu redor.

Para materiais finos como telhados, que geralmente são colocados sobre o isolamento, a refletância e a emitância são as principais propriedades a serem consideradas, pois a capacidade térmica de um telhado bem isolado é baixa. No caso dos

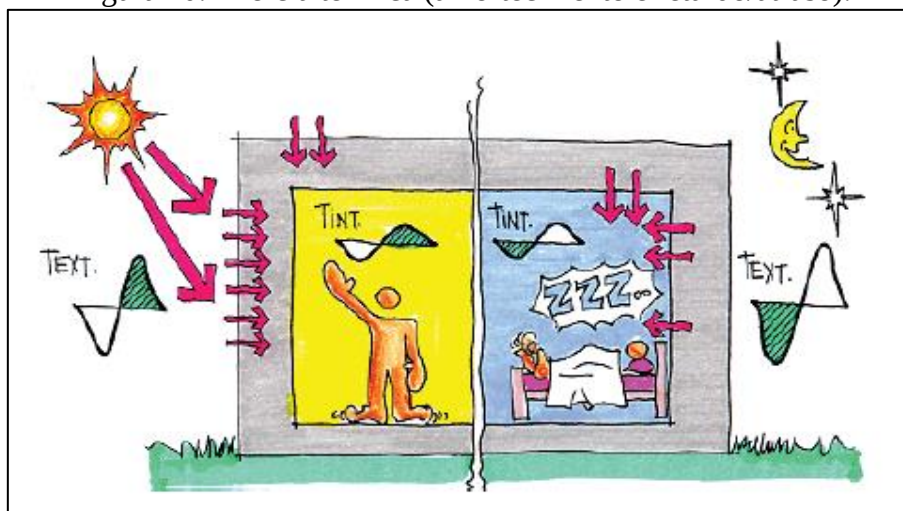
pavimentos, cuja espessura é maior que dos produtos de cobertura e são posicionados no topo do solo, além de terem suas características térmicas específicas, é necessário considerar um conjunto mais complexo de fatores, dentre eles: as propriedades radiativas e térmicas – como capacidade de calor, condutividade térmica e densidade (EPA, 2008; OKE *et al.*, 2017).

Outros fatores afetam tais propriedades como a quantidade de água e a rugosidade. De acordo com Meneses *et al.* (2012), a umidade do material tende a reduzir o albedo e com isso, maior é a sua capacidade de absorver a energia e de reemitir posteriormente. No caso da emissividade, Carnahan e Larson (1990) afirmam que a emissividade do solo por exemplo, está diretamente ligada à umidade do solo. Nesse sentido, Meneses *et al.* (2012) explicam que a emissividade de um solo seco, com valor de 0,92, quando úmido passa a ser de 0,95, ou seja, partículas de solo úmido têm uma alta emissividade - semelhante à da água. Trata-se de uma questão fundamental na análise do campo térmico urbano, pois estudos anteriores demonstraram variações nos padrões de disponibilidade de umidade, com redução de umidade nas áreas urbanas e não vegetadas. No trabalho de Dodd (1979), por exemplo, em ambas as cidades estudadas (St. Louis e Los Angeles – nos EUA) os mínimos de umidade localizaram-se no centro da cidade, onde a atividade comercial se concentra e o tecido urbano é uma mistura heterogênea de asfalto e concreto com poucas superfícies de transpiração livre.

Em relação à rugosidade, os espaços urbanos também se destacam quando comparados a zona rural, porque detém elementos de rugosidade - as edificações – em elevada quantidade e diversidade. Nesse sentido, superfícies com maior rugosidade tendem a apresentar menor albedo que superfícies mais lisas, pois maiores serão as áreas de sombra. Além disso, quanto maior a área superficial do objeto, maior tende a ser seu potencial de absorção, tornando-se um bom emissor (MENESES *et al.*, 2012).

Outra propriedade responsável pelo comportamento dos materiais construtivos é a inércia térmica, que indica sua maior ou menor capacidade em reter calor. Materiais de grande capacidade térmica necessitam de grande quantidade de calor para variar sua temperatura (LAMBERTS *et al.*, 2014). Quanto maior a capacidade térmica dos componentes de uma edificação (paredes e cobertura), maior sua inércia térmica. Dois são os efeitos promovidos pela inércia térmica sobre o fluxo de calor entre o ambiente externo e o ambiente interno: o atraso térmico e o amortecimento térmico (Figura 10).

Figura 10: Inércia térmica (amortecimento e retardo/atraso).



Fonte: Lamberts *et al.*, 2014.

O atraso térmico representa quanto tempo o calor levará para atravessar o material, enquanto o amortecimento retrata a capacidade do material em reduzir a amplitude das variações térmicas (LAMBERTS *et al.*, 2014). Assim, quanto maior a inércia térmica, maior o retardo do fluxo de energia e maior o amortecimento dos picos de temperatura internos comparados ao ambiente externo. Os autores ressaltam que a condução do calor implica - devido à inércia térmica - na retenção de uma parte no interior do material, de tal forma que quanto maior a inércia térmica, maior o calor retido, podendo este ser devolvido ao interior quando for necessário.

Sob essa perspectiva, em locais quentes a inércia térmica pode ser utilizada para resfriar o ambiente interior, desde que as aberturas sejam sombreadas e a ventilação diurna seja evitada, pois eleva-se a temperatura interna ao trazer o ar quente do exterior. No período noturno, a ventilação deve ser seletiva, para retirar o calor acumulado durante o dia e garantir o conforto térmico das pessoas (LAMBERTS *et al.*, 2014). Sob condições de inverno, a elevada inércia térmica pode evitar que as temperaturas internas se reduzam tanto quanto a temperatura externa, desde que se maximize a admissão da insolação e se evitem perdas de calor restringindo a ventilação (LAMBERTS *et al.*, 2010).

O desempenho térmico de uma edificação é influenciado, portanto, por seus fechamentos: horizontais (telhados/piso) e verticais (paredes e janelas). Nesse sentido, as edificações térreas ou até assobradadas, geralmente, têm seu desempenho térmico afetado mais em função dos telhados do que das paredes, pois a radiação solar incide durante grande parte do dia sobre o telhado. Nas residências - em comparação com edifícios comerciais -, a geração de calor interno proveniente de pessoas, computadores e sistemas de iluminação

artificial é menor. Logo, para as residências, os ganhos de calor através das paredes, telhado e aberturas, assim como as condições de exposição à insolação e à ventilação, são os principais fatores determinantes do desempenho térmico (LAMBERTS *et al.*, 2010).

De acordo com Akbari *et al.* (2009), os pavimentos e telhados constituem normalmente mais de 60% das superfícies urbanas nos Estados Unidos: telhados detêm 20–25% enquanto pavimentos representam cerca de 40%. As cidades dos EUA e do continente europeu são tipicamente dotadas de grande quantidade e extensão de vias públicas e parques de estacionamento. Entretanto, visto que o Brasil e especialmente as cidades médias paulistas têm carência de praças, parques e áreas verdes, infere-se que provavelmente a proporção de área dos telhados deve ser mais expressiva, e inclusive maior do que a superfície pavimentada.

A importância dos telhados e de outras superfícies é destacada ainda por Amorim (2018). Em estudo realizado pela autora, os resultados mostraram que bairros de habitação social periférica, com lotes menores densamente construídos, exibiram as temperaturas mais elevadas quando comparados a outros que, apesar de densamente construídos, possuem calçadas com vegetação e, em alguns casos, vegetação no interior dos lotes. Desta forma, as temperaturas são explicadas não apenas pela densidade construída, mas também pelos materiais do telhado (e materiais de superfície), pois nos bairros urbanos de baixa densidade, há presença de telhados de fibrocimento com albedo de 0,34 e emissividade de 0,9 (AMORIM, 2018).

Na maioria das edificações, o telhado é o elemento construtivo mais exposto à radiação solar, e portanto, é um componente responsável por grande parte do fluxo de calor transferido para a edificação e seu entorno (PRADO e FERREIRA, 2005). Isso é especialmente importante em cidades tropicais, pois estão localizadas na zona de maior incidência dos raios solares. Nesse sentido, Akutsu e Vittorino (2000) *apud* Chieppe (2013) constataram que para habitações de pequeno porte, cerca de 45% do ganho total de calor em um dia típico de verão e cerca de 49% da perda de calor para a condição de inverno, acontece pelos telhados. Desta forma, os telhados influenciam diretamente no conforto térmico dos usuários e no consumo de energia da edificação, especialmente a demanda de ar-condicionado. Cabe salientar que no Brasil, o predomínio na composição dos telhados é das telhas cerâmicas e de fibrocimento (geralmente nas residências da população de menor renda).

De acordo com EPA (2008), os materiais de telhado mais frios têm uma alta refletância solar, mais de 65%, absorvendo e transferindo para o edifício 35% ou menos

da energia que os atinge. Tais materiais refletem a radiação em todo o espectro solar, especialmente nos comprimentos de onda do visível e infravermelho (calor).

Prado e Ferreira (2005) apontam que a análise do ganho de calor nos telhados pode ser feita por meio da temperatura superficial alcançada por eles quando expostos à radiação solar, em uma condição pré-estabelecida. O Quadro 3 mostra algumas das propriedades e o respectivo o comportamento térmico de diferentes materiais.

Quadro 3: Temperatura superficial⁶ e propriedades dos materiais para condições climáticas pré-estabelecidas.

Material	Albedo	Emissividade	Temperatura Superficial (°C)	Diferença de temperatura entre o ar e o material (°C)
Cerâmica Vermelha	0,53	0,9	36,8	-0,1
Cerâmica Branca	0,54	0,9	36,2	-0,6
Fibrocimento	0,34	0,9	47,1	10,3
Alumínio sem pintura	0,57	0,05	69,4	32,6
Alumínio cores claras	0,40 a 0,47	0,9	40,1 a 43,3	3,2 a 6,5
Alumínio cores escuras	0,26 a 0,38	0,9	45,0 a 51,4	8,1 a 14,5
Aço galvanizado sem pintura	0,57	0,25	57,9	21,1

Fonte: Adaptado de Prado e Ferreira, 2005.

Conforme os resultados apresentados no quadro adaptado de Prado e Ferreira (2005), a cerâmica vermelha e a branca foram os únicos materiais entre os investigados que atingiram temperaturas de superfície inferiores às do ar, sob as condições climáticas estabelecidas. Em contrapartida, materiais metálicos com desempenhos semelhantes aos das cerâmicas em termos de albedo, em torno de 55%, exibiram temperaturas superficiais bem superiores. Gartland (2010) também alerta que telhas metálicas com albedo de 0,57 podem alcançar 57,9°C de temperatura de superficial sob o sol. Isto porque, materiais metálicos sem revestimento têm baixa emitância (emitem pouca radiação térmica), e as perdas de calor por convecção não conseguem resfriá-los. Ainda sobre o tema, a autora destaca que o albedo dos telhados tende a variar com a idade ou tempo de utilização, de tal forma que a exposição ao tempo tende a diminuir a refletância dos materiais claros e aumentar a refletância dos materiais escuros.

⁶ Os resultados das temperaturas de superfície de cada material foram estimados em função de sua emitância e albedo, de acordo com as condições especificadas pela *American Society for Testing and Materials* - ASTM 1980-98.

Assim, as cerâmicas vermelha e branca, conforme Prado e Ferreira (2005), podem ser denominadas como “materiais frios”, pois apresentam elevado albedo e emissividade. Por outro lado, os telhados metálicos, mesmo apresentando um albedo mais alto, alcançam uma temperatura elevada em função da baixa emissividade, resultando em uma troca de calor entre a telha metálica e o ambiente, com impactos na temperatura do ar. Dessa forma, Prado e Ferreira (2005) complementam que a emitância de materiais metálicos os desqualifica como “frios”, e enfatiza a influência dessa propriedade para a temperatura superficial⁷.

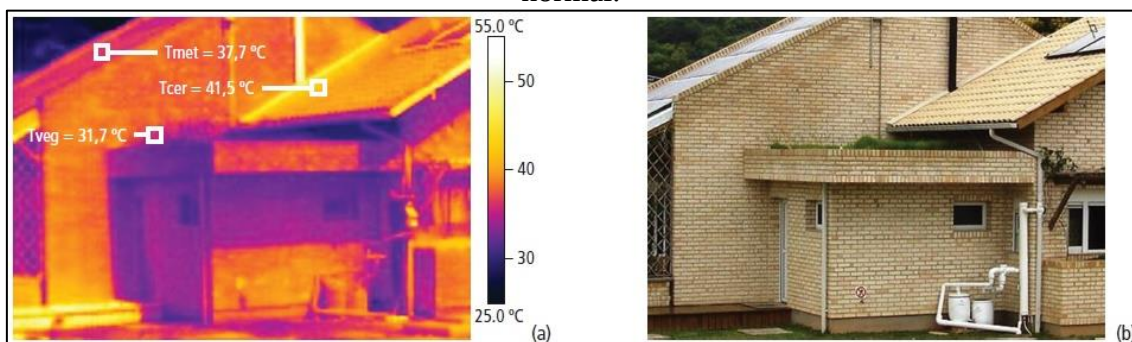
Segundo Akbari *et al.* (2009), um telhado reflexivo é normalmente de cor clara e absorve menos luz solar do que um telhado convencional de cor escura. Este aspecto também pode ser observado no Quadro 3, pois os materiais de cor clara - cerâmica clara e telhado de alumínio de cor clara- exibiram temperatura superficial menor em relação aos seus semelhantes de coloração escura (cerâmica vermelha e telhado de alumínio de cor escura, respectivamente). Nesse sentido, Lamberts *et al.* (2014) acrescentam que se uma chapa metálica, cuja emissividade é 0,20 for pintada com tinta não metálica de qualquer tipo, sua emissividade passará a ser 0,90, equivalente aos materiais não metálicos.

Dentre as estratégias para diminuir as temperaturas das superfícies da edificação, Lamberts *et al.* (2014) recomendam o resfriamento evaporativo, que consiste na retirada de calor do ar pela evaporação de água ou pela evapotranspiração das plantas. Os autores aconselham por exemplo, o uso de telhas de cerâmica não vitrificadas porque sua porosidade absorve a água da chuva e do sereno noturno, sendo posteriormente evaporada com a incidência do sol. Consequentemente, a telha perde calor, reduz os ganhos térmicos por condução e a temperatura radiante. Os autores apontam ainda que o incremento desse efeito pode ser obtido através do umedecimento periódico do telhado nos dias mais quentes.

Outro experimento, executado por Lamberts *et al.* (2010) em Florianópolis e com parte dos resultados ilustrados na Figura 11, permitiu comparar telhados distintos (vegetado-Tveg, metálico-Tmet e cerâmico-Tcer) e suas respectivas respostas térmicas em relação às condições climatológicas da área.

⁷ Algumas superfícies que possuem baixa emissividade, notadamente as metálicas e polidas, além de vidros de janela, podem exibir temperatura anormalmente baixas em imagens térmicas de infravermelho (por exemplo telhados metálicos e veículos) sob condições de céu claro. A explicação para tal fenômeno é detalhada na seção seguinte.

Figura 11: Termografia de infravermelho: (a) Fotografia termográfica e (b) Fotografia normal.



Fonte: Lamberts *et al.*, 2010.

A Figura 11 revela que o telhado vegetado apresentou a menor temperatura superficial externa. Em todo o período analisado pela pesquisa observou-se que a temperatura superficial externa da cobertura vegetada se manteve entre 5,5 e 45,3°C, a metálica e a cerâmica atingiram, por sua vez, valores de 0,6 a 57,7°C e 3,2 a 52,7°C, respectivamente (LAMBERTS *et al.*, 2010). Não obstante, os autores afirmam que os padrões de uso e ocupação também interferem no comportamento térmico de uma residência, na medida em que o modo como os usuários manipulam os dispositivos de controle da ventilação e da insolação influem nos ganhos e perdas de calor pela edificação.

No que se refere aos pavimentos, EPA (2008) aponta respostas distintas entre os materiais convencionais (asfalto e concreto) e permeáveis. Conforme a agência, para os convencionais (com albedo de 5 a 40%), a maioria dos impactos na superfície tende a afetar a subsuperfície da mesma forma, de maneira que materiais convencionais com alta refletância solar geralmente reduzem as temperaturas de superfície e subsuperfície, pois há menos calor disponível na superfície para ser absorvido pelo pavimento. No entanto, as superfícies permeáveis reagem de forma diferente.

Quando secas, as temperaturas de superfície do pavimento permeável podem ser superiores ao seu equivalente impermeável; mas pesquisas preliminares mostram que a subsuperfície geralmente é semelhante ou até mais fria que o equivalente convencional, porque a camada permeável reduz a transferência de calor abaixo. É importante destacar que tal qual para os telhados, os valores de reflectância para pavimentos também dependem da idade e do material e, portanto, geralmente mudam com o tempo. Além disso, embora a emissividade seja uma propriedade importante, existem alternativas limitadas para adotar práticas de pavimentação fria que a modifique, porque a maioria dos materiais de pavimento possui valores de emitância elevados.

2.2. SENSORIAMENTO REMOTO

Os efeitos da urbanização no Clima Urbano podem ser estudados por meio de vários métodos, sendo comumente observadas técnicas relacionadas com uso de estações meteorológicas fixas, transectos móveis, sensoriamento remoto, sensoriamento vertical e balanço de energia (GARTLAND, 2010). Desde os anos 70, segundo Dubreuil (2005), a observação e análise da atmosfera terrestre por meio de satélite transformou de modo intenso e melhorou o conhecimento dos mecanismos climáticos.

De acordo com Meneses e Almeida (2012), o sensoriamento remoto trata de uma técnica de obtenção de imagens dos objetos da superfície terrestre sem contato físico entre o sensor e o objeto, por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres.

Nesse contexto, Berger *et al.* (2017) salientam que a seleção e interpretação cuidadosa de dados obtidos por meio do sensoriamento remoto monotemporal ao estudar ilhas de calor de superfície, por exemplo, e seus fatores explicativos, é importante devido às peculiaridades decorrentes das variações sazonais (estações do ano) nas datas de aquisição de imagens. Não obstante, os autores enfatizam que o aumento da evidência empírica obtida com as séries temporais de temperatura de superfície permite a inferência de tendências gerais dos dados em níveis de confiança mais elevados.

Na escala local, muitos benefícios do emprego do sensoriamento remoto podem ser apontados, dentre eles o fornecimento de informações detalhadas sobre o uso da terra e sobre a temperatura de superfície com uma amostragem mais completa e uniforme comparados com medições *in situ*, além da possibilidade de realizar análises integradas em várias escalas espaciais, temporais e espectrais (Alavipanah *et al.*, 2015). Nesse sentido, considerando a resolução temporal, Weng (2009) afirma que os dados de sensoriamento remoto têm grande potencial para investigação do balanço de energia da superfície urbana, assim como do padrão espacial e da dinâmica temporal das paisagens térmicas urbanas. Face ao fato de que muitas cidades localizadas em países em desenvolvimento não dispõem de uma rede densa de estações meteorológicas, as técnicas de sensoriamento remoto apresentam vantagem também nesse sentido para o estudo do clima urbano (OKE *et al.*, 2017).

2.2.1. Temperatura de Superfície

Dentre os elementos climáticos mais relevantes no estudo das cidades, têm-se a temperatura como uma variável utilizada na maioria trabalhos, cuja importância se torna ainda maior diante das condições naturalmente quentes dos ambientes tropicais. A

temperatura é resultado não apenas do calor fornecido pela radiação solar, mas também, das mudanças microclimáticas produzidas pelas alterações do espaço urbano (SANT'ANNA NETO e RAMPAZZO, 2016). Nesse sentido, a temperatura da superfície (*Land Surface Temperature* ou LST) tem papel fundamental, pois, segundo Voogt e Oke (2003), ela modula a temperatura do ar das camadas mais baixas da atmosfera urbana, é central para o balanço energético da superfície, ajuda a determinar o clima interno dos edifícios e afeta as trocas de energia que influenciam o conforto dos habitantes da cidade.

Por meio do uso de imagens termais e técnicas de sensoriamento remoto é possível estimar temperaturas superficiais, porque todos os objetos que constroem a superfície terrestre são fontes de emissão de radiação eletromagnética com intensidades de emissão proporcionais às temperaturas de superfície (MENESES e ALMEIDA, 2012). As medidas de temperatura de superfície ainda, incorporam os efeitos das propriedades radiativas e termodinâmicas da superfície, incluindo umidade, admitância e emissividade, além da intensidade da radiação direta e difusa incidente e os efeitos locais atmosféricos nas trocas térmicas da superfície (VOOGT e OKE, 2003).

De acordo com Barros e Lombardo (2016), a temperatura da superfície medida via satélite é uma alternativa viável e eficiente para estudos espaciais dos fenômenos relativos à temperatura do ar na baixa atmosfera, visto que esta tem relação estreita com a radiação de onda longa emitida pela superfície. Lemus-Canovas *et al.* (2020) destacam ainda que o estudo da temperatura da superfície terrestre é de vital importância na pesquisa climática e ambiental em áreas urbanas.

O princípio básico de funcionamento dos sensores remotos é a captura da energia refletida ou emitida pela superfície em diferentes faixas espectrais (MENESES e ALMEIDA, 2012). Os sensores que contemplam a faixa do infravermelho termal (*thermal infrared* ou TIR) são aqueles que permitem a recuperação dos valores de temperatura de superfície. Os dados TIR têm papel fundamental para uma série de aplicações conforme sua resolução espacial. Os sensores com resolução espacial muito alta -geralmente menor que 30m, conhecida como *very-high-resolution* (VHR) -, são transportados por aeronaves (aviões ou drones), e tem uso geralmente restrito a áreas e momentos específicos devido aos elevados custos. Já os sensores TIR com menor resolução espacial (maior que 30m) localizam-se a bordo de satélites e têm sido amplamente utilizados em virtude da facilidade e gratuidade de seu acesso, da existência de rotinas estabelecidas para processamento de dados que minimizam o risco de

análise/interpretação inadequada, além de conjuntos de dados auxiliares acessíveis como os índices radiométricos.

Embora o sensoriamento remoto VHR TIR seja capaz de fornecer a temperatura de superfície em resoluções muito altas no momento do registro, tais dados, conforme sugerem os resultados de Coutts *et al.* (2016), podem não ser adequados para identificar pontos quentes (*hotspots*) pois os padrões de LST não se correlacionam fortemente com os padrões de temperatura do ar. Assim, os dados VHR TIR não permitiriam a verificação de processos radiativos e termodinâmicos que conduzem a LST (por exemplo albedo, tipo de solo, teor de água), sendo necessária uma escala espacial mais grosseira (resolução > 30m). Isso porque, a temperatura do ar na camada de dossel depende da divergência de fluxo no volume de ar, incluindo advecção, bem como do balanço de energia da superfície de uma variedade de superfícies urbanas (ROTH *et al.*, 1989). Coutts *et al.* (2016) acrescentam sobre a possibilidade de erros durante a coleta e pós-processamento de dados, prejudicando sua qualidade, e recomendam o uso de VHR TIR para a identificação de áreas de baixo conforto térmico resultante de alta exposição solar (sombra limitada).

Dentre os satélites com bandas que contemplam a faixa do infravermelho termal e permitem recuperação de dados de tal natureza, o Landsat 8 tem sido amplamente utilizado pois, além da disponibilização gratuita e do tempo de revisita de 16 dias, ele detém a melhor resolução espacial (100metros, tratadas e disponibilizadas com pixel de 30metros). Esta última característica, conforme Lemus-Canovas *et al.* (2020), favorece seu emprego principalmente para estudos em cidades de médio porte, pois ela permite capturar a grande maioria dos detalhes em áreas urbanas.

Referido satélite opera com dois sensores imageadores: o *Operational Land Imager* (OLI), com nove bandas espectrais incluindo a banda pancromática, e o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) com duas bandas termais, cujas características são mostradas no Quadro 4. Trata-se de um satélite cujo funcionamento baseia-se em mecanismos passivos, ou seja, seus registros dependem de fonte luminosa externa (o sol). Por isso, não é possível utilizar tal recurso para obter dados de reflectância noturnos (bandas VIS, NIR e SWIR). A exceção nesse sentido se dá para as bandas TIR, pois a energia emitida naturalmente pela superfície (como infravermelho térmico) pode ser detectada durante o dia ou a noite, desde que a quantidade de energia seja suficiente para ser registrada.

Quadro 4: Intervalo espectral das bandas do satélite Landsat 8⁸.

Bandas	Resolução Espectral (µm)	Resolução Espacial (m)
1- Coastal Aerosol	0.43-0.45	30
2- Blue	0.45-0.51	30
3- Green	0.53-0.59	30
4- Red	0.64-0.67	30
5- Near Infrared (NIR)	0.85-0.88	30
6- SWIR 1	1.57-1.65	30
7- SWIR 2	2.11-2.29	30
8- Panchromatic	0.50-0.68	15
9- Cirrus	1.36-1.38	30
10- Thermal Infrared (TIRS 1)	10.60-11.19	100*
11- Thermal Infrared (TIRS 2)	11.50-12.51	100

* A resolução espacial de captura da imagem é 100m, porém são tratadas e disponibilizadas com pixel de 30m.

Fonte: *United States Geological Survey*⁹.

A medição da temperatura por sensoriamento remoto no infravermelho termal se baseia na propriedade de emissividade dos corpos (ou alvos), pois os sensores TIR registram a intensidade da radiação equivalente à temperatura radiante aparente do terreno (radiação eletromagnética que sai do objeto). Diferentemente da temperatura cinética verdadeira, medida pelo termômetro, que se refere ao grau de movimento ou de agitação das moléculas. Tendo em vista que a emissividade varia entre 0 e 1, a temperatura radiométrica medida pelo sensor sempre será inferior à temperatura cinética real do objeto. Para os materiais com emissividade muito baixa, como os metais polidos, Jensen (2009) e Meneses e Almeida (2012) relatam que a temperatura radiométrica pode ser muito mais baixa que a sua temperatura cinética, dando a impressão de ser uma superfície mais fria. Nesse sentido, Oke *et al.* (2017) explicam que superfícies com emissividade baixa retêm calor, mas parecem anormalmente frias quando vistas por sensores térmicos remotos porque o componente refletido da radiação de onda longa da fonte mais fria é aumentado, mas o componente emitido da radiação de onda longa total de saída é reduzido. Tal informação é imprescindível para uma correta interpretação de respostas térmicas de objetos urbanos com baixa emissividade como os telhados metálicos.

Sob essa perspectiva, o procedimento para obtenção da temperatura a partir do sensoriamento remoto envolve duas questões importantes:

⁸ Embora as bandas termais (10 e 11) possuam resolução espacial de 100 metros, elas são processadas e disponibilizadas com uma resolução espacial de 30 metros pela USGS.

⁹ Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php>.

a) Efeitos atmosféricos – os sensores TIR do satélite medem a radiância do topo da atmosfera (TOA) para posterior derivação da temperatura de brilho por meio da lei de Plank. Como TOA é resultado da mistura da radiância emitida da superfície da Terra, com a radiância ascendente da atmosfera e a radiância descendente do céu, faz-se necessário a correção dos efeitos de absorção, emissão ascendente e irradiância descendente refletida da superfície (WENG, 2009; OKE *et al.*, 2017).

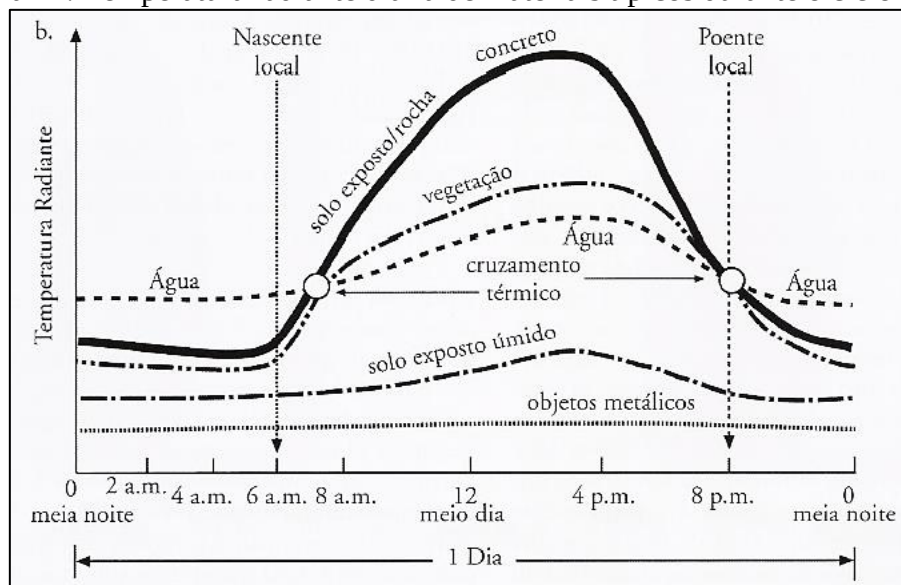
b) Efeitos da emissividade – relacionados às propriedades de rugosidade da superfície da terra, a quantidade e a natureza da cobertura vegetal, as propriedades térmicas e o teor de umidade do solo (FRIEDL, 2002). Por isso, a correção para os efeitos da emissividade espectral envolve a natureza da cobertura/uso da terra (WENG *et al.*, 2004), sendo possível sua estimativa a partir de dados de sensores passivos através de diferentes técnicas, algumas baseadas no NDVI, outras fundamentadas em classificações mais detalhadas. Além deste, um segundo efeito relacionado à emissividade é a anisotropia, que ocorre devido à natureza ondulada da estrutura da superfície urbana criando padrões 3D de temperatura da superfície. Tal fenômeno pode reduzir ou aumentar a radiância total da superfície e depende tanto do ângulo de visão quanto da geometria solar (OKE *et al.*, 2017).

Outra questão relevante no que tange a análise dos dados TIR, está relacionada à resolução espacial. Imagens com uma resolução de captura de 100 metros, como é o caso do Landsat 8, não distinguem alvos com distâncias entre si menores que 100 metros, de tal forma que haverá um grau de generalização no processo de mapeamento da temperatura de superfície.

Gartland (2010) destaca que as temperaturas de superfície são muito mais variantes do que a do que a temperatura do ar no decorrer do dia. Superfícies tipicamente urbanas, como coberturas asfálticas e calçadas aquecidas pela insolação, podem atingir temperaturas de 27 a 50°C maiores do que a temperatura do ar, com o equilíbrio (temperatura original do ar) sendo retomado durante a noite por meio da liberação do calor acumulado.

De acordo com Jensen (2009), a mudança de temperatura medida (ΔT) está inversamente associada à inércia termal, ou seja, um alto valor de ΔT geralmente está relacionado com materiais do terreno que têm um baixo valor de inércia termal. O ciclo energético diário compreende 24 horas, e os materiais respondem segundo suas propriedades termodinâmicas, conforme ilustra a Figura 12.

Figura 12: Temperatura radiante diária de materiais típicos durante o ciclo diário.



Fonte: Jensen, 2009.

Do nascer do sol até o anoitecer, o terreno intercepta energia incidente de onda curta, sendo parte dela absorvida pelo terreno e reirradiada para atmosfera como radiação de comprimento de onda do infravermelho termal. Quando a radiação de onda curta se torna zero - após o pôr do sol -, a radiação de onda longa continua emergindo do terreno durante toda a noite. Ressalta-se que o pico de emissão de radiação de onda longa tem um deslocamento de duas a quatro horas após o pico do meio dia de incidência de radiação de onda curta, devido ao tempo necessário para aquecer o solo (JENSEN, 2009).

O sensoriamento remoto termal, como relatado anteriormente, é uma técnica relevante para fornecer a temperatura qualitativa da cidade, trazendo contribuições na perspectiva do planejamento urbano, na medida em que são definidos padrões na distribuição da temperatura da superfície de acordo com o uso e a ocupação da terra (AMORIM e MONTEIRO, 2011). Entretanto, uma das limitações nesse contexto, de acordo com Amorim (2018) e Coutts *et al.* (2016), era a indisponibilidade de imagens noturnas, devido ao horário de captura das imagens do satélite Landsat 8 (período da manhã). Assim, as pesquisas sobre temperaturas de superfície noturnas eram realizadas por meio de imagens termais registradas por sensores em aeronaves ou satélites com resolução espacial inferior à do Landsat, conforme mostram os estudos de Nichol (2005), Quattrochi e Ridd (1994), Quattrochi e Ridd (1998), Mathew *et al.* (2018) e Coutts *et al.* (2016). Com a disponibilização recente, em abril de 2019, de imagens termais noturnas do canal infravermelho termal do satélite Landsat 8, viabilizou-se a exploração desse campo.

2.2.2. Índices Radiométricos

A presença de vegetação, bem como sua condição de umidade, e a quantidade de área construída e impermeável, são fatores que influenciam na temperatura da superfície. Uma das formas de se identificar e representar tais variáveis por meio do sensoriamento remoto consiste no emprego de índices radiométricos (ou espectrais). Índices radiométricos são medidas adimensionais capazes de identificar em imagens digitais a abundância relativa e a atividade de determinados tipos de informações, e seu uso permite ainda integrar vários parâmetros. Enquanto na imagem do termal as variações do nível de cinza correspondem às relações de temperaturas/emissividades dos alvos, em imagens do visível, elas se referem às diferenças de reflectâncias entre os alvos (MENESES e ALMEIDA, 2012). Nesse sentido, os índices são obtidos através de operações matemáticas com bandas específicas, nas quais determinados comprimentos de onda do espectro são absorvidos e outros refletidos, de modo a destacar os alvos de interesse, conforme suas assinaturas espectrais.

Os trabalhos de Chen *et al.* (2006), Zhang *et al.* (2009), Meneses e Almeida (2012) e Jensen (2009) dentre outros, mostram que índices como NDVI (Índice de Vegetação), NDWI (Índice de Água), NDBI e BUI (Índices para Áreas Construídas), além de possibilitarem a caracterização dos tipos de cobertura da terra, permitem investigar as relações entre eles, e entre eles e a temperatura de superfície/ilhas de calor. Analogamente ao apontado por Zhang *et al.* (2009) para o NDBI, tais índices permitem ainda verificar a distribuição espacial e a variação temporal dos fatores que representam. Eles são sinteticamente descritos no Quadro 5.

Quadro 5: Síntese dos índices radiométricos.

ÍNDICE	Descrição	Composição	Referência
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>)	NIR e RED	Rouse <i>et al.</i> (1974)
NDWI	Índice de Água (ou Umidade) por Diferença Normalizada (<i>Normalized Difference Water Index</i>)	NIR e SWIR	Gao (1996)
NDBI	Índice de Área Construída por Diferença Normalizada (<i>Normalized Difference Built-up Index</i>)	NIR e SWIR	Zha <i>et al.</i> (2003)
BUI	Índice de Área Construída (<i>Built-up Index</i>)	NDBI e NDVI	Zha <i>et al.</i> (2003)

Fonte: adaptado de Jensen, 2009.

Muitos estudos sobre o campo térmico urbano têm sido realizados com base apenas nos índices de vegetação, notadamente no NDVI. De acordo com Weng (2009), observou-se na maioria deles, uma relação negativa entre a LST e os índices de vegetação, o que motivou a pesquisa em duas direções principais: a análise estatística da relação de abundância da vegetação e LST, e a abordagem TVX (índice de vegetação térmica), definida por (Quattrochi e Ridd, 1994) como um método multiespectral de combinação da LST e um índice de vegetação por meio de um gráfico de dispersão com o intuito de observar suas associações.

Um dos motivos pela preferência pelo NDVI, é sua vantagem quando se pretende comparar uma mesma área ao longo do tempo, pois espera-se dele menor influência das variações das condições atmosféricas (MENESES e ALMEIDA, 2012). Entretanto, apesar de muitos dos trabalhos anteriores aplicarem o NDVI como um indicador principal do clima urbano, Zhang *et al.* (2009) afirma que a sua variabilidade e a não linearidade sugerem que ele sozinho pode não ser suficiente para estudar quantitativamente a UHI, recomendando o emprego de outros indicadores além dele, como por exemplo, índices radiométricos diversos.

A combinação de mais de um índice também é sugerida por Gao (1996), que conclui sobre a complementariedade entre NDWI e NDVI, a partir da constatação de que em grandes valores de NDVI, estes são saturados, enquanto os NDWIs permanecem sensíveis à água líquida na vegetação verde. Desta forma, o autor completa definindo o NDWI como uma medida de moléculas de água líquida em dosséis de vegetação que interagiram com a radiação solar incidente.

O NDBI e o BUI foram desenvolvidos para a identificação de áreas urbanas e edificadas, sendo uma composição auxiliar na classificação do urbano. O resultado desses índices é uma imagem que destaca pixels das áreas construídas e estéreis, e cuja técnica apresentou precisão de 92% (JENSEN, 2009). Nesse sentido, Zha *et al.* (2003) salientam que embora áreas urbanas exibam pouca sazonalidade, o desempenho do método pode ser adversamente (e indiretamente) afetado pela presença de outras coberturas cuja refletância seja sazonal, como floresta. Portanto, trata-se de um aspecto a ser considerado para a análise e interpretação adequada dos dados. Sob essa perspectiva, Zha *et al.* (2003) ponderam ainda que o NDBI pode mapear apenas amplas coberturas do solo urbano, sendo incapaz de distinguir áreas urbanas industriais de comerciais e/ou residenciais devido à similaridade de suas respostas espectrais.

O uso de índices radiométricos apresenta limitações e vantagens comuns a aplicação do sensoriamento remoto com imagens de satélite, como a generalização de informações e integração de variáveis distintas respectivamente, como já relatado. Cumpre destacar que resultados recentes de Berger *et al.* (2017) revelaram que as ligações entre as características do sítio urbano (*urban site characteristics* - USCs) e a temperatura de superfície (LST) não foram mais fortes quando parâmetros 3D (três dimensões) foram considerados em vez dos 2D (duas dimensões). Os autores afirmam que mesmo podendo oferecer representações mais holísticas da paisagem urbana, as estatísticas de correlação sugerem que os parâmetros 3D de USCs foram consistentemente superados por métricas 2D. Tal informação denota outro benefício de estudos com base nos índices relacionada com a confiabilidade e representatividade dos resultados.

Finalmente, segundo Jensen (2009), um Sistema de Informações Geográficas (SIG) que integre dados de zoneamento de uma cidade com informações de temperatura de superfície e NDVI (bem como de outros índices provenientes de dados de sensoriamento remoto), é capaz de fornecer uma “compreensão imediata” aos planejadores urbanos. Nesse sentido pode subsidiar tomadas de decisões acerca da (re)produção do espaço urbano, sobretudo se prestando como ferramenta para escolha e/ou priorização de áreas para investigações adicionais mais detalhadas e complexas, e/ou para intervenção.

2.3. PLANEJAMENTO E GESTÃO URBANA: OS CLIMAS DAS CIDADES NA PERSPECTIVA DOS ODS

Com o acelerado crescimento que o mundo vivencia nas últimas décadas, diversos acordos internacionais têm sido propostos com iniciativas direcionadas a equilibrar as dimensões fundamentais da existência humana: sociedade, economia e ambiente mediadas pela cultura, tecnologia e informação. Nesse contexto, um esforço global em propiciar o desenvolvimento sustentável culminou com a Agenda 2030, um plano de ação estabelecido por 193 Estados-membros da ONU no ano de 2015, constituído por 17 objetivos – Objetivos do Desenvolvimento Sustentável ou ODS (*Sustainable Development Goals* ou SDG) –, como ilustra a Figura 13, e suas respectivas metas.

Figura 13: Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030.



Fonte: ONU BRASIL, 2022.

Para tratar (diretamente) de questões associadas ao clima e as cidades, a agenda definiu o ODS 11 - Cidades Sustentáveis e o ODS 13 - Ação contra a Mudança Global do Clima, para lidar com medidas no sentido de tornar as cidades mais inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis e, melhorar a resiliência aos perigos climáticos, respectivamente. O clima urbano ganha importância nesse sentido, pois revela impactos concretos e sensíveis de um fenômeno global em nível local, sendo fundamental compreender seus mecanismos para avaliar os efeitos futuros do aquecimento global na cidade, bem como tratar sobre medidas adaptativas (DUBREUIL *et al.*, 2014).

Em países tropicais como o Brasil, um dos problemas de origem climática que mais afetam o cotidiano da vida urbana refere-se ao conforto térmico e ambiental (SANT'ANNA NETO e RAMPAZZO, 2016). Todavia, na escala urbana, a adoção de soluções padronizadas que ignoram as especificidades climáticas locais, especialmente as microclimáticas e as oriundas das relações sociedade-natureza, tem causado “desajuste” térmico; a exemplo da escolha do tipo de material construtivo a compor as edificações, que muitas vezes é norteadas pelo critério financeiro e pela sua “resistência” mecânica, em detrimento de aspectos como o desempenho térmico (tanto em termos de consumo energético quanto de conforto humano).

Com o advento da pandemia de Covid-19 (doença infecciosa causada por novos tipos de coronavírus) em 2020, as pessoas foram “forçadas” a permanecer mais tempo em suas casas por dias e até meses, a fim de evitar contaminações. Residências estas que muitas vezes não dispunham de condições mínimas de qualidade, inclusive de um

envelope construtivo adequado. Considerando a perspectiva de um clima socialmente construído, a pandemia assim, aumentou a exposição da sociedade aos problemas de conforto térmico das moradias - especialmente daquela população menos favorecida - provocando situações ainda mais degradantes.

As estratégias para mitigação do calor urbano consistem na modificação dos processos radiativos e energéticos da superfície, podendo ser resumidas: no aumento do albedo urbano (refletância à radiação solar) e no aumento da evapotranspiração. A primeira se dá principalmente, pela substituição de pavimentos e telhados, e a segunda é alcançada através da substituição de superfícies impermeabilizadas por vegetação.

Nesse sentido, há a ainda a necessidade de incorporação do conhecimento do clima urbano no processo de planejamento e gestão da cidade. Atualmente, os planos diretores – instrumento básico da política de desenvolvimento e expansão urbana (Constituição Federal 1988, art.182) -, geralmente reservam uma pequena parte de seu conteúdo para tratar dos aspectos climáticos da cidade. Consistindo em uma breve descrição baseada em uma classificação climática, com dados médios de temperatura do ar e precipitação, tal descrição não guarda relação imediata com o clima urbano (FERREIRA, 2014), tampouco com as múltiplas implicações de suas características na (re)produção do espaço urbano.

Além disso, Barbirato *et al.* (2011) apontam que o desenho urbano não corresponde à “expressão do lugar”, e que a configuração urbana revela a falta comprometimento com as características locais, de tal forma que há descaso com a paisagem natural e com os aspectos culturais (na escala da cidade), e prevalece a concepção da edificação como obra isolada, em detrimento de seu relacionamento com o contexto, por meio do uso de modelos e tipologias importados (na escala da edificação).

Alguns autores apontam as seguintes dificuldades na construção de um planejamento urbano que contemple verdadeiramente os aspectos climáticos em sua concepção e execução: falta de conscientização coletiva sobre a importância da utilização de materiais mais eficientes (FERREIRA e PRADO, 2003); falta de técnicas e literatura facilmente acessíveis e falta de tempo ou treinamento dos gestores para transformar conceitos científicos complexos em planejamento (ZHAO *et al.*, 2011); e necessidade da transferência de conhecimento de forma acessível, aplicável e com foco na qualidade de vida dos habitantes das cidades (ERELL *et al.*, 2011; MILLS, 2014).

Tendo em vista a crescente disseminação de produtos e técnicas do sensoriamento remoto, o uso de imagens de satélites para a investigação do clima urbano se torna cada

vez mais atrativo nesse sentido. Trata-se de uma alternativa acessível a realidade dos gestores urbanos para identificar pontos críticos ou áreas prioritárias por meio do mapeamento da temperatura de superfície, com o intuito de gerar estratégias de mitigação de calor e garantir planejamento adequado da urbanização. Tais ferramentas também permitem a análise sob a perspectiva sistêmica, essencial conforme Monteiro (1990a) para os estudos do S.C.U.; além de possibilitarem o detalhamento físico do sítio e do uso da terra como parte da caracterização geográfica e suporte para a compreensão do clima urbano (POLIZEL, 2009).

De acordo com Bustos Romero (2001), o ambiente construído pode atuar como mecanismo de controle dos fatores do meio físico, incluindo os de cunho climático, por meio de sua envoltória (paredes, pavimentos e telhados), de seu entorno (água, vegetação, sombra, solo) e do melhor aproveitamento do vento e do sol. Considerar o clima urbano e consolidá-lo como uma variável para o planejamento urbano trata-se na verdade, de uma oportunidade, sobretudo de ação local, para atingir a sustentabilidade dentro da perspectiva da Agenda 2030. Isto porque, as propriedades termodinâmicas - albedo, emissividade e inércia térmica por exemplo -, dos materiais que constituem a superfície urbana são indicadores do seu potencial de aquecimento/resfriamento, com implicações para a construção de um clima local específico. Consequentemente, estratégias que considerem informações/ações de tal natureza podem auxiliar nas medidas de adaptação a características climáticas adversas, e, portanto, podem contribuir para o cumprimento dos ODS 11 e 13. Sob essa perspectiva, cada um desses objetivos dispõe de metas específicas conforme Quadro 6.

Quadro 6: Metas dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) 11 e 13.

