

Universidade Brasil
Campus de Fernandópolis

RODRIGO BERTOLOZZI

**ANÁLISE DAS ILHAS DE CALOR URBANO NO MUNICÍPIO DE
VOTUPORANGA - SP**

ANALYSIS OF HEAT ISLANDS IN THE MUNICIPALITY OF VOTUPORANGA-SP

Fernandópolis, SP

2019

Rodrigo Bertolozzi

**ANÁLISE DAS ILHAS DE CALOR URBANO NO MUNICÍPIO
DE VOTUPORANGA - SP**

Orientador: Prof. Dr. Luiz Sergio Vanzela

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Brasil, como complementação dos créditos necessários para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Fernandópolis, SP
2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Bertolozzi, Rodrigo.
B462a Análise das Ilhas de Calor Urbano no Município de
Votuporanga - SP/ Rodrigo Bertolozzi.
São Paulo – SP: [s.n.], 2019.
47 p.: il.; 29,5cm.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Brasil, como complementação dos créditos necessários para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador (a): Prof. Dr. Luiz Sérgio Vanzela.

1. Sensoriamento Remoto. 2. Sustentabilidade. 3. Urbanização. I. Título.

CDD 621.3678

Termo de Autorização

Para Publicação de Dissertações e Teses no Formato Eletrônico na Página WWW do Respectivo Programa da Universidade Brasil e no Banco de Teses da CAPES

Na qualidade de titular(es) dos direitos de autor da publicação, e de acordo com a Portaria CAPES no. 13, de 15 de fevereiro de 2006, autorizo(amos) a Universidade Brasil a disponibilizar através do site <http://www.universidadebrasil.edu.br>, na página do respectivo Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu*, bem como no Banco de Dissertações e Teses da CAPES, através do site <http://bancodeteses.capes.gov.br>, a versão digital do texto integral da Dissertação/Tese abaixo citada, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira.

A utilização do conteúdo deste texto, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, fica condicionada à citação da fonte.

Título do Trabalho: **“ANÁLISE DAS ILHAS DE CALOR URBANO NO MUNICÍPIO DE VOTUPORANGA-SP”**

Autor(es):

Discente: Rodrigo Bertolozzi

Assinatura: _____

Orientador: Luiz Sergio Vanzela

Assinatura: _____

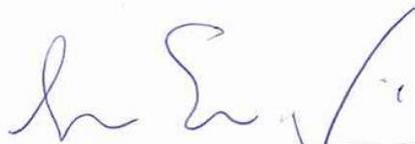
Data: 19/junho/2019

TERMO DE APROVAÇÃO

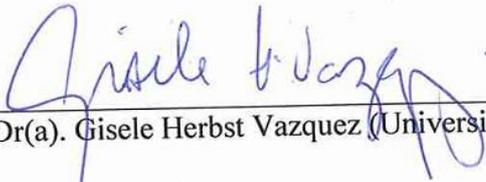
RODRIGO BERTOLOZZI

**“ANÁLISE DAS ILHAS DE CALOR URBANO NO MUNICÍPIO DE
VOTUPORANGA-SP”**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Brasil, pela seguinte banca examinadora:



Prof(a). Dr(a) Luiz Sergio Vanzela (Presidente)



Prof(a). Dr(a). Gisele Herbst Vazquez (Universidade Brasil)



Prof(a). Dr(a). Michael de Melo (UNIFEV)

Fernandópolis, 19 de junho de 2019.

Presidente da Banca Prof(a). Dr(a). Luiz Sergio Vanzela

ANÁLISE DAS ILHAS DE CALOR URBANO NO MUNICÍPIO DE VOTUPORANGA-SP

RESUMO

O crescimento urbano exitoso e, ao mesmo tempo, desordenado tem gerado uma gama de impactos ambientais. Dentre estes, evidencia-se a alteração do clima local, no qual a conduta espacial simultânea da temperatura se expressa como o mais importante elemento, tendo como mais evidente consequência a formação do fenômeno de “ilhas de calor”. Nesse entendimento, a presente dissertação analisa a evolução das ilhas de calor em Votuporanga-SP, tendo, como recorte temporal, os anos de 2017/2018, utilizando-se do mapa georreferenciado dos bairros do município, ferramenta importante para a administração do espaço urbano, ao passo que a espacialização das distintas temperaturas intraurbanas e rurais locais podem proporcionar subsídios para que atitudes possam ser tomadas com a finalidade de reduzir a magnitude de tal fenômeno. Foram utilizadas imagens de satélite com o objetivo de obter, por meio de modelagem matemática, as imagens termais da superfície do terreno na área urbana, como também medir as temperaturas do ar a dois metros de altura no instante das passagens dos satélites. Por fim, efetuou-se a avaliação de regressão da temperatura do ar (variável dependente) com base na temperatura da superfície (variável independente), conseguindo assim o modelo de resposta. Dessa forma, concluiu-se que o sensoriamento remoto estimou, com melhor qualidade, a temperatura na época do verão, período em que a estabilidade climática é maior. Além disso, foi possível diagnosticar (também nessa mesma época) as ilhas de calor urbanas no município.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto, Sustentabilidade, Urbanização.

ANALYSIS OF HEAT ISLANDS IN THE MUNICIPALITY OF VOTUPORANGA-SP

ABSTRACT

Successful and disruptive urban growth has generated a range of environmental impacts. Among these, it is evident the alteration of the local climate, in which the simultaneous space conduct of the temperature is expressed as the most important element, having as most evident consequence to the formation of the phenomenon of "heat islands". In this understanding, this dissertation analyzes the evolution of the heat islands in the city of Votuporanga-SP, using a georeferenced map of the districts of this city, as a temporal cut between 2017/2018, which is an important tool for the management of urban space, while the specialization of different local intra-urban and rural temperatures may provide support for attitudes to be taken in order to reduce the magnitude of such phenomenon. Satellite images were used with the purpose of provoking the thermal images of the surface of the terrain in the urban area, as well as measuring the air temperatures at two meters high at the time of the satellites passage. Finally, the regression evaluation of the air temperature (dependent variable) was carried out based on the surface temperature (independent variable), thus achieving the response model. In this way, it is concluded that the remote sensing estimated with best quality the summer time temperature, period in which the climate stability is higher. Moreover, it was possible to diagnose the urban heat islands in the city (by the same period of time).

Key words: Remote Sensing, Sustainability, Urbanization.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1. Ilustração da ilha de calor urbano.	17
Figura 2. Localização do município de Votuporanga - SP.....	22
Figura 3. Distribuição dos pontos de amostragem de temperatura ao longo dos perfis N-S e W-E.	23
Figura 4. Condições climáticas em 24 horas do dia 12/03/2018, sendo temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento, com destaque para o horário das medições.	24
Figura 5. Condições climáticas em 24 horas do dia 19/08/2018, sendo temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento, com destaque para o horário das medições de temperatura.....	25
Figura 6. Alinhamento NW-SE digitalizado manualmente.....	28
Figura 7. Temperatura da superfície do solo com termômetro ao longo dos alinhamentos N-S (a) e W-E (b) em 12 de março de 2018.....	29
Figura 8. Temperatura da superfície do solo com termômetro ao longo dos alinhamentos N-S (a) e W-E (b) em 19 de agosto de 2018.....	30
Figura 9. Temperatura do ar com termômetro ao longo dos alinhamentos N-S (a) e W-E (b) em 12 de março de 2018.....	32
Figura 10. Temperatura do ar com termômetro ao longo dos alinhamentos N-S (a) e W-E (b) em 19 de agosto de 2018.	32
Figura 11. Comparação entre as médias de temperatura da superfície do solo (T_{st}) e do ar a dois metros (T_a) pelo erro padrão da média.	33
Figura 12. Resposta da temperatura da superfície do solo com termômetro (T_{st}) em função da temperatura da superfície por satélite (T_{ss}) nas duas datas avaliadas....	34
Figura 13. Resposta da temperatura do ar a dois metros (T_a) em função da temperatura da superfície por satélite (T_{ss}) nas datas avaliadas.	35
Figura 14. Valores médios de temperatura da superfície por satélite (T_{ss}) e estimadas pelos modelos para a superfície do solo (T_{st}) e do ar a dois metros (T_a), nas zonas rural e urbana em 12/03/2018.	36
Figura 15. Variabilidade da temperatura da superfície por satélite (T_{ss}) e das temperaturas do ar a 2 m (T_a) e da superfície do solo (T_{ss}) estimadas por satélite em 12/03/2018, sendo a,g,i-fragmento de vegetação nativa em área rural, b,h-área de	

várzea, c-parque industrial II, d-telhado de indústria, e-região com alta densidade arbórea urbana, f-fragmento de vegetação nativa em área urbana.	36
Figura 16. Comparação entre temperaturas Tss, Ta e Tst, mês de 03/2018; sendo a,g,i-fragmento de vegetação nativa em área rural, b,h-área de várzea, c-parque industrial II, d-telhado de indústria, e-região com alta densidade arbórea urbana, f-fragmento de vegetação nativa em área urbana.	38
Figura 17. Valores médios de temperatura da superfície por satélite (Tss) e estimadas pelos modelos para a superfície do solo (Tst) e do ar a dois metros (Ta), nas zonas rural e urbana em 19/08/2018.	39
Figura 18. Medição da temperatura do ar, da superfície e do satélite, em Agosto/2018; sendo a,g,i-fragmento de vegetação nativa em área rural, b,h-área de várzea, c-parque industrial II, d-telhado de indústria, e-região com alta densidade arbórea urbana, f-fragmento de vegetação nativa em área urbana.....	39
Figura 19. Comparação entre temperaturas Tss, Ta e Tst, mês de 08/2018; sendo a,g,i-fragmento de vegetação nativa em área rural, b,h-área de várzea, c-parque industrial II, d-telhado de indústria, e-região com alta densidade arbórea urbana, f-fragmento de vegetação nativa em área urbana.	40
Figura 20. Região com 20% de área de copa de árvores da arborização urbana.....	42

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1. Formas urbanas sustentáveis.....	16
Tabela 2. Calor específico de diferentes materiais.....	18
Tabela 3. Divisão do espectro eletromagnético.....	20
Tabela 4. Resolução espectral e espacial das bandas refletidas ou emitidas, captadas pelos sensores dos satélites LANDSAT 4 e 5.....	21
Tabela 6. Estatística descritiva da temperatura da superfície por termômetro nas datas de 12/03/2018 e 19/08/2018 em Votuporanga-SP.	29
Tabela 7. Estatística descritiva da temperatura do ar por termômetro.	31
Tabela 8. Resultado da análise de regressão da temperatura da superfície com termômetro em função da temperatura da superfície por satélite.	34
Tabela 9. Resultado da análise de regressão da temperatura do ar (T_a) em função da temperatura da superfície por satélite (T_{ss}).....	34

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1. Geral.....	14
2.2. Específicos	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1. Clima urbano	15
3.2. Fenômeno das ilhas de calor	17
3.3. Sensoriamento remoto no estudo da temperatura	19
4. MATERIAL E MÉTODOS	22
4.1 Localização e características	22
4.2. Metodologia.....	23
4.2.1. Avaliação da precisão da estimativa da temperatura da superfície terrestre por imagem de satélite	23
4.2.2. Avaliação dos gradientes de temperatura da superfície ao longo das áreas rurais e urbanas	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
5.1. Temperaturas da superfície do solo e do ar por termômetro.....	29
5.2. Estimativa da temperatura da superfície por satélite.....	33
5.3. Gradiente térmico no ambiente urbano	35
6. CONCLUSÕES	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1. INTRODUÇÃO

O rápido crescimento urbano na maioria dos grandes municípios brasileiros, nas últimas décadas, foi caracterizado pela falta de planejamento na ocupação dos espaços. Esse cenário pode ser observado pela alta taxa de urbanização no Brasil, que, de 1940 a 2010, cresceu de 31,24% para 84,36% (IBGE, 2019). Dentre as consequências dessa rápida urbanização não planejada, estão a deficiência em saneamento básico, a habitação e os demais elementos da infraestrutura urbana, resultando em uma série de problemas sociais e ambientais.

Um dos fatores que mais se destacam nesse processo se refere à redução dos espaços verdes urbanos, que, para Rubira (2016), constituem-se de praças, jardins, parques urbanos entre outros tipos, não podendo ser confundidos com espaços livres de construção e de áreas de lazer privadas, como, por exemplo, os clubes.

Além dos espaços verdes urbanos favorecerem a redução da mortalidade humana pela melhoria da qualidade de vida (WOLCH et al., 2014), também são importantes na ambiência urbana, contribuindo para a redução das inundações urbanas (LENNON et al., 2014) e para o aumento da resiliência climática (VOSKAMP; VAN DE VEM, 2015).

Dentre os problemas da urbanização intensa, o aumento local da temperatura é um dos mais importantes. Além de provocar o desconforto térmico, com riscos à saúde de idosos e crianças, ainda pode gerar outros problemas, como aumento nas demandas de energia, nos níveis de poluição e modificação dos padrões de precipitação (YUAN; BAUER, 2007).

O aumento local da temperatura no ambiente urbano é provocado, principalmente, devido às mudanças dos materiais da superfície, que favorecem o incremento das fontes de emissão de calor. Quando elas ocorrem em grande escala, observa-se um gradiente bem definido de temperatura da superfície urbana em relação ao entorno (SOUZA, 2004). Esse fenômeno é denominado “ilhas de calor”, caracterizado por uma visível variabilidade espacial da temperatura da superfície terrestre (YUAN; BAUER, 2007).

