

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana**

ANGELA MARIA DE ARRUDA

FORMAÇÃO DE ILHAS DE CALOR URBANO EM ÁREAS  
INDUSTRIAIS

SÃO CARLOS - SP  
2023

ANGELA MARIA DE ARRUDA

FORMAÇÃO DE ILHAS DE CALOR URBANO EM ÁREAS  
INDUSTRIAIS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Urbana.

Orientador: Prof. Dr. Érico Masiero

SÃO CARLOS - SP  
2023

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pelas inúmeras oportunidades que tem me proporcionado e por ter colocado em meu caminho pessoas incríveis que me apoiaram, ensinaram, rezaram por mim, torceram e me inspiraram.

Ao meu orientador, prof. Dr. Érico Masiero, por todo seu conhecimento e sabedoria compartilhada, paciência, conselhos e generosidade, com certeza um modelo de professor a ser seguido.

Ao prof. Dr. António Lopes, do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, que supervisionou meu estágio de doutorado na Universidade de Lisboa, agradeço pelo acolhimento, disponibilidade e por compartilhar seu amplo conhecimento e experiência.

A todos os professores que fizeram parte da minha jornada e me fizeram acreditar que a educação pode oferecer oportunidades a todos, independente das dificuldades.

À minha família: meu pai, Carlos, minha mãe, Maria do Carmo, minhas irmãs Roberta e Naiara, meu sobrinho, Rafael, meus cunhados Marcelino e Hernane, gratidão pelas orações, apoio e presença.

À minha parceira Helaine, pelo companheirismo, apoio incondicional e convívio diário.

A todos meus amigos, em especial, àqueles com quem pude conviver mais de perto durante o período em Portugal: Rosaline, Sara e Kowalski, me diverti e aprendi muito com vocês.

À CAPES pela concessão da bolsa CAPES/PRINT de doutorado sanduíche, cuja experiência e conhecimento adquiridos foram fundamentais para o aprimoramento deste trabalho.

*“Viver e não ter a vergonha  
De ser feliz  
Cantar, e cantar, e cantar  
A beleza de ser um eterno aprendiz*

*Ah, meu Deus!  
Eu sei, eu sei  
Que a vida devia ser bem melhor  
E será!*

*Mas isso não impede  
Que eu repita  
É bonita, é bonita  
E é bonita”*

*Gonzaguinha*

## RESUMO

ARRUDA, A. M. Formação de ilhas de calor urbano em distritos industriais. 2023 – 114p: Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, São Carlos – 2023.

O impacto da urbanização e industrialização no meio natural tem suscitado interesse de muitos pesquisadores desde o final do século XIX, quando se percebeu a elevação da temperatura do ar urbana comparada ao ambiente rural. Tal fenômeno intitulado Ilha de Calor Urbano (ICU) impacta no conforto térmico dos indivíduos, nos problemas de saúde, na poluição do ar e na maior demanda energética. O objetivo principal desta tese foi registrar o comportamento térmico, a ocorrência e a configuração de ICUs provocadas pela implantação de zonas industriais no microclima urbano. A partir da análise sistemática pode-se identificar que o uso e a temperatura do solo (LST) são amplamente explorados nos trabalhos sobre os ICUs e o sensoriamento remoto aparece como método mais difundido, seguido por modelagem e simulação computacional. Ao comparar dois distritos industriais de cidades distintas, Sintra/PT e Uberlândia/BR, utilizando o software ENVI-met e análise de componentes principais, constatou-se que o impacto da ventilação no arrefecimento dos distritos industriais se sobrepõe a fatores como o percentual de vegetação do local estudado e ao albedo, capaz de aumentar 1,5°C no ambiente industrial de Sintra quando ocorre redução na velocidade do vento de 1,9 m/s. Verificou-se a necessidade de expandir o estudo, além da interrelação entre Tar e LST, considerando outras variáveis microclimáticas tais como velocidade (WS) e direção do vento (WD), fator de visão do céu (SVF), taxa de energia cinética (TKE), umidade relativa (UR) e específica do ar (Uesp). Foram coletadas a Tar e UR *in loco* em um recorte residencial (R) e outro industrial (DI), na cidade de Uberlândia/MG, durante 15 dias para validação do modelo computacional. A Tar ao longo das 24 h simuladas se manteve maior no DI se comparada ao recorte residencial, atingindo até 1,3° C superior no início da manhã. A maior taxa de vegetação presente no DI não foi capaz de superar o efeito da alta taxa de impermeabilização por asfalto e das coberturas dos amplos galpões, compostas por telhas metálicas sem revestimento, que tendem a reter calor e possuem emissividade térmica baixa. Utilizaram-se os dados da estação meteorológica A 507 situada no aeroporto de Uberlândia para estimativa da intensidade de ICU, sendo a intensidade ICU no DI 70% superior ao recorte residencial. As conclusões obtidas apontam para a dificuldade de implementação de medidas mitigadoras tradicionais aos distritos industriais, sejam por limitação de espaço físico ou viabilidade das intervenções necessárias. Ações como substituição de materiais construtivos já implantados por materiais com propriedades térmicas adequadas, apresentam-se como alternativas viáveis para mitigar os efeitos das ICUs, principalmente quanto ao aumento da Tar noturna nos distritos industriais estudados. O planejamento urbano focado na orientação das ruas e avenidas para otimizar a circulação dos ventos, e permitir a penetração no tecido urbano, bem como o aumento do albedo dos telhados e dos pavimentos, podem também ser alternativas interessantes para a mitigação das ICUs em áreas industriais. A aplicação de tintas acrílicas em coberturas e superfícies de edificações, ou a substituição de pisos de estacionamentos e pátios de manobras por pisos permeáveis e espaços abertos são também alternativas que deveriam orientar diretrizes construtivas para distritos industriais, sobretudo em cidades com clima tropical. A integração entre o planejamento urbano, por parte da administração pública, e as empresas presentes nos DIs, pode transformar a longo prazo, o processo de ocupação das zonas industriais urbanas focado apenas na otimização da produção industrial. Iniciativas que envolvam o poder público, a população afetada pelas condições deterioradas de conforto térmico e os interesses de indústrias devem convergir para

estabelecer processos que integrem efetivamente tais espaços ao meio urbano do ponto de vista climatológico. Transformações nos conceitos de planejamento urbano de distritos industriais devem contribuir para o alívio térmico e mitigar os efeitos da ICU nas cidades.

**Palavras-chave:** Ilhas de Calor Urbanas, Distritos Industriais, ENVI-met

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Classificação das LCZs .....	14
Figura 2: Etapas da realização da pesquisa .....	24
Figura 3: Produção científica anual sobre “Urban Heat Islands” .....	27
Figura 4: Rede de conexão entre os pesquisadores de diferentes países .....	27
Figura 5: Produção científica por país, tema principal e autores.....	28
Figura 6: Publicação por revista .....	28
Figura 7: Frequência de termos nos estudos.....	29
Figura 8: Produção científica sobre ICUs em distritos industriais desde 1985 .....	29
Figura 9: Metodologias apresentadas nos estudos.....	30
Figura 10: Correlação do tema ICU em distritos industriais e outros temas a partir dos termos buscados.....	32
Figura 11: Análise fatorial dos componentes principais referentes aos temas abordados .....	32
Figura 12: Localização de Sintra/PT .....	44
Figura 13: Localização de Uberlândia/MG .....	45
Figura 14: Recortes estudados (a) e (c) DI Sintra; (b) e (d) DI Udia (Escala: 1:5000) 45	
Figura 15: Classificação das LCZs (a) DI Sintra; (b) DI Udia. (Escala: 1:25000).....	46
Figura 16: Resumo dos procedimentos metodológicos .....	47
Figura 17: DIs de Sintra e Udia e albedo (a) DI Sintra; (b) Imagem Landsat 8 Sintra; (c) DI Udia; (d) Imagem Landsat 8 Udia. ....	49
Figura 18: Locais onde foram extraídos os pontos de estudo (a) Udia; (b) Sin. ....	49
Figura 19: (a) Dendrograma mostrando os dois clusters identificados. (b) Gráfico de tela mostrando uma diminuição lenta na inércia após $k = 2$ . (c) Visualização do gráfico de cluster k-means. ....	52
Figura 20: (a) A maior contribuição da variância para o círculo de correlação PC1 e PC2 (a) e gráfico de barras da contribuição do PC em 8 variáveis (b). ....	52
Figura 21: PCs e contribuições variáveis .....	53
Figura 22: Os dois primeiros PCs cobrem 77,02% da variação .....	54
Figura 23: Visualização da análise de componentes principais para dois clusters.....	56
Figura 24: Composição física dos recortes estudados .....	56
Figura 25: Diferença da velocidade do vento para DI Sin e Udia durante dias quentes 59	
Figura 26: Diferença UR dos DIs Sin e Udia .....	60
Figura 27: Diferença Uesp de DIs Sin e Udia .....	60
Figura 28: Diferença Tar dos DIs Sin e Udia .....	61

Figura 29: Comparativo (a) Tar e (b) LST dos DIs Sin e Udia.....	62
Figura 30: (a) Localização dos recortes estudados no perímetro urbano de Uberlândia; (b) LCZs (escala 1:100000).....	79
Figura 31: Posicionamento dos termo-higrômetros nos recortes; (a) R; (b) DI.....	79
Figura 32: Locais aleatórios de extração de dados dos 30 pontos (a) R; (b) DI.....	81
Figura 33: Composição física dos recortes estudados.....	82
Figura 34: Variação do NDVI nos últimos 10 anos.....	82
Figura 35: Imagens de satélite para identificar o NDVI (a) R; (b) DI.....	83
Figura 36: Rosa dos Ventos de Uberlândia/MG.....	83
Figura 37: Tar e UR simulados para os recortes estudados.....	84
Figura 38: Tar e LST para DI e R.....	85
Figura 39: (a) Intensidade de ICU no DI e (b) Tar no DI; (c) Intensidade de ICU em R e (d) Tar residencial.....	86
Figura 40: (a) Clusters e (b) representação bidimensional do agrupamento para os dados analisados R e DI.....	88
Figura 41: Correlação das variáveis de R e DI.....	89
Figura 42: Matriz de correlação das variáveis R e DI.....	89
Figura 43: <i>Scree plots</i> dos recortes (a) R; (b) DI.....	90
Figura 44: Mapa fatorial dos PCs (a) R; (b) DI.....	91
Figura 45: Distribuição dos pontos no mapa fatorial (a) R; (b) DI.....	91
Figura 46: Contribuição de cada variável para os componentes principais (a) R e (b) DI .....	92
Figura 47: Correlação entre as variáveis (a) e (b) R; (c) e (d) DI.....	93
Figura 48: Matriz de correlação e distribuição dos pontos (a) recorte residencial; (b) industrial.....	94
Figura 49: Direção preferencial do vento (a) R; (b) R rotacionado; (c) DI; (d) DI rotacionado.....	95



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados de entrada .....	48
Tabela 2: Autovalores e variações percentuais dos componentes principais .....	54
Tabela 3: Coeficientes de ponderação das características e sua correlação com os dois PCs.....	54
Tabela 4: Comparação do Albedo .....	58
Tabela 5: Dados de <i>input</i> para simulação ENVI-met .....	80
Tabela 6: Medidas descritivas .....	90

## **ABREVIATURAS E SIGNIFICADOS**

Componentes Principais - PCs

Direção do vento – WD

Distrito Industrial – DI

Fator de visão do céu - SVF

Ilha de Calor Urbana - ICU

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE

Instituto Nacional de Meteorologia – INMET

Instituto Nacional de Estatística – INE Portugal

Instituto Português do Mar e da Atmosfera - IPMA

Local Climate Zones – LCZ

Taxa de energia cinética turbulenta - TKE

Temperatura do ar – Tar

Temperatura de superfície terrestre – LST

Umidade relativa do ar – UR

Umidade específica – Uesp

Velocidade do vento – WS

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	12
Áreas de Estudo.....	16
Questões da pesquisa.....	18
Objetivo geral.....	19
Objetivos Específicos.....	19
ESTRUTURA DA TESE.....	19
Artigo 1: Análise sistemática de estudos sobre ICUs nos Distritos Industriais.....	21
Artigo 2: Análise multivariada microclimática de duas áreas industriais.....	39
Artigo 3: Simulação computacional e análise multivariada das variáveis microclimáticas de uma cidade tropical: industrial x residencial.....	72
CONCLUSÕES DA TESE.....	106

## INTRODUÇÃO

A influência do ambiente construído urbano nos microclimas locais é um dos impactos mais evidentes da atuação humana nas cidades (Agathangelidis; Cartalis; Santamouris, 2020). Conseqüentemente, as cidades apresentam temperatura mais elevada em relação às áreas circundantes, o que define o fenômeno de Ilha de Calor Urbana (ICU) (Oke, 1988). Tal fenômeno é visto na maioria dos lugares do mundo como um problema por diversos aspectos: desconforto térmico das pessoas, problemas de saúde, maior poluição e maior demanda energética (Gartland, 2010; Zhao *et al.*, 2022). Os picos de intensidade ocorrem entre três e quatro horas após o pôr do sol, porém ressalta-se que o horário pode variar de acordo com os materiais construtivos e a região climática. Materiais que liberam calor mais lentamente como o concreto e a rocha tendem a contribuir para o aumento da temperatura do ar com um certo atraso, se comparado a materiais que liberam calor mais rapidamente (Oke, 1988).