ODS 11 – Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguro, resilientes e sustentáveis	11.1 Garantir o acesso de todos à habitação segura, adequada e a preço acessível, e aos serviços básicos e urbanizar as favelas
	11.2 Proporcionar o acesso a sistemas de transporte seguros, acessíveis, sustentáveis e a preço acessível para todos, melhorando a segurança rodoviária por meio da expansão dos transportes públicos, com especial atenção para as necessidades das pessoas em situação de vulnerabilidade, mulheres, crianças, pessoas com deficiência e idosos
	11.3 Aumentar a urbanização inclusiva e sustentável, e as capacidades para o planejamento e gestão de assentamentos humanos participativos, integrados e sustentáveis, em todos os países
	11.4 Fortalecer esforços para proteger e salvaguardar o patrimônio cultural e natural do mundo
	11.5 Reduzir significativamente o número de mortes e o número de pessoas afetadas por catástrofes e substancialmente diminuir as perdas econômicas diretas causadas por elas em relação ao produto interno bruto global, incluindo os desastres relacionados à água, com o foco em proteger os pobres e as pessoas em situação de vulnerabilidade
	11.6 Reduzir o impacto ambiental negativo <i>per capita</i> das cidades, inclusive prestando especial atenção à qualidade do ar, gestão de resíduos municipais e outros
	11.7 Proporcionar o acesso universal a espaços públicos seguros, inclusivos, acessíveis e verdes, particularmente para as mulheres e crianças, pessoas idosas e pessoas com deficiência
	11.a Apoiar relações econômicas, sociais e ambientais positivas entre áreas urbanas, peri-urbanas e rurais, reforçando o planejamento nacional e regional de desenvolvimento
	11.b Aumentar substancialmente o número de cidades e assentamentos humanos adotando e implementando políticas e planos integrados para a inclusão, a eficiência dos recursos, mitigação e adaptação às mudanças climáticas, a resiliência a desastres; e desenvolver e implementar, de acordo com o Marco de Sendai para a Redução do Risco de Desastres 2015-2030, o gerenciamento holístico do risco de desastres em todos os níveis
ODS 13 – Tomar medidas urgentes para combater a mudança climáticas e seus impactos humanos, sociais e ambientais	11.c Apoiar os países menos desenvolvidos, inclusive por meio de assistência técnica e financeira, para construções sustentáveis e resilientes, utilizando materiais locais
	13.1 Reforçar a resiliência e a capacidade de adaptação a riscos relacionados ao clima e às catástrofes naturais em todos os países
	13.2 Integrar medidas da mudança do clima nas políticas, estratégias e planejamentos nacionais
	13.3 Melhorar a educação, aumentar a conscientização e a capacidade humana e institucional sobre mitigação da mudança do clima, adaptação, redução de impacto, e alerta precoce
	13.a Implementar o compromisso assumido pelos países desenvolvidos partes da UNFCCC para a meta de mobilizar conjuntamente US\$ 100 bilhões por ano a partir de 2020, de todas as fontes, para atender às necessidades dos países em desenvolvimento, no contexto das ações de mitigação significativas e transparência na implementação; e operacionalizar plenamente o Fundo Verde para o Clima, por meio de sua capitalização, o mais cedo possível
	13.b Promover mecanismos para a criação de capacidades para o planejamento relacionado à mudança do clima e à gestão eficaz, nos países menos desenvolvidos, inclusive com foco em mulheres, jovens, comunidades locais e marginalizadas

Fonte: ONU BRASIL, 2022. Organizado pela autora.

As diretrizes acima elencadas, referentes aos ODS 11 e 13, estão na interface de questões discutidas anteriormente neste trabalho, tais como produção do espaço urbano, planejamento e gestão urbana, sensoriamento remoto (ferramenta integradora), eficiência térmica/energética de materiais construtivos e influência da superfície/cobertura (telhados, pavimentos e vegetação) na geração do clima das cidades. Sob essa perspectiva, notadamente pode-se citar as seguintes metas: acesso à habitação segura e adequada; aumentar a urbanização inclusiva e sustentável; aumentar as capacidades para o planejamento e gestão de assentamentos humanos participativos, integrados e sustentáveis e para o planejamento relacionado à mudança do clima – aqui enfatiza-se o potencial de uso do sensoriamento remoto -; reduzir o número de mortes com foco em proteger os mais pobres e as pessoas em situação de vulnerabilidade; proporcionar o acesso universal a espaços públicos seguros, inclusivos, acessíveis e verdes; aumentar o número de cidades adotando e implementando políticas e planos integrados para a inclusão, a eficiência dos recursos, mitigação e adaptação às mudanças climáticas; reforçar a resiliência e a capacidade de adaptação a riscos relacionados ao clima, dentre outras.

Segundo Oke (1987), a manipulação do albedo invoca uma considerável reação em cadeia climática. De acordo com Jato-espino *et al.* (2018), este conceito (albedo) está fortemente associado ao Aquecimento Global, uma vez que este fenômeno é influenciado pelas trocas de calor entre a superfície da Terra e a atmosfera. Portanto, um projeto urbano tem que, necessariamente, contemplar as questões climáticas desde a sua gênese sob um olhar integrado, pode auxiliar a transformar as cidades em locais mais saudáveis e sustentáveis, bem como melhorar a capacidade de adaptação e mitigação aos perigos e riscos de cunho climático, e desta forma, representa uma oportunidade multifacetada para o atendimento a Agenda 2030.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A essência deste trabalho consistiu em trazer contribuições para o conhecimento do clima urbano de Presidente Prudente a partir de produtos e ferramentas do sensoriamento remoto, a fim de subsidiar os processos de tomada de decisão no planejamento urbano. Especificamente, agregando informações recentes de imagens termais noturnas e buscando melhorar o entendimento sobre a influência dos tipos de materiais construtivos e suas propriedades termodinâmicas, aliada à perspectiva de construção social do fenômeno clima urbano.

A importância do embasamento cartográfico detalhado dos aspectos geocológicos da cidade (relevo com topo-geomorfologia, declividades e orientação de vertentes, direção e velocidade de ventos locais predominantes, e uso da terra) é destacada por Mendonça (1994), como metodologia para o estudo do clima urbano de cidades de porte médio e pequeno. Nesse sentido, o grau de detalhamento em tais estudos é determinante para possibilitar uma intervenção mais consciente na gestão da cidade (MENDONÇA, 2000).

A escolha do satélite utilizado nesta pesquisa (Landsat 8) considerou a resolução espacial e temporal, a disponibilidade de imagens térmicas (infravermelho-termal) diurnas e noturnas, bem como a gratuidade dos dados. A oferta de dados noturnos constitui fator relevante por tratar-se de recurso recente com tal resolução espacial (30m), além da já comprovada relação de fenômenos de aquecimento com o período da noite.

Além do detalhamento do sítio, as análises estatísticas desempenham papel fundamental nos estudos de clima urbano pois permitem investigar as associações entre a composição e configuração da superfície e a temperatura (WENG, 2009). Nesse sentido, técnicas do sensoriamento remoto possibilitam a combinação - através de um método multiespectral - da temperatura do alvo com um índice radiométrico (de vegetação ou área construída, por exemplo) em um gráfico de dispersão para observar suas relações. Coeficientes como de Pearson e Spearman também são recursos importantes nessa investigação sobre a associação entre variáveis.

A grande maioria dos trabalhos sobre Clima Urbano têm se concentrado no estudo do ponto de vista físico, da forma. Todavia, visto que a repercussão dos fenômenos atmosféricos na superfície terrestre ocorre em um território, transformado e produzido pela sociedade, de maneira desigual e apropriado conforme os interesses dos agentes

sociais (SANT'ANNA NETO, 2012), a dimensão social, ligada a características socioeconômicas e ao seu conteúdo, devem integrar tal análise sob uma perspectiva crítica, e considerar os distintos segmentos socioeconômicos e suas capacidades de adaptação e resiliência aos efeitos adversos relacionados ao clima.

Outra característica predominante nas pesquisas sobre Clima Urbano, é a investigação baseada no conceito de ilha de calor, que de forma geral, analisa o urbano em comparação ao não-urbano. Existem várias metodologias para definir o padrão de referência não-urbano, que deve ser avaliado para cada imagem considerando ainda questões associadas com emissividade e anisotropia, a fim de evitar equívocos de interpretação.

Martin-Vide *et al.* (2015) destaca a dificuldade em identificar o ponto não-urbano. Segundo os autores, o tecido urbano às vezes carece de limites bem definidos, apresentando uma transição para usos do solo tipicamente rurais. Assim, para fornecer um valor correto e comparável da intensidade da ilha de calor, é fundamental escolher um ponto não-urbano com fatores geográficos semelhantes aos do ponto urbano, especificamente altitude e distância do mar ou dos corpos d'água existentes. Se o ponto não-urbano, por exemplo, estiver situado várias centenas de metros acima do ponto urbano, sua temperatura será notavelmente mais baixa, ou esporadicamente mais alta em caso de inversão térmica, e portanto, o efeito urbano seria camuflado no cálculo da diferença de temperatura.

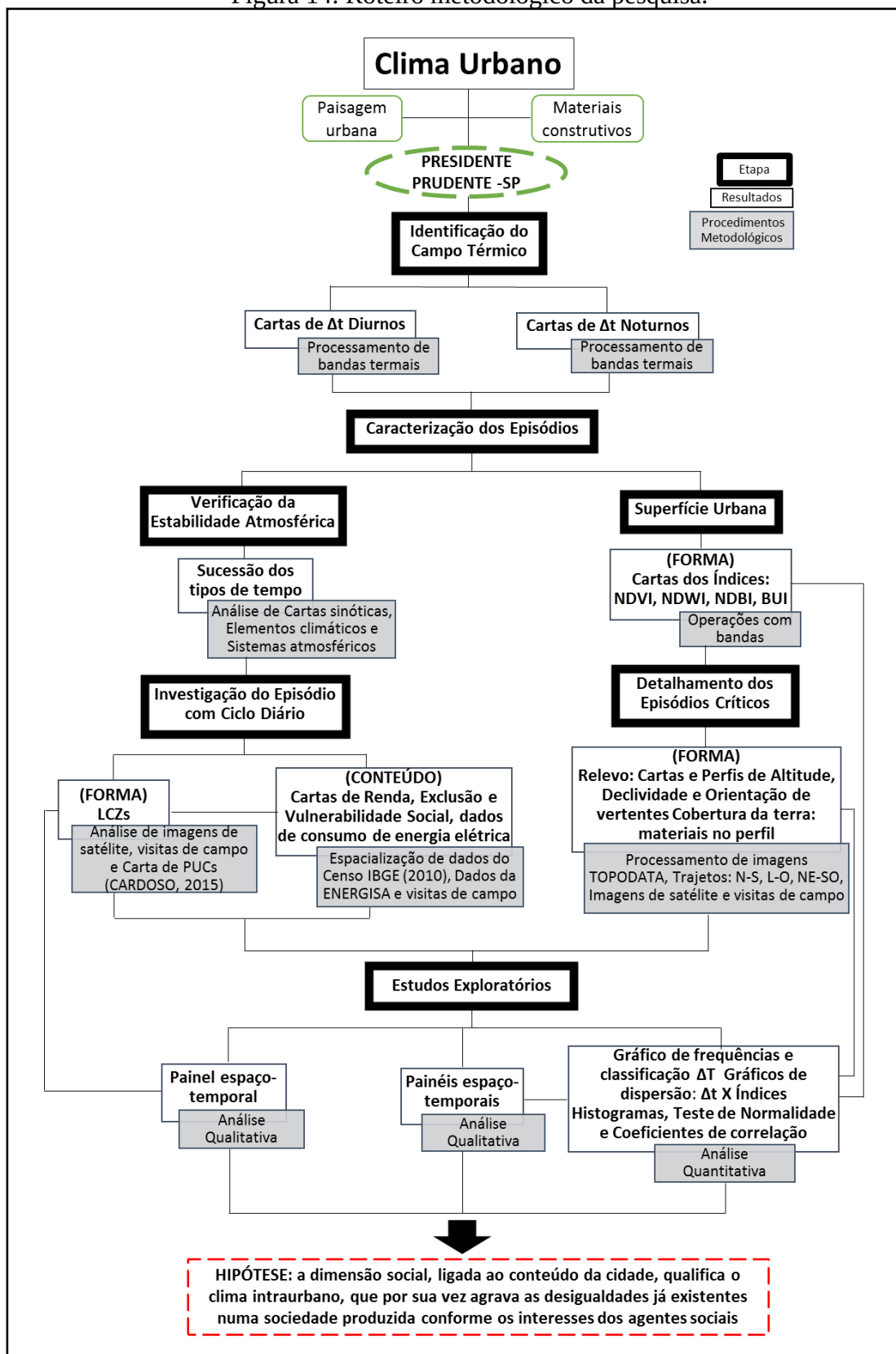
Ainda conforme os autores, muitos estudos falharam em selecionar o ponto não-urbano adequado, selecionando um observatório disponível fora da cidade, mesmo que este não forneça as condições ideais.

Diante da necessidade de uma variável relativa para viabilizar a comparação e análise conjunta e simultânea de dados de diferentes épocas (estações) do ano, em função do elevado número de imagens infravermelho utilizadas nesta pesquisa, bem como de seu enfoque nos materiais de cobertura tipicamente urbanos, e partindo da realidade instalada que já é urbana, ou seja, não seria possível “excluir” a cidade; julgou-se mais adequado e compatível optar, neste estudo, por um ponto zero/neutro - do ponto de vista climático - dentro da cidade. Dessa forma, também seria possível enfatizar a inércia térmica das superfícies, ou seja, identificar variações de temperatura e caracterizar o nível de aquecimento ou resfriamento de diversos tipos de superfície/materiais a partir de um ponto neutro urbano.

As estações meteorológicas localizam-se, por prerrogativa, em áreas cujas características de relevo, distância de corpos d'água, existência de barreiras para o vento e radiação solar ou heterogeneidade de solos, pouco influenciam no registro dos elementos do tempo (ALMEIDA, 2016). Assim, estabeleceu-se uma variável central de natureza térmica relacionando alvo e ar: a diferença de temperatura (ΔT), tendo como referência a temperatura do ar numa área tida como neutra, ou seja, a estação meteorológica.

A partir do levantamento bibliográfico realizado acerca do tema e das considerações feitas anteriormente, e embasado no uso de técnicas e ferramentas do sensoriamento remoto, as etapas desenvolvidas nesta pesquisa foram sistematizadas no roteiro metodológico exibido na Figura 14. Ele consistiu nas etapas a seguir: Identificação Geral do Campo Térmico, Caracterização Detalhada dos Episódios e Estudos Exploratórios.

Figura 14: Roteiro metodológico da pesquisa.



Fonte: Elaborado pela autora.

Então, prosseguiu-se com as seguintes atividades:

(A) Identificação do Campo Térmico

A fim de obter um panorama do ambiente termal urbano da área de estudo (para o dia e a noite), foi realizado o processamento das bandas TIR do satélite Landsat 8 para recuperação da informação de temperatura das superfícies para uma série de imagens diurnas e noturnas, abrangendo o período de um ano - de junho/2019 até maio/2020. Mendonça (2000) orienta que o estudo do clima de cidades de porte pequeno e médio deve contemplar a abordagem geográfica tanto do fato urbano quanto da área rural contígua. Assim, o recorte espacial desta pesquisa considerou inicialmente o perímetro urbano de Presidente Prudente e seu entorno rural próximo.

A partir destas cartas termais, do valor de temperatura de superfície foi subtraído pixel a pixel o valor de T_{ar} da estação (no horário de tomada da imagem), gerando-se dezessete cartas de ΔT que mostram as variações térmicas dos alvos para todas as épocas do ano em relação à referência escolhida.

(B) Caracterização dos Episódios

Tendo em vista a série de cartas diurnas e noturnas, foram identificados quatro episódios que despertaram interesse pois relevaram acentuado aquecimento e resfriamento em relação à estação meteorológica, ou seja: maior e menor diferença de temperatura de dia (duas datas diurnas) e a noite (duas datas noturnas).

No que se refere à superfície da cidade, foram estudados os fatores que impactam a temperatura de superfície, quais sejam os seus tipos e condições, por meio da elaboração de cartas de índices do sensoriamento remoto: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - NDVI, Índice de Água por Diferença Normalizada - NDWI, Índice de Área Construída por Diferença Normalizada - NDBI e Índice de Área Construída - BUI.

A partir do estudo destes quatro episódios foram escolhidos dois deles com características “críticas”, para os quais foi realizado outro detalhamento, no qual as superfícies foram exploradas do ponto de vista vertical/transversal através de perfis, sendo estabelecidos três trajetos: Leste-Oeste, Norte-Sul e Nordeste-Sudoeste. Foram identificados nesses trajetos os valores para as cartas de ΔT , cartas dos índices e de informações de relevo (altitude, declividade e orientação de vertentes), de modo a representar a topografia da área de estudo. Para os perfis foram ainda detalhados e identificados os tipos de coberturas (telhados, pavimentos e vegetação).

Finalmente, considerando o campo térmico inicial com 17 cartas de ΔT , constatou-se proximidade temporal de imagens diurnas e noturnas, possibilitando sua

investigação no contexto de um único ciclo diário visando a análise da inércia térmica. Assim, foi verificada a estabilidade atmosférica entre as datas (por meio de cartas sinóticas, elementos climáticos e sistemas atmosféricos), e selecionadas duas delas para incorporação de características socioeconômicas (Renda, Exclusão-Inclusão e Vulnerabilidade Social) e dados de consumo de energia elétrica. Em função da elevada quantidade de variáveis integradas, optou-se por trabalhar com oito áreas representativas da cidade no que se refere a suas tipologias de cobertura e segmentos socioeconômicos. Nesta etapa, foi utilizada a classificação em LCZs para sistematizar e sintetizar os atributos de forma para dessas áreas. Especificamente acerca do consumo de energia elétrica trabalhou-se com dados mensais totais do município (disponibilizados pela empresa distribuidora local -ENERGISA), e dados de residências (uma unidade consumidora representativa de cada área), obtidos em campo, fornecidos voluntariamente pelos moradores. Todos esses registros contemplaram o recorte temporal inicial da pesquisa, ou seja, junho de 2019 até maio de 2020.

(C) Estudos Exploratórios

Com objetivo de examinar detalhadamente os quatro episódios de interesse, procedeu-se com investigações acerca dos resultados de ΔT e da composição da superfície urbana. Desta maneira, foram gerados os gráficos das cartas de ΔT para averiguar a distribuição de frequência dos pixels em relação à variável térmica. Uma classificação das intensidades de ΔT e dos episódios, baseada no desvio padrão dos dados também foi realizada, facilitando a interpretação dos resultados.

Para compreender as variáveis térmicas e de composição da superfície e suas relações, elaborou-se gráficos de dispersão (*scatter plots*) das cartas de ΔT versus Índices para esses quatro episódios, e os coeficientes de correlação de Pearson e Spearman. Com o intuito de verificar a adequação destes, também foram gerados os histogramas, bem como o teste de normalidade de Shapiro-Wilk e p-valor (bilateral), seguindo recomendação de Silvestre (2016).

Os resultados dos perfis, por sua vez, foram sistematizados primeiramente combinando os índices e os ΔT s para os dois episódios críticos. E num segundo momento foram organizados painéis espaço temporais contemplando ΔT , os aspectos de relevo e os tipos de cobertura (cerâmica, metálica, fibrocimento, asfalto, concreto, vegetação rasteira e arbórea, água e misto).

Por fim, um painel também foi utilizado para sistematizar as informações socioeconômicas e os demais atributos das oito áreas objeto de estudo da última etapa da pesquisa, além de um quadro com escala de cores para facilitar o entendimento dos dados de consumo de energia. Nesta investigação observou-se também as possíveis conexões de tais temas com as metas da ONU, reunidas na agenda 2030, em especial os ODS 11 e 13, relacionados com Cidades Sustentáveis e com o Clima, respectivamente.

Cumprе salientar que a interpretação, análise e discussão dos resultados desta pesquisa foram desenvolvidas dentro da perspectiva proposta por Monteiro (1976), que define o clima das cidades como “um sistema que abrange o clima de um dado espaço terrestre e sua urbanização”, e tendo em vista sua variável central de ordem térmica, teve foco nos aspectos do subsistema termodinâmico. A perspectiva teórica do referido autor considera o clima como um sistema, consistindo na expressão das condições atmosféricas, resultantes da interação de diferentes escalas climáticas e de superfície, e aborda-o como sendo um sistema singular, aberto, evolutivo, adaptativo e morfogênico. Assim, este estudo considerou também os elementos de ordem meteorológica da atmosfera, bem como seus efeitos e aqueles provocados pela urbanização, numa perspectiva integrada, buscando contemplar a análise espacial, ambiental e regional e fornecer subsídios ao ordenamento territorial urbano.

As seções seguintes explicam em detalhe tais procedimentos, relatando as fontes de dados utilizadas, os métodos e técnicas empregados, bem como as formas de análise dos resultados obtidos.

1.1. TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE

A recente disponibilização pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos - *United States Geological Survey* (USGS), a partir de junho de 2019, de imagens termais de satélite noturnas determinou o intervalo de tempo abrangido para a série de dados deste estudo. Assim, as imagens diurnas e noturnas do satélite Landsat 8, correspondentes à banda 10 (canal infravermelho termal/TIRS 1), disponíveis de junho/2019 até maio/2020, foram analisadas, sendo selecionadas aquelas desprovidas de cobertura de nuvens. Além das informações citadas no Quadro 4, elas são dotadas das seguintes características: resolução radiométrica de 16 bits, *Datum* WGS 1984, projeção UTM, e embora a resolução espacial seja de 100m, são tratadas e disponibilizadas com pixel de 30 metros. As imagens foram tomadas por volta das 13:20h (diurnas - órbita/ponto: 222/75) e 01:50h (noturnas - órbita/ponto: 104/169) no horário UTC/GMT, correspondendo

respectivamente às 10:20h e 22:50h (noite da data anterior) no horário local. Desta forma, a série completa contemplou: 8 imagens diurnas e 10 imagens noturnas, descritas no Quadro 7, que mostra ainda alguns de seus dados meteorológicos.

Quadro 7: Datas da série diurna e noturna e respectivos dados meteorológicos.

Período	Data (UTC)		Estação do ano (hemisfério Sul)	Dados da Estação Meteorológica			
				T Média	T 13h* (UTC)	UR Média	Pressão atm
				°C	°C	%	hPa
DIA	2019	22/ago	Inverno	20,4	19,4	54	969,7
		07/set	Inverno	26,0	27,2	51	967,0
		23/set	Primavera	21,2	21,1	55	969,0
		25/out	Primavera	28,5	29,7	40	962,6
	2020	29/jan	Verão	27,8	29,8	56	961,4
		18/abr	Outono	21,4	20,3	57	968,9
		04/mai	Outono	21,2	20,8	56	965,0
		20/mai	Outono	23,2	23,6	53	968,3
Período	Data (UTC)		Estação do ano	T Média	T 02h* (UTC)	UR Média	Pressão atm
				°C	°C	%	hPa
NOITE	2019	25/jun	Inverno	23,1	22,1	46	962,7
		11/jul	Inverno	21,3	19,5	43	967,3
		12/ago	Inverno	27,1	25,2	35	966,2
		29/set	Primavera	23,8	22,8	40	964, 3
		16/nov	Primavera	26,2	24	50	958,3
	2020	23/mar	Outono	24,1	24,3	55	966,1
		24/abr	Outono	22,7	21,0	59	965,3
		10/mai	Outono	22,1	21,1	50	967,8
		26/mai	Outono	14,8	12,0	62	966,9

*T13h e T02h são dados horários da Estação Meteorológica que correspondem ao momento mais próximo à tomada da imagem de satélite, sendo respectivamente no horário local (GMT-3): 10h e 23h. Os demais dados de temperatura, umidade relativa (UR) e pressão atmosférica, correspondem a média diária.

Fonte: INMET, 2019, 2020. Elaborado pela autora.

Foi realizado o recorte da área de estudo, que corresponde a área urbana e o entorno próximo de Presidente Prudente, sendo as temperaturas dos alvos estimadas no aplicativo IDRISI¹⁰, por meio da conversão de níveis de cinza (NC) para radiância (Equação 1), seguida da correção atmosférica da radiância (Equação 2), desta para

¹⁰ Idrisi é marca registrada da Clark University.

temperatura Kelvin (Equação 3) e por fim para graus Celsius (Equação 4). Tais procedimentos foram realizados a partir de parâmetros fixos e equações disponibilizadas pelo USGS (https://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php. Acesso: Jun/2018), da seguinte forma:

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L \quad (1)$$

Onde:

L é a radiância do topo da atmosfera (Watts/(m² * srad * μ m));

M_L é o fator multiplicativo de redimensionamento de cada banda presente nos metadados (RADIANCE_MULT_BAND_x, onde x é o número da banda);

Q_{cal} são os valores de pixel quantificados e calibrados do produto padrão (DN);

A_L é o fator aditivo de redimensionamento de cada banda presente nos metadados (RADIANCE_ADD_BAND_x, onde x é o número da banda).

A correção atmosférica foi feita de acordo com Coll *et al.* (2010) e com os princípios da Calculadora de Parâmetros de Correção Atmosférica, que fornece valores locais de transmitância, radiação *upwelling* e radiação *downwelling* a partir de dados da estação meteorológica automática local do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada em Presidente Prudente. Segundo Meneses e Almeida (2012), como as condições ambientais e climáticas interferem a todo o momento na temperatura de superfície, modificando-a em curtos intervalos de tempo, os dados das imagens obtidas na faixa do termal podem variar temporalmente. Daí a necessidade de conhecimento das condições ambientais no momento da tomada da imagem para a aplicação das imagens termais, a fim de se corrigir a radiância da cena. A correção atmosférica foi executada a partir da equação descrita a seguir.

$$CVR2 = \frac{CVR1 - L_{\uparrow}}{\varepsilon \tau} - \frac{(1 - \varepsilon)(L_{\downarrow})}{(\varepsilon)} \quad (2)$$

Onde:

$CVR2$ é o valor de radiância da célula com correção atmosférica;

$CVR1$ é o valor de radiância obtido da Equação 1;

$L_{\uparrow}$ é a radiação *upwelling*;

$L_{\downarrow}$ é a radiação *downwelling*;

τ é a transmitância;

ε é a emissividade (0,95).

Em seguida, foi possível obter a temperatura dos alvos, em Kelvin:

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L\lambda} + 1\right)} \quad (3)$$

Onde:

T é a temperatura no satélite em Kelvin;

K2 é a constante de calibração 2;

K1 é a constante de calibração 1;

L é a radiância espectral, em Watts/(m² * srad * μ m).

Aplicou-se então, a fórmula para converter a temperatura Kelvin em graus Celsius, subtraindo os valores de temperatura de cada pixel da imagem por 273,15:

$$TS = ImgK - 273,15 \quad (4)$$

Onde:

TS é a temperatura da imagem em graus Celsius;

ImgK é a temperatura da imagem em Kelvin.

Finalmente, com a Equação 5, foi obtida a diferença de temperatura, subtraindo-se o valor de Tar da estação meteorológica no horário de tomada da imagem, conforme dados mostrados Quadro 7.

$$\Delta T = TS - T_{arest} \quad (5)$$

Onde:

ΔT é a diferença de temperatura em relação à referência;

TS é a temperatura dos alvos obtida com a Equação 4;

T_{arest} é temperatura do ar na estação meteorológica no horário de tomada da imagem.

O sensoriamento remoto termal é uma função tanto do estado térmico da cidade, da posição do Sol no céu (que controla as taxas de aquecimento) quanto das propriedades ópticas do instrumento usado para visualizá-lo (OKE *et al.*, 2017). A incidência de radiação solar ocorre com diferente inclinação conforme as estações e resulta em diferentes respostas da superfície. Além disso, sua intensidade influencia no aquecimento solar sobre os materiais: em dia de fraca insolação, as superfícies dos materiais terão temperaturas mais baixas e emitirão intensidades menores de energia radiante do que num dia de alta insolação (MENESES e ALMEIDA, 2012).

Outra questão está relacionada as temperaturas radiativas da superfície observadas por sensores remotos devido ao efeito da estrutura da superfície urbana em combinação com a geometria do sol-sensor-superfície. Diferenças aparentes de temperatura são visualizadas durante o dia, por exemplo, pois à medida que a direção de visão do sensor muda, diferentes padrões de sombra são criados diante das variações na proporção de superfícies horizontais sombreadas e iluminadas pelo sol; e à noite, em virtude da geometria que controla o fator de visão do céu de todas as superfícies onde o horizonte está obstruído (OKE *et al.*, 2017).

A correção de emissividade é um procedimento que pode ser incluído na metodologia anteriormente descrita da estimativa de temperatura de superfície, e que tem o intuito de minimizar problemas de interpretação. Entretanto, devido a diversidade das características urbanas, bem como de geometria e dos materiais construtivos, Haashemi *et al.* (2016) afirmam que embora vários métodos tenham sido desenvolvidos para recuperar a emissividade em áreas urbanas, eles resolvem parcialmente o problema. Os métodos mais comumente utilizados são baseados na classificação da cobertura em várias categorias ou na aplicação do NDVI.

Diante da grande diversidade de tipos de coberturas e da extensão, tal tarefa é especialmente trabalhosa e difícil em áreas urbanas, além da dificuldade mencionada por Coutts *et al.* (2016), relacionada com a variação drástica dos valores de emissividade na literatura, por exemplo para telhados metálicos, que mudam conforme o material (aço galvanizado, alumínio galvanizado e outros) e a condição (quantidade de ferrugem, sujeira etc.).

As condições ambientais e climáticas interferem na quantidade e qualidade da vegetação, de tal forma que o NDVI pode variar temporalmente, inclusive em curtos intervalos de tempo. Assim, para fazer a correção da emissividade por esse método neste estudo, seria necessário gerar o índice para todas as datas (diurnas) e verificar sua proximidade com a data das imagens termais noturnas, bem como as condições sinóticas, atmosféricas e meteorológicas no período entre elas. Realizar tais procedimentos para toda a série de imagens demandaria tempo o suficiente para implicar em prejuízo ao atendimento aos objetivos centrais da pesquisa.

Tendo em vista estas questões e o fato de que em ambientes urbanos predominam materiais com elevada emissividade, neste estudo optou-se por realizar a estimativa da temperatura de superfície sem a correção de emissividade. A exceção nesse sentido se dá para telhados metálicos - materiais de baixa emissividade - e portanto, ressalta-se que o

efeito de “aparente resfriamento” dessas coberturas foi considerado para evitar equívocos de interpretação.

Além disso, foi obtido no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) a base da rede urbana de Presidente Prudente para a delimitação da área da cidade inserida na imagem de satélite. A referida base foi sobreposta a todas as cartas de ΔT e foram organizados no software ArcGIS¹¹.

Após a geração de todas as cartas diurnas e noturnas da série, foram selecionados dois episódios de cada período, conforme critérios descritos anteriormente, e a partir dos dados exportados do ArcGIS, foram elaborados os gráficos no aplicativo Excel¹² para análise dessas datas, com intervalo de grau em grau.

A classificação das intensidades de diferenças de temperatura, que possibilitou categorizar os episódios posteriormente, foi fundamentada no desvio padrão dos dados (1/2 DP como unidade de classe), a partir da organização dos dados numa planilha do Excel. Assim, foram estabelecidas seis classes de ΔT com seus respectivos intervalos: Negativo Forte ($<-7,5$), Negativo Moderado ($-7,5$ a $-2,5$), Neutro ($-2,5$ a $2,5$), Positivo Moderado ($2,5$ a $7,5$), Positivo Forte ($7,5$ a $12,5$) e Positivo Muito Forte ($>12,5$).

3.2. ÍNDICES RADIOMÉTRICOS

Neste estudo as informações sobre o uso/cobertura da terra foram extraídas de imagens de satélite, para os episódios diurnos e noturnos, por meio dos índices espectrais ou radiométricos NDVI, NDWI, NDBI e BUI, gerados a partir de operações com bandas do satélite Landsat 8.

Os índices de vegetação são medidas radiométricas adimensionais que indicam abundância relativa e a atividade da vegetação verde, incluindo porcentagem de cobertura verde, teor de clorofila, biomassa verde, a radiação fotossinteticamente ativa absorvida e o índice foliar (JENSEN, 2009). Neste caso, foi escolhido o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) para identificar a presença de vegetação e caracterizar sua distribuição espacial nas datas que corresponderam aos episódios de ΔT . Este índice foi desenvolvido por Rouse *et al.* (1974), como um indicador da densidade da vegetação e é calculado conforme equação

¹¹ ArcGIS é marca registrada da *Environmental Systems Research Institute* (ESRI).

¹² Excel é marca registrada da *Microsoft Corporation*.

6, com escala entre -1 e +1, cujos valores positivos sugerem áreas vegetadas e valores negativos, superfícies não vegetadas.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (6)$$

Onde:

ρ_{NIR} é o valor de reflectância da banda no infravermelho próximo (banda 5);
 ρ_R é o valor de reflectância da banda no vermelho (banda 4).

Face ao fato de existirem diferenças sazonais de umidade (e calor) entre as estações, e estas consequentemente provocarem efeitos sobre a vegetação, foi calculado o Índice de Água por Diferença Normalizada – NDWI (*Normalized Difference Water Index*) como mostra a equação 7.

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (7)$$

Onde:

NIR é o valor do número digital da banda no infravermelho próximo;
 $SWIR$ é o valor do número digital da banda no infravermelho médio.

Tal índice foi proposto por Gao (1996), sendo entendido como um método capaz de estimar o teor de água líquida presente na vegetação, e portanto, é altamente correlacionado com o conteúdo de umidade do dossel vegetal e permite acompanhar melhor as mudanças na biomassa e no estresse de umidade das plantas (JENSEN, 2009). Assim, também é chamado de índice de ausência de água na área foliar, sugerindo além do teor de água na vegetação, o estado hídrico da vegetação (CHEN *et al.*, 2006). O NDWI deve ser considerado como complementar ao NDVI, e conforme Gao (1996), seus valores geralmente são negativos para solo exposto e vegetação rasteira morta, enquanto para as demais áreas com vegetação verde, são positivos. Além disso, o NDWI é menos sensível aos efeitos do espalhamento atmosférico do que o NDVI, e não acompanha a saturação deste, pois os NDWIs permanecem sensíveis à água líquida na vegetação verde, mesmo quando os NDVIs são saturados em grandes valores de NDVI.

Na identificação das superfícies construídas optou-se pelo Índice de Área Construída por Diferença Normalizada – NDBI (*Normalized Difference Built-up Index*) e pelo Índice de Área Construída – BUI (*Built-up Index*) formulados por Zha *et al.* (2003) de acordo com as equações 8 e 9, respectivamente.

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} \quad (8)$$

$$BUI = NDBI - NDVI \quad (9)$$

Onde:

SWIR é o valor do número digital da banda no infravermelho médio (banda 6);
NIR é o valor do número digital da banda no infravermelho próximo (banda 5).

O BUI é apontado por Jensen (2009) como uma composição que auxilia na classificação do urbano, tal como o NDBI. Este permite distinguir áreas construídas, entretanto não é capaz de diferenciar solo exposto de áreas urbanas devido à semelhança de suas respostas espectrais. Já o BUI foi proposto para melhorar o NDBI, e seu resultado possibilita distinguir coberturas impermeáveis (com valores positivos) das permeáveis (solo exposto e áreas vegetadas). Outra vantagem desses índices relatada pelos autores é que não estão sujeitos aos efeitos da sazonalidade, já que a reflectância das áreas urbanas exibe pouca variação.

É importante salientar que para os episódios noturnos, a confecção dos índices foi executada a partir de imagens diurnas registradas nas datas mais próximas e com pouca ou nenhuma ocorrência de precipitação entre elas. Isto porque, conforme explicado anteriormente, as bandas necessárias para tais procedimentos não são fornecidas pelo Landsat 8 devido a natureza do seu funcionamento (sensor passivo).

Após a elaboração das cartas dos índices para os episódios escolhidos, a fim de explorar quantitativamente as relações entre os fatores de ΔT , gráficos de dispersão (*scatter plots*) de NDVI, NDWI, NDBI e BUI com a variável térmica foram gerados, bem como os coeficientes de correlação linear de Pearson e Spearman. O *scatter plot* permite, por meio de um método multiespectral, combinar duas variáveis – neste caso ΔT e o índice escolhido - em um gráfico (diagrama de dispersão) para observar suas associações através do formato da nuvem de pontos (revelado pelo gráfico).

O coeficiente (adimensional) de Pearson ou Spearman, por sua vez, mede o grau e a direção da associação linear existente entre duas variáveis quantitativas; seu valor varia entre +1 e -1, e quanto mais próximo do valor absoluto 1, mais forte a correlação, que pode ser ainda, positiva ou negativa. Embora amplamente empregado nos estudos de Clima Urbano, Silvestre (2016) aponta deficiência na aplicação do teste de correlação de Pearson (teste paramétrico) devido à falta de atendimento as suas pressuposições tais como: aleatoriedade, normalidade uni e bivariada das variáveis envolvidas. Nesse

sentido, a autora sugere a aplicação de testes não paramétricos como o Teste de Correlação de Spearman ou o Teste de Correlação de Daniel, para os casos em que o Teste de Correlação de Pearson não possa ser aplicado. Assim, para verificar tais pressupostos e qual coeficiente adequado, foram gerados os histogramas de cada variável isoladamente, realizado o teste de normalidade Shapiro-Wilk, bem como avaliado o p-valor (teste bilateral).

Tais resultados permitiram - resguardado o grau de generalização decorrente da resolução espacial de 30m da imagem, avaliar as relações entre ΔT diurno e noturno com as características de composição da superfície mostradas pelos índices.

3.3. RELEVO E COBERTURA DA TERRA

A partir dos resultados anteriores, foi possível identificar, com base em sua classificação através do desvio padrão, dois episódios (um diurno e um noturno) que se destacaram com maior aquecimento e maior resfriamento respectivamente, os quais foram denominados como “episódios críticos”.

Dada a relevância das características de relevo para o estudo do Clima Urbano, foram elaboradas as cartas de hipsometria, declividade e orientação das vertentes, a partir de dados adquiridos gratuitamente pelo projeto TOPODATA¹³ de imageamento por radar, com resolução espacial de 30 metros. Estas cartas são apresentadas na seção sobre a área de estudo, também para fins de caracterização.

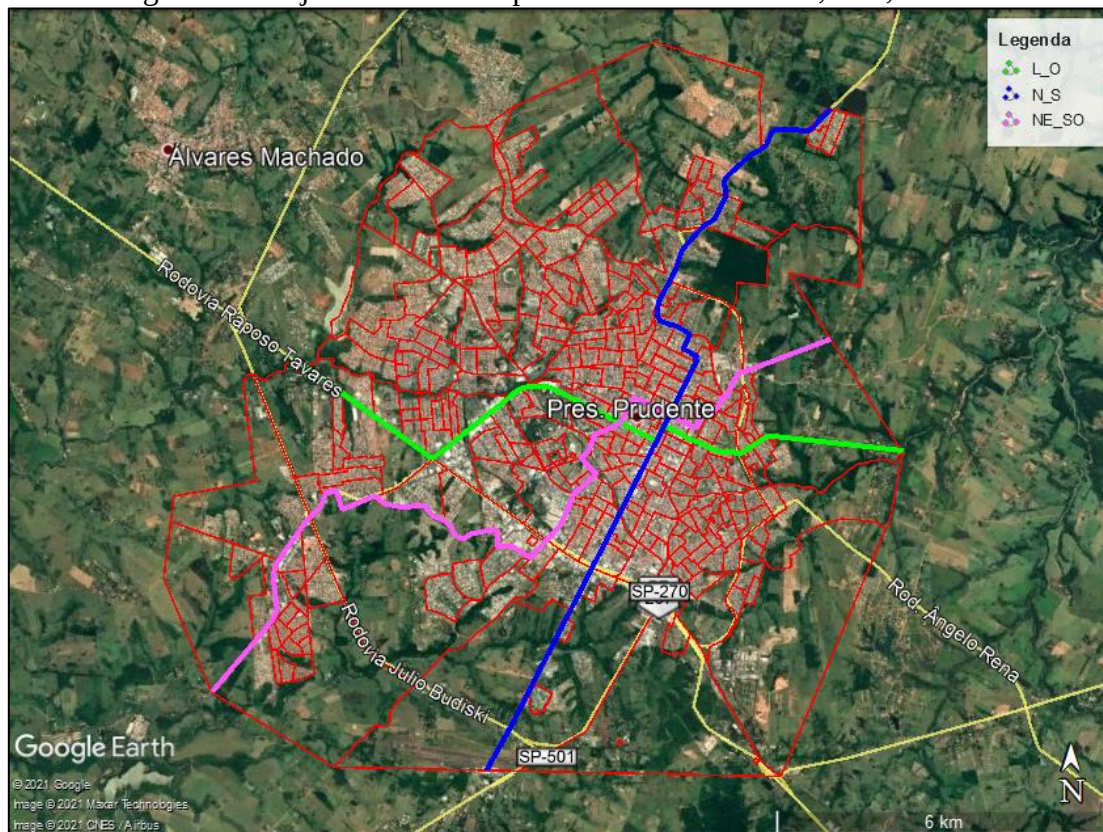
Com as informações do relevo, dos índices e do campo térmico, realizou-se uma análise de todas as variáveis de modo integrado através do traçado e sobreposição dos atributos de perfis da área. A aplicação de perfis transversais em cartas ou modelos cartográficos foi enfatizada por Monteiro (1990b), que destacou seu uso para associar os padrões espaciais identificáveis no plano horizontal, revelados, em sua estrutura exibida no plano vertical; e para além de caracterizá-los setorialmente, exibir os atributos de relações entre eles.

Desta forma, foram definidos três perfis, conforme Figura 15, buscando representar a diversidade da paisagem urbana (em termos de morfologia, composição e configuração) e dos aspectos do relevo da área de estudo, sendo eles: Leste-Oeste (L-O), Norte-Sul (N-S) e Nordeste-Sudoeste (NE-SO). Os perfis foram elaborados no ArcGIS

¹³ Disponível em: <<http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata>>.

para os quatro episódios de interesse e para todas as variáveis, de modo a extrair o atributo pixel a pixel conforme o traçado definido.

Figura 15: Trajetos escolhidos para detalhamento: L-O, N-S, NE-SO.



Fonte: Google Earth, 2021. Elaborado pela autora.

De acordo com Mendonça (2000), “a identificação o mais detalhada possível dos diferentes espaços intraurbanos é de grande importância, pois, a partir dela, também é possível identificar os fatores causadores da diferenciação climática do ambiente citadino”. Desta forma, para os episódios críticos realizou-se uma investigação mais detalhada dos perfis, por meio imagens de satélite e visitas de campo, que incluiu a identificação, realizada de forma manual, da cobertura da terra predominante a cada 100 metros, considerando a faixa de 50 metros ao redor e ao longo do eixo do trajeto, compatível com a resolução espacial de captura das imagens termiais. Nesse sentido, trabalhou-se com nove classes: 1) Telha de cerâmica, 2) Telha metálica, 3) Telha de fibrocimento, 4) Pavimento de asfalto, 5) Pavimento de concreto, 6) Corpos d’água, 7) Copa de árvore (Vegetação arbórea), 8) Vegetação rasteira (gramíneas e/ou cultivos agrícolas e/ou solo exposto) e 9) Misto.

Não existem áreas integralmente constituídas por alguns tipos de materiais - por exemplo um pixel 100% formado por telhas metálicas. Há ainda um grau de generalização intrínseco as imagens do Landsat 8, devido a resolução espacial, de modo que não há distinção entre alvos com distâncias entre si menores que 100 metros na banda termal. Portanto, o valor do pixel representa, geralmente, uma “mistura” da temperatura de superfície do nível da rua e do nível dos telhados, sendo que no centro da cidade a fração do nível do telhado predomina pois são áreas densamente construídas (PARLOW *et al.*, 2014). Por isso, a classificação da cobertura da terra foi realizada com base no predomínio do tipo de material (construtivo ou não) da seguinte forma: em áreas densamente edificadas considerando o nível dos telhados, e em áreas pouco edificadas, o nível da rua. Assim, os perfis foram traçados em sua maioria sobre as vias asfaltadas (quando existentes) – procedimento análogo aos transectos móveis -, e uma área foi enquadrada na classe asfalto por exemplo, em locais como rodovias, caracterizados por baixa densidade de edificações e dotados de várias faixas de rolamento para veículos.

Com o intuito de facilitar a interpretação dos dados, os resultados dos perfis de declividade e orientação de vertentes - inicialmente obtidos sob a forma de gráficos de linhas (quantitativo)-, foram transformados em gráficos de barras horizontais (qualitativo), delimitadas em intervalos iguais aos da cobertura (100metros). As categorias de declividade seguiram a classificação da Embrapa (2009): Plano (0-3%), Suave ondulado (3-8%), Ondulado (8-20%), Forte ondulado (20-45%), Montanhoso (45-75%) e Escarpado (>75%). Já a orientação das vertentes seguiu as 4 classes usuais: Norte, Sul, Leste e Oeste.

Por fim, as informações de temperatura de superfície, altitude, cobertura da terra, declividade e orientação de vertentes dos episódios críticos foram organizadas em painéis espaço temporais no Excel. Desta forma, concentrando-se a análise ao longo de um eixo, foi possível demonstrar as partes – mais fundamentais e expressivas – do todo complexo que é a cidade (MONTEIRO, 1990b), e fazer uma análise comparativa dos efeitos isolados e combinados/sinérgicos de cada fator sobre a resposta térmica das coberturas.

3.4 ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA, CARACTERÍSTICAS SOCIOECONÔMICAS E CONSUMO ENERGÉTICO

A série de cartas de ΔT inicial revelou datas próximas com tomadas diurna e noturna, o que possibilitaria examiná-las no contexto de uma data única, mediante a comprovação de ocorrência de estabilidade atmosférica entre elas. Assim, prosseguiu-se com o estudo de cartas sinóticas do satélite GOES 16, disponibilizadas¹⁴ pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, associado aos registros dos elementos climáticos da Estação Meteorológica local do INMET, e identificação dos sistemas atmosféricos atuantes. Considerou-se para tanto os dados do período entre as datas diurna e noturna, bem como aqueles de três dias antes da tomada da imagem diurna (SEZERINO e MONTEIRO, 1990; HALL *et al.*, 1992; BERGER *et al.*; 2017).

Para agregar a dimensão social na interpretação e análise do clima urbano, conforme proposta de SANT’ANNA NETO (2012), buscou-se informações socioeconômicas de Presidente Prudente. Nesse sentido, foram utilizadas: a carta de Renda, elaborada a partir de dados do Censo Demográfico do IBGE (2010), a carta de Exclusão-inclusão Social de Camacho (2013), e a carta do Índice de Vulnerabilidade Social (SoVI®) de Rampazzo (2017).

Em virtude da elevada quantidade de variáveis envolvidas e do refinamento da escala de análise exigido neste ponto do estudo para discutir questões socioeconômicas, escolheu-se aplicar a abordagem por áreas. A caracterização socioeconômica, relativa ao conteúdo, permitiu selecionar oito áreas (A1 até A8) representativas da zona urbana sob o ponto de vista dos segmentos socioeconômicos, levando-se em conta ainda seus materiais construtivos. Referidas áreas foram definidas com formato circular e delimitadas com raio de 100 metros. Tendo em vista que as etapas anteriores da pesquisa trataram com detalhe dos elementos relacionados com a forma e estrutura da cidade, e que a fase final se propôs a focar no conteúdo (dimensão social), valeu-se da metodologia de classificação da paisagem em LCZs – Zonas Climáticas Locais ou *Local Climate Zones* (STEWART e OKE, 2009) para sintetizar suas tipologias construtivas e complementar sua caracterização. Tal tarefa foi realizada com o auxílio de imagens de satélite, da carta de Potenciais Unidades Climáticas (PUCs) de Cardoso (2015) e de visitas de campo.

Visto que o contexto climático repercute diretamente no consumo de energia elétrica, cuja característica também está bastante conectada com as condições

¹⁴ Endereço eletrônico para acesso às cartas: <<http://satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes16.formulario.logic>>.

socioeconômicas, foram solicitados dados mensais do consumo de energia de Presidente Prudente a empresa distribuidora de energia elétrica local (Energisa), com o mesmo recorte temporal da série de cartas de ΔT inicial (de junho de 2019 até maio de 2020). Para completar o banco de dados, foram obtidos os registros mensais de consumo de energia elétrica para a mesma época, porém por unidade consumidora individual, ou seja, uma residência unifamiliar representativa para cada área.