Isso ocorre porque a modificação do uso e ocupação do solo pelos materiais que normalmente compõem as superfícies urbanas, alteram o balanço de radiação solar que atinge a superfície terrestre e, conseqüentemente, as parcelas de radiação refletidas, emitidas, absorvidas e conduzidas. Assim, pode ser avaliada por sensoriamento remoto, nas faixas ou bandas do espectro eletromagnético, denominadas de infravermelho distante ou termal (BOSCHETTI, 2008).

Como algumas instituições governamentais promovem o acesso livre às imagens de satélite, como o United States Geological Survey (USGS, 2019) nos Estados Unidos e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2019), no Brasil, o estudo do fenômeno das ilhas de calor no ambiente urbano está se tornando mais acessível e importante no planejamento urbano.

No entanto, com essa ampla disponibilidade, é também necessário que mais estudos sejam realizados sobre a qualidade das imagens em estimar a temperatura da superfície, a fim de subsidiar a confiabilidade das estimativas e o aperfeiçoamento da tecnologia. Isso porque os sistemas orbitais e sensores se diferenciam e as imagens possuem diferentes resoluções geométricas, espectrais, radiométricas e temporais.

Assim, o objetivo, neste trabalho, foi avaliar as ilhas de calor urbano no município de Votuporanga-SP, com uso de imagens de satélite, passando pelas etapas de avaliação da qualidade da estimativa da temperatura do ar por satélite e da avaliação das variações de temperatura na zona urbana no verão e no inverno.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

Avaliar as ilhas de calor e a qualidade do sensoriamento remoto em estimar os gradientes de temperatura da superfície em investigar o fenômeno das ilhas de calor no município de Votuporanga – SP.

2.2. Específicos

- Avaliar a precisão da estimativa da temperatura da superfície terrestre por imagem de satélite, comparando-a com as temperaturas medidas por termômetro a dois metros de altura e na superfície;
- Analisar a influência dos elementos de superfície sobre as variações térmicas, utilizando as imagens termais obtidas por satélite e por termômetro.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Clima urbano

A definição clássica de Hann de clima, em 1982, é o conjunto de fenômenos meteorológicos que caracterizam o estado médio da atmosfera sobre determinado lugar da superfície terrestre (SILVA; ASSUNÇÃO, 2004).

Mas, para Cunha e Vecchia (2007), a definição que considera os dados a partir de suas médias, representa uma abstração desconectada da realidade, pois os elementos do tempo (meteorológico) interagem entre si, no tempo e no espaço, sobretudo por não serem elementos estáticos, artificiais ou subjetivos. Portanto, outra forma de abordagem do clima, refere-se à climatologia dinâmica, em que o objetivo primordial é considerar os elementos climáticos de maneira integrada, considerando a impossibilidade de tratá-los de maneira dissociada quando o que se busca é a compreensão da realidade.

Na climatologia dinâmica, o clima é estudado e analisado considerando a dinâmica climática, que se repete em intervalos regulares (estações do ano) ou não (eventos anômalos - disritmias), no conjunto fluente (atmosfera) e sua interação com outras esferas (biosfera, hidrosfera, antroposfera), a que se denomina de holorritmo, ou totalidade dos ritmos (SETTE; TARIFA, 2002).

Nesse contexto, como geralmente as áreas urbanizadas são relativamente pequenas em relação às zonas rurais, elas exercem pouca influência em escala global. Além disso, para a maioria dos estudos climáticos, utilizam-se dados de estações meteorológicas padronizadas, em que um dos requisitos básicos de instalação é que seja em área livre de obstruções naturais e prediais (INMET, 2011). Portanto, na maioria dos estudos climáticos, o efeito da área urbana é pouco estudado.

O clima urbano resulta das modificações que as superfícies materiais e as atividades das áreas urbanas provocam nos balanços de energia, massa e movimento, cujos estudos devem ser abordados de forma interdisciplinar, em uma área denominada de climatologia urbana (ANDRADE, 2005).

A influência das zonas urbanas sobre o clima urbano depende de uma série de fatores, mas pode-se destacar o tamanho da área urbanizada (OKE, 1973), os tipos de planejamento urbano (JABAREEN, 2006) e o clima da região (AMORIM, 2010).

Os efeitos mais diretos do clima urbano são percebidos pela população por meio de manifestações ligadas ao conforto térmico, à qualidade do ar, aos impactos pluviais e a outras manifestações (AMORIM, 2010). Ainda de acordo com o mesmo autor, as transformações são causadas pela retirada da vegetação original, pelo aumento da circulação de veículos e pessoas, pela impermeabilização do solo, pelas mudanças no relevo, por meio de aterros, canalizações de rios e córregos, concentração de edificação, verticalização urbana, instalação de equipamentos urbanos (parques, praças, edifícios, áreas industriais, residenciais etc.), além do lançamento de partículas e gases poluentes na atmosfera.

Jabareen (2006) identificou quatro formas urbanas sustentáveis, cujas abordagens existentes foram aprimoradas com a racionalização ambiental, mais precisamente com princípios de desenvolvimento sustentável e *design* ecológico (Tabela 1).

Tabela 1. Formas urbanas sustentáveis.

Tipos de cidades	Características
Compactas	Alta densidade e compacidade urbana. Propõe usos mistos do solo como as abordagens do novo urbanismo ou desenvolvimento neotradicional.
Eco-cidade	Enfatiza o verde urbano, a diversidade ecológica e cultural e o design solar passivo. Além disso, as abordagens eco cidade preconizam a gestão ambiental e outras políticas ambientais importantes.
Neotradicional	Preconiza o transporte sustentável, diversidade (por exemplo, tipos de habitação), urbanização compacta, usos mistos do solo e reflorestamentos. Além disso, o desenvolvimento neotradicional tem muito a ver com codificação de estilo e design.
Contenção urbana	Preconiza políticas de cidades mais compactas

Fonte: JABAREEN (2006)

Pode-se notar que, de maneira geral, as formas sustentáveis de desenvolvimento urbano têm como princípio os usos mistos do solo e a preservação e implantação de espaços verdes.

Esse tipo de planejamento vem sendo adotado como prioridade em diversos países do mundo. Zhao et al. (2006) concluíram que, se a China pretende reduzir os impactos ambientais negativos do desenvolvimento econômico e manter os benefícios econômicos e sociais, deverá adotar estratégias de gerenciamento do uso do solo e

o desenvolvimento de cidades mais verdes, proporcionando, assim, um ambiente mais saudável para seres humanos e animais selvagens.

Um exemplo no Brasil é o Programa Município Verde Azul do Estado de São Paulo (PMVA, 2016), que visa a estimular a implementação e o desenvolvimento de uma agenda ambiental municipal, conferindo eficiência e valorizando a descentralização administrativa, permitindo uma avaliação anual do desempenho das gestões ambientais dos municípios paulistas. Nesse programa, cinco das dez diretrizes consideradas imprescindíveis na gestão ambiental sustentável estão relacionadas diretamente com o aumento da arborização e espaços verdes do ambiente urbano.

3.2. Fenômeno das ilhas de calor

Uma das mais estudadas consequências do clima urbano é o fenômeno denominado Ilha de calor urbana, como resultado da diminuição gradativa da temperatura à medida que sai do centro para a periferia da área urbana (Figura 1).



Figura 1. Ilustração da ilha de calor urbano.

O fenômeno da ilha de calor pode ser apontado como uma irregularidade térmica, em que a temperatura da superfície do ar urbano é mais elevada do que os espaços circunvizinhos. A ilha de calor pode ocorrer em diversas escalas, tanto em

localizações dentro da própria cidade (escala local) quanto na diferença da temperatura da área urbana e rural (escala regional) (WENG; YANG, 2004).

No entendimento de Oke (2005), as alterações de calor que acontecem no interior das áreas urbanas são responsáveis pela constituição da ilha de calor, resultando em alterações no clima local. Contudo, existem ocorrências em que as alterações de calor excedem o centro urbano, os limites da cidade, transpondo o ambiente rural na periferia das cidades.

Os altos gradientes de temperatura que ocorrem das cidades em relação ao ambiente rural são decorrentes da denominada variação climática de ordem antropogênica (CAMARGO et al., 2007), resultando na ilha de calor. De acordo com os mesmos autores, é uma anormalidade térmica resultante do procedimento de desenvolvimento urbano, no tocante à alteração da superfície (basicamente no que se refere aos materiais que a compõem) e da atmosfera local que beneficia a entrada do fluxo de radiação solar.

Os diferentes materiais possuem uma propriedade física denominada de calor específico, que é a quantidade de energia necessária para provocar a variação de um grau de temperatura (em um quilograma de material) nos diferentes materiais (Tabela 2).

Tabela 2. Calor específico de diferentes materiais.

Material	kcal kg ⁻¹ °C ⁻¹	J kg ⁻¹ K ⁻¹	Material	kcal kg ⁻¹ °C ⁻¹	J kg ⁻¹ K ⁻¹
Aço	0,110-0,120	450-512	Hidrogênio	3,390	14.200
Acrílico	0,350	1.460	Lã mineral	0,160-0,190	670-800
Água	1,000	4.187	Madeira	0,360-0,600	1.500-2.510
Álcool metílico	0,609	2.549	Madeira, aglomerado	0,310	1.300
Alumínio	0,200-0,215	830-950	Mármore	0,200	830
Amoníaco	1,125	4.710	Óleo vegetal	0,400	1.670
Ar	0,240	1.000	Painel de fibras isolantes	0,330	1.400
Areia	0,190	800	Painel de aglomerado denso	0,300	1.250
Argamassa de cimento	0,250	1.046	Parafina	0,510	2.130
Asfalto	0,215	920	Pedras calcárias	0,220	920
Betão	0,210-0,260	840-1.040	Petróleo	0,510	2.130
Calcário	0,190	810	Polietileno	0,550	2.300
Cerâmica	0,220-0,240	920-1.000	Poliestireno expandido	0,370	1.550
Chumbo	0,031	128-130	Poliuretano expandido	0,250	1.045
Cobre, Zinco	0,092	386-390	PVC	0,250	1.040
Cortiça, aglomerado	0,040	170	Terra	0,440	1.840
Estanho, Prata	0,055	230-240	Vapor de água	0,420	1.760
Granito	0,160	650	Vidro	0,200	750
Grês	0,180	745	Zinco	0,090	389

Fonte: SASTRE (2000).

Assim como todos os fenômenos climáticos, a anomalia térmica decorrente da ilha de calor tem diversas escalas. Coltri et al. (2007) ressaltam as variações em escala espacial, tanto na zona intraurbana quanto entre a zona urbana e a rural, como a temporal.

Além dos problemas relacionados ao alto gradiente de temperatura, as construções também podem se constituir em barreiras para a circulação de ar, dificultando as trocas de calor com o ambiente rural. Alcoforado et al. (2006) afirmam que a redução no gradiente de velocidade do vento é influenciada pela diminuição da altura das áreas urbanas. Esse fato está relacionado à capacidade das construções e edifícios em modificar a velocidade e direção o vento, com resultados que podem ser negativos para a população urbana.

Entre as alterações climáticas, a temperatura é a que mais demonstra a concepção do clima urbano. O espaço edificado, incorporado às atividades humanas e às alterações na atmosfera urbana, provocam fenômenos distintos como “ilhas de calor” e “ilhas de frescor”, regiões que proporcionam diferenças térmicas quando conferidas ao seu entorno próximo (DUMKE, 2007).

3.3. Sensoriamento remoto no estudo da temperatura

A dificuldade em se estudar os gradientes de temperatura em escala espacial por meios convencionais (rede de estações meteorológicas) fez que o sensoriamento remoto fosse uma ótima alternativa sobretudo a partir da década de 1970, permitindo a identificação e diagnósticos do fenômeno de ilha de calor.

A definição clássica do termo sensoriamento remoto (SR) refere-se a um conjunto de técnicas destinado à obtenção de informação sobre objetos, sem que haja contato físico com eles (NOVO; PONZONI, 2001).

Sabe-se que a informação pode ser detectada e mensurada a partir das modificações que o objeto atribui aos campos eletromagnéticos, acústicos ou potenciais, e que segundo Novo (2008) “o termo sensoriamento remoto se tornou restrito ao uso de sensores de radiação eletromagnética”, por não necessitar de um meio para se propagar, podendo ficar em satélites e cada vez mais distantes do alvo de estudo. Os sensores captam a radiação lançada e transformam em sinais elétricos, que são recebidos na Terra e logo após são decompostas em representações orbitais.

O sensoriamento remoto no infravermelho termal, envolvido entre o intervalo de 8 a 14 μm do espectro eletromagnético, é baseado no princípio de que todo elemento e superfície que tenha temperatura acima do zero absoluto emite energia eletromagnética (STEINKE; STEINKE; SAITO, 2004). Para os mesmos autores, esses sensores remotos têm a capacidade de detectar a radiação em ondas longas emitida na faixa do infravermelho termal, faixa esta que permite detectar a radiação emitida pelos materiais, cujos valores se alteram em função da temperatura.

De acordo com a Lei de Plank, “quanto maior a temperatura de um dado comprimento de onda, maior será a abundância de energia enunciada por um corpo negro” (BIAS; BAPTISTA; LOMBARDO, 2003, p. 1742). Assim é possível avaliar a temperatura de determinada localidade ou objeto por meio da alteração dos níveis de cinza das imagens, sendo possível converter em valores de temperatura manifesta, fundando-se, para isso, no bom emprego do procedimento.

Jensen (2007) destaca que os estudos elementares das qualidades térmicas superficiais em escala regional foram fundamentados com o auxílio de satélites de baixa precisão espacial. No entanto, as últimas duas décadas constataram um grande progresso do sensoriamento remoto, consubstanciado pelo desenvolvimento dos sistemas orbitais de maior precisão espacial e/ou espectral, além da disponibilidade de imagens. Os estudos em sensoriamento remoto se baseiam na medição das radiações eletromagnéticas refletidas ou emitidas do espectro eletromagnético (Tabela 3.)