Resumidamente, Oke (1982) enumera os processos mais importantes relacionados aos efeitos climáticos urbanos, tais como, valores elevados da relação entre a altura do edifício (H) e a largura da rua (W) que dificulta o resfriamento (Arnfield, 2003) e dificultam a passagem dos ventos. As propriedades térmicas dos materiais construtivos, a geometria do cânion e a variação da estrutura do ambiente urbano podem favorecer o acúmulo de calor durante o dia, e dificultar a liberação à noite, mantendo o fluxo de calor sensível positivo (Goward, 1981; Aida, 1982). A alta taxa de impermeabilização do solo, com retirada extensiva de vegetação natural também responde pelo fluxo de calor latente. A vegetação, em geral, contribui para o resfriamento por evapotranspiração (Melo *et al.*, 2021). A liberação de calor antropogênico pode favorecer o saldo positivo de energia na superfície (Sailor, 2011).

O desenvolvimento de pesquisas para identificação da configuração, da intensidade e da amplitude dos impactos das ICUs no ambiente urbano é de suma importância, visto que, segundo previsões da ONU, a parcela urbana global da população atingirá 68,36% até 2050, implicando uma maior e mais intensa urbanização nos próximos anos (ONU, 2018). Além disso, o processo de degradação dos ambientes urbanos, geralmente fruto da ocupação desordenada, tem efeito direto sobre a qualidade de vida dos cidadãos (Amorim, 2019). Ugeda Júnior e Amorim (2016) afirmam que os estudos tradicionais sobre clima urbano focam essencialmente em áreas centrais de grandes cidades e regiões metropolitanas, porém é importante também, concentrar estudos em cidades pequenas e médias, e principalmente nas áreas periféricas, onde

muitos distritos industriais se situam. Genericamente, os estudos apontam para uma variação térmica de 3°C a 10°C entre as áreas centrais, periféricas e rurais.

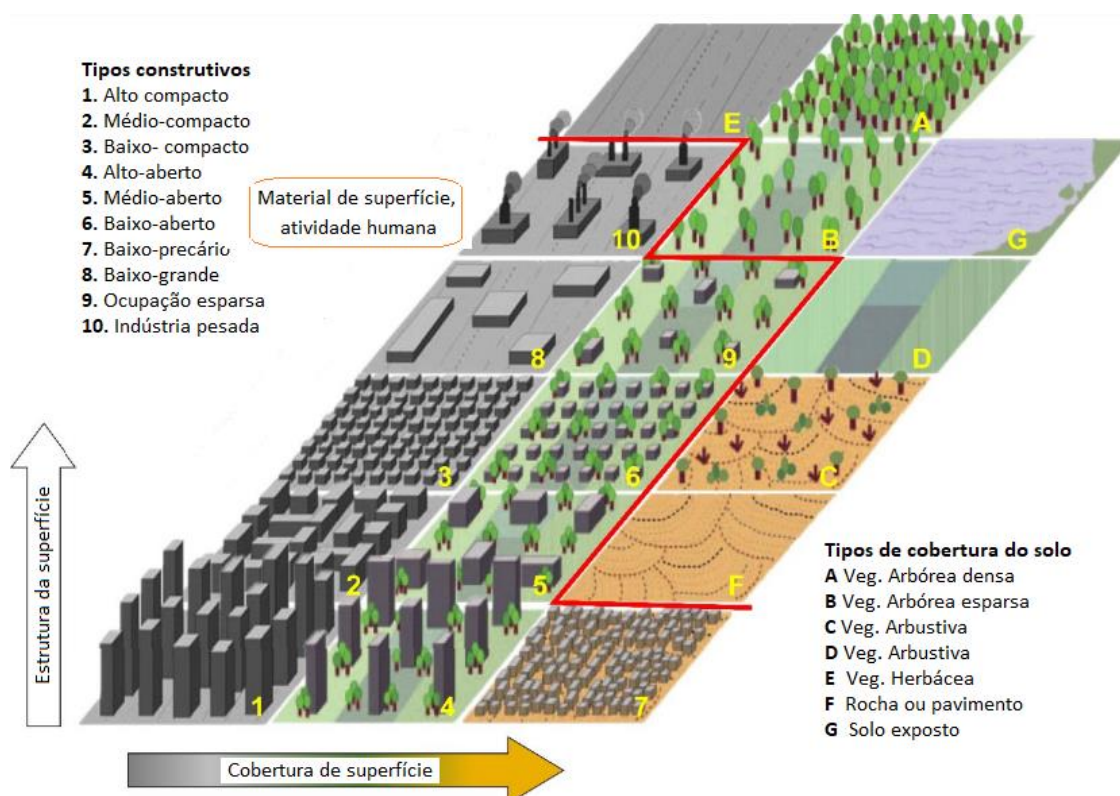
Estima-se que cidades com população igual ou superior a um milhão de pessoas possuem temperatura média anual do ar de 1° a 3°C mais quente que os arredores, podendo atingir uma diferença de temperatura de até 12°C para uma noite clara e ventos fracos. Cidades com porte menor também são capazes de produzir ilhas de calor, todavia o efeito tende a acompanhar o tamanho da cidade, ou seja, apresentam intensidade menor para cidades menores (Oke, 1988 e Ugeda e Amorin, 2016).

O entendimento de um fenômeno tem sido favorecido por revisões amplas, sistemáticas e criteriosas dos principais fatores associados. Os estudos sobre ICU tem sido revisados mundialmente sob múltiplas perspectivas, tais como principais causas, métodos e estratégias de mitigação em diferentes níveis da atmosfera – dossel urbano e camada limite – segundo Oke (1988). A revisão de estudos sobre clima urbano proposta por Arnfield (2003) explorou os fatores relacionados à formação de ICU e apontou, já naquele ano, as principais premissas científicas a serem estudadas nos anos subsequentes, colocando a cidade no centro do debate sobre mudanças climáticas em nível local.

O clima urbano é resultado da heterogeneidade em escala local da cobertura superficial. Pode ser caracterizado por uma intensa variabilidade do ambiente intraurbano. Por esta razão é de fundamental importância estabelecer métodos e critérios para se estudar a influência da paisagem sobre os microclimas.

Para desenvolver um entendimento mais apurado dos fenômenos físicos que decorrem da ocupação urbana foram introduzidas as *Local Climate Zones (LCZs)*, propostas por Stewart e Oke (2012) que classificam os bairros em função da sua forma e sua função urbana, mostradas na figura 1.

Figura 1: Classificação das LCZs



Fonte: Adaptado de Jiang et al. (2020) e Stewart, Oke (2012)

O conceito de LCZ consiste em subdividir e classificar a paisagem urbana de acordo com os tipos de construções e os tipos de cobertura do solo, variando de densamente construídos aos espaços mais abertos e naturais. Áreas industriais, por exemplo, podem ser caracterizadas por conjunto de construções horizontalizadas com baixa altura interligadas por vias altamente impermeabilizadas. Quanto às coberturas dos solos, a classificação de uma LCZ pode considerar variação da densidade ocupada por árvores, solo exposto, rocha e água (Stewart, Oke, 2012). Portanto, os autores ressaltam a necessidade de se implantar uma rede densa de estações meteorológicas superficiais para mapear as diferenças locais de temperatura do ar e garantir a identificação precisa de ICUs (Stewart, 2011).

Frente à impossibilidade de implantação física de equipamentos em todas as LCZs presentes em uma cidade, apresentam-se alternativas para os estudos de “Ilhas de Calor Atmosférico inferior” (UHI) definidas por Oke (1988) como o fenômeno que ocorre na camada de dossel urbano, ou seja, do nível do solo até a altura média dos níveis do telhado.

Os modelos numéricos e computacionais têm apresentado resultados promissores para análise do clima urbano em espaços abertos, destacando o software ENVI-met. Este programa computacional é frequentemente utilizado em estudos na escala de edifícios e

bairros para avaliar a efetividade de ações mitigatórias dos efeitos das ICUs (Ouyang *et al.*, 2022; Uesparma *et al.*, 2016; Fang *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2023; Susca; Zanghirella; Del Fatto, 2023).

Segundo Feng *et al.* (2022), o software ENVI-met é um modelo de simulação de microclima que utiliza a Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) para formular as interações entre superfície-vegetação-atmosfera no ambiente construído, e permite simular o microclima externo com grande precisão, tornando-se uma importante ferramenta no estudo de ambientes térmicos urbanos. Yang *et al.* (2013) acrescenta que sua aplicação se estende para ambientes microclimáticos urbanos em bairros e espaços verdes de cidades médias e pequenas, considerando a interação entre os elementos, tais como a temperatura e umidade do ar e todas as superfícies do edifício relacionados aos fluxos de energia, por exemplo (Herath; Halwatura; Jayasinghe, 2018; Simon *et al.*, 2018)

Voogt e Oke (2003) explicam que as temperaturas da superfície e da atmosfera variam de acordo com as áreas de uso do solo. Durante o dia, as temperaturas da superfície variam mais do que as temperaturas do ar. Porém à noite, o comportamento de ambas é semelhante. Ibrahim *et al.* (2018) estudaram a formação de ICUs em Cameron Highlands/Malásia através de medições realizadas durante algumas horas do dia e da noite e concluíram que o aumento significativo da temperatura, associado à rápida atividade de urbanização na região estudada causou a formação de ICU. A diferença de temperatura entre a área urbana e rural durante o dia foi de 2,8 ° C, enquanto à noite é de 1,4 ° C.

As temperaturas da superfície têm influência indireta, porém significativa sobre as temperaturas do ar, com destaque para a camada de dossel, mais próxima da superfície. Muitos estudos consideram que o tipo de atividade desenvolvida, o tipo de cobertura de solo e a geometria urbana são cruciais para o entendimento das ICUs, a exemplo da pesquisa desenvolvida por Coury *et al.* (2021). Os autores verificaram a influência da cobertura do solo rural, decorrente da sazonalidade da cultura da cana-de-açúcar, sobre a diferença entre a temperatura do ar em bairro central e em uma área periférica de Piracicaba/SP. Os autores relatam que regiões periurbanas podem apresentar temperaturas mais elevadas que a zona rural e inferiores que a região central, reafirmando a contribuição da densidade urbana nas temperaturas ao redor.

