

Anomalia térmica em cidade de médio porte: estudo de caso da cidade de São José do Rio Preto, São Paulo

Thermal anomaly in a medium-sized city: a case study of the city of São José do Rio Preto, São Paulo, Brazil

Anomalia térmica en una ciudad de mediano: estudio de caso de la ciudad de São José do Rio Preto, São Paulo, Brasil


Fernanda Frois dos Santos ¹  <https://orcid.org/0000-0002-6909-1145>


Iara Nogueira Liguori ²  <https://orcid.org/0000-0003-0895-9446>


Julia Manfredini de Araujo ³  <https://orcid.org/0000-0001-6961-1940>

Mirlene Amaral Borges ²  <https://orcid.org/0009-0005-9604-3711>

Leonardo Marques Monteiro ³  <https://orcid.org/0000-0002-1163-8136>

1 Universidade Federal de São Carlos  - Sorocaba (SP), Brasil

2 Universidade de São Paulo  - São Paulo (SP), Brasil

3 Universidade Federal de São Paulo  - São Paulo (SP), Brasil

Autor de correspondência: fernandafrois@estudante.ufscar.br

Recebido: 13 Maio 2022. Aceito: 30 Ago. 2023

Editor de seção: Antônio Carlos Oscar Junior

Resumo

Objetivo: avaliar anomalias térmicas na cidade de São José do Rio Preto, município de médio porte localizado no interior do estado de São Paulo. **Métodos:** o método utilizado é de sensoriamento remoto aliado a medições em estações meteorológicas, avaliando as temperaturas superficial e do ar no período de sete anos, em estação úmida e seca. Para o sensoriamento remoto foram consideradas imagens do satélite Landsat 8 OLI/TIRS C2 L1, e determinados os Índices de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e Temperatura Superficial (LST). **Resultado:** Os resultados demonstraram duas anomalias térmicas. A primeira, característica da estação climática úmida na região, pode ser entendida como uma ilha de calor superficial, onde o centro urbano é mais quente em comparação com as áreas rurais. Entretanto, a segunda anomalia, correspondente à estação seca, demonstrou uma inversão desses valores, com o entorno mais quente que o sítio urbano. **Conclusão:** O comportamento térmico observado pode ser consequência das características da vegetação natural da região, como também da cultura canavieira, que sazonalmente deixa o solo exposto, provocando a anomalia térmica.

Palavras-chave: Clima urbano. Conforto térmico. Anomalia térmica. Sensoriamento remoto.

Abstract

Objective: to evaluate thermal anomalies in the city of São José do Rio Preto, a medium-sized city located in the interior of the state of São Paulo. **Methods:** the method used is remote sensing combined with measurements at meteorological stations, evaluating surface and air temperatures over a period of nine years, in wet and dry seasons. For remote sensing, images from the Landsat 8 OLI/TIRS C2 L1 satellite were considered, and the Vegetation Index by Normalized Difference (NDVI) and Surface Temperature (LST) were determined. **Result:** The results showed two thermal anomalies. The first, characteristic of the wet season in the region, can be understood as a surface heat island, where the urban center is warmer compared to rural areas. However, the second anomaly, corresponding to the dry season, demonstrated an inversion of these values, with the surroundings warmer than the urban site. **Conclusion:** The observed thermal behavior may be a consequence of the characteristics of the region's natural vegetation, as well as the sugarcane culture, which seasonally leaves the soil exposed, causing the thermal anomaly.

Keywords: Urban climate. Thermal comfort. Thermal anomaly. Remote sensing.

Resumen

Objetivo: evaluar anomalías térmicas en la ciudad de São José do Rio Preto, una ciudad de tamaño mediano ubicada en el interior del estado de São Paulo. **Métodos:** el método utilizado es la teledetección combinada con mediciones en estaciones meteorológicas, evaluando las temperaturas superficiales y del aire durante un período de siete años, en estaciones húmedas y secas. Para la teledetección se consideraron imágenes del satélite Landsat 8 OLI/TIRS C2 L1 y se determinó el Índice de Vegetación por Diferencia Normalizada (NDVI) y la Temperatura Superficial (LST). **Resultado:** Los resultados mostraron dos anomalías térmicas. El primero, característico de la temporada de lluvias en la región, puede entenderse como una isla de calor superficial, donde el centro urbano es más cálido en comparación con las zonas rurales. Sin embargo, la segunda anomalía, correspondiente a la estación seca, demostró una inversión de estos valores, siendo el entorno más cálido que el sitio urbano. **Conclusión:** El comportamiento térmico observado puede ser consecuencia de las características de la vegetación natural de la región, así como del cultivo de la caña de azúcar, que estacionalmente deja el suelo expuesto, provocando la anomalía térmica.

Palabras-clave: Clima urbano. Comodidad térmica. Anomalia térmica. Detección remota.

Introdução

Os efeitos da urbanização geram ações antrópicas sobre o ambiente natural levando muitas vezes à sua degradação (SOUZA, 2019). A crescente migração do campo para as cidades, no Brasil acentuada a partir dos anos 1930 (BRITO et al, 2001; MATOS, 2012), resultam em mudanças não só na configuração do modo de vida dos indivíduos e da sociedade, como nas condições climáticas, ocasionando inúmeros impactos ambientais (CASTILHO, 2006).

Os parâmetros climáticos alterados pela urbanização são vários, com destaque à temperatura, umidade relativa do ar, precipitação, direção e velocidade dos ventos (CASTILHO, 2006). As características térmicas dos materiais que compõem as superfícies no ambiente construído como capacidade de absorção da radiação solar, emissão de ondas longas, ganhos e perdas de calor devido à rugosidade e permeabilidade são de suma importância, sendo também relevantes como a forma e tipologia das edificações sombreiam o entorno e canalizam as massas de ar (LABAKI et al, 2011).

Em relação às deformações dos padrões de temperatura ocorre o que se chama de anomalias térmicas, caracterizadas como alterações verificadas na temperatura do ar, especialmente em áreas urbanas, onde os efeitos da urbanização e da degradação ambiental comprometem a qualidade de vida e o conforto da população (SOUZA, 2019).

Com o surgimento e aumento das anomalias térmicas, o balanço de energia na área urbana sofre modificações devido às alterações de superfície de vegetação para edificações ou pavimentação, as quais armazenam parte da energia (DUARTE, 2015).

Essas anomalias térmicas são mais comuns no período noturno, uma vez que não há radiação solar direta e as áreas constituídas por materiais com grandes capacidades de armazenar calor, ou seja, áreas urbanas construídas, passam a dissipar a energia que receberam durante o dia (MASCARÓ, 1996; ASSIS, 2006). Mas, em menor grau, também podem ser observadas no período diurno, enquanto resultado da diferença de temperatura superficial urbana (FIALHO, 2012).

Ao contrário das superfícies construídas, a vegetação reduz a temperatura do ar, sombreia o entorno em uma escala microclimática e permite trocas térmicas úmidas pela evaporação (DUARTE e SHINZATO, 2018). Além disso, a cobertura vegetal não é a única forma de otimizar os espaços urbanos, o elemento natural também pode ter a presença de corpos d'água, ou a mescla dos dois recursos, dependendo da necessidade do ambiente (DUARTE e SERRA, 2008).