Tabela 3. Divisão do espectro eletromagnético.

Intervalo Espectral	Comprimento de Onda
Raios cósmicos	0,01 A°
Raios gama	0,01 – 0,1 A°
Raios X	0,1 – 10 A°
Ultravioleta	100nm – 0,38 μm
Visível	0,38 – 0,76 μm
Infravermelho próximo	0,76 – 1,2 μm
Infravermelho de ondas curtas	1,2 – 3,0 μm
Infravermelho médio	3,0 – 5,0 μm
Infravermelho termal	5,0 μm – 1,0 mm
Micro-ondas	1 mm – 100 cm
Rádio	1 m – 10 km
Áudio	10 – 100 km
Corrente alternada	> 100 km

Obs: $\text{A}^\circ = 10^{-10}$ m; nm = 10^{-9} m; $\mu\text{m} = 10^{-6}$ m; mm = 10^{-3} m; km = 10^3 m

Fonte: MENESES e ALMEIDA (2012).

O espectro eletromagnético se estende desde comprimentos de onda muito curtos a muito longos, como, por exemplo, as ondas de rádio, de baixa frequência, sendo divididos em ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, luz visível, ultravioleta, raios x e raios gama.

Para mensurar ou distinguir as radiações refletidas ou emitidas pelas diferentes superfícies ou materiais, são utilizados sensores embarcados nos sistemas orbitais (satélites) (Tabela 4).

Tabela 4. Resolução espectral e espacial das bandas refletidas ou emitidas, captadas pelos sensores dos satélites LANDSAT 4 e 5.

Sensor	Bandas	Resolução espectral (μm)	Resolução espacial (m)
Thematic Mapper (TM)	1	0,45-0,52	30
	2	0,52-0,60	30
	3	0,63-0,69	30
	4	0,76-0,90	30
	5	1,55-1,75	30
	6	10,40-12,50	120
	7	2,08-2,35	30
Multispectral Scanner (MSS)	1	0,5-0,6	60
	2	0,6-0,7	60
	3	0,7-0,8	60
	4	0,8-1,1	60

Fonte: USGS (2019).

No caso dos satélites LANDSAT 4 e 5 (Tabela 4), observa-se que a radiação emitida em ondas longas (infravermelho termal) é abrangida pela banda 6, cujo espectro captado pelo sensor é toda a radiação emitida com comprimento de onda variando de 10,40-12,50 μm . Com isso, a escolha do satélite, sensor e banda para os estudos em sensoriamento remoto, depende exclusivamente da interação da radiação com a superfície ou objeto a ser estudado.

Como a temperatura da superfície continental é mais facilmente pautada com as condições da própria superfície, um dos aproveitamentos básicos do sensoriamento remoto térmico no estudo de climas urbanos trata em analisar relações entre a composição espacial dos padrões térmicos urbanos e as especialidades da superfície urbana, o que pode ajudar posteriormente no planejamento do uso da terra (CHEN et al., 2006).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Localização e características

O estudo foi conduzido no município de Votuporanga, região Noroeste do Paulista (Figura 2), localizado entre as latitudes $20^{\circ}19'23,25''$ e $20^{\circ}34'52,56''$ Sul e as longitudes $49^{\circ}50'39,52''$ e $50^{\circ}10'20,80''$ Oeste e altitude de 499 metros.

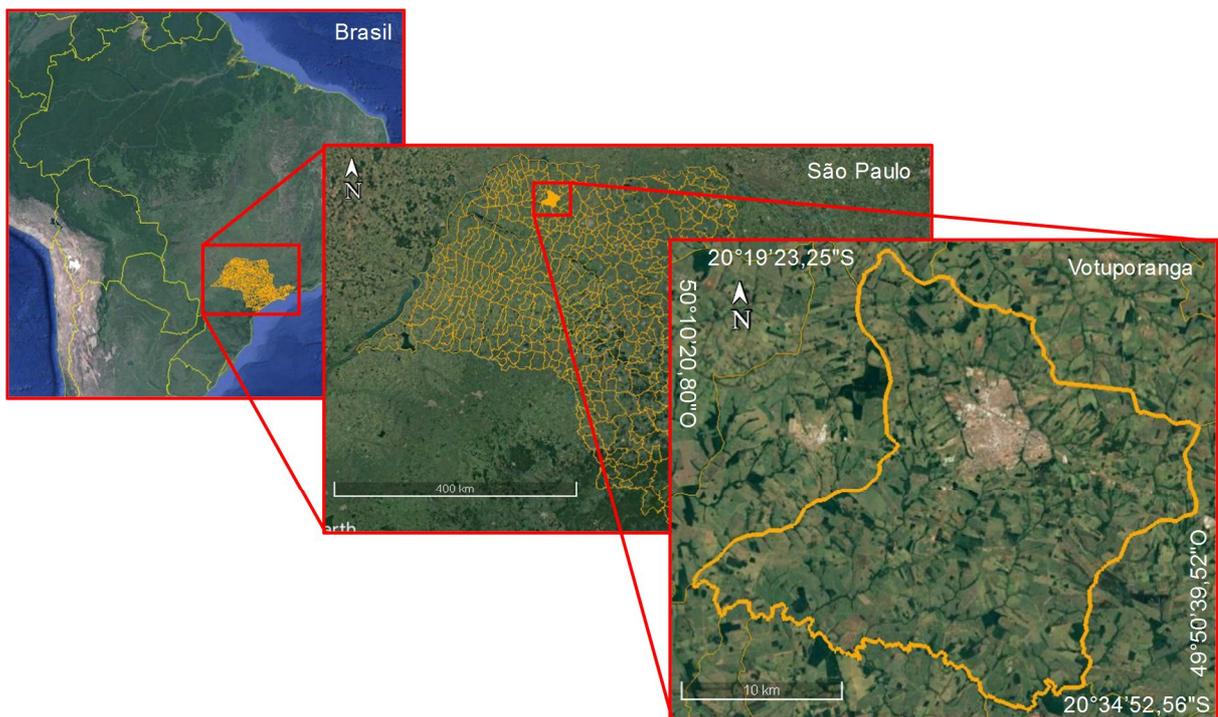


Figura 2. Localização do município de Votuporanga - SP.
Fonte: Editado de Google Earth (2018).

De acordo com o último censo, o município é composto de uma população estimada de 84.692 habitantes (IBGE, 2018), uma densidade demográfica de 201,15 habitantes por km^2 (IBGE, 2010), sendo que, segundo Zuanazzi (2017), a área urbanizada cresceu de 18,17 km^2 em 2002 para 24,09 km^2 em 2016, resultando em uma taxa de expansão média anual de 0,493 km^2 .

Quanto à classificação Köppen, o clima da região de Votuporanga/SP é tropical úmido, com inverno seco e ameno e verão quente e chuvoso (ROLIM et al., 2007), precipitação média anual de 1.298 mm e temperatura média de $24,4^{\circ}\text{C}$ (CIIAGRO, 2019).

4.2. Metodologia

A avaliação do efeito das ilhas de calor com o uso de sensoriamento remoto foi realizada em duas etapas: (1) avaliação da precisão da estimativa da temperatura da superfície terrestre por imagem de satélite e (2) avaliação dos gradientes de temperatura ao longo das áreas rurais e urbanas.

4.2.1. Avaliação da precisão da estimativa da temperatura da superfície terrestre por imagem de satélite

Esta etapa foi realizada pela modelagem matemática entre as temperaturas da superfície estimadas por satélite (variável independente) e as temperaturas medidas na superfície do solo e a dois metros de altura com o uso de termômetros (variáveis dependentes).

Para a determinação das variáveis dependentes, foram definidos dois perfis de amostragem com 9 pontos cada, sendo um no alinhamento aproximado de Norte-Sul (N-S) e outro com alinhamento aproximado de Oeste-Leste (W-E), iniciando no perímetro rural e se distribuindo ao longo do perímetro urbano até atingir novamente o perímetro rural (Figura 3).

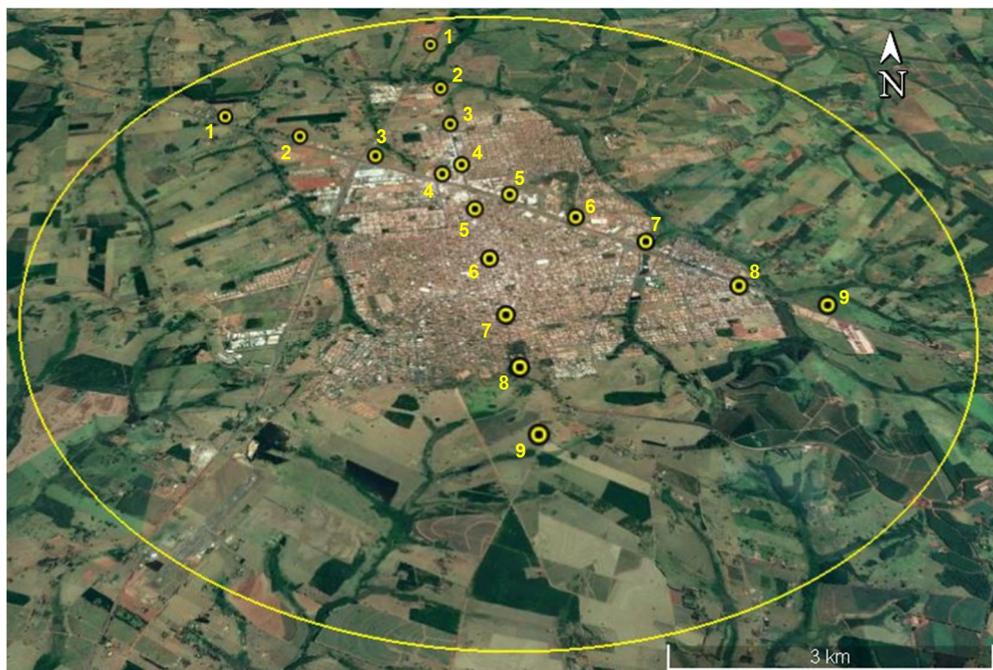


Figura 3. Distribuição dos pontos de amostragem de temperatura ao longo dos perfis N-S e W-E.

Em cada um desses pontos foram medidas as temperaturas da superfície do solo e a temperatura à dois metros de altura, utilizando um TERMO-HIGROMETRO DIGITAL HTH-24.

As medidas de temperatura foram programadas para serem realizadas nas mesmas datas e horários de passagem do satélite. De acordo com o planejamento, as campanhas deveriam ser distribuídas ao longo dos períodos seco e chuvoso do ano, porém, de todas as datas programadas (07/01/2018, 12/03/2018, 13/04/2018, 15/05/2018, 16/06/2018, 02/07/2018, 19/08/2018, 04/09/2018, 06/10/2018, 23/11/2018 e 09/12/2018), somente em duas foi possível obter imagens de satélite de boa visibilidade sobre a área de estudo, em decorrência da presença de nuvens.

As datas, então, consideradas neste estudo, foram as das campanhas realizadas em 19/08/2018 (período de inverno) e em 12/03/2018 (período de verão). Os horários de medições foram próximos aos de passagem dos satélites (entre as 12h00 e 14h00), ou seja, em torno das 13h00 no horário de Brasília (-3 GMT). Nas Figuras 4 e 5, estão apresentadas as temperaturas do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento ao longo dos dias em que as medições foram realizadas.

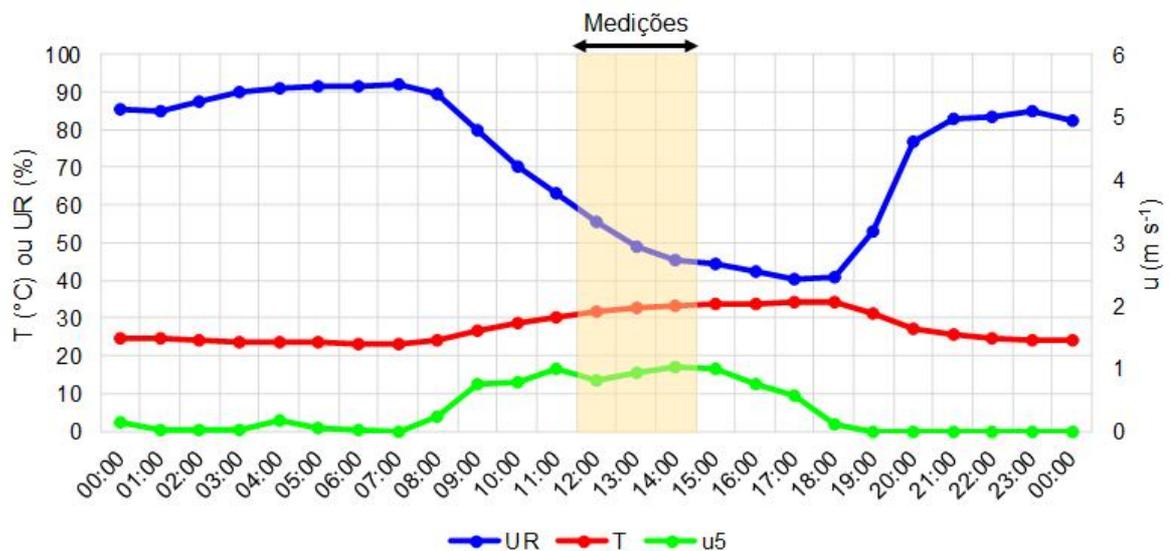


Figura 4. Condições climáticas em 24 horas do dia 12/03/2018, sendo temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento, com destaque para o horário das medições.