No que tange à criação de zonas industriais, é importante ressaltar que tais áreas, de forma geral, estão localizadas em áreas periurbanas caracterizadas por extensas áreas construídas com edifícios horizontais, com coberturas metálicas, com pouca ou nenhuma vegetação, e infraestrutura urbana amplamente pavimentada, como rodovias,

estacionamentos, hidrovias, aeroportos e ou ferrovias para escoamento da produção (Croce *et al.*, 2021).

Os estudos sobre os impactos de instalações industriais no aumento da temperatura do ar urbano são bastante recentes. Singh *et al.* (2017), Pearsall (2017), Tran *et al.* (2017), Meng *et al.* (2022) e Bechtel *et al.* (2019) correlacionaram o aumento da temperatura da superfície intraurbana à implantação de conglomerados industriais ao redor do mundo.

A escolha da cidade de Uberlândia/MG e Sintra/PT como objetos de estudo se justifica pelo fato de que a primeira constitui uma cidade localizada no interior de uma região tropical brasileira em processo de intenso crescimento e expansão da malha urbana, com extensa área industrial situada na periferia. Por outro lado, Sintra, em Portugal, integra a região metropolitana de Lisboa, com extensas áreas verdes e sob a influência de ventos originários do oceano, com clima temperado mediterrâneo. A disparidade quanto ao clima, vegetação e ocupação do solo das duas cidades oferece a oportunidade de se explorar as variáveis climáticas de cada região, favorecendo a identificação dos principais fatores sobre a ocorrência das ICUs nestes climas.

## **Áreas de Estudo**

Segundo Silva (2017), o perfil de crescimento das cidades brasileiras, principalmente de médio porte, se caracteriza pela qualidade inferior das habitações, pelo aumento da verticalização e pela inadequação da infraestrutura.

A cidade de Uberlândia está localizada no Triângulo Mineiro, sudeste brasileiro com 713.232 habitantes, área total de 4.115,20 km<sup>2</sup>, sendo a segunda cidade mais populosa do estado, cujo clima é tropical com estação seca (IBGE, 2020). O processo de industrialização da cidade de Uberlândia/MG teve início na década de 1970, impulsionada pela descentralização do polo industrial, seguido de problemas ambientais devido à diversificação do uso do solo, sua degradação e retirada da vegetação das periferias. Mesquita e Andreozzi (2009) explicam que a principal preocupação era realocar tais indústrias em um local afastado para reduzir o impacto da poluição sonora e do ar sobre a população. Ou seja, a urbanização de Uberlândia foi imediatista e se propôs a atender às demandas da classe empresarial, não se preocupando com os impactos ambientais decorrentes de tais ações, como o desmatamento de grandes áreas periféricas.

A ocupação desordenada seguida por falta de infraestrutura adequada, saneamento básico, o aumento de construções irregulares em áreas de risco e a excessiva impermeabilização do solo tiveram elevados impactos sobre os sistemas naturais. Como



impactos socioambientais podemos citar inundações, erosões, assoreamento dos corpos d'água, poluição do ar e da água, a retenção do vento, o aumento da formação de ICUs e, possivelmente alterações nos regimes de chuva (Stanganini; Lollo, 2018).

Em contrapartida, a cidade de Sintra em Portugal conta com planejamento urbano que engloba áreas de reserva agrícola e ecológica em seu território. Porém, mesmo com planejamento e rigorosa legislação sobre o uso e ocupação do solo, estudos sugerem que as áreas agrícolas contidas na área metropolitana de Lisboa tendem a ser pressionadas a se tornarem urbanizadas o que impõe maiores desafios ao plano de contenção urbana (Abrantes, 2016)

Na cidade de Lisboa, segundo o Relatório para Identificação das ICUs, em áreas críticas, a maior intensidade de ICU ocorre ao entardecer, com anomalias maiores que 2°C, podendo ultrapassar 4°C, diminuindo para 1,1°C - 1,5°C ao anoitecer. Estes resultados são atribuídos à boa ventilação como fator de alívio no sobreaquecimento da região (Lopes *et al.*, 2020; Oliveira *et al.*, 2021). Oliveira *et al.* (2021) ainda afirmam que na referida cidade, a intensidade de ICU não aumenta durante eventos de ondas de calor, mesmo sob influência do vento.

A cidade de Sintra tem 319,23 km<sup>2</sup> e 385 954 habitantes (INE, 2021), subdividida em 11 freguesias e possui 3 zonas industriais. É o segundo município mais populoso de Portugal e apresenta grande heterogeneidade em seu território, sendo as freguesias litorais e do norte com características florestais e rurais, enquanto que ao sul tem-se as freguesias urbanizadas, objeto deste estudo.

Reis *et al.* (2020) demonstraram a necessidade de estudar os microclimas diversos presentes na cidade de Lisboa, principalmente na ocorrência de *hot spots*, possibilitando a classificação do tipo de clima local para distinguir os diferentes padrões térmicos urbanos. Como exposto anteriormente, pesquisas demonstram que a aglomeração de indústrias tende a criar focos de calor antropogênico, que contribuem para o aquecimento do entorno. Desta forma, seria interessante estender o estudo do microclima, amplamente explorado na capital, para uma cidade localizada na região metropolitana, e que possui zonas industriais expressivas, a exemplo de Sintra.

A exemplo de Cardoso e Amorim (2017) que elaboraram um mapa classificando a cidade de Presidente Prudente/SP em LCZs e estudaram sua correlação com a temperatura do ar, para episódios de inverno e verão, para este estudo foram selecionados recortes representativos das LCZ 3 e 8 de Uberlândia/MG e LCZ 8 de Sintra, em Portugal, baseados na classificação proposta por Dezumere *et al.* (2022). Tais recortes foram modelados e simulados utilizando o software ENVI-met. Nos recortes de Uberlândia foi

possível realizar medições *in loco*, com o uso de termo-higrômetros, que serviram como parâmetros de entrada do referido modelo a ser simulado.

Além da obtenção dos valores para as variáveis climáticas, através da simulação computacional, faz-se necessário adotar uma ferramenta estatística capaz de indicar as variáveis mais importantes para o estudo do microclima de cada recorte, sendo a “Análise de Componentes Principais” (PCA). Esta é uma ferramenta algébrica que aplica a decomposição em autovetores para reduzir dados de grande dimensão para um pequeno número de variáveis independentes sendo amplamente utilizada em diferentes áreas do conhecimento, inclusive na área de Climatologia (Evrendilek; Berberoglu, 2008; Westra *et al.*, 2009; Raziei, 2018). A PCA permite transformar um conjunto de variáveis originais em outro de mesma dimensão denominados componentes principais que são uma combinação linear de todas as variáveis principais, independentes entre si, mantém o máximo de informação relativa à variação total dos dados e agrupa os dados segundo seu comportamento dentro da população, ou seja, sua variância (Jonhson; Wichern, 1998).

Sob esta ótica, o estudo do clima urbano, em especial, restrito aos distritos industriais de Uberlândia/MG e Sintra/PT se torna relevante a ponto de servir como instrumento para tomada de decisão no planejamento urbano, pois quando este é articulado às variáveis climáticas, é possível atingir melhores condições de conforto térmico dos usuários de espaços abertos, bem como minimizar impactos sobre a saúde das pessoas e o consumo energético das edificações (Silva, 2017).

### **Questões da pesquisa**

A pesquisa aqui apresentada procura focar o estudo sobre ambientes urbanos específicos para compreender como organizações territoriais em distritos industriais, normalmente situados em áreas periféricas urbanas, podem impactar a formação de ICUs, bem como nas áreas adjacentes. Ressalta-se que a aplicação de medidas mitigadoras mais conhecidas como o incremento de vegetação e a redução da impermeabilização de vias de circulação nem sempre podem ser adotadas neste contexto urbano. Principalmente pelo fato das áreas industriais exigirem, via de regra, grandes edifícios com amplas coberturas metálicas e áreas pavimentadas para manobra e circulação de veículos pesados.

Neste sentido, as principais questões que guiam este estudo podem ser resumidas em três:

- Quais as variáveis presentes no clima urbano com maior impacto na formação de ICU em áreas industriais?

- Quais as correlações entre as variáveis e configurações urbanas na formação de ICU?
- Quais as propostas de medidas mitigatórias exequíveis para os efeitos das ICUs para o ambiente industrial?

### **Objetivo geral**

Este estudo tem como objetivo principal registrar o comportamento térmico e os principais fatores de influência que contribuem para a ocorrência, a configuração de ICUs e o impacto da implantação de zonas industriais no microclima urbano.

### **Objetivos Específicos**

- Realizar uma revisão sistemática de literatura dos principais trabalhos publicados e identificar as palavras-chave mais recorrentes sobre o tema;
- Identificar possíveis lacunas nas pesquisas desenvolvidas sobre a formação de ICUs em distritos industriais;
- Avaliar componentes climáticos específicos (temperatura do ar, umidade relativa e específica do ar, temperatura do solo, velocidade e direção do vento, fator de visão do céu de dois distritos industriais localizados em Sintra/PT e Uberlândia/MG através de simulação computacional no ENVI-met;
- Identificar quais das variáveis climáticas citadas têm maior relevância sobre o microclima urbano de cada local;
- Comparar o microclima de duas LCZs distintas da cidade de Uberlândia/MG através da medição in loco da temperatura e da umidade relativa do ar e posteriormente realizar a simulação computacional de dois recortes urbanos, um residencial e outro industrial.

### **ESTRUTURA DA TESE**

A tese se concentra no estudo sobre a formação de Ilhas de Calor Urbano (ICUs) em áreas industriais. Foram analisados recortes urbanos representativos das cidades de Uberlândia/MG e Sintra/PT especificamente para o estudo do comportamento das variáveis microclimáticas de maior impacto para a ocorrência deste fenômeno. Foram desenvolvidas campanhas de medições in loco, análises multivariadas microclimáticas e simulações computacionais a respeito de ICUs em áreas urbanas industriais para compor 3 artigos, que se complementam, integram e conduzem a narrativa da tese.

Na introdução do trabalho, foi apresentado um breve referencial histórico sobre o clima urbano, os principais conceitos sobre ICUs e metodologias comumente utilizadas nos estudos com esta temática, assim como a proposta, as principais hipóteses e os objetivos da tese. A caracterização das áreas de estudo foi realizada ao final da introdução para auxiliar no entendimento dos temas discutidos nos artigos.

O primeiro artigo, “Análise sistemática dos estudos das ICUs nos Distritos Industriais”, apresenta uma análise sistemática dos trabalhos produzidos entre 1967 a 2023, por meio do banco de dados Scopus, e identifica aqueles que abordam as possíveis interferências dos distritos industriais no microclima urbano. Foram analisadas a relevância e a contribuição regional e global da produção científica, bem como os principais métodos, as variáveis associadas e os programas computacionais utilizados. As informações foram processadas pela plataforma web Bibliometrix integrada ao software R. Foi identificada a necessidade de se ampliar o escopo de pesquisa e explorar outras variáveis que possivelmente interferem no microclima urbano de áreas industriais. Entre as principais contribuições, aponta-se para a necessidade de se desenvolver técnicas de mitigação exequíveis para combater os efeitos negativos das ICUs nestes ambientes.

No segundo artigo, “Análise multivariada microclimática de duas áreas industriais”, foram analisadas, variáveis como temperatura superficial, temperatura, umidade relativa e específica do ar, velocidade e direção do vento, fator de visão do céu e albedo para esclarecer o fator que mais impacta o microclima de dois recortes industriais urbanos com climas distintos. O primeiro situado em Uberlândia/BR e o segundo em Sintra/Portugal. Foram realizadas simulações computacionais com o programa ENVI-met e os dados submetidos à análise multivariada para identificar as especificidades e características microclimáticas dos dois locais.