Partindo da problemática apresentada, esse trabalho tem como objetivo avaliar anomalias térmicas na cidade de São José do Rio Preto. Localizada no interior do estado de São Paulo, a cidade possui um clima tropical úmido, com verões quentes e chuvosos, invernos secos e amenos (CASTILHO, 2006).

O método da pesquisa é por meio de sensoriamento remoto e de medições microclimáticas realizadas em estação meteorológica. As imagens foram obtidas através do satélite Landsat 8 OLI/TIRS C2 L1, com o intuito de observar todo o sítio urbano, determinar o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e aferir a temperatura superficial (LST, do inglês Land Surface Temperature). Foram escolhidos apenas registros da atmosfera com céu limpo e em diferentes estações do ano, em tempo seco e tempo úmido. O intervalo utilizado para a análise é de nove anos, iniciando em 2013, passando por 2016 e terminando em 2019.

Uma breve revisão bibliográfica

Os primeiros trabalhos sobre clima urbano são datados do começo do século XIX, quando Howard e Renou, respectivamente, estabelecem reflexões sobre o clima urbano de Londres e Paris (ASSIS, 2005). Mas é somente nas décadas de 60 e 70 que o interesse pelo tema é despertado, com incentivos à pesquisa coordenados pela Organização Mundial de Meteorologia (WMO) (ASSIS, 1997).

Dessa forma, são consolidados métodos de análise, com destaque aos trabalhos de Oke (1981; 1984; 1987) que inaugura o clima urbano como disciplina de estudo e estipula parâmetros de investigação das ilhas de calor, atmosfera urbana e fator de visão do céu.

Paralelamente, Terjung e O'Rourke (1979) realizam simulações dos elementos de ilhas de calor em clima urbano. Page (1980) discorre sobre a conservação de energia e determina formas de modelagem e Givoni (1994) considera o design do elemento urbano em regiões com clima quente e úmido.

A partir dos anos 2000 percebe-se uma maior preocupação sobre questões do clima urbano e sustentabilidade das cidades. Nikolopoulou (2004) apresenta recomendações acerca da morfologia urbana, Ng e Ren (2015) exibem um compêndio do mapa climático urbano de uma série de localidades, com destaque às cidades de Salvador/BA (ANDRADE et al, 2015) e Campinas/SP (SHIMOMURA et al, 2015).

No âmbito nacional, Monteiro (1976, 1984) estabelece o desenvolvimento da climatologia geográfica através da abordagem do clima urbano pelas escalas espaciais e a estruturação dos elementos de impacto, possibilitando o planejamento e ordenamento do solo a partir dos fenômenos climáticos. Nesse sentido, Assis (2000) aborda os impactos da forma urbana na formação de ilhas de calor na cidade de Belo Horizonte/MG e determina que um melhor arranjo da malha urbana diminui a ocorrência de grandes áreas aquecidas.

Posteriormente, Monteiro (2008; 2018) apresenta um modelo preditivo de conforto térmico para espaços abertos, Gonçalves et al (2011) avaliam o adensamento urbano frente ao desempenho ambiental na cidade de São Paulo/SP e Duarte e Serra (2008) propõem um indicador que relaciona a densidade construída e os elementos naturais. Em comum, esses trabalhos abordam questões do microclima dos espaços abertos e a qualidade do ambiente urbano construído.

Liberando os edifícios das preocupações climáticas, o condicionamento artificial permitiu o desenvolvimento de megaestruturas cujo aquecimento, refrigeração, umidade e iluminação dependem totalmente de sistemas mecânicos. Isso fez com que as cidades dessem as costas ao meio exterior, tornando-se cada vez mais um lugar contaminado, varrido por ventos de inverno ou sufocados pelo calor do verão. A preocupação exclusiva com o microclima interior nega o papel condicionante climático ao espaço exterior, e os microclimas urbanos cada vez mais insalubres geram maior confiança nos microclimas interiores controlados. (DUARTE e SERRA, 2008)

Ao entender a cidade como um “mosaico de microclimas diferentes” (DUARTE e SERRA, 2008), os fenômenos de anomalia térmica, pequenas ilhas de calor, bolsões de poluição atmosférica e diferenças na velocidade do vento vão se replicando pela cidade. Nesse sentido, a vegetação possui um papel de fundamental importância no solo urbano: atenuar o desconforto ambiental e melhorar a qualidade do ar em uma escala microclimática (SHINZATO e DUARTE, 2018).

Dessa forma, a investigação dos fenômenos climáticos na cidade pode ser compreendida em três principais métodos de análise: medições in situ, simulação e sensoriamento remoto.

Em muitas situações os dados in situ são incipientes justamente pela cobertura reduzida das estações de monitoramento (FIALHO, 2012). No caso do estado de São Paulo,

por exemplo, as estações da Companhia Ambiental do Estado (CETESB) são uma importante fonte de dados e apesar de sua ampla cobertura quando comparado com outros estados do país, somente uma pequena parcela dos municípios é atendida.

Nesse contexto, os dados provenientes de sensoriamento remoto são uma alternativa importante. É ampla a literatura que utilizou dados de sensores remotos para estudos climáticos e relacionados à temperatura na superfície, em escala global e local (VOOGT e OKE, 2002, LOMBARDO, 2009, ZHOU et al., 2019). No contexto de estudos no Brasil, Ferreira (2019), utilizou dados do satélite MODIS para avaliar a relação da vegetação e da temperatura superficial para a RMSP, assim como Monteiro et al (2021), que utilizou do mesmo satélite para avaliar as Ilhas de Calor Urbanas em 21 áreas metropolitanas do país. Makishi e Campos (2013) e Lemos (2011), empregaram dados do satélite Landsat 5 para avaliar a influência do uso do solo nas temperaturas de superfície.

Objetivo

O objetivo deste trabalho é verificar a presença de anomalias térmicas urbanas na cidade de São José do Rio Preto, São Paulo.

Metodologia

A metodologia foi dividida em três etapas: caracterização da área em estudo, imagens de satélite e dados climáticos *in loco*.

Caracterização da área em estudo

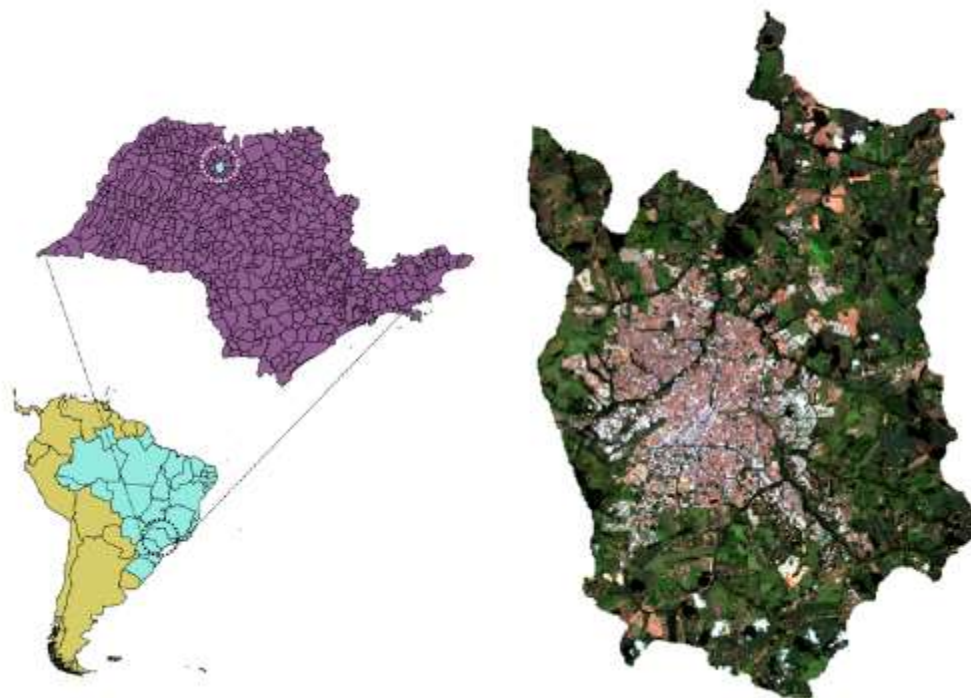
São José do Rio Preto está localizada a noroeste do estado de São Paulo, como mostra a Figura 1, situada no Planalto Ocidental, tendo o Rio Preto como principal corpo d'água do local. A cidade possui uma área de 431 km², 489 metros de altitude e uma população estimada de 464.983 habitantes (IBGE, 2020).