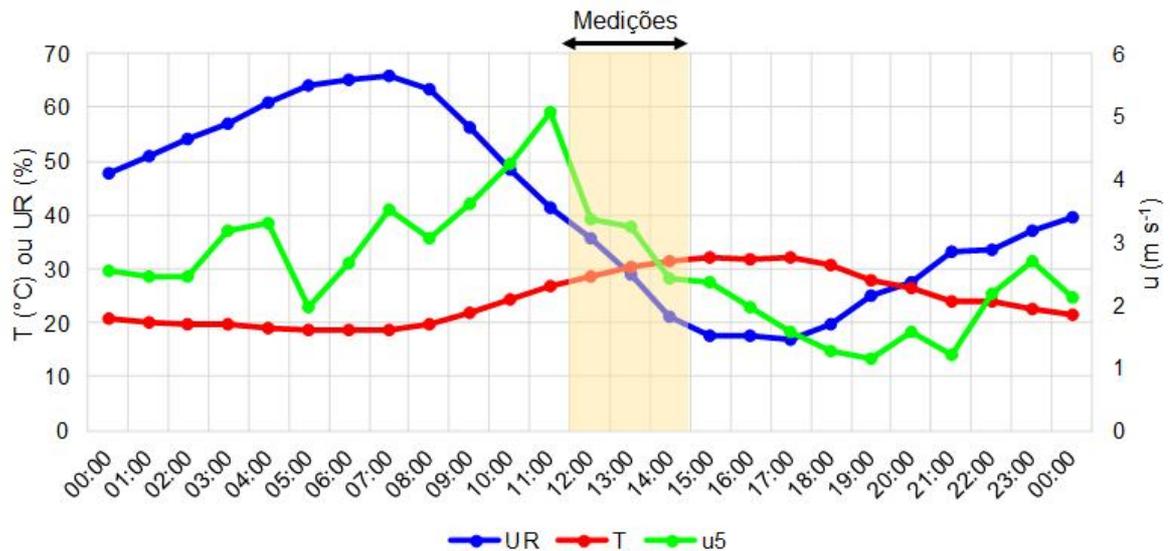


Figura 5. Condições climáticas em 24 horas do dia 19/08/2018, sendo temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento, com destaque para o horário das medições de temperatura.

A temperatura da superfície por satélite (variável independente) foi obtida por imagens da banda 10, do sensor TIRS, do satélite LANDSAT 8 (USGS, 2019), cujas características dos sensores estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Características dos sensores do satélite LANDSAT 8.

Satélite	Sensor	Banda	Respe (μm)	Respa (m)	Rtemp (dias)	Rrad (bits)	
LANDSAT 8	OLI (Operational Land Imager)	1	0,433 - 0,453	30	16	12	
		2	0,450 - 0,515				
		3	0,525 - 0,600				
		4	0,630 - 0,680				
		5	0,845 - 0,885				
		6	1,560 - 1,660				
		7	2,100 - 2,300				
		8	0,500 - 0,680				15
		9	1,360 - 1,390				30
	TIRS (Thermal Infrared Sensor)	10	10,60 - 11,19	100			
		11	11,50 - 12,50	100			

Obs: Respe (resolução espectral), Respa (resolução espacial), Rtemp (resolução temporal), Rrad (resolução radiométrica).

Fonte: USGS (2019).

O sensor TIRS usa fotodetectores de infravermelho de poço quântico (QWIP's) para medir a energia do infravermelho térmico (TIR) de onda longa emitida pela superfície da Terra, cuja intensidade é uma função da temperatura da superfície. Os QWIP's do TIRS são sensíveis a duas bandas de comprimentos de onda longos

infravermelhos térmicos, permitindo a separação da temperatura da superfície da Terra e da temperatura da atmosfera (USGS, 2018).

O trabalho de geoprocessamento iniciou-se com o *download* da banda 10 das imagens LANDSAT 8 do banco de dados do United States Geological Survey (USGS, 2019). A imagem padrão calibrada e quantizada foi convertida em irradiância espectral aparente a partir da Equação 01.

$$L_{\lambda} = M_L \cdot Q_{cal} + A_L \quad (01)$$

, em que:

M_L – fator de re-escala da banda específica 10;

A_L – fator aditivo de re-escala da banda específica 10;

Q_{cal} – produto padrão calibrado e quantizado do valor do pixel.

Em seguida, as imagens da temperatura da superfície por satélite, a partir da banda 10, são obtidas com o auxílio da Equação 02.

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)} \quad (02)$$

, em que:

T - temperatura da superfície (°K);

K_1 e K_2 – constantes de conversão da banda termal específica 10;

L_{λ} - irradiância espectral aparente da banda 10 (equação 1).

Finalmente, as imagens foram transformadas de Kelvin para Celsius, utilizando expressão $TC = TK - 273$, em que TC é a temperatura em graus Celsius e TK é a temperatura em graus Kelvin. Os processamentos foram realizados com o auxílio da ferramenta de álgebra de mapas do aplicativo ArcGIS versão educacional.

Pela sobreposição dos mesmos pontos de medição das temperaturas em campo nos perfis N-S e W-E e por meio da ferramenta de atribuição de informação da superfície pelo aplicativo ArcGIS, foi possível obter as temperaturas da superfície por satélite (variável independente) nos mesmos pontos.

A análise compreendeu a estatística descritiva das temperaturas medidas e comparação de médias, com o objetivo de identificar possíveis diferenças entre as temperaturas medidas na zona urbana e rural. Para isso, utilizou-se o critério de Gravetter e Wallnau (1995), por meio do qual a diferença estatística é obtida quando não há sobreposição dos limites superior e inferior dos erros padrão das médias.

Também, de posse dos dados das variáveis dependentes e independentes, realizou-se a modelagem matemática por análise de variância da regressão, em que foram testados os modelos linear, quadrático, logarítmico, potência e exponencial. A precisão das temperaturas da superfície por satélite foi avaliada pelo nível de significância e, respectivos coeficientes de determinação dos modelos.

4.2.2. Avaliação dos gradientes de temperatura da superfície ao longo das áreas rurais e urbanas

Os gradientes de temperatura foram avaliados utilizando imagens da temperatura da superfície por satélite (T_{ss}) e imagens das temperaturas da superfície com termômetro (T_{st}) e a dois metros de altura (T_a). As imagens de T_{st} e T_a foram obtidas por processamento, a partir da imagem T_{ss} , utilizando os modelos matemáticos obtidos no item anterior, com o auxílio da ferramenta de álgebra de mapas do ArcGIS.

Para avaliar o perfil de temperatura nas três imagens criou-se, por digitalização manual, um alinhamento de 12 km na direção Noroeste-Sudeste (NW-SE), de forma a abranger a zona rural nos dois extremos e o máximo de zona urbana no centro (Figura 6).

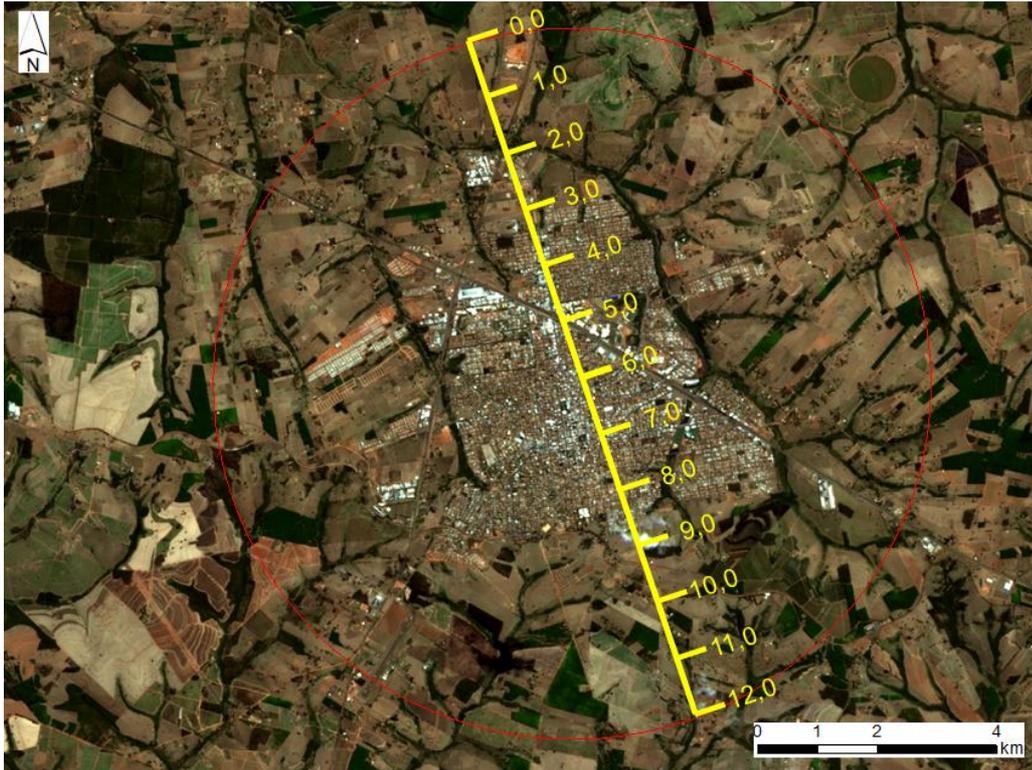


Figura 6. Alinhamento NW-SE digitalizado manualmente.

Com esse alinhamento sobreposto nas imagens Tss, Tst e Ta, foi possível obter os valores de temperatura a cada 30 metros de distância entre os pontos, permitindo analisar as mínimas variações espaciais de temperatura ao longo do alinhamento.

Com os dados de temperaturas extraídos desses perfis, realizou-se uma análise descritiva visando a comparar os padrões de temperatura entre as zonas rurais e urbanas, além de análises pontuais visando a caracterizar os efeitos de locais de estruturas urbanas (prédios, praças, áreas de preservação, fragmentos de matas nativas, etc). Também se realizou a comparação entre as médias segundo Gravetter e Wallnau (1995). Todas as análises estatísticas e gráficas foram realizadas com o auxílio do *software* Microsoft Excel.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Temperaturas da superfície do solo e do ar por termômetro

As temperaturas da superfície com termômetro (T_{st}) em 12/03/2018 variaram de 28,8 a 32,5°C, com média de $30,73 \pm 0,62^\circ\text{C}$ e coeficiente de variação de 4,0%. Na data de 19/08/2018, a temperatura média da superfície foi de $34,21 \pm 1,78^\circ\text{C}$, variando de 29,9 a 39,7°C e coeficiente de variação de 10,5% (Tabela 6).

Tabela 6. Estatística descritiva da temperatura da superfície por termômetro nas datas de 12/03/2018 e 19/08/2018 em Votuporanga-SP.

Variável	12/03/2018	19/08/2018
Média \pm Intervalo de confiança	$30,73 \pm 0,62$	$34,21 \pm 1,78$
Máximo	32,5	39,7
Mínimo	28,8	29,9
Desvio padrão	1,24	3,58
Coeficiente de variação	4,0%	10,5%

Observou-se uma tendência do aumento da temperatura da superfície por termômetro na área de abrangência urbana do alinhamento N-S em 12/03/2018 (Figura 7 a), em que a temperatura média foi de 31,1°C em comparação com 29,1°C da região rural.

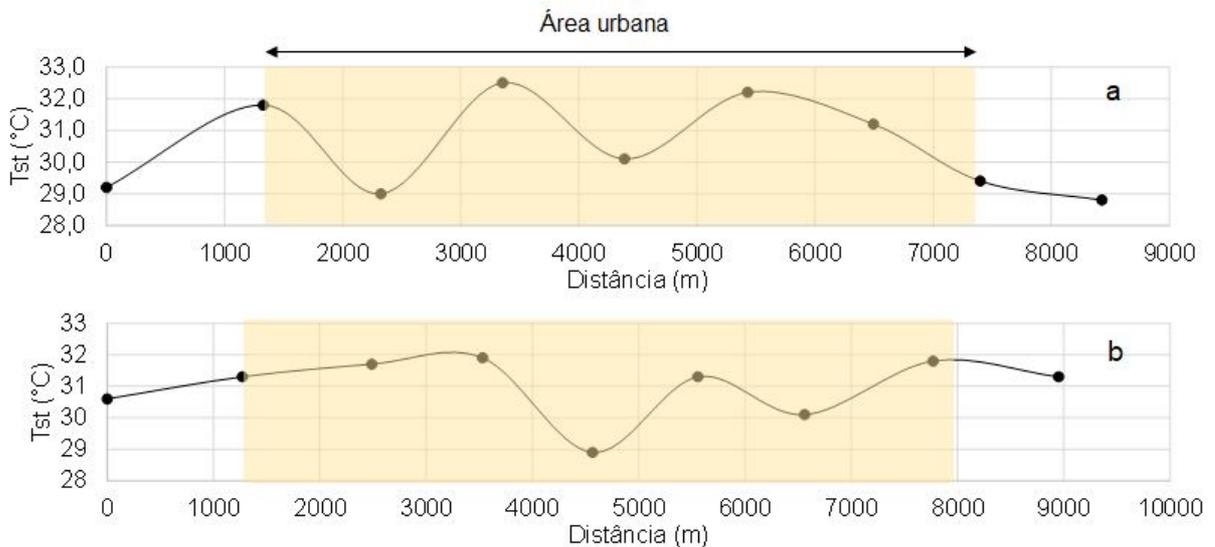


Figura 7. Temperatura da superfície do solo com termômetro ao longo dos alinhamentos N-S (a) e W-E (b) em 12 de março de 2018.