O terceiro artigo, “Simulação computacional e análise multivariada microclimática de uma cidade tropical: industrial x residencial”, apresenta o estudo das variáveis climáticas envolvidas no microclima de um recorte central com característica de uso e ocupação predominantemente residencial e outro periférico industrial. Foram desenvolvidas medições *in loco* da temperatura e umidade relativa do ar durante 15 dias e a simulação computacional com o programa ENVI-met dos recortes urbanos. A análise estatística multivariada contribuiu para identificar as variáveis climáticas mais importantes para o microclima de cada área. Tais métodos e resultados poderão ser aplicados para prever impactos negativos de ICUs e a irradiação de possíveis fenômenos semelhantes em locais adjacentes, bem como orientar intervenções em áreas já existente ou para a implantação de novas áreas industriais.

## **Artigo 1: Análise sistemática de estudos sobre ICUs nos Distritos Industriais**

**Resumo:** O estudo das Ilhas de Calor Urbanas (ICUs) tem sido amplamente difundido, desde o final do século XIX, através de diferentes metodologias para identificação dos fatores que culminam no gradiente térmico entre o ambiente urbano e rural. Este artigo tem como objetivo realizar uma análise sistemática dos trabalhos produzidos sobre tal temática de 1967 a 2023, através do banco de dados Scopus, e identificar aqueles que abordam as possíveis interferências dos distritos industriais no microclima urbano. Foram analisadas a relevância e a contribuição regional e global da produção científica; os métodos utilizados para o estudo e as variáveis associadas e softwares mais utilizados através da plataforma web Bibliometrix integrada ao software R. A China lidera o ranking de pesquisas no âmbito de ICUs, tendo trabalhos de destaque sobre a contribuição dos distritos industriais na formação das ICUs, enquanto no Brasil os pesquisadores têm se dedicado às pesquisas relativas ao conforto térmico. Através da Análise de Componentes Principais foi possível identificar que o uso e a temperatura do solo são amplamente explorados nos trabalhos sobre ICUs e o sensoriamento remoto aparece como o método mais difundido, seguido por modelagem e simulação computacional e medições *in loco*. Nota-se a necessidade de ampliar o escopo de pesquisa e explorar quais outras variáveis poderiam interferir no microclima urbano industrial, visando propor medidas mitigadoras exequíveis para os efeitos das ICUs nestes ambientes.

**Palavras-Chave:** Ilhas de Calor Urbanas. Análise Sistemática. Distritos industriais.

### **1 Introdução – Artigo 1**

Os primeiros estudos da formação de ilhas de calor urbanas (ICUs) remetem ao século XIX e início do século XX, quando vários pesquisadores, entre eles, Luke Howard, o primeiro cientista a estudar o clima urbano, notaram a diferença expressiva da temperatura do ar entre o ambiente urbano e rural. Por meio de estações meteorológicas, teceram considerações e formalizaram suas descobertas acerca do impacto da atuação antropogênica no ambiente e no clima urbano (Oke *et al.*, 2017).

Grant; Booth (2009) definem a revisão sistemática da literatura como um método de integração e comparação dos resultados dos estudos qualitativamente, permitindo identificar e analisar o conhecimento acumulado, de uma nova teoria ou uma generalização mais ampla. A partir de uma revisão sistemática, é possível identificar a época na qual o estudo das ICUs avançou para recortes urbanos mais afastados do centro, para além da tradicional comparação entre centro urbano e rural, o volume de trabalhos produzidos, os termos mais recorrentes, as variáveis térmicas mais exploradas e o impacto destes estudos nos âmbitos regionais ou mundiais: tópicos considerados cruciais para

entendimento das lacunas neste campo de pesquisa e que permitem filtrar os trabalhos de maior impacto na área.

Uma das definições de ICU, segundo Oke *et al.* (1991), refere-se ao calor característico de uma cidade ou centro urbano, consequência da intervenção humana na superfície, com impacto nas propriedades atmosféricas. A explicação para o termo advém do fato de que os padrões isotérmicos do ar próximo à superfície se assemelham aos contornos de uma ilha, já que o calor relativo da cidade se projeta distintamente para fora do 'mar' fresco da paisagem circundante. Portanto, se refere às diferenças entre as temperaturas de estações urbanas e rurais, ou como Gartland (2010) prefere denominar “oásis inverso”, em que o ar e as temperaturas da superfície são mais elevadas do que em áreas rurais próximas.

A partir da década de 1920, os estudos do clima urbano ficaram mais criteriosos com a incorporação de técnicas para aferição da variação da temperatura, do vento, da radiação e da umidade no ambiente urbano. Entre as diversas técnicas aplicadas, se destacaram os transectos móveis e o monitoramento experimental temporário, por meio de estações meteorológicas, para a coleta de informações sobre a configuração espacial da temperatura do ar no espaço urbano (Fialho, 2009).

Além dos países desenvolvidos, citados em estudos de Mondal, Mishra (2021), Wehrli, Hauser, Sevevirane (2019), países em desenvolvimento passaram a ser foco de estudos sobre o impacto da crescente urbanização e industrialização no ambiente, na saúde, na qualidade do ar, no conforto dos moradores (Guo *et al.*, 2020). Huang e Wang (2019) alertam para o fato de que as atividades antropogênicas estão transformando as sociedades de matriz agrícola em sociedades industriais e conseqüentemente, alterando o uso e a cobertura do solo, aumentando a impermeabilização das superfícies e causando alterações no balanço energético. Arelada a estas condições, tem-se a alta densidade construtiva, a escassez de vegetação urbana, o excessivo uso de materiais construtivos com baixa reflexividade e alta capacidade de retenção de calor, que impactam significativamente no clima urbano, e contribuem para a formação de ICUs principalmente nas primeiras horas da noite (Oke, 1982; Gartland, 2010).

O acúmulo de calor deve-se principalmente à estrutura e à geometria urbana que favorecem o aprisionamento de calor e alteram significativamente o microclima urbano (Yang *et al.*, 2018). Materiais construtivos, como o concreto e o asfalto, absorvem calor durante o dia e o liberam lentamente à noite, causando um aumento na temperatura do ar ao redor, se comparado a locais onde estes materiais não estão presentes. Tal fenômeno é frequentemente registrado em várias cidades do mundo como Jharsuguda/Índia, Hanoi/Vietnam, onde os processos de mineração, alta densidade construída e atividades

industriais são responsáveis por temperaturas noturnas elevadas (Singh; Mahadevan, 2017; Bechtel *et al.*, 2019).

Percebe-se o amplo interesse dos pesquisadores em comparar regiões distintas do ponto de vista de ocupação do solo, dos níveis de impermeabilização e vegetação (Akbari; Pomerantz; Taha, 2001; Weng; Lu; Schubring, 2004), geralmente, rural e centros urbanos.

Chen *et al.* (2006) utilizaram sensoriamento remoto, via imagens de Landsat de 1990 a 2000, para verificar o impacto de configurações espaciais diversificadas, sujeitas à sazonalidade do uso e ocupação do solo na intensidade da ICU, em uma região da China, cujo processo de urbanização ocorreu rapidamente. Os pesquisadores verificaram que o fenômeno ocorre com maior intensidade em regiões com solo descoberto ou semi-descoberto. Já Chen e Boomsma (2023) estudaram as ondas de calor nos Estados Unidos durante o verão de 2021 e demonstraram que as interações da escala atmosférica e a dinâmica espaço-temporal contribuem para o aumento da temperatura do ar em toda região, tanto ambientes urbanos quanto rurais.

Em microescala, dentro dos próprios espaços urbanizados, existem diferentes zonas com características intrínsecas que certamente interferem nas variáveis microclimáticas, ambientais e espaciais. Stewart e Oke (2012) propuseram a classificação do espaço urbano e rural em Local Climate Zones (LCZs) visando parametrizar e oferecer subsídios para o estudo do impacto de cada zona no microclima urbano, por exemplo. Os espaços industriais, objetos deste estudo são caracterizados por edificações horizontais, de até 2 pavimentos, alto percentual de área impermeabilizada, amplo uso de concreto e asfalto na pavimentação. Genericamente, tais áreas podem ser classificadas como LCZ 8 (Stewart, Oke, 2012).

Sob a ótica do crescimento urbano atual, torna-se evidente a importância dos distritos industriais no desenvolvimento econômico de uma cidade. Contudo qual seria o impacto destas extensas áreas, em geral localizadas nas periferias, no microclima urbano?

Este trabalho é dedicado à exploração dos conceitos de ilhas de calor urbano, mais especificamente em “distritos industriais”, através de uma revisão sistemática de literatura acerca de estudos já produzidos sobre o tema.

## **2 Objetivos – Artigo 1**

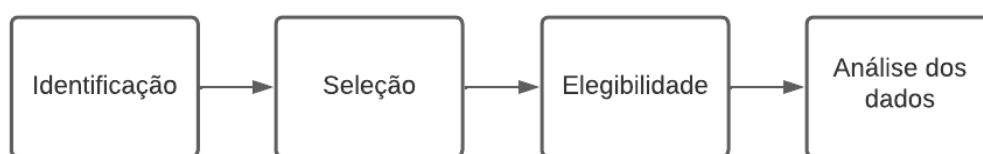
O objetivo primordial deste artigo é desenvolver uma revisão sistemática da literatura dedicada aos estudos sobre Ilhas de Calor Urbano e o impacto dos distritos industriais no microclima urbano.

### 3 Método – Artigo 1

Foram analisadas a relevância e a contribuição regional e global da produção científica; os métodos utilizados para o estudo; as variáveis associadas e os softwares mais utilizados.

Primeiramente, a revisão sistemática da literatura visa avaliar quantitativamente a produção acadêmica relacionada aos estudos conceituais e empíricos sobre ICUs em distritos industriais. As etapas para o desenvolvimento da pesquisa são apresentadas na figura 2, a exemplo de Fernandes e Masiero (2021).

Figura 2: Etapas da realização da pesquisa



#### 3.1. Identificação

Na fase de identificação, a abordagem adotada para consulta à literatura científica consistiu na busca pelas palavras que melhor representassem o tema da pesquisa. As palavras-chave foram utilizadas para filtrar a biblioteca Scopus ([www.scopus.com](http://www.scopus.com), acessado em 06 de julho de 2023), considerado um dos bancos de dados da literatura científica revisado por pares mais abrangentes do mundo (Viana *et al.*, 2017). Foram selecionadas as seguintes palavras-chave: “Urban Heat Islands” e posteriormente “Urban Heat Islands” e “industrial areas”.

#### 3.2. Seleção

Após a definição das palavras, foram inseridos os termos na base de dados Scopus para pesquisa realizada no dia 06 de julho de 2023, considerando todo o período disponível na plataforma (1967 a 2023) que retornou 9096 artigos ao todo, sendo 1827 textos de conferências, 432 capítulos de livros e 383 livros para o termo “Urban Heat Islands”; enquanto para os termos “Urban Heat Islands” e “industrial areas”, o período de registros foi de 1985 a 2023 e foram encontrados 87 artigos e 21 textos de conferências. Os estudos foram elencados conforme o número de citações recebidas até o ano de 2023.

#### 3.3. Elegibilidade

Para a análise da produção de maior relevância, manteve-se o período de pesquisa e restringiu-se a pesquisa para os artigos completos publicados em português ou inglês.



Foram lidos os títulos, resumos e conclusões dos 87 artigos e foram selecionados apenas aqueles cujo conteúdo estava diretamente relacionado às ICUs e distritos industriais. Os dados foram exportados para um arquivo na extensão BibTeX (.bib).

### 3.4. Análise dos dados

Foi utilizada a plataforma web Biblioshiny integrada ao software R, capaz de realizar análises abrangentes de mapeamento da produção científica, apresentando os resultados em gráficos e tabelas de acordo com princípios propostos por Aria e Cuccurullo (2017).