Diante das interfaces entre as questões socioeconômicas, de saúde, eficiência energética e conservação de recursos naturais com as tipologias e materiais construtivos, bem como da ligação delas com o clima, vislumbrou-se e verificou-se seu potencial de contribuição com a Agenda 2030, principalmente com as metas dos ODS 11 e 13.

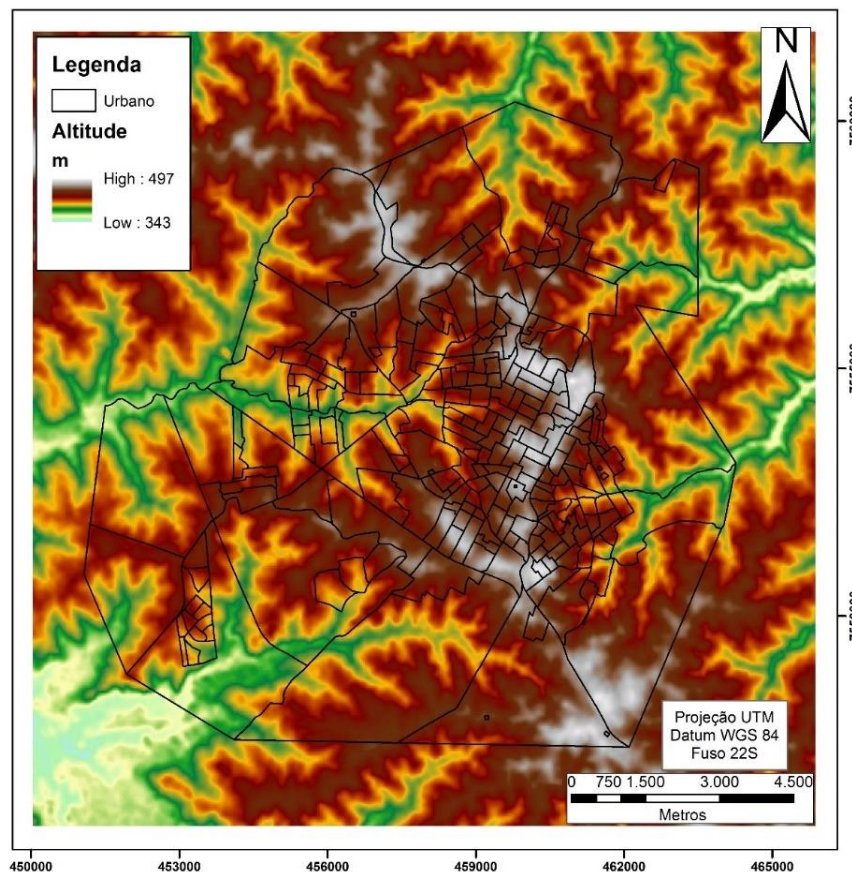
4. ÁREA DE ESTUDO

O município de Presidente Prudente está localizado no oeste do estado de São Paulo – Brasil, possui área territorial de 560,6 km², e população total estimada em 230.371 habitantes (IBGE, 2020), dos quais, mais de 97% residem na zona urbana, esta com área aproximada de 125 km². A área deste estudo, especificamente, contempla a área urbana e seu entorno rural próximo.

Do ponto de vista econômico trata-se da capital regional de caráter agropastoril, consistindo-se, num importante centro comercial, de serviços e educacional, porém com atividade industrial pouco expressiva em relação a outras áreas do estado (SPOSITO, 2011).

Em termos de características físicas, o município pertence à Bacia Hidrográfica do Rio Paraná (UGRHI 21 - Rio do Peixe e UGRHI 22 - Pontal do Paranapanema) e situa-se no Planalto Ocidental Paulista, especificamente no Planalto Centro Ocidental (ROSS e MOROZ, 1997), sendo dotado de relevo proveniente de processos erosivos, com altitudes concentradas entre 350 e 500m, como mostra a Figura 16, e predomínio de colinas médias e baixas.

Figura 16: Carta de hipsometria da área urbana e entorno de Presidente Prudente.

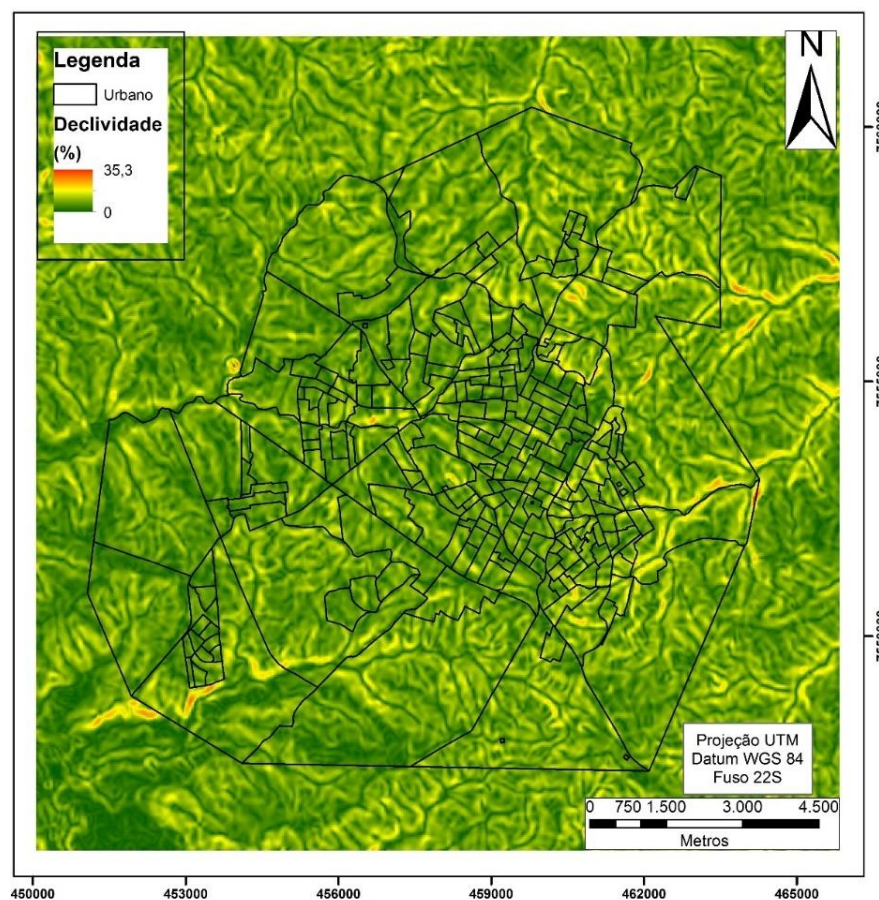


Fonte: TODODATA – INPE, 2011. Elaborado pela autora.

Como será detalhado mais adiante, a cidade de Presidente Prudente teve seu surgimento e expansão motivados pela Estrada de Ferro Sorocabana, cujos trilhos acompanham o espigão que se estende de sudeste a noroeste. A ocupação se deu primeiro nos topos das colinas e espigões rasos, e posteriormente, seguiu para áreas mais baixas, fundos de vales e várzeas (NUNES *et al.*, 2011). Desta forma, o núcleo urbano -originado da estação ferroviária- se situa sobre morrotes alongados e espigões, com amplitudes locais inferiores a 100 metros (NUNES *et al.*, 2011).

As declividades médias estão entre 10% a 20%, como ilustra a Figura 17, de modo que no setor leste e nordeste do município predominam as colinas de poucas extensões e topos curtos e ondulados, cujas declividades variam entre 5% a 20%. Enquanto no setor oeste, dominam as colinas amplas de topos suavemente ondulados, com declividades entre 0 a 10% (NUNES *et al.*, 2006). Embora a maior parte da área seja constituída por valores entre 5 e 10%, declividades mais acentuadas (15-20%) podem ser observadas no setor leste e sudoeste, onde localizam-se bairros com população de baixa renda.

Figura 17: Carta de declividade da área urbana e entorno de Presidente Prudente.

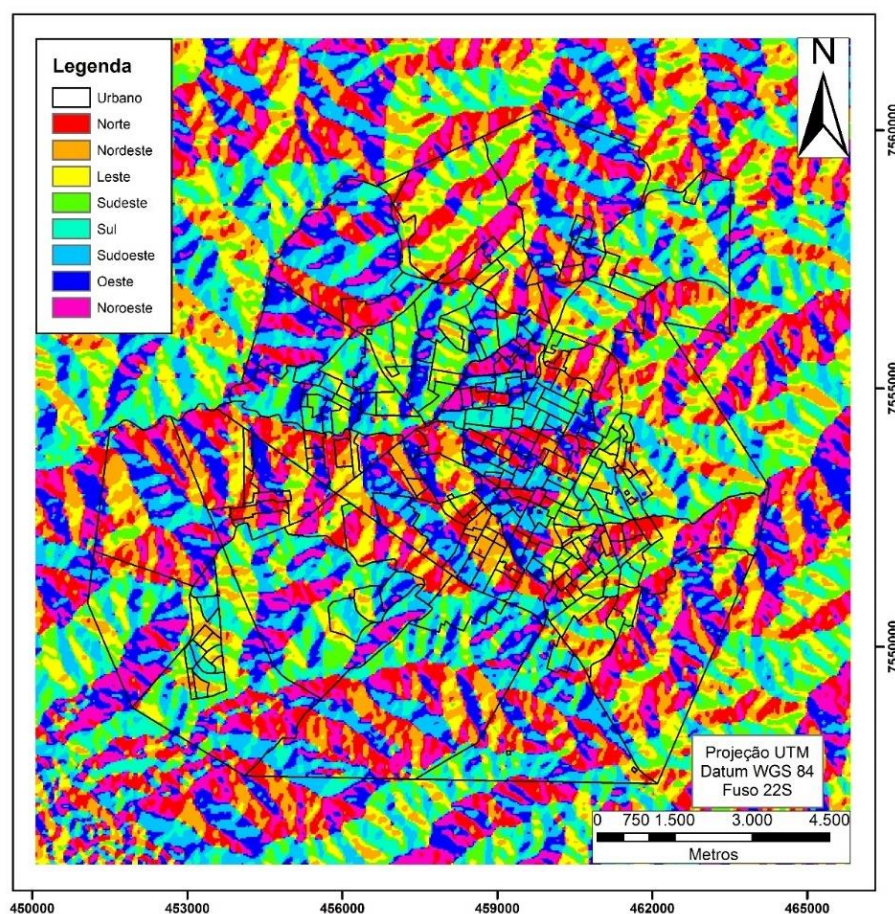


Fonte: TODODATA – INPE, 2011. Elaborado pela autora.

Outra informação relacionada ao relevo, importante para a compreensão do clima urbano sob a perspectiva do canal termodinâmico, e mais especificamente das temperaturas de superfície pois cria diferentes condições no balanço de energia, é a orientação das vertentes. Isto porque, conforme o movimento aparente do sol, no hemisfério Sul, as vertentes orientadas para o quadrante norte e oeste recebem intensa insolação a partir do meio dia até metade do período da tarde, e portanto, são sempre mais quentes, bem como nordeste e noroeste, quando comparadas as demais orientações. Além disso, o efeito do sombreamento juntamente com a orientação das vertentes pode indicar áreas que recebem mais ou menos incidência da radiação solar de forma direta de acordo com a hora do dia.

Na carta de orientação das vertentes da área de estudo (Figura 18), nota-se que de maneira geral, na porção centro-oeste da cidade houve maior quantidade de vertentes direcionadas para o sul, enquanto nas áreas a sudoeste e nordeste, predominaram vertentes voltadas para norte.

Figura 18: Carta de orientação de vertentes da área urbana e entorno de Presidente Prudente.



Fonte: TODODATA – INPE, 2011. Elaborado pela autora.

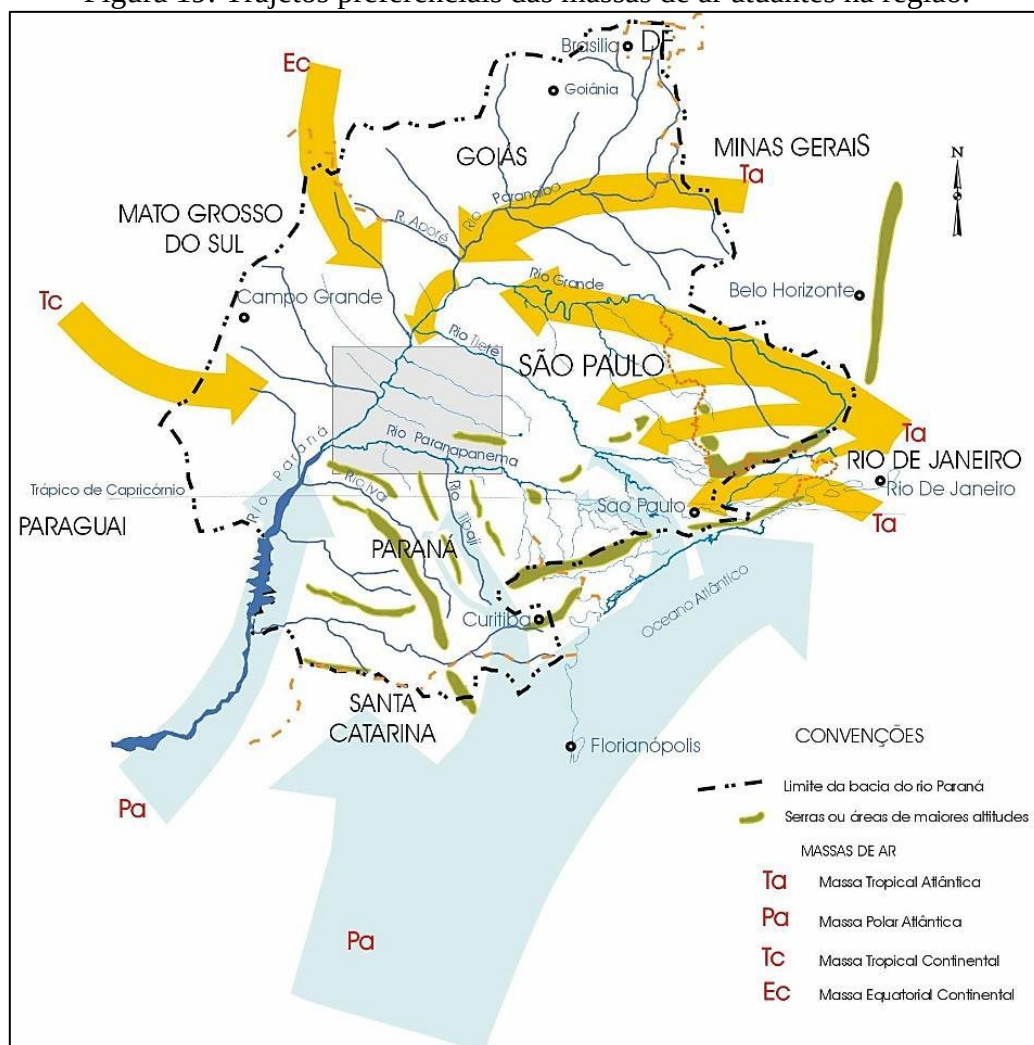
Quanto ao contexto climático em que a cidade está inserida, à distância de 600 km do Oceano Atlântico e a altitude média de 430m, resultam numa forte influência da continentalidade e frequentemente na ocorrência de tipos de tempo com grandes amplitudes térmicas, tanto durante o dia, quanto entre o dia e a noite. Em função ainda de sua localização - muito próxima do Trópico de Capricórnio – a incidência da radiação exerce impacto também relevante na definição de suas características climáticas.

Trata-se de uma área que se localiza numa região de transição climática entre os domínios dos sistemas tropicais e extratropicais, que resultam numa acentuada variabilidade pluviométrica interanual. O município de Presidente Prudente, está sob o efeito dos seguintes sistemas atmosféricos (Figura 19): massa Tropical Atlântica (Ta), Tropical Continental (Tc), Equatorial Continental (Ec), Polar Atlântica (Pa), Polar Tropicalizada (Pt), Frente Polar Atlântica (FPA), Frente Quente (FQ), Instabilidade Tropical (It), Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Zona de Convergência de Umidade (ZCOU) e Complexo Convectivo de Mesoescala (CCM). De modo geral, as massas tropicais prevalecem na região a maior parte do ano, ora com origem no atlântico, mais úmidas, ora com trajetórias continentais, mais quentes e secas (SANT'ANNA NETO e TOMMASELLI, 2009).

Tal dinâmica regional e local determinam o tipo climático predominante: Aw (tropical com inverno seco) segundo a classificação climática de Koppen (DUBREUIL *et al.*, 2019) e valores médios de temperatura do ar e de precipitação. Assim, conforme mostra a Figura 20, o clima na cidade é caracterizado por um período quente e chuvoso influenciado pelos sistemas tropical e equatorial, correspondendo aos meses de primavera e verão (outubro a março), e um período em que as chuvas diminuem e as temperaturas são mais amenas (abril a setembro), causado pela presença de sistemas extratropicais, com a entrada das massas polares.

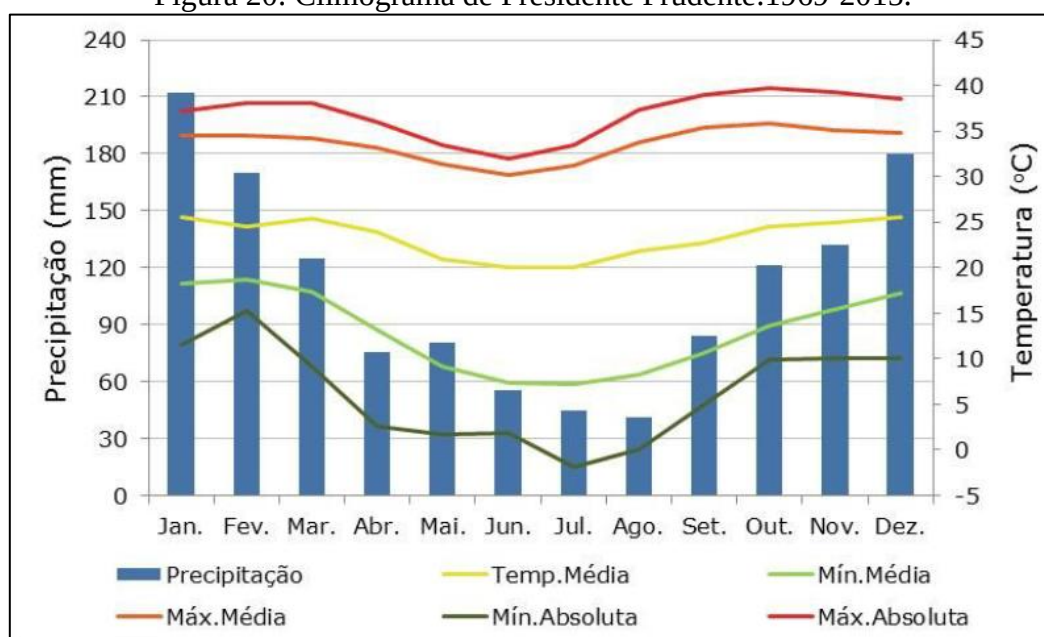
Suas características climáticas contemplam temperaturas naturalmente elevadas, com média anual de 23°C e, cerca de 170 dias do ano com temperaturas máximas superiores a 30°C e temperaturas mínimas superiores a 20°C, além de precipitação média anual de 1300mm. Como pode ser observado no Climograma (Figura 20), durante a primavera e o verão entre 1969 e 2015, a variação das temperaturas diárias foi de 20°C a 32°C, com máximas absolutas próximas a 40°C, estando concentrada a precipitação média anual neste período.

Figura 19: Trajetos preferenciais das massas de ar atuantes na região.



Fonte: Boin, 2000.

Figura 20: Climograma de Presidente Prudente:1969-2015.



Fonte: Amorim, 2021.

Salienta-se que no estudo realizado por Fante (2014), no qual foram feitas análises comparativas entre os dados de temperatura máxima e mínima com as da normal climatológica (1961-1990) e do período recente (1991 a 2011), constatou-se aumento de 1,45°C para as máximas e aumento de 0,45°C para as mínimas.

Além dos fatores abordados anteriormente (radiação, relevo, continentalidade e sistemas atmosféricos), a expansão territorial urbana tem papel fundamental na explicação do clima urbano da cidade.

Do ponto de vista histórico-geográfico, o município de Presidente Prudente foi fundado em 1917 e emancipado em 1921. Surgiu e cresceu no cenário de expansão da Estrada de Ferro Sorocabana, associada ao avanço do setor econômico do café com a busca de novas áreas de plantio na porção oeste do estado de São Paulo, na década de 1920.

Em sua origem, foram criadas a Vila Marcondes e Vila Goulart (hoje, centro da cidade), localizadas à leste e à oeste da ferrovia, respectivamente, e a ocupação das áreas se deu ao longo da linha férrea com esses dois núcleos urbanos desempenhando função de suporte para a exploração da região (ABREU, 1972). Todavia a urbanização nasceu para amparar a negociação e comercialização das terras (SPOSITO, 2011) e fornecer subsídios para a ocupação e colonização e desempenho das funções da zona rural (ABREU, 1972). Desta forma, a estrada de ferro orientou o processo de expansão territorial da cidade (SPOSITO, 2011).

Houve avanço da produção de algodão em 1930 e a instalação de indústrias ligadas ao setor, até que em 1940 o algodão e a criação de gado superaram o café. Quando em 1960 a pecuária se torna a principal atividade econômica, as décadas seguintes tem crescimento marcado pelos frigoríficos e curtumes, com a decadência da agricultura.

Ocupações próximas aos dois núcleos principais ocorreram desde 1920, entretanto, conforme Abreu (1972), a instalação de infraestrutura urbana no município foi lenta, e teve o início apoiado principalmente pela iniciativa privada.

Enquanto a Vila Goulart, por sua posição - de frente para a Estação Ferroviária - e traçado retilíneo, foi recebendo melhorias que consolidavam seu aspecto de centralidade; a Vila Marcondes (de costas para a estação), dotada de topografia acidentada com o afastamento do espigão da linha férrea, reunia estabelecimentos voltados ao suporte à ocupação das terras rurais.

Tal diferenciação socioespacial acentuou-se com o passar do tempo e apesar da expansão territorial urbana acontecer majoritariamente no sentido norte-sul ao longo da

linha férrea até 1960, observava-se aumento de loteamentos fora desse eixo desde a década de 1950, e a consequente geração de vazios urbanos.

A partir de 1970 o crescimento da cidade tornou-se predominantemente leste-oeste, com concentração na zona oeste, marcado pela descontinuidade territorial na implantação dos loteamentos.

A partir desta década a especulação imobiliária, o êxodo rural e o inchaço populacional urbano, acompanhados de problemas habitacionais, sociais e ambientais, caracterizam o espaço urbano do município (CAMARGO, 2007).

No final da década de 1980 e ao longo dos anos 1990, as porções periféricas da cidade tornaram-se ainda mais distintas, denotando dois perfis: um deles com população de menor renda se instalando em locais afastados e de difícil acesso a postos de trabalho, serviços e infraestrutura; e o outro consistindo nos espaços residenciais fechados, de alta renda.

Assim, na década de 1980 foram criados os loteamentos populares de:

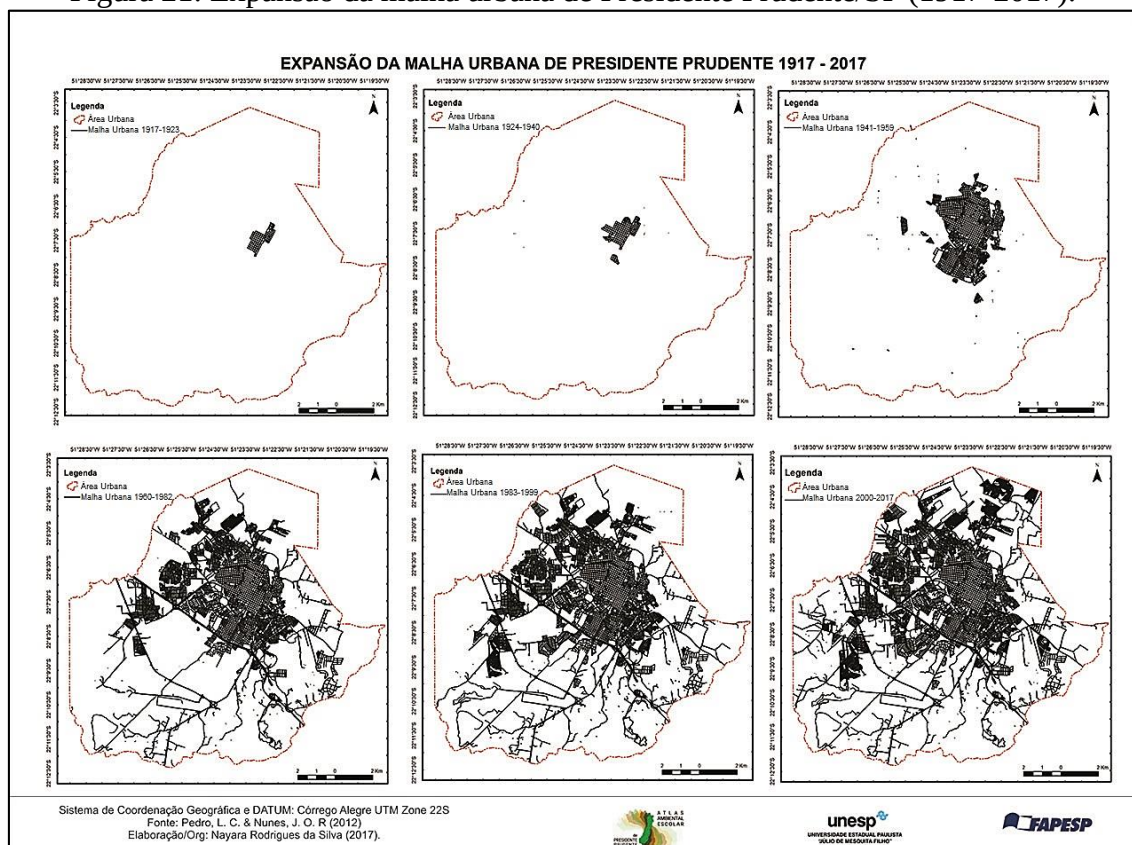
- COHAB, CECAP, Parque Cedral, Jardim Jequitibás na zona oeste;
- Parque Alexandrina, Parque Watal Ishibashi, Parque Bandeirantes na zona norte;
- Jardim Itatiaia e Jardim Santa Marta na zona leste.

Já na década de 1990 cabe destacar a implantação dos loteamentos:

- Brasil Novo, Jardim Morada do Sol, Augusto de Paula, Jardim Humberto Salvador e jardim Maracanã na zona norte;
- Jardim Cambuci na zona leste;
- Jardim Vale do Sol, Jardim Santa Paula, Ana Jacinta I e II, Mario Amato, Jequitibás II e CECAP II na zona oeste.

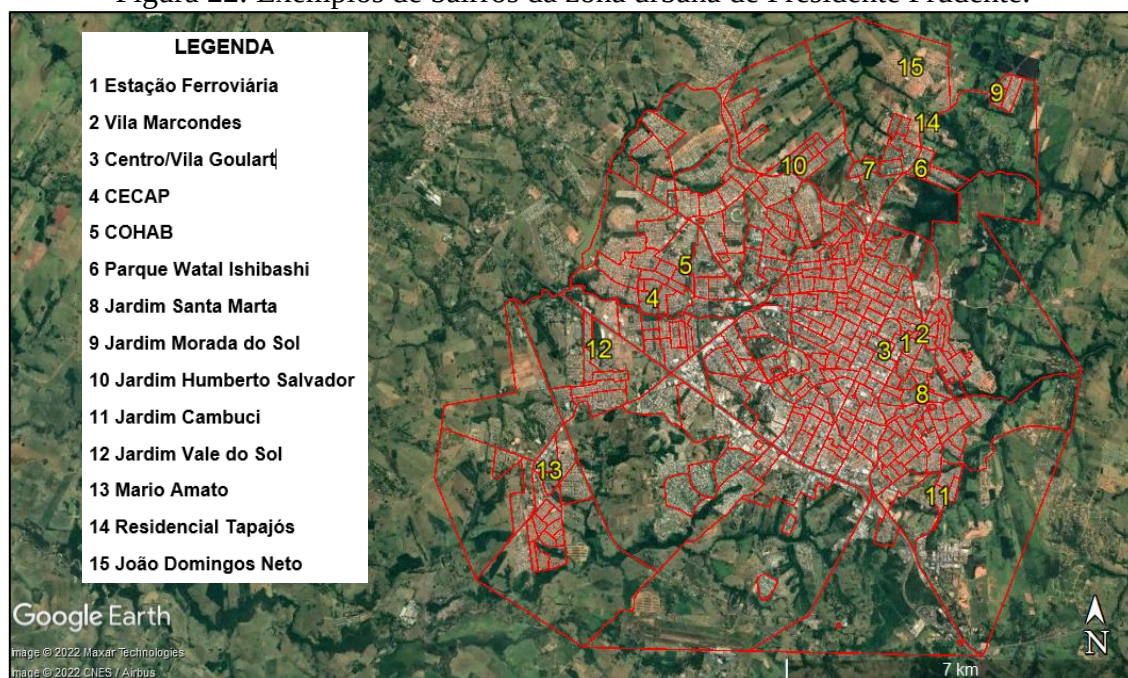
Por fim, a partir dos anos 2000, foi realizada a implantação do Residencial Tapajós (2013) e João Domingos Netto (2014) na porção norte da cidade. Essa dinâmica de expansão urbana que ocorreu em Presidente Prudente é ilustrada na Figura 21, e alguns dos lugares citados estão destacados na Figura 22.

Figura 21: Expansão da malha urbana de Presidente Prudente/SP (1917-2017).



Fonte: Pedro e Nunes, 2012.

Figura 22: Exemplos de bairros da zona urbana de Presidente Prudente.



Fonte: Google Earth, 2022. Elaborado pela autora.

Sposito (1990) chama a atenção nesse processo, para a falta de preocupação em prover continuidade à malha urbana e promover sua expansão na mesma proporção em todas as direções, o que torna as cidades desiguais em relação à acessibilidade de sua população às áreas centrais, ao comércio, aos serviços e aos empregos.

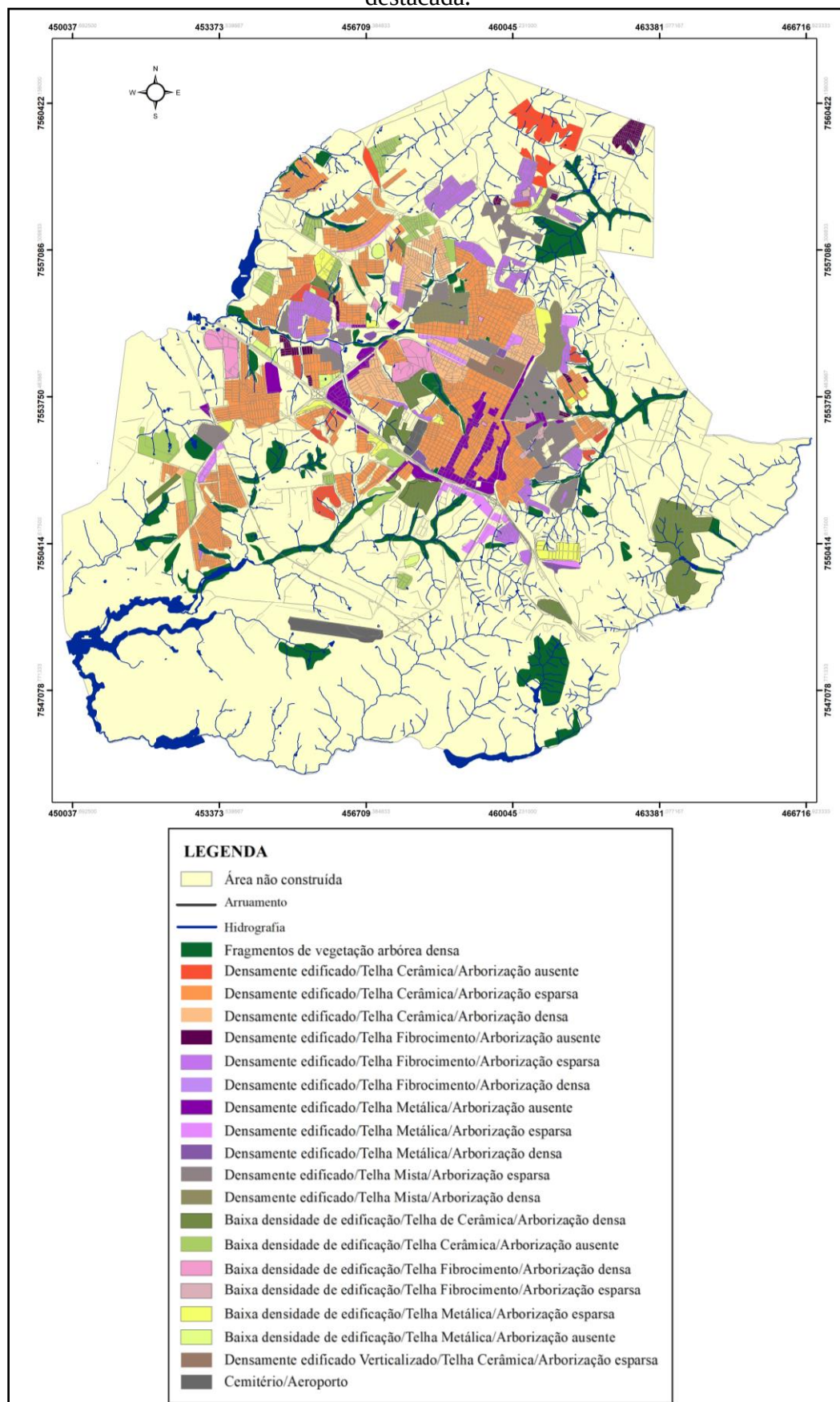
Além disso, o processo de produção do espaço urbano que ocorreu em Presidente Prudente, motivado principalmente pela especulação imobiliária, proporcionou um tipo de crescimento e o surgimento de bairros caracterizados por problemas como a grande densidade de edificações (lotes pequenos e excessivamente edificadas, ou lotes grandes com várias residências), ocupação de áreas de risco (fundos de vale), ausência de cobertura vegetal, aumentando ainda mais a exclusão social (CAMARGO, 2007).

Em decorrência desses fatos e acontecimentos, a paisagem urbana configura-se hoje, pela grande diversidade de uso e ocupação da terra, como pode ser observado na Figura 23. Conforme já destacado por Amorim (2017), os bairros mais antigos - construídos entre as décadas de 1950 e 1970 - são densamente construídos e tem uma cobertura vegetal arbórea, marcadamente nas calçadas e quintais. Já as áreas residenciais estabelecidas nas décadas de 1980/1990, em sua maioria, são dotadas de edificações esparsas, com gramado e vegetação arbórea, nas quais predominam conjuntos habitacionais e loteamentos destinados a população de baixa renda, com terrenos menores e materiais construtivos pouco adequados ao conforto térmico e ambiental (paredes finas e coberturas de fibrocimento).

Nesse sentido, nos ambientes urbanos, a influência antrópica representada pela grande quantidade de edificações, extensas superfícies pavimentadas, diminuição de superfícies permeáveis e o emprego de determinados tipos de materiais construtivos, produz um clima urbano que potencializa as características já naturalmente quentes de localidades tropicais como Presidente Prudente. A Figura 23 demonstra por exemplo, a arborização urbana deficitária, falta de áreas verdes, espaços públicos, praças e parques urbanos.

Resultados de medições itinerantes de temperatura do ar (transectos móveis) realizadas por Cardoso e Amorim (2017) na mesma área de estudo e em dois trajetos (eixo oeste-leste e sul-norte) já demonstraram tal fato. De acordo com as autoras, a área da cidade que mais se destacou com elevadas temperaturas foi a zona oeste, em decorrência possivelmente da combinação de escassa cobertura vegetal com alta densidade construtiva, além da presença de materiais construtivos inadequados, que produzem elevada inércia térmica e desconforto humano.

Figura 23: Mapa de caracterização do uso da terra de Presidente Prudente, com legenda destacada.

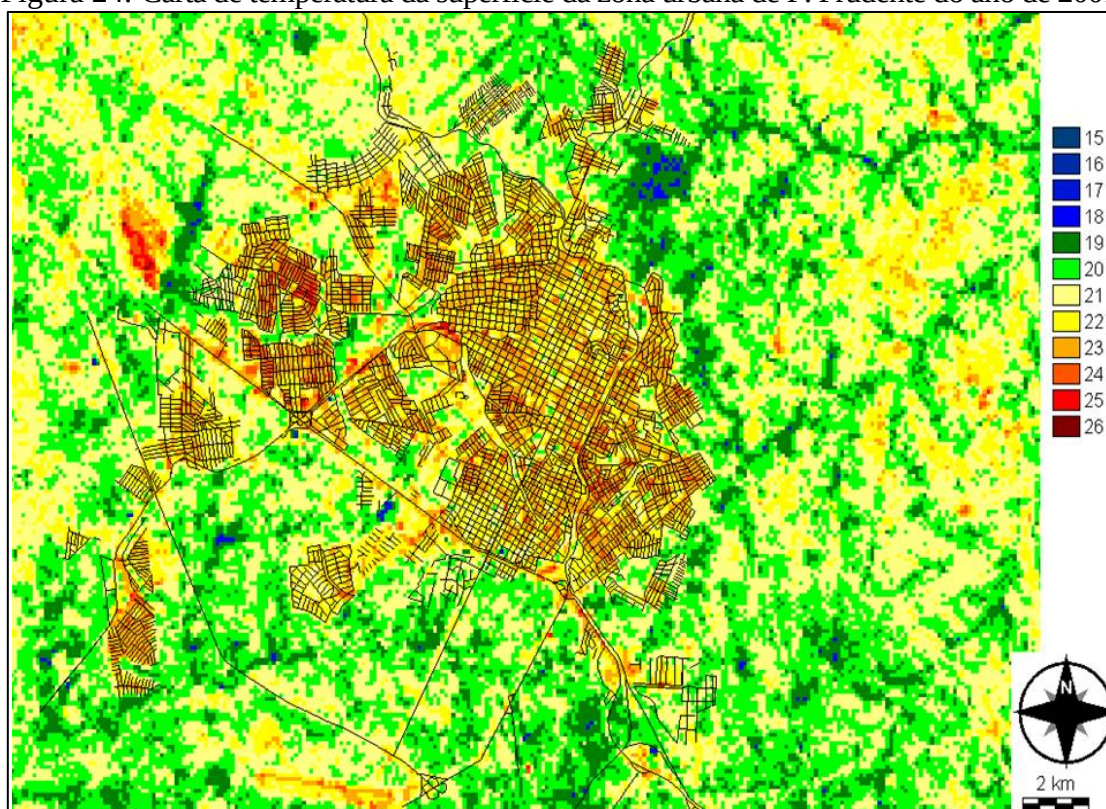


Fonte: Rampazzo, 2019.

Nesta perspectiva, a temperatura da superfície (ou dos alvos), mais do que a temperatura do ar (que é medida a 1 metro de altura), tem papel importante, pois, segundo Voogt e Oke (2003), ela modula a temperatura do ar das camadas mais baixas da atmosfera urbana, é central para o balanço energético da superfície, ajuda a determinar o clima interno dos edifícios e afeta as trocas de energia que influenciam o conforto dos habitantes da cidade. Além disso, a atual configuração urbana é refletida também na temperatura dos alvos que compõem a paisagem da cidade.

Assim, as temperaturas dos alvos da área urbana de Presidente Prudente podem ser observadas na Figura 24, que mostra como o processo de urbanização afeta a temperatura e o clima urbano na área de estudo. A distribuição espacial das temperaturas de superfície mostra o centro urbano mais aquecido do que o entorno menos construído e o rural próximo. Dentre as áreas urbanas que exibem temperaturas elevadas, cabe destacar os loteamentos urbanos de baixa renda que são densamente construídos e têm telhados fibrocimento, além de quadras predominantemente comerciais com telhados metálicos, ambos com pouca/nenhuma vegetação. Já em áreas com temperaturas reduzidas são observados fundos de vale com vegetação ciliar ou fragmentos florestais.

Figura 24: Carta de temperatura da superfície da zona urbana de P. Prudente do ano de 2001.



Fonte: Amorim *et al.*, 2008.

A grande diversidade de tipos de uso e ocupação da terra em Presidente Prudente, com seus respectivos e distintos materiais de cobertura, provenientes da lógica de expansão urbana motivada pela especulação imobiliária e associada à diferenciação socioespacial, resultaram em modificações nas características climáticas locais. Daí a necessidade de compreender as consequências da mudança de uso da terra na dinâmica do clima urbano e fornecer subsídios para a realização de seu planejamento sustentável que contemple o bem-estar de todos os habitantes.

5. CAMPO TÉRMICO

Tendo em vista a disponibilidade de acesso a imagens noturnas do canal infravermelho termal do satélite Landsat 8, foi realizado o tratamento de imagens tanto noturnas quanto diurnas, com o intuito de caracterizar o campo térmico da área de estudo e investigar as respostas térmicas dos alvos durante o dia e a noite, esta última ainda pouco conhecida.

Optou-se por contemplar todas as imagens disponíveis, desde que desprovidas de nuvens na área de estudo, para o período de um ano - jun/2019 até mai/2020 - com o intuito de abranger épocas com maior diferença de incidência de radiação solar e precipitação. Optou-se ainda por realizar as análises a partir de uma variável relacionada à inércia térmica, ou seja, que representasse as diferentes variações de temperatura das coberturas e superfícies em comparação com um alvo urbano “neutro”. Tal referência foi definida como a temperatura do ar na Estação Meteorológica local (do INMET), pois a localização de equipamentos e instrumentos deste tipo preconiza áreas cujas características do entorno pouco influenciam no registro dos elementos do tempo. Foram obtidas assim, uma série diurna e uma noturna, com o total de dezessete cartas de diferença de temperatura (ΔT), sendo na sequência relatadas as principais informações constatadas acerca do comportamento dos alvos do núcleo urbano *versus* entorno rural próximo nos períodos diurno e noturno.

5.1. DIURNO

Foram geradas oito cartas de ΔT para as imagens diurnas (às 10h20 horário local), exibidas na Figura 25, que apresenta ainda, os dados meteorológicos dessas datas, bem como a temperatura do ar no momento de tomada das imagens de satélite.

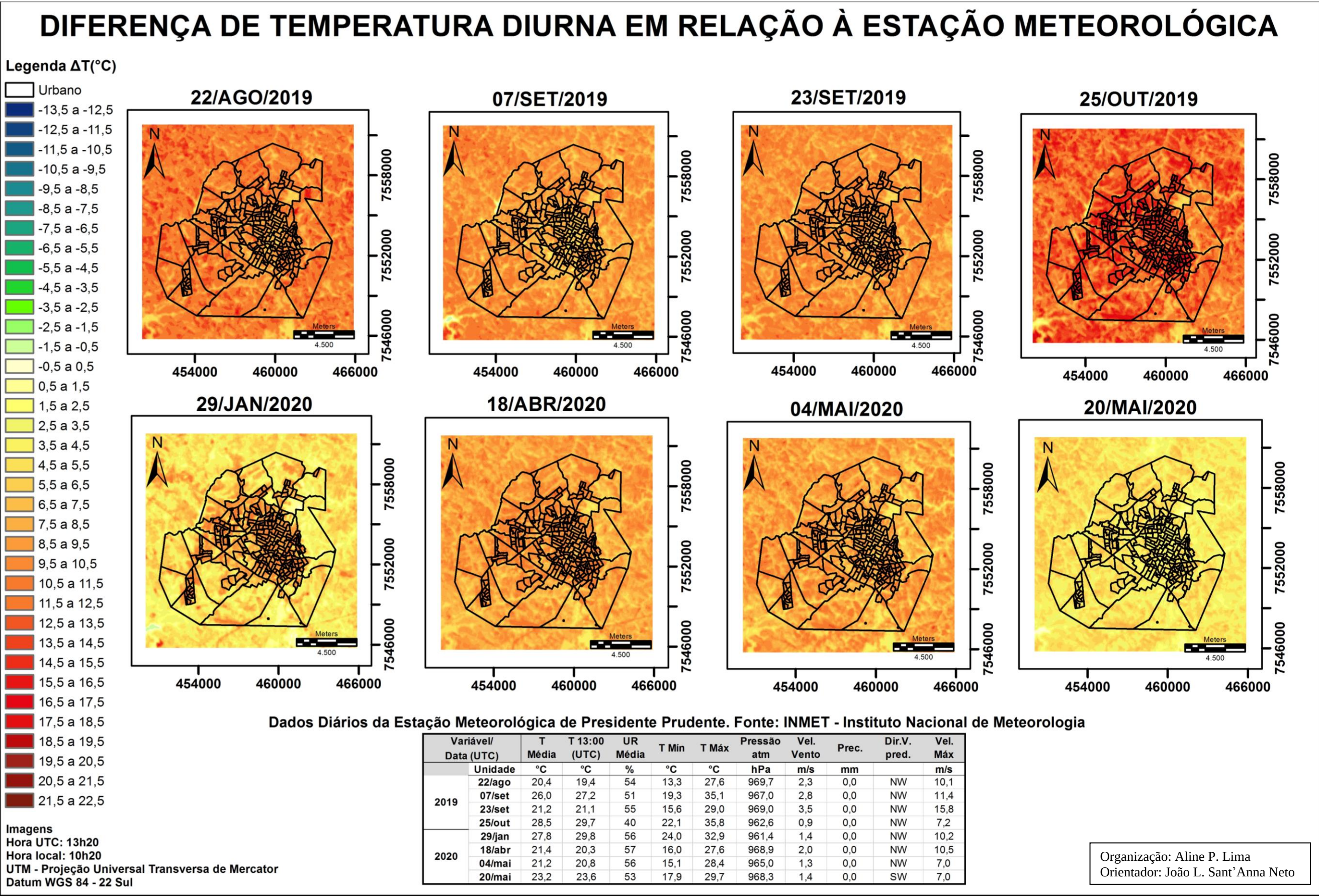
Os resultados obtidos no período diurno, de modo geral, apontam temperaturas maiores ($\Delta T > 0$) em relação à estação meteorológica, analogamente indo ao encontro de pesquisas anteriores diurnas realizadas por Amorim (2018) e Cardoso e Amorim (2017) que mostram cenários térmicos de superfície aquecidos para a área de estudo. Tais resultados são compatíveis com a ocorrência de exposição à radiação solar o período avaliado (diurno) e com o perfil térmico apontados pelos dados meteorológicos, característico da cidade.

