

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

Escola de Engenharia de São Carlos

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO SUPERFICIAL  
HORIZONTAL EM AMBIENTE URBANO: UM EXPERIMENTO  
UTILIZANDO VEÍCULO AÉREO NÃO-TRIPULADO (VANT).**

**Rafael Perussi**

**Orientador: Prof. Dr. Adriano Rogério Bruno Tech**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DA ENGENHARIA AMBIENTAL**

Rafael Perussi

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO SUPERFICIAL  
HORIZONTAL EM AMBIENTE URBANO: UM EXPERIMENTO  
UTILIZANDO VEÍCULO AÉREO NÃO-TRIPULADO (VANT)**

**São Carlos – SP  
2023**



**RAFAEL PERUSSI**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO SUPERFICIAL  
HORIZONTAL EM AMBIENTE URBANO: UM EXPERIMENTO  
UTILIZANDO VEÍCULO AÉREO NÃO-TRIPULADO (VANT)**

**Tese apresentada à Escola de Engenharia de São  
Carlos, da Universidade de São Paulo, para  
obtenção do título de Doutor em Ciências da  
Engenharia Ambiental.**

**Orientador: Prof. Dr. Adriano Rogério Bruno Tech**

**VERSÃO CORRIGIDA**

**São Carlos – SP  
2023**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da  
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

P471a Perussi, Rafael  
Análise do comportamento térmico superficial  
horizontal em ambiente urbano: um experimento  
utilizando veículo aéreo não-tripulado (VANT). / Rafael  
Perussi; orientador Prof. Dr. Adriano Rogério Bruno  
Tech. São Carlos, 2023.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação e  
Área de Concentração em Ciências da Engenharia  
Ambiental -- Escola de Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo, 2023.

1. Clima Urbano. 2. Ilhas de Calor Urbanas. 3.  
Temperatura Superficial. 4. Termografia. 5. VANT. I.  
Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **RAFAEL PERUSSI**.

Título da tese: "Análise do comportamento térmico superficial horizontal em ambiente urbano: um experimento utilizando veículo aéreo não-tripulado (VANT)".

Data da defesa: 10/03/2023.

### Comissão Julgadora

### Resultado

Prof. Associado **Adriano Rogerio Bruno Tech** (Orientador)  
(Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/FZEA-USP)

Aprovado

Dr. **Gustavo Zen de Figueiredo Neves**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/CRHEA-USP)

Aprovado

Prof. Dr. **Érico Masiero**  
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovado

Prof. Dr. **Antonio Luiz Ferrari**  
(Academia da Força Aérea/AFA)

Aprovado

Prof. Dr. **Paulo Henrique de Souza**  
(Universidade Federal de Alfenas/UNIFAL-MG)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental:

Prof. Titular **Marcelo Zaiat**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Carlos De Marqui Junior**

---

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais pelo apoio durante toda minha trajetória acadêmica.*

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Adriano Rogério Bruno Tech, pela oportunidade e confiança em mim depositada para a realização deste trabalho.

À minha companheira Livia, pelo amor, carinho e apoio durante todas as etapas ao longo deste ciclo.

Aos colegas do Núcleo de Climatologia e demais colegas do PPGSEA, pela amizade e companheirismo em todos os momentos desta trajetória.

Ao técnico da estação meteorológica do CRHEA e também amigo do Núcleo de Climatologia, José Roberto Maramarque (in memoriam) pelo exemplo de dedicação, sabedoria e reflexões sobre a interpretação dos fenômenos climáticos.

Aos funcionários José Luiz e Nelson Tessarin, pelo trabalho e disposição em ajudar sempre que necessário em todos os momentos durante esse ciclo na universidade.

À todos(as) os(as) representantes discentes da USP São Carlos, pela soma à luta no movimento estudantil, imprescindível durante os últimos anos para a defesa da educação e da ciência brasileira.

À CAPES e ao CNPq, pelo apoio à realização desta pesquisa por meio da concessão das bolsas de estudo.



## RESUMO

PERUSSI, R. 2023. **Análise do comportamento térmico superficial horizontal em ambiente urbano: um experimento utilizando veículo aéreo não-tripulado (VANT)**. 54p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2023.

A crescente atenção dada às questões ambientais e a consequente busca de um desenvolvimento sustentável por parte das sociedades atuais têm acentuado as preocupações relacionadas aos impactos associados à transformação do ambiente natural em ambiente construído. A proposição de novas metodologias para o estudo do clima urbano se faz relevante na medida em que possibilitam a obtenção de dados em micro escala de maneira mais dinâmica, otimizando o trabalho de investigação pelo pesquisador. O objetivo desse estudo foi analisar a variação da temperatura superficial horizontal de diferentes tipologias de coberturas do solo e de edificações em três setores urbanos no município de São Carlos-SP por meio de termografias utilizando uma câmera térmica acoplada a um veículo aéreo não tripulado (VANT) em dias típicos de calor. Foram analisados os dados de temperatura de algumas tipologias de cobertura do solo (asfalto, calçada, árvores e corpos d'água) e cobertura de edificações (telhado de fibrocimento e telhado cerâmico). Os resultados mostraram que houve uma maior retenção de calor pelo revestimento asfáltico, atingindo  $T_{\text{máx}}$  de 54,4°C às 10h00, seguido pela calçada com  $T_{\text{máx}}$  de 43,8°C às 16h00, apresentando, também, as maiores amplitudes térmicas diárias ( $\Delta T$  25,4°C e 11,8°C, respectivamente). A cobertura arbórea e os corpos d'água apresentaram as menores temperaturas máximas ( $T_{\text{máx}}$  34°C às 16h00 e 28,3°C às 16h00, respectivamente), e as menores amplitudes térmicas ( $\Delta T$  5,5°C e 2°C). Dentre as coberturas das edificações, a de fibrocimento apresentou as temperaturas mais elevadas e maior amplitude térmica ( $T_{\text{máx}}$  46,8°C às 11h00 e  $\Delta T$  25,3°C) em comparação com o telhado cerâmico ( $T_{\text{máx}}$  43°C às 16h00 e  $\Delta T$  15°C). A utilização do VANT para o estudo se mostrou uma ferramenta bastante satisfatória na medida em que possibilitou uma rápida obtenção das termografias dos alvos selecionados e no período de tempo programado. A análise dos tipos de tempo foi um fator determinante para identificar a massa de ar atuante e escolher o episódio representativo de calor e estabilidade atmosférica. Os valores dos dados obtidos demonstram as diferenças de temperatura superficiais e suas repercussões na atmosfera em microescala.

**Palavras-chave:** Clima urbano. Ilhas de calor urbana. Temperatura superficial. Termografia. VANT.

## ABSTRACT

PERUSSI, R. 2023. **Analysis of horizontal surface thermal behavior in an urban environment: an experiment using an unmanned aerial vehicle (UAV)**. 54p. Thesis (Doctorate). São Carlos School of Engineering, University of São Paulo. São Carlos, 2023.

The attention given to environmental issues and the consequent search for sustainable development by modern societies have heightened concerns related to the impacts associated with the transformation of the natural environment into the built environment. The proposition of new methodologies for the study of the urban climate is relevant insofar as it makes it possible to obtain micro-scale data in a more dynamic way, optimizing the research work by the researcher. The aim of this study was to analyze the horizontal surface temperature variation of different types of land cover and buildings in three urban sectors in the city of São Carlos-SP through thermography using a thermal camera coupled to an unmanned aerial vehicle (UAV) on typical hot days. Temperature data of some types of ground cover (asphalt, sidewalk, trees and water bodies) and building cover (fiber cement roof and ceramic roof) were analyzed. The results showed that there was a greater retention of heat by the asphalt coating, reaching a  $T_{\max}$  of 54,4°C at 10h00, followed by the sidewalk with a  $T_{\max}$  of 43,8°C at 16h00, also presenting the highest thermal daily amplitudes ( $\Delta T$  25,4°C and 11,8°C, respectively). Tree cover and water bodies had the lowest maximum temperatures ( $T_{\max}$  34°C at 16h00 and 28,3°C at 16h00, respectively) and the lowest thermal amplitudes ( $\Delta T$  5,5°C and 2°C). Among the building roofs, the fiber cement roof had the highest temperatures and the greatest thermal amplitude ( $T_{\max}$  46,8°C at 11h00 and  $\Delta T$  25,3°C) compared to the ceramic roof ( $T_{\max}$  43°C at 16h00 and  $\Delta T$  15°C). The use of the UAV for the study proved to be a very satisfactory tool insofar as it made it possible to quickly obtain the thermographs of the selected targets and within the programmed period of time. The weather types analysis was a determining factor to identify the active air mass and to choose the representative of a hot episode and atmospheric stability. The values of the acquired data demonstrate the surface temperature differences and their repercussions in the atmosphere at a microscale.

**Keywords:** Urban climate. Urban heat islands. Surface temperature. Thermography. UAV.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Localização espacial do município de São Carlos .....	27
<b>Figura 2:</b> : Localização dos bairros selecionados para o estudo .....	29
<b>Figura 3:</b> Imagens das vias e das edificações do bairro Bela Vista .....	29
<b>Figura 4:</b> Imagem do Parque do Bicão .....	30
<b>Figura 5:</b> Imagens de uma via da Vila Izabel e do ginásio Milton Olaio Filho .....	31
<b>Figura 6:</b> Imagens da entrada norte da UFSCar e da vegetação de cerrado .....	32
<b>Figura 7:</b> Imagem aérea com indicação da área dos voos nos bairros (A) Bela Vsita, (B) Vila Izabel e (C) UFSCar .....	33
<b>Figura 8:</b> (A) VANT DJI F450; (B) radiocontrolador e monitor para guiar os voos noturnos; (C) abrigo para termohigrômetro; (D) câmera térmica acoplada ao smartphone e (E) termohigrômetro digital portátil.....	35
<b>Figura 9:</b> Probabilidade de anomalias térmicas em relação às normais climatológicas para o mês de setembro de 2020 .....	37
<b>Figura 10:</b> Imagem do programa <i>Flir Tools</i> , utilizado para analisar as termografias, mostrando no exemplo as temperaturas de algumas tipologias de coberturas .....	38
<b>Figura 11:</b> Análise rítmica do período de 22 a 30/9/2020 com as variáveis climáticas de temperatura atmosférica, umidade relativa e precipitação, com destaque para os dias experimentais selecionados.....	39
<b>Figura 12:</b> Mosaico das imagens do satélite entre os dias 26 e 28/9/2020 às 10h00, 16h00 e 22h00 de cada dia, com destaque para localização de São Carlos .....	40

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Valores de temperatura máxima, umidade relativa do ar, velocidade do vento registrados nos respectivos horários das missões e a altitude dos setores urbanos .....	41
<b>Tabela 2:</b> Valores de temperatura máxima da estação automática do INMET .....	41
<b>Tabela 3:</b> Imagem RGB e termografias das tipologias analisadas em cada missão no bairro Bela Vista no dia 26/9/2020, indicando as áreas amostrais e suas respectivas temperaturas médias em cada missão e a amplitude térmica .....	43
<b>Tabela 4:</b> Imagem RGB e termografias das tipologias analisadas em cada missão no bairro Vila Izabel no dia 27/9/2020, indicando as temperaturas médias das áreas amostrais e a amplitude térmica .....	45
<b>Tabela 5:</b> Imagem RGB e termografias das tipologias analisadas em cada missão na região da UFSCar no dia 28/9/2020, indicando as temperaturas médias das áreas amostrais e a amplitude térmica .....	46

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

T<sub>máx</sub> – Temperatura máxima

ICU – Ilhas de Calor Urbanas

VANT – Veículo Aéreo Não-Tripulado

SCU – Sistema Clima Urbano

ICA – Ilhas de Calor Atmosféricas

ICS – Ilhas de Calor Superficiais

CDU – Camada de Dossel Urbano

CLU – Camada Limite Urbana

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration

ARP – Aeronaves Remotamente Pilotadas

m<sub>Tc</sub> – Massa Tropical Continental

m<sub>Ta</sub> – Massa Tropical Atlântica

m<sub>Pa</sub> – Massa Polar Atlântica

m<sub>Ec</sub> – Massa Equatorial Continental

ASAS – Alta Subtropical do Atlântico Sul

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

UFSCar – Universidade Federal de São Carlos

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

SIG – Sistemas de Informações Geográficas.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta T$  – Amplitude térmica.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA</b> .....	13
<b>2. HIPÓTESE</b> .....	16
2.1. Objetivos específicos.....	16
<b>3. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	17
3.1. Os processos de urbanização e as ilhas de calor urbanas .....	17
3.2. A influência dos materiais no ambiente urbano .....	17
3.3. O clima urbano e as escalas de análise .....	19
3.4. Sensoriamento remoto: técnicas em clima urbano .....	23
<b>4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b> .....	27
4.1. Delineamento experimental .....	27
4.2. Caracterização da área de estudo .....	27
4.3. Instrumentação e aquisição dos dados .....	34
4.4. Análise do episódio climático .....	36
4.5. Análise dos valores de temperatura .....	38
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	39
5.1. Análise dos tipos de tempo no período estudado .....	39
5.2. Análise dos dados meteorológicos .....	41
5.3. Análise das termografias .....	42
5.3.1. Bairro Bela Vista .....	42
5.3.2. Bairro Vila Izabel .....	44
5.3.3. UFSCar .....	45
<b>6. CONCLUSÃO</b> .....	48

## 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A crescente atenção dada às questões ambientais e a consequente busca de um desenvolvimento sustentável por parte das sociedades atuais têm acentuado as preocupações relacionadas aos impactos associados à transformação do ambiente natural em ambiente construído. Diversos autores têm relatado as diferenças microclimáticas promovidas nas cidades pelo processo de urbanização (LOWRY, 1967; LOMBARDO, 1985; OKE, 1987; PITTON, 1997). Sabe-se que mudanças na paisagem determinam condições que interferem diretamente na qualidade de vida dos habitantes das cidades. A definição de “ecossistema urbano”, de acordo com Gómez, Tamarit e Jabaloyes (2001), refere-se à substituição do habitat natural por outro mais adequado às necessidades das pessoas atualmente. Entretanto, o ambiente artificial tem excedido a capacidade biológica de seus habitantes, que sentem necessidade crescente de equilíbrio envolvendo elementos naturais, como espaços livres de construções, presença de vegetação e água. A modificação do clima das cidades pode ser ocasionada pelos seguintes fatores: os materiais utilizados nas construções e na pavimentação; o formato das cidades; as atividades humanas geradoras de calor; a remoção das águas das superfícies e a presença de poluentes no ar (LOWRY, 1967).

De acordo com Castro (1999) e Bueno (2003) o conforto térmico no ambiente urbano vem sendo ameaçado pelas alterações micro e topoclimáticas decorrentes das mudanças das características térmicas das superfícies, das taxas de evaporação, da grande impermeabilização do solo decorrentes de construções e pavimentações, aumento da concentração de poluentes, fruto das atividades humanas, novos padrões de circulação do ar e principalmente devido à ausência de vegetação, causando uma incidência direta da radiação solar nas construções, que retorna ao meio externo sob a forma de calor; este, por sua vez, tem sua dissipação reduzida devido às condições do ambiente, transformando as cidades em verdadeiras estufas.