Após carregar a biblioteca Biometrix na plataforma Biblioshiny, com o comando “library (biometrix)” no software R, foi executado o comando “Biblioshiny ()”. Os dados previamente salvos via Scopus no formato. bib foram carregados em uma página na web e analisados sob a óptica da Estatística Multivariada através da Análise de Componentes Principais (PCA), integrada à plataforma Biblioshiny, que transformam um conjunto de variáveis originais em outros de mesma dimensão. Os dados são agrupados de acordo com sua variância e geralmente os dois primeiros componentes principais abrangem 70% dos dados e explicam a maior parte da variabilidade dos dados (Hongyu; Sandanielo; Junior, 2016).

Diante da vasta possibilidade de análise de indicadores utilizando a ferramenta supracitada, optou-se por verificar: (a) relevância da produção científica; (b) contribuição regional e global; (c) os métodos e os softwares utilizados para estudo das ICUs e (d) as variáveis associadas ao estudo do microclima industrial.

## 4 Resultados e discussão – Artigo 1

Esta seção está dividida em subtítulos para fornecer uma descrição organizada, concisa e precisa dos resultados e sua interpretação e discussão.

### 4.1 Relevância da produção científica

A partir da pesquisa de artigos publicados com o tema "Urban Heat Islands" na plataforma Scopus, foram encontrados cerca de 8700 artigos completos publicados desde 1967 até 2023, sendo os dez mais citados em ordem decrescente apresentados no quadro 1.

Quadro 1 - Autores mais citados

Autor(es)	Ano	Título	Número de citações
Arnfield	2003	Two decades of urban climate research: A review of turbulence,	2329

		exchanges of energy and water, and the urban heat island	
Stewart, Oke	2012	Local climate zones for urban temperature studies	2118
Voogt, Oke	2003	Thermal remote sensing of urban climates	2005
Oke	1982	The energetic basis of the urban heat island	2004
Weng	2004	Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relation Uespip for urban heat island studies	1757
Oke	1973	City size and the urban heat island	1650
Gill, Handley, Ennis, Pauleit	2007	Adapting cities for climate change: The role of the green infrastructure	1226
Chen, Zhao, Li, Yin	2006	Remote sensing image-based analysis of the relation Uespip between urban heat island and land use/cover changes	1207
Akbari, Pomerantz, Taha	2001	Cool surfaces and Uespade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas	1206
Yuan, Bauer	2007	Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery	1150

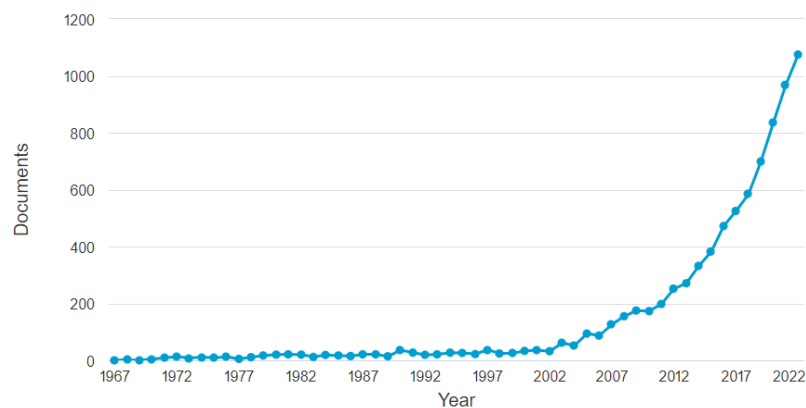
Fonte: Scopus, 2023

Dentre os artigos mais citados, destaca-se Arnfield (2003) que faz uma ampla revisão da climatologia urbana ao longo de duas décadas desde a primeira publicação, abordando aspectos da troca de calor e da temperatura urbana. Já o estudo publicado por Stewart e Oke (2012) foi um marco no estudo do microclima urbano, ao propor uma parametrização do espaço urbano classificado em Local Climate Zones (LCZs) de acordo com sua caracterização física.

Silva *et al.* (2018) ressaltam que os softwares de informações geográficas e outros capazes de simular as condições ambientais de ambientes construídos contribuíram para o avanço das pesquisas em conforto térmico e planejamento urbano, a partir do final do século XX. De fato, percebe-se na figura 3, que a quantidade de artigos publicados com a temática manteve-se constante do final da década de 1960 até início dos anos 2000, e desde então, o tema se manteve em ascensão.

Este comportamento pode estar relacionado ao rápido desenvolvimento tecnológico, com o advento de equipamentos modernos, acesso dos pesquisadores a satélites potentes, a computadores com maior capacidade de processamento e talvez o mais importante: a preocupação com as mudanças climáticas acompanhada da pressão das organizações ambientais, entre elas a Organização das Nações Unidas (ONU) para implementação de medidas mitigadoras dos efeitos das atividades antrópicas no ambiente natural, em especial, no aumento da temperatura do ar e tornar as cidades “inclusivas, seguras resilientes e sustentáveis contribuindo para o cumprimento do 11º Objetivo de Desenvolvimento Sustentável da ONU (ONU, 2015).

Figura 3: Produção científica anual sobre “Urban Heat Islands”

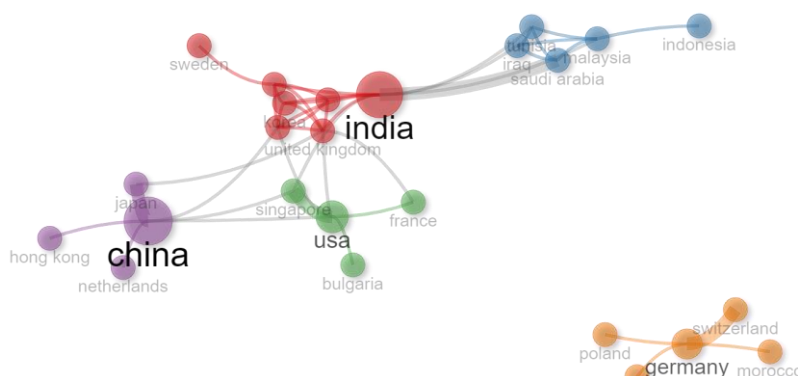


Fonte: Scopus (2023)

#### 4.2 Contribuição regional e global

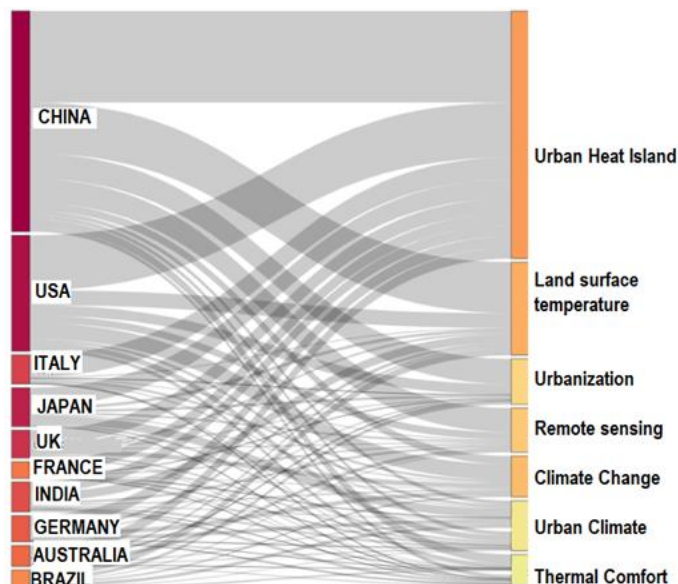
A rede de colaboração entre os países é apresentada na figura 4 utilizando o Bibliometrix. A rede de conexão tem 20 nós interligados por 31 links: existe uma forte ligação entre os pesquisadores chineses e indianos e destes com países europeus e os Estados Unidos. Todavia, os pesquisadores alemães se encontram em um nó isolado, mantendo contribuições apenas com a Polônia, Suíça e Marrocos.

Figura 4: Rede de conexão entre os pesquisadores de diferentes países



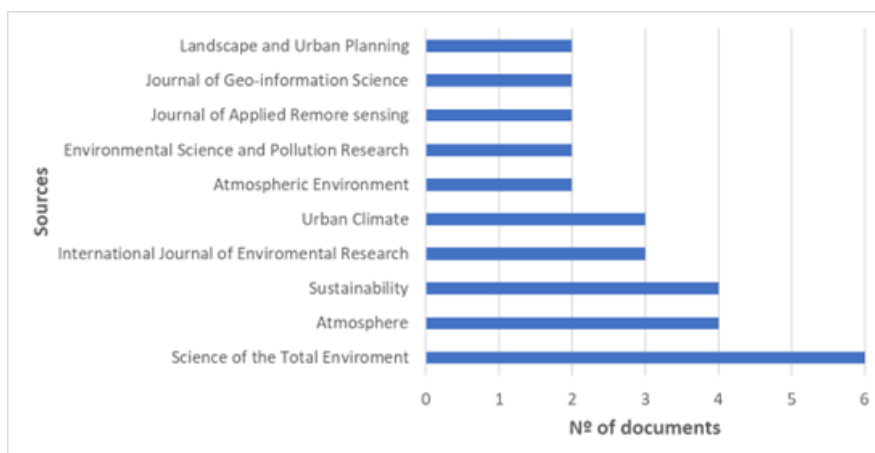
Quanto à produção científica por país, a China domina o ranking sobre o tema, sendo os 10 autores que mais publicam sobre esse tema pertencentes ao país, como pode ser visto na Figura 5. O Brasil aparece em 10ª posição e abarca todos os principais temas deste o conforto térmico ao estudo mais amplo para caracterização das ICUs.

Figura 5: Produção científica por país, tema principal e autores



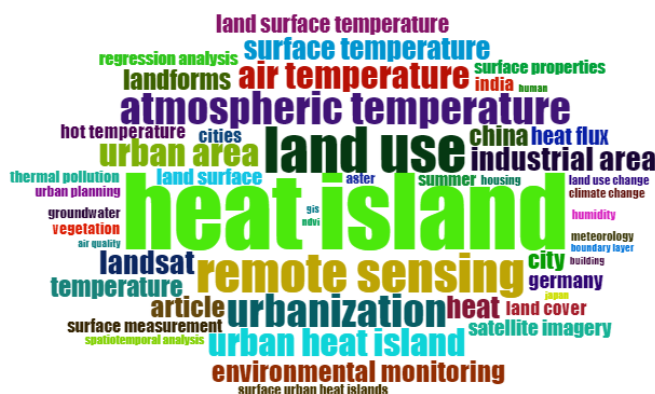
As dez revistas que mais publicam artigos sobre o tema são elencadas na figura 6, lideradas pela revista *Science of Total Environment*, seguido por *Atmosphere* e *Sustainability*.

Figura 6: Publicação por revista



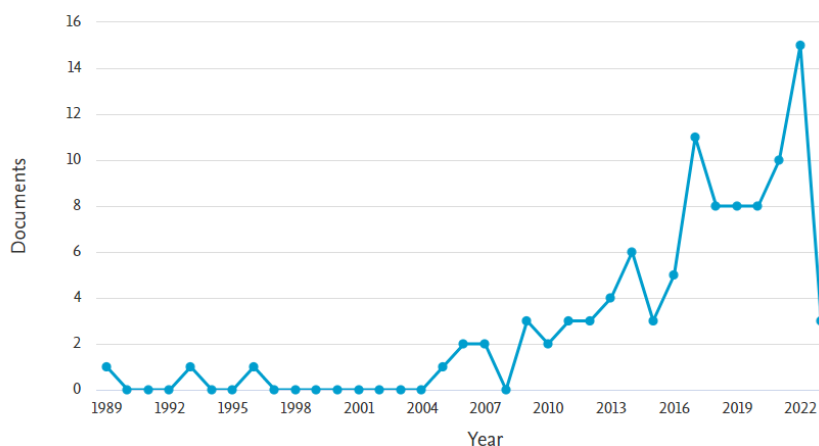
Na figura 7 são apresentados os termos mais recorrentes nos estudos referentes às ICUs, com destaque para uso do solo, temperatura atmosférica, sensoriamento remoto e área industrial.