As datas de 25 de outubro (2019) e de 20 de maio (2020) chamaram a atenção pois foram os episódios diurnos que exibiram características opostas dentro da série, sendo este com temperaturas de superfícies mais próximas e àquele mais distantes da T_{ar} na estação meteorológica. Assim, outubro esteve mais aquecido dentre todas as cartas diurnas com diferenças de temperatura predominantemente maiores a 7°C , e nesta data registrou-se ainda os maiores valores de temperatura média ($28,5^{\circ}\text{C}$) e temperatura máxima do ar ($35,8^{\circ}\text{C}$), e a menor umidade relativa (40%) dentre as datas analisadas. Já em maio observaram-se valores de ΔT que mais se aproximaram de zero, além de uma suavização nas diferenças de temperatura urbano-rural, sugerindo pouca contribuição da cidade para variação do campo térmico.

No caso das demais datas diurnas estudadas, 22/ago, 07/set, 23/set, 18/abr e 04/mai, foi encontrada uma mistura de pixels, com variação similar de ΔT s tanto na área urbana quanto na rural. Referida mistura representa a heterogeneidade tanto no ambiente urbano, constituído de coberturas antropogênicas como asfalto, concreto e telhados diversos, árvores, gramados, quanto no rural, composto por lavouras, pastagens, vegetação densa e solo exposto, dentre outros. Assim, nestas datas, as respostas termais dos alvos urbanos e rurais foram muito semelhantes.

Nesse sentido, Amorim (2018) aponta que sob condições atmosféricas estáveis e pequeno volume de chuva antes das imagens serem tomadas, a perda de folhas e o esgotamento da cobertura vegetal em termos de umidade provocam impactos no balanço de energia (albedo), e quase igualam as temperaturas das superfícies rurais e urbanas. Tal fato ficou também evidente para a data de 20/mai, todavia nesta, com superfícies menos aquecidas.

Figura 25: Cartas de diferença de temperatura para as datas diurnas de 22/ago/2019 a 20/mai/2020.



Com relação à imagem tomada em 22/ago, inserida na estação do ano historicamente mais fria (inverno) e com os registros de T_{ar} menores dentre as demais datas, além da influência da seca citada anteriormente, é importante destacar a ligação com outros dois aspectos citados por Berger *et al.* (2017): a taxa de transpiração das plantas, que é bastante reduzida na estação fria, e na qual o efeito de resfriamento da vegetação é pouco significativo; e, a diminuição da insolação e/ou aumento do sombreamento, que provoca menores temperaturas nas superfícies antropogênicas.

As cartas diurnas permitem observar ainda que, exceto em 20/mai - quando houve predomínio de valores intermediários de ΔT , as áreas mais centrais da zona urbana, caracterizadas pela alta densidade construtiva e concentração de atividades e serviços humanos, apresentaram diferenças de temperatura médio-altas dentro da escala. Esse resultado sugere pouca variabilidade sazonal das respostas termais de alvos urbanos.

Sob a perspectiva da configuração espacial, identificou-se melhor a definição do da área urbana em comparação à rural em 29 de janeiro, data na qual o núcleo urbano do município apresentou diferenças de temperatura mais elevadas e significativas do que seu entorno, evidenciando o aquecimento da cidade. O maior aquecimento dos alvos urbanos em relação aos rurais durante o período diurno foi constatado por diversos autores (FERREIRA, 2019; BARROS e LOMBARDO, 2016; COUTTS *et al.*, 2016), sendo o alto grau de impermeabilização, a presença de construções e a carência de vegetação das cidades fatores de grande influência apontados nesse sentido.

Outro aspecto determinante para o contraste térmico é a presença de água no ambiente, típica desta época (janeiro), ou seja, período quente e úmido. Constatação análoga, com diferenças térmicas maiores em estações chuvosas, foi verificada para a cidade de São Paulo por Ferreira (2019) e para Presidente Prudente por Amorim (2018). Esta observou resultados semelhantes na análise das ilhas de calor, sendo registradas as menores diferenças entre os ambientes urbano e rural nas datas com menor volume de chuva precedente às imagens.

Segundo a autora, episódios de chuva forte e bem distribuídas levam ao aumento das intensidades da UHI devido ao crescimento da biomassa rural (tanto vegetação rasteira quanto arbórea), o que diminui a temperatura desses alvos; relacionando diretamente os contrastes térmicos à ocorrência de precipitação. Nesse sentido, Amorim (2018) explica ainda que essa maior variabilidade espacial observada na época quente e úmida acontece porque a cidade é muito impermeável, a água é drenada rapidamente e

não permanece nas superfícies, além das elevadas temperaturas provocarem acelerada evaporação.

No caso de Presidente Prudente, os corpos d'água, matas ciliares, a mata do Furquim e um fragmento de floresta densa no sudeste da malha urbana exibiram comportamento similar para todas as datas diurnas estudadas, com diferenças de temperatura sempre menores e próximas de zero em relação aos demais tipos de cobertura da terra. Conforme Chen *et al.* (2020), a vegetação e o solo úmido podem diminuir o processo de aquecimento durante o dia. Este efeito de resfriamento da vegetação durante o período diurno foi verificado por mais autores em outras localidades (BENZ *et al.*, 2017; FERREIRA, 2019; BARROS e LOMBARDO, 2016; AMORIM, 2018). A resposta térmica dos corpos d'água se deve ao seu alto calor específico, que conduz à uma alta demanda energética para alterar a temperatura, e consequentemente torna mais lento seu aquecimento durante o dia, também devido à convecção (WENG, 2003).

O Quadro 8 mostra os valores absolutos extremos de temperatura de superfície (TS) e de diferença de temperatura (ΔT) para as datas analisadas do período diurno e a respectiva amplitude. Também é possível verificar a ocorrência de precipitação recente (acumulado de 3 dias anteriores), apontada por Amorim (2018) como elemento fundamental para compreensão das respostas termais.

Quadro 8: Variáveis térmicas e ocorrência de precipitação para as datas diurnas.

Variável/Data	2019				2020			
	22/ago	07/set	23/set	25/out	29/jan	18/abr	04/mai	20/mai
TS Mín	21,1	25,9	23,1	30,7	28,5	21,5	23,5	20,4
TS Máx	38,3	42,6	35,6	51,9	45,6	34,5	35,3	33,0
ΔT Mín	1,7	-1,3	2,0	1,0	-1,3	1,2	2,7	-3,2
ΔT Máx	18,9	15,4	14,5	22,2	15,8	14,2	14,5	9,4
Amplitude	17,2	16,7	12,5	21,1	17,1	13,0	11,8	12,6
P 3 dias antes	0,0	0,0	18,4	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0

Fonte: Elaborado pela autora.

A partir do quadro é possível constatar que a data que apresentou maior temperatura de superfície ($51,9^{\circ}\text{C}$) e maior diferença de temperatura em relação à estação meteorológica ($22,2^{\circ}\text{C}$) foi 25/out, indo ao encontro dos resultados da carta da Figura 25, com aspecto geral de maior aquecimento da área para o período considerado. Além disso, foram observados elevados valores de TS, acima de 40°C , em 23/set e 29/jan. Por outro lado, os menores valores de TS ($20,4^{\circ}\text{C}$) e ΔT ($-3,2^{\circ}\text{C}$) corresponderam a data de 20/mai, cuja carta mostrou a maior parte dos pixels com ΔT inferiores.

Cumprir relatar que não houve ocorrência de precipitação nos três dias anteriores às tomadas das imagens, exceto em 23/set e 25/out. Entretanto, o volume pluviométrico de outubro (2,4mm) pode ser considerado pouco significativo para influenciar o campo térmico. Apesar da ausência de água no meio, elemento que tende a aumentar os contrastes térmicos, observou-se que a maior amplitude ocorreu em outubro, quando as escalas variaram 22,2°C, já a menor amplitude foi observada na data de 04/mai (11,8°C).

5.2. NOTURNO

Os resultados para as imagens obtidas no período da noite estão na Figura 26, que contempla ainda variáveis climáticas registradas pela estação meteorológica para as datas estudadas. As cartas de ΔT do período noturno exibiram predomínio de pixels negativos e, quando positivos, com valores próximos de zero. O fato das superfícies estarem mais frias durante a noite, com aspecto de resfriamento em relação à T_{ar} na estação meteorológica, está principalmente ligado ao horário de tomada das imagens, às 22h50 (local). Neste momento, já se passaram entre 3 e 5 horas do pôr do sol (em função de sua declinação sazonal), com ausência da radiação solar, e as coberturas realizaram trocas energéticas ao longo deste período.

A noite de 12/ago apresentou superfícies mais frias, enquanto que 26/mai mostrou superfícies mais quentes em relação à estação, ou seja, ambos foram os episódios noturnos com características opostas. O mês de agosto corresponde à uma época de seca (inverno), sendo que nesta data especificamente, foi registrada umidade relativa de 35%, com valores elevados para as variáveis de temperatura do ar (média, mínima, máxima e T02:00¹⁵), superiores às demais datas. Em 26/mai, noite menos fria dentro do período analisado, as temperaturas (do ar) apontadas pela estação meteorológica estavam reduzidas em relação às outras datas, sugerindo maior correspondência entre T_{ar} e TS. Sobre as datas de 23/mar e 26/mai, observou-se maior heterogeneidade de classes de ΔT , com grande variação de intensidade tanto no urbano, quanto no rural.

A maioria das cartas noturnas mostrou boa definição dos limites urbano-rural, com destaque para 24/abr, que exibiu o melhor contraste entre essas áreas, com o centro urbano dotado de diferenças de temperatura mais elevadas em relação ao entorno próximo e ao rural. A zona urbana é caracterizada por maior densidade construtiva e superfícies como

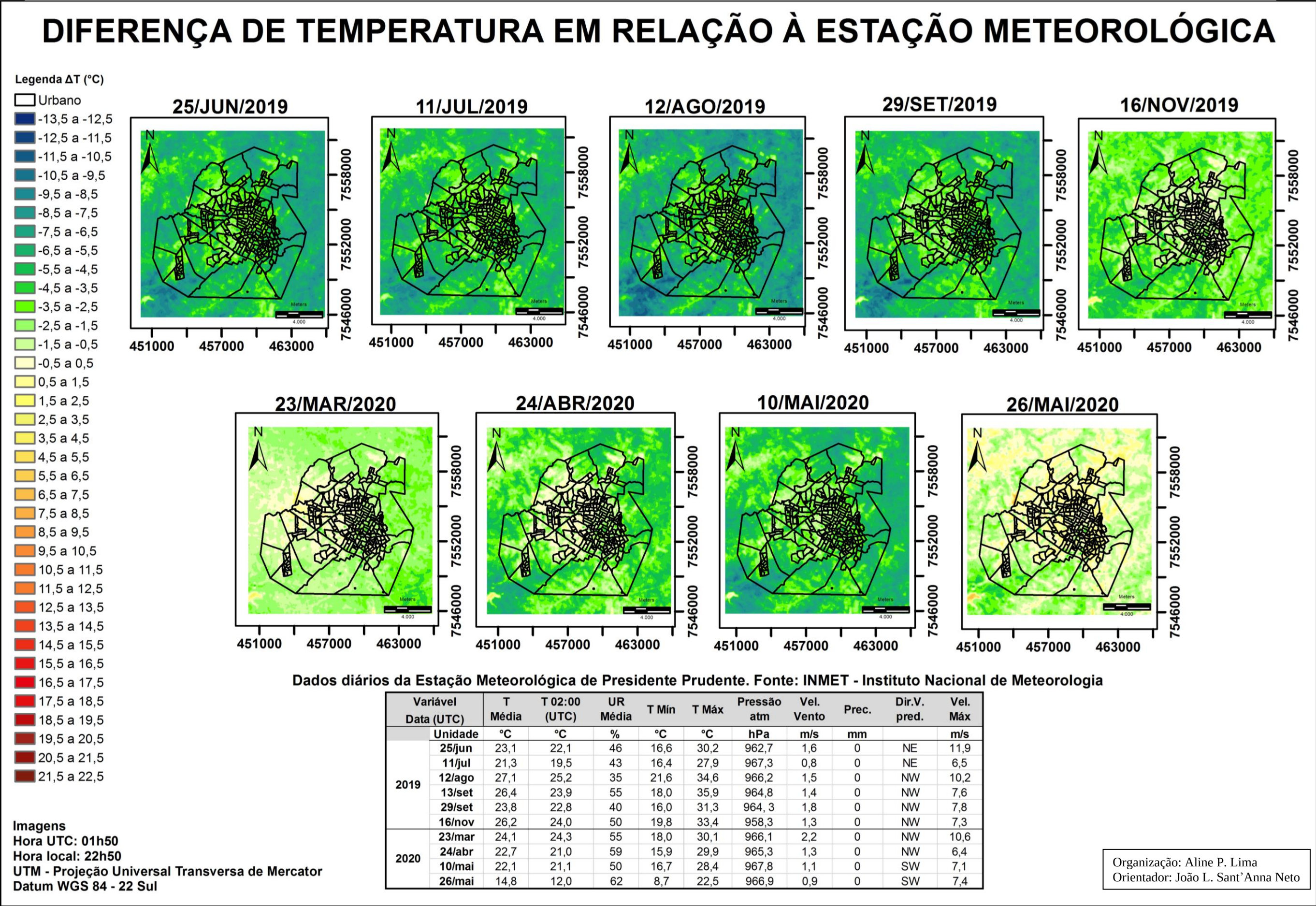
¹⁵ T2:00 é o dado horário, ou seja, temperatura registrada às 2:00a.m. (momento de tomada da imagem de satélite) pela Estação Meteorológica, correspondendo no horário local (GMT-3) às 11:00p.m..

asfalto, concreto e diversos tipos de coberturas. Durante a noite, vias com elevada quantidade de coberturas impermeáveis permanecem quentes, enquanto as permeáveis resfriam rapidamente (COUTTS *et al.*, 2016). De acordo com Parlow *et al.* (2014), altas temperaturas de superfícies urbanas impermeáveis configuram um cenário que perdura toda a noite, e significa que a radiação líquida negativa deve ser equilibrada pelos fluxos de calor.

Cabe destacar que a maior quantidade de datas noturnas com melhor definição dos limites urbano-rural converge com resultados de outros estudos, como o de Mathew *et al.* (2018), que aponta o período noturno como mais adequado para o estudo das ilhas de calor urbano. A pesquisa realizada por Peng *et al.* (2018) em várias cidades na China, também verificou maior proporção de cidades com maior temperatura de superfícies urbanas em relação às rurais durante a noite do que durante o dia. Outro exemplo foi constatado por Wang *et al.* (2018) em Greater Yangon, a maior aglomeração urbana de Myanmar, no qual observou-se que o centro da cidade estava consistentemente mais quente do que as áreas circundantes (rurais agrícolas) para a temperatura de superfície noturna quando comparado à diurna.

Nesse sentido, as exceções ocorreram em 23/mar e 26/mai, quando não se observou padrão de resposta térmica claramente distinto entre o centro da cidade e o entorno e rural. Trata-se de um comportamento noturno também verificado por Dodd (1979) para a cidade de Los Angeles, EUA. Conforme Berger *et al.* (2017), diferenças térmicas sazonais são esperadas pois uma interação de fatores causa impacto nas temperaturas de superfície além da cobertura da terra, dentre eles aspectos fenológicos da vegetação, a estação de aquisição das imagens de satélite e condições meteorológicas.

Figura 26: Cartas de diferença de temperatura para as datas noturnas de 25/jun/2019 a 26/mai/2020.



Dados específicos acerca das temperaturas de superfície para as noites estudadas, das diferenças, amplitude e precipitação recente estão no Quadro 9.

Quadro 9: Variáveis térmicas e ocorrência de precipitação para as datas noturnas.

Variável/ Data	2019					2020			
	25/jun	11/jul	12/ago	29/set	16/nov	23/mar	24/abr	10/mai	26/mai
TS Mín	11,6	8,5	13,7	9,6	14,0	16,4	12,4	10,8	2,6
TS Máx	21,9	20,0	24,4	27,7	27,3	27,8	24,8	23,1	20,8
ΔT Mín	-10,5	- 11,0	-11,5	-13,2	-10,0	-7,9	-8,6	-10,3	-9,4
ΔT Máx	-0,2	0,5	-0,8	4,9	3,3	3,5	3,8	2,0	8,7
Amplitude	10,3	11,5	10,7	18,1	13,4	11,4	12,4	12,3	18,1
P 3 dias antes	0,0	0,0	0,0	0,0	8,4	0,8	0,0	0,0	15,2

Fonte: Elaborado pela autora.

O maior valor de TS observado, conforme o Quadro 9, foi de 27,8°C em 23/mar, noite cuja carta (Figura 26) exibiu predomínio de valores de ΔT negativos. Todavia, as datas de setembro e novembro também apresentaram temperaturas de superfície elevadas (próximas de 28°C). Já a maior diferença de temperatura constatada, foi de 8,7°C, que ocorreu em 26/mai.

Com relação às mínimas, foi atingido o valor de 2,6°C (em 26/mai) e -13,2 °C (em 29/set), respectivamente para TS e ΔT . Enquanto a menor amplitude registrada (em 25/jun) foi de 10,3°C, a maior, quase dobrou este valor, atingindo 18,1°C em 29/set e 26/mai. Assim, nestas noites as superfícies apresentaram grandes variações tanto em termos de TS quanto de ΔT .

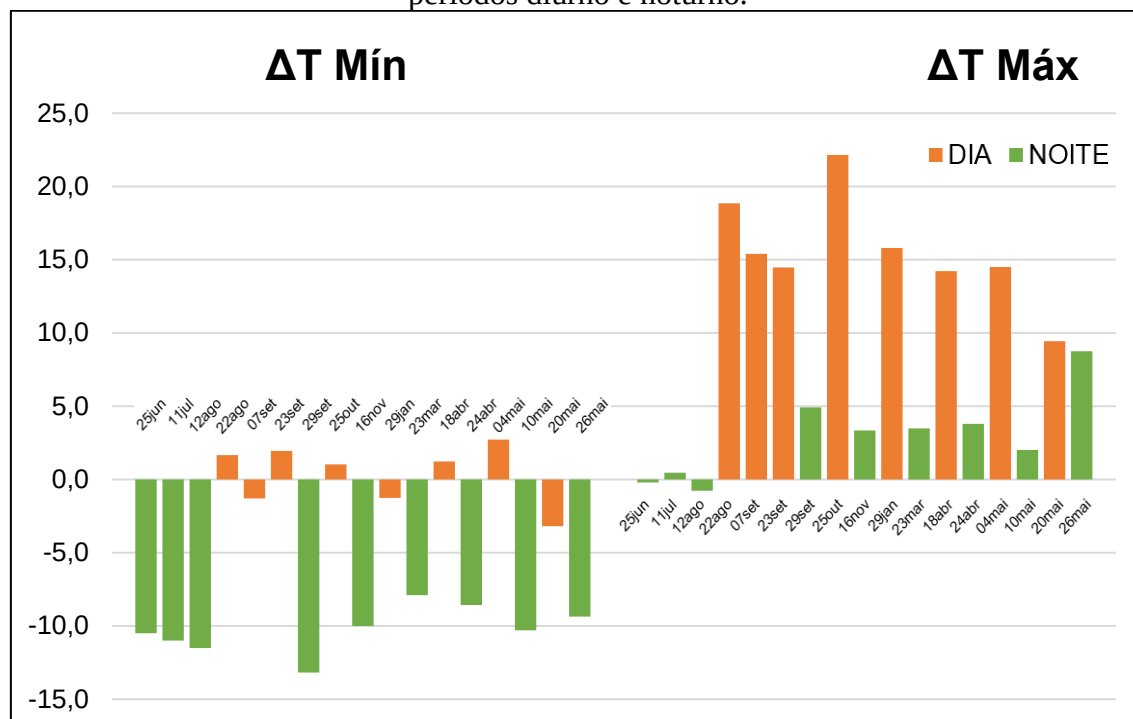
Os dados da estação meteorológica apontam que houve chuva nos três dias antecederam a tomada das imagens, com volumes de 8,4, 0,8 e 15,2mm nas datas de 16/nov, 23/mar e 26/mai, respectivamente.

5.3. COMPARAÇÃO DIURNO-NOTURNO

A partir da análise das dezessete cartas com as respostas térmicas dos alvos, foi possível observar a distribuição temporal e espacial das diferenças entre as temperaturas de superfície e do ar na zona urbana de Presidente Prudente e em seu entorno rural próximo, bem como analisar o campo térmico de ambos os períodos (diurno e noturno). Nesta comparação constatou-se que os pixels com ΔT predominantemente positivos ocorreram no período diurno e, os negativos no noturno (Figuras 25 e 26 respectivamente), o que mostra o potencial tanto de aquecimento quanto de resfriamento

da cidade. Isto porque, a maioria dos pixels apresentou valores médios e inferiores dentro da escala para a noite, e valores médios e superiores para o período diurno. Nesse sentido, o gráfico da Figura 27 ilustra as intensidades de $\Delta T_{\text{Mín}}$ e $\Delta T_{\text{Máx}}$, e estes resultados apontam valores absolutos noturnos de $\Delta T_{\text{Mín}}$ superiores aos diurnos. Já para $\Delta T_{\text{Máx}}$, essa relação se inverte, e as intensidades diurnas são maiores que as noturnas.

Figura 27: Comparação entre diferenças de temperatura mínima e máxima para os períodos diurno e noturno.



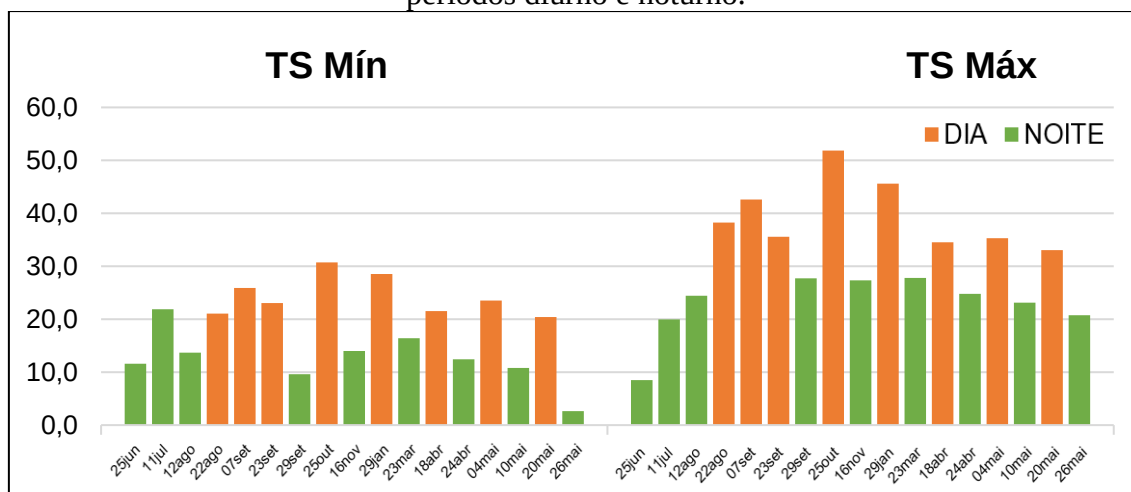
Fonte: Elaborado pela autora.

A variação encontrada para os valores extremos de ΔT corroborou com os resultados de TS (Gráfico - Figura 28), sendo os diurnos maiores que os noturnos: $\Delta T_{\text{Mín}}$ para o período diurno entre $-3,2^{\circ}\text{C}$ e $2,7^{\circ}\text{C}$, e para o noturno entre $-13,2^{\circ}\text{C}$ e $-7,9^{\circ}\text{C}$, enquanto que $\Delta T_{\text{Máx}}$ diurno entre $9,4^{\circ}\text{C}$ e $22,2^{\circ}\text{C}$, e noturno entre $-0,8^{\circ}\text{C}$ e $8,7^{\circ}\text{C}$.

Os valores de $T_{\text{S}}_{\text{Mín}}$ e $T_{\text{S}}_{\text{Máx}}$ para o período diurno foram em sua maioria superiores aos do período noturno, como mostrado pelo gráfico da Figura 28. Enquanto a $T_{\text{S}}_{\text{Mín}}$ esteve entre $20,4^{\circ}\text{C}$ e $30,7^{\circ}\text{C}$ durante o dia, os valores noturnos variaram entre $2,6^{\circ}\text{C}$ e $21,9^{\circ}\text{C}$. Já a $T_{\text{S}}_{\text{Máx}}$ ficou no intervalo de $33,0^{\circ}\text{C}$ a $51,9^{\circ}\text{C}$ nas imagens diurnas, e a noite entre $8,5^{\circ}\text{C}$ e $27,8^{\circ}\text{C}$. Além disso, as maiores temperaturas de superfície diurnas, máxima e mínima, concentraram-se nos meses quentes (primavera e verão). Já para as

noturnas não se observou padrão bem definido nessa perspectiva, apenas a TSMáx levemente superiores nas estações quentes.

Figura 28: Comparação entre temperatura de superfície mínima e máxima para os períodos diurno e noturno.



Fonte: Elaborado pela autora.

Há uma mistura quase infinita de propriedades radiativas e térmicas em uma área urbana, e consequentemente, os padrões espaciais de temperatura de superfície nas cidades são extremamente variados, especialmente durante o dia (OKE *et al.*, 2017).

No horário do crepúsculo, devido ao fim da incidência de radiação solar direta, Nichol (2005) afirma que os gradientes de temperatura de imagens noturnas devem ser menos acentuados do que nas imagens diurnas.

Atkinson (2003) verificou variações dos efeitos térmicos para UHI inferiores durante a noite quando comparadas ao dia. De fato, a amplitude (por data) para a área de estudo durante a noite (entre 9,9°C e 18,1°C) é menor que a diurna (entre 12,8°C e 21,1°C), de modo que há variações maiores das temperaturas de superfície e também em relação à estação meteorológica durante o período diurno.

Nichol (2005) observou resultados semelhantes em sua pesquisa, na qual a variação de temperatura de superfície durante a noite foi de 6°C, enquanto a diurna atingiu 15°C. Segundo Parlow *et al.* (2014), a faixa de variação menor no período noturno é considerada esperada, e de acordo com Landsberg e Maisel (1972) *apud* Dodd (1979) a radiação líquida é menor de dia e maior a noite nas cidades.

Áreas que configuram corpos d'água como os rios e o Balneário da Amizade, estavam mais frias que as demais superfícies no período diurno, e mais quentes a noite. Essa variação da resposta térmica da água também foi observada na região metropolitana

de São Paulo (Brasil) por Ferreira (2019), em Basel (Suíça) por Parlow *et al.* (2014) e em Yangon (Myanmar) por Wang *et al.* (2018).

Nesse sentido, Jensen (2009) explica que ao contrário das superfícies da terra firme, os corpos d'água transferem energia primeiramente por convecção e dessa forma, qualquer energia introduzida no sistema pode ser transferida centenas de metros no seu interior durante o dia e à noite. Portanto, corpos d'água geralmente têm alta inércia termal, o que implica que pode existir pouca diferença entre a temperatura de superfície da água diurna e noturna. Isto resulta em corpos d'água relativamente mais frios do que a terra de dia e relativamente mais quentes do que as terras vizinhas antes do amanhecer.

A análise espacial para o período diurno revelou semelhanças nas respostas termais entre alvos urbanos e rurais, na maior parte dos episódios, não sendo possível sua nítida distinção para todas as datas.

Já a configuração de ΔT durante a noite ofereceu melhores condições para o estudo das diferenças entre rural e urbano, pois ocorreram neste período, mais episódios com contrastes térmicos significativos entre esses ambientes. Tal fato também foi constatado nos estudos de temperatura de superfície de Mathew *et al.* (2018), Peng *et al.* (2018) e Parlow *et al.* (2014).

Os resultados de Mathew *et al.* (2018) demonstram que apesar das maiores temperaturas serem observadas durante o período diurno, o fenômeno da ilha de calor superficial foi claro, predominante e mais forte (em intensidade) durante a noite; enquanto que as imagens diurnas mostraram efeito SUHI de baixa intensidade ou até negativo durante o dia. Peng *et al.* (2018) afirmaram que o efeito da UHI variou entre estações e entre o período diurno e noturno, entretanto, dentre as várias cidades estudadas, a área (extensão) total delas que vivenciou o efeito de UHI foi máxima durante a noite.

Tais resultados demonstram os diferentes desempenhos térmicos das coberturas de superfície diante do comportamento, também variável, dos distintos elementos climáticos ao longo do dia e da noite. Sob essa perspectiva, o padrão espacial de SUHI diurnas é determinado pela variação da radiação solar durante o dia, e pela rugosidade e resistência das superfícies à evaporação, conforme Peng *et al.* (2018) e Atkinson (2003) respectivamente. Por outro lado, à noite, de acordo com Parlow *et al.* (2014), as cenas destacam as coberturas impermeáveis como *hotspots* das SUHI noturnas. Nesse sentido, as anomalias térmicas noturnas observados por Dodd (1979) sugerem a influência de outro fator além da elevada inércia termal, que seriam os resíduos de anomalias diurnas geradas pelo maior armazenamento de calor decorrente da redução na evaporação.

Mathew *et al.* (2018) também destacaram a importância da inércia térmica de diferentes materiais da superfície terrestre para variações temporais/diurnas de temperatura, evidenciada a partir de seu estudo da temperatura *in situ* de diferentes materiais durante o período de 24h, no qual observou-se que o solo fica mais quente do que os materiais urbanos como cimento e concreto durante o dia, e os materiais urbanos apresentam temperaturas mais elevadas em relação ao solo e vegetação durante a noite.

É importante salientar que as respostas térmicas das superfícies dependem do horário de tomada da imagem, de tal forma que possivelmente imagens tomadas no período noturno, em horário pouco anterior às do Landsat 8 - com menor distanciamento em relação ao pôr do sol, por exemplo às 21h-, devem apresentar contrastes maiores e ainda mais adequados para as investigações do clima urbano, pois os materiais urbanos neste momento teriam perdido menor quantidade de calor. Tal reflexão associada às discussões anteriores evidenciam a importância da cuidadosa escolha e interpretação de dados relacionados ao estudo de temperaturas de superfícies e suas causas (BERGER *et al.*, 2017).

6. FATORES EXPLICATIVOS DO CLIMA FÍSICO: ÁGUA, VEGETAÇÃO E ÁREA CONSTRUÍDA

A partir das séries diurna e noturna de cartas de ΔT e tendo como critério a intensidade geral da variação de ΔT , foram escolhidos quatro episódios de interesse -dois diurnos e dois noturnos-, com objetivo de averiguar o potencial tanto de resfriamento quanto de aquecimento das superfícies em ambos os períodos analisados.

As datas selecionadas foram: 25/out (dia) e 26/mai (noite), nos quais as coberturas estavam mais quentes, e 20/mai (dia) e 12/ago (noite), nos quais as coberturas mostraram-se mais frias em relação à estação meteorológica. Para tais episódios foi realizada, então, a investigação mais detalhada que consistiu: (1) no estudo quantitativo da distribuição das diferenças de temperatura; (2) na caracterização da superfície por meio dos índices do sensoriamento remoto NDVI, NDWI, NDBI e BUI, e (3) na identificação e análise das relações (positiva/negativa e forte/fraca) entre estes índices e a variável térmica em questão.

6.1. DISTRIBUIÇÃO DAS DIFERENÇAS DE TEMPERATURA

Gráficos foram elaborados a partir de cada carta de ΔT dos episódios diurnos e noturnos (Figura 29), com o intuito de obter informações sobre a distribuição quantitativa da variável na área de estudo.

Os gráficos mostram que as imagens diurnas apresentaram predomínio de valores positivos e as noturnas, negativos. Entretanto, o comportamento diferiu entre os episódios, de maneira que cada data revelou resultados de ΔT abrangendo regiões distintas dentro da escala.

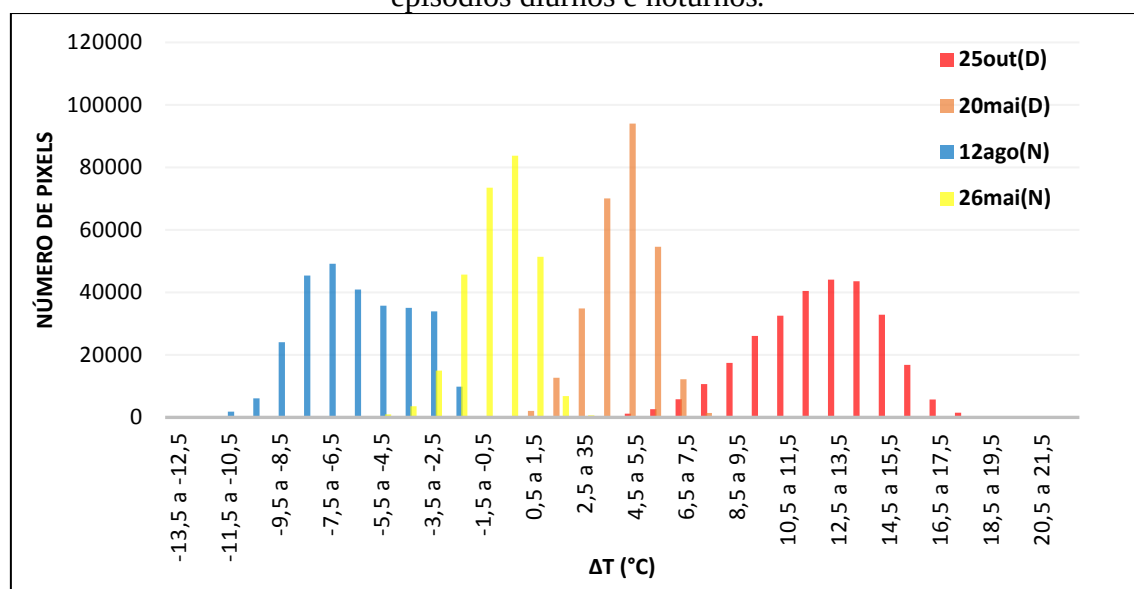
Assim, verificou-se que cada episódio, ainda que pertencente ao mesmo período (diurno/noturno) e horário de tomada da imagem, apresentou um perfil típico para a variável estudada. Tal constatação denota a influência da inércia térmica, pois diante da mesma superfície (em termos de tipos e arranjos de materiais e coberturas), as respostas térmicas dos alvos foram distintas, provavelmente em decorrência da presença/ausência e intensidade de outros elementos como radiação e umidade.

De acordo com Ayoade (1996), a quantidade de radiação solar incidente sobre o topo da atmosfera da Terra depende, para a mesma localidade (mesma latitude), de dois fatores, sendo o principal, o período do ano e depois o período do dia.

Mathew *et al.* (2018) também enfatizaram que a radiação solar desempenha um papel determinante na modificação da ilha de calor sobre uma cidade, destacando a importância da época de observação.

No que se refere à quantidade de água, os estudos de Quattrochi e Ridd (1998), por exemplo, mostraram comportamentos específicos que classes distintas de vegetação podem apresentar, e apontaram que o aumento da umidade é o fator principal na diminuição da resposta termal diurna de vegetação gramínea. Além disso, após o pôr do sol, a energia de onda longa é lançada muito rapidamente para o céu noturno conforme o gramado seco e as pastagens atingem a temperatura do ar ambiente, e continuam a resfriar ao longo de toda a noite (QUATTROCHI e RIDD, 1998).

Figura 29: Distribuição dos pixels nas faixas de diferenças de temperatura para os episódios diurnos e noturnos.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para facilitar a interpretação, optou-se por estabelecer uma classificação das intensidades de ΔT , utilizando o desvio padrão como critério para determinação dos intervalos das classes. Assim, seis classes foram criadas e os pixels nelas enquadrados foram contabilizados, conforme mostra o Quadro 10.

Quadro 10: Classes de ΔT e distribuição dos pixels.

Escala de ΔT	Classe	20mai (D)	25out (D)	12ago (N)	26mai (N)
<-7,5	Negativo Forte	0,00 %	0,00 %	27,40 %	0,01 %
-7,5 -2,5	Negativo Moderado	0,00 %	0,00 %	68,96 %	6,95 %
-2,5 2,5	Neutro	5,38 %	0,11 %	3,64 %	92,46 %
2,5 7,5	Positivo Moderado	94,09 %	3,58 %	0,00 %	0,53 %
7,5 12,5	Positivo Forte	0,54 %	45,03 %	0,00 %	0,05 %
>12,5	Positivo Muito Forte	0,00 %	51,28 %	0,00 %	0,00 %

Fonte: Elaborado pela autora.

De modo geral e considerando todas as datas, o episódio de outubro (diurno) foi o mais aquecido, e o de agosto (noturno) foi o mais frio em relação à estação meteorológica, sendo classificados respectivamente como Positivo Forte a Muito Forte e Negativo Moderado a Forte. Os episódios de maio (20/mai - Positivo Moderado e 26/mai - Neutro) exibiram temperaturas de superfície mais próximas da estação, e consequentemente foram enquadrados nas categorias intermediárias de ΔT .

Cumprir destacar ainda que, como mostra a Figura 29, o comportamento observado em cada episódio relacionado à concentração dos pixels por classes foi variável. Em 20/mai (episódio diurno) e 26/mai (episódio noturno) a distribuição dos pixels concentrou-se em poucas classes, de tal forma que mais de 90% dos pixels ficaram entre -2,5 e 2,5°C nesta, e entre 2,5 e 7,5°C naquela data - demonstrando a menor variação térmica das superfícies em setembro.

Já para os episódios de outubro (diurno) e agosto (noturno) constatou-se diluição dos dados, ou seja, a distribuição dos pixels nessas datas alcançou muitas classes. Tal constatação pode estar relacionada à presença de umidade, pois segundo Amorim (2018), durante os períodos secos, as diferenças intraurbanas aumentam devido aos diferentes materiais de cobertura.

Nesse sentido, no episódio de 12 de agosto de 2019, quase toda a área (97%) teve diferenças de temperatura que variavam de -1,5 até -9,5°C, ou seja, os alvos estavam mais frios que a estação, observando-se ainda, quantidade de pixels semelhante para várias classes de ΔT . No episódio diurno de 25 de outubro de 2019, todos os pixels apresentaram ΔT superiores a zero - mais quentes que a estação-, e a grande maioria deles (quase 94%) permaneceu dentro da variação de 7,5 até 16,5°C.

Variações temporais no aquecimento/resfriamento da cidade revelaram diferenças sazonais em virtude dos diferentes tipos de uso/cobertura da terra, como descrito nos

resultados acima. Por isso, prosseguiu-se com a investigação da superfície pelo uso de índices radiométricos.

É válido relatar que Peng *et al.* (2018), Wang *et al.* (2018) e Lemus-Canovas *et al.* (2020) também contataram variações nesse sentido em seus estudos. Peng *et al.* (2018, observou em diversas cidades chinesas que o efeito UHI variou entre as estações e entre o dia e a noite, sendo que proporção maior de cidades apresentou maior LST_u (urbano) do que LST_r (rural) durante a noite (98,9% no verão e 94,4% no inverno) do que durante o dia (88,8% e 56,8% no verão e inverno, respectivamente). Wang *et al.* (2018) verificou que num aglomerado urbano de Myanmar, as áreas agrícolas estavam mais quentes do que o centro da cidade durante o dia em abril, enquanto as áreas centrais da cidade foram mais quentes do que as áreas rurais circundantes em dezembro; todavia para o LST noturno, o centro da cidade estava mais aquecido do que as áreas circundantes, com padrões mais perceptíveis em dezembro do que em abril. Lemus-Canovas *et al.* (2020), por sua vez, relataram que na área metropolitana de Barcelona (Espanha), o aquecimento das áreas urbanas e industriais - medido em termos de LST -, em contraste com as áreas verdes urbanas e florestais foi mínimo no inverno e se acentuou na primavera e no verão: as diferenças médias entre as duas coberturas (industrial e florestal) caíram para 3,7°C no inverno, enquanto no verão essa diferença média atingiu 9,1°C. Observaram ainda amplitude térmica espacial variável conforme a estação do ano: primavera (2,9°C) e verão (3,4°C) maiores do que no inverno (1,7°C) e outono (2,3°C).

6.2. A SUPERFÍCIE A PARTIR DOS ÍNDICES (NDVI, NDWI, NDBI E BUI)

Os índices provenientes das imagens de satélite permitiram verificar características da superfície da área de estudo e obter informações acerca de fatores que influenciam o clima urbano. Nesse sentido, os resultados de Chen *et al.* (2020) revelaram que as associações entre diferentes composições e arranjos da superfície - em seu estudo verificada através de LCZs e as temperaturas de superfície foram significativas entre os períodos diurno e noturno. Assim, as cartas de NDVI, NDWI, NDBI e BUI auxiliaram na análise da variabilidade espacial das temperaturas dos alvos, pois possibilitaram a identificação da densidade desses fatores (vegetação, umidade, área construída e permeável) e sua distribuição espacial na zona urbana e rural próxima de Presidente Prudente.

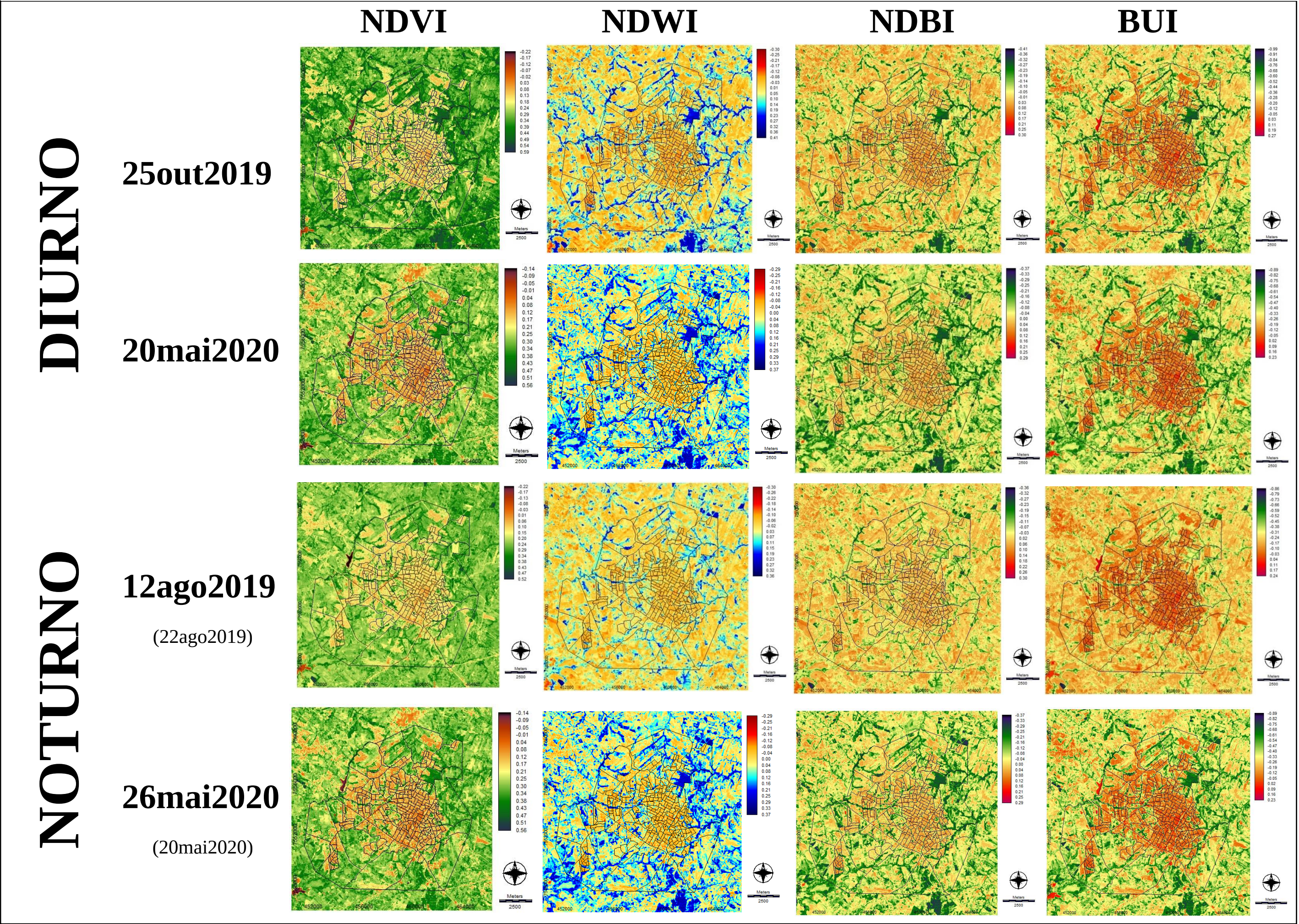
Tendo em vista que o Landsat 8 é um satélite cujo funcionamento é baseado no sensoriamento remoto passivo, ou seja, seus sensores não emitem luz própria e dependem

da luz do sol para geração de dados, os índices (NDVI, NDWI, NDBI e BUI) para os episódios noturnos foram gerados por meio de imagens de satélite diurnas mais próximas das datas de tomada das imagens termais.

Para os índices NDBI e BUI possivelmente não ocorreu alteração significativa entre os episódios - principalmente aumento/diminuição de construções e edificações - pois o lapso temporal é curto na série de análise deste estudo. Entretanto, a fim de buscar maior representatividade dos dados, optou-se por utilizar uma imagem de satélite diurna para cada data conforme dois critérios: proximidade temporal e mínima ou ausência de ocorrência de chuva entre as datas. Desta forma, para os episódios noturnos de 12 de agosto e de 26 de maio, as imagens (diurnas) utilizadas para confecção dos índices foram respectivamente das seguintes datas: 22 de agosto (2019) e 20 de maio (2020).

Desta forma, cartas de NDVI, NDWI, NDBI e BUI foram elaboradas para todas as datas que representaram episódios de interesse (25/out, 20/mai, 12/ago e 26/mai) e estão organizadas na Figura 30.

Figura 30: Cartas de NDVI, NDWI, NDBI e BUI dos episódios diurnos e noturnos. Fonte: Elaborado pela autora.



→ 25out

Para 25 de outubro de 2019, período quente (primavera), episódio diurno no qual observou-se maior aquecimento da superfície da cidade em relação à estação meteorológica, o NDVI variou entre -0,22 e 0,59. Foram constatados valores de aproximadamente 0,15 ou inferiores para área urbana, dotada de edificações e coberturas impermeabilizadas; e predomínio de valores maiores a 0,24 para áreas de entorno rural, caracterizada por lavouras (com predomínio de horticultura), pastagens e fragmentos florestais.

Em termos de NDWI, a escala ficou entre -0,30 e 0,41 e evidenciou as faixas de mata ciliar, fragmentos florestais e a zona mais central do perímetro urbano. Isto porque, enquanto àquelas áreas cobertas por vegetação arbórea densa – com maior quantidade de água - mostraram NDWI superiores a 0,15, os bairros densamente construídos principalmente mais ao centro, além de áreas de uso industrial, apresentaram valores negativos.