Do ponto de vista climatológico, as superfícies são extremamente importantes. É onde estão localizadas as principais fontes e sumidouros de calor. A natureza da superfície condiciona fortemente o comportamento das camadas mais baixas da atmosfera. A estrutura da superfície afeta o clima local modificando o fluxo de ar, transportando o calor atmosférico e os balanços de radiação de ondas curtas e longas, enquanto a cobertura da superfície modifica o albedo, a disponibilidade de umidade e o potencial de aquecimento e resfriamento do solo (STEWART; OKE, 2012). A especificação de propriedades e condições da superfície é, portanto, um objetivo importante para o estudo e um pré-requisito necessário para compreender



o sistema climático. Se o campo relativamente novo da climatologia urbana é obter informações, é preciso lidar com a definição e especificação da interface tridimensional cidade-atmosfera, que é heterogênea e altamente complexa (VOOGT; OKE, 1997). Isso significa que o clima de uma área urbana se destaca claramente em relação à área circundante.

A introdução de geometrias complexas que compreendem cidades na paisagem natural são conhecidas por alterar drasticamente o balanço de energia na interface entre a superfície e a atmosfera, isto é, a camada limite planetária. O efeito mais pronunciado detectável é o de anomalias térmicas positivas associadas à temperatura do ar urbano noturno, que são as ilhas de calor urbanas (ICU). A ilha de calor descrita tradicionalmente é aquela que é medida na altura padrão das pessoas (de 1 a 2 m acima do solo), abaixo da altura média dos telhados da cidade em uma seção fina da atmosfera da camada limite chamada camada de cobertura urbana. O ar nessa camada é tipicamente mais quente do que no campo (VOOGT; OKE, 1997). Esse efeito, em termos gerais, é um reflexo da totalidade das mudanças microclimáticas instigado pela urbanização e pode ser detectado em múltiplas escalas temporais e espaciais. As causas e implicações desse aquecimento dependem da escala da investigação, desde edifícios individuais ao longo de horas até áreas urbanas inteiras ao longo dos anos. Entretanto, a ICU mais comumente estudada é a temperatura do ar próximo à superfície encontrada abaixo do nível dos edifícios dentro da camada de cobertura urbana, que é onde o homem vive. Por isso, a magnitude da ICU é diretamente relevante para estudos de saúde e conforto humano e gerenciamento de energia da construção (OKE, 1976; ALEXANDER; MILLS, 2014).

O sensoriamento remoto constitui uma ferramenta rápida e prática na identificação de locais de concentração de calor em áreas urbanas (COSTA; FRANCO, 2013). A utilização de dados de estações meteorológicas de superfície e de termografias obtidas por câmeras especiais permitem quantificar a variação térmica com base no tipo de uso do solo urbano, em conjunto com técnicas de processamento de dados de imagens de satélite. Estas técnicas podem ser facilmente aplicadas a outras cidades e utilizadas para descrever o ambiente térmico das áreas urbanas, gerando resultados que podem ser fornecidos para os planejadores urbanos e formuladores de políticas públicas. A imagem térmica é uma importante fonte de informação no clima urbano. As imagens térmicas são necessárias principalmente para a análise espacial das distribuições de temperatura e sua importância nos estudos da ilha de calor urbano foi descrita e revisada em Voogt e Oke (2003).

Na maioria dos estudos são utilizadas imagens de satélite, mas as resoluções da banda térmica de temperaturas superficiais são geralmente baixas (Landsat 8 TIRS: 100 m, ASTER

TIR: 90 m, NOAA AVHRR: 1,09 km) (HONJO et al., 2017). Recentemente, com uso dos VANTs, essa situação vem mudando e a obtenção de dados de temperaturas superficiais por termografia está se tornando mais prática e econômica devido ao desenvolvimento de câmeras térmicas menores e mais leves. Enquanto imagens térmicas obtidas de satélites ou aviões se tornaram padrão, o uso do VANT como plataforma de gravação para câmeras térmicas é relativamente novo, contudo, tornaram-se uma contribuição valiosa para o estudo de micro distribuições de temperatura, uma vez que permitem obter termografias georreferenciadas a custo reduzido permitindo voar grandes áreas, em diversas alturas e em curtos intervalos de tempo (SIEBERT e TEIZER, 2014; WESTOBY et al., 2012).

Problemas como a plataforma mais instável e suscetível a interferências em comparação com os aviões (por exemplo, desfoque causado pelo movimento do vento ou dos rotores), os sensores menores, embora algumas vezes sejam mais imprecisos devido à limitação do peso de carga, bem como o formato menor da imagem, representam um desafio no planejamento para a obtenção de temperaturas superficiais com VANTs (HONJO et al., 2017; PECH et al., 2013; NEWCOME, 2004).

A principal diferença entre as imagens obtidas por VANTs e por satélite está relacionada aos diferentes níveis de resolução espacial e temporal que cada plataforma fornece. Enquanto a imagem do satélite Landsat-7 tem uma resolução espacial de 30 x 30 m de pixel, a aeronave não tripulada apresenta resolução espacial que pode ser regulada pela altitude da aeronave, variando entre centímetros até alguns metros. Já em relação à resolução temporal as aeronaves não tripuladas permitem a escolha do período de repetição do levantamento, ao contrário do satélite, o que facilita o acompanhamento dinâmico dos alvos sobre uma região. Por outro lado, uma vez que a aeronave não tripulada caracteriza-se pelos recentes avanços em tecnologias, verificam-se a inexistência de imagens de anos anteriores para se fazer comparações temporais. Outra vantagem apresentada por estas aeronaves é não estarem dependentes das interferências das nuvens na obtenção das imagens em regiões de clima tropical e subtropical. Além do baixíssimo custo de suas imagens, em comparação com imagens de satélites de alta resolução, como IKONOS e QUICKBIRD, as aeronaves não tripuladas podem operar em condições impraticáveis para plataformas orbitais e não requerem meios humanos significativos de suporte (NEWCOME, 2004).

A proposição de novas metodologias para o estudo do clima urbano se faz relevante na medida em que possibilitam a obtenção de dados em micro escala de maneira mais dinâmica, otimizando o trabalho de investigação pelo pesquisador. Nesse sentido, o presente estudo busca

contribuir com a análise microclimática do ambiente urbano ao propor uma metodologia de aquisição de dados de temperaturas superficiais horizontais por termografias durante a primavera no município de São Carlos-SP.

## **2. HIPÓTESE**

Como hipótese argumenta-se que o uso de termografias obtidas com o auxílio de um VANT possa fornecer dados sobre o comportamento térmico superficial horizontal de diferentes tipologias de cobertura, do solo e de edificações, para o estudo do clima urbano.

### **2.1. Objetivos específicos**

Para validar a hipótese, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar os setores urbanos com as características desejadas à experimentação;
- Selecionar o episódio climático representativo de calor, atmosfera estável e ausência de nuvens;
- Executar os experimentos para aquisição das termografias com VANT e das medições com o termohigrômetro nos setores selecionados;
- Discutir os dados obtidos pelos experimentos.

### **3. REVISÃO DE LITERATURA**

#### **3.1. Os processos de urbanização e as ilhas de calor urbanas**

O processo de urbanização gera alterações das características térmicas das superfícies das cidades, como resultado decorrente da presença de edificações e materiais de construção comparadas com as áreas verdes distribuídas nos centros urbanos. Este crescimento da malha urbana vem se caracterizando como um processo desordenado e desarticulado que associa os vários âmbitos que contemplam a cidade, físico, social e ambiental. O crescente aumento das áreas impermeáveis decorrentes da urbanização, aumentam a temperatura do ar devido a alta capacidade de absorver e re-irradiar o calor. Esta é uma das maiores modificações geradas decorrente deste processo intensificado no século XX (BRANCO, 2009).

Nos diversos estudos realizados na climatologia brasileira, e em nível internacional, tem se verificado que assim como nos grandes centros urbanos, as cidades de médio e de pequeno porte, também passaram por fortes transformações na paisagem natural, materializadas através de diferentes formas de poluição do ar, água, solo e subsolo, além de transformações na morfologia e estrutura do ambiente urbano. Rios e córregos são canalizados ou têm seus cursos alterados; a morfologia é modificada através de aterros e construções; a vegetação é retirada. Além disso, a associação das atividades urbanas com a forma de ocupação da terra provoca alterações nos processos dinâmicos da atmosfera e, conseqüentemente, nos elementos climáticos (AMORIM, 2017).

Entendido como um dos principais problemas ambientais, o clima urbano resulta das alterações no clima local associadas ao processo de urbanização, sobretudo pelas transformações na ocupação do solo e a retirada da cobertura vegetal e sua substituição por materiais construídos. As ilhas de calor ou bolsões de ar quente que se formam sobre a superfície é um fenômeno recorrente nas cidades e sua identificação, intensidade e representação espacial é fundamental para as análises dos problemas ambientais e urbanos (RAMPAZZO, 2019).

#### **3.2. A influência dos materiais no ambiente urbano**

As coberturas (telhados) são as principais responsáveis pelo calor produzido tanto no interior quanto no entorno das edificações, uma vez que reemitem calor aquecendo o ar em

contato com suas superfícies. Este calor é determinado pelas variáveis de albedo (reflectância) e emissividade dos materiais. O albedo representa a porção da radiação solar incidente, que é refletida pelo material, enquanto a emissividade determina o desempenho térmico caracterizado pela temperatura superficial. Assim, superfícies com elevado albedo e emissividade tendem a permanecerem mais frias quando expostas à radiação solar, pois absorvem menos radiação e emitem mais radiação térmica para o espaço, transmitindo menos calor para seu entorno. Ao contrário, quanto menor for o albedo e a emissividade maior será a absorção de calor e sua permanência no ambiente de entorno.

Mello (2009) realizou um estudo com tipos de cobertura das edificações (telhados) classificando-os em três grupos: cerâmica, metálica e fibrocimento. Considerando que as coberturas de fibrocimento (habitações populares) produzem entre 10° C e 12° C de temperatura superior ao do ar circundante. As coberturas cerâmicas entre - 0,1° C e - 0,3° C (habitações das classes média e alta) e as metálicas (comércio, galpões e serviços) entre 16,0°C e 20° C superiores. Como resultados demonstrou-se que as temperaturas médias da cidade estudada aumenta cerca de 2,5° C nos últimos 30 anos e a diferença entre a área urbana e rural, em cerca de 10° C.

No verão as propriedades físicas do fibrocimento (asbestos) geram temperaturas elevadas que são transmitidas para o interior das residências em mais de 6°C. Considerando uma cidade de clima sub-úmido, esse acréscimo de temperatura gera enorme desconforto térmico e, inclusive, aumento de enfermidades. Todos esses fatores somados podem acarretar em problemas para os moradores da região, como doenças respiratórias e do aparelho circulatório devido ao desconforto térmico, além da modificação do clima local, como formação de ilhas de calor por exemplo (MELLO, 2009).

Pesquisando o efeito do albedo de pavimentos na redução da temperatura em cânions urbanos através de um modelo em escala reduzida, por meio de termopares e termografias Kowalski (2019) verificou que a orientação do cânion, a relação H/W e as variações do albedo em função do teor de umidade da superfície podem provocar variações de temperatura do ar e das superfícies dos cânions urbanos. O albedo dos pavimentos e a configuração dos elementos urbanos podem contribuir para a mitigação das ilhas de calor urbanas.

Em um estudo em escala micro e meso climática sobre a influência de corpos hídricos em área urbana Masiero e Souza (2019), verificaram que a ação dos ventos sobre as superfícies expostas de água tem elevado potencial para influenciar um entorno imediato de aproximadamente 1.000m, dependendo da topografia, da densidade do ambiente construído,

das condições atmosféricas e da vegetação. A dificuldade de penetração das massas de ar umedificadas em um denso e impermeabilizado ambiente construído sugere que o espaço urbano deva favorecer a ação passiva do resfriamento evaporativo, reduzindo a amplitude térmica e aumentando a umidade do ar.

### **3.3. O clima urbano e as escalas de análise**

Os conceitos de “tempo” e “escala”, não podem passar despercebidos quando se fala em clima. Tempo é o estado atmosférico de um certo instante ou de um determinado dia, e o clima de um dado lugar é a síntese de seus tempos atmosféricos em um determinado período (AYOADE, 1991; SILVA e RIBEIRO, 2004).

Nesse sentido, o clima pode ser entendido como as condições do tempo de uma determinada região (LARCHER, 2000). Já as escalas são referências de valor, estabelecidas por critérios, para a compreensão de um fenômeno (NUNES, 2003).

Os primeiros estudos de clima urbano caracterizaram a ilha de calor na cidade, durante o período noturno. Mas, atualmente, há comprovação de que a manifestação deste fenômeno também ocorre no período diurno (manhã ou tarde). Todavia, o crescimento das cidades, incorporando sítios distintos, tornou o estudo da ilha de calor, muito distante da realidade, em razão da pequena rede de monitoramento de parâmetros climáticos, principalmente, em países tropicais ser escassa. Apesar disso, novas possibilidades de aplicação de técnicas de sensoriamento remoto alavancaram o interesse pela temática do clima urbano (FIALHO, 2012).

Problemas relacionados ao clima urbano, como geração de ilhas de calor, impacto de eventos de precipitação ou problemas decorrentes da poluição atmosférica, são mais perceptíveis e facilmente percebidos pelas populações em grandes aglomerações urbanas (MONTEIRO, 1976; LOMBARDO, 1985).

No entanto, vários estudos realizados em todo o mundo revelaram que não apenas os grandes centros urbanos, mas também as cidades médias e pequenas são afetadas, especialmente aquelas cuja morfologia, estrutura do ambiente urbano e paisagem natural foram consideradas alteradas por diferentes formas de ar, água, solo e poluição do subsolo (KOPEC, 1970; PINHO e ORGAZ, 2000; HAWKINS, 2008; CARDOSO et al., 2017).

O clima apresenta três escalas de abordagem: o macroclima ou macroescala, que abrange a escala regional e se relaciona diretamente com as propriedades meteorológicas; o clima local ou mesoescala, que apresenta relação com as alterações climáticas em menor escala,

possibilitando averiguar modificações decorrentes da variação do relevo; e o microclima ou microescala, que compreende as variações decorrentes da influência das edificações, dos elementos da paisagem, da geometria urbana e das propriedades dos elementos de superfície (OKE, 1987).

No Sistema Clima Urbano (SCU), a cidade é investigada sob uma perspectiva integradora que propõe adotar uma concepção dinâmica dirigida pelo paradigma do ritmo de sucessão habitual dos estados atmosféricos sobre as cidades e buscar a mensuração do ar comprometido dentro da realidade do ambiente urbano (MONTEIRO, 1976).