No alinhamento W-E (Figura 7 b), as temperaturas foram mais uniformes ao longo do percurso (31,0°C para as regiões de abrangência urbana e rural), fato este que pode ser atribuído às medições terem sido realizadas ao longo da rodovia, que se caracteriza por longas faixas de domínio, o que reduz a resistência do ar, providas de coberturas vegetais, que utilizam energia solar na fotossíntese e evapotranspiração, proporcionando maior fluxo de vento e menor gradiente de temperatura no caminhar longitudinal.

Outro fato relevante foi o decréscimo da Tst entre 4000 e 7000 m do primeiro ponto de medição (Figura 7b), que está relacionado ao efeito microclimático das represas municipais de abastecimento de água (SAEV – Serviço de Água e Esgoto de Votuporanga) e de recreação (Parque da Cultura de Votuporanga), visto que a evaporação da água resfria a superfície do solo por meio da troca do calor sensível (MONTEIRO et al., 1990), retirando energia e reduzindo a temperatura.

Na data de 19/08/2018, no alinhamento N-S (Figura 8 a), as Tst tenderam a ser menores ao longo da zona urbana (média de 30,8°C) e mais elevadas no perímetro rural (média de 31,6°C).

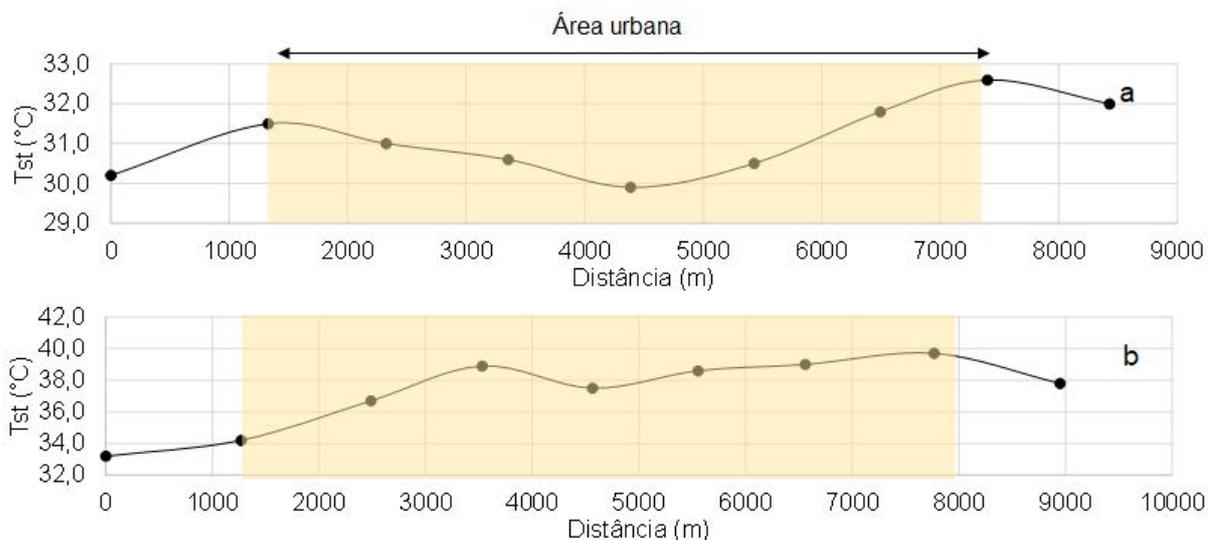


Figura 8. Temperatura da superfície do solo com termômetro ao longo dos alinhamentos N-S (a) e W-E (b) em 19 de agosto de 2018.

No alinhamento W-E (Figura 8 b), as Tst foram mais elevadas no perímetro urbano (média de 38,4°C) e mais amenas no perímetro rural (média de 35,0°C) para as regiões de abrangência rural, ou seja, cerca de 5 a 6°C superior ao do alinhamento N-S.

Esses resultados demonstram que a interação da radiação com a superfície do solo depende não somente do material com o qual a radiação interage, mas também com as estações do ano (SILVA et al., 2010), que interferem na intensidade (distância do Sol em relação a Terra) e ângulo de incidência da radiação (posição do Sol em relação a Terra), bem como a velocidade do vento e umidade relativa do ar (BARBIRATO, 2007), que interferem na condução e difusão do calor sensível da superfície.

A temperatura do ar por termômetro (T_a) na data de 12/03/2018 variou de 26,8 a 31,0°C, resultando em média de $28,78 \pm 0,59$ °C. Em 18/08/2018, a variação observada foi de 27,8 a 32,6°C, resultando em média um pouco superior de $29,78 \pm 0,60$ °C (Tabela 7).

Tabela 7. Estatística descritiva da temperatura do ar por termômetro.

Variável	12/03/2018	19/08/2018
Média \pm Intervalo de confiança	$28,78 \pm 0,59$	$29,78 \pm 0,60$
Máximo	31,0	32,6
Mínimo	26,8	27,8
Desvio padrão	1,18	1,21
Coeficiente de variação	4,1%	4,1%

Nas medições de 12/03//2018 (Figura 9 a), observou-se, no alinhamento N-S, uma diferença média de 1,7°C na T_a , entre a área de abrangência do perímetro urbano (média de 28,9°C) em comparação com os locais medidos em área rural (27,2°C).

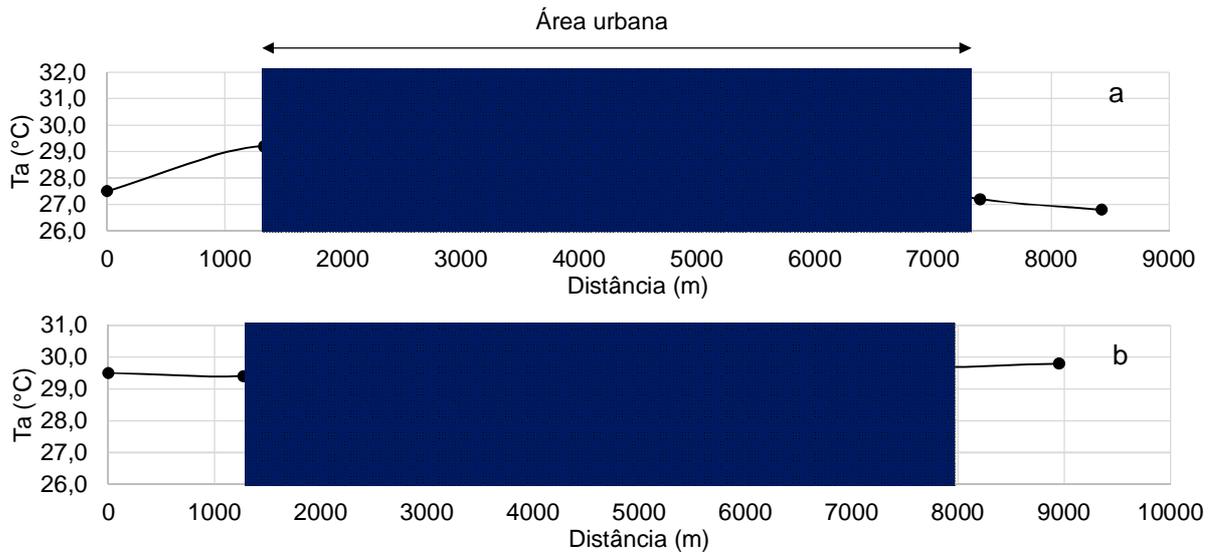


Figura 9. Temperatura do ar com termômetro ao longo dos alinhamentos N-S (a) e W-E (b) em 12 de março de 2018.

Já no alinhamento W-E (Figura 9 b), houve certa uniformidade da ($29,1^{\circ}\text{C}$ na área urbana e $29,7^{\circ}\text{C}$ na área rural). Assim como para a T_{st} houve um decréscimo da T_a entre a distância de 4000 e 5000 m a partir do primeiro ponto de medição, fato este que também pode ser atribuído à presença das regiões das represas de abastecimento de água e de recreação.

Nas medições de 19/08/2018 (Figura 10 a), verificou-se no alinhamento N-S, uma diferença média de $1,5^{\circ}\text{C}$ na T_a medida na área de abrangência do perímetro urbano ($28,7^{\circ}\text{C}$) em comparação com a da área rural ($27,2^{\circ}\text{C}$).

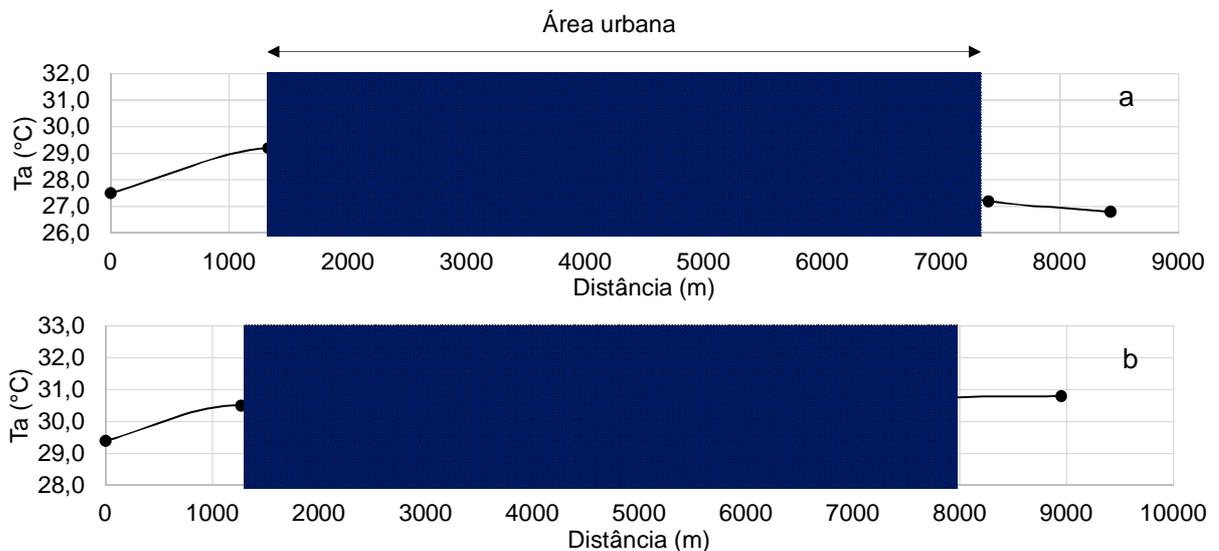


Figura 10. Temperatura do ar com termômetro ao longo dos alinhamentos N-S (a) e W-E (b) em 19 de agosto de 2018.

No alimento W-E (Figura 10 b), as temperaturas Ta foram mais semelhantes nas áreas de abrangência urbana (29,1°C) e rural (29,7°C), com diferença média de 0,6°C.

Comparando-se as temperaturas medidas entre as datas (Figura 11), pode-se observar que houve diferenças significativas entre Tst e Ta, sendo a Tst superior a Ta em 6,8% (= 2,0°C) na data de 12/03/2018 e em 14,9% (=4,4°C) na data de 19/08/2018.

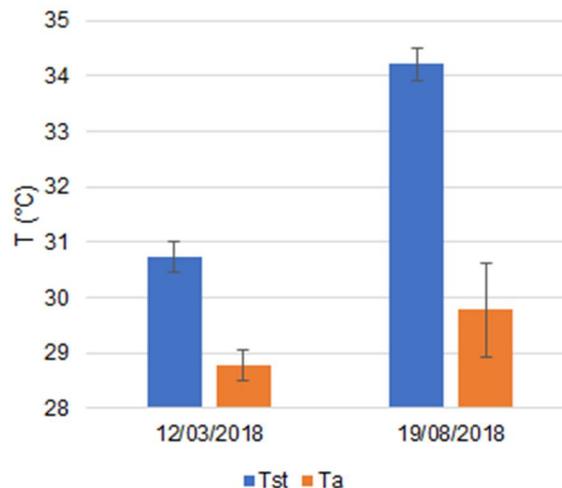


Figura 11. Comparação entre as médias de temperatura da superfície do solo (Tst) e do ar a dois metros (Ta) pelo erro padrão da média.

Quando se compara a mesma variável de temperatura medida (Tst ou Ta) entre as datas, observou-se diferença significativa somente para a Tst, sendo a média na data de 19/08/2018 significativamente superior ao encontrado em 12/03/2018 (11,3% ou 3,5°C). Esse resultado provavelmente está relacionado à maior umidade no mês de março (tanto do ar quanto do solo), o que dificulta a variação de temperatura (BARBIRATO, 2007).

5.2. Estimativa da temperatura da superfície por satélite

Os melhores modelos de resposta da Tst em função da temperatura da superfície por satélite (Tss) nas duas datas avaliadas, foram quadráticos, porém, com significância ($p < 0,05$) somente para a data de 12/03/2018 (Tabela 8).

Tabela 8. Resultado da análise de regressão da temperatura da superfície com termômetro em função da temperatura da superfície por satélite.

Data	p	Modelo	R
12/03/2018	<0,01	Quadrático	0,911
19/08/2018	0,06	Quadrático	0,563

Pelos resultados da Tabela 8, observa-se que as correlações, segundo Hopkins (2000), foram quase perfeitas em 12/03/2018 ($r = 0,9$ a $1,0$) e altas em 19/08/2018 ($r = 0,5$ a $0,7$). Os melhores modelos matemáticos obtidos para as duas datas estão apresentados na Figura.12.