O município destaca-se pela importância regional no interior paulista, e é caracterizado como um polo comercial e de saúde. A cidade é cortada por duas das principais rodovias do país, Rodovia Transbrasiliana (Br-153) e Rodovia Washington Luiz (SP-310), sendo estes eixos rodoviários vetores de crescimento da cidade. Nos últimos anos a cidade vem passando por um vertiginoso fenômeno de crescimento, agravando questões ambientais provenientes da urbanização (ROCHA et al, 2011).

Resultados

In ornare ornare iaculis. Duis nec purus libero. Suspendisse blandit libero urna, ac euismod libero porta vitae. Nam faucibus tristique sollicitudin. Donec ipsum sapien, sagittis quis dictum non, luctus vel ex. Vivamus ipsum mauris, ullamcorper nec dignissim ac, ultrices in purus. Sed lectus mauris, porttitor ac diam at, tristique vulputate metus. Sed congue ante mauris, ac imperdiet lectus ullamcorper id. Morbi odio purus, scelerisque et massa vel, pharetra porta arcu. Sed iaculis non diam vitae sollicitudin. Morbi pharetra aliquet ex vel tempor. Proin mollis accumsan est, sed porta leo dapibus vel. Morbi id nulla vitae augue ullamcorper ornare. Proin pharetra commodo mi, faucibus ultrices nibh porta et. Suspendisse mollis, ligula nec blandit lobortis, orci dui fringilla velit, nec placerat ex magna sed turpis. Aliquam porta ac eros non feugiat.

Figura 1. Localização da cidade de São José do Rio Preto/SP com imagem de satélite da cidade em março de 2019.



Fonte: Elaborado pelas autoras.

O clima do município é tropical úmido, classificado como Aw pela escala climática de Köppen e Geiger (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007). O regime de chuvas do município possui períodos tipicamente úmidos, primavera e verão, e outros secos, outono e inverno. As temperaturas são caracterizadas por verões quentes e invernos mais amenos, com máximas de aproximadamente 34°C e mínimas de aproximadamente 13°C. As temperaturas médias anuais oscilam entre 20°C e 26°C (CASTILHO, 2006).

Imagens de satélite

Ao analisar as imagens de satélite foi possível compreender todo o sítio urbano, e dessa forma determinar o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e aferir a temperatura superficial (LST, do inglês *Land Surface Temperature*). Para tanto, foram selecionadas imagens do satélite Landsat 8 OLI/TIRS C2 L1.

O satélite Landsat 8 é o mais recente de sua série, com dados a partir de 2013, opera em uma altitude de 705 km, numa órbita heliossíncrona com inclinação de 98,2° (USGS, 2021). A passagem do Landsat 8 na linha do equador ocorre às 10:00 horas e sua cobertura é de praticamente todo o globo, com uma resolução temporal de 16 dias (USGS, 2021).

O Landsat 8 carrega dois instrumentos imageadores, o OLI (*Operational Land Imager*) e o TIRS (*Thermal Infrared Sensor*). O primeiro contém nove bandas espectrais, incluindo a banda pancromática, com resolução de 30 metros. O sensor TIRS apresenta duas bandas termais, com resolução de 100 metros, tratada e disponibilizada com resolução de 30 metros, que coincide com a resolução das bandas do instrumento OLI.

Como critério de seleção das imagens foram computados apenas os registros de atmosfera sem nuvens e escolhidas estações do ano diferentes, tempo seco e tempo úmido. O

espaço de tempo em análise compreende uma janela de sete anos, com início no ano de 2013, sendo o primeiro registro do Landsat 8, posteriormente os anos de 2016 e 2019 (Quadro 1).

Quadro 1. Dias de coleta dos dados do satélite Landsat 8.

| | 2013 | 2016 | 2019 |
|---------------|------------|------------|------------|
| Estação Úmida | 20/04/2013 | 16/04/2016 | 24/03/2019 |
| Estação Seca | 30/08/2013 | 09/10/2016 | 02/10/2019 |

Fonte: Elaborado pelos autores.

As imagens são disponibilizadas gratuitamente e foram obtidas no sistema da USGS: *Science For Chance The World* (2021). Para a confecção dos mapas de interesse foram utilizadas as bandas 2, 3 e 4 para composição colorida de cores naturais (RGB, do inglês *Red, Green e Blue*) e 3, 4, 5 e 10 para composição dos índices de temperatura superficial e NDVI (SILVA, 2018). Os detalhes de cada banda são listados no Quadro 2, abaixo.

Quadro 2. Intervalo espectral e bandas utilizadas, satélite Landsat 8.

| Banda | Intervalo Espectral | Aplicações | Resolução |
|----------|----------------------------|------------------------------|--|
| Banda 2 | 0.45 - 0.51 μm | Visível Azul | 30 metros |
| Banda 3 | 0.53 - 0.59 μm | Visível Verde | 30 metros |
| Banda 4 | 0.64 - 0.67 μm | Visível Vermelho | 30 metros |
| Banda 5 | 0.85 - 0.88 μm | Infravermelho próximo | 30 metros |
| Banda 10 | 10.6 - 11.19 μm | Infravermelho Termal / TIRS1 | Tratada e disponibilizada com pixel 30 m |

Fonte: Elaborado pelos autores.

Após a obtenção das imagens, elas foram tratadas no software livre QGIS, um Sistema de Informação Geográfica (SIG) que permite “visualizar, editar, gerir, analisar dados e criar mapas” (QGIS, 2021).

As bandas foram georreferenciadas e foram feitos os processamentos referentes à composição colorida, ao NDVI e LST. A composição colorida foi realizada com as bandas 4, 3 e 2, que sobrepostas passam de imagens cinzas para cores naturais e permitem melhorar a visualização da imagem. As imagens também foram recortadas nos limites do município de São José do Rio Preto / SP.

Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

O índice de vegetação NDVI pode ser utilizado para avaliar mudanças no uso e ocupação do solo, por meio das mudanças na cobertura vegetal. Ele é considerado um índice

bem-sucedido como medida de vegetação, e permite comparações de mudanças sazonais e interanuais relacionadas à vegetação (HUETE, 2002). Além disso, é um passo essencial para avaliar a temperatura de superfície, dado que a vegetação está profundamente relacionada com a temperatura. Está clara na literatura também a relação entre o aquecimento das cidades e a mudança no uso e cobertura do solo, associados ao processo de urbanização (AKINYEMI et al, 2019, LIU e ZHANG, 2011).