Em um estudo comparativo entre as cidades de Presidente Prudente, Brasil, e Rennes, França, cidades de médio porte localizadas em climas tropicais e temperados continentais, respectivamente, Amorim, Dubreuil e Amorim (2021) compararam e analisaram as intensidades das ilhas de calor urbanas, atmosféricas e superficiais, durante o dia e a noite por meio de registros de temperatura do ar na cidade e na área rural juntamente com mapas de temperatura usando as imagens termais do satélite Landsat 8, captadas durante o dia e a noite. Os resultados mostraram que as ilhas de calor atmosféricas (ICA) e superficiais (ICS) não apresentavam as mesmas características e que a dinâmica de cada ilha de calor varia não só ao longo do dia, mas também depende do clima da região, condição meteorológica, localização e tipos de uso do solo. As temperaturas mais altas em áreas construídas foram claramente perceptíveis em Presidente Prudente com altas temperaturas atmosféricas máximas (acima de 30 °C) e com ilhas de calor atmosféricas mais intensas à noite. Em Rennes, devido às condições climáticas mais frias e úmidas, a intensidade da ilha de calor superficial foi muito menor durante o dia do que à noite. As temperaturas da superfície e do ar durante a passagem do satélite (dia e noite) mostraram os efeitos da vegetação e de menos áreas construídas na redução das diferenças entre as temperaturas do ar e da superfície, evidenciando os efeitos das edificações no aumento da temperatura do ar, principalmente à noite, quando as ilhas de calor são mais intensas.

Segundo Amorim (2019) a literatura aponta três tipos principais de ilhas de calor urbanas em função da camada onde se encontram: 1 – a ilha de calor superficial diagnosticada por sensoriamento remoto, que permite o cálculo da temperatura dos alvos (OKE et. al., 2017); 2 – a ilha de calor atmosférica inferior, que Oke (1978) denominou de camada de dossel urbano (CDU), cuja temperatura é registrada entre o nível do solo e o nível médio dos telhados. Nesse caso, as temperaturas são medidas abaixo do nível do topo das edificações, por meio de diferentes procedimentos, como transectos móveis (medidas itinerantes com veículos) e pontos

fixos por meio de uma rede de sensores de temperatura inseridos na malha urbana e no meio rural; e 3 - a ilha de calor da alta atmosfera urbana, também denominada por Oke (1978) como camada limite urbana (CLU).

Em um estudo sobre a intensidade e a manutenção de ilhas de calor na baixa atmosfera e sua distribuição espacial durante diferentes períodos do dia em Presidente Prudente, SP, Amorim (2020) utilizou dados de temperatura e umidade do ar de uma rede meteorológica composta por 26 pontos distribuídos ao longo do território intraurbano e suburbano durante os meses mais representativos das estações seca e chuvosa (agosto e dezembro de 2015, respectivamente), em períodos uniformemente espaçados do dia (0 h, 3 h, 6 h, 9 h, 12 h, 15 h, 18 h e 21 h). Integrando os dados por meio de estatística descritiva de regressão linear simples e múltipla, os resultados mostram que a magnitude e a continuidade das ilhas de calor nos diferentes períodos do dia variam de acordo com as características da superfície (uso do solo, relevo e vegetação) e com a sazonalidade climática da cidade. As maiores e menores magnitudes foram registradas durante a estação chuvosa e seca, respectivamente.

Já Stewart e Oke (2012) propõem que a magnitude das ilhas de calor seja representada pela diferença de temperatura entre Zonas Climáticas Locais e não apenas a diferença entre o urbano e rural. Assim, é possível averiguar as superfícies comuns e as características dos estudos de caso comparados, evidenciando e facilitando o reconhecimento das influências urbanas e não-urbanas sobre a temperatura.

A vegetação é o componente essencial para a formação das ilhas de frescor que equivalem a elementos que promovem uma amenização de temperatura, como quando ocorre um adensamento de árvores, grama, corpos hídricos ou quando existe um sombreamento provocado por uma barreira (GERMANO, 2012).

Analisando os efeitos climáticos nos espaços urbanos, Paz (2009) e Costa (2009) observaram que as áreas construídas são capazes de armazenar mais calor, enquanto que nas áreas verdes o ar tende a ser mais fresco, mais denso e mais estável. Suas pesquisas apontaram que nos espaços edificados o ar é mais rapidamente aquecido, tendendo a subir produzindo uma diferença em sua densidade a qual resulta numa dinâmica de circulação de massas entre as áreas mais quentes e as mais frescas, contribuindo de forma geral para a renovação e resfriamento do ar urbano.

Ferreira, Carrilho e Mendes (2015) estudaram a variação termo-higrométrica da maior área verde localizada na região central de Uberlândia-MG: a Praça Sérgio de Freitas Pacheco e sua influência na região circunvizinha. Os dados meteorológicos foram obtidos por meio de



transectos lineares móveis, tratados estatisticamente pelo método paramétrico t de Student e espacializados em cartogramas de isotermas e isoígras. Os resultados demonstraram que a Praça Sérgio de Freitas Pacheco contribui para o conforto térmico e higrométrico local atuando como uma pequena “ilha de frescor”. Os dados apontaram que a radiação solar, apesar de intensa no período analisado, não conseguiu impor na praça os mesmos valores de temperaturas elevadas e baixos índices de umidade relativa do ar registradas nas áreas circunvizinhas.

Segundo Macedo (2010), a forma da cidade brasileira está ligada ao processo de produção, aos padrões culturais, sociais e as características biofísicas e climáticas e não possui uma forma padronizada, apesar de apresentar características comuns. Fato este, constatado pela mancha urbana e da inserção desta no suporte físico em diferentes paisagens.

O Laboratório Quadro do Paisagismo no Brasil LAB-QUAPÁ, da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo investiga, desde 2012, as relações entre sistemas de espaços livres e a forma urbana brasileira, considerando sua produção a partir dos processos socioeconômicos e ambientais, seus aspectos comuns e especificidades locais. Dentre seus objetivos está a construção de referencial metodológico para a análise qualitativa destas relações (CAMPOS, A., et al, 2013; MACEDO, S., 2010a; MACEDO, S., 2010b; MACEDO, S., 2013).

Em um estudo para verificar a variação da temperatura superficial aparente em diferentes bairros na cidade de São Carlos-SP, Neves, et al (2018) utilizaram um termômetro infravermelho com a aferição de pontos cardeais e colaterais nas angulações de 10°, 0°, em diversas classificações do uso do solo urbano definidas pelo Laboratório Quadro do Paisagismo do Brasil - QUAPÁ. Os resultados apontaram que as temperaturas mais elevadas foram registradas para a angulação -10°, altura aproximada ao nível do pedestre.

Rampazzo e Sant’anna Neto (2017) analisaram as características do clima urbano em São Carlos SP a partir de dados de temperatura e umidade relativa do ar e técnicas de sensoriamento remoto. Foram realizadas análises das diferenças termohigrométricas em 8 pontos urbanos no período entre 28 de março a 01 de maio de 2014 às 18h (outono) e, verificação da temperatura de superfície dos alvos no dia 04 de abril de 2014, juntamente com transectos móveis. Foram identificadas diferenças térmicas de até 5,5°C e correlação entre as áreas de ocorrência de bolsões de ar e resposta térmica dos alvos em distintos padrões geoambientais.

De acordo com os autores, no âmbito da malha viária destacou-se a influência da vegetação arbórea densa e dos cursos d’água na diminuição da temperatura dos alvos, com

variação de temperatura significativamente inferior entre 23°C e 27°C. No setor geográfico a extremo norte evidenciam-se as áreas de experimento da EMBRAPA e dependências da UFSCar com temperatura variando de 20°C a 25°C. Em contraposição, a leste e noroeste observaram-se nos alvos temperaturas de 31°C associados à resposta termal de solo exposto. Destacaram-se alguns bairros dos setores geográficos da cidade, como, a Vila Bela Vista, Vila Boa Vista 1, Vila Boa Vista 2, Jardim Beatriz e Jardim Cruzeiro do Sul.

### **3.4. Sensoriamento remoto: técnicas em clima urbano**

O sensoriamento remoto e a modelagem das ilhas de calor atmosféricas permitem maior detalhamento das mesmas no intraurbano e rural próximo, podendo ser um instrumento fundamental para subsidiar medidas mitigadoras permitindo intervenções mais localizadas e quando representadas por meio das intensidades dos fenômenos e não apenas dos valores absolutos, possibilitam análises comparativas entre cidades e entre os diferentes sistemas atmosféricos nos dias de registros (AMORIM, 2019).

Nas últimas décadas, estudos de clima urbano e de Ilhas de Calor vem se destacando e ganhando muita importância na área do sensoriamento remoto, pois oferece visões de diferentes escalas e permite a transformação de dados do infravermelho termal em temperatura aparente da superfície (POLIZEL, 2009).

Os primeiros estudos foram efetuados com o satélite NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), que tem resolução espacial de 1,1 km (KIDDER e WU, 1987; No entanto, essa resolução é baixa, limitando a qualidade da descrição (WENG, 2003). Os próximos satélites que foram utilizados, e ainda são até hoje, são os da série Landsat, que se destaca por sua maior acessibilidade (NICHOL, 1994).

Os VANTs são plataformas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) que estão atualmente em contínuo desenvolvimento em ritmo acelerado. Ao todo, o desenvolvimento de sensores e instrumentos a serem instalados em plataformas VANT está crescendo exponencialmente. Esses fatores juntos levaram ao aumento do uso de estas plataformas e sensores para aplicações de sensoriamento remoto com novo potencial (PAJARES, 2015).

Segundo Longhitano (2010) uma das primeiras referências sobre o desenvolvimento de VANTs no mundo é atribuída ao padre Bartolomeu de Gusmão, que desenvolveu um balão de ar quente e demonstrou, em 1709, à toda Corte Portuguesa. Contudo, o primeiro voo aéreo fotografado da história é datado de 1888, na França. O voo foi realizado por Arthur Batat, por

meio de uma câmera fotográfica embarcada em uma pipa (MEDEIROS, 2007).

Sobre a atividade de rádio controle da aeronave, o primeiro VANT foi desenvolvido em 1935, por Reginald Denny. Em 2002, o “Predator” tornou-se conhecido e ficou sendo conhecido como o VANT norte-americano, sendo utilizado para fins militares e uma de suas primeiras aplicações foi durante a guerra do Afeganistão. Já no Brasil, a utilização dos VANTs é mais recente e teve seu início na década de 1980, quando o Centro Técnico Aeroespacial (CTA) desenvolveu o projeto Acauã (MEDEIROS, 2007).

A aplicação dos VANTs tem trazido para o meio tecnológico uma gama muito grande de possibilidades e estudos, desde o monitoramento de ambientes, animais, dimensionamento e estudo de crescimento populacional em apoio ao desenvolvimento de planos diretores que norteiam o crescimento das cidades, até o controle de ilhas de calor existentes nas cidades. As aplicações dos VANTs com câmeras termais acopladas podem auxiliar os gestores na melhor identificação dessas áreas e, conseqüentemente, auxiliarem em intervenções que diminuam a sensação térmica percebida pelos habitantes próximos a esses locais (MONTEIRO e COELHO, 2015).

Recentes avanços em VANTs para uso civil permitem monitorar ambientes regularmente desde o ponto de vista termofísico, em escalas espaciais e temporais, que seriam difíceis de alcançar usando métodos convencionais. O registro de imagens térmicas e visuais consiste em diferentes métodos para melhorar a qualidade do registro interespectral para fins de monitoramento em tempo real e mapeamento móvel. As imagens capturadas por VANTs de baixa altitude representam um cenário muito desafiador para registro interespectral devido às fortes variações de sobreposição, escala, rotação, ponto de vista e estrutura de tais cenas (YAHYANEJAD e RINNER, 2015).

Burud, Thiis e Gaitani (2017), analisaram as propriedades do material e seu comportamento térmico usando imagens multiespectrais com sensores VIS/NIR (*visible infrared/near infrared*) e IR (*infrared*) embarcados em VANT em uma pesquisa em Atenas. As imagens foram combinadas para formar mapas de distribuição de temperatura de superfície e de propriedades de materiais.

Mapas de albedo estimado e de inércia térmica foram derivadas das imagens VIS/NIR e das imagens de temperatura. Combinando a mapas de temperatura superficial com mapas de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), albedo e inércia térmica aparente foi possível identificar características de refletância de uma variedade de materiais utilizados no ambiente urbano e relacioná-los com suas propriedades térmicas. A técnica multissensorial aplicada

demonstra como novos avanços em sensores e o desenvolvimento combinado com análise avançada de dados fornece ferramentas novas e exclusivas para estudos climáticos urbanos.

Em um estudo para visualizar o campo de temperatura e localizar linhas de aquecimento subterrâneas na Polônia, Piwowarski et al (2017) utilizaram um VANT multicopter Iris + equipada com uma câmera de imagem térmica FlirONE. A ferramenta permitiu a determinação rápida e precisa do curso da tubulação e a indicação de um possíveis vazamentos em caso de falha. O método utilizado também permitiu a visualização e determinação do tamanho de a perda de calor nas seções individuais da rede de aquecimento. A geração de imagens provou ser eficaz na localização da tubulação pré-isolada com perdas de calor reduzidas. Segundo os autores, o baixo custo de montagem da plataforma e baixo custo de manutenção permite medições frequentes. Ao comparar os dados coletados em momento em que o desgaste da tubulação pode ser detectado com antecedência e planeje sua troca antecipada ou estabeleça o cronograma de manutenção para a rede.

Na última década, veículos aéreos não tripulados (VANTs) também vêm sendo aplicados para mapear uma variedade de características geológicas (McGONIGLE et al., 2008; PISCIOTTA et al., 2016; WILKINSON, 2017). Dentre as várias aplicações se inclui o mapeamento espacial de vulcões (JORDAN, 2015; BLACKETT, 2017). Uma vantagem significativa do uso de VANTs é que eles permitem que dados de alta resolução sejam coletados de uma distância relativamente segura das áreas de risco (BLACKETT, 2017; 2017; WILKINSON, 2017).

Equipamentos de monitoramento de vulcões tradicionais são caros e não estão disponíveis para muitas comunidades locais. Wakeford et al (2019) propuseram um novo método de baixo custo para resolver esses problemas usando um fluxo de trabalho de modelagem termofotogramétrica 3D exclusivo. A aquisição e processamento de dados parte deste fluxo de trabalho foi testado em Stromboli, um vulcão nas Ilhas Eólias da Itália. Veículos aéreos não tripulados (VANTs) foram utilizados no vulcão para adquirir imagens termais e RGB. O resultado é um fluxo de trabalho fácil de usar aplicável a qualquer vulcão. Este sistema de monitoramento de baixo custo poderia ser implantado em países em desenvolvimento e áreas remotas, de outra forma prejudicadas por orçamentos limitados e acesso deficiente.

O uso dos VANTs na área de segurança e defesa militar tem sido bastante desenvolvido. Krause, Salahat e Franklin (2018) investigaram o uso da variação de massa térmica de material explosivo para detecção de minas terrestres. No estudo foi utilizado uma câmera termográfica FlirONE Pro acoplada a um VANT ao longo de um ciclo diurno e, em

seguida, analisado visualmente para identificar a localização de uma mina terrestre enterrada. Uma série de imagens térmicas de minas terrestres revelou formas claras, com diferenças de calor  $>2^{\circ}$  Kelvin com o seu entorno. Isso indica que as imagens termais do VANT podem ser usadas para detecção de minas terrestres. Essas técnicas e métodos apresentados podem ser facilmente replicado, resultando na identificação, remoção de minas terrestres na maioria dos ambientes, salvando vidas e reduzindo baixas.