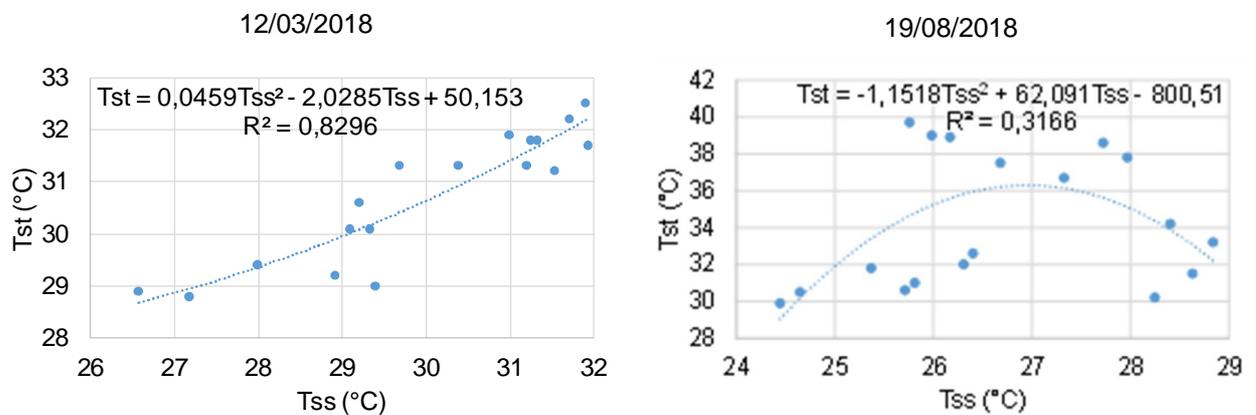


Figura 12. Resposta da temperatura da superfície do solo com termômetro (Tst) em função da temperatura da superfície por satélite (Tss) nas duas datas avaliadas.

Para a T_a (Tabela 9), os melhores modelos de resposta em função da T_{ss} também foram quadráticos, sendo, neste caso, significativo ($p < 0,01$) para nas duas datas avaliadas.

Tabela 9. Resultado da análise de regressão da temperatura do ar (T_a) em função da temperatura da superfície por satélite (T_{ss}).

Data	p	Modelo	R
12/03/2018	< 0,01	Quadrático	0,711
19/08/2018	0,03	Quadrático	0,625

Pelos resultados da Tabela 9, obtiveram-se correlações classificadas como “muita alta” em 12/03/2018 ($r = 0,7$ a $0,9$) e “alta” em 19/08/2018 ($r = 0,5$ a $0,7$) (HOPKINS, 2000). Os melhores modelos matemáticos para as duas datas estão apresentados na Figura 13.

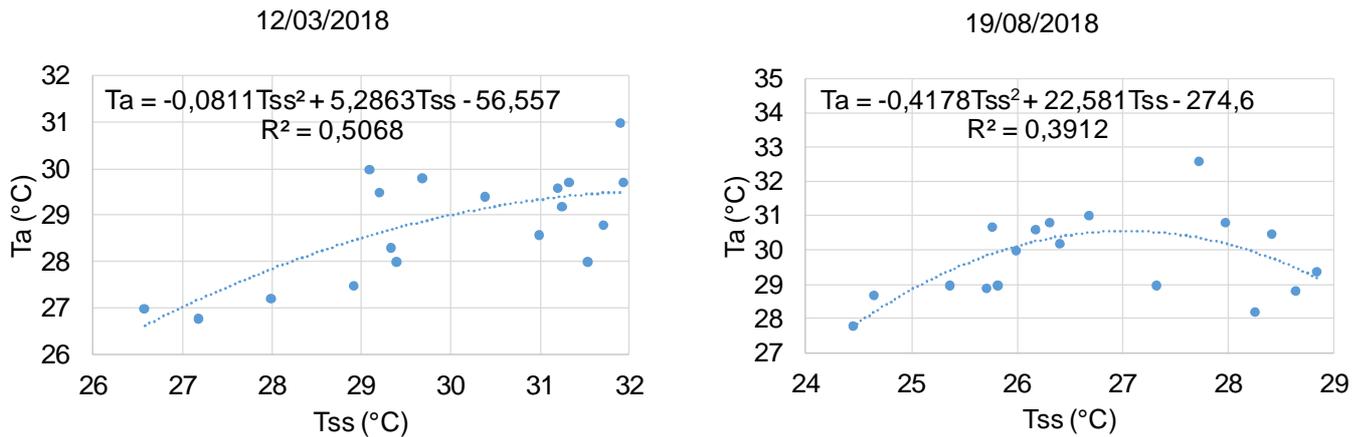


Figura 13. Resposta da temperatura do ar a dois metros (T_a) em função da temperatura da superfície por satélite (T_{ss}) nas datas avaliadas.

As melhores precisões nas estimativas da temperatura, tanto pra T_{st} como T_a , foram obtidas no verão (12/03/2018). Esses resultados podem estar relacionados à maior estabilidade das condições climáticas entre o momento das medidas de temperatura por termômetro (entre 12:00 e 14:00h) em relação ao horário de aquisição da imagem de satélite.

As condições climáticas médias entre 12h00 e 14h00 da medição em março foram de 32,6°C de temperatura do ar, 50,04% de umidade relativa do ar e 0,93 m s⁻¹ de velocidade do vento a 5 m de altura, enquanto em agosto foram de 30,1°C de temperatura do ar, 28,56% de umidade relativa e 3,01 m s⁻¹. Portanto, a maior umidade relativa do ar (aproximadamente o dobro) e menor velocidade do vento (cerca de três vezes menor) do horário de medição em março, tendeu a manter as condições climáticas mais estáveis, reduzindo os erros em relação à estimativa por satélite.

5.3. Gradiente térmico no ambiente urbano

As temperaturas médias da superfície por satélite (T_{ss}) e as estimadas para a superfície do solo (T_{st}), a dois metros de altura no ar (T_a), em 12/03/2019 (época do verão), foram significativamente superior na área de abrangência da zona urbana (Figura 14).

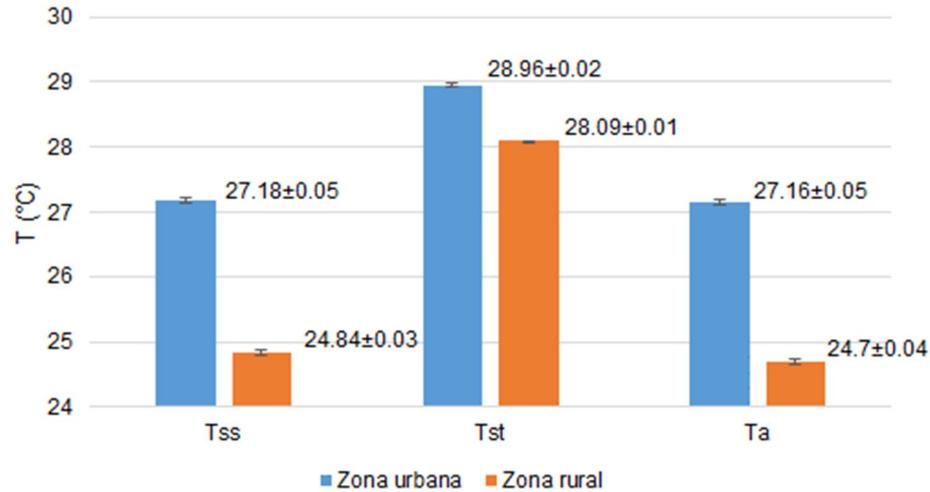


Figura 14. Valores médios de temperatura da superfície por satélite (Tss) e estimadas pelos modelos para a superfície do solo (Tst) e do ar a dois metros (Ta), nas zonas rural e urbana em 12/03/2018.

A maior diferença observada foi na Ta, que na zona urbana apresentou temperatura média de 2,5°C ou 10,0% a mais do que na zona rural. A menor diferença observada foi na Tst, que, mesmo assim, na zona urbana, foi de 0,9°C ou 3,1% a mais que na zona rural.

Esses resultados podem ser confirmados na Figura 15, em que é evidente um aumento mais acentuado das Tss e Ta, e mais suave da Tst, do início ao fim da abrangência da zona urbana em comparação com a zona rural.

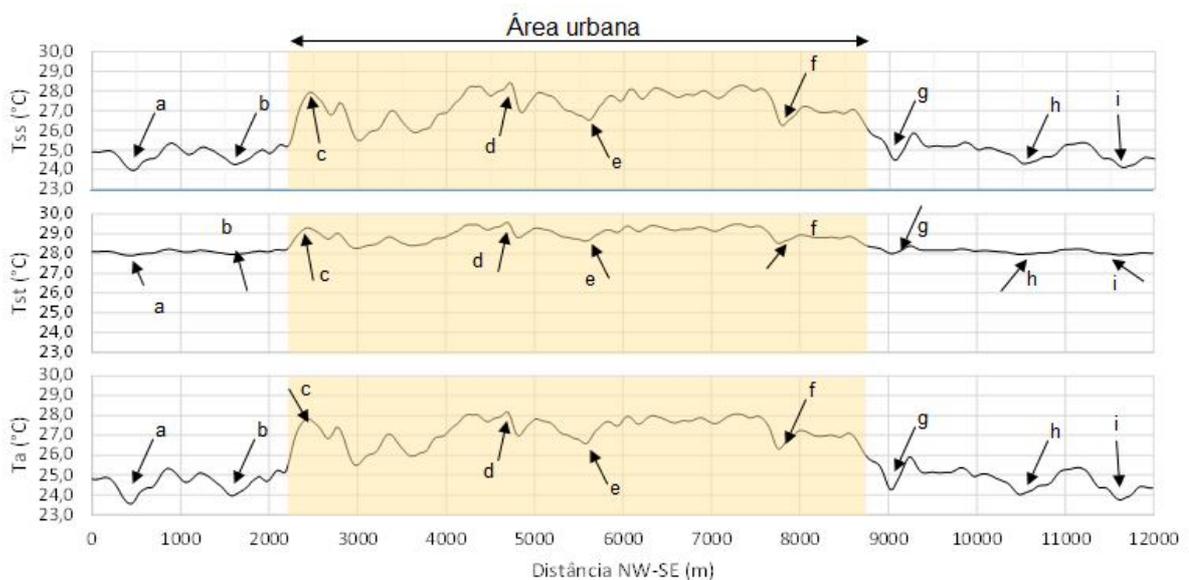


Figura 15. Variabilidade da temperatura da superfície por satélite (Tss) e das temperaturas do ar a 2 m (Ta) e da superfície do solo (Tst) estimadas por satélite em 12/03/2018, sendo a,g,i-fragmento de vegetação nativa em área rural, b,h-área de várzea, c-parque industrial II, d-telhado de indústria, e-região com alta densidade arbórea urbana, f-fragmento de vegetação nativa em área urbana.

Pelo comportamento da T_{ss} e da T_a , as áreas de várzeas e com fragmentos de vegetação nativa na zona rural, proporcionaram temperaturas locais próximas a 23 e 24,0°C (setas a, b, g, h, i da Figura 15), enquanto, nas demais regiões da zona rural, as temperaturas oscilaram entre 24,0 e 26,0°C.

Já na zona urbana, as coberturas vegetais, tanto dos fragmentos de vegetação nativa como de região com alta densidade de arborização urbana (cerca de 21% de cobertura de dossel), proporcionaram temperaturas locais variando de 26,0 a 27,0°C (setas “e” e “f” da Figura 15), enquanto, nas demais regiões da zona urbana, as temperaturas variaram em entre 27,0 e 29,0°C. Outro fator importante foram os picos de temperaturas locais nas regiões industriais, com a temperatura da superfície com termômetro (T_{st}) entre 29 e 30°C (setas “c” e “d” da Figura 15), demonstrando a necessidade de readequação urbanística desses elementos.

Esses resultados corroboram com Weng (2003), que, utilizando a banda termal do sensor ETM+ do LANDSAT 7, obteve temperaturas médias de 32,3°C em áreas comerciais e industriais, 30,8°C em áreas residenciais, 26,5 °C em áreas de culturas agrícolas, 27,5°C em gramados, 26,5°C em área de pastagens, 25,2°C em florestas e locais com água. Coelho e Correa (2013), na cidade de Vitória/ES, com o uso de sensor TIRS/LANDSAT 8, observaram intensa exatância termal em áreas como prédios, pavimentos, telhados e outras superfícies típicas da paisagem urbana, bem como a distribuição heterogênea dessas respostas, resultando em temperaturas da superfície com amplitudes elevadas superiores a 12°C. Também constataram a influência e a importância da cobertura vegetal na amenização da temperatura, a exemplo do Parque Estadual da Fonte Grande.

É evidente, nesse caso, como a área urbanizada, mesmo em um município de pequeno a médio porte como Votuporanga, já demonstra as características de ilhas de calor urbano, observadas na Figura 16.