Os resultados do NDVI variam de -1 a 1, onde valores mais altos refletem maior capacidade fotossintética do dossel da vegetação, enquanto valores mais baixos para o mesmo período é reflexo de estresse vegetativo, sendo assim, valores próximos a -1 representam áreas menos vegetadas, enquanto valores próximos a 1 representam áreas com maior presença de vegetação. O NDVI possui a seguinte formulação (HUETE, 2002):

$$NDVI = \frac{(\rho_{IVP} - \rho_V)}{(\rho_{IVP} + \rho_V)}$$

Sendo que, ρ_{IVP} é a reflectância no infravermelho próximo (800-1100 nm) e ρ_V é a reflectância na faixa do vermelho (600-700 nm).

Land Surface Temperature (LST)

A medição da temperatura de superfície através de satélite é amplamente utilizada para uma variedade de estudos que incluem evapotranspiração, mudanças climáticas, monitoramento da vegetação, clima urbano, entre outros (NDOSSI e AVDAN, 2016). A utilização de sensoriamento remoto para medir as temperaturas da superfície permite também a realização de estudos sobre Ilhas de Calor Urbanas de Superfície. Por se referir à diferença radiativa entre superfícies de áreas urbanas e não-urbanas, a Ilha de Calor de Superfície é medida por satélites e permite estudos em escala local e global (ZHOU et al, 2019).

Para o cálculo da *Land Surface Temperature* (LST), foi utilizada a banda infravermelha termal (10) das imagens selecionadas do satélite Landsat 8, além dos resultados do NDVI. Os resultados de LST foram obtidos com a ajuda de um *plug-in* experimental no *software* QGIS desenvolvido pelos autores Ndossi e Avdan (2016). O *plug-in*, chamado *Land Surface Temperature Estimation Plug-in*, tem a capacidade de estimar a emissividade da superfície terrestre (LSE, do inglês *Land Surface Emissivity*), a partir do cálculo da radiância e reflectância.

O *plug-in* realiza primeiramente o cálculo da radiância espectral, através da conversão dos níveis de cinza (NC), conforme a equação abaixo:

$$L_\lambda = M_L Q_{CAL} + A_L - O_i$$

Onde L_λ corresponde à radiância espectral no topo da atmosfera (TOA) em $W/m^2sr \mu m$, M_L é o fator multiplicativo de redimensionamento da banda de acordo com o arquivo metadata que é obtido juntamente com as imagens, A_L é o fator aditivo de redimensionamento da banda, também obtido no arquivo metadata. Q_{CAL} é o valor quantizado calibrado pelos valores do pixel do produto e O_i são as compensações emitidas pelo USGS para calibração das bandas TIRS (NDOSSI e AVDAN, 2016).

Em seguida, o *plug-in* converte os resultados da radiância para temperatura de brilho, por meio da equação abaixo:

$$T_{sen} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)}$$

Onde T_{SEN} corresponde à temperatura de brilho em Kelvin (K), L_{λ} é a radiância espectral no TOA, e K_1 e K_2 são constantes de calibração específicas da banda, contidas no arquivo metadata obtido com cada uma das imagens (NDOSSI e AVDAN, 2016).

O próximo passo do plug-in é calcular a emissividade, que é calculada a partir dos resultados de NDVI, já explicitados. Para estimar a emissividade, o algoritmo utiliza certos valores de NDVI para distinguir pixels de solo e de cobertura vegetal, para então calcular a emissividade, de acordo com a seguinte equação:

$$\varepsilon_{\lambda} = \varepsilon_{v\lambda}P_v + \varepsilon_{s\lambda}(1 - P_v) + C_{\lambda}$$

A variável ε_v corresponde à emissividade da vegetação, ε_s é a emissividade do solo, P_v a proporção de vegetação e C é um valor que representa o efeito da geometria da superfície. A proporção da vegetação é calculada considerando o NDVI, de acordo com a equação: (NDOSSI e AVDAN, 2016).

$$P_v = \left[\frac{[NDVI - NDVI_{min}]}{[NDVI_{max} - NDVI_{min}]} \right]^2$$

Para a correção da temperatura de brilho em relação à emissividade e parâmetros atmosféricos, o plug-in possui quatro algoritmos. Neste estudo foi utilizado o algoritmo de Inversão da Função de Planck, que corrige a emissão de uma substância em comparação com um corpo negro (NDOSSI e AVDAN, 2016). Conforme equação abaixo:

$$T_s = \frac{BT}{\left\{1 + \left[\frac{\lambda \cdot BT}{\rho}\right] \cdot \ln \varepsilon\right\}}$$

onde, T_s é a temperatura da superfície, BT corresponde à temperatura de brilho (K), λ é o comprimento de onda da radiância emitida, ρ é $(h * c/\sigma) = 1.438 \cdot 10^{-2} \text{ mK}$, e ε corresponde à emissividade espectral (NDOSSI e AVDAN, 2016). Após esses cálculos o plug-in resulta nos valores de LST, já na unidade escolhida, que no caso deste estudo foi Celsius (C°).

Dados Climáticos

Os dados climáticos computados são temperatura do ar e umidade relativa em duas estações meteorológicas: a estação climática da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) e a estação mantida pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC).

A estação mantida pela CETESB está localizada no bairro Eldorado, uma área residencial adensada em construções e com pouca arborização urbana. Já a estação mantida pelo IAC está localizada em área rural, próxima a alguns condomínios e eixos rodoviários de saída da cidade.

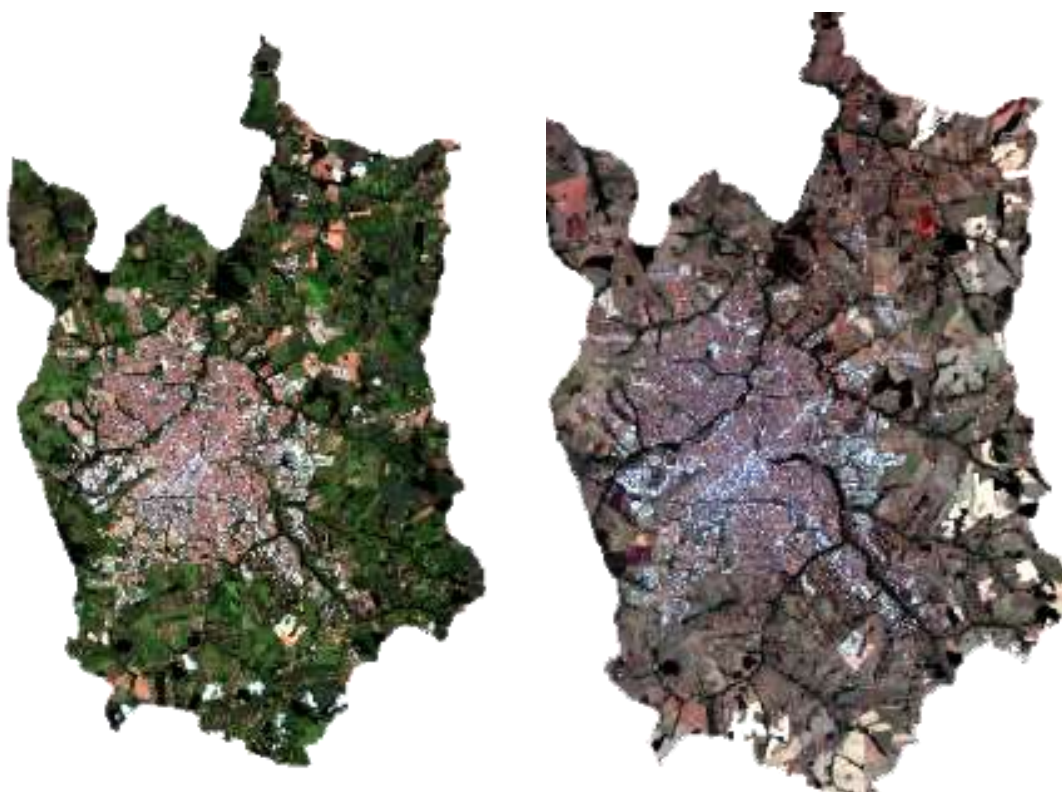
A estação da CETESB registra dados horários, já o IAC fornece as temperaturas máxima e mínima diárias. Dessa forma, foram utilizados dados de temperatura dessas duas estações meteorológicas em dias coincidentes com as imagens geradas, conforme demonstrado anteriormente no Quadro 1. Os dados da Cetesb foram coletados e apresentados em forma de gráfico, exibindo a umidade relativa e a temperatura do ar em duas datas por