Rodríguez, Melgar e Márquez (2022) apresentaram um novo método para avaliar a medição da transferência de calor radiante em um espaço urbano pedestre usando termografia aérea a partir de um VANT. Com as imagens infravermelhas coletadas em três diferentes horários (11h00, 15h00 e 19h00), foi estimada a temperatura média radiante (TMR) em vários pontos em uma área de pedestres de uma cidade subtropical (Huelva, Espanha) durante um dia típico de verão, juntamente com uma simulação urbana de microclima realizada usando o programa ENVI-met v5. A análise comparativa do conjunto de dados medido e simulado verificou a aplicabilidade da termografia aérea para a medição da transferência de calor radiante (com valores de R2 de 0,98 para o conjunto de dados e 0,8 para os dados de cada período de tempo).

Em um estudo sobre ilhas de calor urbanas na cidade de São Carlos, Arruda, Masiero e Perussi (2022) procuraram correlacionar a formação de ICU na camada do dossel urbano, à temperatura de superfície registrada para três recortes representativos da zona industrial da cidade de São Carlos. As temperaturas do ar e da superfície para as áreas estudadas foram obtidas através de imagens térmicas, por uma câmera térmica portátil ligada a um VANT, e através de simulações, utilizando o software ENVI-met. No estudo foi possível estabelecer uma correlação entre  $T_{ar}$  e  $T_s$  nesta zona, com base em dados simulados e medidos, previamente apresentados para centros urbanos e periferias. Os autores concluem que a correlação é um avanço no estudo da formação de ICU em áreas industriais, porque: fornece uma equação que correlaciona os dois parâmetros ( $T_{ar}$  e  $T_s$ ); utiliza equipamento acessível (câmara termográfica portátil) e software de simulação de microclima (ENVI-met); e também contribui para a compreensão dos fenômenos físicos de troca de calor entre superfície e atmosfera.

## 4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

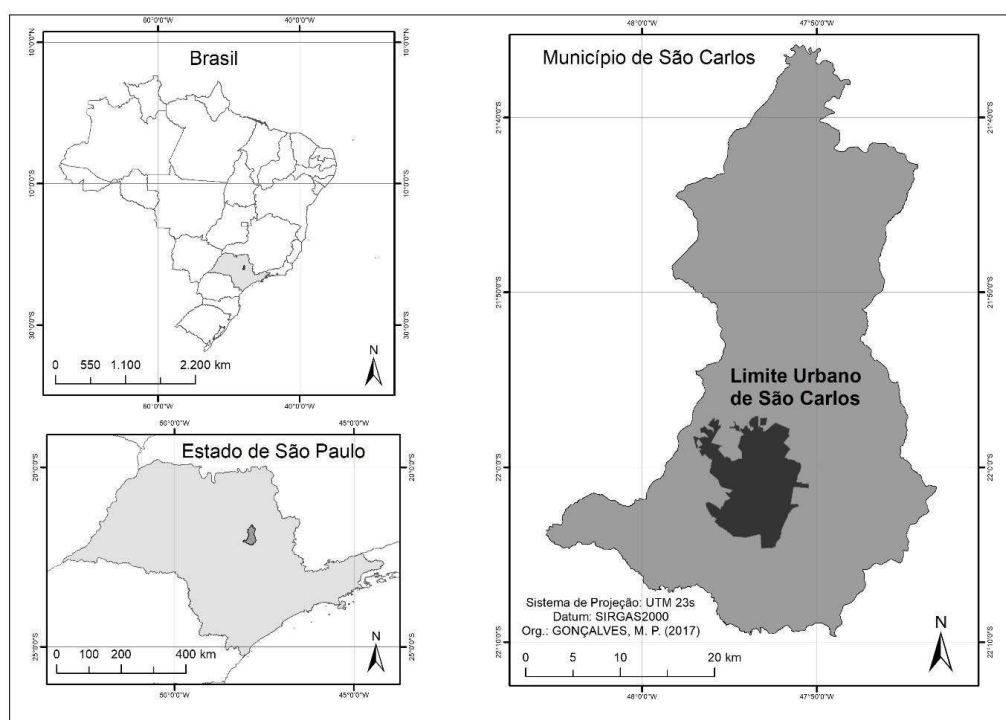
### 4.1. Delineamento experimental

O experimento foi constituído por sobrevoos com VANT, denominados “missões”, permitindo registrar a evolução temporal dos parâmetros necessários ao estudo do comportamento térmico superficial horizontal de determinadas tipologias de cobertura do solo e de edificações no espaço urbano, juntamente com um termohigrômetro para o registro das condições atmosféricas local.

As análises do comportamento térmico das superfícies foram realizadas a partir da identificação das massas de ar atuantes possibilitando a determinação do episódio representativo do fato climático e suas repercussões tanto sobre os valores das temperaturas superficiais quanto nos valores atmosféricos locais registrados.

### 4.2. Caracterização da área de estudo

O experimento foi conduzido no município de São Carlos, localizado na região centro-leste do Estado de São Paulo, entre as coordenadas 21°30' / 22°30' S e 47°30' / 48°30' O, com altitude média de 856 metros (Figura 1).

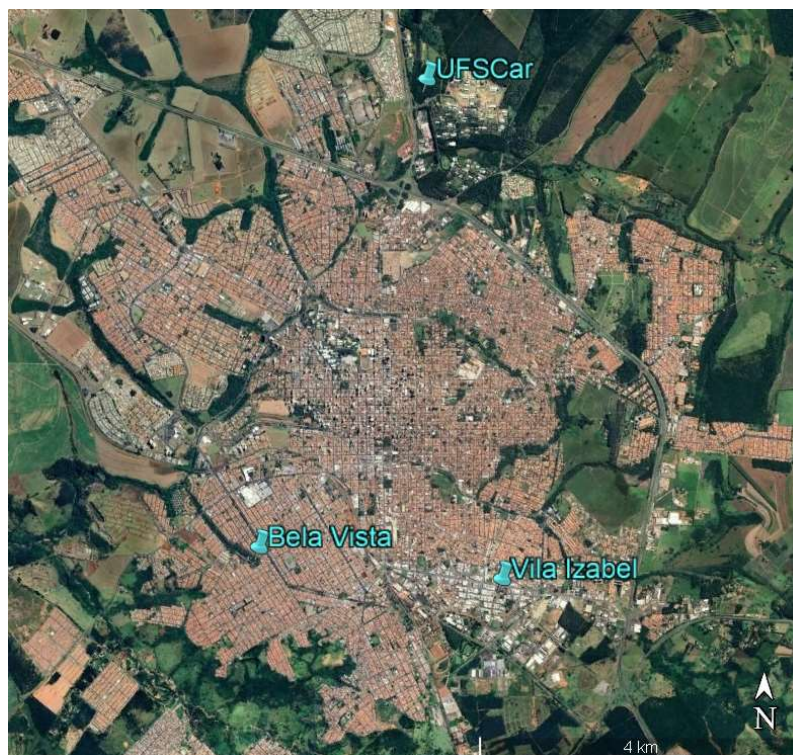


**Figura 1:** Localização espacial do município de São Carlos (GONÇALVES, 2018).

O município de São Carlos possui área total de 1.136,907 km<sup>2</sup>, com uma área urbana de 79,87 km<sup>2</sup> e população total de 238.950 habitantes, fazendo limite com os municípios de Ibaté, Itirapina, Rincão, Santa Lúcia, Analândia, Luís Antônio, Araraquara, Descalvado, Brotas, Américo Brasiliense e Ribeirão Bonito (SÃO CARLOS, 2022).

O clima da região é quente com inverno seco do tipo Cwa, de acordo com a classificação clássica de Köppen-Geiger (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007). Sob a ótica dinâmica do clima, a região se caracteriza pela passagem de frentes frias ao longo de todo o ano. Segundo Monteiro (1973), a região de São Carlos possui clima controlado por massas equatoriais e tropicais, caracterizando-se por climas tropicais alternadamente secos e úmidos. No período seco, entre os meses de abril e setembro, a frequência de chuva diminui consideravelmente e se constitui na área de inverno nitidamente mais seco do Estado de São Paulo, predominando sobre a região as massas de ar Tropical Continental (mTc), Tropical Atlântica (mTa) e Polar Atlântica (mPa), apresentando baixa precipitação, pouca nebulosidade, baixa umidade relativa e temperaturas médias menores que as dos períodos chuvosos. A estação chuvosa ocorre nos meses de outubro a março, devido às incursões da massa Equatorial Continental (mEc) e ao dinamismo da Frente Polar Atlântica sobre a Tropical Atlântica, que responde, em grande parte, pela gênese das chuvas que se produzem durante a atuação de sistemas frontais nesse período do ano (MONTEIRO, 1973; BARBOSA, 2009). Os baixos totais pluviométricos no período seco estão associados à atuação do ASAS (Alta Subtropical do Atlântico Sul), pois nessa estação tal sistema alcança sua posição mais a oeste do continente se estendendo até a região sudeste do Brasil. Eventos de chuva ocorrem quando os sistemas frontais e ciclones subtropicais e extratropicais conseguem se sobrepor ao ASAS (REBOITA, 2010). No verão, a persistente precipitação nas regiões Sudeste, sul do Nordeste, norte do Paraná e Brasil central está relacionada à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), um fenômeno típico nesse período na América do Sul e se caracteriza por uma faixa de nebulosidade convectiva que, quando se configura, estende-se desde o Sul da Amazônia em direção ao Sudeste até o Oceano Atlântico Subtropical (QUADRO, 1994).

As missões para a obtenção das termografias foram conduzidas em quatro setores do município onde estão localizados os bairros Bela Vista, Vila Izabel e região da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), conforme indicado na **Figura 2**.



**Figura 2:** Localização dos bairros selecionados para o estudo. Fonte: O autor, adaptado de Google Earth.

O bairro Bela Vista se localiza na região sudoeste da cidade. Se caracteriza por ser predominantemente residencial, possui quarteirões quadrados e retangulares com alta densidade de construções de médio padrão, com coberturas predominantemente de telhado cerâmico, todas as ruas asfaltadas e arborização viária rara ou ausente, conforme a **Figura 3**.



**Figura 3:** Imagem das vias e das edificações do bairro Bela Vista. Fonte: O autor.

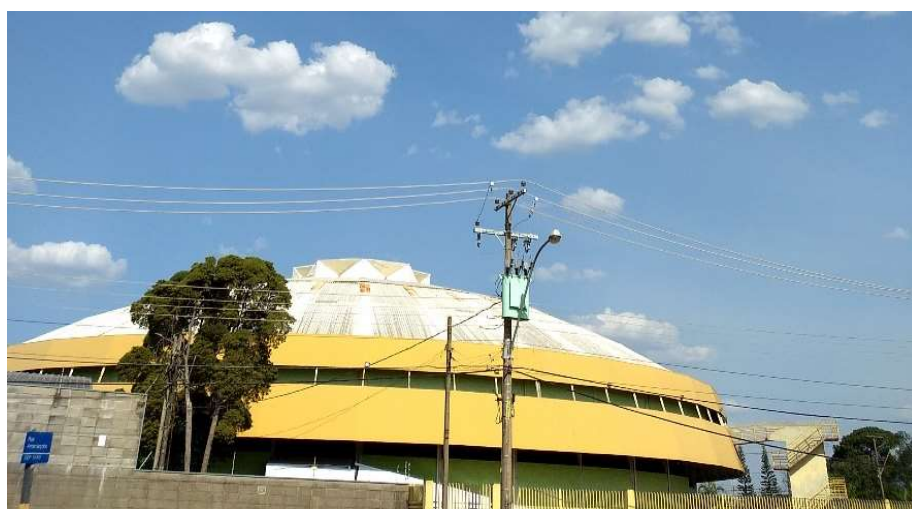


O bairro possui um parque na sua área mais baixa, o Centro de Esportes e Lazer Veraldo Sbampato, conhecido como Parque do Bicão. O parque possui arborização densa, de grande, médio e pequeno portes, gramado, quadras de esportes, uma área de circulação coberta, calçamento de pedras e um lago, conforme mostrado na **Figura 4**.



**Figura 4:** Imagem do Parque do Bicão. Fonte: O autor.

O bairro Vila Izabel se localiza na região sudeste da cidade, é predominantemente industrial, ocupado por galpões de empresas de pequeno e médio portes, poucas residências e alguns terrenos vazios. Nas coberturas dessas edificações são utilizados, na grande maioria, telhas de fibrocimento e galvanizadas. A maioria das ruas são asfaltadas e arborização das vias são raras ou ausentes. No bairro está localizado o ginásio esportivo Milton Olaio Filho. Uma avenida arterial de pista dupla atravessa o bairro, sendo uma das principais vias de ligação com a rodovia Washington Luiz. A **Figura 5** mostra uma via local do bairro e o ginásio.



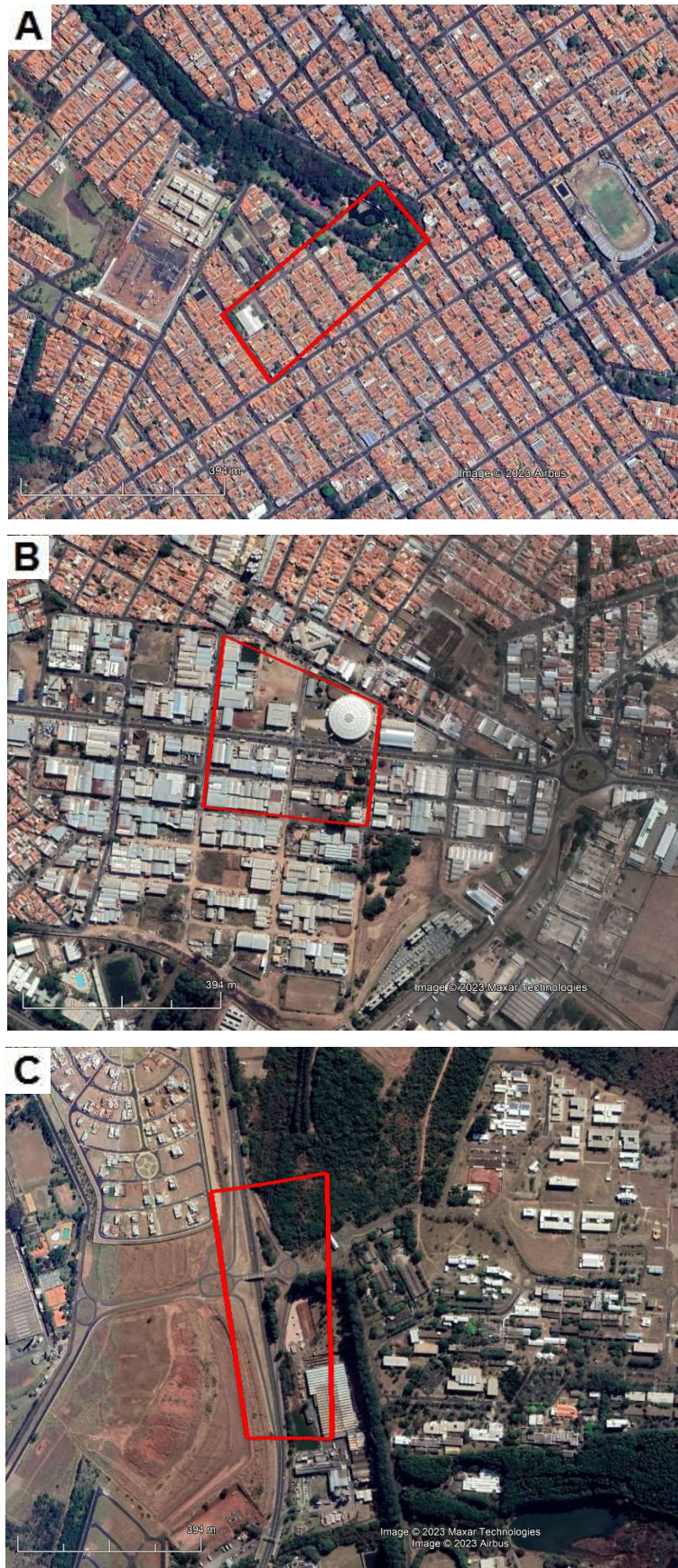
**Figura 5:** Imagens de uma via da Vila Izabel e do ginásio Milton Olaio Filho. Fonte: O autor.