Figura 7: Frequência de termos nos estudos



Restringindo a pesquisa aos termos “Urban Heat Islands” e “industrial areas”, comparado à primeira pesquisa, tal temática apresenta poucos estudos, cerca de 87 artigos ao longo de anos 1985 a 2023 segundo plataforma Scopus. A produção ao longo dos anos é apresentada na Figura 8. Percebe-se que foram necessárias quase duas décadas para que o tema se destacasse mesmo de forma discreta até seu ápice em 2022.

Figura 8: Produção científica sobre ICUs em distritos industriais desde 1985



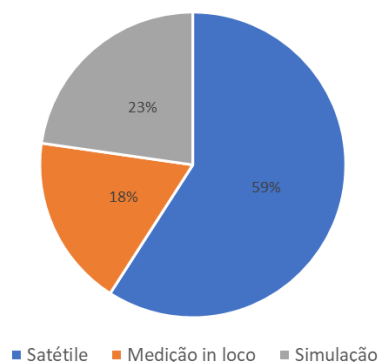
Seguindo a mesma tendência apresentada anteriormente, a China destaca-se na pesquisa do tema, porém o Brasil não aparece como um dos dez primeiros países com produção mais relevante.

#### 4.3 Métodos e softwares utilizados para estudo das ICUs

Na figura 9 são apresentados os métodos mais utilizados nas pesquisas de identificação das ICUs em distritos industriais. O sensoriamento remoto é o método mais difundido entre os pesquisadores cujo objetivo é correlacionar a temperatura da superfície (LST) e a intensidade de ICUs em grandes centros urbanos, pioneiramente utilizado por Roth, Oke e Emery (1989) para identificação de padrões térmicos em três cidades costeiras (Vancouver, Seattle e Los Angeles), expandindo para Índia (Choudhury; Das;

Das, 2021), Israel (Rotem-Mindali *et al.*, 2015), Espanha (Lemus-Canovas *et al.*, 2020). Tal método foi utilizado também para estudo das trocas térmicas (Kato; Yamaguchi, 2005, 2007) e o efeito da superfície impermeabilizada nas ICUs (Mallick; Rahman; Singh, 2013).

Figura 9: Metodologias apresentadas nos estudos



Processos de modelagem e simulações computacionais se destacam nos seguintes trabalhos de maior relevância, segundo o Scopus: Chow *et al.* (2014), que estudaram o fluxo de calor antropogênico em diversos bairros de Phoenix, com ênfase para as regiões industriais e comerciais; Yilmaz, Mutlu e Yilmaz (2018) que propuseram cenários alternativos visando planejamento urbano ecológico usando o software ENVI-met; Žuvela-Aloise *et al.* (2018) estudaram a mudança dos telhados tradicionais para telhados verdes e com alto albedo como medida mitigadora para o efeito das ICUs, principalmente em áreas industriais.

Dos trabalhos supracitados, nota-se a tendência do estudo das condições microclimáticas por meio de simulações computacionais, seguidas de validação através de medições *in loco* e ajustes de modelos matemáticos considerando as características ocupacionais de um determinado local. A escolha de um método em detrimento dos outros depende das variáveis a serem abordadas e das limitações de cada método de análise.

Todavia, para se utilizar a simulação computacional como ferramenta para estimativa das ICUs deve-se atentar ao fato de que os resultados do modelo dependem fortemente de condições de contorno definidas no arquivo de configuração, que afetam os resultados da simulação (Croce *et al.*, 2021).

Amorim (2019) explica que o cálculo da intensidade da ICU é realizado comparando-se a temperatura do ar urbana e rural, devido ao fato de não ser possível avaliar as alterações climáticas ocorridas desde os primórdios da ocupação humana.

Assim, o meio rural é considerado menos afetado pelas transformações antrópicas e portanto, mais próximo da versão original, se comparado ao meio urbano.

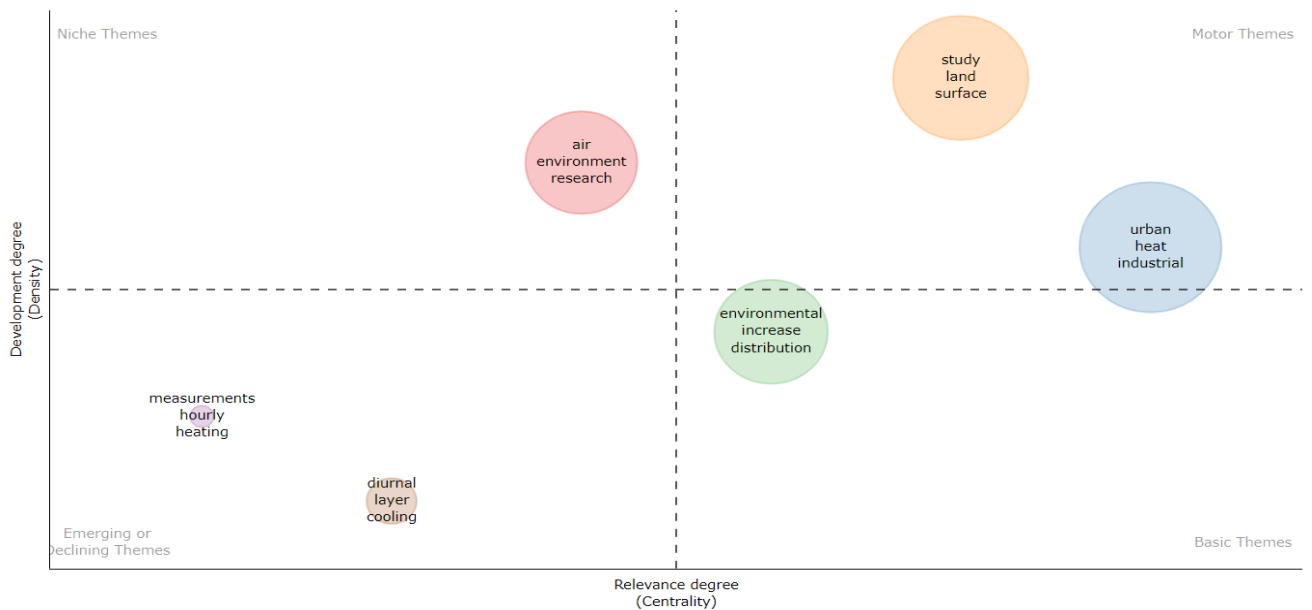
A rigor, Martilli, Krayenhoff e Nazarian (2020) explicam frequentemente, a intensidade de ICU é considerada a quantificação do calor extra adicionado à atmosfera pela cidade. Isso é frequentemente ilustrado com uma analogia com a mudança climática (global). Essa abordagem é viável porque não apenas confirma que os seres humanos, por meio do desenvolvimento urbano, influenciam o clima local, mas também quantifica o efeito sobre a temperatura. No entanto, para os autores, aprofundar os estudos na literatura sobre ICU tem-se dúvidas sobre se a intensidade da ICU, como muitas vezes é definida e medida, representa o verdadeiro impacto urbano.

Primeiro, a temperatura medida em uma área rural próxima a uma cidade não é necessariamente a temperatura que teria sido medida se a cidade não existisse. Os impactos urbanos nas áreas rurais próximas estão se tornando cada vez mais difundidos, devido à indefinição dos limites urbanos e assim, os locais rurais mais próximos são frequentemente agrícolas e, portanto, fortemente modificados pelo homem. Escolher um estado atmosférico passado como referência, como é feito para as mudanças climáticas globais e sugerido no início dos estudos de ICU, raramente é possível devido à falta de dados. Portanto, uma referência adequada para avaliação do calor extra adicionado pela cidade pode ser difícil de determinar. Em suma, os autores indicam fortemente estudar a formação de ICU comparando duas LCZs distintas de uma mesma cidade (Martilli, Krayenhoff; Nazarian, 2020).

#### *4.4 Variáveis associadas ao estudo do microclima industrial*

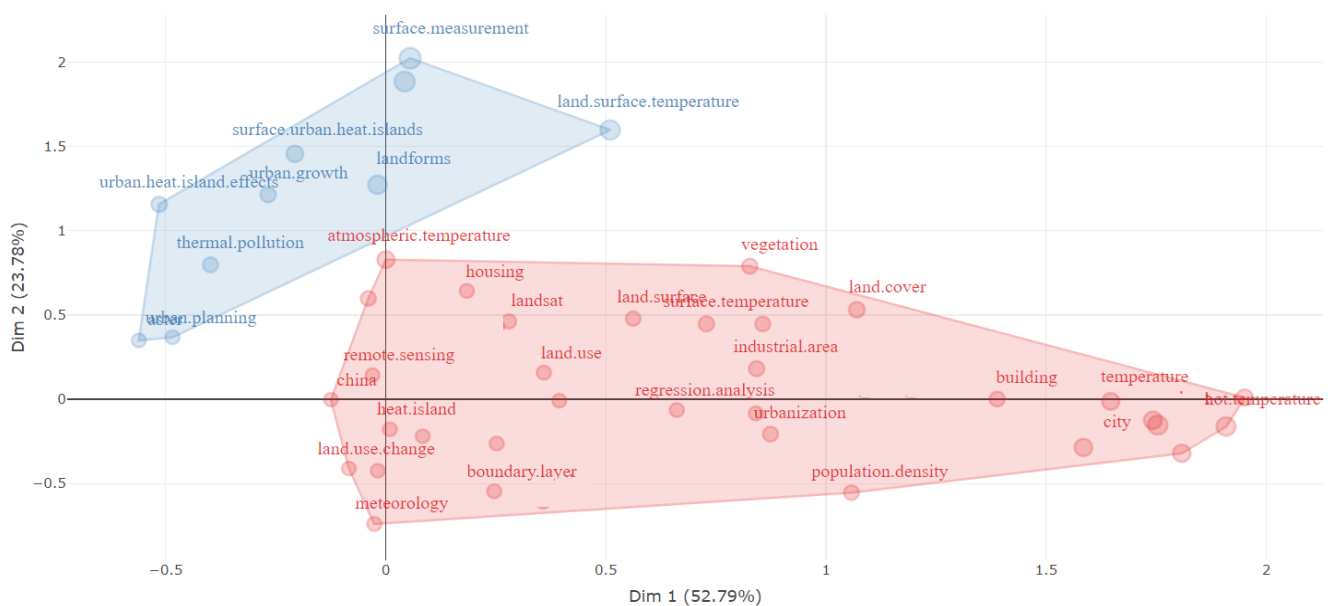
Na figura 10 é apresentada a correlação do tema ICU em distritos industriais e outros temas como o uso e cobertura do solo, temperatura do ar e ocupação do ambiente, apontadas como palavras recorrentes nos artigos (figura 7) e confirmadas nesta análise: quanto mais próximos do centro e maiores os círculos, maior a correlação existente.

Figura 10: Correlação do tema ICU em distritos industriais e outros temas a partir dos termos buscados



Aprofundando o estudo, pode-se proceder com a análise fatorial das principais palavras recorrentes nos resumos dos artigos: os componentes principais 1 e 2 correspondem a aproximadamente 80% da variância dos dados analisados. O termo “heat island” encontra-se fortemente relacionado aos termos “air temperature”, “land use surface” e “urbanization”. De fato, ao pesquisar os artigos pode-se observar a tendência a estudar as ICUs em distritos industriais correlacionando com a temperatura superficial (Pearsall, 2017; Tran *et al.*, 2017; Singh *et al.*, 2022; Bechtel *et al.*, 2019; Meng *et al.*, 2022).