Áreas periurbanas, o entorno rural próximo (vegetação rasteira) e algumas zonas residenciais de menor densidade construtiva, mostraram índice de umidade intermediário possivelmente devido à precipitação reduzida própria desta época. Por tratar-se do episódio mais quente e corresponder ao período diurno, destaca-se que as áreas densamente construídas (e mais quentes) coincidiram com aquelas dotadas de menor quantidade de água.

Resultados análogos foram obtidos por Dodd (1979), nos quais para Los Angeles e Saint Louis (EUA) as áreas de máximos de temperatura diurna corresponderam quase aos mínimos em disponibilidade de umidade, sugerindo que tal fator seria o parâmetro governante durante o dia.

As cartas de NDBI e BUI por sua vez, apresentaram pixels com valores entre -0,41 e 0,30, e, -0,99 e 0,27, respectivamente. As áreas construídas e áreas com vegetação rasteira apresentaram respostas próximas, com pixels com NDBI positivo. Nesse sentido, geralmente, as zonas tipicamente urbanas tendem a ter maiores temperaturas do que as zonas com mais superfícies naturais, porque sua composição incluindo vegetação e solo úmido possibilita diminuição do processo de aquecimento durante o dia. Áreas com solo exposto também tem altas temperaturas de superfície durante o período diurno, devido suas propriedades termiais, podendo aquecer muito rapidamente de dia (CHEN *et al.*, 2020).

→ 20mai

No episódio diurno de 20 de maio de 2020, na estação do outono, foi verificado o menor aquecimento das superfícies comparado aos outros episódios diurnos estudados. O índice de vegetação, permaneceu dentro do intervalo de -0,14 até 0,56, com as áreas construídas apresentando valores em geral inferiores a 0,12 e a vegetação, valores superiores a 0,25. Sobre o NDWI, que variou de -0,29 a 0,37, as áreas densamente vegetadas mais uma vez, em função de suas características fisiológicas e da permeabilidade, mostraram maior teor de umidade ($NDWI > 0,20$), seguidas das pastagens e lavouras (NDWI com valores intermediários), enquanto as demais zonas urbanas tiveram NDWI negativos. Nesta data, as áreas de pastagens e lavouras apresentaram melhores condições de umidade do que os demais episódios analisados.

Neste contexto, cumpre salientar que as respostas termais de superfícies de pastagens provêm de diversos fatores relacionados com as características da vegetação: a umidade do solo, a arquitetura vegetal e a associação dos atributos biofísicos dos tipos específicos de vegetação, a quantidade de água da planta e a disponibilidade de água para evapotranspiração, sendo esta a mais importante em afetar a irradiância térmica de onda longa de ressurgência (QUATTROCHI e RIDD, 1998).

O NDBI para a data de maio teve escala com limite inferior de -0,37, atingindo 0,29; e o BUI de -0,89 até 0,23. Neste episódio diurno, as superfícies com vegetação rasteira mostraram melhor distinção em relação aos alvos construídos, possivelmente devido a maior quantidade de água presente no meio.

→ 12ago

O episódio noturno de 12 de agosto de 2019, época fria e seca (inverno), foi a que apresentou superfícies com maior resfriamento em relação à temperatura na estação meteorológica. A imagem de satélite diurna - necessária para a elaboração das cartas com os índices - mais próxima a esta data e sem cobertura de nuvens foi de 22 de agosto do mesmo ano, e não foi registrada precipitação entre essas datas.

O NDVI teve variação de -0,14 a 0,52, e os pixels com predomínio de vegetação apontaram valores superiores a 0,20. Em relação ao índice de umidade, foram observadas poucas áreas com valores positivos, que se restringiram sobretudo, às matas ciliares e fragmentos florestais. A escala de NDWI teve amplitude entre -0,30 e 0,36. Enquanto o NDBI exibiu escala com valores entre -0,36 e 0,30, o BUI por sua vez, variou entre -0,86 e 0,24. Não obstante, a carta de NDBI, permitiu identificar matas ciliares e fragmentos

florestais ($NDBI < 0$). Tendo em vista que a área urbana se mostrou mais aquecida em relação à rural nesta data, durante a noite, algumas áreas urbanas com alta carga térmica tendem a ter temperaturas de superfície mais elevadas do que de dia (CHEN *et al.*, 2020), evidenciando a influência de fatores intraurbanos.

→ 26mai

Por fim, na data de 26 de maio, também no outono, foi identificado o menor resfriamento das superfícies dentro da série temporal noturna analisada. Mais próximo desta data, foi escolhida a imagem de satélite diurna de 20 de maio, desprovida de nuvens. Entre as datas foi registrada ocorrência de chuva de 42,8mm no dia 22 e 15,2mm no dia 23 de maio.

Tendo em vista que a data mais próxima diurna coincidiu com um episódio também de interesse, os índices gerados para 26/mai mantiveram os valores de 20/mai, quais sejam: NDVI de -0,14 a 0,56, NDWI de -0,29 a 0,37, NDBI de -0,37 a 0,29 e BUI de -0,89 a 0,23.

Considerando os quatro episódios, observou-se uma amplitude maior do BUI em todos os casos. Tal contraste, que permite distinguir alvos urbanos e impermeáveis das superfícies permeáveis, ficou mais evidente nas cartas de BUI para todas as datas diurnas e noturnas porque, dada a amplitude de sua escala (mais abrangente), a zona urbana densa exibiu valores superiores, enquanto a vegetação rasteira mostrou valores intermediários e a vegetação arbórea densa, valores inferiores. Especificamente em Presidente Prudente, há predomínio de superfícies com telhados de cerâmica vermelha nas áreas construídas dos distritos com média e alta densidade urbana (AMORIM, 2018).

O índice de vegetação NDVI mostrou boa definição do limite urbano-rural, com melhor definição observada em outubro. Áreas urbanas geralmente exibem valores de NDVI menores do que áreas não-urbanas, com diminuição da média de NDVI conforme aumenta a quantidade de área impermeável (ZHANG *et al.*, 2009). Além disso, excluindo-se as propriedades biofísicas da planta e do solo, a presença ou ausência de água traz uma contribuição muito dinâmica para as variações nas respostas térmicas entre o dia e a noite (QUATTROCHI e RIDD, 1998).

Com relação às cartas de NDWI e NDBI, estes exibiram contrastes significativos apenas para matas ciliares (vegetação arbórea densa) na data de agosto, de tal forma que demais superfícies construídas e o entorno constituído de lavouras e pastagens tiveram respostas muito semelhantes. Foi possível observar melhor esta definição dos alvos em outubro e maio.

O reservatório artificial conhecido como Balneário da Amizade, situado na porção oeste da área de estudo, que constitui o seu maior espelho d'água, apresentou comportamento esperado em termos de NDVI para este tipo de alvo, ou seja, valores negativos em todas as datas. Seus índices de umidade e de NDBI mostraram valores compatíveis com a presença (acúmulo) de água e superfícies não-construídas respectivamente; todavia apesar do NDWI positivo, notam-se valores inferiores aos observados para vegetação densa. Já o comportamento constatado na carta de BUI foi típico de superfícies impermeáveis (>0). A elevada concentração de sedimentos pode ter influenciado tais resultados.

É importante salientar que nos episódios diurnos este corpo d'água apresentou diferenças de temperatura negativas e nos noturnos, ΔT positivos. Além do efeito da alta inércia térmica da água, os corpos d'água são fonte consistente de fluxos evaporativos que provavelmente reduzem a temperatura de superfície durante o dia (WANG *et al.*, 2018).

Outras considerações acerca da cobertura da terra e das relações entre quantidade de vegetação, umidade e área construída são apresentadas, também de modo mais detalhado, nos próximos capítulos.

6.3. RELAÇÃO ENTRE DIFERENÇA DE TEMPERATURA E ÍNDICES (NDVI, NDWI, NDBI E BUI)

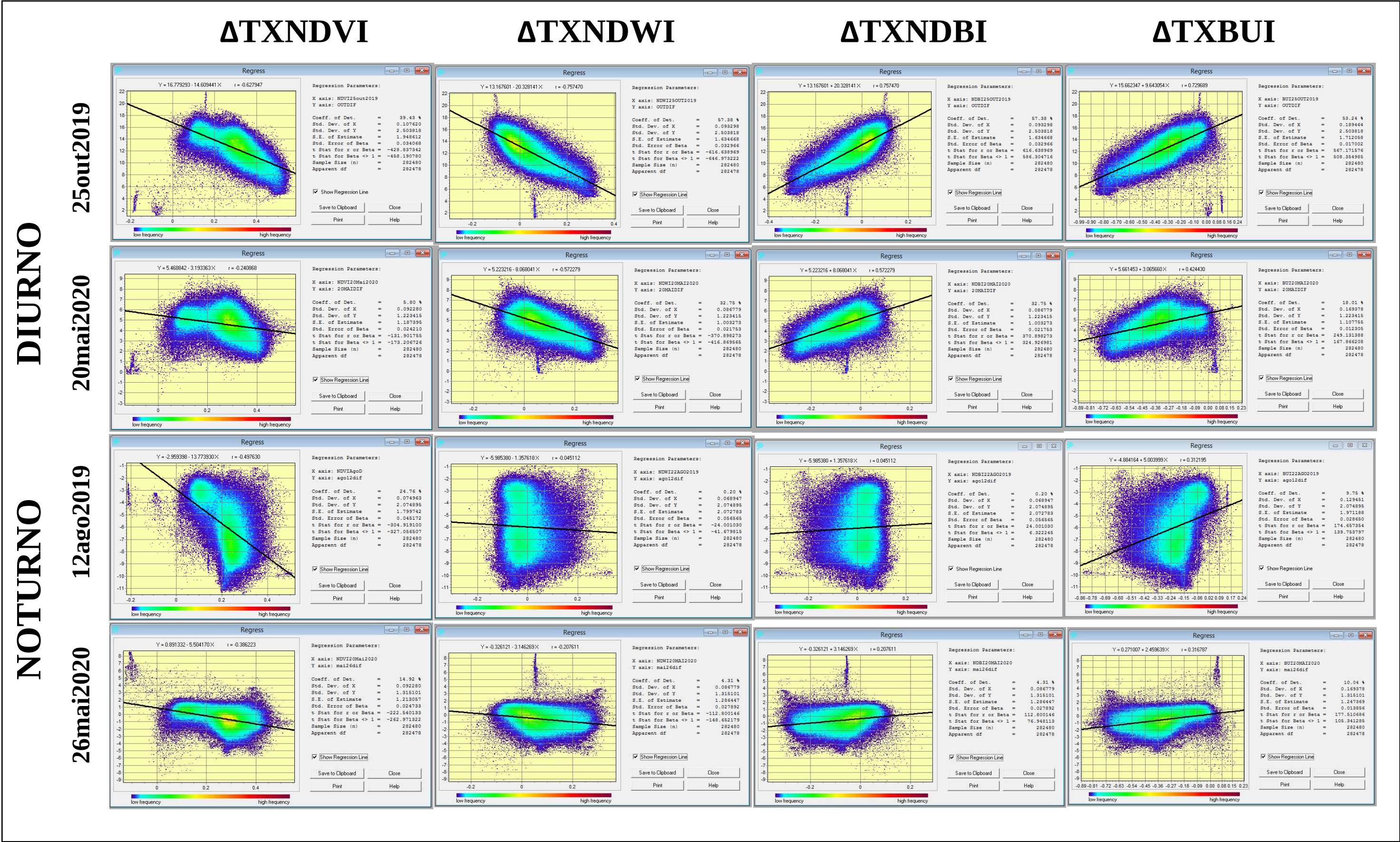
Com o objetivo de averiguar a relação entre ΔT e os índices NDVI, NDWI, NDBI e BUI, foram elaborados gráficos de dispersão e calculados seus respectivos coeficientes de correlação de Pearson para os quatro episódios. A Figura 31 exibe os gráficos de dispersão de ΔT com os quatro índices para todos os episódios. A partir desses resultados foram verificadas as naturezas (se positiva ou negativa), bem como as intensidades das relações entre a variável térmica e os tipos e condições da cobertura detectados a partir dos índices.

A análise dos gráficos permitiu identificar as relações por índice. Assim, o índice de vegetação e o índice de umidade apresentaram relação negativa com a diferença de temperatura para todos os episódios, mostrando-se variáveis com comportamento inverso ao da temperatura. Já o comportamento linear dos dados ficou melhor definido apenas no episódio diurno de 25/out e noturno de 26/mai para o NDVI, e em ambas as datas diurnas e para 26/mai (noturno) para o NDWI.

A relação inversa entre a vegetação e a temperatura foi observada por diversos autores (FERREIRA, 2019; QUATTROCHI e RIDD, 1998; WANG *et al.*, 2018; COUTTS *et al.*, 2016), sendo constatado ainda tanto relações lineares quanto não lineares (ZHANG *et al.*, 2009). Conforme apontado por Quattrochi e Ridd (1998), as respostas térmicas para a vegetação podem ser altamente variadas em função das propriedades biofísicas da própria vegetação, bem como de outros fatores. Nesse sentido, a relação entre o NDVI e a temperatura de superfície é variável, sendo fortemente influenciada pela estação do ano, especialmente porque os locais sem vegetação experimentam variação maior na temperatura de superfície do que aqueles densamente vegetados (ZHANG *et al.*, 2009).

No que se refere à influência da umidade nas respostas termais, o estudo de Dodd (1979) constatou semelhança do mapa de disponibilidade de umidade com o mapa de temperatura diurna, sendo os máximos de umidade altamente correlacionados com os mínimos de temperatura e vice-versa. Essa relação inversa é esperada, uma vez que um grande potencial de evaporação proporciona uma porção relativamente pequena da radiação líquida dividida como fluxo de calor sensível, e conseqüentemente culmina em baixas temperaturas de superfície.

Figura 31: Gráficos de dispersão dos índices versus ΔT para os episódios.



Os gráficos de NDBI e BUI apontaram relação positiva com ΔT em todos os casos, de tal forma que quanto maior a quantidade de área construída e impermeável, maior será a tendência de variações térmicas positivas. O comportamento linear desses índices com a variável térmica revelou melhor definição nos episódios diurnos.

Para os episódios noturnos a relação linear não é muitas vezes observada, possivelmente devido à heterogeneidade dos materiais que constituem a superfície urbana, uma vez que apesar da característica comum da impermeabilidade, eles possuem inércias térmicas distintas.

Assim Dodd (1979) constatou para cidades dos EUA, que alguns sítios urbanos com máximos diurnos não apresentaram anomalias noturnas significativas, e os locais de cultivo e pastagem que eram *hotspots* diurnos eram na verdade, mínimos noturnos.

Da mesma maneira, a pesquisa de Coutts *et al.* (2016) identificou que os bairros que eram *hotspots* durante o dia não eram necessariamente *hotspots* noturnos, demonstrando a importância das propriedades termodinâmicas e radiativas da superfície na LST e que áreas que aquecem rapidamente durante o dia, podem realmente esfriar relativamente rápido à noite. Tal fato também pode ser ilustrado por exemplo, pelo estudo de Mathew *et al.* (2018) em Jaipur (Índia), no qual foi realizada medição de temperatura de superfície *in-situ* durante 24 horas para vários tipos de superfícies (antropogênicas e naturais), e os resultados revelaram que o solo pode aquecer e resfriar mais rapidamente do que os materiais antropogênicos como estradas e concreto.

Tais observações demonstram que considerando todos os episódios, o desempenho dos índices, quando comparados entre eles, foi consistente. Isto porque, vegetação e água exibiram relacionamentos negativos com ΔT , e área construída e impermeável, revelaram relação positiva. Em termos de melhor definição da relação linear, os episódios diurnos se destacaram, o que sugere que a utilização dos índices para estudar a variabilidade espaço-temporal da temperatura de superfície é mais adequada para o período diurno. Relações lineares entre LST diurna e a cobertura vegetal também foram constatadas por Coutts *et al.* (2016), onde para um aumento de 10% na cobertura vegetal, houve uma redução de 1,2°C na LST.

Através dos gráficos, o comportamento não linear entre NDVI versus ΔT para o período noturno permite inferir que áreas com vegetação rasteira mostraram diferenças de temperatura menores que áreas com vegetação arbórea. Resultados similares, nos quais durante o dia a temperatura superficial de zonas com vegetação arbórea densa foi inferior

às das demais classes vegetadas, porém, nas imagens noturnas, as vegetações arbustivas e herbáceas apresentam temperaturas semelhantes ou ligeiramente inferiores à vegetação arbórea densa, foram constatados também por Ferreira (2019). Este comportamento térmico da vegetação explica o aspecto não linear para o período noturno, e se deve muito provavelmente à contribuição da biomassa -presente nas áreas de vegetação mais densa- para seu lento resfriamento durante a noite.

A intensidade das relações entre os índices e ΔT pode ser avaliada por meio da comparação dos coeficientes de correlação de Pearson ou Spearman. As matrizes com tais valores foram geradas e organizadas no Quadro 11. A fim de facilitar a interpretação, um esquema de cores foi aplicado nas células do quadro de acordo com os valores, semelhante ao procedimento adotado por Berger *et al.* (2017). As correlações estatísticas constituem uma análise quantitativa das características apontadas pelos índices e diferenças de temperatura; assim as correlações mais baixas foram indicadas pela cor branca e tons de vermelho e azul sugerem maiores correlações positivas e negativas, respectivamente.

Quadro 11: Relação espaço-temporal entre os índices e ΔT apontada pelos coeficientes de correlação de Pearson e Spearman (formato da data: DDMesAA).

Índx ΔT / Data	PEARSON				SPEARMAN			
	Diurno		Noturno		Diurno		Noturno	
	Pri	Out	Inv	Out	Pri	Out	Inv	Out
	25out19	20mai20	12ago19	26mai20	25out19	20mai20	12ago19	26mai20
NDVI	-0,63	-0,24	-0,50	-0,39	-0,69	-0,33	-0,48	-0,38
NDWI	-0,76	-0,57	-0,05	-0,21	-0,75	-0,57	-0,05	-0,26
NDBI	0,76	0,57	0,05	0,21	0,75	0,57	0,05	0,26
BUI	0,73	0,42	0,31	0,32	0,75	0,46	0,35	0,35

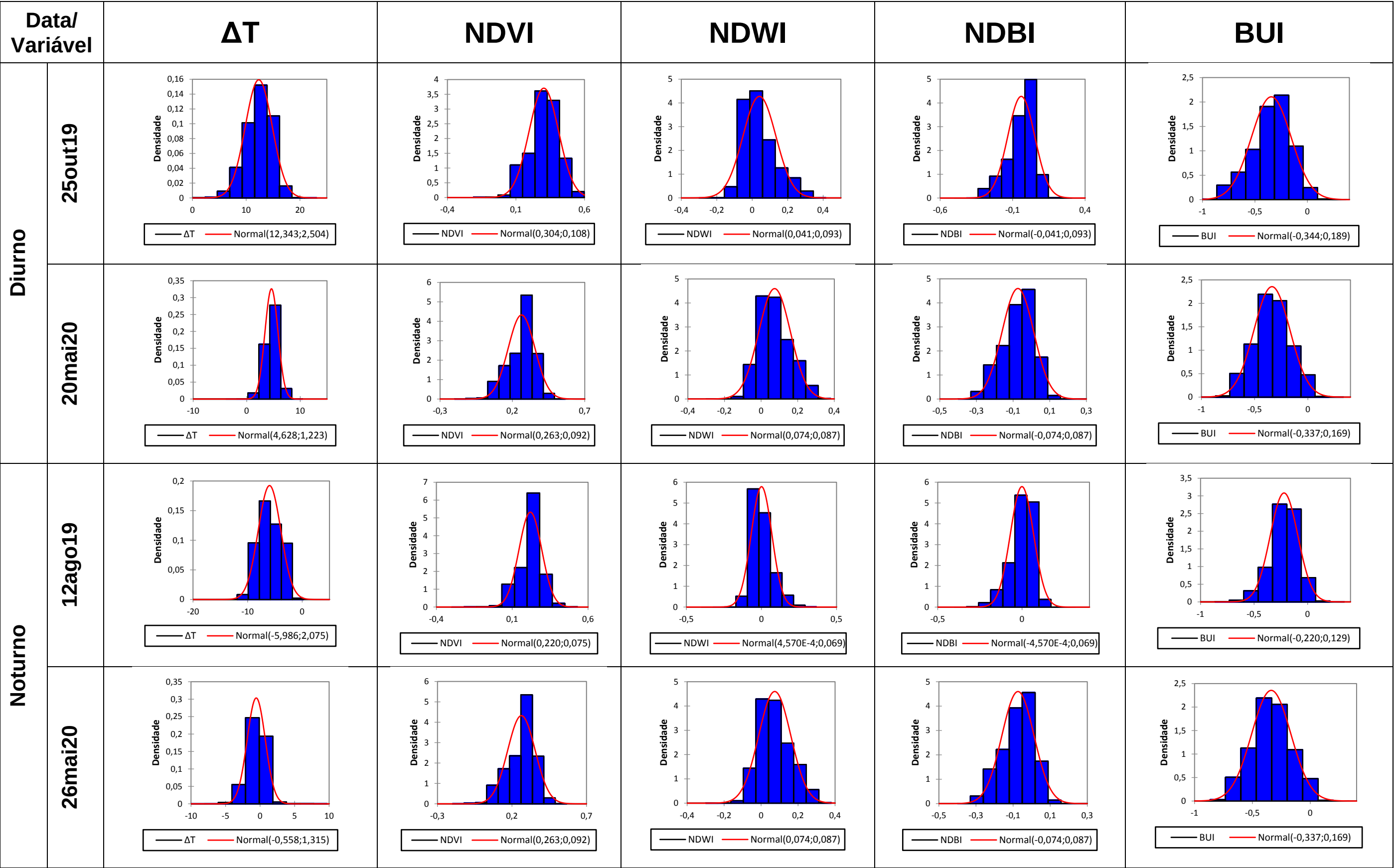
*Pri: primavera, Out: outono, Inv: inverno.

Obs.: P-valor<0,0001 para todos os coeficientes e episódios, com $\alpha=0,05$ (5%) e teste bilateral.

Fonte: Elaborado pela autora.

Embora os valores das duas matrizes de correlação sejam próximos e os coeficientes significativos (p -valores< α), é necessário verificar pressupostos acerca da normalidade e simetria dos dados para escolher o coeficiente adequado para a análise. Dessa forma, foram elaborados os histogramas de cada variável isoladamente para todas as datas, bem como o teste de normalidade Shapiro-Wilk com o p -valor. Tais resultados são apresentados na Figura 32 e no Quadro 12, respectivamente.

Figura 32: Histogramas das variáveis para todos os episódios.



Fonte: Elaborado pela autora.

Quadro 12: Teste de normalidade Shapiro-Wilk para ΔT nos episódios.

Período/Data		Shapiro-Wilk	
Diurno	25out19	W=0,987	p-valor<0,0001
	20mai20	W=0,993	p-valor<0,0001
Noturno	12ago19	W=0,978	p-valor<0,0001
	26mai20	W=0,977	p-valor<0,0001

Obs.: $\alpha=0,05$ (5%) e teste bilateral.

Fonte: Elaborado pela autora.

Os histogramas das variáveis mostraram que não há simetria na distribuição dos dados. Na interpretação do teste de Shapiro-Wilk, para a primeira variável ΔT analisada observou-se que p-valor calculado foi menor que o nível de significância $\alpha=0,05$ em todos os episódios. Para atender ao pressuposto, o comportamento normal deve ser observado para as variáveis individualmente e aos pares. Uma vez que já foi detectada não normalidade para ΔT , não houve necessidade realizar o procedimento para as demais variáveis. Portanto, concluiu-se que as variáveis não seguem uma distribuição Normal e optou-se pelo teste de correlação de Spearman.

Os coeficientes revelaram que em geral o NDVI e o BUI foram os índices que mais fortemente se correlacionaram com ΔT , atingindo até -0,69 e +0,75 (em outubro), correspondendo a relações negativa e positiva, respectivamente. Tais resultados sugerem estes como indicadores mais adequados para análises de TS.

Utilizando imagens diurnas e noturnas do satélite MODIS, Wang *et al.* (2018) também observaram altas correlações positivas entre áreas construídas e TS para a cidade de Yangon. Berger *et al.* Analisaram uma série de variáveis associadas com as características da superfície em duas cidades alemãs, e verificaram, utilizando o coeficiente de Spearman, correlações estatísticas das temperaturas de superfície mais fortes para aquelas relacionadas com a vegetação e área impermeável, respectivamente neste caso, fração entre a área coberta por vegetação e área total (VF) e fração entre área coberta por superfícies impermeáveis e área total (ISA).

Finalmente, Barros e Lombardo (2016) observaram para a cidade de São Paulo, que a variável que estabeleceu melhor relação espacial com o fenômeno SUHI foi a classe de uso da terra caracterizada pela presença de armazéns/indústria, comércio e serviços, ou seja, com abundância de asfalto, concreto e telhados de zinco, amianto e alumínio.

Nos estudos de Wang *et al.* (2018), os principais tipos de cobertura da terra que aumentaram a LST média durante o dia foram a agricultura e as áreas edificadas, com as áreas verdes e de água diminuindo a LST média durante o dia. Já para a temperatura de

superfície noturna média, os terrenos construídos continuaram a reforçar e elevar as temperaturas, com altos coeficientes de correlação, variando de 0,45 a 0,68. A evapotranspiração das áreas verdes e áreas agrícolas reduziu o LST noturno médio, independentemente da sazonalidade anual.

Cabe destacar ainda que as relações positivas da temperatura com as superfícies construídas podem apresentar intensidades menos expressivas. No caso do estudo de Zheng *et al.* (2014), para a cidade de Phoenix, concluiu-se que os impactos da porcentagem de cobertura de edificações na LST podem variar significativamente de um lugar para outro e/ou de uma cidade para outra. Eles observaram que a fração de cobertura construída teve uma influência muito fraca na temperatura de superfície diurna ($r^2 = 0,03$) e noturna ($r^2 = 0,003$); enquanto a fração da superfície pavimentada mostrou relacionamentos muito mais fortes com o LST em comparação com a fração de edificações ($r^2 = 0,15$ para o dia e $r^2 = 0,32$ para a noite).

A explicação para tal comportamento, conforme os autores, estaria relacionada à composição dos edifícios por materiais refletivos com telhados de cores claras que refletem a maior parte da radiação solar que entra e retém baixa quantidade de calor; além de efeitos de sombreamento, e consequentemente, de resfriamento.

Especificamente sobre o comportamento da vegetação, Zhang *et al.* (2009) explicam que as relações fortes e negativas com as temperaturas de superfície se fundamentam no fato de que os níveis de fluxo de calor latente são maiores em áreas com cobertura vegetal significativa em comparação com áreas dotadas de vegetação esparsa ou sem vegetação e com baixa disponibilidade de umidade.

Além disso, os resultados do quadro, apesar da pequena quantidade de dados contemplada (apenas 4 datas), sugerem uma dependência espaço-temporal, que evidencia efeitos potenciais causados pela estação do ano, data e horário de aquisição das imagens (BERGER *et al.*, 2017). Desta forma, os episódios diurnos exibiram correlações mais fortes que os noturnos, cujos coeficientes apontaram em sua maioria pouca ou quase nenhuma relação estatística com ΔT . Especificamente, o episódio diurno de outubro revelou as correlações mais intensas em todos os índices.

Efeitos ligados à estação do ano são notados por exemplo quando se compara a correlação entre ΔT e NDWI ou NDBI, porque no inverno os valores são praticamente nulos, denotando que a quantidade de água e a área construída são mais importantes na primavera e no outono do que no inverno.

Por outro lado, Zheng *et al.* (2014) constataram correlações significativas, entretanto, mais fortes durante a noite do que de dia, entre a porcentagem e os padrões espaciais das superfícies pavimentadas e LST. Além disso, os autores relataram que os efeitos das variáveis de configuração na LST foram mais fortes que aqueles correspondentes associados às variáveis ligadas à composição.

Sob a perspectiva temporal, a relação entre os índices e as diferenças de temperatura mostrou variações tanto em relação aos períodos (diurno/noturno) quanto às datas de tomada das imagens. Nesse sentido, observaram-se variações significativas entre as intensidades das correlações na comparação entre episódios diurnos e noturnos, e entre as datas de tomada da imagem.

Enquanto a média dos coeficientes para os episódios diurnos foi de 0,61, a média dos noturnos foi menos da metade deste valor. Entre os episódios diurnos, outubro apresentou maior média de coeficientes (0,73) que maio (0,48), e entre os noturnos, agosto exibiu maior média (0,23) que a outra data (0,32). Essas intensidades de correlação inferiores para a noite e para o inverno sugerem que outros fatores podem ter efeitos mais determinantes neste período e estação, tais como que fenômenos relacionados a uma escala espacial diferente da analisada neste capítulo.

Sobretudo, tais variações apresentadas pelos coeficientes de correlação evidenciam a atuação de não apenas um determinante, mas sim uma interação de fatores incluindo momento de aquisição dos dados, fenologia da vegetação, condições meteorológicas, umidade, entre outras (BERGER *et al.*, 2017).

Wang *et al.* (2018) acrescentam nesse sentido que a intensidade variável da relação entre uso/cobertura da terra e temperatura de superfície se dá possivelmente devido a diferentes classificações de uso/cobertura da terra, bem como a diferentes unidades de análise.

Pode-se citar por exemplo, o estudo de Amorim *et al.* (2021) para a zona urbana de Presidente Prudente. Nele foi avaliada a correlação entre temperatura de superfície e o NDVI não para uma área delimitada (conjunto de todos os pixels), mas para pontos de registro escolhidos, considerando-se o valor do pixel desses pontos. Dessa maneira, os autores constataram correlação de -0,78 durante o dia, e de -0,64 a noite; valores consistentes com os encontrados nesta pesquisa, porém não idênticos devido a diferente época de tomada da imagem, bem como possivelmente da unidade de análise.

7. FATORES EXPLICATIVOS DAS INTERAÇÕES DO CLIMA: RELEVO E TIPOS DE COBERTURA

Fatores de microescala ligados ao desenho urbano como estrutura, morfologia e configuração, além da própria composição, como já explicado anteriormente, são capazes de alterar o clima local, em resposta aos fatores de outras escalas como insolação, umidade, velocidade e direção dos ventos. Isto porque, para qualquer material de superfície, propriedades como albedo, emissividade e inércia térmica, desempenham papéis fundamentais no controle da temperatura de um corpo em equilíbrio com seu entorno. Constatações feitas por Mackey *et al.* (2012) a partir de imagens aéreas apontaram inclusive que o aumento do albedo por meio de telhados reflexivos, por exemplo, pode produzir um resfriamento mais forte do que iniciativas para aumentar o NDVI, como telhados verdes, árvores nas ruas e parques verdes.

Entretanto, identificar e avaliar a contribuição individual dos fatores para o impacto térmico nas cidades é tarefa extremamente difícil, pois trata-se de interações complexas que resultam em alta variabilidade tanto espacial quanto temporal na temperatura de superfície.

Neste trabalho optou-se por analisar a questão térmica com enfoque e abordagem nas coberturas, com o intuito de verificar a influência dos tipos de pavimentos, tipos de telhados e formas de vegetação que constituem a zona urbana de Presidente Prudente.

Nesse sentido cumpre relatar que as pesquisas de Chen *et al.* (2014) e Li *et al.* (2017) constatarem maior relevância da composição do meio urbano para LST do que da configuração. Para os telhados por exemplo, de acordo com a ASTM 1980-98 (*American Society for Testing and Materials*), a diferença de temperatura entre o ar e as coberturas com telhas cerâmicas é de $-0,1^{\circ}\text{C}$, enquanto a diferença de temperatura entre o ar e as coberturas com telhas de fibrocimento é de $10,3^{\circ}\text{C}$.

A partir do contexto dos quatro episódios de interesse inicialmente definidos no capítulo anterior, observou-se que as características de outubro e agosto permitem apontá-los como “críticos”, sendo escolhidos para fins de detalhamento e investigação sob a perspectiva das coberturas. Por isso, este capítulo apresenta um detalhamento dos resultados anteriores realizado para os dois episódios considerados críticos por meio de dois procedimentos:

a) o emprego da técnica de perfis representativos da área de estudo (Leste-Oeste, Norte-Sul e Nordeste-Sudoeste) como mostrado no Capítulo 3 (Procedimentos Metodológicos), e

b) a realização de uma classificação manual das coberturas, mostrando o tipo predominante a cada intervalo de 100 metros.

Também foram incorporados nesta análise, os aspectos relativos ao relevo (altitude, declividade e orientação de vertentes), organizados no mesmo intervalo espacial, que foram provenientes das cartas exibidas no Capítulo 4 (área de Estudo). É importante destacar que a classificação da cobertura da terra foi fundamentada na resolução de captura da imagem termal (100m), de modo que esta classificação representa a cobertura dominante na faixa (buffer) de 50m ao redor de feição do trajeto.

Tendo em vista que o traçado foi realizado majoritariamente ao longo das vias (asfaltadas) - metodologia análoga ao transecto móvel -, a área questionada foi considerada com predomínio da classe asfalto quando da ocorrência de vias com várias faixas de rolamento e/ou presença de rotatórias, como por exemplo, em rodovias.

Assim na primeira parte do capítulo a discussão foi feita separadamente por período, ou seja, para os episódios diurno (outubro) e noturno (agosto), buscando identificar os valores mínimos e máximos de ΔT , e sua variação em cada perfil e relacionar com as respostas apontadas pelos índices (NDVI, NDWI, NDBI e BUI).

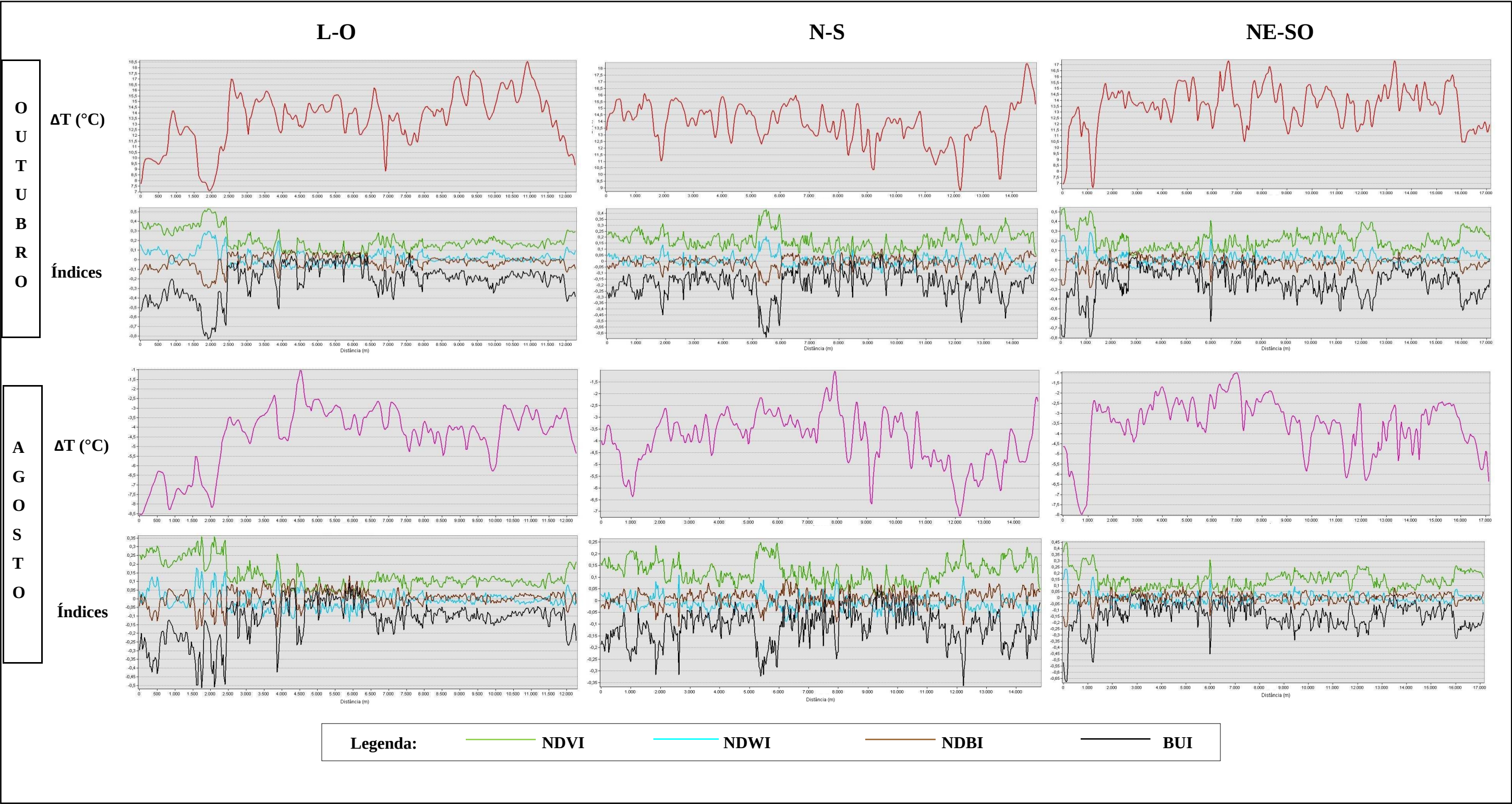
Na segunda parte do capítulo, optou-se por fazer a análise conjunta dos períodos e observar as semelhanças (picos e vales de ΔT) e divergências de comportamento em relação à variável térmica. Por fim, na terceira parte do capítulo, foram contemplados os fatores explicativos das diferenças de temperatura quanto aos aspectos de relevo e cobertura da terra.

7.1. DIFERENÇA DE TEMPERATURA NOS EPISÓDIOS DIURNO E NOTURNO

Episódio Diurno

Conforme mostra a Figura 33, os perfis dos índices em outubro exibiram contrastes mais evidentes nas áreas contínuas com vegetação - arbórea ou rasteira - para os três perfis, que muitas vezes se localizam nas periferias da zona urbana. Nas demais áreas observou-se valores semelhantes para NDVI, NDWI, NDBI e BUI, mostrando elevado grau de heterogeneidade do intraurbano, principalmente em termos de composição. Tal fato está relacionado com a própria resolução espacial, que corresponde a capacidade de detecção do satélite, de 30metros neste caso, que resulta generalização da informação. Nesse sentido, destacam-se os pontos nas distâncias: 2.000m em L-O; 12.200m e 13.800m em N-S; e 0m, 1.100m e 16.000m em NE-SO.

Figura 33: Variável térmica e índices nos três perfis dos episódios diurno e noturno.



Fonte: Elaborado pela autora.

Do ponto de vista térmico, nas áreas periféricas onde há presença acentuada de vegetação (NDVI/NDWI positivos e NDBI/BUI negativos), foram verificados pontos com diferenças de temperatura menores: em 2.000m em L-O, 12.200m em N-S e 1.200m em NE-SO. Em contrapartida, quando se adentra a zona urbana (áreas não periféricas e mais densamente edificadas), existem locais nos quais não se observa esta relação inversa, de tal forma que ΔT s mínimos nem sempre correspondem a elevados valores de NDVI e NDWI (baixo NDBI e BUI), como por exemplo aos 6.900m em L-O ou 9.200m em N-S, sugerindo a influência de outros fatores como relevo, morfologia e o próprio aspecto qualitativo vegetacional.

Sobre a morfologia, Chen *et al.* (2020) apontam que áreas com morfologia urbana densa geralmente tem temperaturas de superfície mais elevadas do que aquelas com morfologia urbana aberta, tal qual as áreas periféricas analisadas no presente estudo.

Já os pontos de maior aquecimento foram observados em 11.000m em L-O, 14.500m em N-S e, em 6.800m e 13.500m em NE-SO. Nesse sentido, apesar da predominância nas periferias da zona urbana, no perfil NE-SO contatou-se um máximo ΔT (6.800m) e outro semelhante (8.500m) também na porção central do trajeto, que correspondem a áreas com predomínio de vias asfaltadas.

Episódio Noturno

Os resultados para os perfis L-O, N-S e NE-SO do episódio de agosto (Figura 33), mostraram a respeito do comportamento dos índices que, por tratar-se das mesmas áreas, os gráficos são muito similares. Assim, mais uma vez foram observados contrastes mais evidentes – índices de água e vegetação positivos e de área construída negativos - notadamente nas áreas periféricas da zona urbana.

Embora alguns pontos de menor diferença de temperatura correspondam a áreas periféricas dotadas de mais vegetação e menos área construída, locais de maior resfriamento em relação à estação meteorológica -mínimos ΔT s- também foram observados em áreas com maior densidade construtiva (e menor NDVI/NDWI), tais como em 9.100m (N-S).

Cumprе salientar que a noite, na ausência de insolação, e tendo em vista o horário de tomada da imagem, há influência predominante da quantidade de água e da dinâmica dos ventos nas trocas térmicas, e conseqüentemente, nas temperaturas dos alvos. Nesse sentido, sob ventos calmos e céu claro, segundo Voogt e Oke (2003), os processos em microescala dependentes das propriedades térmicas da superfície, fator de visão do céu e advecção serão mais aparentes.

Para ambos os episódios (outubro e agosto) não foram encontradas tendências claras de queda ou aumento de ΔT no sentido centro-periferia ou periferia-centro (respectivamente) nos perfis estudados. Tal fato pode estar relacionado ao processo de produção do espaço urbano de Presidente Prudente, que conforme Sposito (1983) resultou em fragmentação socioespacial e em diversos núcleos espalhados pelo espaço urbano.

7.2. COMPARAÇÃO DE ΔT ENTRE OS PERÍODOS (DIURNO X NOTURNO)

De acordo com Oke *et al.* (2017), durante o dia a temperatura de superfície de todas as facetas da superfície está acima da temperatura do ar medida simultaneamente na camada do dossel (T_{ar}), exceto a vegetação transpirante que permanece próxima a T_{ar} . Por outro lado, à noite, a temperatura de superfície dos telhados está abaixo de T_{ar} , as paredes são substancialmente mais quentes que T_{ar} , mas a vegetação permanece próxima a T_{ar} . Desta forma, todos os perfis do episódio diurno exibiram, como era de se esperar, e conforme Figura 33, diferenças de temperatura superiores ao noturno. Os valores de outubro ficaram sempre positivos – superfícies mais aquecidas que a estação - acima de 1°C atingindo até $18,5^{\circ}\text{C}$, enquanto que em agosto foram observados somente ΔT s negativos, entre -1°C e $-8,5^{\circ}\text{C}$.

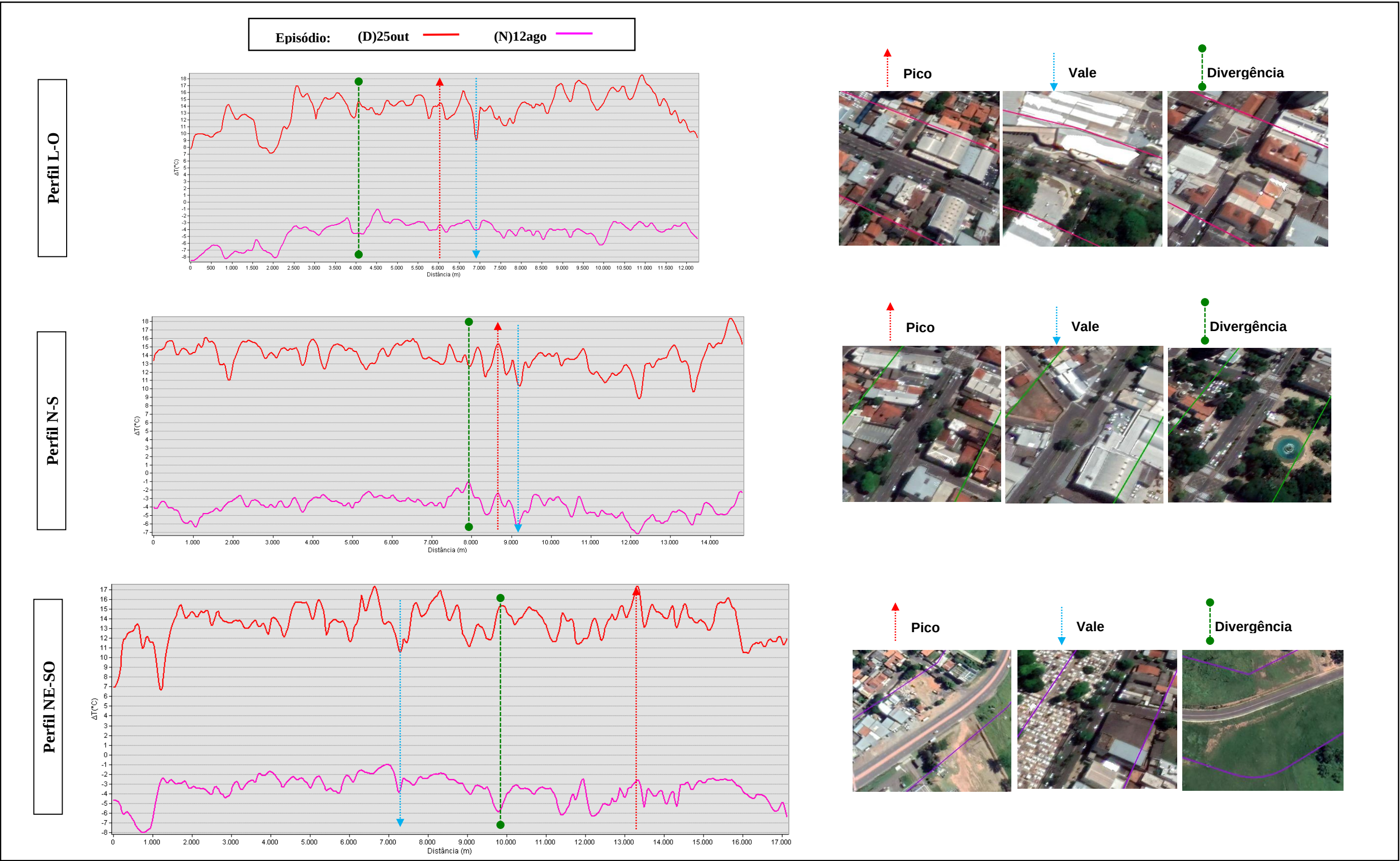
Analogamente ao comportamento das SUHIs, geralmente são observadas temperaturas dos alvos diurnas de maior intensidade do que noturnas, devido ao efeito da radiação solar no aquecimento da superfície (Mathew *et al.*, 2018). Além disso, Nichol (2015) explica que gradientes de temperatura menores entre diferentes tipos de cobertura da terra observados na imagem noturna resultam possivelmente do predomínio de fenômenos de mesoescala, ao invés de padrões climáticos de microescala, sugestivos de processos operando na Camada Limite Urbana (UBL), em oposição a Camada do Dossel Urbano (UCL) que é dominante durante o dia.