A UFSCar está localizada na região norte da cidade, em uma área periurbana que é atravessada pela rodovia Thales de Lorena Peixoto. A região possui uma grande área com mata de cerrado, plantações de eucalipto, uma fábrica ao lado da universidade e condomínios residenciais com casas de médio e alto padrões, além de loteamentos ainda vazios. A **Figura 6** mostra a entrada norte da UFSCar e uma parte da área com vegetação de cerrado pertencente à Universidade que margeia a rodovia.



**Figura 6:** Imagens da entrada norte da UFSCar e da vegetação de cerrado. Fonte: O autor.

As missões se concentraram sobre áreas predefinidas dentro dos bairros de modo que fosse possível obter as termografias das diferentes tipologias de cobertura estudada e que também seguissem alguns critérios para a execução dos voos, como: manter a altura máxima do VANT de acordo com o padrão permitido pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) em ambiente urbano que é de 120 metros do solo, ausência de obstáculos nos trajetos, como torres de alta tensão e de antenas e, também, que permitisse ao piloto acompanhar o VANT a olho nu durante todo o voo. As **Figuras 7A, 7B e 7C** mostram os trajetos dos voos em cada bairro.



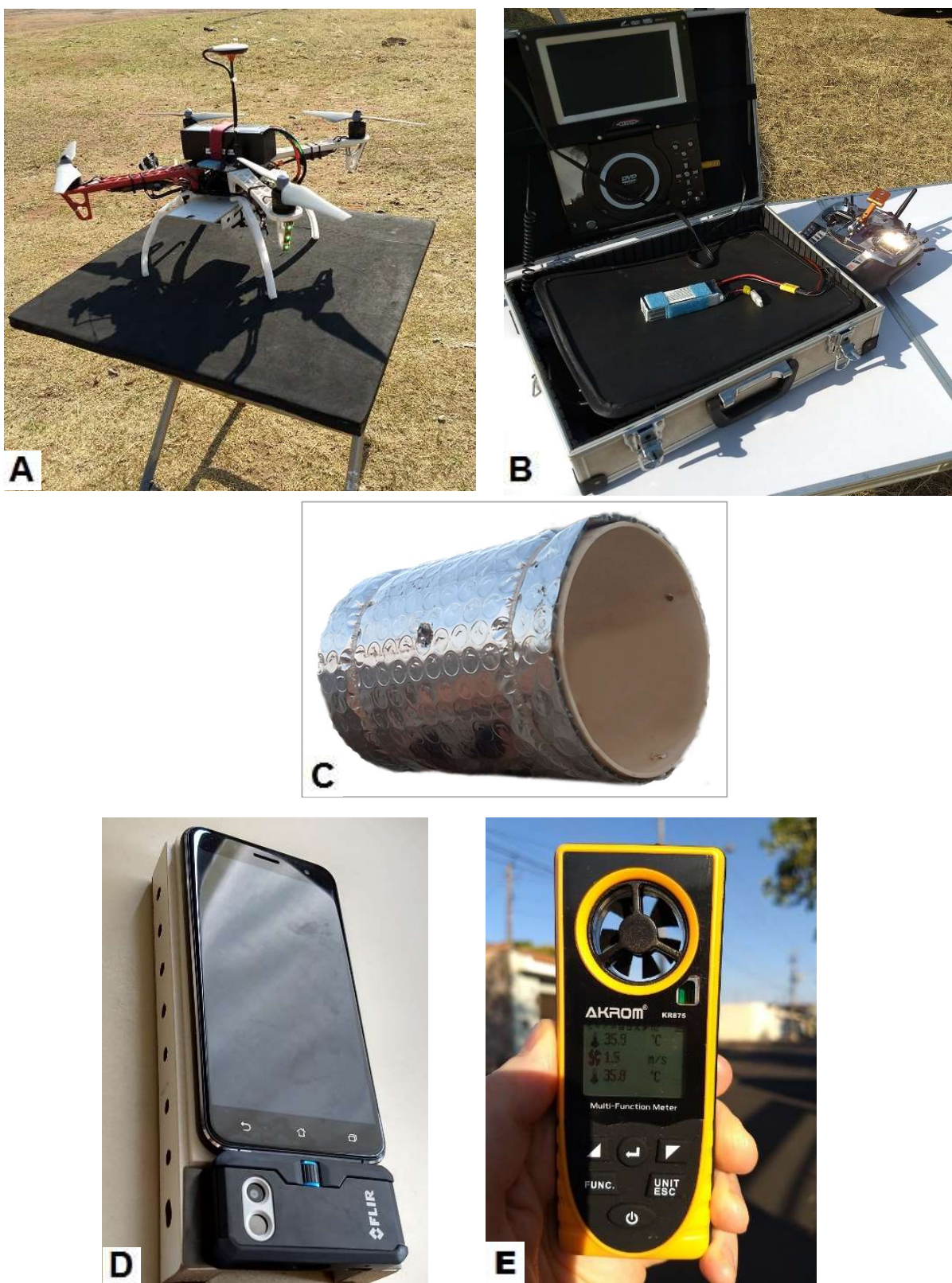
**Figura 7:** Imagem aérea com indicação da área dos voos nos bairros (A) Bela Vista, (B) Vila Izabel e (C) UFSCar.  
Fonte: O autor, adaptado de Google Earth.

### 4.3. Instrumentação e aquisição dos dados

Para o desenvolvimento do estudo foi utilizado um VANT quadrotor DJI F450, no qual foi embarcado uma câmera térmica Flir One, que trabalha conectada a um *smartphone*. A câmera capta imagens com resolução de 640x480 pixels em RGB e imagens infravermelhas termais, onde cada pixel da imagem fornece um valor de temperatura. A câmera pode registrar temperaturas dentro de uma margem de -20 a 120°C, com acurácia de  $\pm 3^\circ\text{C}$ .

O equipamento foi embarcado no VANT com o uso de um suporte projetado para ser afixado e retirado com facilidade, que não afetasse a sua estabilidade durante o voo e tivesse um peso compatível para não sobrecarregá-lo, de modo a maximizar o aproveitamento da sua bateria durante as missões. O conjunto câmera, *smartphone* e suporte possui um peso de 310 g.

Para se obter os dados atmosféricos locais foi utilizado um medidor digital portátil com datalogger Akrom KR875, com certificação de calibragem do fabricante, que possui termohigrômetro, barômetro, anemômetro, altímetro e luxímetro. O equipamento foi mantido em um abrigo feito com tubo de PVC recoberto por um *foil* aluminizado funcionando como proteção da radiação solar direta e como quebra-vento enquanto o ar podia fluir através do abrigo. As **Figuras 8A, 8B, 8C, 8D e 8E** mostram os equipamentos utilizados para a aquisição dos dados.



**Figura 8:** (A) VANT DJI F450; (B) radiocontrolador e monitor para guiar os voos noturnos; (C) abrigo para termohigrômetro; (D) câmera térmica acoplada ao smartphone e (E) termohigrômetro digital portátil. Fonte: O autor.

O experimento foi conduzido no início da primavera de 2020, nos dias 26, 27 e 28 de setembro, e foi constituído por três missões diárias, sempre às 10h00, às 16h00 e às 22h00 em cada dia. Cada missão teve duração total aproximada de 10 minutos, contados da decolagem até o retorno do VANT à base.

As imagens consideradas para este estudo foram somente aquelas obtidas quando o VANT havia atingido a altura máxima do voo, possibilitando a obtenção das termografias das superfícies como: via de asfalto, calçada de cimento, calçada de pedras, cobertura vegetal (gramado e árvores), corpos d'água e cobertura de edificações (telhado cerâmico e telhado de fibrocimento), permitindo a análise da variação das temperaturas de cada tipologia de superfície nos diferentes horários.

O termohigrômetro era mantido a uma altura de 2 metros durante todo o tempo em cada missão para se obter valores de temperatura e umidade locais instantâneos. Os dados eram obtidos retirando-se o equipamento do abrigo para poder se registrar os valores mostrados no visor e em seguida era acoplado ao abrigo novamente.

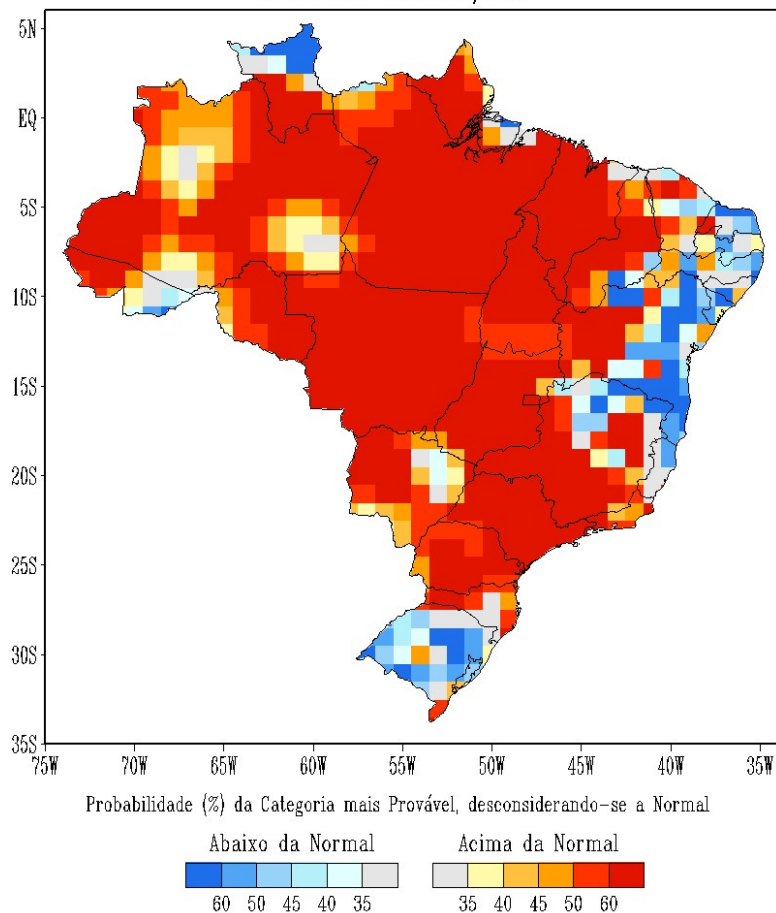
Como referência, também foram utilizados os dados da estação meteorológica automática do INMET em São Carlos, localizado na UFSCar.

A câmera térmica é controlada por meio de aplicativos da própria fabricante que são instalados diretamente no *smartphone* no qual ela é conectada. Porém, como esses aplicativos são restritos em relação a alguns ajustes, como o temporizador e a padronização dos nomes dos arquivos salvos. Como a câmera possui sistema controlador interno de código aberto em linguagem *Python*, foi possível desenvolver um aplicativo próprio instalado no *smartphone* e fazer ajustes do temporizador para se obter fotos a cada 10 segundos e organizar os arquivos nas pastas mais livremente.

#### **4.4. Análise do episódio climático**

De acordo com os prognósticos do clima para a região de São Carlos divulgados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), havia, para o mês de setembro de 2020, uma alta previsão probabilística de se apresentar anomalias térmicas positivas com valores acima das Normais Climatológicas 1991–2020, também computadas pelo INMET e utilizadas como referência no estudo (Figura 9).

PREVISÃO PROBABILÍSTICA EM TERCIS - TEMPERATURA  
ATUALIZACAO - AGOSTO/2020  
VALIDO PARA SETEMBRO/2020



**Figura 9:** Probabilidade de anomalias térmicas em relação às normais climatológicas para o mês de setembro de 2020. Fonte: (INMET, 2020).

Assim, o regime climático local foi analisado na forma de episódios representativos dos Tipos de Tempo de Monteiro (1969), em que são considerados os dados meteorológicos tomados em superfície junto às propriedades das massas de ar que atuam sobre um determinado local, permitindo que seja determinada a fase mais apropriada à realização de experimentos diante da necessidade de uma análise climática voltada ao estudo do comportamento térmico superficial de diferentes tipologias de coberturas no ambiente urbano e, no caso do presente trabalho, da sua reação frente ao calor.