Figura 11: Análise fatorial dos componentes principais referentes aos temas abordados





## 5 Considerações finais – Artigo 1

Com base na revisão sistemática de literatura realizada pode-se concluir que a quantidade de trabalhos que correlacionam as ICUs e distritos industriais é ínfima se comparada ao amplo estudo das ICUs no ambiente urbano como um todo, especialmente associado à influência do uso e ocupação do solo na temperatura superficial e consequentemente nas ICUs.

No quadro 2, são apresentados os trabalhos que se dedicaram ao estudo a intensidade de ICU em distritos industriais e residenciais: Li *et al.* (2013), Henits, Mucsi, Liska (2017), Milodrvic *et al.* (2022), Mohan *et al.* (2020) e Keeratikasikorn, Bonafoni (2018) cujos resultados de intensidade de ICU variam de 1,76°C a 3°C e 1,35°C a 3,84°C, respectivamente. Todavia, os estudos focados somente nos distritos industriais apontam intensidade de ICU de 4°C a 9°C (Mallick, URaman e Singh, 2013; Singh, Mohan, Bati, 2023; Betchel *et al.* 2019). No Brasil, os estudos focam na diferença das ICUs registradas ao longo de um trecho atingindo máxima de 7°C para ambientes densamente construídos (Megda, Masiero, 2021).

Quadro 2 – Intensidade de ICUs registradas

<b>Autor(es)</b>	<b>Local</b>	<b>Método</b>	<b>Industrial</b>	<b>Residencial</b>	<b>Máxima</b>
Mallick, URaman e Singh (2013)	Delhi-India	Sensoriamento remoto	4°C	—	—
Li <i>et al.</i> (2013)	Cingapura	Simulação numérica	2,4°C	1,5°C	—
Holt, Pullen (2007)	Nova York	Simulação numérica	—	2,2°C	—
Henits, Mucsi, Liska (2017)	Hungria	Sensoriamento remoto	1,76°C	1,35° - 1,69°C	—
Milodrvic <i>et al.</i> (2022)	Sérvia	Estações meteorológicas	2°C - 3°C	2°C	—
Mohan <i>et al.</i> (2020)	Índia	Sensoriamento remoto	2,52°C	2,13°C	—
Singh, Mohan, Bati (2023)	Índia (Angul - Talcher)	Simulação numérica	7°-9°C	—	—
Nichol, Wong (2008)	Hong Kong	Sensoriamento remoto e estações meteorológicas	—	2°C - 3,5°C	—
Betchel <i>et al.</i> (2019)	Los Angeles	Sensoriamento remoto	7,8°C	—	—
Keeratikasikorn, Bonafoni (2018)	Tailândia	Sensoriamento remoto	2,7°C	3,84°C	—
Oliveira <i>et al.</i> (2021)	Lisboa/PT	Sensoriamento remoto	—	4°C	—
Megda, Masiero (2021)	Franca/BR	Transecto móvel	—	—	7°C
Silva <i>et al.</i> (2017)	Uberlândia/BR	Transecto móvel	—	—	2,2°C

Valverde <i>et al.</i> (2020)	ABC Paulista/BR	Estações meteorológicas	—	—	3,7°C
Cardoso, Amorin (2018)	Presidente Prudente/BR	Transecto móvel	—	—	5°C
Galusic (2019)	São Carlos/SP	Estações meteorológicas	—	—	6,4°C

A RSL se mostrou eficiente servindo como base para a pesquisa bibliográfica, permitindo avaliar a evolução da temática ao longo dos anos e fornecendo subsídios para novas pesquisas ao identificar as lacunas na produção bibliográfica.

Nota-se a presença dos pesquisadores brasileiros em temas de pesquisa amplos que abarcam desde o estudo dos fatores que influenciam as ICUs até o estudo dos índices de conforto térmico. Porém, quando a pesquisa é restrita a estudos que associam as ICUs aos distritos industriais, o Brasil não configura na lista. Tal constatação corrobora a necessidade de ampliação do estudo das ICUs considerando o impacto dos distritos industriais sobre o microclima urbano brasileiro.

Verificou-se que a maioria dos estudos de ICUs em distritos industriais aborda o tema relacionando-o à temperatura superficial, porém, quais as outras variáveis poderiam ter impacto neste microclima? Qual a influência de cada fator de contribuição às ICUs?

O próximo passo será o desenvolvimento de uma pesquisa comparando dois distritos industriais presentes em locais com climas diferentes para identificar o impacto de cada variável no microclima e seu impacto no entorno urbano.

Na inexistência de ambientes “totalmente” rurais, ou seja, isentos de interferência humana, faz-se necessário incluir no estudo das ICUs, outras LCZs, além da LCZ 8, como por exemplo uma LCZ 3, residencial. Seguindo a tendência das pesquisas na área, pretende-se coletar dados *in loco* para calibração de modelos de simulação utilizando o software ENVI-met em recortes urbanos centrais e industriais e comparação dos resultados.

## Referências

AKBARI, H.; POMERANTZ, M.; TAHA, H. Cool surfaces and Uespade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. **Solar Energy**, vol. 70, no. 3, p. 295–310, 2001. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X0000089X>. Acessado em: 20 Aug. 2023.

AMORIM, M. C. D. C. T. Ilhas de calor urbanas: métodos e técnicas de análise. **Revista Brasileira de Climatologia**, 15 Jun. 2019. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/65136>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. Bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, vol. 11, no. 4, p. 959–975, Nov. 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1751157717300500>. Acessado em: 20 Aug. 2023.

ARNFIELD, A. J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **International Journal of Climatology**, vol. 23, no. 1, p. 1–26, Jan. 2003. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.859>. Acessado em: 20 Aug. 2023.

BECHTEL, B. *et al.* SUHI analysis using Local Climate Zones—A comparison of 50 cities. **Urban Climate**, vol. 28, p. 100451, Jun. 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212095519300239>. Acessado em: 20 Aug. 2023.

CHEN, K.; BOOMSMA, J.; HOLMES, H. A. A multiscale analysis of heatwaves and urban heat islands in the western U.S. during the summer of 2021. **Scientific Reports**, vol. 13, no. 1, p. 9570, 13 Jun. 2023. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-35621-7>. Acessado em: 20 Aug. 2023.

CHEN, X.-L. *et al.* Remote sensing image-based analysis of the relation between urban heat island and land use/cover changes. **Remote Sensing of Environment**, vol. 104, no. 2, p. 133–146, Sep. 2006. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425706001787>. Acessado em: 20 Aug. 2023.

CHOUDHURY, D.; DAS, A.; DAS, M. Investigating thermal behavior pattern (TBP) of local climatic zones (LCZs): A study on industrial cities of Asansol-Durgapur development area (ADDA), eastern India. **Urban Climate**, vol. 35, 2021. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85097468539&doi=10.1016%2Fj.uclim.2020.100727&partnerID=40&md5=3b7885ddb861701b3299cc9c6edd2b28>.

CHOW, W. T. L. *et al.* A multi-method and multi-scale approach for estimating city-wide anthropogenic heat fluxes. **Atmospheric Environment**. Elsevier Ltd, 2014. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84907691916&doi=10.1016%2Fj.atmosenv.2014.09.053&partnerID=40&md5=c44eb76fb6c2d3f0563f8a0ad38082d9>.

CROCE, S. *et al.* The Use of Cool Pavements for the Regeneration of Industrial Districts. **Sustainability**, vol. 13, no. 11, p. 6322, 2 Jun. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/11/6322>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

FERNANDES, M. E.; MASIERO, É. A Poluição Sonora no Contexto do Desenvolvimento Sustentável: Uma Análise Bibliométrica. *In*: III Simpósio Nacional de Gestão e Engenharia Urbana [SINGEURB 2021], 20 Dec. 2021. Maceió, Brasil. 20 Dec. 2021. p. 151–160. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/singeurb/article/view/860>. Acessado em: 23 Sep. 2023.

FIALHO, E. S. **Ilha de calor em cidade de pequeno porte: Caso de Viçosa, na Zona da Mata Mineira**. 2009. Doutorado em Geografia Física – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-22022010-154045/>. Acessado em: 20 Aug. 2023.

GARTLAND, L. **Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**. 1ª. Editora Oficina de Textos, 2010.

GRANT, M. J.; BOOTH, A. A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. **Health Information and Libraries Journal**, v. 26, n. 2, p. 91–108, jun. 2009. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19490148>. Acesso em: 28 ago. 2021.

GUO, A. *et al.* Influences of urban spatial form on urban heat island effects at the community level in China. **Sustainable Cities and Society**, vol. 53, p. 101972, Feb. 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2210670719320062>. Acessado em: 20 Aug. 2023.

HENITS, L.; MUCSI, L.; LISKA, C. M. Monitoring the changes in impervious surface ratio and urban heat island intensity between 1987 and 2011 in Szeged, Hungary. **Environmental Monitoring and Assessment**, vol. 189, no. 2, p. 86, Feb. 2017. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s10661-017-5779-8>. Accessed on: 25 Sep. 2023.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; JUNIOR, G. J. D. O. Análise de Componentes Principais: Resumo Teórico, Aplicação e Interpretação. **E&S Engineering and Science**, vol. 5, no. 1, p. 83–90, 29 Jun. 2016. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/eng/article/view/3398>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

HUANG, X.; WANG, Y. Investigating the effects of 3D urban morphology on the surface urban heat island effect in urban functional zones by using high-resolution remote sensing data: A case study of Wuhan, Central China. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 152, p. 119–131, Jun. 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924271619301066>. Acessado em: 20 Aug. 2023.

KATO, S.; YAMAGUCHI, Y. Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux. **Remote Sensing of Environment**. 2005. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-27144526615&doi=10.1016%2Fj.rse.2005.04.026&partnerID=40&md5=aea3d287849f9cac9e49fa1ed309310d>.

KATO, S.; YAMAGUCHI, Y. Estimation of storage heat flux in an urban area using ASTER data. **Remote Sensing of Environment**. 2007. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-34447537962&doi=10.1016%2Fj.rse.2007.02.011&partnerID=40&md5=030806510c116845aaaed620c02864a2>.

KEERATIKASIKORN, C.; BONAFONI, S. Urban Heat Island Analysis over the Land Use Zoning Plan of Bangkok by Means of Landsat 8 Imagery. **Remote Sensing**, vol. 10, no. 3, p. 440, 11 Mar. 2018. Available at: <http://www.mdpi.com/2072-4292/10/3/440>. Accessed on: 16 Sep. 2023.

LEMUS-CANOVAS, M. *et al.* Estimating Barcelona's metropolitan daytime hot and cold poles using Landsat-8 Land Surface Temperature. **Science of the Total Environment**. Elsevier B.V., 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0->

85072022629&doi=10.1016%2fj.scitotenv.2019.134307&partnerID=40&md5=5c9449b554d06c468a602aa43cbe7d67.

LI, X.-X. *et al.* A multi-resolution ensemble study of a tropical urban environment and its interactions with the background regional atmosphere: STUDY OF TROPICAL URBAN ENVIRONMENT. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, vol. 118, no. 17, p. 9804–9818, 16 Sep. 2013. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1002/jgrd.50795>. Accessed on: 25 Sep. 2023.

MALLICK, J.; RAHMAN, A.; SINGH, C. K. Modeling urban heat islands in heterogeneous land surface and its correlation with impervious surface area by using night-time ASTER satellite data in highly urbanizing city, Delhi-India. **Advances in Space Research**. Elsevier Ltd, 2013. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84879843557&doi=10.1016%2fj.asr.2013.04.025&partnerID=40&md5=62134778964e7ab7f063ab02fdd9ecb5>.

MARTILLI, A.; KRAYENHOFF, E. S.; NAZARIAN, N. Is the Urban Heat Island intensity relevant for heat mitigation studies? **Urban Climate**, vol. 31, 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85074173799&doi=10.1016%2fj.uclim.2019.100541&partnerID=40&md5=92416a3bd16878cddb8a5cb2bcfec2>.