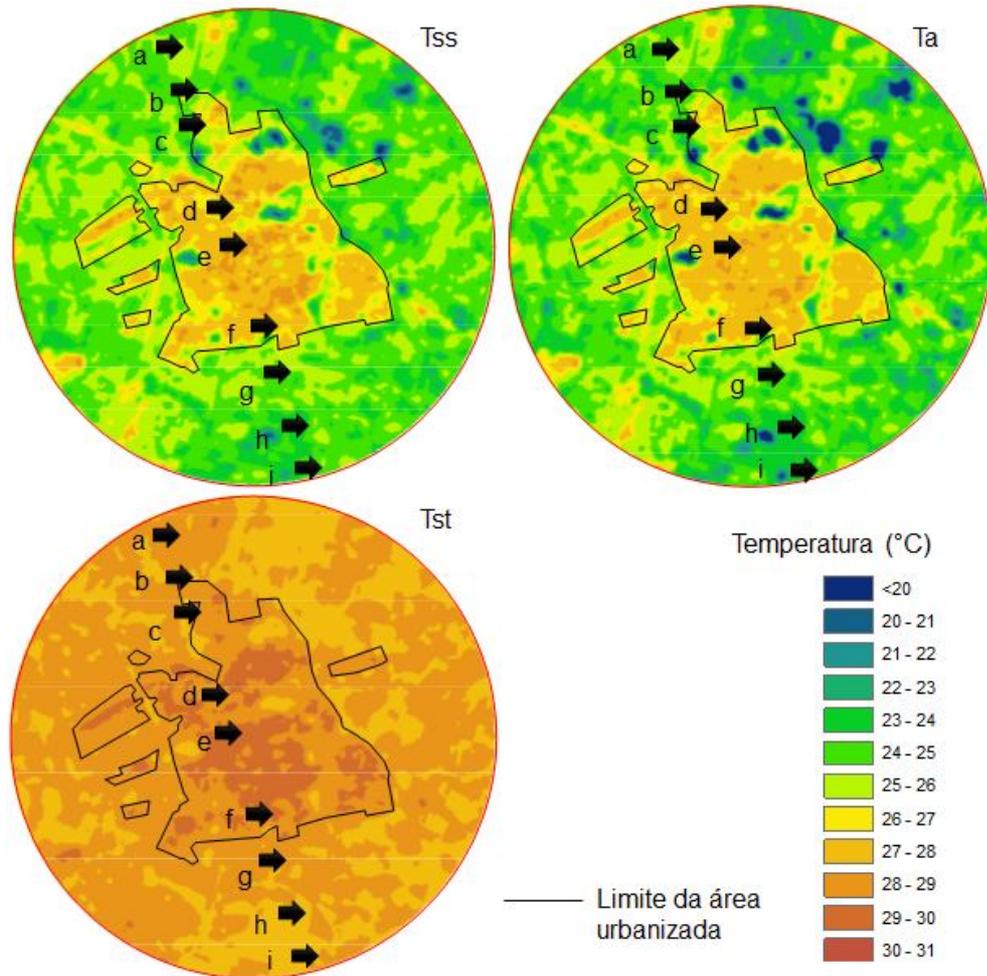


Figura 16. Comparação entre temperaturas Tss, Ta e Tst, mês de 03/2018; sendo a,g,i-fragmento de vegetação nativa em área rural, b,h-área de várzea, c-parque industrial II, d-telhado de indústria, e-região com alta densidade arbórea urbana, f-fragmento de vegetação nativa em área urbana.

É nítido o efeito das ilhas de calor urbano nas regiões centrais da cidade com Tss e Ta, variando 28 a 30°C e, à medida que se caminha para os limites da área urbanizada, as temperaturas caem para 22 e 23°C (gradientes de cerca de 6°C). Cabe ressaltar que boa parte das áreas com temperatura inferior a 20°C observadas na imagem são devido a interferências das nuvens.

Na observação de 19/08/2018 (época do inverno), não obstante as temperaturas médias haviam sido sensivelmente superiores na zona rural, não foram observadas diferenças significativas entre as Tss, Tst e Ta obtidas na abrangência das zonas rurais e urbanas (Figura 17).

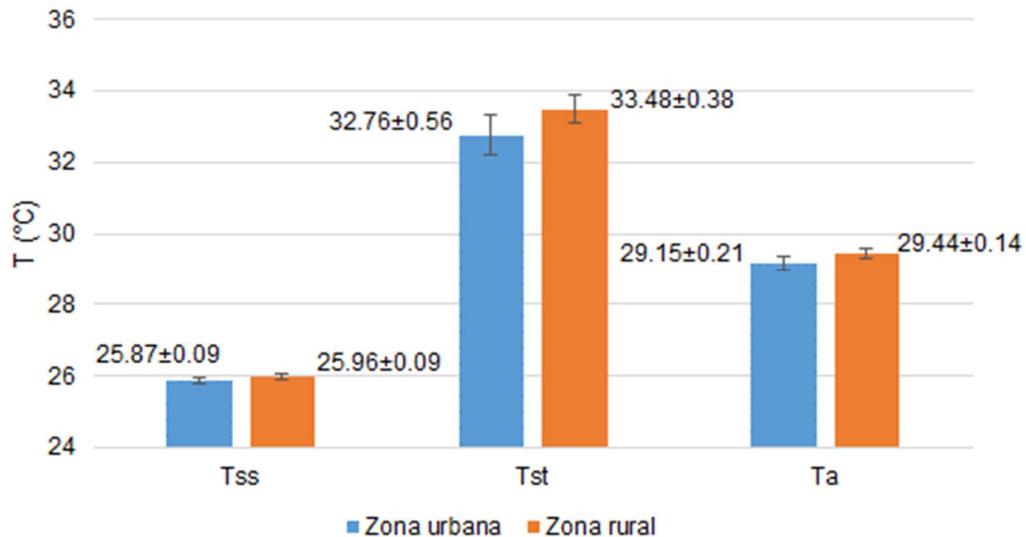


Figura 17. Valores médios de temperatura da superfície por satélite (Tss) e estimadas pelos modelos para a superfície do solo (Tst) e do ar a dois metros (Ta), nas zonas rural e urbana em 19/08/2018.

Em todos os casos (Tss, Tst e Ta), as diferenças nas temperaturas médias entre zonas urbana e rural foram inferiores a 1,0°C. Essa uniformização, e até uma suave diminuição de temperaturas na zona urbana em relação à zona rural, pode ser evidenciada a partir da análise do perfil de gradientes das temperaturas Tss, Tst e Ta da Figura 18.

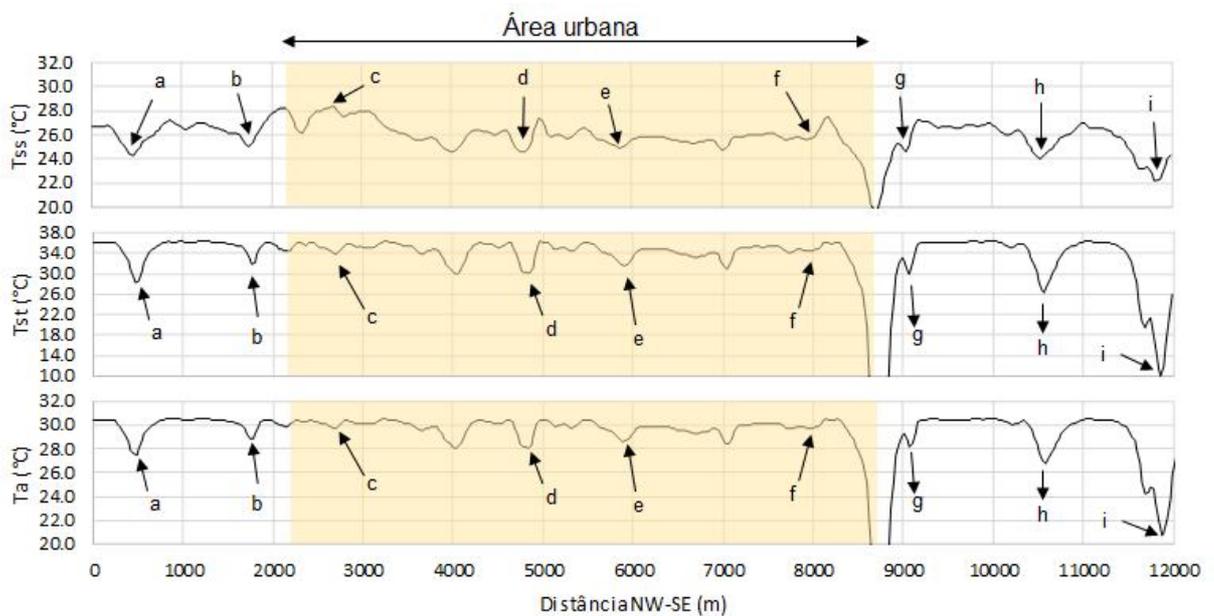


Figura 18. Medição da temperatura do ar, da superfície e do satélite, em Agosto/2018; sendo a,g,i-fragmento de vegetação nativa em área rural, b,h-área de várzea, c-parque industrial II, d-telhado de indústria, e-região com alta densidade arbórea urbana, f-fragmento de vegetação nativa em área urbana.

Mesmo com maior uniformização, é possível identificar que os locais da zona rural ocupados por fragmentos de vegetação nativa e áreas de várzeas (setas a, b, g, h, i da Figura 18) apresentaram Tss variando de 22,0 a 26,0°C, Ta variando de 20,0 a 29,0°C e Tst variando de 10,0 a 34,0°C. Cabe destacar que entre o trecho de 8600 a 9000 m ocorreu interferência de nuvens e que também no local da seta “i” (Figura 18) pode ter ocorrido essa interferência, embora não sendo visível pela imagem de satélite.

Com a uniformização da temperatura observada nessa data de inverno, não foi possível observar o efeito das ilhas de calor (Figura 19). A única diferenciação possível de ser observada foram as áreas de várzeas e fragmentos de vegetação nativa (com menos de 20,0 a 24,0°C) das demais áreas, que, no geral, variaram de 24 a 31°C nas Tss e Ta e de 31 a 40°C na Tst.

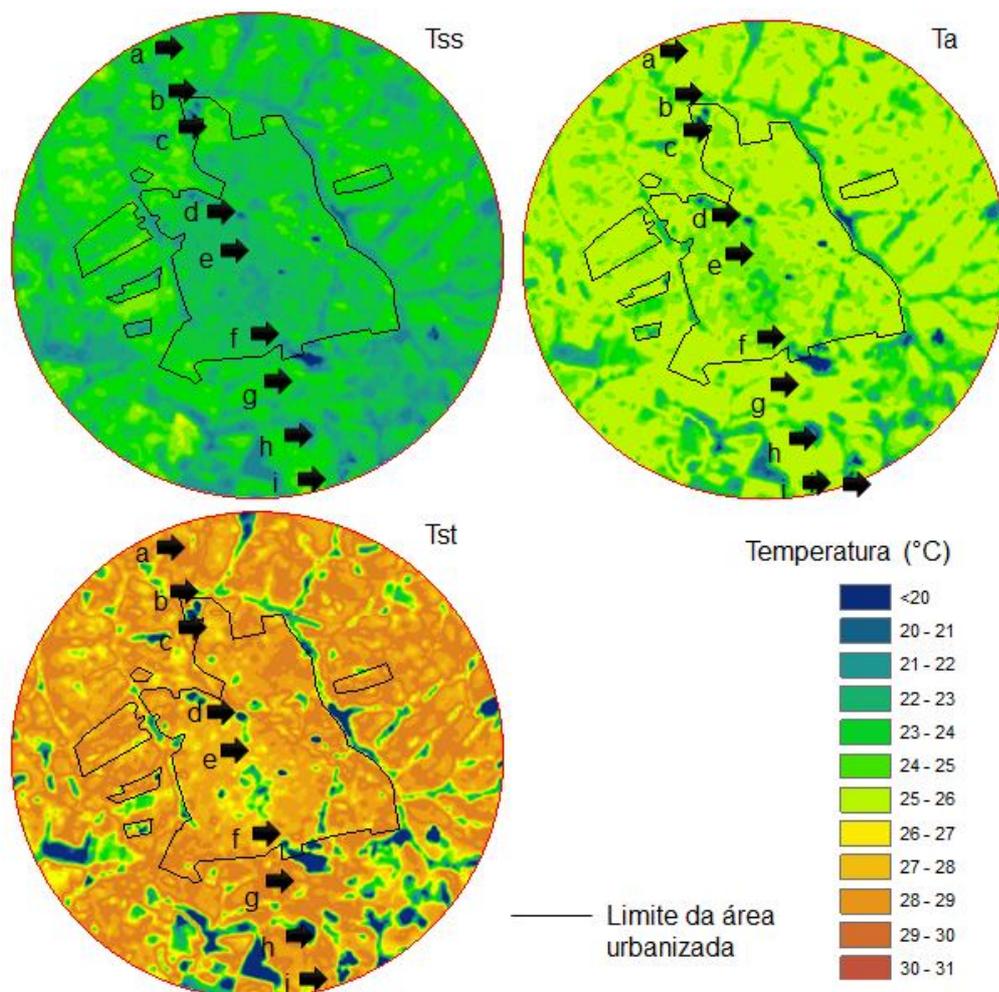


Figura 19. Comparação entre temperaturas Tss, Ta e Tst, mês de 08/2018; sendo a,g,i-fragmento de vegetação nativa em área rural, b,h-área de várzea, c-parque industrial II, d-telhado de indústria, e-região com alta densidade arbórea urbana, f-fragmento de vegetação nativa em área urbana.

Esses resultados demonstram que o efeito das ilhas de calor urbano em Votuporanga foi influenciado pelas condições climáticas. É possível que a alta velocidade do vento, associada à baixa umidade relativa do ar em 19/08/2018, tenha facilitado a maior difusão do calor sensível e a homogeneização dos gradientes de temperatura entre as zonas rural e urbana, eliminando o efeito das ilhas de calor. Esse comportamento vai de acordo com uma das conclusões de Chen et al. (2006), que, ao estudarem ilhas de calor urbano por sensoriamento remoto na China, observaram que a umidade exerceu importante impacto na intensidade da ilha de calor, sendo o seu efeito mais fraco em regiões mais áridas. Os mesmos autores ainda concluíram que a ilha de calor foi proporcionalmente relacionada com o tamanho da zona urbana e densidade populacional.

Nesse contexto, a diferença de cerca de 6,0°C de temperatura entre a zona rural e urbana obtida para a data de 12/03/2018 em Votuporanga foi similar ao resultado de 5,5°C obtido pelo modelo matemático proposto por Oke (1973), considerando uma população aproximada de 85 mil habitantes.

Rizwan et al. (2008), ao revisarem diversos trabalhos sobre as formas de mitigação da temperatura do ar, verificaram resultados de máxima redução variando de 1 a 3°C com ações de aumento nas áreas verdes, utilização de pavimentos claros e telhados mais frios e até a eliminação do uso do ar condicionado.