ano, uma data referente à estação úmida e outra referente à estação seca. Já os dados obtidos na estação do IAC (temperaturas máxima e mínima), estão apresentados na forma de tabela.

Resultados

Conforme citado anteriormente, a cidade possui uma intensa variabilidade climática, que pode ser observada já na composição RGB das imagens de satélite. Fica evidente, nas Figuras 2 e 3, que nos meses com condição climática úmida há presença de vegetação, enquanto no período seco a cor predominante é o marrom, seja pelo solo exposto ou vegetação seca.

Figuras 2 e 3. Registros de satélite da cidade de São José do Rio Preto/SP coletados nos dias 02/10/2019 e 24/03/2019, em condições climáticas úmidas e secas, respectivamente.

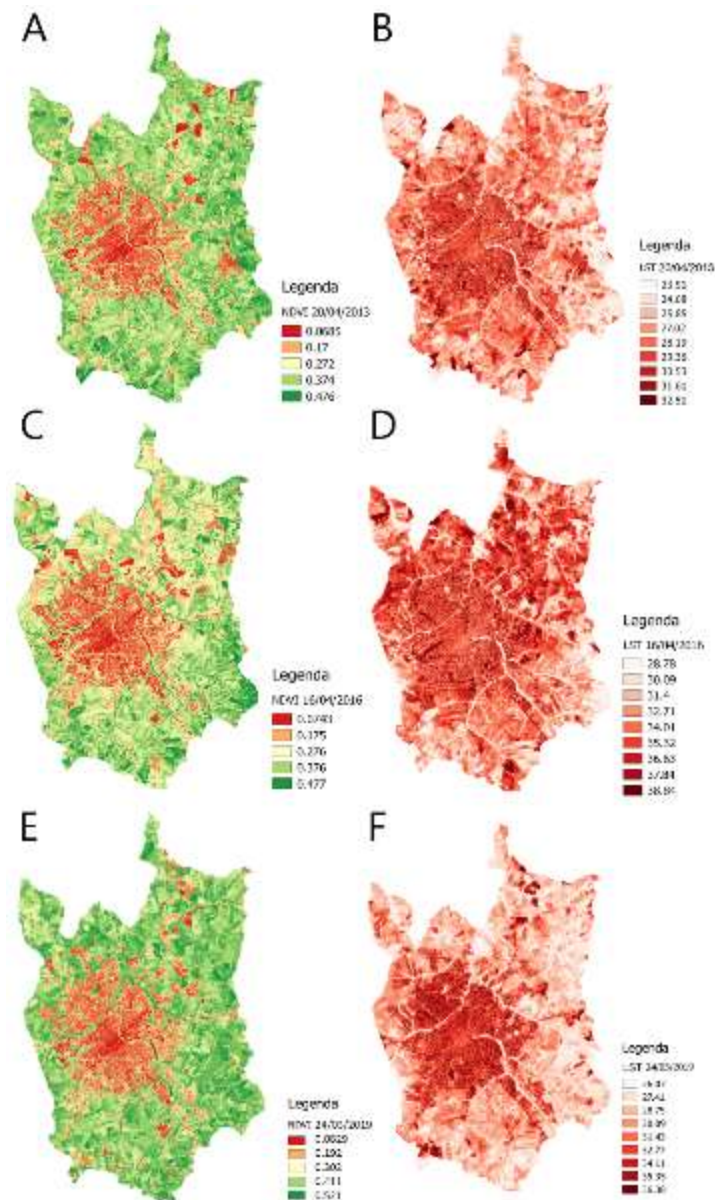


Fonte: Elaborado pelos autores.

Tempo úmido

A seguir são apresentados os dados de Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e *Land Surface Temperature* (LST) para as condições climáticas de tempo úmido, março de 2013 e abril dos anos 2016 e 2019 (Figura 4).

Figura 4. Resultados de NDVI e LST para condições climáticas de tempo úmido, 2013 (A e B), 2016 (C e D) e 2019 (E e F).



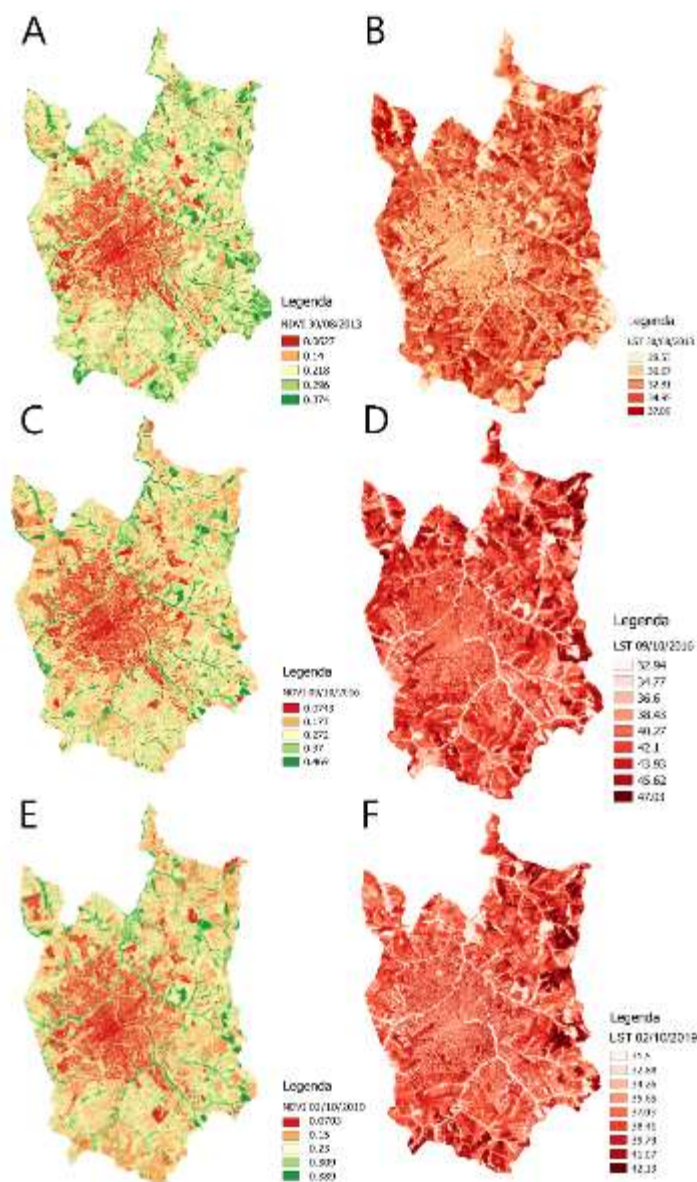
Fonte: Elaborado pelos autores.