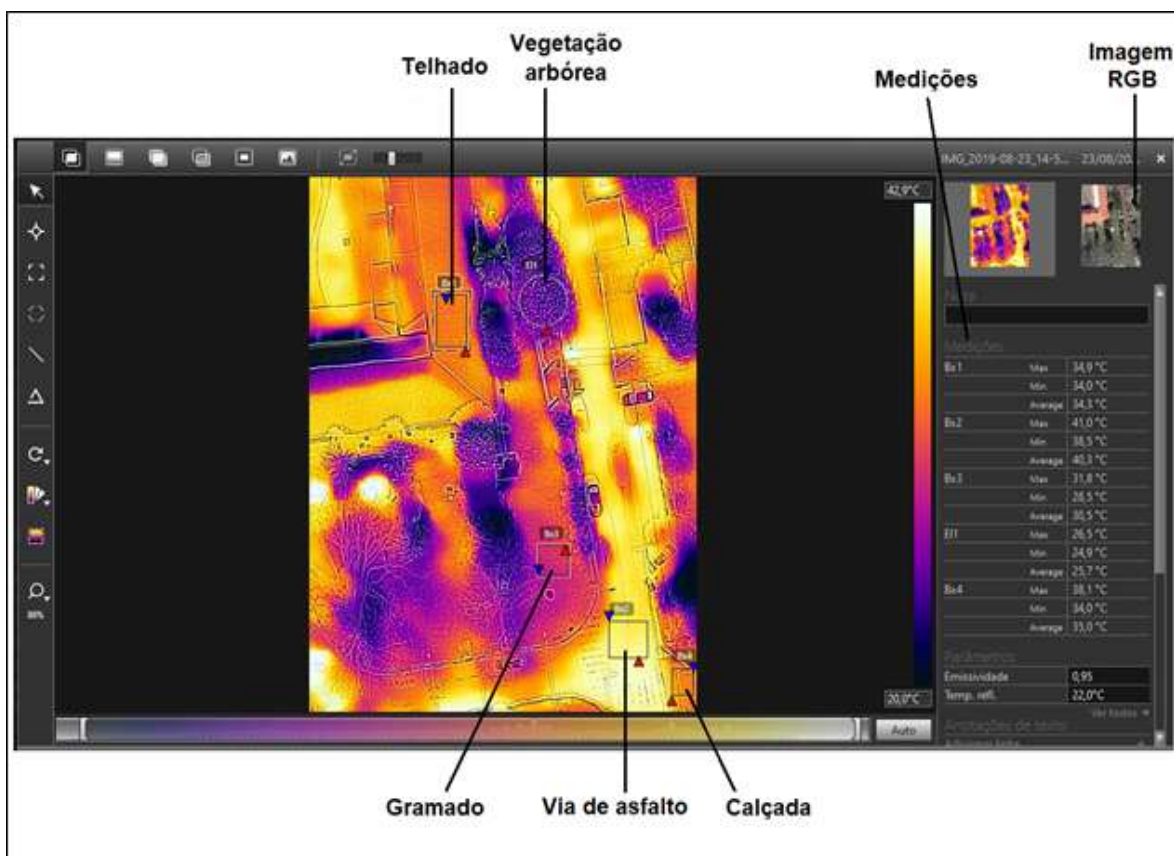
Para essa investigação da variação do clima em episódios, a análise rítmica se torna apropriada, tanto por suas possibilidades de representação das variações cronológicas dos elementos atmosféricos num dado espaço (ou lugar) como pelo fato de que apenas a partir da escala diária é possível associar a variação dos elementos do clima com os tipos de tempo que se sucedem (MONTEIRO, 1973 apud ALVES, 2016).



Também foram utilizadas as análises do boletim técnico fornecido pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais CPTEC (INPE, 2020).

#### 4.5. Análise dos valores de temperatura

As termografias foram analisadas com o programa *Flir Tools* (Figura 11), que permite verificar os valores de temperatura de cada pixel da imagem e calcular a média das temperaturas de uma área desejada na cena, possibilitando a análise da variação desses valores no período estudado.



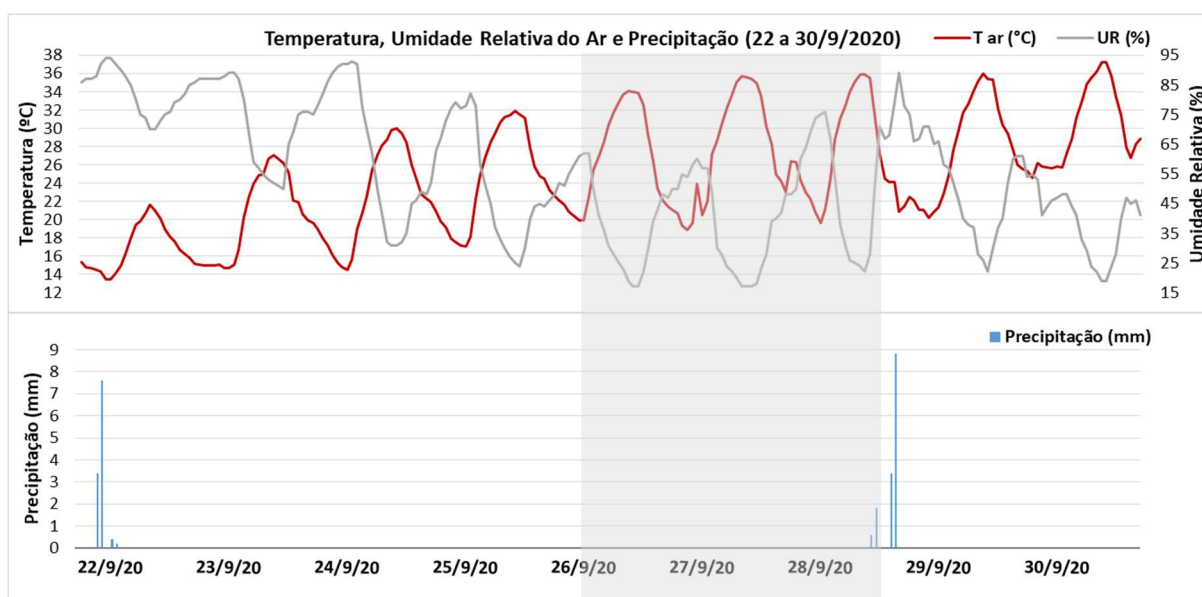
**Figura 10:** Imagem do programa *Flir Tools*, utilizado para analisar as termografias, mostrando no exemplo as temperaturas de algumas tipologias de coberturas. Fonte: O autor.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

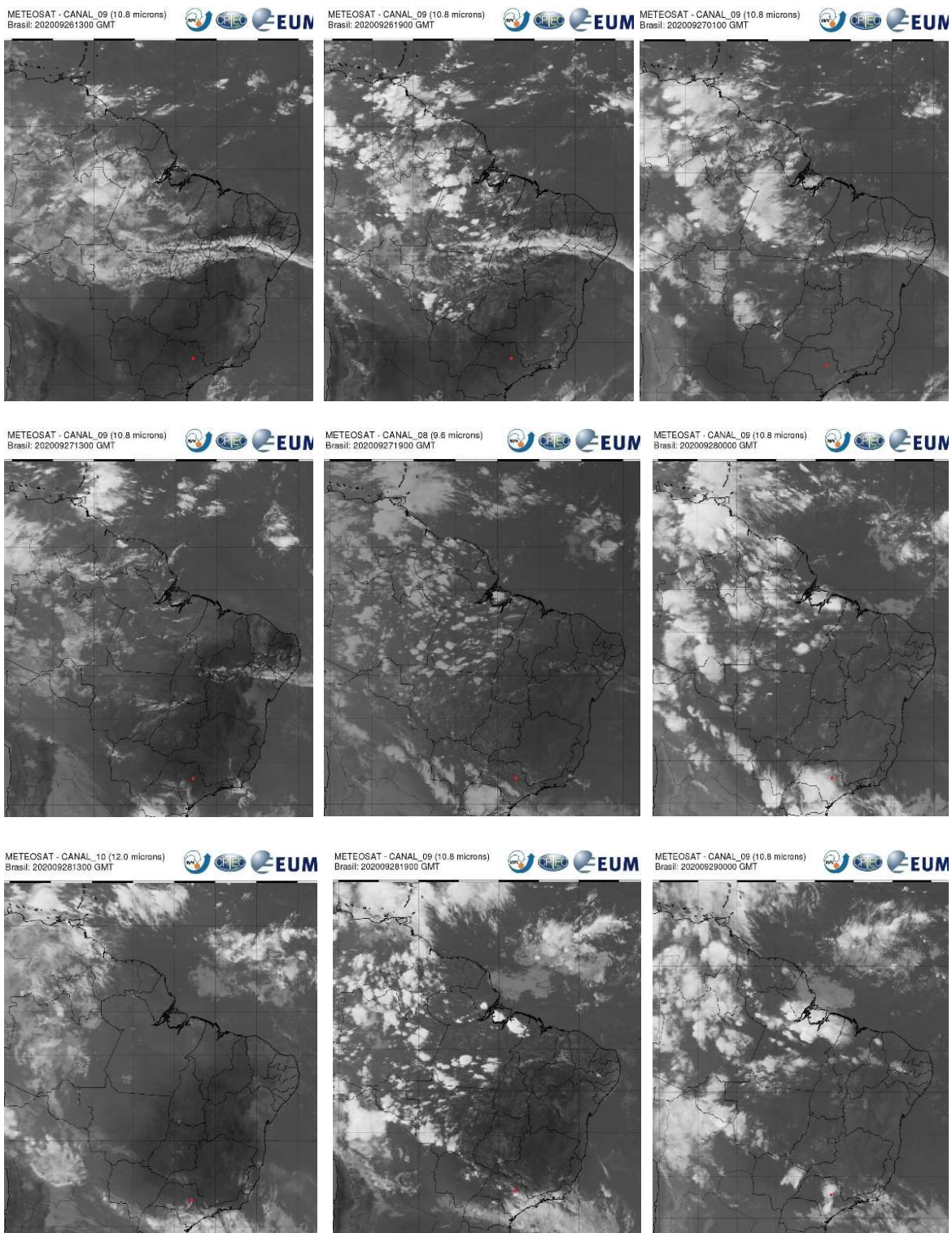
### 5.1. Análise dos tipos de tempo no período estudado

Conforme descrito na Metodologia, o episódio climático representativo selecionado para execução dos experimentos e a análise das temperaturas superficiais foram dias em que a região esteve sob o domínio de uma massa de ar de característica quente e seca e de onde foram extraídos os dias típicos experimentais.

Para a identificação das massas atuantes, foram avaliados os dados de temperatura atmosférica, umidade relativa e precipitação do período por meio de gráficos (Figura 11), com confirmação pelas imagens do satélite METEOSAT-09, entre os dias 26 e 28 de setembro de 2020, às 10h00, 16h00 e 22h00 (Figura 12).



**Figura 11:** Análise rítmica do período de 22 a 30/9/2020 com as variáveis climáticas de temperatura atmosférica, umidade relativa e precipitação, com destaque para os dias experimentais selecionados. Fonte: O autor.



**Figura 12:** Mosaico das imagens do satélite entre os dias 26 e 28/9/2020 às 10h00, 16h00 e 22h00 de cada dia, com destaque para localização de São Carlos. Fonte: O autor.

De acordo com o boletim, sobre as regiões centro oeste, sudeste e grande parte da região sul, prevaleceu a condição de déficit de precipitação em associação a atuação de um sistema de alta pressão. As temperaturas máximas no mês de setembro de 2020 apresentaram-se acima da

média sobre essas regiões que estando sob influência do sistema de alta pressão caracterizaram se pela manifestação de uma forte onda de calor.

## 5.2. Análise dos dados meteorológicos

Os dados obtidos pelo termohigrômetro em cada setor urbano foi registrado na **Tabela 1**, que mostra os valores de temperatura máxima e da umidade relativa do ar, a velocidade do vento nos horários que foram executadas as missões e também a altitude dos setores urbanos estudados.

**Tabela 1:** Valores de temperatura máxima, umidade relativa do ar, velocidade do vento registrados nos respectivos horários das missões e a altitude dos setores urbanos.

	Data	Hora	T ar (°C)	UR (%)	Vento (m/s)	Altitude (m)
Parque do Bicão	26/09/2021	10:00	32,5	28	0	812
		16:00	34,0	29	0	
		22:00	30,0	46	0	
Bela Vista	26/09/2021	10:00	35,5	25	2,5	830
		16:00	36,0	23	1,5	
		22:00	26,5	40	0	
Vila Izabel	27/09/2021	10:00	36,5	22	2,5	868
		16:00	38,0	20	1,5	
		22:00	29,0	35	0	
UFSCar	28/09/2021	10:00	34,5	32	1	842
		16:00	33,0	35	3,5	
		22:00	28,0	53	0	

Os dados de temperatura máxima e umidade relativa do ar nos horários das missões da estação do INMET estão na **Tabela 2**.

**Tabela 2:** Valores de temperatura máxima da estação automática do INMET.

Data	Hora	T ar (°C)	UR (%)
26/09/2021	10:00	28,5	36
	16:00	34	17
	22:00	22,1	48
27/09/2021	10:00	30,4	28
	16:00	35,4	17
	22:00	24,2	42
28/09/2021	10:00	31,0	38
	16:00	35,5	28
	22:00	20,9	89

De acordo com os dados obtidos pela estação do INMET, os dias selecionados para os experimentos do estudo podem ser considerados dias típicos de calor ao se tomar como referência a temperatura máxima mensal para o mês de agosto que consta das Normais Climatológicas 1991-2020, que é de 28,2°C.

No último dia em que foram conduzidos os experimentos foram registradas alterações atmosféricas registradas tanto pelo termohigômetro portátil quanto pela estação de referência, que precederam um evento de precipitação no período noturno, como o aumento da velocidade do vento e da umidade, confirmadas também pela imagem do satélite que registrou a presença de nebulosidade.

### **5.3. Análise das termografias**


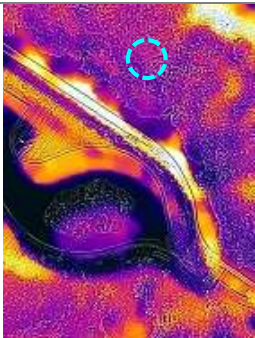

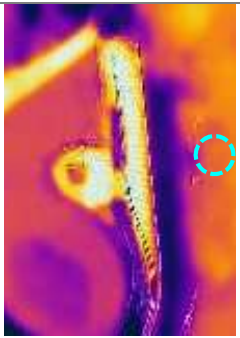

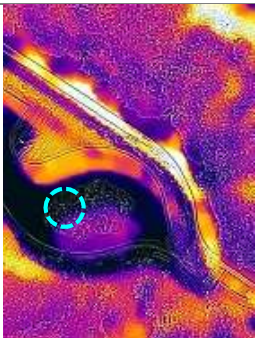
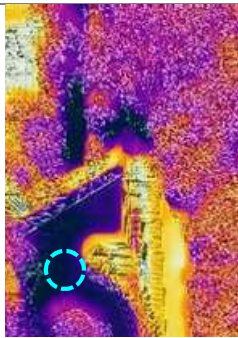
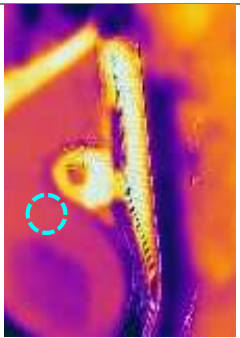

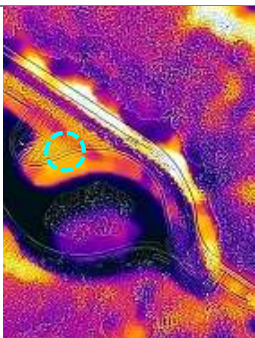
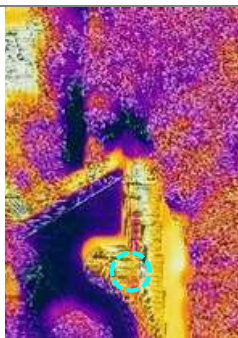
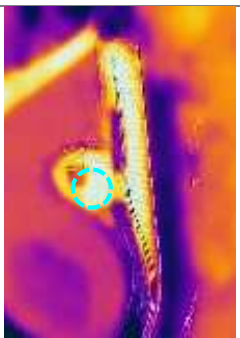

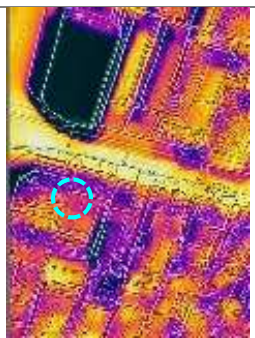
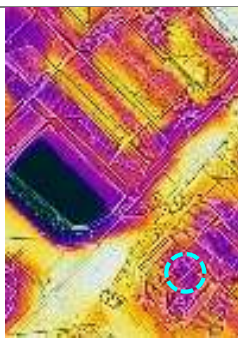
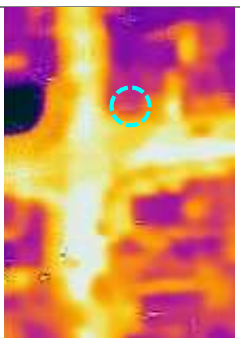
Para a análise das termografias foram selecionadas as imagens obtidas do VANT em altitude estabilizada, permitindo a menor variação possível da distância entre a câmera e as superfícies. As tipologias de superfícies analisadas foram separadas em dois grupos: cobertura do solo (via de asfalto, calçada, gramado, árvores e corpos d'água), e cobertura das edificações (telhado cerâmico e telhado de fibrocimento).