No município de Votuporanga, pelos resultados observados, o uso de alta densidade de arborização urbana (20% de área de copas) (Figura 20) e as florestas nativas urbanas foram efetivas em reduzir de 1 a 3°C a temperatura local em relação ao entorno.

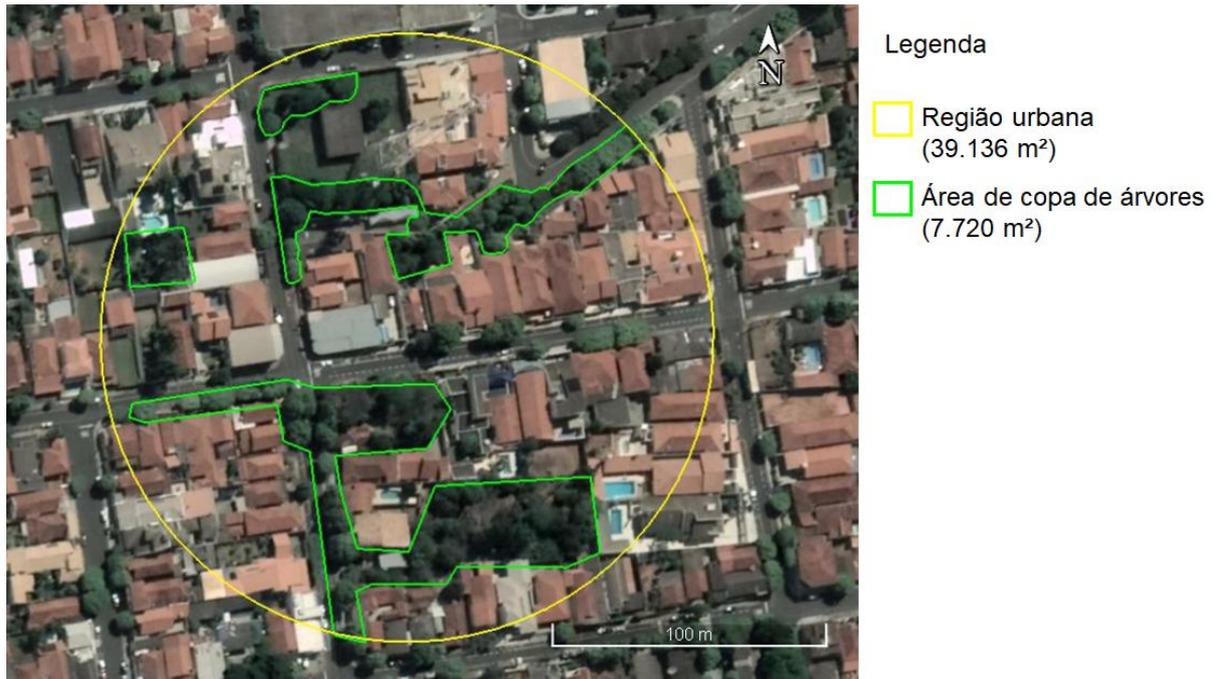


Figura 20. Região com 20% de área de copa de árvores da arborização urbana.

Outros elementos de suma importância na ambiência urbana são os mananciais urbanos. Neste estudo observou-se que a presença das represas de recreação e de abastecimento de água foram capazes de amenizar a temperatura de 2 a 3°C em relação ao entorno na zona urbana. Sendo assim, é imprescindível que as administrações públicas municipais planejem ações de compatibilização da malha viária urbana com os córregos urbanos, eliminando as canalizações e mantendo as vias públicas a distâncias mínimas de 30 m das calhas, permitindo a sua restauração florestal.

6. CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que o uso da banda 10 do sensor TIRS do satélite LANDSAT 8 estimou com melhor qualidade a temperatura da superfície do solo no verão (12/03/2018), devido à maior estabilidade climática durante o período de medições de temperatura com termômetro.

Dentre as datas investigadas, observou-se a ocorrência do fenômeno de ilhas de calor urbano no município de Votuporanga – SP durante a avaliação no verão (12/03/2018), em que o gradiente de temperatura entre a zona rural e a urbana foi de cerca de 6°C.

A densidade de arborização urbana com cobertura de 21% com área de copa, as florestas nativas urbanas bem como as áreas dos mananciais urbanos foram efetivas em reduzir de 1 a 3°C a temperatura local em relação ao seu entorno, sendo, portanto, recomendadas como as melhores alternativas para a ambiência urbana.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCOFORADO, M. J. et al. **Orientações climáticas para o ordenamento em Lisboa**. Lisboa: Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa, 2006. 82p.
- AMORIM, M. C. C. T. Climatologia e gestão do espaço urbano. **Mercator - número especial**. 374:71-90, 2010.
- ANDRADE, H. O clima urbano: natureza, escalas de análise e aplicabilidade. **Finisterra**. 50(80): 67-91, 2005.
- BAPTISTA, G. M. M. **Sensoriamento remoto hiperespectral**: o novo paradigma nos estudos de solos tropicais. Brasília: Universa, 2006. 212p.
- BARBIRATO G M. **Clima e Cidade**: a abordagem climática como subsídio para estudos urbanos, 2007 p.p. 71 e 76.
- BIAS, E. de S.; BAPTISTA, G. M. de M.; LOMBARDO, M. A. Análise do fenômeno de ilhas de calor urbanas, por meio da combinação de dados Landsat e Ikonos. In: **Anais do 11 SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 1741-1748.
- BOSCHETTI, C. **Conceitos fundamentais em ciência e tecnologia**. 2008. Disponível em: <http://www.las.inpe.br/~cesar/Infrared/conceitos.htm>. Acesso em: 30 abril. 2019.
- CAMARGO, F. F. et al. Análise multitemporal da evolução urbana e sua influência na modificação do campo térmico na Região Metropolitana de São Paulo para os anos de 1985, 1993 e 2003. In: **Anais do 13 SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, Florianópolis: INPE, 2007. p. 5127-5134.
- CHEN, X.L. et al. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. **Remote Sensing of Environment**. 104(1):133-146, 2006.
- COELHO, A. L. N.; CORREA, W. S. C. Temperatura de superfície Celsius do sensor Tirs/Landsat-8: metodologia e aplicações. **Revista Geográfica Acadêmica**. 7(1): 31–45, 2013.
- COLTRI, P. P. et al. Ilhas de calor da estação de inverno da área urbana do município de Piracicaba, SP. In: **Anais do 13 SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, Florianópolis: INPE, 2007. p. 5151-5157.
- CUNHA, D. G. F.; VECCHIA, F. As abordagens clássica e dinâmica de clima: uma revisão bibliográfica aplicada ao tema da compreensão da realidade climática. **Ciência e Natura**. 29(1):137-149, 2007.

DUMKE, E. M. S. **Clima Urbano / Conforto Térmico e Condições de Vida na Cidade** – Uma Perspectiva a Partir do Aglomerado Urbano da Região Metropolitana de Curitiba (AURMC). 418 p. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

ELACHI, C. **Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing**. Nova York, EUA: Wiley, 2006.

FLORENZANO, T.G. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. São Paulo, Oficina de Textos, 2002.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Orientações do PMVA**, Ciclo 2016

GRAVETTER, F.J.; WALLNAU, L.B. **Statistics for the behavioral sciences**. 2. ed. St. Paul: West Publishing, 1995. 429p.

HOPKINS, W.G. **Correlation coefficient**. 2000. Disponível em: <http://glovisusgs.gov/> > Acesso: 29 abr. 2019.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2010). Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=355030&earch=||infogr%E1ficos:-informa%E7%F5es-completas>>. Acesso em: 30 abr. 2019.

_____. **Ilha de calor urbana; São Paulo, Região Metropolitana de (SP)**. 2019. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo?id=210899&view=detalhe>. Acesso em: 02/02/2019

_____. Catálogo. 2018. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/bibliotecacatalogo?view=d_42472> . Acesso em: 30 abr. 2019.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Normais climatológicas. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=>>. Acesso em: 29 abr de 2019.

INPE Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais em áreas urbanas, por conta do fenômeno conhecido como “ilha de calor” e da poluição. Meio Ambiente e Saneamento 2019.

JABAREEN, Y.R. Sustainable Urban Forms: Their Typologies, Models, and Concepts. **Journal of Planning Education and Research**, 2006. Disponível em: <<http://jpe.sagepub.com/cgi/content/abstract/26/1/38>> Acessado em 30 abril de 2019.

JENSEN, J.R. **Remote sensing of the environment: an earth resource perspective**. 2.ed. Upper Saddle River (NJ): Prentice Hall, 2007.

LENNON, M.; SCOTT, M. et. al. Delivering ecosystems services via spatial planning: reviewing the possibilities and implications of a green infrastructure approach'. **Town Planning Review**. 85:563-587 2014.

MENESES, P. R. e ALMEIDA T. de., **Introdução ao processamento de imagens de Sensoriamento Remoto**. Universidade de Brasília – UNB. Brasília. 2012. Disponível em: <<http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>>. Acesso em 12/05/2019.

MONTEIRO C. A. F. Por um suporte teórico e pratico para estimular estudos geográficos do clima urbano do Brasil. **GeoSul**. (9):7-140, 1990.

MONTEIRO, E.; SOUZA, L. C. L. de. **Simulação do Comportamento Microclimático Urbano**. (2012). Disponível em: <www.eventos.em.br/index.php/simpgeu/simpgeu/paper/viewFile/874/577> . Acesso em 21/03/2019.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2008.

_____; PONZONI, F. J. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**: (2001). Disponível em <http://www.dpi.inpe.br/Miguel/AlunosPG/Jarvis/SR_DPI7.pdf> Acesso em 29/07/2019.

OKE, T.R. City size and the urban heat island. **Atmospheric Environment**. 7:769-779, 1973.

_____. Towards better scientific communication in urban climate. **Theatrical and Applied Climatology**. 84:179-190, 2005.

RIZWAN, A. M., DENNIS, Y.C., LEUNG, L. C., et al. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island, **Journal of Environmental Sciences**. 20:120–128, 2008.

ROLIM, G. S. et al. Classificação Climática de Köppen e de Thornthwaite e Sua Aplicabilidade na Determinação de Zonas Agroclimáticas Para o Estado de São Paulo. **Bragantia**, 66(4):711-720, 2007.

RUBIRA, F. G. Definição e diferenciação dos conceitos de áreas verdes/espacos livres e degradação ambiental/impacto ambiental. **Caderno de Geografia**, 26 (45):134-150, 2016.

SASTRE, R.. **Proprietats dels materials i elements de construcció**; Barcelona: Edicions UPC, 2000.

SETTE, D. M.; TARIFA, J. R. O El Nino 97/98, ritmo e repercussão na gênese dos climas no Mato Grosso (Brasil). **Geo. USP-Espaco e Tempo**. 11: 51-67, 2002.

SILVA, E. M. da; ASSUNÇÃO, W. L. O clima na cidade de Uberlândia (MG). Sociedade e Natureza. Universidade Federal de Uberlândia, Instituto de Geografia/EDUFU Uberlândia, v. 16, n. 30.2004.

SILVA JÚNIOR, J. de A. et al. Estudo do conforto térmico e o fenômeno da ilha de calor na cidade de Belém-PA durante o ano de 2010. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA. Anais do XVI **CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA** Rio Claro, 2010.

SOUZA, L. C. L. **Ilhas de calor**. Jornal UNESP, São Paulo, v.18, n.186, p.11, 2004.

STEINKE, E. T; STEINKE, V. A.; SAITO, C. H. Avaliação da estimativa da temperatura de superfície a partir de imagens de satélite Landsat TM 5 voltada para a gestão de bacias hidrográficas. In: SAITO, C. H. (Org.). **Desenvolvimento tecnológico e metodológico para mediação entre usuários e comitês de bacia hidrográfica**. Brasília: Departamento de Ecologia da Universidade de Brasília, 2004. p. 41-64.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Using the USGS Landsat 8 Product**. Disponível em: <https://landsat.usgs.gov/using-usgs-landsat-8-product>. Acessado em: 29/abr/2019.

USGS. **USGS Global Visualization Viewer–Landsat 8**. [S.L.], september 2019
Disponível em: <https://www.researchgate.net/.../292931765> Acesso em 30/04/2019.

VOSKAMP, I.M; VAN de VEN, F.H.M. Planning support system for climate adaptation: composing effective sets of blue-green measures to reduce urban vulnerability to extreme weather events. **Building and Environment**. 83: 159-167, 2015

WENG, Q. Fractal analysis of satellite: detected urban heat island effect. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 69:555-566, 2003.

_____; YANG, S. Managing the adverse thermal effects of urban development in a densely populated Chinese city. **Journal of Environmental Management**. Oxford, 70(2):145-156, 2004.

WOLCH, Jennifer R. et al. (2014). Urban green space, public health and environmental justice: The challenge of making cities 'just green enough'. In **Landscape and Urban Planning**. 125:234–244, 2014.

YUAN, F., BAUER, M.E., 2007, Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in land sat imagery, **Remote Sensing Environment**. 106:375-386,

ZHAO, X., NIE, W., HUO, B., YOUNG, J. The impact of supply chain integration on company performance and supply chain performance in China. **Working Paper**. The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong. 2006.

ZUANAZZI, P. T. et al. **Avaliação e evolução do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC 1 e PAC 2)**. 2015. Convênio FACE/PUCRS e SESCOB-RS: Relatório14. Disponível em: <http://www.sesconrs.com.br/wp-content/uploads/2017/05/Relat%C3%B3rio-14-Gest%C3%A3o-P%C3%BAblica-Eficaz-Programa-de-Acelera%C3%A7%C3%A3o-do-Crescimento-mai-2015.pdf>.> Acesso em: 29/04/2019.