Fica evidente, através das figuras, que há uma diferença entre a área construída e a área vegetada (NDVI), causando uma variação da temperatura superficial entre o centro da cidade e a zona rural (LST). O primeiro registro, datado de 20/04/2013 (A e B) demonstra um entorno com temperatura superficial de 23,51°C, enquanto o centro urbano está 9,0°C mais quente, com valores de 32,51°C. Os resultados se repetem nos anos seguintes, em 2016 há uma diferença de 10,06°C (C e D) e em 2019 esse valor chega a 10,31°C (E e F).

Tempo seco

Os mapas abaixo (Figura 5) representam os resultados de NDVI e LST para o período seco, correspondente aos meses de agosto de 2013 e outubro de 2016 e 2019.

Figura 5. Resultados de NDVI e LST para condições climáticas de tempo seco, 2013 (A e B), 2016 (C e D) e 2019 (E e F).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para as condições climáticas de tempo seco percebe-se uma inversão térmica, o centro urbano apresenta temperaturas superficiais inferiores ao entorno rural. As imagens de NDVI sugerem uma alteração da morfologia vegetada, que se repete nos três cenários.

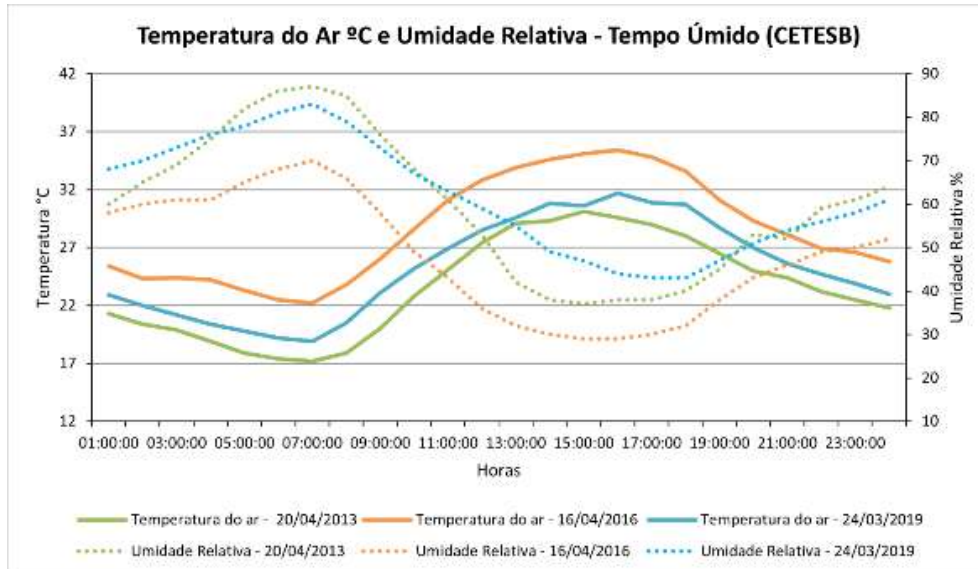
A alteração da temperatura superficial também é clara, no ano de 2013 (A e B) há uma diferença de 8,56°C com maiores valores para a zona rural. Nos anos seguintes (C e D, E e F) a divisão entre a cidade e o entorno fica menos evidente, mas também podem ser observadas diferenças de até 14,09°C entre pontos de análise.

Dados microclimáticos

A avaliação microclimática foi realizada através de dados cedidos por duas estações meteorológicas, uma no centro urbano e outra na área rural. Os dados da CETESB, coletados

em área construída, demonstram um comportamento similar entre os dias analisados com condição de clima úmido (Figura 6). A amplitude térmica foi de 12,9°C no ano de 2013, 13,2°C em 2016 e 12,8°C no ano de 2019.

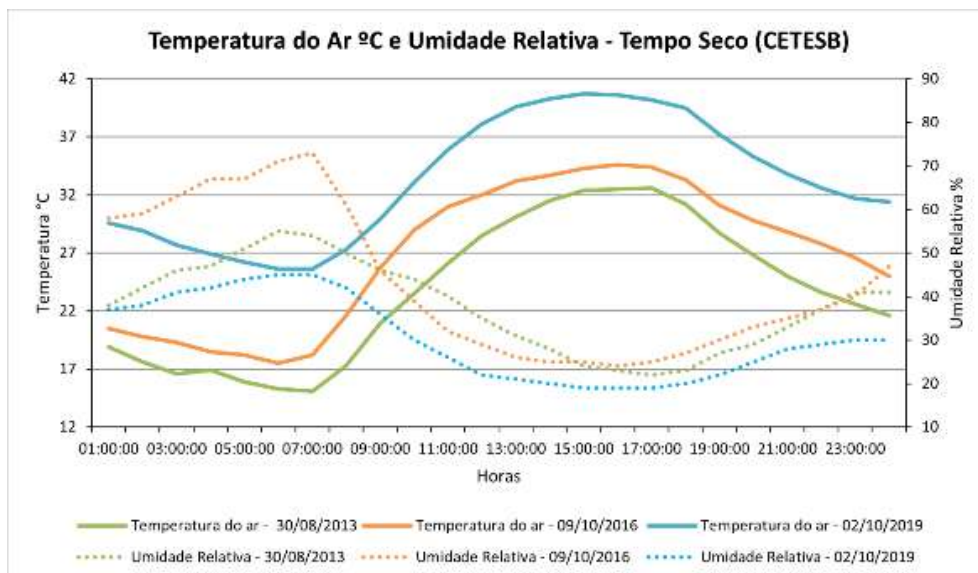
Figura 6. Dados de temperatura e umidade relativa do ar dos anos 2013, 2016 e 2019 para tempo úmido.



Fonte: Elaborado pelas autoras a partir de dados cedidos pela CETESB.

Para a condição climática de tempo seco (Figura 7), conforme característico dessa época do ano, apresentou uma maior amplitude térmica, sendo de 17,5°C em 2013, 17,1°C em 2016 e 15,1°C em 2019.

Figura 7. Dados de temperatura e umidade relativa do ar dos anos 2013, 2016 e 2019 para tempo seco.



Fonte: Elaborado pelas autoras a partir de dados cedidos pela CETESB.

Ao analisar o Quadro 3 é possível comparar as diferenças de temperaturas máximas e mínimas entre área rural (dados do IAC) e urbana (dados da Cetesb). Conforme esperado percebe-se uma tendência a temperaturas maiores (tanto mínima quanto máximas) no meio

urbano em relação ao meio rural. A maior diferença de temperatura entre as áreas analisadas foi encontrada em de agosto de 2013, com 6,8°C.