A comparação entre os períodos permitiu constatar ainda, respostas térmicas semelhantes e diferentes de acordo com os locais analisados. Assim, os gráficos da Figura 34 mostram comportamentos associados por exemplo, a picos¹⁶ de ΔT em todos os episódios, a vales ΔT em todos os episódios, bem como respostas divergentes¹⁷ entre as datas. Um exemplo de cada categoria (picos, vales e divergência) foi destacado no layout para cada perfil, e ainda por meio de imagens do Google Earth.

¹⁶Neste trabalho, picos e vales de ΔT foram definidos como subidas e descidas (ou o contrário, respectivamente) abruptas dos gráficos.

¹⁷Divergências foram consideradas quando no mesmo local, observou-se pico em episódio diurno e vale no noturno (ou o contrário).

Figura 34: Variável térmica nos três perfis dos episódios diurnos e noturnos.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nesse sentido, os locais do exemplo onde foram observados picos em ambos os episódios se caracterizaram por áreas com uso para comércio/serviços e residencial, densamente construídas e com vegetação escassa. Locais com vales durante o dia e a noite foram verificados em áreas também densamente construídas, porém com uso predominante comercial (ou de serviços), salientando a presença de coberturas com telhados metálicos.

Divergências foram constatadas com picos diurnos e vales noturnos nos perfis L-O e NE-SO, para área densamente construída com vegetação escassa (quase inexistente), e área aberta dotada de vegetação rasteira, respectivamente. Com relação à vegetação rasteira, tal resposta possivelmente se fundamenta no fato de que áreas abertas com vegetação rasteira ou solo nu armazenam calor com menos eficiência do que superfícies totalmente vegetadas ou urbanizadas (DODD, 1979).

Em contrapartida, no destaque do perfil N-S, aconteceram vale diurno e pico noturno, que correspondeu a um local central, de uso comercial e com presença vegetação arbórea significativa.

Observando os mesmos alvos, respostas térmicas opostas conforme o período (dia ou noite) também foram detectadas por Quattrochi e Ridd (1994). Neste estudo, verificou-se que durante o dia, áreas comerciais exibiram as temperaturas de superfície mais elevadas, seguidas pelas de serviços, transportes e indústrias. Áreas residenciais - constituídas por mistura heterogênea de casas, gramado e coberturas arbóreas - apresentaram valores intermediários. As menores temperaturas diurnas foram registradas em corpos d'água, vegetação e terras de uso agrícola, nesta ordem. A noite, as coberturas com comércio, serviço, indústria e transporte esfriaram rápido, enquanto que a agricultura mostrou a menor temperatura.

Além destes, outros autores como Nichol (2005), Chen *et al.* (2020) e Coutts *et al.* (2016) constataram, a partir de imagens termais, comportamentos diferentes nos períodos diurno e noturno para a mesma área, de modo que locais com altas temperaturas de superfície durante o dia, não necessariamente mantinham-se aquecidos após o pôr-do-sol. Tal fato segundo Coutts *et al.* (2016), demonstra a importância das propriedades termodinâmicas e radiativas de superfície na LST.

Tendo em vista que as altas temperaturas da superfície podem ocorrer em diferentes partes da cidade durante o dia e a noite, evidencia-se a necessidade dos planejadores urbanos considerarem a questão temporal tanto quanto a espacial, ou seja, quando (dia/noite) e onde, almejam aplicar estratégias de mitigação de calor.

7.3. RELAÇÃO ENTRE ΔT , RELEVO E TIPOS DE COBERTURA NOS EPISÓDIOS CRÍTICOS

Após a investigação geral por meio dos perfis, dada a influência dos materiais construtivos notadamente na escala intraurbana, prosseguiu-se com a sua identificação e incorporação na análise. Na escala mais detalhada as diferenças mostram-se mais ricas no espaço intraurbano, o que evidencia sua maior heterogeneidade (MENDONÇA e DUBREUIL, 2005). Desta maneira, visto que a variável central da pesquisa se baseou na temperatura de superfície e que ela apresenta maior variação em relação à temperatura do ar, foi determinado um critério-limite para definir as variações de diferença de temperatura relevantes ou significativas para o estudo detalhado dos perfis.

Trabalhos de Teobaldo Neto (2019) em Cuiabá (MT) e Dorigon (2019) em Jundiá (SP) empregaram procedimento semelhante para identificar variações térmicas utilizando as intensidades de temperatura do ar medidas por meio de transectos móveis. Neles optou-se respectivamente por adotar os valores mínimos de 3 e 2,5°C respectivamente para identificar áreas de redução de temperatura. Embora tanto Cuiabá quanto Jundiá sejam cidades tropicais, esta apresenta maior semelhança com Presidente Prudente, no que refere a suas características climáticas, principalmente em função da latitude. Desta forma, para a área estudada na presente pesquisa, foram consideradas variações significativas - redução ou aumento de diferenças de temperatura -, aquelas com intensidade igual ou superior a 2,5°C para o episódio crítico diurno. Já para o episódio crítico noturno, em virtude da falta de referências e considerando constatações anteriores que comprovaram menor amplitude e variação térmicas (ΔT) a noite do que durante o dia, adotou-se o limiar mínimo de 1,5°C. As Figuras 35 até 40 contemplam o comportamento de ΔT , a cobertura predominante e os respectivos aspectos do relevo.

Também foi elaborado um quadro síntese (Quadro 13) com os resultados dos painéis, mostrando as intensidades das variações térmicas significativas e sua localização, sistematizadas conforme os tipos de materiais construtivos e perfil.

Figura 35: Diferenças de temperatura em relação aos aspectos de relevo e cobertura no perfil L-O do episódio crítico diurno.

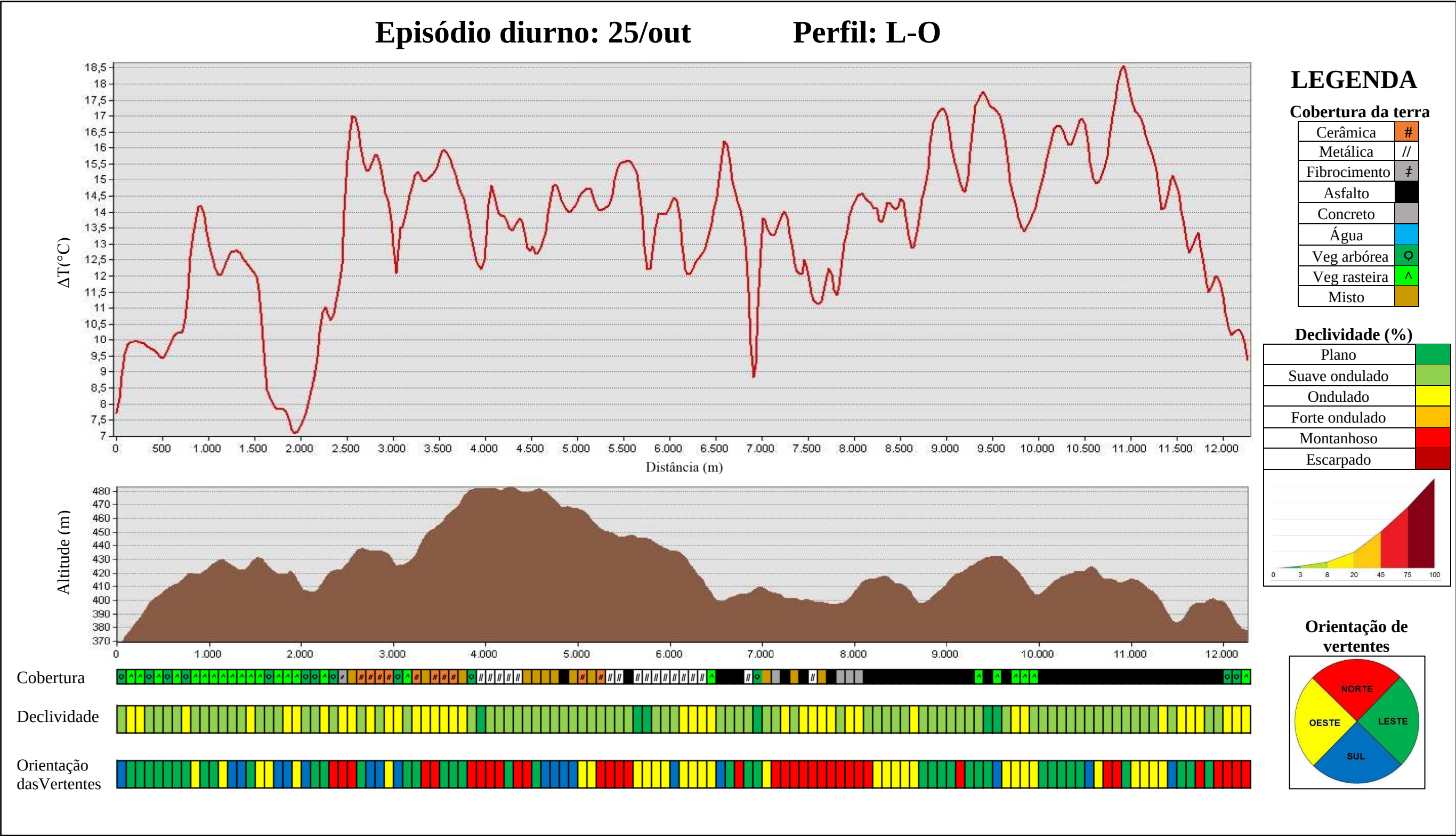


Figura 36: Diferenças de temperatura em relação aos aspectos de relevo e cobertura no perfil N-S do episódio crítico diurno.

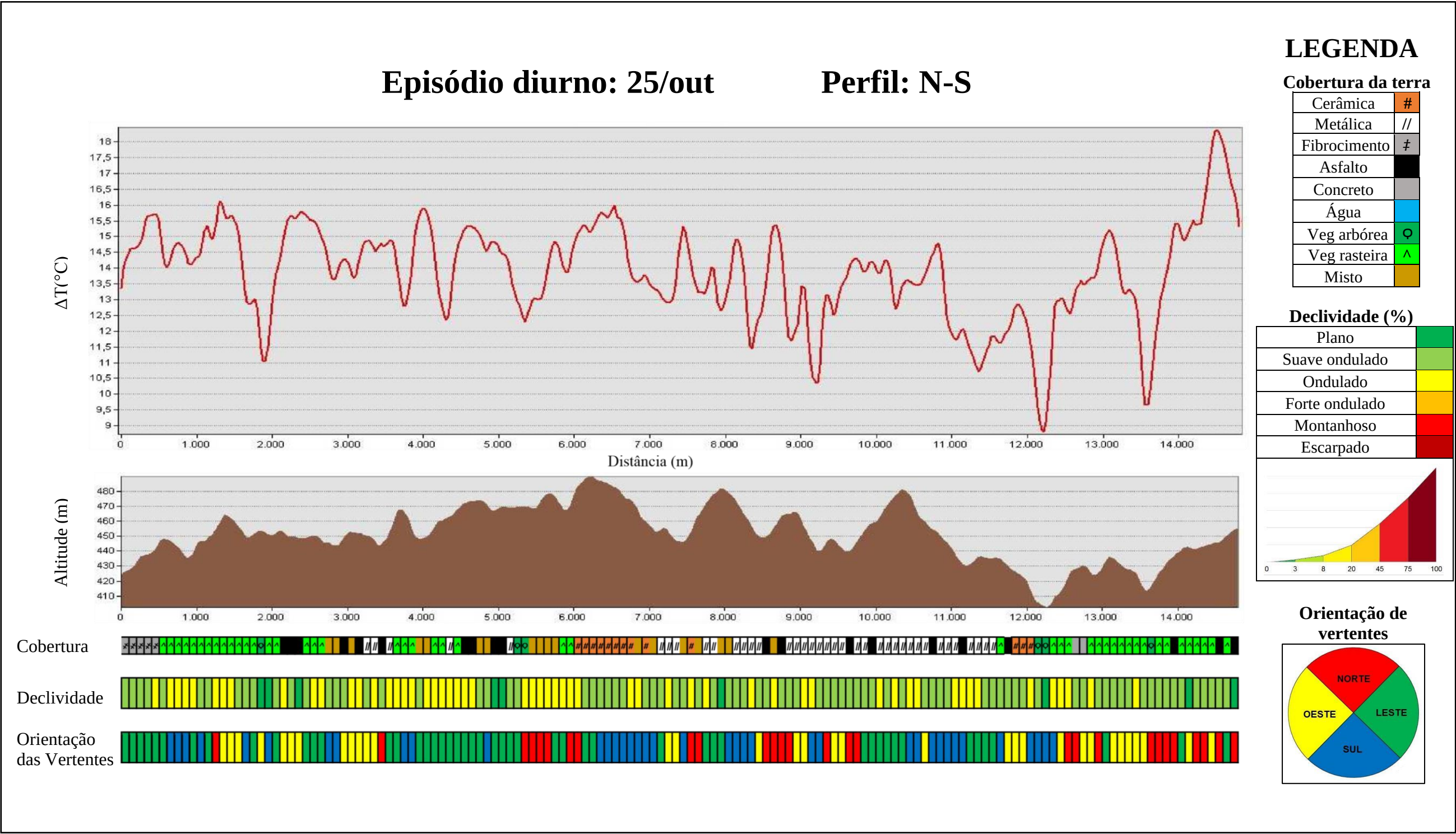


Figura 37: Diferenças de temperatura em relação aos aspectos de relevo e cobertura no perfil NE-SO do episódio crítico diurno.

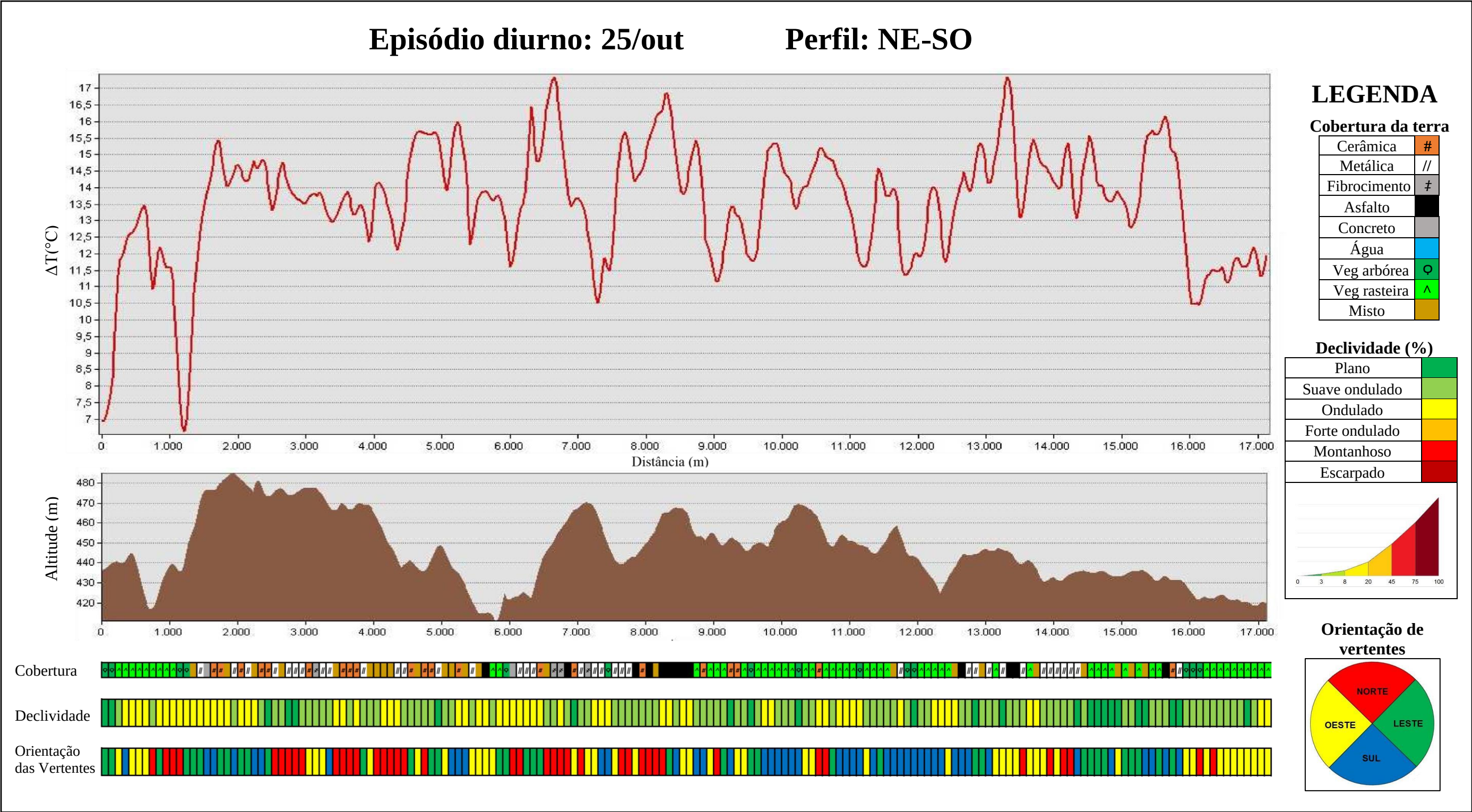


Figura 38: Diferenças de temperatura em relação aos aspectos de relevo e cobertura no perfil L-O do episódio crítico noturno.

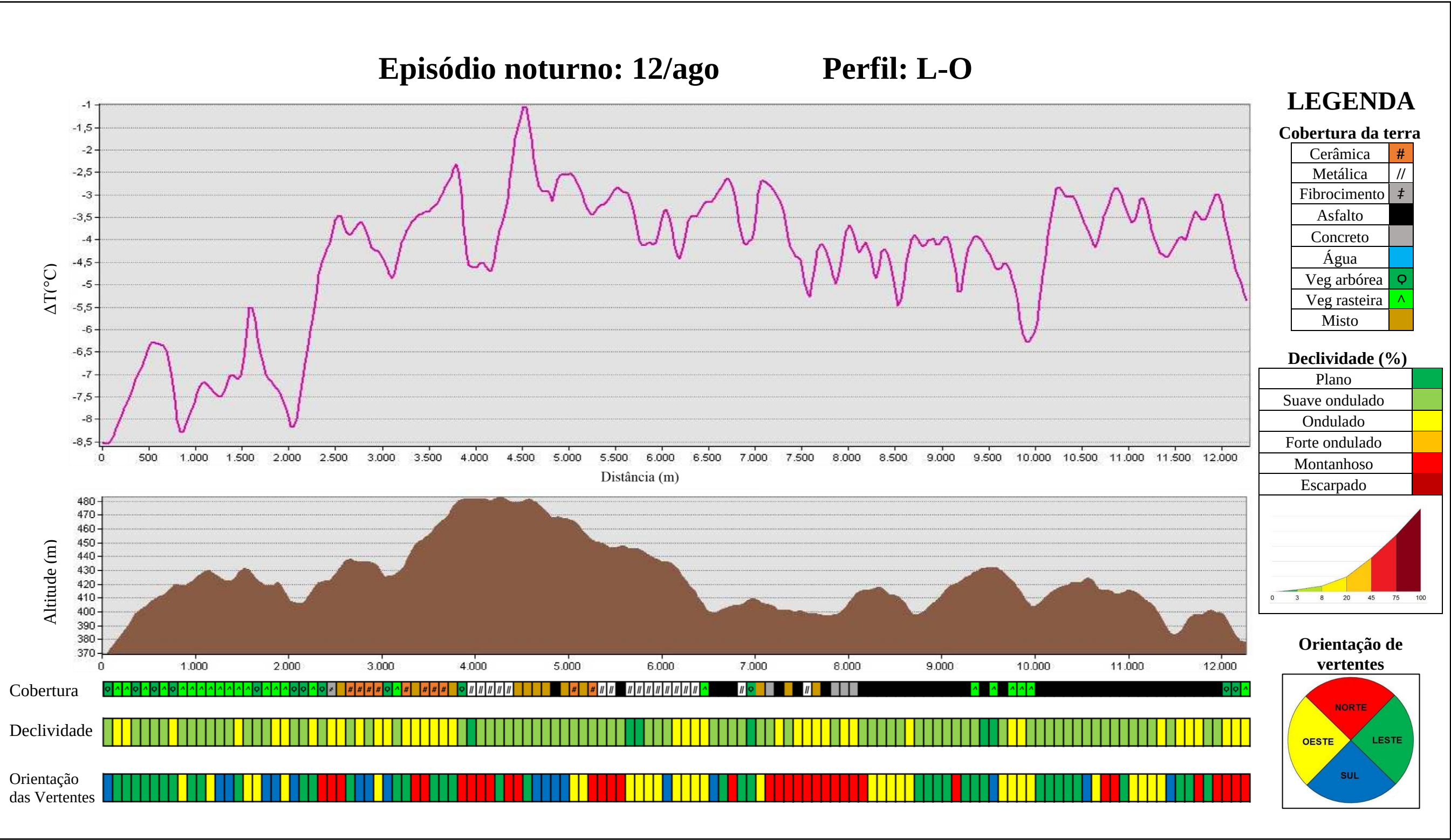
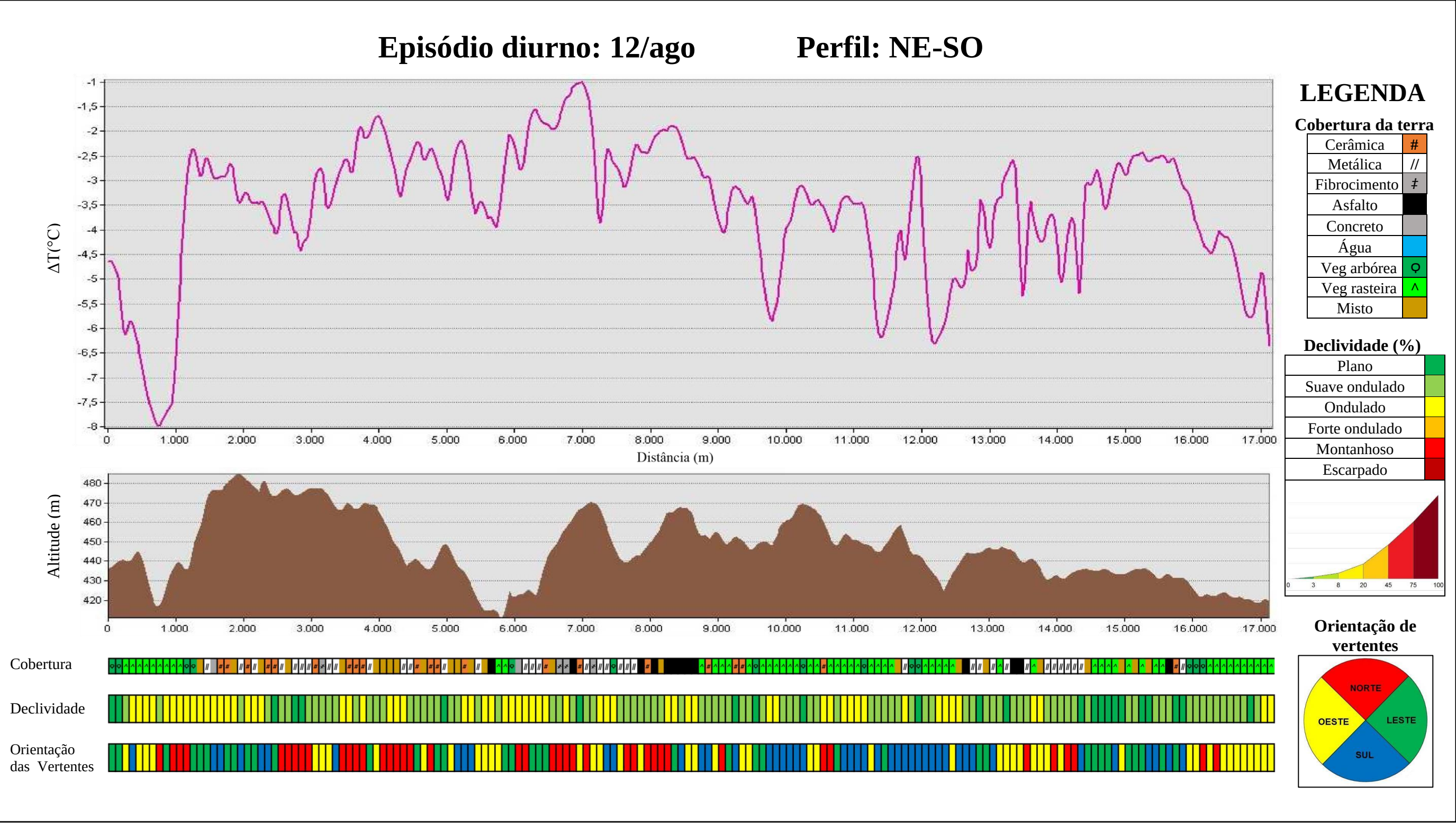


Figura 40: Diferenças de temperatura em relação aos aspectos de relevo e cobertura no perfil NE-SO do episódio crítico noturno.



Fonte: Elaborado pela autora.

Quadro 13: Síntese das variações significativas de ΔT observadas nos períodos diurno (25out) e noturno (12ago).

Coberturas/Materiais		Período	DIA			NOITE		
		Perfil	Localização (m)	Intensidade (°C)	Orientação Vertente	Localização (m)	Intensidade (°C)	Orientação Vertente
Telhados	Cerâmica	LO	2600-3000	-4,0	S	-----	-----	-----
		NS	6500-6800	-2,5	S	11800-12100	-2,5	O+S
			11900-12100	-2,5	S+O	-----	-----	-----
	Metálico	NESO	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		LO	3900-4100	2,5	N	3900-4400	2,5	N
		NS	8100-8300	-3,5	S	8100-8400	-2	S
			9000-9200	-3,0	O+S	8900-9200	-3	O+S
			9200-9600	3,0	O+N	9200-9600	3,5	N+O
			10800-11100	-3,0	S	10200-10500	-2,2	L
	Fibrocimento	NESO	6100-6300	3,5	N+L	7200-7400	1,5	O+S
		LO	2400-2500	3,5	N	-----	-----	-----
		NS	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Pavimentos	Asfalto	LO	8600-9000	4,0	L	8100-8500	-1,5	O
			9000-9200	-2,5	N+L	8500-8600	1,5	O
			10000-10500	2,5	L	1000-10200	3,0	L
		NS	8500-8700	2,5	N	8500-8600	1,5	N
	Concreto	NESO	8300-8500	-2,8	L+S	13300-13500	-2,5	O
			13300-13500	-4,0	O	-----	-----	-----
		LO	7800-8100	3,0	N	-----	-----	-----
		NS	-----	-----	-----	-----	-----	-----
		NESO	-----	-----	-----	-----	-----	-----
			-----	-----	-----	7100-7200	-1,5	O
Vegetação	LO		0-900	6,0	L	0-600	2,0	L
			900-1900	7,0	N+O	600-900	-1,5	L
			1900-2400	4,0	L+N	900-1600	2,5	L+O
			-----	-----	-----	1600-2100	-2,5	S
			-----	-----	-----	2100-2400	3,5	L+N
			-----	-----	-----	3800-3900	-1,5	N
			-----	-----	-----	9700-9900	-1,5	O
			-----	-----	-----	12000-FIM	-2,0	N
			1300-1900	-5,0	O	500-1100	-2,0	L+S
			1900-2100	3,5	S+L	1100-2100	3,5	O
	NS		4100-4300	-2,5	L	3600-3800	-1,5	L+S
			12200-12600	4,0	S+N+O	1220-12600	2,0	S+O+N
			13100-13600	-5,0	O	12800-13300	1,5	N+O
			13600-13900	4,5	N	13300-13600	-1,5	O
			-----	-----	-----	13600-13900	2,0	N
			-----	-----	-----	-----	-----	-----
	NESO		0-600	6,5	L+O	0-700	-3,0	O
			600-1200	-6,5	N+L	700-1300	5,5	N
			9600-9900	3,0	S	6700-6900	3,0	L+O
			10600-11200	-3,5	S	9400-9800	-2,5	L
			11800-12200	2,5	S	9800-10200	2,5	S
			-----	-----	-----	10900-11400	-2,9	S
			-----	-----	-----	11900-12200	-3,7	S
			-----	-----	-----	15900-FIM	-3,0	O

Fonte: Elaborado pela autora.

Nos trechos com predomínio de telhados de cerâmica observou-se redução de ΔT tanto no episódio diurno (outubro) quanto no noturno (agosto). Em outubro foram constatadas reduções de 4°C (2.600 - 3.000m em L-O), 2,5°C (6.000 - 6.500m em N-S) e 2,5°C (11.900 - 12.100m em N-S), todas em áreas com orientação de vertentes para o sul.

No episódio noturno a redução ocorreu entre 11.800 e 12.100m no perfil N-S com intensidade de 2,5°C e faces voltadas para o sul e oeste. Essa característica “fria” foi observada também em estudo realizado por Ferreira e Prado (2003) para o período diurno, no qual a cerâmica vermelha e a branca foram os únicos materiais, dentre os medidos,

que atingiram temperaturas superficiais mais baixas que as temperaturas do ar, quando submetidos às condições climáticas estabelecidas. No caso desta pesquisa, por se tratarem de épocas tipicamente mais secas (agosto e outubro), esta constatação mostra-se relevante, pois mesmo na ausência de água este tipo de material construtivo demonstrou potencial de resfriamento tanto a noite quanto durante o dia.

Além das propriedades termodinâmicas discutidas anteriormente, Bueno *et al.* (2007), acrescentam que a capacidade de fixar umidade -com poros facilmente preenchidos por líquidos-, a noite ou mesmo pela retenção das águas da chuva, resultam em menores amplitudes térmicas para o material cerâmico. Isto porque, ganham energia por calor latente através da condensação à noite e perdem energia, também por calor latente, através da evaporação de dia.

Reduções e elevações de ΔT foram registradas no caso dos telhados metálicos para ambos os períodos, cabendo destacar em outubro as áreas voltadas para o norte com aumento igual ou superior a 3°C (9.200 - 9.600m em N-S e 6.100 - 6.300m em NE-SO), e áreas voltadas para o sul com diminuição igual ou superior a 3°C (8.100 - 8.300m e 10.800 - 11.100m em N-S). Em agosto, reduções e elevações de mesma ordem, como por exemplo nos trechos de 8.900 - 9.200m (faces sul e oeste) e de 9.200 - 9.600m (faces norte e oeste) em N-S, respectivamente.

Acerca do comportamento variado das coberturas metálicas é importante relembrar duas questões. Primeiro que, embora cerâmicas brancas e vermelhas apresentem valores de albedo similares aos materiais metálicos (em torno de 0,5), estes podem atingir temperaturas superficiais muito mais elevadas em virtude de sua baixa emissividade (FERREIRA e PRADO, 2003). E segundo, que em imagens do infravermelho termal obtidas por sensores remotos, alvos com emissividade baixa -como telhados metálicos- podem aparecer frios, mesmo que sua temperatura cinética (real) seja elevada (BERGER *et al.* (2017), FERREIRA (2019)), inclusive no período noturno (JENSEN, 2009).

Com relação aos telhados de fibrocimento, verificou-se no episódio diurno, aumento de ΔT de $3,5^{\circ}\text{C}$ de 2.400 a 2.500m no perfil L-O, em área com predomínio de tal material voltada para o norte. No episódio noturno foi encontrada redução de ΔT no valor de $1,5^{\circ}\text{C}$ em área com face para oeste (7.100-7.200m) no perfil NE-SO.

Conforme Erell (2008), embora o albedo das superfícies do telhado possa ter menos efeito sobre a temperatura do ar na camada do dossel do que as propriedades do

pavimento ou do solo - pois afeta a transferência de calor acima do nível do telhado -, ele pode afetar diretamente o desempenho energético de uma casa. No período diurno por exemplo, a combinação de baixo albedo, baixa condutividade e secura torna a maioria dos telhados muito quentes em dias ensolarados, sendo comum atingirem temperaturas de superfície de 50°C, e até de 60°C, mesmo em cidades temperadas (OKE *et al.*, 2017). Portanto, os materiais dos telhados têm papel fundamental no conforto térmico das pessoas devido às trocas energéticas entre o interior e o exterior da edificação, bem como na questão do consumo de energia para garantir tal conforto e desempenho das atividades e rotina doméstica.

Trechos nos quais prevalecem pavimentos asfálticos exibiram tanto reduções quanto elevações de ΔT em outubro (diurno) e agosto (noturno). Foi verificada redução e aumento de mesma intensidade no episódio diurno, com valor de 4°C, de 13.300-13.500m com face oeste em NE-SO, e de 8.600-9.000m com face leste em L-O, nesta ordem. Já em agosto, embora tenha ocorrido redução e aumento, foi observada maior frequência de elevação de ΔT , como por exemplo 3°C de 10.000-10.200m em L-O (face leste).

No que se refere às áreas caracterizadas pela superfície de concreto, foi constatada apenas uma ocorrência, que foi de aumento de ΔT no valor de 3°C no episódio diurno, associada à face norte (7.800-8.100m). Para o noturno, não foram observadas variações térmicas significativas ($\geq 2,5^\circ\text{C}$).

Vale destacar que a emissividade, segundo Gartland (2010), não é um fator tão importante para as temperaturas de superfície de pavimentos como é para as coberturas. Isto porque, pavimentos convencionais de asfalto e concreto possuem valores de refletância diferentes quando novos e envelhecidos, e emissividade térmica alta em torno de 85% ou mais e 70 a 90%, respectivamente. Assim, para um pavimento seco e impermeável a refletância é o fator que mais afeta a sua temperatura, e dado que as cores claras estão relacionadas com maiores refletâncias, os pavimentos mais claros são geralmente os mais frescos.

Sobre o comportamento do fibrocimento, asfalto e concreto, tratam-se de bons condutores térmicos e com grande capacidade calorífica, de tal forma que a energia recebida durante o dia, é liberada por tais materiais lentamente após o pôr-do-sol, podendo provocar situações acentuadas de desconforto térmico para as pessoas, além de aumentar a demanda por energia elétrica.

Como apontado por Guan *et al.* (2015), os telhados são geralmente muito mais frios do que a superfície do solo à noite devido a um maior fator de visão do céu e boa

exposição ao fluxo de vento. De fato os resultados (Quadro 13) revelaram maior número e intensidades mais expressivas de reduções de ΔT para os telhados do que para os pavimentos.

Por fim, trechos com predomínio de cobertura vegetativa foram notadamente observados em locais não-centrais ou periurbanos com presença majoritária de vegetação rasteira em detrimento da arbórea, evidenciando a carência de áreas verdes intraurbanas na área de estudo. Mathew *et al.* (2018) explicam que ao contrário da superfície construída que tem sido observada como o contribuinte mais significativo para o aumento das temperaturas da superfície regional, os efeitos de terras agrícolas e floresta variam distintamente entre o dia e a noite devido a diferenças em suas inércias térmicas.

Do ponto de vista térmico e considerando todos os perfis, em outubro (episódio diurno) verificou-se mais vezes aumento do que redução de ΔT . Cabe destacar os aumentos de mais de $6,5^{\circ}\text{C}$ no perfil L-O (900-1900m com faces norte e oeste) e no perfil NE-SO (0-600m com vertentes leste e oeste), bem como as reduções de 5°C em N-S (1300-1900m com face oeste) e de $6,5^{\circ}\text{C}$ em NE-SO (600-1200m vertentes norte e leste).

Apesar do conhecido papel de resfriamento da vegetação, segundo Quattrochi e Ridd (1998), tais superfícies podem apresentar temperaturas elevadas quando por exemplo, a evapotranspiração excede a precipitação, situação típica de épocas de seca como outubro no caso da área de estudo. De acordo com o autor, isso resulta em déficits sustentados de umidade da planta e do solo, conduzindo a um aumento das temperaturas da folha acima da temperatura do ar e a respostas de energia térmica de ondas longas relativamente altas.

Por outro lado, no episódio de agosto (noturno) mais ocorrências de redução da variável térmica foram observadas do que elevações. As maiores reduções de ΔT foram registradas entre 11.900 e 12.200m em NE-SO ($3,7^{\circ}\text{C}$, vertente sul) e entre 15.900 até o final de NE-SO (3°C , vertente oeste). Já as maiores elevações de ΔT foram localizadas de 700 a 1.300m em NE-SO ($5,5^{\circ}\text{C}$, face norte) e de 1.100 a 2.100m em N-S ($3,5^{\circ}\text{C}$, face oeste). Coutts *et al.* (2016) fizeram constatações similares em Melbourne (Austrália): a noite ruas com grande quantidade de superfícies impermeáveis permaneceram quentes, enquanto superfícies permeáveis, incluindo grama não irrigada, esfriaram rapidamente.

É importante salientar que nesse sentido, as áreas periurbanas - como a maioria das vegetadas identificadas neste estudo, - possuem menor rugosidade, e sendo mais abertas, detêm alto fator de visão do céu, o que favorece a perda de radiação durante a

noite (QUATTROCHI e RIDD, 1998), bem como o amortecimento das temperaturas principalmente em superfícies com vegetação rasteira.

Outro aspecto importante desse tipo de cobertura constatado por Dodd (1979) em St Louis (EUA), foi o padrão de inércia térmica sobre os sítios de pastagem e lavoura ao redor do perímetro da cidade com valores anormalmente baixos, implicando que áreas abertas de vegetação rasteira ou solo nu armazenam calor com menos eficiência do que superfícies totalmente vegetadas ou urbanizadas.

Áreas periféricas urbanas podem comumente estarem descobertas de vegetação, por exemplo, em atividades de entressafra ou troca de uso do solo. Conforme estudo de Mathew *et al.* (2018), a temperatura do solo pode ser ainda mais elevada do que a temperatura de uma estrada (superfície de concreto) durante as horas de sol de pico do verão. O autor observa que o solo se aquece rapidamente na presença de radiação solar e também resfria rapidamente quando a radiação solar está ausente. A taxa de resfriamento do solo é máxima em comparação com outros materiais.

Tendo em vista que a temperatura de superfície representa a resposta da cidade às condições do tempo e do clima, os episódios - denominados “críticos” - foram escolhidos para a investigação detalhada porque exibiram comportamento com maiores variações em relação a série de cartas termais estudadas.

De modo geral, foi verificado que o padrão de comportamento térmico diurno-noturno foi distinto entre os sete tipos de cobertura da terra identificados e analisados, principalmente em virtude de suas propriedades termodinâmicas. Nesse sentido, é importante salientar que os episódios críticos historicamente são época seca (agosto) e quente (outubro) dentro do contexto climático da área de estudo. Jensen (2009) trata da alta capacidade térmica da água e exemplifica com a vegetação, que por conter água, ela geralmente é mais fria que o solo, rocha e concreto de dia (às 2p.m.), e mais quente que o solo, rocha e concreto antes do amanhecer. Assim, estudos realizados sob condições melhores de umidade poderiam demonstrar outros comportamentos para os materiais construtivos, e revelar por exemplo, resultados de resfriamento ainda maiores para superfícies permeáveis como os telhados de cerâmica.

No que se refere aos efeitos topográficos, embora tenha implicações importantes para a temperatura do ar, foi observada influência pouco significativa da altitude para as variações de ΔT . Isto porque, os perfis mostraram variação máxima de cotas em torno dos 100 metros, o que sugere impacto reduzido nas respostas térmicas dos alvos. Não obstante, a altitude tem influência direta na temperatura do ar, pois conforme aquela

aumenta, o ar se torna menos carregado de partículas sólidas e líquidas, que por sua vez, absorvem a radiação solar e a difunde aumentando a temperatura do ar (BARBIRATO *et al.*, 2011).

Por outro lado, os resultados evidenciaram que a orientação das vertentes é a componente essencial para a compreensão das variações de ΔT ao longo das áreas com composição diversificada. Conforme o período (e horário) de registro dos dados, a trajetória do sol muda, de tal forma que áreas voltadas para o norte e leste durante o dia tendem a estar mais aquecidas, enquanto que a noite as temperaturas mais elevadas geralmente estão associadas a locais voltados para o oeste (que ficaram expostos a radiação solar a tarde).

Foram constatadas variações de ΔT (reduções/elevações) menores para áreas com predomínio de materiais construtivos do que de vegetação, o que pode ser devido a questão hídrica já comentada anteriormente. Notou-se ainda que com relação a vegetação, a ordem de grandeza de reduções/elevações de ΔT é maior no período diurno. Tal fato também foi identificado por Nichol (2005), quando seus resultados mostraram que um parque urbano era apenas 2°C mais frio do que as superfícies urbanas circundantes durante a noite, ao passo que durante o dia era 8°C mais frio, sugerindo um enfraquecimento dos padrões microclimáticos dentro da área urbana. Essa hipótese levantada pelo autor está relacionada a contribuição dos fatores climáticos da mesoescala, que parecem ser mais determinantes do que os fatores da microescala à noite, com a temperatura de vários tipos de superfícies influenciadas por sua localização relativa e pelo tipo de superfície.

8. A DIMENSÃO SOCIAL NA ANÁLISE CLIMÁTICA

Tendo por base a série anual com cartas de ΔT diurnas e noturnas da área urbana de Presidente Prudente, identificaram-se datas de períodos opostos (dia/noite) com proximidade acentuada e desprovidos da ocorrência de precipitação entre elas, sendo: 04/mai (diurno) e 10/mai (noturno) de 2020. Tal constatação originou a hipótese de se considerar esses resultados provenientes de uma data única, referenciando-os e atribuindo-os somente aos horários de tomada das imagens de satélite, para fins de investigação da inércia térmica das superfícies. Assim, foi necessário verificar o atendimento ao pressuposto de manutenção/predomínio da estabilidade atmosférica entre 01 e 10 de maio, com estudo de cartas sinóticas associado aos registros meteorológicos.

Segundo Sant'Anna Neto e Tommaselli (2009), compreender a atuação dos tipos de tempo na cidade é importante para o planejamento urbano, e permite aumentar a capacidade da população e dos sujeitos sociais em se protegerem dos seus efeitos adversos. No intuito de compreender tal capacidade de defesa, e portanto, investigar a questão climática urbana para além da forma, ou seja, não apenas de seus aspectos intrínsecos, mas sobretudo com foco em seu conteúdo, que significa como a dimensão socioespacial qualifica o clima urbano, a pesquisa prosseguiu com a investigação dos aspectos demográficos e socioeconômicos (renda, exclusão-inclusão e vulnerabilidade social e consumo de energia elétrica) de oito áreas representativas da cidade, valendo-se neste momento da metodologia de LCZs (STEWART e OKE, 2009) para sintetizar suas tipologias construtivas.

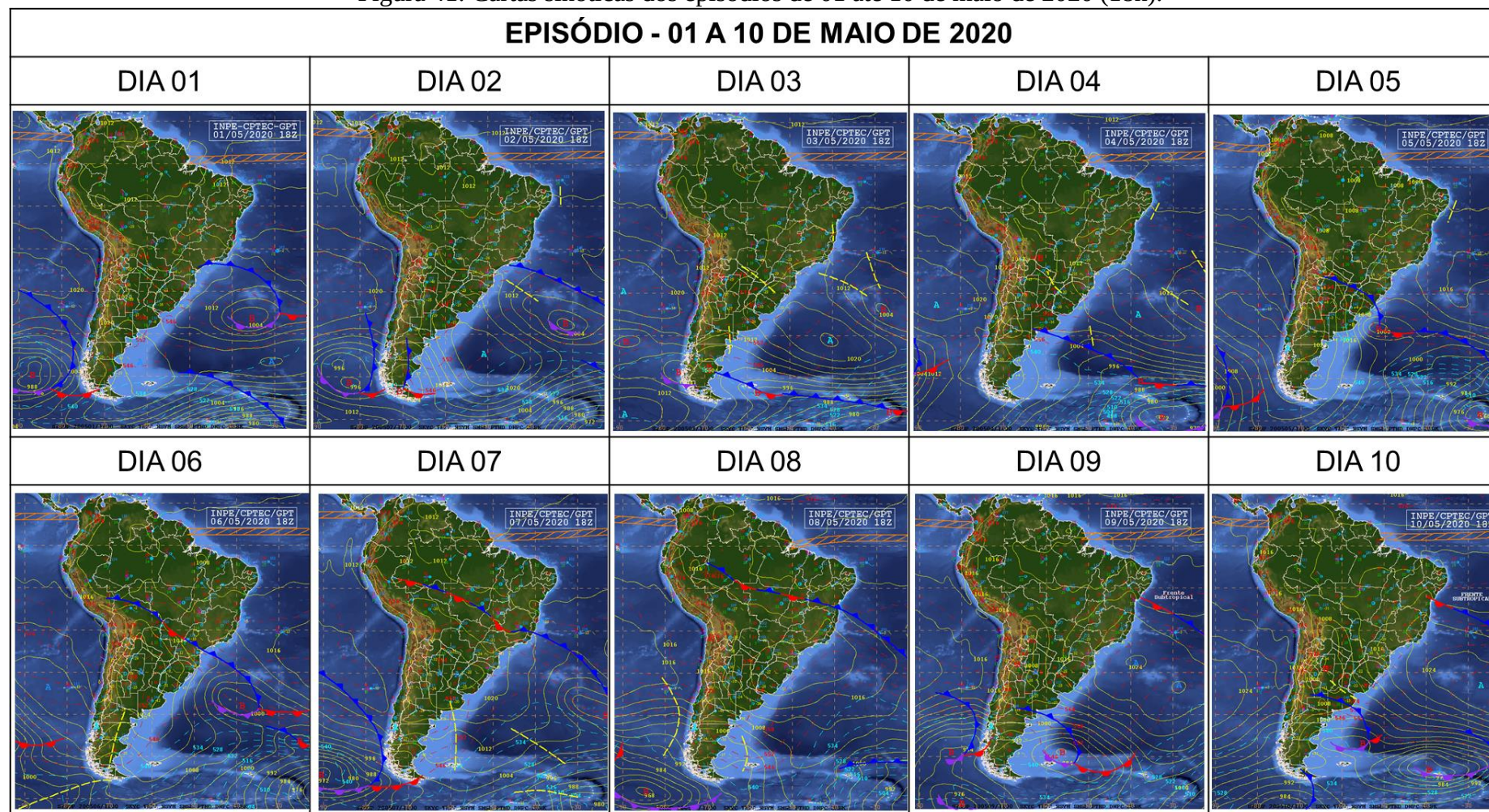
Tendo em vista que as tipologias e materiais construtivos tem implicações sobre o clima, e que as questões a ele relacionadas apresentam interfaces com demandas por exemplo de saúde, eficiência energética, conservação de recursos naturais e aspectos socioeconômicos. Além disso, os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 buscam solucionar problemas associados a esses temas. Logo, desde já se desperta para o potencial de contribuição dos materiais construtivos que constituem os ambientes urbanos no atendimento aos ODS, especialmente ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis e ODS 13 - Ação contra a Mudança Global do Clima, e na construção de cidades sustentáveis e saudáveis.