Em cada tipologia foi selecionada uma área amostral de igual dimensão nos três diferentes horários em cada setor e que não tivesse sido sombreada durante o dia. Em seguida, analisou-se a temperatura média de cada área amostral e sua amplitude térmica (diferença entre a maior e a menor temperatura entre as três missões).

#### **5.3.1. Bairro Bela Vista**

No bairro Bela Vista, foram selecionadas para o estudo as tipologias de cobertura presentes no Parque do Bicão e também na área residencial do bairro. No parque, as tipologias selecionadas foram: cobertura arbórea, corpo d'água e calçada de pedras. Na área residencial foi selecionado o telhado cerâmico. A **Tabela 3** mostra as termografias das tipologias analisadas nas missões executadas no bairro Bela Vista no dia 26/9/2020, as temperaturas médias e a amplitude térmica das áreas amostrais.

**Tabela 3:** Imagem RGB e termografias das tipologias analisadas em cada missão no bairro Bela Vista no dia 26/9/2020, indicando as áreas amostrais e suas respectivas temperaturas médias em cada missão e a amplitude térmica.

Termografias e temperaturas médias das áreas amostrais (°C)				
Imagem RGB	Missão 1	Missão 2	Missão 3	$\Delta T$
 <p>Cobertura arbórea (Parque do Bicão)</p>	 <p>31,5</p>	 <p>34,0</p>	 <p>28,5</p>	5,5
 <p>Corpo d'água (Parque do Bicão)</p>	 <p>26,2</p>	 <p>28,3</p>	 <p>28,1</p>	2,1
 <p>Calçada de pedras (Parque do Bicão)</p>	 <p>42,4</p>	 <p>43,8</p>	 <p>32,0</p>	11,8
 <p>Telhado cerâmico (Residência)</p>	 <p>34,5</p>	 <p>43,0</p>	 <p>28,0</p>	15,0

Dentre as tipologias de coberturas do solo analisadas no primeiro dia do experimento, a calçada de pedras foi a que apresentou maiores valores de temperaturas, e também apresentou uma amplitude térmica de 11,8°C ao final das três missões, a maior amplitude entre as coberturas do solo. A cobertura arbórea apresentou valores de temperatura superficial intermediários em comparação com as outras duas tipologias de cobertura do solo e uma amplitude térmica de 5,5°C. O corpo d'água foi a tipologia de cobertura do solo que apresentou os menores valores de temperatura e também a menor amplitude térmica: 2,1°C.


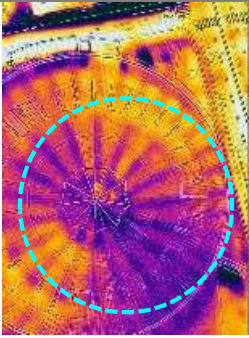
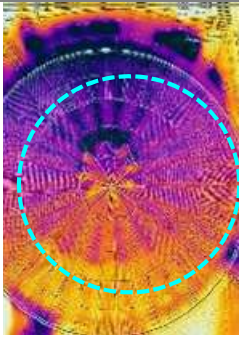
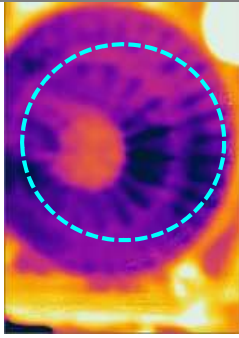

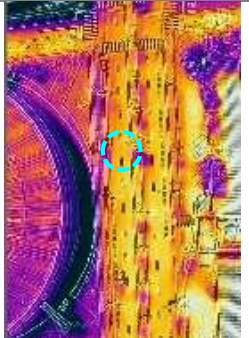

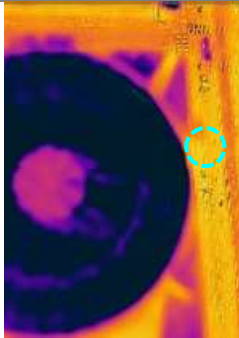
As três tipologias de cobertura do solo apresentaram elevação dos valores de temperatura entre a missão 1 e a missão 2 e redução dos valores entre a missão 2 e a missão 3, embora o corpo d'água do parque tenha apresentado uma variação menor em comparação àquelas apresentadas pelas outras tipologias.

A cobertura de telhado cerâmico também apresentou uma variação positiva nos valores de temperatura entre a missão 1 e a missão 2, de 8,5°C, e um decréscimo na missão 3, apresentando uma amplitude térmica total de 15°C.

### **5.3.2. Bairro Vila Izabel**

No bairro Vila Izabel, as tipologias de cobertura selecionadas foram: telhado de fibrocimento, pertencente ao Ginásio Milton Olaio Filho, e a via de asfalto, na Avenida Getúlio Vargas no dia 27/9/2020. A **Tabela 4** mostra as termografias das tipologias analisadas nas missões executadas no bairro Bela Vista, as temperaturas médias e a amplitude térmica das áreas amostrais.

**Tabela 4:** Imagem RGB e termografias das tipologias analisadas em cada missão no bairro Vila Izabel no dia 27/9/2020, indicando as temperaturas médias das áreas amostrais e a amplitude térmica.

Imagem RGB	Termografias e temperaturas médias das áreas amostrais (°C)			$\Delta T$
	Missão 1	Missão 2	Missão 3	
 elhado de fibrocimento (Ginásio)	 46,8	 38,7	 21,5	25,3
 Via de asfalto (Avenida)	 54,4	 49,3	 29,0	25,4

A cobertura de telhado de fibrocimento do ginásio apresentou uma redução sequencial nos valores de temperatura ao longo das três missões, com uma amplitude térmica total de 25,3°C.


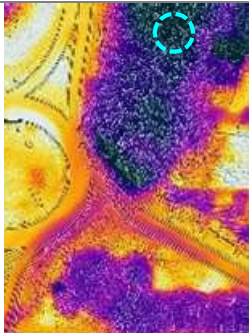
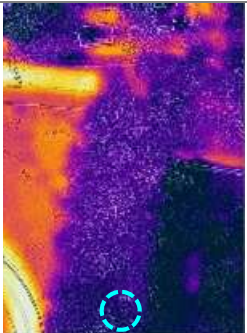
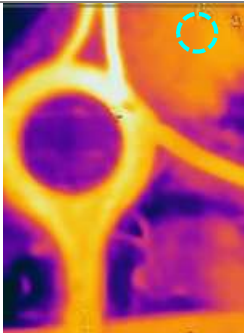

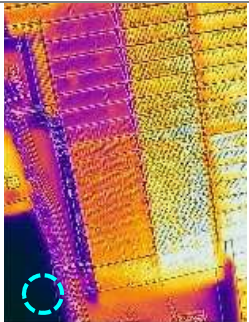
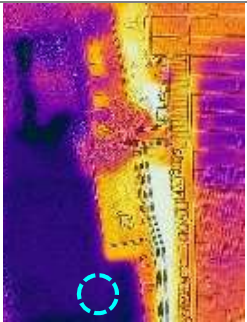
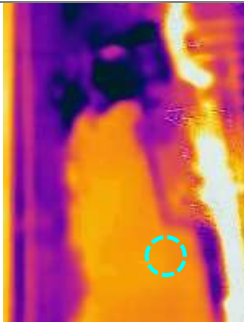
A via de asfalto também apresentou um decréscimo nos valores de temperatura entre as três missões, com uma amplitude térmica de 25,4°C.

### 5.3.3. UFSCar

Na região da UFSCar foram selecionadas duas tipologias de cobertura do solo para o estudo: a cobertura arbórea, localizada na entrada da universidade, e o corpo d'água, pertencente à fábrica vizinha da universidade. A **Tabela 5** mostra as termografias das tipologias analisadas nas missões executadas na região da UFSCar no dia 28/9/2020, as temperaturas médias e a amplitude térmica das áreas amostrais.



**Tabela 5:** Imagem RGB e termografias das tipologias analisadas em cada missão na região da UFSCar no dia 28/9/2020, indicando as temperaturas médias das áreas amostrais e a amplitude térmica.

Termografias e temperaturas médias das áreas amostrais (°C)				
Imagem RGB	Missão 1	Missão 2	Missão 3	$\Delta T$
 <p>Cobertura arbórea (UFSCar)</p>	 <p>31,0</p>	 <p>32,5</p>	 <p>26,5</p>	6,0
 <p>Corpo d'água (Fábrica)</p>	 <p>26,5</p>	 <p>28,2</p>	 <p>26,2</p>	2,0

A cobertura arbórea apresentou uma elevação nos valores de temperatura entre as missões 1 e 2 seguido de um decréscimo nos valores durante a missão 3, com uma amplitude térmica de 6°C. O corpo d'água da fábrica apresentou uma variação pequena entre as 3 missões, com uma amplitude térmica de 2°C.

Analisando os valores obtidos nos três setores estudados, dentre as tipologias de coberturas do solo sem vegetação (asfalto e calçada de pedras), a via de asfalto mostrou-se ser a superfície com a maior capacidade de reter calor durante o dia e liberá-lo no período noturno, permanecendo com temperaturas acima da temperatura do ar durante a noite, mostrando que são materiais com capacidade de continuar aquecendo a atmosfera em contato com essas superfícies mesmo após a radiação solar já ter cessado ao final do dia.

A calçada de pedras, por possuir maior refletância em relação ao asfalto absorve menos calor durante o dia e libera menos calor no período noturno, ainda que também apresente temperaturas superiores à temperatura do ar.

Já a cobertura de vegetação arbórea apresentou os menores valores de temperatura superficial e manteve a menor amplitude térmica total entre as tipologias de cobertura do solo.

Tanto a cobertura arbórea presente no parque dentro da cidade quanto na região da UFSCar apresentaram comportamento térmico semelhante, com diferenças dentro da própria margem de erro da câmera nos valores de temperatura durante as três missões e também na amplitude térmica.

Os resultados relativos à cobertura arbórea de grande porte encontrados nesse estudo mostram que enquanto houver ganho de energia solar, esta é compensada pelo resfriamento da evaporação. Assim, onde há menos vegetação, as construções, ruas e calçadas absorvem a maioria do *input* de energia solar, conforme demonstraram King e Davis (2007), favorecendo a redução da intensidade das ilhas de calor urbanas e melhorando as condições de conforto humano.

Comportamento semelhante ao da cobertura arbórea pôde ser verificado com corpo d'água presente tanto no interior do parque quanto na fábrica próxima da UFSCar, apresentando os menores valores de temperatura entre as coberturas do solo e também as menores amplitudes térmicas. Assim, o corpo d'água mostra-se capaz de resfriar o ar em contato com sua superfície durante o dia, perdendo energia térmica em menor intensidade durante a noite quando comparado com as demais tipologias de cobertura do solo.

Esses resultados estão de acordo com aqueles encontrados por Masiero e Souza (2013), onde mostram que os cursos d'água, pequenos lagos e represas nas áreas urbanas aumentam o resfriamento evaporativo, corroborando com a redução da temperatura do ar e favorecendo a formação de áreas com maior ventilação.

Entre as tipologias de cobertura de edificações (telhado de fibrocimento e telhado cerâmico), a diferença nos valores de temperatura foram significativas. O telhado de fibrocimento do ginásio apresentou decréscimo de temperatura ao longo das três missões e uma maior amplitude térmica em comparação com o telhado cerâmico.

O telhado cerâmico apresentou menores valores de temperatura e menor amplitude térmica em comparação com a telha de fibrocimento. Por serem porosas, as telhas cerâmicas retêm umidade durante a noite e a libera durante o dia por evaporação, o que favorece a redução da amplitude térmica.

Resultados semelhantes foram encontrados por Mello (2009) verificando que as moradias que possuem cobertura de fibrocimento apresentaram valores internos mais altos que os valores externos, o que mostra um maior acúmulo de calor na superfície do material, devido ao seu albedo de 0,34, diferente da cerâmica, que possui albedo de 0,54, tendo assim maior capacidade de reflexão e temperatura interna menor.

A utilização do VANT para o estudo se mostrou uma ferramenta bastante satisfatória na medida em que possibilitou uma rápida obtenção das termografias dos alvos selecionados e no período de tempo programado. A análise dos tipos de tempo foi um fator determinante para identificar a massa de ar atuante e escolher o episódio representativo de calor e estabilidade atmosférica necessários para realizar as missões.

## 6. CONCLUSÃO

O comportamento térmico das superfícies que compõem o ambiente urbano pode se apresentar com maiores ou menores amplitudes ao longo do período de um dia conforme a natureza dos materiais utilizados na sua fabricação e que, por sua vez, influenciam na temperatura atmosférica podendo gerar ilhas de calor urbanas e afetar as condições de conforto humano nesses locais. Os valores dos dados obtidos pelo conjunto de equipamentos formado pelo VANT e os sensores demonstram as diferenças de temperatura superficiais e suas repercussões na atmosfera em microescala, conforme os objetivos propostos, respondendo à hipótese apresentada.

Trabalhos futuros podem ser desenvolvidos no sentido de se aprimorar as análises com a utilização de uma estação meteorológica instalada dentro do ambiente urbano ou uma rede de estações meteorológicas portáteis em cada setor da cidade durante o período estudado de modo a se obter dados microclimáticos mais precisos, assim como embarcar outros sensores junto ao VANT durante as missões, possibilitando testar algumas correlações com as temperaturas superficiais, ou até o uso de um conjunto de VANTs em missões simultâneas em setores diferentes.

A utilização de programas para processamento de imagens em mosaico também pode vir a acrescentar avanços nesse tipo de estudo de temperaturas superficiais, uma vez que se torna possível a junção de várias imagens obtidas com VANT, ampliando a área das cenas estudadas, podendo ser integrado com plataformas de sistemas de informação geográfica (SIG) e, também, o uso de outros programas capazes de realizar análise de temperaturas superficiais. A possibilidade de produzir aplicativos que melhorem a comunicação e a precisão da obtenção de imagens com a câmera e a integração com outros programas também pode ser incluído em estudos futuros pela possibilidade do uso da programação em *Python*.