Quadro 3. Comparativo entre os dados de temperatura e umidade relativa do ar em ambas as estações meteorológicas.

| Estação climática úmida | | | | | | | Estação climática seca | | | | | | |
|-------------------------|------|------------|--------|------------|--------|------------|------------------------|------------|--------|------------|--------|------------|--------|
| Datas | | 20/04/2013 | | 16/04/2016 | | 24/03/2019 | | 30/08/2013 | | 09/10/2016 | | 02/10/2019 | |
| Estação Meteorológica | | IAC | CETESB | IAC | CETESB | IAC | CETESB | IAC | CETESB | IAC | CETESB | IAC | CETESB |
| Temp. °C | mín. | 13,9 | 17,2 | 20 | 22,2 | 18,8 | 18,9 | 8,3 | 15,1 | 15 | 17,5 | 21,5 | 25,6 |
| | máx. | 28,7 | 30,1 | 34 | 35,4 | 30,6 | 31,7 | 29,6 | 32,6 | 34 | 34,6 | 36,9 | 40,6 |
| UR % | mín. | 35,1 | 37 | 28,4 | 29 | 40,5 | 43 | 11,3 | 22 | 18,6 | 24 | 17,0 | 19 |
| | máx. | 94 | 87 | 72,1 | 70 | 91,1 | 83 | 82,9 | 55 | 75,1 | 73 | 62,8 | 45 |

Fonte: Elaborado pelas autoras, dados cedidos pela CETESB e IAC.

Discussão dos resultados

Os resultados apresentados demonstram que para os dias analisados: a) há uma anomalia térmica na cidade, caracterizada como ilha de calor de superfície para a condição de estação climática úmida; b) há uma inversão dos resultados no período seco, como possível consequência da falta de cobertura vegetal no entorno da cidade.

As ilhas de calor de superfície, conforme apontado por Fialho (2012), podem ser analisadas por meio de imagens de satélite e são caracterizadas como diferenças de temperatura na superfície urbana. O fenômeno ocorre devido a modificações da paisagem urbana, inerentes ao processo de formação das cidades (AMORIM, 2016; BARROS e LOMBARDO, 2016).

Para a inversão dos resultados esperados no tempo seco é possível supor que tal comportamento se deva à classificação vegetal da região de São José do Rio Preto que segundo Veloso *et al* (1991) é considerada floresta estacional semidecidual somada à cultura canavieira e de pastagens que predominam na região.

O comportamento da vegetação de floresta estacional semidecidual se deve à dupla sazonalidade de intensas chuvas no verão e estiagens acentuadas no inverno, resultando no que se chama de seca fisiológica para o vegetal. Tal ocorrência se caracteriza por “uma forte estacionalidade foliar dos elementos arbóreos como resposta à deficiência hídrica ou à queda de temperatura, na qual ocorre perda de e 20 a 50% das folhas no período desfavorável, alterando fortemente a fisionomia da vegetação” (VELOSO *et al*, 1991).

Nas estações secas e frias do ano as pastagens (gramíneas) também têm suas fisionomias modificadas, se tornando secas e até escassas. Já no que diz respeito ao cultivo da cana de açúcar, esta também é uma espécie de gramínea, cujas respostas fisiológicas fazem com que a planta apresente pouco desenvolvimento nas épocas de seca em algumas variedades, como na variedade mais cultivada na região centro sul do país que inclui o estado de São Paulo.

Somados aos fatores citados acima, a própria morfologia da cidade favorece a ocorrência de fenômenos de inversão térmica em épocas mais frias do ano, ao refletir a luz solar e não permitir que os cânions urbanos recebam o calor necessário (ARNFIELD, 1990). Dessa forma, o solo exposto das áreas rurais permite uma absorção da temperatura de forma maior que o centro urbano.

Conclusões

A pesquisa parte da problemática das anomalias térmicas urbanas, como a formação de áreas mais quentes que o entorno imediato. Dessa forma, para investigação do fenômeno foram aferidas imagens do satélite Landsat 8, com dados de Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e temperatura superficial (LST), acrescidos de medições microclimáticas em estações meteorológicas.

Os resultados demonstraram duas anomalias térmicas. A primeira, característica da estação climática úmida na região, pode ser entendida como uma ilha de calor superficial, onde o centro urbano é mais quente em comparação com as áreas rurais. Entretanto, a segunda anomalia, correspondente à estação seca, demonstrou uma inversão desses valores, com o entorno mais quente que o sítio urbano.

Essa inversão das perspectivas esperadas pode ser consequência do padrão vegetacional do meio rural. De acordo com Veloso *et al* (1991) e Castilho (2016) esse comportamento térmico pode ser decorrente das características da vegetação natural da região. Mas pode ser também em parte devido a alterações que a cultura canavieira provocou nesse entorno, uma vez que há ocorrências de solo exposto que se repete de forma sazonal, em tempos de colheita da cana de açúcar.

Portanto, diante dos resultados, fica claro a necessidade de um planejamento urbano que leve em consideração os múltiplos fatores que compõem uma cidade e suas interações, uma vez que o campo, caso utilizado de forma predatória, pode interferir no conforto térmico de todo o sítio urbano.

Referências

- AKINYEMI, F. O.; IKANYENG, M.; MURO, J. Land cover change effects on land surface temperature trends in an African urbanizing dryland region. **City and Environment Interactions**, v. 4, n. 2019, p. 100029, 2019.
- AMORIM, M. C. DE C. T. Ilhas de Calor Urbanas: Métodos e Técnicas de Análise. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, n. 1976, p. 361–376, 2016.
- ANDRADE, T.; NERY, J.; MOURA, T.; KATZSCHNER, L. Urban Climatic Map Studies in Brazil: Salvador. In: NIKOLOPOULOU, M. **Designing Open Spaces in the Urban Environment: a Bioclimatic Approach**, 2015.
- ARNFIELD, A. J. Street design and urban canyon solar access. **Energy and Buildings**, v. 14, n. 2, p. 117–131, 1990.
- ASSIS, E. S. DE. Aplicações da Climatologia Urbana no Planejamento da Cidade: revisão dos estudos brasileiros. **Revista de Urbanismo e Arquitetura RUA**, v. 7, n. 1, 2006.
- ASSIS, E. S. DE. A abordagem do clima urbano e aplicações no planejamento da cidade: Reflexões sobre uma trajetória. **Encac**, p. 92–101, 2005.