8.1. ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA

A análise da dinâmica da circulação atmosférica regional foi realizada para as datas de 01 até 10 de maio de 2020 e resultou na identificação da atuação de sistemas tropicais, polares e frontais. Trata-se de uma época historicamente representativa do período ameno e seco para Presidente Prudente. Nesse sentido, é importante relatar que, de modo geral, os sistemas atmosféricos estáveis atuantes no Brasil são as massas Tropical Atlântica (TA), Tropical Continental (TC), Polar Atlântica (PA) e Polar Tropicalizada (PT). Já os sistemas que trazem condições instáveis são as frentes, principalmente a Polar Atlântica (FPA) e a Estacionária (FE), bem como a Zona de Convergência de Umidade (ZCOU), Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Instabilidade Tropical (IT).

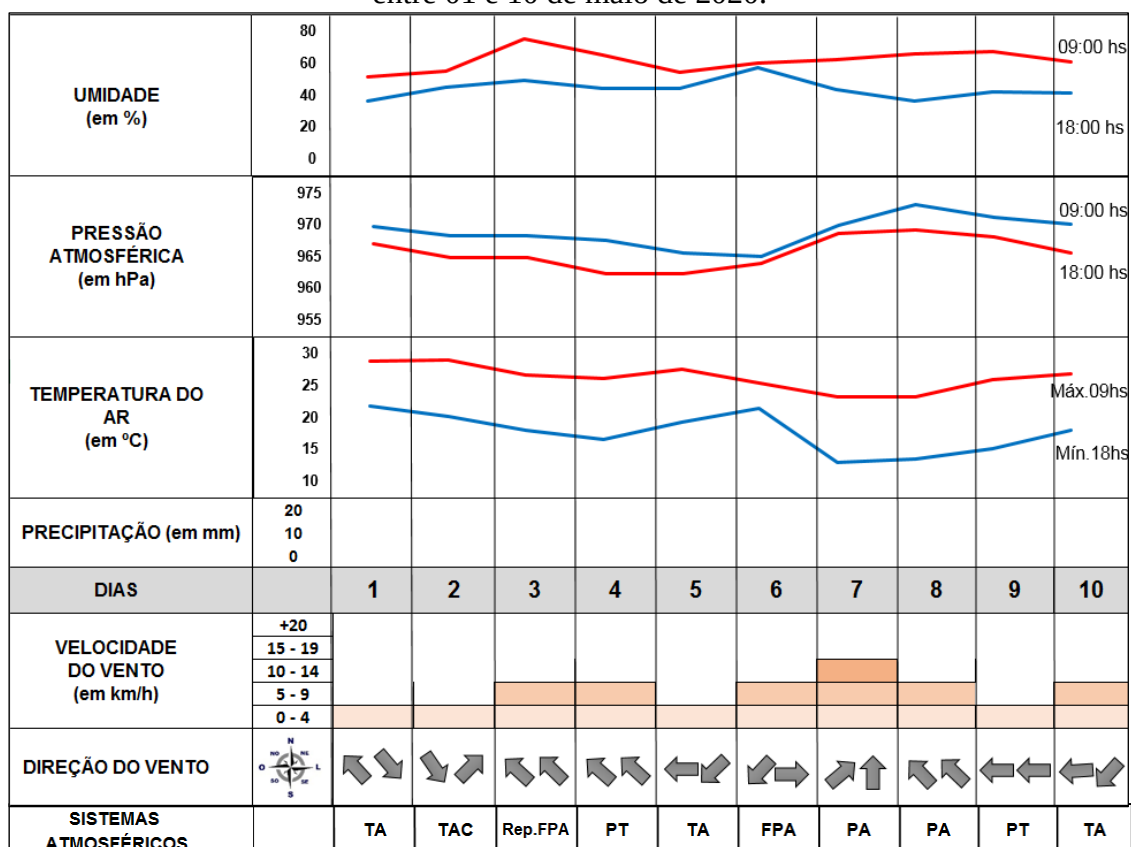
O gráfico com a representação contínua e simultânea dos elementos climáticos, condições atmosféricas e tipos de tempo (Figura 42) foi então organizado a partir dos dados meteorológicos registrados pela estação meteorológica, com auxílio das informações sinóticas fornecidas por imagens do satélite GOES 16 (Figura 41).

Figura 41: Cartas sinóticas dos episódios de 01 até 10 de maio de 2020 (18h).



Fonte: INPE, 2021. Organizado pela autora.

Figura 42: Variação temporal dos elementos climáticos e sistemas atmosféricos atuantes entre 01 e 10 de maio de 2020.



Fonte de dados: Estações Meteorológicas UNESP e UNOESTE.

Elaborado pela autora.

Constatou-se que houve pouca atuação de sistemas instáveis (frentes e suas repercussões) – somente em 03 e 06 de maio -, não sendo registrada precipitação no período. Observou-se forte atuação dos sistemas estáveis (altas pressões), com ocorrência dos sistemas tropicais (TA e TAC) em 01, 02, 05 e 10 de maio, e dos sistemas polares (PT e PA) em 04, 07, 08 e 09 de maio.

Nos dois primeiros dias do mês, sob a influência de sistemas tropicais, as temperaturas do ar ficaram em torno de 25°C, com ventos fracos. O primeiro deles, a TA, é proveniente do anticiclone do Atlântico, e o segundo, a TAC, é uma massa de ar secundária derivada de TA, uma vez que ao se deslocar em direção ao interior absorve características continentais e perde parte de sua umidade, chegando ao oeste paulista com menor quantidade de água e temperatura mais elevada.

A estabilidade é interrompida em 03 de maio pela atuação de um sistema frontal (Repercussão da FPA). Segundo Sant'Anna Neto e Tommaselli (2009), tais sistemas geram instabilidade atmosférica na área de descontinuidade das massas de ar em virtude da natureza frontal, ou seja, sua formação se dá pelo encontro de dois sistemas antagônicos (polar e

tropical). Assim, nesta data nota-se diminuição da temperatura do ar, aumento da umidade relativa, e aumento da velocidade dos ventos, que atingem 5,8km/h do quadrante sudeste.

Nos dias 04 e 05 de maio observa-se o retorno de sistemas estáveis, de natureza polar e tropical respectivamente (PT e TA). A massa Polar Tropicalizada é caracterizada pela diminuição gradativa da pressão atmosférica e aumento da temperatura após o domínio do ar polar, enfraquecido na latitude dos trópicos, e também relacionado à absorção de atributos superficiais. Consequentemente, registrou-se queda da pressão atmosférica em 04/05 (962,3hPa às 18h), acompanhado de elevação da temperatura do ar em 05/05 (27,5°C às 18h) com ventos de leste e nordeste.

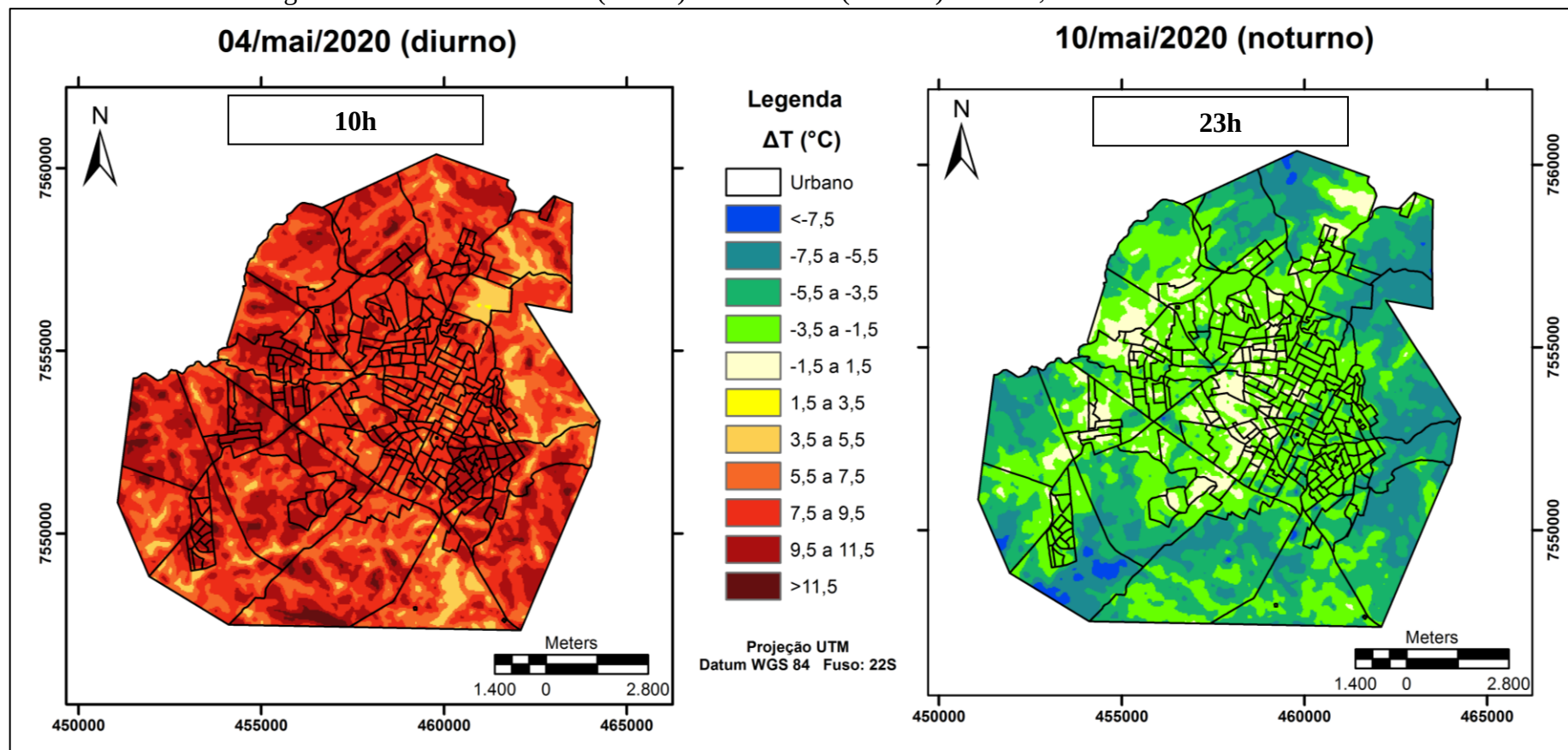
Conforme a carta sinótica de superfície de 06/05, que registra a passagem da FPA, nota-se um ciclone extratropical no leste da Argentina e sul do Uruguai, cuja frente fria encontra-se entre os estados do Paraná e São Paulo. Assim, houve leve instabilidade na região de Presidente Prudente, com diminuição da temperatura mínima do ar, que foi de 21,4°C às 9h.

Nos três dias seguintes há atuação de sistemas polares, sendo a massa Polar Atlântica em 07 e 08 de maio, seguida da massa Polar Tropicalizada em 09 de maio. O ramo Atlântico do anticiclone migratório polar origina a mPa, marcada pelas baixas temperaturas, de tal forma que nessas datas ocorreu aumento da pressão atmosférica (969,1hPa às 18h de 08/05), e diminuição da temperatura (com $T_{\min}=13,4^{\circ}\text{C}$ às 9h de 08/05). Finalmente na carta sinótica de 10/05 é possível identificar o anticiclone marítimo próximo ao litoral do Sudeste, que aliado com os registros de ventos predominantes de leste e nordeste, configuraram a ação da massa Tropical Atlântica, com tênue elevação das temperaturas.

Em síntese, constatou-se que esse período foi caracterizado por condições sinóticas estáveis e temperaturas amenas devido à entrada de massas de ar frio. Uma vez atendido o pressuposto da estabilidade, foi possível prosseguir com a análise comparativa das cartas de ΔT diurna, de 04 de maio, e noturna, de 10 de maio, sob a premissa de corresponderem à mesma data de tomada pelo satélite – apenas em horários distintos.

Além da influência dos tipos de tempo, Oke (1982) explica que as anomalias da camada do dossel são em grande parte resultado do caráter imediato do local - especialmente a geometria e os materiais construtivos. Nessa perspectiva, foi gerada uma escala única para ΔT , como mostra a Figura 43, incluindo toda amplitude dessas datas e assumindo pertencerem ao mesmo ciclo diário para viabilizar o estudo relacionado à inércia térmica.

Figura 43: Cartas de ΔT de 04 (diurno) e 10 de maio (noturno) de 2020, considerando ciclo diário.



Fonte: Elaborado pela autora.

As cartas de ΔT revelaram respostas antagônicas, como esperado, compatíveis com os períodos de tomada das imagens, ou seja, valores positivos para o dia (04/05) e predominantemente negativos para a noite (10/05) - mais quentes e mais frios que a estação meteorológica, respectivamente. No horário da imagem diurna (próximo às 10h), as superfícies estão recebendo radiação, e conseqüentemente o fluxo de calor incidente é maior do que o emitido (OKE *et al.*, 2017). Por outro lado, no horário da carta noturna, por volta das 23h, o saldo do balanço de energia é negativo, sendo resultado das características termodinâmicas das superfícies urbanas, bem como da ação dos ventos.

Resultados similares foram obtidos por Amorim *et al.* (2021) em pesquisa também realizada para Presidente Prudente e fazendo uso de uma imagem termal diurna e uma noturna (outubro e novembro, respectivamente). Neste caso, foram comparadas as temperaturas de superfície aos registros de temperatura do ar em vários pontos (estes medidos por sensores móveis), e constatou-se que nas áreas construídas, as temperaturas da superfície se elevam acentuadamente acima das temperaturas do ar durante o dia e o contrário ocorre à noite: as temperaturas do ar são superiores às temperaturas dos alvos.

A carta do período diurno da Figura 43 não apresentou valores negativos, revelando a maioria dos pixels com ΔT s entre 5,5 e 11,5°C, que correspondem a temperaturas de superfície de 26,3 e 32,3°C. Observou-se valores mais elevados ($\Delta T > 9,5^\circ\text{C}$) em várias áreas da cidade, configurando não apenas uma, mas várias zonas aquecidas. Dentre elas, destacaram-se em função da maior extensão, conjuntos de bairros localizados no sudeste e oeste do núcleo urbano.

Nesse sentido, também chamaram a atenção os bairros do Ana Jacinta, à sudoeste, e Jardim Humberto Salvador, no extremo norte, que exibiram ΔT s elevados mesmo localizados na periferia da cidade, porém caracterizados por elevada densidade construtiva. No que se refere aos pontos mais frios durante o dia ($1,5 < \Delta T < 5,5^\circ\text{C}$), eles se concentraram especialmente em áreas periféricas e próximas ao rural, locais com cobertura de vegetação rasteira e/ou arbórea. Cabe salientar que nesta data houve atuação de uma massa Polar Tropicalizada, com ventos de 7,6km/h de sudeste às 9h, o que tendo em vista o horário de tomada da imagem Landsat (10h) pode ter contribuído para a amenização do calor nas áreas centrais.

Por outro lado, a carta noturna da Figura 43 exibiu predomínio de ΔT s negativos, o que significa que as coberturas estavam com temperaturas inferiores à do ar na estação meteorológica a noite. Ressalta-se que a maioria dos valores da variável térmica ficou

entre -7,5 e -1,5°C (13,6 e 19,6°C em termos de TS, respectivamente). Todavia, é possível notar que a área central e oeste do núcleo urbano estavam menos frios em relação à periferia, pois neles predominaram pixels com ΔT s superiores a -3,5°C. Em 10 de maio a região de Presidente Prudente estava sob ação de uma TA (Tropical Atlântica) mais úmido e menos quente, o que possivelmente propiciou o aumento da radiação solar direta sobre a superfície dos alvos e maior armazenamento de calor durante o dia pelos materiais construtivos urbanos. Consequentemente, tais áreas apresentaram diferenças menores, embora inferiores a zero, em relação à T_{ar} da estação a noite, indicando significativo acúmulo de energia térmica ainda às 23h.

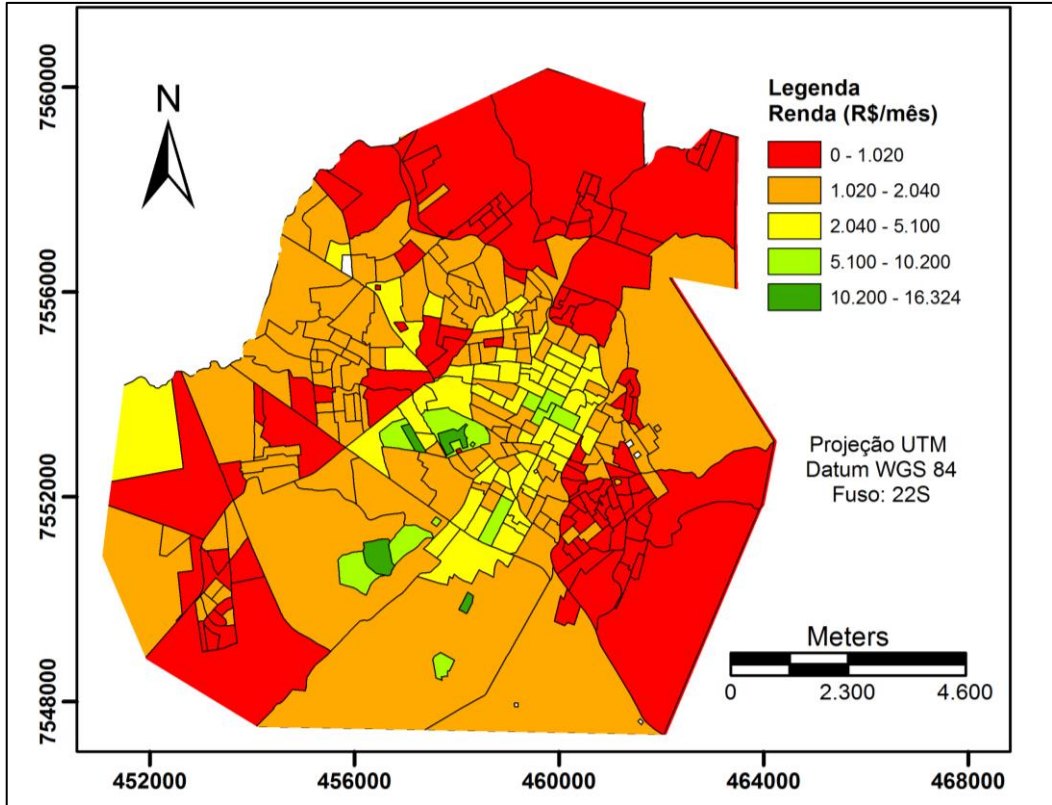
8.2. CARACTERÍSTICAS SOCIOECONÔMICAS

Os padrões de vulnerabilidade existentes enfatizam a necessidade de considerar a desigualdade estrutural na elaboração de incentivos, engajamento público e planos de emergência que não exacerbem ou agravem a desigualdade existente (LIN *et al.*, 2021). Nesse sentido, enfatiza-se o papel do planejamento urbano como instrumento de interferência e mudança.

Em capítulos anteriores os fatores explicativos do clima urbano foram relatados e discutidos, sobretudo do ponto de vista físico. Entretanto, trata-se de um fenômeno cuja gênese é mais complexa, com repercussões na superfície e nas relações entre sociedade e natureza. No estudo de Jenerette *et al.* (2007) para Phoenix (EUA), por exemplo, os autores concluíram que a condição socioeconômica influencia a quantidade e qualidade da vegetação no local, que por sua vez, influencia a temperatura de superfície. Como a análise e discussão do modelo econômico e seus efeitos sociais é possível numa escala mais “fina”, nesta etapa da pesquisa foi realizada a caracterização socioeconômica da zona urbana de Presidente Prudente, por meio de três cartas: Renda, Exclusão-Inclusão Social e Índice de Vulnerabilidade Social (SoVI®, proposto por Susan Cutter, 2003).

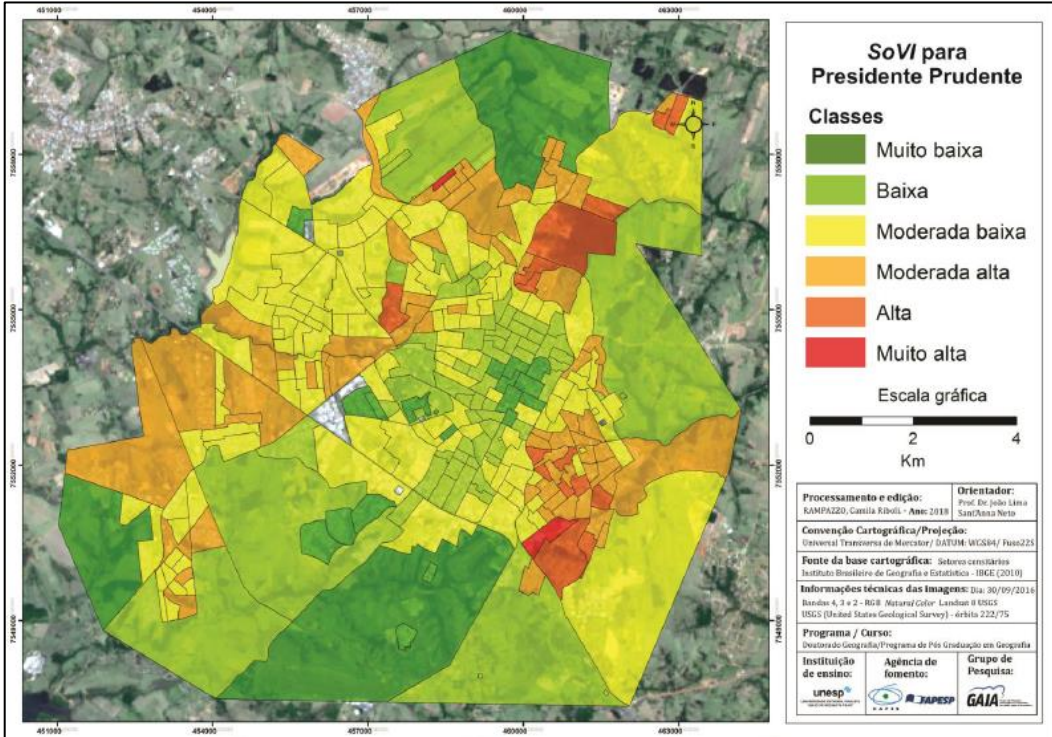
As cartas de Renda (Figura 44), Exclusão/Inclusão Social (Figura 45) e Índice de Vulnerabilidade Social (SoVI®) (Figura 46) revelaram a fragmentação da cidade de Presidente Prudente. O processo de produção do espaço urbano diferenciado na dinâmica de urbanização resultou na descontinuidade dos padrões de habitação e do ambiente construído no entorno, de renda e de exclusão/inclusão social, cuja combinação originou por sua vez, uma cidade dividida espacialmente também sob a perspectiva da vulnerabilidade.

Figura 44: Carta de renda da área urbana de Presidente Prudente.



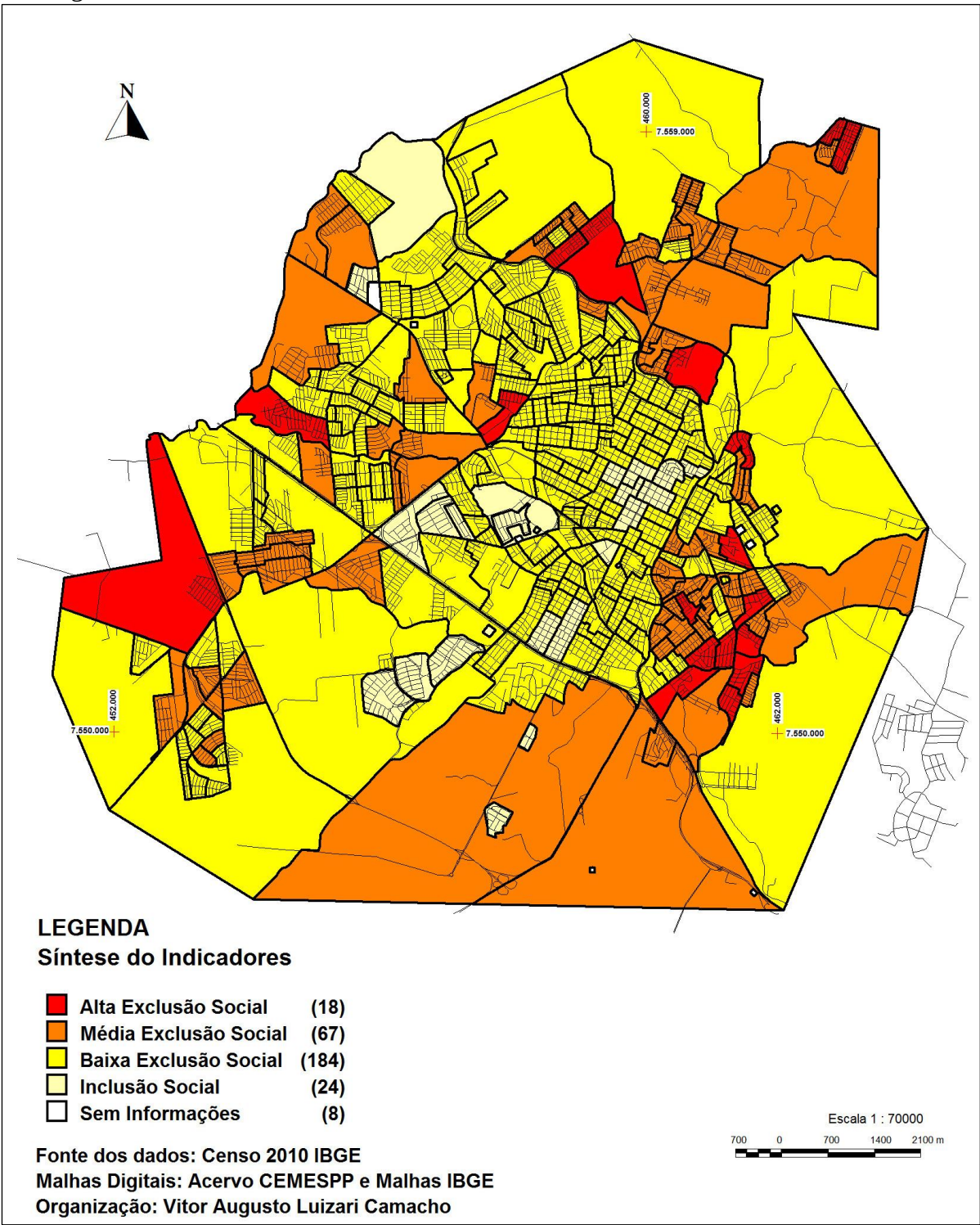
Fonte de dados: IBGE, 2010. Elaborado pela autora.

Figura 46: Carta do SoVI® da área urbana de P. Prudente.



Fonte: Rampazzo, 2019.

Figura 45: Carta de Exclusão/Inclusão Social da área urbana de Presidente Prudente.



Fonte: Camacho, 2013.

Os setores norte, leste e oeste apresentam concentração de bairros residenciais populares, com empreendimentos habitacionais voltados para segmentos socioeconômico de menor renda, dentre eles: os residenciais Cremonezi e Tapajós, os conjuntos habitacionais Brasil Novo e João Domingos Netto ao norte, o Jardim Paraíso e Jardim Marisa a leste, e COHAB e CECAP a oeste. Estas áreas são dotadas de alta densidade populacional, padrão construtivo adensado, lotes menores e baixa ou nula densidade de arborização. São classificados com vulnerabilidade “alta” a “muito alta”, e seus indicadores de exclusão/inclusão social são piores, variando de baixa até alta exclusão social.

A zona sul é caracterizada por condições opostas às do setor norte: melhores indicadores de exclusão/inclusão social, bem como índices de vulnerabilidade “baixa” a “muito baixa”. É marcada pela presença de condomínios fechados e bairros residenciais com padrão construtivo elevado, constituídos por tipologia de ocupação com menor densidade construtiva, presença de áreas de lazer e piscina, lotes maiores, arborização densa e telhados em sua maioria de cerâmica. Neste caso, cabe citar: os residenciais fechados horizontais Parques Residenciais Damha, Residencial Porto Madero e o bairro Parque Higienópolis.

A área central é dotada de padrão construtivo densamente edificado, solo altamente impermeabilizado, verticalização, arborização esparsa, telhados mistos com predomínio de telhas metálicas nas edificações comerciais e cerâmicas nas residenciais, além de fluxo intenso de pessoas e veículos. Com índices de vulnerabilidade “baixa” e “muito baixa” e baixa exclusão social e inclusão social, trata-se de área destinada ao uso de comércio e serviços.

Em se tratando de tipologias, por tratar-se de um padrão comum em áreas de cidades de pequeno e médio porte, vale destacar a existência de bairros com características mistas em diferentes locais da cidade, ou seja, com uso residencial/comercial, tamanho de lote e arborização diversificados, telhados de natureza variadas e indicadores socioeconômicos intermediários. Dentre eles, pode-se citar: São Judas Tadeu (zona norte), Cidade Universitária (zona sul) e Conjunto Habitacional Ana Jacinta (sudoeste). Este último, junto com outros bairros como Mário Amato, Jardim Prudentino e Residencial Monte Carlo também no extremo sudoeste e com áreas periurbanas e rurais no entorno, têm suas diferenciações socioespaciais determinadas ainda pela distância do centro principal e pelo acesso aos espaços da cidade.

As três cartas anteriores consistem num retrato das desigualdades socioespaciais da zona urbana da área de estudo. Nesse sentido destaca-se a proposta de Sant'Anna Neto (2012, p.35-36).

Se o espaço geográfico é produzido de forma altamente complexa e fortemente desigual. Se o clima é o produto da interação entre os processos dinâmicos da atmosfera e das ações dos agentes sociais, que ao produzirem novas territorialidades modificam as características fundamentais dos elementos climáticos. Então os diversos grupos sociais não experimentam nem percebem o tempo e o clima da mesma forma. Espaços desiguais potencializam efeitos do clima, igualmente desiguais. Nesta perspectiva, temos que admitir que o clima é uma construção social.

Portanto, conclui-se que, para além dos atributos da forma comumente investigados, é fundamental inserir nos estudos de clima urbano aspectos da cidade relacionados ao seu conteúdo, visto que a dimensão social é um dos pilares do desenvolvimento sustentável, e que a característica socioeconômica influencia a capacidade de adaptação e resiliência aos efeitos ambientais adversos, inclusive os de cunho climático.

8.3. A PERSPECTIVA DO CONTEÚDO

Além dos atributos naturais dos tipos de tempo, aqueles específicos da superfície, especialmente as formas de uso e ocupação da terra, propiciam diferenças térmicas intra-urbanas e determinam a distribuição espacial do calor na cidade. As cartas anteriores mostram os campos térmicos diurno e noturno e os aspectos socioeconômicos para a zona urbana de Presidente Prudente, revelando diferenças de ΔT intraurbanas e entre dia e noite, bem como diferenciações de renda, exclusão/inclusão social e vulnerabilidade conforme a localização geográfica. Isto evidencia, portanto, a existência de desigualdades de naturezas distintas, inclusive climática, consequências da produção desigual do espaço urbano.

Temperatura, clima, renda, exclusão/inclusão e vulnerabilidade social são aspectos ligados a princípios como igualdade, sustentabilidade e dignidade; estes por sua vez apontados nos parâmetros de cidades sustentáveis e preconizados pela ONU na Agenda 2030. O desenvolvimento sustentável tem por prerrogativa o emprego de soluções integrativas e integradoras, de modo a conciliar a questão ecológica, social, econômica e cultural. Portanto, incorporar a dimensão social na análise e interpretação do clima urbano é imprescindível para alcançá-lo, bem como os ODS da referida estratégia global.

Assim, foram selecionadas oito áreas representativas da cidade de acordo com os seguintes critérios: tipologias e materiais construtivos e características socioeconômicas

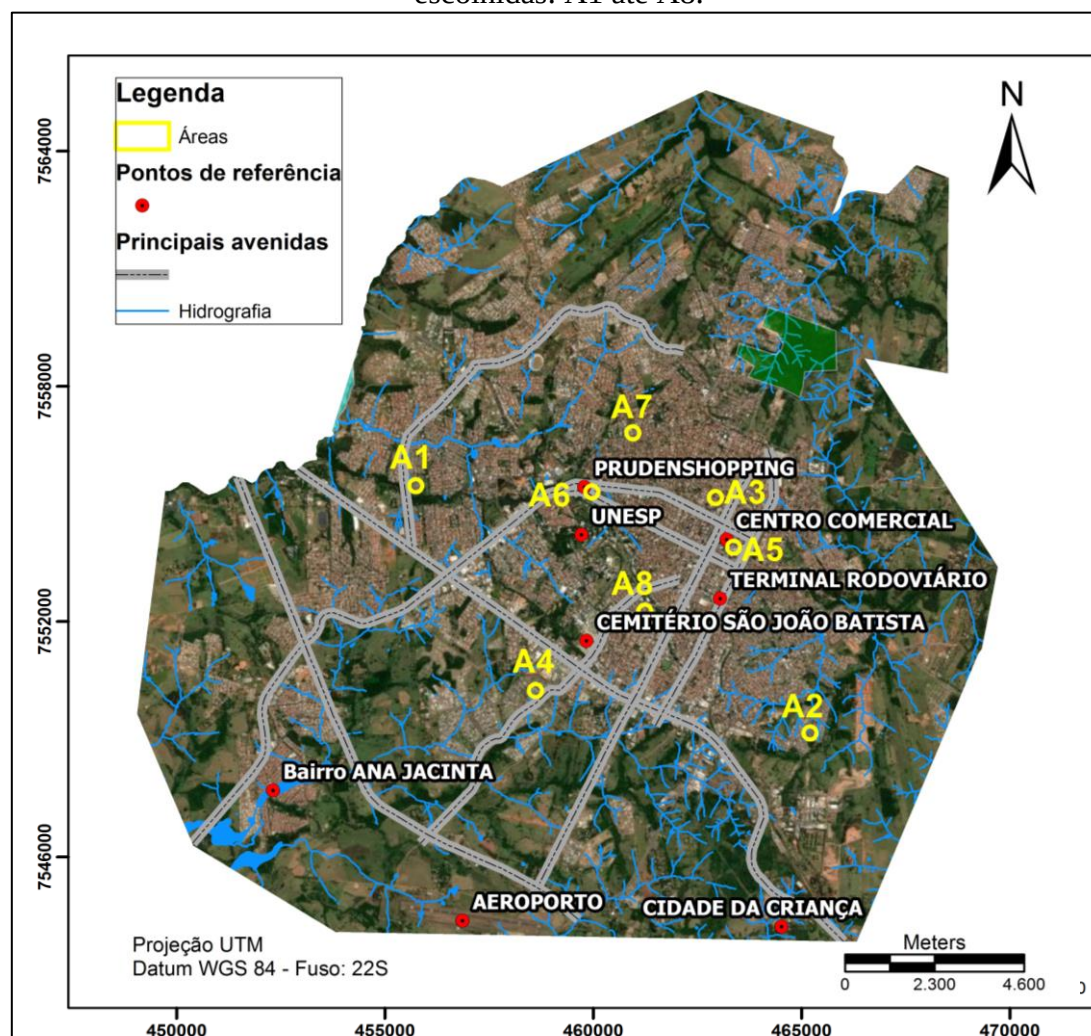
(renda, exclusão/inclusão e vulnerabilidade social). À essas informações qualitativas foram identificadas e acrescentadas ainda suas respectivas classificações da paisagem conforme a metodologia de Zonas Climáticas Locais (LCZ – STEWART e OKE, 2009). A síntese dos atributos das áreas escolhidas bem como sua localização estão no Quadro 14 e na Figura 47, respectivamente.

Quadro 14: Síntese das características das áreas escolhidas.

ÁREA	TIPOLOGIAS	NOME/LOCALIZAÇÃO	LCZ
1	Bairros vulneráveis de baixa renda com telhado de fibrocimento	CECAP (Zona Oeste)	3
2		Jardim Paraíso (Zona Sudeste)	3
3	Bairros de classe média/alta com telhado de cerâmica	Jardim Aviação (Centro)	3
4		Dahma 1 (Zona Sul)	6
5	Bairros com telhados metálicos e grandes áreas asfálticas	Quadrilátero W. Luis/Manoel Goulart/Av. Brasil/Cel. Marcondes (Centro)	2 ₄
6		PrudenShopping (Zona Oeste)	8
7	Bairros mistos residencial/comercial com telhados variados	São Judas Tadeu (Zona Norte)	3 ₅
8		Cidade Universitária (Zona Sul)	3 ₅

Fonte: Elaborado pela autora

Figura 47: Localização das áreas do perímetro urbano de Presidente Prudente escolhidas: A1 até A8.

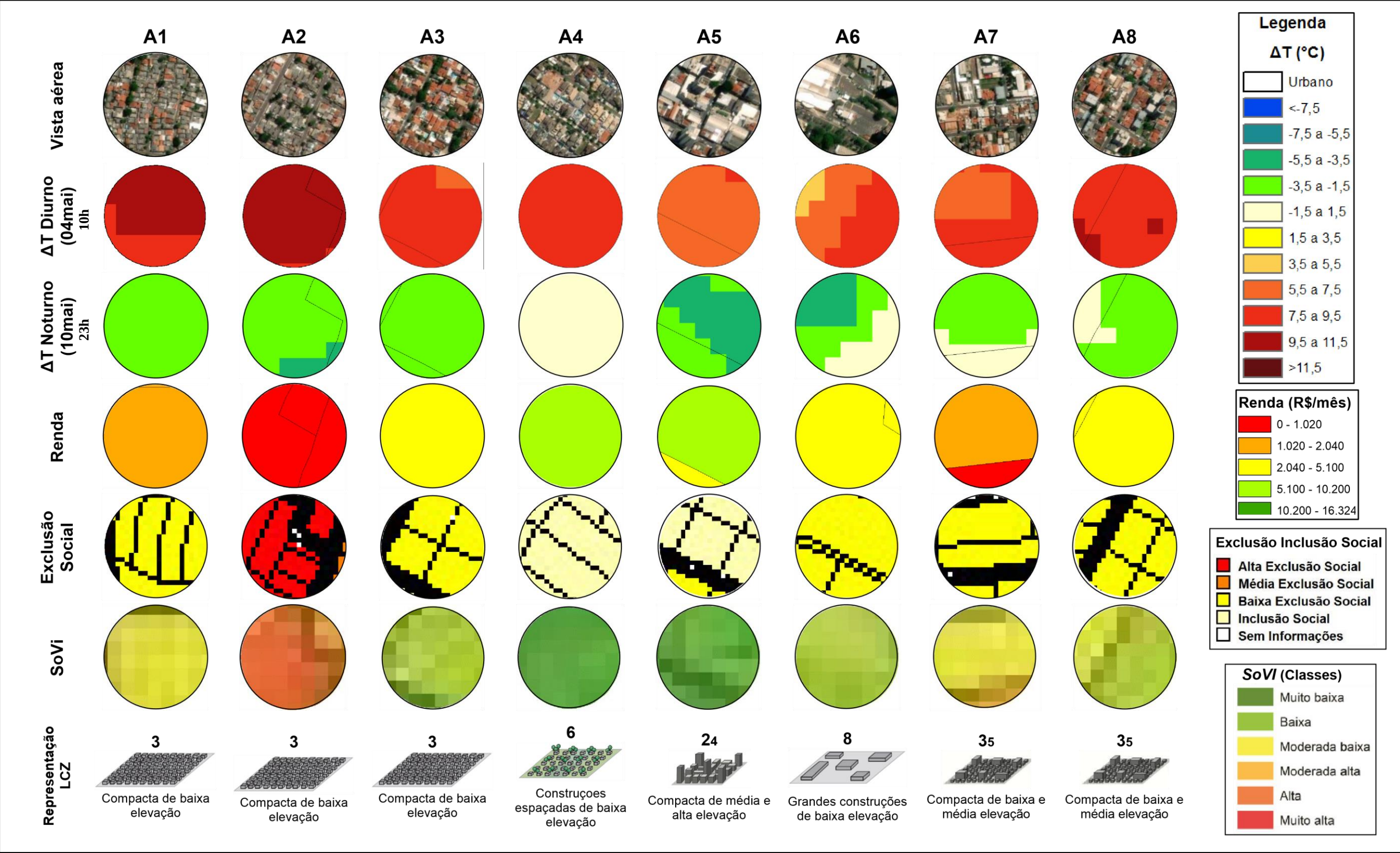


Fonte: Esri ArcMap, 2021. Elaborado pela autora.

Todas as informações qualitativas das áreas escolhidas foram organizadas no painel da Figura 48, juntamente com as classes de diferença de temperatura dos períodos diurno e noturno para analisar a resposta termal, considerando fatores explicativos de cunho físico, mas sobretudo do ponto de vista da articulação com os segmentos sociais ali residentes. Isto é fundamental porque, as escalas finas, ou seja, os climas locais (mesoclimas e topoclimas) e os microclimas relacionam-se com o próprio cotidiano da sociedade e os ciclos do mundo natural (SANT'ANNA NETO, 2013).

As respostas térmicas das áreas 1 até 8 foram descritas quantitativamente em termos de variável absoluta no Quadro 15, ou seja, a média da temperatura de superfície.

Figura 48: Painel síntese com tipologias e materiais construtivos, respostas diurna e noturna da variável térmica e atributos socioeconômicos em A1 até A8.



Fonte: Elaborado pela autora.

Quadro 15: Valores de temperatura de superfície: médias e diferença entre dia e noite.

ÁREA	1	2	3	4	5	6	7	8
TS DIA (°C)	30,5	31,4	28,7	29,7	27,4	28,0	28,5	30,1
TS NOITE (°C)	18,4	18,1	19,2	20,1	17,4	18,5	19,2	19,5
TSD-TSN (°C)	12,1	13,3	9,5	9,5	10,0	9,5	9,3	10,6

Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com Jensen (2009), a mudança de temperatura medida (ΔT) está inversamente associada à inércia termal, ou seja, um alto valor de ΔT geralmente está relacionado com materiais do terreno que têm um baixo valor de inércia termal. Sob essa perspectiva, nas áreas 1 e 2, ambas na LCZ 3, observaram-se valores de ΔT mais elevados para o horário das 10h, sendo em sua maioria de 9,5 a 11,5°C, enquanto ΔT variou de -3,5 a -1,5 às 23h. Isto equivale a médias de temperatura de superfície de 30,5 e 31,4°C (diurno), e 18,4 e 18,1°C (noturno), respectivamente para A1 e A2. Resultados compatíveis foram observados em outro ponto de LCZ 3 para a zona urbana de Presidente Prudente por Amorim *et al.* (2021), que constataram temperaturas superficiais entre 20,4°C e 21,2°C para uma noite de primavera.

As diferenças das temperaturas dos alvos entre o dia e a noite atingiram os maiores valores: 12,1°C para a CECAP e 13,3°C para o Jardim Paraíso, sugerindo materiais de cobertura com baixa inércia térmica em relação às demais áreas analisadas. As temperaturas de brilho mais altas durante o dia ocorrem em facetas constituídas de materiais com baixa inércia térmica, que resistem à transferência de calor para o substrato e concentram-no numa camada superficial fina que fica muito quente (por exemplo, telhados); enquanto à noite, os telhados ficam relativamente frios, pois têm uma reserva limitada de calor para extrair em relação às superfícies das estradas (OKE *et al.*, 2017). A este cenário somam-se ainda a precariedade das habitações e da qualidade do ambiente urbano associada aos piores indicadores de renda, exclusão/inclusão e vulnerabilidade social.

Por outro lado, as áreas 3 e 4 – nas LCZs 3 e 6 respectivamente –, exibem condições opostas, com respostas térmicas menos elevadas durante o dia e diferenças de TS entre dia e noite por volta de 9,5°C, além de bons indicadores socioeconômicos. Desta forma, sugerem um ambiente constituído por superfícies de elevada inércia térmica.

É válido destacar que A1, A2 e A3 enquadraram-se na LCZ 3, que corresponde a classe compacta de baixa elevação. De fato, Chen *et al.* (2020) afirmam que algumas categorias de LCZ com temperaturas de superfície relativamente altas tendem a esfriar à

noite, como LCZ 3, e que isto pode ser em função da menor carga térmica de edificações baixas. Entretanto, embora as três áreas possuam mesma geometria construtiva (LCZ 3), há diferença do ponto de vista dos fatores físicos na composição dos telhados, sendo: fibrocimento em A1 e A2, e cerâmica em A3. Isto evidencia o papel dos materiais construtivos, notadamente de superfície, na construção do clima urbano e no conforto térmico dos habitantes, porque A3 apresentou diferença de TS significativamente inferior à A1 e A2.

A área 4 está localizada em um condomínio horizontal fechado, e chama atenção também por apresentar temperatura de superfície muito próxima da temperatura do ar na estação meteorológica no período noturno. A4 foi a única dentre as oito áreas que mostrou tal comportamento possivelmente em função de sua estrutura urbana, marcada por construções espaçadas de baixa elevação, combinada com a presença de espaços permeáveis (jardins e gramados) e arborização, além dos materiais construtivos já relatados anteriormente.

As áreas caracterizadas por telhados metálicos e grandes superfícies asfaltadas, A5 e A6, apresentaram diferenças de TS entre 9,5 e 10°C. Entretanto, em virtude da baixa emissividade desses tipos de telhados, não é possível relacionar tal resultado com a inércia térmica, pois trata-se de materiais nos quais a temperatura de brilho pode ser muito menor do que sua temperatura cinética. O trabalho da EPA (2008) detalha por exemplo, que telhados de metal nu ou com superfície metálica (alta refletância e baixa emitância) podem aquecer até 66-77°C e telhados frios (alta refletância e alta emitância) atingem temperaturas máximas de apenas 43-46°C no sol de verão.

Há de se destacar ainda em A5, na LCZ 24 – compacta de média e alta elevação, a influência da sombra bem como do reduzido fator de visão do céu (SVF) decorrente da verticalização do centro urbano, que tendem a propiciar: aquecimento lento durante o dia e resfriamento lento das superfícies a noite, uma vez que as trocas de radiação de onda longa com a atmosfera são restritas. Em se tratando da situação socioeconômica, são locais de uso predominantemente comercial e de prestação de serviços, que apresentam bons indicadores de renda, exclusão/inclusão e vulnerabilidade social devido à dinâmica do setor terciário.

A heterogeneidade de A7 e A8, classificados como LCZ3₅ – compacta de baixa e média elevação, resultou em diferenças de TS mais próximas dos valores de A3 e A4, ou seja, sugeriram materiais construtivos com maior inércia térmica.

Conforme Akbari *et al.* (2009), muitos estudos realizados nos EUA demonstraram reduções superiores a 20% nos custos de refrigeração para edifícios cujo albedo do telhado aumentou de 10 a 20% para cerca de 60%. Os autores ainda destacam como benefício, que

superfícies urbanas frias, principalmente os telhados frios, proporcionam economia de energia significativa e, portanto, redução nas emissões de GEE (Gases de Efeito Estufa), uma das maiores preocupações ambientais globais. Tendo em vista a diversidade de tipologias construtivas e condições socioeconômicas típicas da área de estudo, bem como de muitas cidades brasileiras, associada ao fato de as questões térmicas repercutem diretamente no contexto energético, dados de consumo de energia elétrica foram integrados nesta análise.