## REFERÊNCIAS

ALEXANDER, P. J.; MILLS, G. Local Climate Classification and Dublin's Urban Heat Island, *Atmosphere*, 5, 755-774, 2014.

ALVES, E. D. L. **Análise das influências geourbanas no clima urbano da cidade de Iporá – Goiás**. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

AMORIM, M. C. C. T. Ilhas de calor urbanas: métodos e técnicas de análise. *Revista Brasileira de Climatologia*. P.22-46, 2019.

AMORIM, M. C. C. T. **Teoria e método para estudo das ilhas de calor em cidades tropicais de pequeno e médio porte**. (Tese de Livre docência) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente-SP, 2017.

AMORIM, M. C. C. T. Daily evolution of urban heat islands in a Brazilian tropical continental climate during dry and rainy periods, *Urban Climate*, v.34, 2020.

AMORIM, M. C. C. T, DUBREUIL, V, AMORIM, A. T. Day and night surface and atmospheric heat islands in a continental and temperate tropical environment, *Urban Climate*, v.38, 2021.

ARRUDA, A.M.; MASIERO, E.; PERUSSI, R. Análise da correlação entre a formação de Ilhas de Calor e temperatura da superfície a partir de simulações e imagens térmicas em zona industrial. Simpósio brasileiro online de gestão urbana. **Anais...** p.991-1006, disponível em: < <https://www.eventoanap.org/eventos/anais/evento/9> > , Acessado em: setembro/2022.

AYOADE, J.O. **Introdução à climatologia para os tópicos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil, 332p., 1991.

BARBOSA, R. V. **Estudo do campo térmico urbano de São Carlos (SP): análise da intensidade da ilha de calor urbano em episódio climático de verão**. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

BLACKETT, M. An overview of infrared remote sensing of volcanic activity. *Journal of Imaging*, 3(2): 13–37, 2017.

BRANCO, C; BURGOS, L. M. **Microclimas urbanos no Plano Piloto de Brasília: o caso da superquadra 108 sul**. Brasília. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – Universidade de Brasília, 2009.

BUENO, C. L. **A influência da vegetação no conforto térmico urbano e no ambiente construído**. Tese (Doutorado em Saneamento e Ambiente) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. 186 p., Campinas, 2003.

BURUD, I; THUIS, T.; GAITANI, N. “Reflectance and thermal properties of the urban fabric studied with aerial spectral imaging”. **Anais**. SPIE 10444, Fifth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment, September, 2017.

CAMPOS, A. C. et al. Os espaços livres na constituição da forma urbana brasileira. **Anais Conferência Anual da Rede Portuguesa de Morfologia Urbana PNUM**, Coimbra, Portugal, p.264-267, 2013.

CARDOSO, R.D.S.; DORIGON, L.P.; TEIXEIRA, D.C.F.; AMORIM, M. C. C. T. Assessment of Urban Heat Islands in Small- and Mid-Sized Cities in Brazil. *Urban Climate*, v.5, 2017.

CASTRO, L. L. F. L. **Estudo de parâmetros de conforto térmico em áreas verdes inseridas no ambiente urbano**. Dissertação (Mestrado em Saneamento e Ambiente) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. 125p., Campinas, 1999.

COSTA, A. S.; FRANCO, I. M. Aplicação de imagens termográficas para caracterização do calor urbano. *Rev. Ciências da Amazônia* 1(2): 18-26, 2013.

COSTA, E. R. **O Campo Termo-Higrométrico intra urbano e a formação de ilhas de calor e ilhas de frescor em Santa Maria/RS**. 118 f. Dissertações (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2009.

FERREIRA, L. F.; CARRILHO, S. T.; MENDEZ, P. C. Áreas verdes urbanas: uma contribuição aos estudos das ilhas de frescor. *Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium*, Ituiutaba, v. 6, n. 2, p. 101-120, 2015.

FIALHO, E. S. Ilha de calor: reflexões acerca de um conceito. *ACTA Geográfica*, Boa Vista, Ed. Esp. Climatologia Geográfica, p.61-76, 2012.

GERMANO, P. J. M. M. T. Investigação multitemporal de ilhas de calor e de frescor em Maringá, Paraná, utilizando imagens do satélite landsat 5 – 2000 a 2010. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 2012.

GÓMEZ, F.; TAMARIT, N.; JABALOYES, J. Green zones, bioclimatic studies and human comfort in the future development of urban planning. *Landscape and Urban Planning*, no 55, p.151-161, 2001.

GONÇALVES, M. P. **Análise da distribuição espacial, funcionalidade e atratividade de áreas verdes públicas na cidade de São Carlos, SP**. São Carlos. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

HAWKINS, D. Assessing a small summer urban heat island in rural south central Pennsylvania **Geographical Bulletin - Gamma Theta Upsilon** v. 49, n. 2, p. 65 – 76, 2008.

HONJO, T.; TSUNEMATSU, N.; YOKOYAMAC, H.; YAMASAKI, Y.; UMEKI, K. **Analysis of urban surface temperature change using structure-from-motion thermal mosaicing**. *Urban Climate*, v. 20, p.135-147, 2017.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Mapas temáticos de clima**. Disponível em: < <https://clima.inmet.gov.br/> > Acessado em: dezembro/2020.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Boletim Técnico**. Disponível em: <<http://tempo.cptec.inpe.br/boletimtecnico/pt>> Acessado em: 25/7/2019.

JORDAN, B. R. A bird's-eye view of geology: the use of micro drones/UAVs in geologic fieldwork and education. *GSA Today*, 25(7): 50–52, 2015.

KIDDER, S.Q.; WU, H.T. A multispectral study of the St. Louis area under knowcovered conditions using NOAA-7 AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, Oxford, v.22, n.2, p.159-172, 1987.

KING, V. J.; DAVIS, C. A case study of urban heat islands in the Carolinas. **Environmental Hazards**, Oxford, v. 7, p. 353–359, 2007.

KOPEC, R. Further observations of the urban heat island in a small city **Bulletin of the American Meteorological Society** v.51, p.602 – 606, 1970.

KOWALSKI, L. F. **Influência do albedo de pavimentos no campo térmico de cânions urbanos: estudo de modelo em escala reduzida**. 2019. 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, 2019.

KRAUSE, P.; SALAHAT, E.; FRANKLIN, E. "Diurnal Thermal Dormant Landmine Detection Using Unmanned Aerial Vehicles," *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Washington, DC, USA, p.2299-2304, doi: 10.1109/IECON.2018.8591378. 2018.

LARCHER, W. *Ecofisiologia Vegetal*. Tradução de Carlos Henrique Brito de Assis Prado. São Carlos: Editora RiMa Artes e Texto., 531p., 2000.

LONGHITANO, G. A. **VANTS para sensoriamento remoto: Aplicabilidade na avaliação e monitoramento de impactos ambientais causados por acidentes com cargas perigosas**. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

LOMBARDO, M. **A Ilhas de calor nas metrópoles: o exemplo da cidade de São Paulo**, Hucitec, São Paulo. 244 p., 1985.

LOWRY, W. The climate of cities. **Scientific American**, vol. 217, no 2, p. 15-24, 1967.

MACEDO, S. QUAPÁ-SEL – um projeto de pesquisa em rede. I Encontro Nacional de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo (ENANPARQ). 15p. Rio de Janeiro, 2010. (a)

MACEDO, S. Os sistemas de Espaços livres e a constituição da esfera pública contemporânea no Brasil. Coleção QUAPÁ. São Paulo, 2010. (b)

MACEDO, S. et al. Sistemas de espaços livres e forma urbana: algumas reflexões. **Anais**. XV ENANPUR - Encontro Nacional da Associação Nacional de Pesquisa e Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional, Recife. v. 1. p. 1-16, 2013.

MASIERO, E., SOUZA, L.C.L., Variação de umidade absoluta e temperatura do ar intraurbano nos arredores de um corpo d'água. *Ambiente Construído* 13, 25-39. 2013.

MASIERO, E; SOUZA, L. C. L. de. Clima urbano e estabelecimentos de diretrizes para cenários de ocupação do solo. **Cadernos Zygmunt Bauman** v. 8, n. 18, 2019.

McGONIGLE, A. J. S.; AIUPPA, A.; GIUDICE, G.; TAMBURELLO, G.; HODSON, A. J.; GURRIERI, S. Unmanned aerial vehicle measurements of volcanic carbon dioxide fluxes. *Geophysical Research Letters*, 35(6): article L06303. 4 pages., 2008.

MEDEIROS, F. A. **Desenvolvimento de um Veículo Aéreo Não Tripulado para Aplicação em Agricultura de Precisão**. 148 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

MELLO M. A. R.; MARTINS, N.; NETO, J. L. S. A influência dos materiais construtivos na produção do clima urbano. *Revista Brasileira de Climatologia*. 2009.

MONTEIRO, C. A. F. **A. dinâmica climática e as chuvas no Estado de São Paulo**: estudo geográfico sobre a forma de atlas. São Paulo: Instituto de Geografia- USP, 1973.

MONTEIRO, C. A. de F. Teoria e Clima Urbano. São Paulo: IGEOG/USP. 181p. (Série Teses e Monografias, 25), 1976.

MONTEIRO, D. L.; COELHO, A. L. N. Sensoriamento Remoto Aplicado ao Mapeamento Termal: Uma análise espaço-temporal do Município de Serra (ES). **Anais. XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril, 2015.

NEVES, G.; GALLARDO, N.; FELÍCIO, R.; MACEDO, S.; VECCHIA, F. Variação da temperatura de superfície em diferentes usos do solo na cidade de São Carlos-SP. **Revista de Geografia e Ordenamento do Território (GOT)**, n. 13 (junho). p. 315-336, 2018.

NEWCOME, L. R. Unmanned Aviation: A Brief History of Unmanned Aerial Vehicles. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2004.

NICHOL, J.E. A GIS-based approach to microclimate monitoring in Singapore's highrise housing estates. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 60, n.10, p.1225-1232, 1994.

NUNES, L.H. Repercussões globais, regionais e locais do aquecimento global. Instituto de Geociências da UNICAMP. São Paulo: Editora Terra Livre, v.19, n.20, p.101-110,. 2003.

OKE, T. R. *Boundary Layer Climates*. London: Methuen & Ltd. A. Halsted Press Book, John Wiley & Sons, New York, 372p., 1978

OKE, T. R. **Boundary layer climates**. Routledge, 2nd Ed , UK. 434p., 1987.

OKE, T. R. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphere*, 14, 269–277, 1976.

OKE, T. R.; MILLS, G.; CHRISTEN, A.; VOOGT, J. Urban Heat Island. In *Urban Climates* (pp.). Cambridge: Cambridge University Press, p.197-237, 2017.

OKE, T. R., MILLS, G., CHRISTEN, A.; VOOGT, J. A. **Urban Climates**. Cambridge Univ. Press, 519p, 2017.

PAJARES, G. Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs). *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 81(4), pp. 281-329, 2015.

PAZ, L. H. F. **A influência da vegetação sobre o clima urbano de Palmas/TO**. 169 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Urbano) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, 2009.

PECH, K; STELLING, N; KARRASCH, P; MAAS, H.-G. **Generation of multitemporal thermal orthophotos from UAV data**. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. 40-1/W2, 2013.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, European Geosciences Union, n11, p.1633-1644, 2007.

PISCIOTTA, A.; CAPASSO, G.; MADONIA, P. Aerial monitoring in active mud volcano by UAV technique. *EGU General Assembly*, Vienna, Austria, 18; EGU2016-13104., 2016.

POLIZEL, J. L. **Geotecnologias e Clima Urbano: aplicação dos recursos de sensoriamento remoto e sistema de informações geográficas na cidade de Piracicaba, SP**. 2009. 153 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

PINHO, O.S.; ORGAZ, M.D.M. The urban heat island in a small city in coastal Portugal **International Journal of Biometeorology** v. 44, n. 4, p. 198 – 203, 2000.

PITTON, S. E. C. **As cidades como indicadores de alterações térmicas**. São Paulo, 272 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, 1997.

PIWOWARSKI, D.; ANWEILER, S.; ULBRICH, R.; TAŃCZUK, M. Unmanned aircraft vehicle design for temperature field analysis. 23rd International Conference ENGINEERING MECHANICS. Svratka, Czech Republic, 15 – 18 May, 2017.

QUADRO, M. F. de L. **Estudo de Episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul ZCAS sobre a América do Sul**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, INPE, 1994.

RAMPAZZO, C. R.; NETO, J. L.S. Episódio do clima urbano em São Carlo/SP em situação sazonal de outono em 2014: modelagem de ilha de calor urbana. *Entrelugar*. v. 10, n.19, 2019.

RAMPAZZO, C. R.; SANT'ANNA NETO, J. L. Características do clima urbano em São Carlos/SP a partir de dados de temperatura e umidade relativa do ar e técnicas de sensoriamento (dos alvos). *Anais. XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada e I Congresso*



Nacional de Geografia Física. Campinas, Brasil, 2017.

REBOITA, M. S. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.25, n.2, 185 - 204, 2010.

RODRÍGUEZ, M. V.; MELGAR, S. G.; MÁRQUEZ, J. M. A. Assessment of aerial thermography as a method of in situ measurement of radiant heat transfer in urban public spaces. *Sustainable Cities and Society*, v.87, 2022.

SÃO CARLOS – Prefeitura Municipal <<http://www.saocarlos.sp.gov.br/index.php/conheca-sao-carlos/115442-dados-da-cidade-geografico-e-demografico.html>> Acessado em: maio/2022.

SIEBERT, S.; TEIZER, J. Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system. *Automation in Construction*, v. 41, p.1-14, 2014.

SILVA, E.M. da.; RIBEIRO, A.G. As tendências das variações climáticas na cidade de Uberlândia-MG (1981-2000). *Caminhos de Geografia, Uberlândia*, v.9, n.12, p.174-190, 2004.

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

VOOGT, J. A.; OKE, T. R. **Complete urban surface temperature**. *Journal of Applied Meteorology*, vol. 36, p. 1117-1132, 1997.

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

WAKEFORD, Z. E.; CHMIELEWSKA, M.; HOLE, M. J.; HOWELL, J. A.; JERRAM, D. A. Combining thermal imaging with photogrammetry of an active volcano using UAV: an example from Stromboli, Italy. *The Photogrammetric Record*. 34(168): 445–466, 2019.

WENG, Q. Fractal analysis of satellite-detected urban heat island effect. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Bethesda, v.69, n.5, p.555-566,. 2003.

WESTOBY, M. J.; BRASINGTON, J.; GLASSER, N. F.; HAMBREY, M. J.; REYNOLDS, J. M. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, v. 179, p. 300-314, 2012.

WILKINSON, A. Game of drones. *Geoscientist: The Fellowship Magazine of the Geological Society of London*, 27(2): 10–15, 2017.

YAHYANEJAD, S.; RINNER, B. A fast and mobile system for registration of low-altitude visual and thermal aerial images using multiple small-scale UAVs. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104, 189-202., 2015.



***EESC • USP***