- ASSIS, E. S. DE. Bases teóricas para a aplicação da climatologia ao planejamento urbano. **IV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído**, p. 134–139, 1997.
- ASSIS, E. S. DE. **Impactos da forma urbana na mudança climática: método para a previsão do comportamento térmico e melhoria de desempenho do ambiente urbano**. Tese de Doutorado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- 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.
- BRITO F; HORTA, C. J. G.; AMARAL, E. F. L. “A urbanização recente no Brasil e as aglomerações metropolitanas.” In: **Open Science Framework Preprints**, 2018.
- CASTILHO, F. J. V. **Abordagem geográfica do clima urbano e das enfermidades em São José do Rio Preto/SP**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2006.
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Dados climáticos de São José do Rio Preto. Disponível em:
<<https://qualar.cetesb.sp.gov.br/qualar/exportaDados.do?method=pesquisar>>. Acesso em: 10/07/2021.
- DUARTE, D. H. S. O impacto da vegetação no microclima em cidades adensadas e seu papel na adaptação aos fenômenos de aquecimento urbano. **Contribuições a uma abordagem interdisciplinar**. FAU USP, 2015.
- DUARTE, D. H. S.; SERRA, G. G. Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima tropical continental brasileira: correlações e proposta de um indicador. **Ambiente Construído**, v. 3, n. 2, p. 7–20, 2008.
- FERREIRA, L. S. **Vegetação, temperatura de Superfície e morfologia urbana - Um retrato da região metropolitana de São Paulo**. Universidade de São Paulo, 2019.
- FIALHO, E. S. Ilha de calor: reflexões acerca de um conceito. In: **ACTA Geográfica**, Boa Vista, Ed. Esp. Climatologia Geográfica, 2012.
- GIVONI, B. Urban design for hot humid regions. **Renewable Energy**, v. 5, n. 5–8, p. 1047–1053, 1994.
- GONÇALVES, J. C. S.; MULFARTH, R. K.; MONTEIRO, L. M.; MOURA, N. C.; PRATA, A. R.; MIANNA, A. C.; CAVALCANTE, R. Adensamento urbano e desempenho ambiental no centro da cidade de São Paulo. **XI Encontro Nacional e VII Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído**, n. 1, p. 1–10, 2011.
- HUETE, A. R. Vegetation Indices, Remote Sensing and Forest Monitoring. **Geography Compass**, v. 6, n. 9, p. 513–532, 2012.
- IBGE. **Panorama do Município de São José do Rio Preto**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/sao-jose-do-rio-preto.html>>. Acesso em: 10/07/2021.
- Instituto Agrônomo (IAC). Dados climáticos de São José do Rio Preto. Disponível em: <<http://clima.iac.sp.gov.br/index.php/main/detalhar/44>>. Acesso em: 10/07/2021.
- LABAKI, L. C. et al. Vegetação e conforto térmico em espaços urbanos abertos. **Fórum Patrimônio: mudanças climáticas e impacto das cidades**, Belo Horizonte, v. 4, n.1, p. 23-42, 2011.
- LEMOS, J. DE S. **Espacialização da Ilha de Calor do Aglomerado Urbano da Região Metropolitana de Curitiba (AU-RMC) em agosto de 2006 a partir da termografia de superfície**. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. **Anais...Curitiba**, PR, Brasil: 2011.
- LIU, L.; ZHANG, Y. Urban heat island analysis using the landsat TM data and ASTER Data: A case study in Hong Kong. **Remote Sensing**, v. 3, n. 7, p. 1535–1552, 2011.
- LOMBARDO, M. A. Análise das mudanças climáticas nas metrópoles: o exemplo de São Paulo e Lisboa. In: CORTEZ, A.; ORTIGOZA, S., orgs. **Da produção ao consumo: impactos socioambientais no espaço urbano** [online]. São Paulo: Editora UNESP; São Paulo: Cultura Acadêmica, 2009. p. 111 – 146.
- MATOS, R. Migração e urbanização no Brasil. **Revista Geografias**, 7–23, 2012.
- MONTEIRO, C.A.F. **Teoria e Clima Urbano**, São Paulo, IBEOG/USP. São Paulo, 181p, 1976.
- MONTEIRO, C.A.F. The study of urban climates in tropical South America – The brazilian contribution. **WMO – Technical conference of urban climatology and its applications with special regard to tropical areas**, México/DF, 1984.

- MONTEIRO, F. F. et al. Assessment of Urban Heat Islands in Brazil based on MODIS remote sensing data. **Urban Climate**, v. 35, n. September 2021.
- MONTEIRO, L. M. **Modelos preditivos de conforto térmico: Quantificação de relações entre variáveis microclimáticas e de sensação térmica para avaliação e projeto de espaços abertos**. Tese de Doutorado, FAU USP, 2008.
- MONTEIRO, L. M. Conforto térmico em espaços urbanos abertos: verificações modelares como aportes à exploração de abordagens. 520p. Tese de Livre-Docência. FAU USP, 2018.
- NDOSSI, M. I.; AVDAN, U. Application of open-source coding technologies in the production of Land Surface Temperature (LST) maps from Landsat: A PyQGIS plugin. **Remote Sensing**, v. 8, n. 5, 2016.
- NG, E.; REN, C. **The urban climatic map: A methodology for sustainable urban planning**, Routledge, 2015.
- NIKOLOPOULOU, M. Outdoor Comfort. In: STEEMERS, K.; STEANE, M. A. (Eds.). Environmental Diversity in Architecture. Oxford: Spon Press, 2004. chapter 7, p.101-119. OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. 2ª ed, p. 460, 1987.
- OKE, T. R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. **Journal of Climatology**, n. 1, p. 237-254, 1981.
- PAGE, J. K. Climate considerations and energy conservation. In: BACH, W.; PANKRATH, J.; WILLIAMS, J. **Interactions of Energy and Climate**. Dordrecht: D. Reidel Publishing, p. 73-88. 1980.
- PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. **Updated world Koppen-Geiger climate classification map**. p. 1633-1644, 2007.
- QGIS. **QGIS - A liderança do SIG de código aberto**. Disponível em: <https://qgis.org/pt_BR/site/about/index.html>. Acesso em: 19 jul. 2021.
- ROCHA, L. M. V.; SOUZA, L. C. L.; CASTILHO, F. J. V. Ocupação do solo e ilha de calor noturna em avenidas marginais a um córrego urbano. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 3, p. 161-175, 2011.
- SHIMOMURA, A. P.; LOPES, A. S.; CORREIA, E. Urban Climatic Map Studies in Brazil: Campinas. In: NIKOLOPOULOU, M. **Designing Open Spaces in the Urban Environment: a Bioclimatic Approach**. 2015.
- SHINZATO, P.; DUARTE, D. H. S. Impacto da vegetação nos microclimas urbanos e no conforto térmico em espaços abertos em função das interações solo-vegetação-atmosfera. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 2, p. 197-215, 2018.
- SILVA, P. C. B. **Identificação de anomalias térmicas por sensoriamento remoto em Cuiabá/MT**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2016.
- SOUZA, N. S. **Análise de anomalias térmicas em função da geometria urbana em Cuiabá-MT**. 2019. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Física Ambiental, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2019.
- TERJUNG, W. H.; O'ROURKE, P. A. Simulating the causal elements of urban heat islands. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 19, n. 1, p. 93-118, 1980.
- USGS. **Landsat Missions**. Disponível em: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con>. Acesso em: 19 jul. 2021.
- VELOSO, H.P.; RANGEL, F.; LIMA, J.C.A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro, IBGE, 1991.
- VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, n. 3, p. 370-384, 2003.
- ZHOU, D. et al. Satellite remote sensing of surface urban heat islands: Progress, challenges, and perspectives. **Remote Sensing**, v. 11, n. 1, p. 1-36, 2019.

Contribuição dos autores

Os autores participaram de todas as etapas, desde a concepção do estudo até a revisão da versão final do artigo.

Base de dados

Não se aplica.

Financiamento

Este trabalho não recebeu nenhum subsídio específico de agências de fomento nos setores público, comercial ou sem fins lucrativos.

Conflito de interesse

Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Aprovação do conselho de ética

Não se aplica.

Agradecimentos

Não se aplica.