O Quadro 16 mostra os registros de consumo de energia elétrica mensal (em KWh) de residências unifamiliares representativas das 8 áreas (A1 até A8, sendo um domicílio por área), de junho de 2019 até maio de 2020, que corresponde ao recorte temporal inicial desta pesquisa. Além disso, é apresentado ainda o consumo total de energia elétrica mensal (em GWh) do município de Presidente Prudente para este mesmo período.

Quadro 16: Consumo de energia elétrica mensal de residências e total do município, registros de temperatura do ar da Estação Meteorológica do INMET.

Consumo de energia elétrica mensal (KWh)													
Época		2019							2020				
		jun	jul	ago	set	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr	mai
Temperatura (°C)	Max abs	30,5	31,2	37,3	38,6	38,4	38,1	35,8	36,9	35,2	35,0	34,3	31,2
	Méd max	27,8	27,1	29,5	32,5	34,1	33,4	31,7	32,1	30,7	31,6	29,7	26,5
	Média	22,0	20,4	22,3	25,4	27,1	26,7	25,7	26,0	25,1	25,6	23,4	20,3
	Média min	17,5	15,1	16,5	19,5	21,1	21,5	21,4	21,9	21,3	20,4	17,9	15,2
	Mín abs	11,6	3,5	10,6	14,7	17,4	17,3	18,6	19,4	17,8	17,9	10,8	8,4
Residência		jun	jul	ago	set	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr	mai
1	CECAP	172	174	188	193	218	188	194	208	218	212	242	198
2	Jd Paraíso	92	75	104	111	104	103	131	104	133	149	148	115
3	Jd Aviação	397	372	370	433	516	372	478	383	479	480	468	421
4	Dahma	517	615	539	540	435	340	349	374	453	590	476	817
5	Centro	289	287	320	307	312	347	394	337	373	338	328	216
6	Prudenshopping*	130	136	141	174	190	224	162	96	100	192	154	152
7	São Judas	180	184	181	206	240	214	251	195	245	206	221	107
8	Cid Universitária	291	313	285	306	396	360	354	401	360	355	407	330
Total município (×10 ⁶ ou GWh)		41,3	39,9	41,5	46,5	51,3	53,0	51,9	50,5	51,4	49,5	45,6	40,2

*Por tratar-se de uma edificação com uso exclusivamente comercial, estes dados correspondem ao consumo de energia de uma residência próxima ao estabelecimento.

Obs.: os dados domiciliares foram disponibilizados espontaneamente pelos moradores, e o total do município foi disponibilizado pela Energisa, empresa responsável pela distribuição de energia elétrica em Presidente Prudente.

Fonte: Elaborado pela autora.

Quando se observa o comportamento individual ao longo dos meses, o padrão de consumo energético das moradias não é coincidente, ou seja, alta e baixa demandas

variam entre os meses e entre as residências. Isto porque, provavelmente por se tratar de uma amostra pequena -uma residência por área-, ocorre grande influência de hábitos particulares, específicos de cada família e muitas vezes não característicos da população em geral. Pode-se citar, por exemplo, que o consumo diminui nos bairros de classe média e alta no verão devido às férias escolares, época na qual provavelmente a casa ficou fechada por dias ou semanas.

Em contrapartida, os registros de consumo de energia total do município permitem constatar uma sazonalidade relacionada aos tipos de tempo atuantes e respectivos elementos climáticos. Nesse sentido, na primavera e verão (outubro até março), épocas historicamente mais quentes, há aumento de aproximadamente 20% no consumo em comparação com os demais meses, em função da intensificação do uso de equipamentos para refrigeração.

Em se tratando do consumo comparativo entre as residências representativas de A1 até A8, verificou-se em maior quantidade de kWh mensais faturados para as casas do Dahma e do Jardim Aviação, com média respectivamente de 503 e 430kWh. Já os domicílios localizados na CECAP, Jardim Paraíso, proximidades do Prudenshopping e São Judas registraram consumos de energia mensais 50% menores ou inferiores àqueles.

Face ao fato de que o consumo de energia elétrica aponta o acesso a equipamentos e sistemas de controle e regulação térmica, este dado pode ser considerado um indicador da capacidade de resposta às condições climáticas e/ou de conforto térmico adversas. Essa consideração vai diretamente ao encontro de metas do ODS 11 e ODS 13 tais como: 11.b) Aumentar o número de cidades adotando e implementando políticas e planos integrados para a inclusão, a eficiência dos recursos, mitigação e adaptação às mudanças climáticas; 13.1) Reforçar a resiliência e a capacidade de adaptação a riscos relacionados ao clima e, 13.3) Aumentar a capacidade humana e institucional sobre mitigação da mudança do clima, adaptação, redução de impacto.

A partir dos dados do Quadro 16, conclui-se então, que locais cuja população tem menor capacidade de defesa e adaptação ao estresse térmico, com alta vulnerabilidade social e situação socioeconômica desfavorável (A1 e A2), são aqueles onde estão os cenários térmicos mais degradantes, quais sejam, maiores amplitudes de ΔT sugerindo baixa inércia térmica dos materiais, além de qualidade inadequada do ambiente urbano e das moradias. Nesse sentido, o ODS 11 da Agenda 2030 ressalta que se deve buscar garantir o acesso de todos à habitação segura e adequada (meta 11.1), e aumentar a urbanização inclusiva e sustentável (meta 11.3).

Por outro lado, bairros onde residem pessoas de segmentos sociais de média/alta renda (como A3 e A4), com elevada capacidade e/ou potencial de defesa a situações de desconforto térmico evidenciada pelo alto consumo de energia elétrica, são aqueles dotados de estrutura urbana com morfologia e materiais de superfície com elevada inércia térmica, que favorecem temperaturas mais amenas.

Essa mesma relação contraditória entre condições socioeconômicas e campo térmico urbano também foi observada por Mitchell *et al.* (2014) em Pinellas (Flórida), onde a temperatura de superfície encontrada foi significativamente maior em setores censitários caracterizados por porcentagens mais altas de certas minorias raciais/étnicas e taxas de pobreza mais altas, ou seja, grupos particularmente vulneráveis. Os autores defendem ainda que se trata de uma paisagem de desigualdade térmica: distribuição desigual de calor dentro do ambiente urbano construído e uma estrutura comunitária com vulnerabilidade variável.

Cabe destacar nesse sentido, que quando se trata de eficiência térmica e condições de moradia, há que se considerar iniciativas voltadas ao uso racional e conservação dos recursos naturais, ao seu consumo consciente e ao combate ao desperdício, em detrimento a adoção de políticas que favoreçam o acesso da população a equipamentos de controle de temperatura interna (sistemas ativos), o que aumentaria o consumo de energia por exemplo. Portanto, deve-se priorizar e estimular medidas que promovam a eficiência térmica das residências pelo uso de materiais construtivos mais adequados, bem como explorar o potencial das fontes de energia renováveis - especialmente solar para a área de estudo, e a eólica para outras localidades brasileiras.

Numa perspectiva horizontal, retomando o Quadro 15, tal desigualdade pode ser quantificada, de tal modo que a diferença de TS entre A2 e A4 (área com pior e melhor condições socioeconômicas e de vulnerabilidade, respectivamente) foi de 1,7 °C (positivo) às 10h e 2,0°C (negativo) às 23h. O estudo de Jenerette *et al.* (2007) em Phoenix revelou resultado semelhante, no qual entre setores censitários, nos 10% mais baixos e os 10% mais altos da distribuição de renda, foram observadas diferenças médias de temperatura de superfície de 1,4°C em uma manhã de maio.

Outros assuntos além do conforto térmico, eficiência energética, qualidade do ambiente urbano, habitabilidade e resiliência, estão associados a temperatura e ao clima urbano, e como já demonstrado, aos materiais construtivos no que se refere principalmente a suas propriedades termodinâmicas. Nesse sentido, é importante citar ainda a repercussão da amplitude térmica na saúde das pessoas, o efeito sobre a vida útil

dos materiais em geral, a emissão e geração de resíduos em função da falta de eficiência no uso dos recursos. Tais questões representam claramente uma oportunidade para atuação dos gestores públicos urbanos no atendimento aos ODS, neste caso pertinentes a metas como por exemplo: Fortalecer esforços para proteger e salvaguardar o patrimônio cultural e natural do mundo (11.4); Reduzir o impacto ambiental negativo *per capita* das cidades, prestando especial atenção à qualidade do ar e gestão de resíduos municipais (11.6) e; Promover mecanismos para a criação de capacidades para o planejamento relacionado à mudança do clima (13.b).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A hipótese desta tese de que o clima urbano, do ponto de vista físico, associado aos processos de produção do espaço, como dimensão que qualifica a análise geográfica do clima, pôde ser comprovada com os resultados alcançados.

Partiu-se de uma escala de análise mais ampla, tanto na perspectiva temporal quanto espacial, na qual o perímetro urbano e seu entorno próximo foram estudados por meio do ciclo anual da variável térmica nos períodos diurno e noturno, e por meio da análise episódica de quatro datas frente aos índices de vegetação, água e área construída. Em seguida, adentrou-se a cidade (escala mais fina) também considerando episódios de interesse, e contemplou-se apenas o perímetro urbano (núcleo urbano e periferia), por meio de três trajetos (L-O, N-S e NE-SO) e oito áreas representativas das características físicas e socioeconômicas, respectivamente.

Para tanto foram utilizadas principalmente técnicas e produtos de Sensoriamento Remoto, que se mostraram fundamentais, eficientes e eficazes no estudo do efeito climático – especialmente térmico com a temperatura de superfície - da área urbana de Presidente Prudente. Permitiram, dentre outros resultados e benefícios, tanto a análise por meio de recursos quantitativos quanto de uma abordagem descritivo-analítica. Possibilitaram ainda, a investigação integrativa em diferentes escalas espacial e temporal, distintas óticas (horizontal e vertical/transversal), e sob a perspectiva de um clima físico e socialmente construído, com a inclusão dos atributos de renda, vulnerabilidade e exclusão social.

Enfatiza-se que esses procedimentos metodológicos são interessantes sobretudo para o estudo do clima urbano de cidades médias, marcadas pela diferenciação socioespacial, fragmentação e presença de polinúcleos urbanos. Destaca-se também que as características radiativas representadas pelas imagens de satélite são de uma "superfície" estritamente plana, de modo a contemplar as respostas provenientes de telhados e copas de árvores por exemplo, mas não de elementos verticais como paredes.

Sem dúvida, uma limitação desta pesquisa foi quanto à adoção de apenas um valor de emissividade para derivar os valores de temperatura da superfície para toda a cidade, fato que restringiu algumas constatações referentes a objetos com baixa emissividade (telhados metálicos nesse caso).

A partir da caracterização do campo térmico urbano para o ciclo anual (junho/2019 até maio/2020) com ΔT (diferença de temperatura entre o alvo e T_{ar} na estação meteorológica), verificou-se que a estrutura e o padrão construtivo da cidade respondem bem às condições do mês de maio, ou seja, a maior parte da área apresentou ΔT s próximos de zero. Em contrapartida, de agosto até outubro a cidade exacerba as condições naturalmente quentes, típicas de ambientes tropicais.

Como esperado, nas cartas diurnas predominaram valores positivos e nas noturnas, negativos, e a amplitude de ΔT foi maior para o período diurno do que para o noturno. Isto porque, os fatores que atuam são diferentes conforme o período: durante o dia as superfícies absorvem a radiação solar, fazendo com que a temperatura dos alvos seja maior que a T_{ar} , enquanto que a noite ocorre perda de energia da superfície de parte dessa radiação para o ar adjacente com influência maior dos ventos e da umidade.

Nessa escala mais ampla (local), a investigação da relação entre o tipo de cobertura da terra - com os índices NDVI, NDWI, NDBI e BUI - e a diferença de temperatura em quatro episódios (diurnos: 25out19 e 20mai20, noturnos: 12ago19 e 26mai20) revelou intensidades maiores com o NDVI (negativa) e o BUI (positiva), bem como, correlações mais fortes para o dia do que para a noite.

Além da quantidade de água, ligada com a forma de transferência de energia via calor latente ou sensível, os resultados sugeriram uma dependência espaço-temporal, que evidencia efeitos potenciais causados pela estação do ano, data e horário de aquisição das imagens, bem como confirmaram a importância da escala e da unidade de análise escolhidas. Nesse sentido, ainda cabe destacar que a verificação dos pressupostos de normalidade foi fundamental para selecionar e aplicar o teste de correlação de Spearman, ao invés do de Pearson, em conformidade com as regras estatísticas.

O detalhamento dos fatores explicativos, quais sejam, relevo e tipos de coberturas (pavimentos, telhados e vegetação) com os trajetos para as datas de 25out19 (dia) e 12ago19 (noite), demonstrou uma influência maior da orientação das vertentes, do que da altitude e declividade, para as temperaturas superficiais dos materiais construtivos.

Embora o efeito da orientação das vertentes no período diurno seja imediato, esta também impactou a noite - mesmo quatro horas após o pôr-do-sol (horário de tomada da imagem) -, especialmente em função das propriedades termodinâmicas dos materiais de pavimentos e telhados, tais como baixo albedo e inércia térmica. A distribuição das vertentes associada com o movimento aparente do sol cria diferentes condições no

balanço de energia, de modo que áreas que tendem a estar mais aquecidas durante o dia são as voltadas para norte e leste, e durante a noite, são aquelas voltadas para oeste.

As temperaturas elevadas da superfície da cidade e o desconforto térmico que elas auxiliam a produzir, surgem pela falta de evapotranspiração e pelas propriedades dos materiais de construção. Nesse sentido, os telhados de cerâmica se destacaram dentre os demais tipos analisados, pois os resultados revelaram exclusivamente variações de ΔT negativas.

Para as coberturas com telhado de fibrocimento, o asfalto e o concreto verificou-se maior quantidade de aumentos do que de reduções de ΔT , o que sugere que a cerâmica pode ajudar a minimizar o aquecimento das cidades. Embora tenha-se notado predomínio de reduções de ΔT , não é possível fazer inferências sobre os telhados metálicos, porque sua baixa emissividade geralmente influencia nos registros de temperatura radiante. Para tal, seria necessário investigar mais informações sobre a emissividade, o que não era o objetivo deste trabalho.

Com relação aos materiais construtivos, reduções na temperatura superficial podem ser atingidas com o aumento do albedo e da inércia térmica. Os telhados contribuem na redução da carga térmica das edificações durante épocas quentes, e os pavimentos permeáveis auxiliam a tratar questões como escoamento superficial nas cidades, além de ajudar a mitigar o calor urbano. Cabe destacar estratégias ainda pouco aproveitadas nesse sentido, como garagens/estacionamentos acima e abaixo do solo como alternativas para estacionamentos, e deve-se também considerar o uso de jardins para telhados extensos e bem estruturados.

Melhorar o microclima urbano por meio do aumento da cobertura vegetal ocasiona benefícios para os serviços ecossistêmicos, qualidade da paisagem urbana e bem-estar da sociedade. Entretanto, investir no resfriamento vegetativo implica na criação de condições para o desenvolvimento adequado da vegetação, por exemplo cuidados com o solo, acesso à água e nutrientes e ações de manutenção. Além disso, deve-se considerar o tempo para crescimento do exemplar, no caso arbóreo, necessário para o efeito de sombreamento.

Assim, fica evidente o papel dos materiais construtivos e a relevância de mais estudos acerca dos efeitos de suas propriedades termodinâmicas no ambiente climático urbano. Martin-Vide e Moreno-Garcia (2020) acrescentam nesse sentido, que para reduzir a quantidade de calor absorvida pelo ambiente urbano e diminuir a intensidade das ilhas de calor são necessárias medidas que passam pelo reforço do isolamento térmico das habitações urbanas.

Esforços de resfriamento reflexivo associados ao vegetativo são essenciais, pois enquanto estes mostram eficácia no médio-longo prazo, àqueles revelam resultados mais imediatos, de curto prazo. Não obstante, conforme Oke *et al.* (2017), a modificação das propriedades das superfícies (como albedo e permeabilidade) deve ser realizada com uma abordagem localizada, tanto quanto estendida por toda a paisagem urbana para ter um efeito amplo. O sucesso com estratégias relacionadas à inércia térmica de edificações, por exemplo, implica em considerar a interação de vários parâmetros como condições climáticas, propriedades térmicas, ventilação, isolamento e hábitos dos usuários.

Os resultados dos trajetos permitiram verificar ainda, que a posição relativa dentro da área urbana pode ser um componente essencial para a compreensão de questões térmicas, notadamente em locais periféricos, e neste caso, também para superfícies vegetadas. Observou-se também que elevadas temperaturas superficiais podem ocorrer em diferentes locais da cidade durante o dia e a noite, o que demonstra a importância das propriedades radiativas e termodinâmicas, e indica que as imagens térmicas noturnas podem caracterizar melhor o ambiente térmico dentro de uma cidade.

Sobretudo, os resultados dos capítulos 5, 6 e 7 revelaram variações espaciais e temporais na diferença de temperatura, com diferenças sazonais entre diferentes tipos de uso/cobertura da terra. Isso destaca a necessidade dos planejadores urbanos avaliarem onde e quando (período diurno e/ou noturno) desejam aplicar estratégias de mitigação do calor.

Finalmente, o estudo de oito áreas representativas da forma (estruturas espaciais) e do conteúdo (processos históricos e sociais) da zona urbana de Presidente Prudente, demonstrou que os níveis de aquecimento/resfriamento urbano, indicados pela diferença de temperatura, são distribuídos de forma desigual em relação aos aspectos demográficos e socioeconômicos (renda, exclusão-inclusão e vulnerabilidade social e consumo de energia elétrica). Tais resultados evidenciaram que ΔT s mais elevados, menores quantidades de vegetação e materiais construtivos com baixa inércia térmica estão associados com o segmento socioeconômico mais vulnerável.

Visto que esta população, vivendo em habitações precárias, tem capacidade reduzida de adaptação/defesa aos efeitos térmicos e/ou climáticos adversos – o que também foi confirmado por seu consumo reduzido de eletricidade –, a diferenciação socioespacial proveniente da lógica da produção do espaço urbano exacerba as desigualdades já existentes. Por isso, é essencial incorporar a dimensão social na interpretação do clima urbano conforme a proposta de Sant’Anna Neto (2012), que compreende a repercussão dos fenômenos atmosféricos na superfície terrestre em um território, transformado e produzido

pela sociedade, de maneira desigual e apropriado conforme os interesses dos agentes sociais.

Mais do que conforto térmico e ambiental, cujo conceito é dotado de certa relatividade e subjetividade, é imprescindível garantir dignidade a todos os segmentos da sociedade. Assim, os distintos padrões de vulnerabilidade destacam a necessidade de considerar a desigualdade estrutural, além de aspectos culturais e da paisagem natural, na elaboração de soluções mais eficientes e equitativas para os problemas relacionados ao clima e a qualidade do ambiente urbano.

As questões térmicas repercutem diretamente no contexto energético pois as estratégias de conforto ambiental se baseiam em métodos ativos, ou seja, equipamentos e sistemas de controle e regulação térmica. Tal paradigma estimula o aumento do consumo de energia elétrica e se posiciona no sentido contrário à crescente preocupação acerca da acelerada demanda energética e da natureza de suas fontes geradoras. Sobretudo, ressalta-se nesse sentido, a oportunidade de melhorar a eficiência energética de residências, o conforto térmico dos habitantes e a qualidade ambiental urbana por meio modificações no padrão construtivo da cidade.

Assim, se os materiais construtivos são elementos fundamentais na configuração do clima urbano, e se este é essencial no contexto do desenvolvimento sustentável; então aqueles (com suas propriedades termodinâmicas) podem representar indicadores de sustentabilidade no planejamento urbano e iniciativas com esse foco podem auxiliar no cumprimento da Agenda 2030.

Diretamente esta tese propôs trazer uma contribuição ao cumprimento dos ODS 11 (Cidades Sustentáveis) e ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima), porque eles preconizam iniciativas voltadas à inclusão, segurança e resiliência climática, e sustentabilidade das cidades. Todavia, especialmente quando se agrega a dimensão social da Geografia do Clima na análise, verifica-se claramente que para alcançar tais metas deve-se lançar mão de soluções construídas coletivamente e, sobretudo, combater a desigualdade de cunho socioeconômico, que por sua vez se relaciona com a erradicação da pobreza, tema do ODS 1.

É importante lembrar que as variações da temperatura de superfície repercutem na temperatura do ar em virtude da quantidade de energia térmica que os materiais da envoltória acumulam e irradiam para a atmosfera, contribuindo para um aumento da temperatura do ar interno e externo (às edificações).

Durante o dia, as superfícies sob insolação têm sua temperatura elevada e aquecem o ar adjacente -pela transferência de calor sensível-, que sobe por convecção. Por isso, o efeito da temperatura dos alvos na temperatura do ar externo nesse período é menor a altura convencional de 1,5 a 2m (LANDSBERG, 1979). Após o pôr-do-sol, a superfície e o ar próximo esfriam através da radiação e perdem energia para a atmosfera e o céu. Como se trata de um fenômeno mais eficiente na superfície do que no ar, a temperatura da superfície é geralmente menor que a temperatura do ar durante a noite, e a transferência de calor sensível ocorre para do ar para a superfície (descendente). Além disso, no período noturno, a radiação de onda longa para o espaço e o transporte ascendente do calor armazenado no subsolo permanecem maiores, aumentando a temperatura do ar adjacente. As diversas propriedades do material de superfície geram diferentes taxas de resfriamento noturno (LANDSBERG, 1979).

A temperatura do ar interior é resultado das respostas térmicas de todas as superfícies e elementos da edificação, representando assim, o comportamento da envoltória diante das condições climáticas de um determinado local. Albedos baixos e inércias altas provocam maior armazenamento de calor e aquecimento das superfícies urbanas durante o dia, que pelo princípio do equilíbrio térmico, liberam o calor acumulado a noite e colaboram para o aquecimento do ar no interior das residências.

Longe de se esgotar o tema, vislumbram-se ideias para estudos futuros a partir dos resultados desta pesquisa. Do ponto de vista físico e com a sistemática apresentada no capítulo 7, por exemplo, deve-se buscar avançar na investigação quantitativa da influência dos tipos de cobertura da terra para as variações térmicas da superfície, fazendo uso da ferramenta dos perfis representativos e agregando simulações com várias faixas diferentes de buffer.

Acerca do aspecto social, dado o avanço em termos qualitativos com a representação da Figura 48 - que conseguiu ultrapassar os limites da análise descritiva-, é fundamental evoluir com estudos quantitativos no sentido de descobrir a dimensão, bem como outros atributos dessa desigualdade.

Por fim, os resultados desta pesquisa, ainda que apresente algumas limitações, oferecem instrumentos para o conhecimento dos processos de gênese do clima urbano pela sua matriz térmica e pode fornecer subsídios para que possamos produzir espaços urbanos mais sustentáveis como habitat para uma população mais saudável, garantindo justiça ambiental e bem-estar a todos os segmentos sociais.

REFERÊNCIAS

- ABREU, D. S. **Formação histórica de uma cidade pioneira paulista**: Presidente Prudente. Presidente Prudente: Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, 1972.
- AKBARI, H.; MENON, S.; ROSENFELD, A. Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO₂, **Climatic Change**, v.94, p.275–286, 2009.
- AKUTSU, M.; VITTORINO, F. Avaliação do conforto térmico e lumínico em conjuntos habitacionais. **Revista Técnica**, São Paulo, v.46, 2000.
- ALAVIPANAH, S.; WEGMANN, M.; QURESHI, S.; WENG, Q.; KOELLNER, T. The Role of Vegetation in Mitigating Urban Land Surface Temperatures: A Case Study of Munich, Germany during the Warm Season. **Sustainability**, v.7, p.4689-4706, 2015.
- ALMEIDA, H. A. **Climatologia Aplicada à Geografia**. Campina Grande: Eduepb, 2016.
- AMORIM, M. C. C. T.; SANT'ANNA NETO, J. L.; DUBREUIL, V. A utilização do canal termal do Landsat 7 e de transectos móveis para o estudo do clima urbano. In: **Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica**, Alto Caparaó. Anais... Uberlândia: Ufu, v.1. p.87-97, 2008.
- AMORIM, M. C. C. T.; MONTEIRO, A. As temperaturas intraurbanas: exemplos do Brasil e de Portugal. **Confins**, v.13, p.1-18, 2011.
- AMORIM, M. C. C. T. **Teoria e método para o estudo das ilhas de calor em cidades tropicais de pequeno e médio porte**. Tese (Tese de Livre-Docência) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Presidente Prudente, 2017.
- AMORIM, M. C. C. T. Spatial variability and intensity frequency of surface heat island in a Brazilian city with continental tropical climate through remote sensing. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v.9, p.10–16, 2018.
- AMORIM, M. C. C. T. Ilhas de Calor Urbanas: Métodos e Técnicas de Análise. **Revista Brasileira de Climatologia**, Ano 15, Ed. Especial, p.22-46, 2019.
- AMORIM, M. C. C. T.; DUBREUIL, V.; AMORIM, A. T. Day and night surface and atmospheric heat islands in a continental and temperate tropical environment. **Urban Climate**, v.38, p.100918, 2021.
- ARNFIELD, A. J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **International Journal of Climatology**, v.23, n.01, p.1-26, 2003.
- ATKINSON, B. W. Numerical Modelling of Urban Heat-Island Intensity. **Boundary-Layer Meteorology**, v.109, p.285–310, 2003.
- AYOADE, J. O. **Introdução à Climatologia para os Trópicos**. 4 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996.

BARBIRATO, G. M.; TORRES, S. C.; SOUZA, L. C. L. **Clima Urbano e Eficiência Energética nas Edificações** - Rio de Janeiro, 2011.

BARROS, H. R.; LOMBARDO, M. A. A ilha de calor urbana e o uso e cobertura do solo em São Paulo-SP. **Geosp – Espaço e Tempo (Online)**, v.20, n.1, p.160-177, 2016.

BENZ, S.A.; BAYER, P.; BLUM, P. Identifying anthropogenic anomalies in air, surface and groundwater temperatures in Germany. **Science of the Total Environment**, v.584–585, p.145–153, 2017.

BERGER, C.; ROSENTERETER, J.; VOLTERSEN, M.; BAUMGART, C.; SCHMULLIUS, C.; HESE, S. Spatio-temporal analysis of the relationship between 2D/3D urban site characteristics and land surface temperature. **Remote Sensing of Environment**, v.193, p.225–243, 2017.

BOIN, M. N. **Chuvas e erosões no oeste paulista: uma análise climatológica aplicada**. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2000.

BUSTOS ROMERO, M. A. **Princípios bioclimáticos para o desenho urbano**. 2ª Ed.: São Paulo, Proeditores, 2001.

CAMARGO, C. E. S. **Qualidade Ambiental Urbana em Presidente Prudente-SP**. Dissertação (mestrado) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Presidente Prudente, 2007.

CARDOSO, R. S.; AMORIM, M. C. C. T. Variações Espaciais das Temperaturas Noturnas em Presidente Prudente-SP em Episódios de Verão. **R. Ra’eGa**, v.42, p.257-268, 2017.

CARNAHAN, W. H.; LARSON, R. C. An analysis of an urban heat sink. **Remote Sensing of Environment**, v.33 (1), p.65-71, 1990.

CHANDLER, T. J. **The climate of London**. Hutchinson: London, 1965.

CHEN, X. L.; ZHAO, H. M.; LI, P. X.; YIN, Z. Y. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. **Remote Sensing of Environment**, v.104, p.133-146, 2006.

CHEN, A.; YAO, L.; SUN, R.; CHEN, L. How many metrics are required to identify the effects of the landscape pattern on land surface temperature?. **Ecological Indicators**, v.45, p.424–433, 2014.

CHEN, X.; XU, Y.; YANG, J.; WU, Z.; ZHU, H. Remote sensing of urban thermal environments within local climate zones: A case study of two high-density subtropical Chinese cities. **Urban Climate**, v.31, 2020.

COLL, M.; PIRODDI, C.; STEENBEEK, J.; KASCHNER, K.; BEM RAIS LASRAM, F.; AGUZZI, J. The biodiversity of the Mediterranean Sea: estimates, patterns, and threats. **PLoS One**, v.5, n.8, p.1–36, 2010.

COUTTS, A. Green infrastructure for cities: It's all about trees. **Urban Climate News** n.57, p.7–12, set. 2015.

COUTTS, A. M.; HARRIS, R. H.; PHAN, T.; LIVESLEY, S. J.; WILLIAMS, N. S. G.; TAPPER, N. J. Thermal infrared remote sensing of urban heat: Hotspots, vegetation, and an assessment of techniques for use in urban planning. **Remote Sensing of Environment**, v.186, p.637–651, 2016.

CUTTER, S. L. A ciência da vulnerabilidade: modelos, métodos e indicadores. **Revista Crítica de Ciências Sociais** n. 93, 2011.

DODD, J. K. **Determination of Surface Characteristics and Energy Budget Over an Urban Area Using Satellite Data and a Boundary Layer Model**. Thesis (Master of Science) - Department of Meteorology, Pennsylvania State University, 1979.

DORIGON, L. P. **As ilhas de calor urbanas em Jundiaí-SP**. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Presidente Prudente, 2019.

DUBREUIL, V. Clima e Teledetecção: Uma abordagem geográfica. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, 2005.

DUBREUIL, V.; AMORIM, M. C. C. T. A.; FOISSARD, X.; QUENOL, H. Métodos e monitoramento da variabilidade espaço temporal da ilha de calor em cidade de porte médio: Rennes/França e Presidente Prudente/Brasil. SILVA, C.A. (org.); FIALHO, E. S. (org.); STEINKE, E. T. (org.) **Experimentos em Climatologia Geográfica**. 1. ed. Dourados (MS): Editora da UFGD, p.23-32, 2014.

DUBREUIL, V.; FANTE, K. P.; PLANCHON, O.; SANT'ANNA NETO, J. L. Climate change evidence in Brazil from Köppen's climate annual types frequency. **International Journal of Climatology**, v.39, p.1446-1456, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/joc.5893>>. Acesso em: 22 dez. 2020.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA) – **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, 2009.

ERELL, E. The application of urban climate research in the design of cities. **Advances in Building Energy Research**, v.2, n. 1, p.95–121, 2008.

ERELL, E.; PEARLMUTTER, D.; WILLIAMSON, T. **Urban Microclimate: Designing the Spaces Between Buildings**. London: Eathscan, 2011.

FANTE, K. P. **Variabilidade da temperatura em áreas urbanas não metropolitanas do estado de São Paulo – Brasil no período de 1961 – 2011**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho, Presidente Prudente, 2014.

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.

FERREIRA, C. C. M. Modelo para análise das variáveis de cobertura da terra e a identificação de microclimas, em centros urbanos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.14, 2014.

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

GAO, B. C. NDWI A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. **Remote Sensing of Environment**, v.58, p.257-266, 1996.

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

GIVONI, B. **Urban Design in Different Climates**. World Meteorological Organization – WMO/TD-N/ 346. Los Angeles, 1989.

GUAN, H.; McGRATH, A.; CLAY, R.; EWENZ, C.; BENDER, S.; BENNETT, J. Effective surface areas for optimal correlations between surface brightness and air temperatures in an urban environment. **Journal of Applied Remote Sensing**, v.9, p.1-16, 2015.

HAASHEMI, S.; WENG, Q.; DARVISHI, A.; ALAVIPANAH, S. K. Seasonal Variations of the Surface Urban Heat Island in a Semi-Arid City. **Remote Sensing**, v.352, n.8, 2016.

HALL, F. G.; HUENNRICH, K. F.; GOETZ, S. J.; SELLERS, P. J.; NICKESON, J. E. Satellite Remote Sensing of Surface Energy Balance Success, Failures, and Unresolved Issues in FIFE. **Journal of Geophysical Research**, v.97, n.D17, p.19,061-19,089, 1992. 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, 1833, v.1. Disponível em: http://www.urbanclimate.org/documents/LukeHoward_Climate-of-London-V1.pdf. Acesso em: 12 dez. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). (2020). **Cidades**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=354140>>. Acesso em: 15 abr. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Glossário de Termos Técnicos em Radiação Atmosférica**. 2021. Disponível em: <satellite.cptec.inpe.br/radiacao/glossar/gloss_ae.htm>. Acesso em: 14 mar. 2021.

JENERETTE, G. D.; HARLAN, S. L.; BRAZEL, A.; JONES, N.; LARSEN, L.; STEFANOV, W. L. Regional relationships between surface temperature, vegetation, and human settlement in a rapidly urbanizing ecosystem. **Landscape Ecology**, v.22, n.3, p.353–365, 2007.

JATO-ESPINO, D.; YIWO, E.; RODRIGUEZ-HERNANDEZ, J.; CANTERAS-JORDANA, J. C. Design and application of a Sustainable Urban Surface Rating System (SURSIST). **Ecological Indicators**, v.93, p.1253–1263, 2018.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2 ed. Sao Jose dos Campos: Parenteses, 2009.

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

LABAKI, L. C.; SANTOS, R. F. S.; BUENO-BARTHOLOMEI, C. L.; ABREU, L. V. A. Vegetação e conforto térmico em espaços urbanos abertos. **Forum Patrimônio - Mudanças Climáticas e o impacto das cidades**. v.4, n.1, 2011.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; PEREIRA, C. D.; BATISTA, J.O. **Casa eficiente: Bioclimatologia e desempenho térmico**. – Florianópolis: UFSC/LabEEE; v.1, 2010.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3ª Ed. São Paulo: PW, 2014.

LAMBERS, H.; CHAPIN, F. S.; PONS, T. L. **Plant Physiological Ecology**. Second Edition. Springer, 2008.

LANDSBERG, H. E. Atmospheric changes in a growing community (the Columbia, Maryland experience). **Urban Ecology**, v.4, p.53–81, 1979.

LANDSBERG, M. E. **The urban climate**. New York: Academia Press, 1981.

LEMUS-CANOVAS, M.; MARTIN-VIDE, J.; MORENO-GARCIA, M. C.; LOPEZ-BUSTINS, J. A. Estimating Barcelona's metropolitan daytime hot and cold poles using Landsat-8 Land Surface Temperature. **Science of the Total Environment**, v. 699, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134307>>. Acesso em: 10 jan. 2022.

LI, W.; CAO, Q.; LANG, K.; WU, J. Linking potential heat source and sink to urban heat island: Heterogeneous effects of landscape pattern on land surface temperature. **Science of the Total Environment**, v.586, p.457–465, 2017.

LIN, B. B.; OSSOLA, A.; ALBERTI, M.; ANDERSSON, E.; BAI, X.; DOBBS, C.; ELMQVIST, T.; EVANS K. L.; FRANTSESKAKI, N.; FULLER, R. A.; GASTON, K. J.; HAASE, D.; JIM, C. Y.; KONIJNENDIJK, C.; NAGENDRA, H.; NIEMELA, J.; McPHEARSON, T.; MOOMAW, W. R.; PARNELL, S.; PATAKI, D.; RIPPLE, W. J.; TAN, P. Y. Integrating solutions to adapt cities for climate change. **Lancet Planet Health**, v.5, p.479–86, 2021.

LOMBARDO, M. A. Análise das mudanças climáticas nas metrópoles o exemplo de São Paulo e Lisboa. CORTEZ, A. T. C. (Org.) ORTIGOZA, S. A. G. (Org.). **Da produção ao consumo: impactos socioambientais no espaço urbano [online]**. São Paulo: EdUNESP, p.111-146, 2009.

MACKEY, C. W.; LEE, X.; SMITH, R. B. Remotely sensing the cooling effects of city scale efforts to reduce urban heat island. **Build. Environ.**, v.49, p.348–358, 2012.

MARTIN-VIDE, J.; SARRICOLEA, P.; MORENO-GARCIA, M. C. On the definition of urban heat island intensity: the “rural” reference. **Frontiers in Earth Science**, 3:24, 2015. Disponível em: <doi:10.3389/feart.2015.00024>. Acesso em: 12 jan. 2022.

MARTIN-VIDE, J.; MORENO-GARCIA, M. C. Probability values for the intensity of Barcelona's urban heat island (Spain). **Atmospheric Research**, v. 240, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104877>. Acesso em : 13 jan. 2022.

MASCARÓ, L.; MASCARÓ, J. L. **Vegetação Urbana**. Porto Alegre: Finep. 3ªed. 2010. MATHEW, A.; KHANDELWAL, S.; KAUL, N. Analysis of diurnal surface temperature variations for the assessment of surface urban heat island effect over Indian cities. **Energy and Buildings**, v.159, p.271–295, 2018.

MENDONÇA, F. A. O clima e o planejamento urbano de cidades de porte médio e pequeno: proposição metodológica para estudo e aplicação à cidade de Londrina, PR. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 1994.

MENDONÇA, F. A. O clima urbano de cidades de porte médio e pequeno: aspectos teórico-metodológicos e estudo de caso. SANT'ANNA NETO, J. L.; ZAVATINI, J. A. (Org.). **Variabilidade e Mudanças Climáticas**. Maringá: EDUEM, p.167-192, 2000.

MENDONÇA, F.; DUBREUIL, V. Termografia de superfície e temperatura do ar na RMC (Região Metropolitana de Curitiba – PR). **Revista RA'E GA – O espaço geográfico em análise**, n.9, p.25-35, 2005.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de textos, 2007.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (Org.). **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

MILLS, G. Urban climatology: History, status and prospects. **Urban Climate**, v.10, n.P3, p.479–489, 2014.

MITCHELL, B. C.; CHAKRABORTY, J. Urban Heat and Climate Justice: A Landscape of Thermal Inequality in Pinellas County, Florida. **Geographical Review**, v.104 (4), p.459–480, 2014.

MONTEIRO, A. **O clima urbano do Porto: contribuição para a definição das estratégias de planejamento e ordenamento do território**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbekian: Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica, 1997.

MONTEIRO, A. Desenvolvimento, sustentabilidade ou a busca por um melhor índice de felicidade bruta – a contribuição da climatologia urbana. In: LEMOS, A. I. G.; GALVANI, E. (org.). **Geografia, tradições e perspectivas: Interdisciplinaridade, meio**

ambiente e representações. 1 ed. Buenos Aires: CLACSO; São Paulo, Expressão popular, v. 1, 2009.

MONTEIRO, C. A. F. **Teoria e Clima Urbano**. Tese (Tese-Livre Docência) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1976.

MONTEIRO, C. A. F. Por um Suporte Teórico e Prático para Estimular Estudos Geográficos do Clima Urbano do Brasil. **Geosul**, Florianópolis: EdUFSC, n.9, ano V, p.6-17, 1990a.

MONTEIRO, C. A. F. A Cidade como Processo Derivador Ambiental e Estrutura Geradora de um “Clima Urbano”. **Geosul**, Florianópolis: EdUFSC, n.9, ano V, p.75-107, 1990b.

MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. (Org). **Clima urbano**. São Paulo: Contexto, 2003.
NICHOL, J. Remote Sensing of Urban Heat Islands by Day and Night. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.71, n.5, p.613-621, 2005.

NUNES, J. O. R.; FREIRE, R.; PERES, I. U. **Mapeamento geomorfológico do perímetro urbano de Presidente Prudente-SP**. In: VI Simpósio Nacional de Geomorfologia e Regional Conference on Geomorphology, 2006, Goiânia. Anais... Goiânia: União da Geomorfologia Brasileira; International Association of Geomorphologists, 2006.

NUNES, J. O. R.; FREIRE, R.; PEREZ, Y. U. A Geomorfologia de Presidente Prudente – SP. In: WHITACKER, A. M.; MELAZZO, E. S. (coord.) **Conjuntura Prudente 2011**. FCT/UNESP, Presidente Prudente, 2011.

OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.108, p.1-24, 1982.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. London: Methuen & Ltd. A. Halsted Press Book, John Wiley & Sons, 2Ed. New York, 1987.

OKE, T. R. The urban energy balance. **Progress in Physical Geography**, v. 12, 1988. Disponível em: <doi: 10.1177/030913338801200401>. Acesso em: 07 jul. 2021.

OKE, T. R. **Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban site, Instruments and Methods of Observation Program**, IOM Report No. 81, WMO/TD 1250, World Meteorological Organization, Geneva, 2006.

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

PARLOW, E.; VOGT, R.; FEIGENWINTER, C. The urban heat island of Basel – seen from different perspectives. **Die Erde**, v.145, n.1-2, p.96-110, 2014.

PEDRO, L. C.; NUNES, J. O. R. A Relação entre processos morfodinâmicos e os desastres naturais: uma leitura das áreas vulneráveis a inundações e alagamentos em Presidente Prudente - SP. **Caderno Prudentino de Geografia**, v.2, p.81/5-96, 2012.

PENG, J.; MA, J.; LIU, Q.; LIU, Y.; HU, Y.; LI, Y.; YUE, Y. Spatial-temporal change of land surface temperature across 285 cities in China: An urban-rural contrast perspective. **Science of the Total Environment**, v.635, p.487–497, 2018.

PILLAR, V. D. **Clima e vegetação**. UFRGS, Departamento de Botânica, 1995. Disponível em: <<http://ecoqua.ecologia.ufrgs.br>>. Acesso em: 09 mar. 2020.

POLIZEL, J. L. **Geotecnologias e clima urbano: aplicação dos recursos de sensoriamento remoto e sistema de informações geográficas na cidade de Piracicaba, SP**. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2009.

PRADO, R. T. A.; FERREIRA, F. L. Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. **Energy and Buildings**, v.37, p.295–300, 2005.

QUATTROCHI, D. A.; RIDD, M. K. Analysis of vegetation within a semi-arid urban environment using high spatial resolution airborne thermal infrared remote sensing data. **Atmospheric Environment**, v.32, n.1, p.19-33, 1998.

RAMPAZZO, C. R. **Clima urbano, risco climático e vulnerabilidade socioespacial mediados pela produção do espaço urbano em cidades paulistas (São Carlos, Marília e Presidente Prudente)**. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Presidente Prudente, 2019.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n.10, p.41-56, 1997.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Proceedings, **Third Earth Resources Technology Satellite – 1 Symposium**, Greenbelt: NASA SP-351, p.3010-1017, 1974.

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

SANT'ANNA NETO, J. L.; TOMMASELLI, J. T. G. **O tempo e o clima de Presidente Prudente**. Presidente Prudente: FCT/UNESP, 2009.

SANT'ANNA NETO, J. L. Desafios da climatologia geográfica no Brasil: da competência técnica ao compromisso social. In: SILVA, C. A.; FIALHO, E. S. (Org.). **Concepções e Ensaio da Climatologia Geográfica**. 1ed. Dourados: Editora da UFGD, v.1, p.13-38, 2012.

SANT'ANNA NETO, J. L. Escalas geográficas do clima: mudança, variabilidade e ritmo. In: Margarete C. de Costa Trindade Amorim; João Lima Sant'Anna Neto; Ana Monteiro. (Org.). **Climatologia Urbana e Regional: questões teóricas e estudos de caso**. 1ed. São Paulo: Outras Expressões, v.1, p.75-91, 2013.

SANT'ANNA NETO, J. L.; RAMPAZZO, C. R. Geoindicadores urbanos para o estudo dos processo termodinâmicos do clima das cidades de pequeno e medio porte. In: João Lima Sant'Anna Neto; Margarete C. de Costa Trindade Amorim; Cahrlei Aparecido da Silva. (Org.). **Clima e Gestão do Território**. 1ed. Jundiaí: Paco Editorial, p.7-32, 2016.

SANTOS, M. **A Natureza do Espaço**. São Paulo: Edusp, 2002.

SANDHOLT, I.; RASMUSSEN, K.; ANDERSEN, J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. **Remote Sensing of Environment**, v. 79 (2-3), p.213-224, 2002.

SEZERINO, M. L.; MONTEIRO, C. A. F. O Campo Térmico na cidade de Florianópolis: Primeiros experimentos, Florianópolis: EdUFSC, n.9, ano V, p.18-56, 1990.

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

SIDIQUI, P.; HUETE, A.; DEVADAS, R. Spatio-Temporal Mapping and Monitoring of Urban Heat Island Patterns over Sydney, Australia using MODIS and Landsat-8. 2016 **Fourth International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications**, IEEE, 2016.

SPOSITO, M. E. B. **O Chão em Presidente Prudente: a lógica da expansão territorial urbana**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1983.

SPOSITO, E. S. **Produção e apropriação da renda fundiária urbana em Presidente Prudente**. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

SPOSITO, E.S. Presidente Prudente: crítica da formação histórica. In: Whitacker, A. M., Melazzo, E.S. (coord.), **Conjuntura Prudente**, Presidente Prudente, FCT/UNESP, 2011.
STEWART, I. D.; OKE, T. R. Classifying climate field sites by “local climate zones”: the case of Nagano, Japan. **The Seventh International Conference on Urban Climate**, Yokohama, Japan, 2009.

STEWART, I. D. Why should urban heat island researchers study history? **Urban Climate**, v.30, 2019.

TAHA, H. Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. **Energy and Buildings**, v.25, p.99–103, 1997.

TEOBALDO NETO, A. **A geografia do risco e da vulnerabilidade ao calor em espaços urbanos da zona tropical: o caso Cuiabá/MT**. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Presidente Prudente, 2019.
VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. **Remote Sensing of Environment**, v.86, p.370-384, 2003.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies**. Washington, 2008.

WANG, Y. C.; HU, B. K. H.; MYINT, S. W.; FENG, C. C. F.; CHOW, W. T. L.; PASSY, P. F. Patterns of land change and their potential impacts on land surface temperature change in Yangon, Myanmar. **Science of the Total Environment**, v.643, p.738–750, 2018.

WENG, Q. Fractal analysis of satellite-detected urban heat island effect. **Photogramm. Eng. Remote Sens.** v.69 (5), p.555–566, 2003.

WENG, Q.; LU, D.; SCHUBRING, J.. Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. **Remote Sensing of Environment**, v.89, p.467–483, 2004.

WENG, Q. Thermal infrared remote sensing of urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.64, p.335–344, 2009.

ZHA, Y.; GAO, J.; NI, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n.3, p.583–594, 2003.

ZHANG, Y.; ODEH, I. O. A.; HAN, C. Bi-temporal characterization of land surface temperature in relation to impervious surface area, NDVI and NDBI, using a sub-pixel image analysis. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.11, p.256–264, 2009.

ZHAO, C.; FU, G.; LIU, X.; FU, F. L. Urban planning indicators, morphology and climate indicators: A case study for a north-south transect of Beijing, China. **Building and Environment**, v.46, p.1174–1183, 2011.

ZHENG, B.; MYINT, S. W.; FAN, C. Spatial configuration of anthropogenic land cover impacts on urban warming. **Landscape and Urban Planning**, v.130, p.104–111, 2014.