MEGDA, O. R.; MASIERO, E. Análise das Ilhas de Calor Urbano sobre Zonas Climáticas Locais com o uso de VANT - Veículo Aéreo Não Tripulado - em uma cidade média. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, vol. 13, p. e20200333, 2021. Available at: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2175-33692021000100280&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2175-33692021000100280&tlng=pt). Accessed on: 16 Sep. 2023.

MENG, Q. *et al.* Do industrial parks generate intra-heat island effects in cities? New evidence, quantitative methods, and contributing factors from a spatiotemporal analysis of top steel plants in China. **Environmental Pollution**, vol. 292, p. 118383, Jan. 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0269749121019655>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

MILOŠEVIĆ, D. *et al.* Analysis of air temperature dynamics in the “local climate zones” of Novi Sad (Serbia) based on long-term database from an urban meteorological network. **International Journal of Biometeorology**, vol. 66, no. 2, p. 371–384, Feb. 2022. Available at: <https://link.springer.com/10.1007/s00484-020-02058-w>. Accessed on: 25 Sep. 2023.

MONDAL, S.; MISHRA, A. K. Complex Networks Reveal Heatwave Patterns and Propagations Over the USA. **Geophysical Research Letters**, vol. 48, no. 2, 28 Jan. 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2020GL090411>. Acessado em: 20 Aug. 2023.

MOHAN, M. *et al.* Industrial heat island: a case study of Angul-Talcher region in India. **Theoretical and Applied Climatology**, vol. 141, no. 1–2, p. 229–246, Jul. 2020. Available at: <https://link.springer.com/10.1007/s00704-020-03181-9>. Accessed on: 25 Sep. 2023.

OKE, T. R. *et al.* **Urban climates**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

OKE, T. R. *et al.* Simulation of surface urban heat islands under ideal conditions at night part 2: Diagnosis of causation. **Boundary-Layer Meteorology**, vol. 56, no. 4, p. 339–

358, Sep. 1991. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/BF00119211>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, vol. 108, no. 455, p. 1–24, Jan. 1982. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.49710845502>. Acessado em: 17 Sep. 2023.

ONU Organização das Nações Unidas. (2015). The 17 goals | Sustainable Development. United Nations - Department of Economic and Social Affairs Sustainable Development. Disponível em: <https://sdgs.un.org/goals>.

PEARSALL, H. Staying cool in the compact city: Vacant land and urban heating in Philadelphia, Pennsylvania. **Applied Geography**, vol. 79, p. 84–92, Feb. 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S014362281630827X>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

ROTEM-MINDALI, O. *et al.* The role of local land-use on the urban heat island effect of Tel Aviv as assessed from satellite remote sensing. **Applied Geography**. Elsevier Ltd, 2015. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84919822861&doi=10.1016%2fj.apgeog.2014.11.023&partnerID=40&md5=87bdc5859db9a74524b8e8bf154d05da>.

ROTH, M.; OKE, T. R.; EMERY, W. J. Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. **International Journal of Remote Sensing**. 1989. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0024856054&doi=10.1080%2f01431168908904002&partnerID=40&md5=4d52d3183f2c5dd335f56096c3d4b684>.

SILVA, V. J. da *et al.* Mobile transect for identification of intra-urban heat islands in Uberlandia, Brazil. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, vol. 13, no. 4, p. 1, 5 Jul. 2018. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1980-993X2018000400303&lng=en&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1980-993X2018000400303&lng=en&nrm=iso&tlng=en). Acessado em: 11 Apr. 2023.

SINGH, P.; MAHADEVAN, B. **Heat Island Effect in an Industrial Cluster – Identification, Mitigation and Adaptation**. The Energy and Resources Institute, 2017.

SINGH, V. K. *et al.* Numerical simulation of the impact of urban canopies and anthropogenic emissions on heat island effect in an industrial area: A case study of Angul-Talcher region in India. **Atmospheric Research**. Elsevier Ltd, 2022. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85133215351&doi=10.1016%2fj.atmosres.2022.106320&partnerID=40&md5=2d5865b9128f095fdf0c7b61824d5d71>.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, vol. 93, no. 12, p. 1879–1900, 1 Dec. 2012. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

TRAN, D. X. *et al.* Characterizing the relationUespip between land use land cover change and land surface temperature. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 124, p. 119–132, Feb. 2017. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924271617300035>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

VIANA, J. *et al.* Remote Sensing in Human Health: A 10-Year Bibliometric Analysis. **Remote Sensing**, vol. 9, no. 12, p. 1225, 28 Nov. 2017. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2072-4292/9/12/1225>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

WEHRLI, K. *et al.* Identifying Key Driving Processes of Major Recent Heat Waves. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, vol. 124, no. 22, p. 11746–11765, 27 Nov. 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019JD030635>. Acessado em: 20 Aug. 2023.

WENG, Q.; LU, D.; SCHUBRING, J. Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relation Uespip for urban heat island studies. **Remote Sensing of Environment**, vol. 89, no. 4, p. 467–483, Feb. 2004. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425703003390>. Acessado em: 20 Aug. 2023.

YANG, X. *et al.* Assessing the thermal behavior of different local climate zones in the Nanjing metropolis, China. **Building and Environment**, vol. 137, p. 171–184, Jun. 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132318302130>. Acessado em: 20 Aug. 2023.

YILMAZ, S.; MUTLU, E.; YILMAZ, H. Alternative scenarios for ecological urbanizations using ENVI-met model. **Environmental Science and Pollution Research**. Springer Verlag, 2018. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85049565462&doi=10.1007%2fs11356-018-2590-1&partnerID=40&md5=3344e4f0be51fb7493bf0667ed37bc05>.

ŽUVELA-ALOISE, M. *et al.* Modelling reduction of urban heat load in Vienna by modifying surface properties of roofs. **Theoretical and Applied Climatology**. Springer-Verlag Wien, 2018. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85008455089&doi=10.1007%2fs00704-016-2024-2&partnerID=40&md5=b2b600489d33e44330063ac01c6bbc53>.

## **Artigo 2: Análise multivariada microclimática de duas áreas industriais**

**Resumo:** A maioria dos estudos existentes sobre o aumento da temperatura do ar (Tar) em bairros industriais (DIs) aborda o assunto a partir da análise da temperatura da superfície terrestre (LST). Portanto, o objetivo deste estudo foi analisar, além do LST, as seguintes variáveis: temperatura do ar, umidade relativa e específica, velocidade e direção do vento, fator de visão do céu e o albedo das superfícies dos materiais, e verificar quais delas têm maior impacto no microclima urbano dos DIs de duas cidades, Sintra/PT e Uberlândia/BR. Para desenvolver esta análise foram selecionados recortes representativos de áreas urbanas industriais nas cidades citadas anteriormente e realizadas simulações computacionais com o software ENVI-met para obtenção de resultados relacionados às variáveis estudadas. Os resultados das simulações, verificados por análise multivariada, mostraram que, embora o DI Udia tenha materiais com menor albedo (-45%), menores porcentagens de vegetação (-20%) e velocidade do vento (-40%) do que o DI Sin, a Tar dentro dela pode ser menor do que em ambientes sem sombra em

torno de 1,3°C. Para o DI Sin, uma diferença de WS de -1,9 m/s, em relação aos pontos de controle, provocou um pico de +1,5°C no ambiente industrial, às 13h, ao contrário do que aconteceu em DI Udia.

**Palavras-chave:** microclima urbano; análise multivariada; simulação de computador

## 1 Introdução – Artigo 2

As alterações climáticas são uma preocupação da comunidade científica, dos cidadãos e da classe política em todo o mundo (Alcoforado, 2012), sendo a cidade o agente central nestas mudanças. Os efeitos ICUs, definidas como o aumento da temperatura do ar urbano na camada atmosférica limite urbana em comparação com ambientes suburbanos ou rurais próximos (Oke, 2002), têm se destacado, uma vez que as atividades antrópicas estão transformando as sociedades de matriz agrícola em sociedades industriais e de serviços (Huang; Wang, 2019). Dentre as principais causas deste fenômeno podem-se citar: as atividades humanas e as características físicas do ambiente, particularmente do ambiente construído, como a elevada densidade de edifícios, a concentração de materiais de construção com elevado potencial energético, a redução da evapotranspiração, o maior armazenamento de calor, o aumento do equilíbrio da radiação solar, advecção reduzida e aumento do calor antrópico (Oke *et al.*, 2002; Oke *et al.*, 1991; Amorim; Dubreuil; Cardoso, 2015; Gartland, 2010; Amorin *et al.*, 2019; Bechtel *et al.*, 2019; Meng *et al.*, 2022).

Para entender o que acontece na camada de dossel, ou seja, entre o solo e o nível médio das coberturas e as peculiaridades de cada local, é interessante identificar as características intrínsecas de cada recorte urbano. Stewart e Oke (2012) propuseram Local Climate Zones (LCZs) para classificar cada paisagem urbana e rural de acordo com as propriedades dos elementos presentes em cada local. As principais propriedades analisadas são altura de rugosidade superficial, fração superficial impermeável e desempenho térmico dos materiais, entre outras.

Stewart (2011) explica que ao adotar o sistema LCZs, a classe universal de estudo das ICUs é a paisagem composta pelas propriedades que influenciam o campo térmico do dossel (morfologia da superfície – altura e densidade do objeto) e a cobertura do solo (impermeável ou permeável). A morfologia da superfície tem impacto no clima local, alterando o fluxo de ar e a transferência de calor no ar, à medida que a cobertura do solo altera o albedo, a disponibilidade de umidade e a capacidade de aquecimento e/ou resfriamento do solo. As LCZs são divididas de acordo com o tipo de edificação presentes e tipos de cobertura do solo, que vão desde construções densamente construídas, grandes edifícios e baixa altura até cortes com indústrias pesadas. Em relação às coberturas, há



variação na densidade ocupada por árvores, solo exposto, rocha e água (Stewart, Oke, 2012).

Compreende-se o interesse generalizado em comparar diferentes regiões do ponto de vista da ocupação do solo, níveis de impermeabilização e vegetação, geralmente centros rurais e urbanos. Porém, dentro dos espaços urbanizados, existem diferenças de temperatura e umidade relativa do ar, consequências diretas do microclima, bem como de variáveis ambientais e espaciais. Em geral, os estudos do ICU são dedicados às áreas centrais das grandes cidades e nem sempre consideram as diversas configurações espaciais ou a sazonalidade do uso e ocupação do solo.

As áreas industriais, em particular, são locais com potencial para formação de ICUs e consequente interferência em áreas próximas (Mohan *et al*, 2020). A escolha do material de construção tem papel de destaque na melhoria das condições térmicas do ambiente e na mitigação dos efeitos da ICU, sendo a melhor escolha, materiais com menor capacidade de absorção de calor, maior refletividade (albedo) e maior emissividade térmica, chamados materiais frescos (Xu *et al.*, 2017).

Além dos materiais de construção frescos utilizados no envoltório e na cobertura dos edifícios, como a utilização de coberturas e paredes refletoras (Lu *et al*, 2023) ou telhados verdes (Susca; Zanghirella; Del Fatto, 2023), diferentes estratégias de mitigação dos efeitos das ICUs têm sido abordadas para o entorno edificado, desde a utilização de pavimentos frios com vegetação integrada, pavimentos com concreto poroso, mais permeáveis, nas calçadas, substituição do pavimento convencional por piso gramado nos estacionamentos, além de cercas vivas e árvores. Os resultados dessas substituições mostram redução de até 3°C no Tar e 30°C na LST, além de melhora nos índices de conforto térmico (Peluso; Persichetti; Moretti, 2022). A diminuição da Tar associada à vegetação em cânions urbanos pode atingir 10°C a 15°C dependendo da disposição das árvores e do sombreamento (Yan, 2023).

A alta concentração de edificações, extensas áreas construídas com edifícios horizontais com coberturas metálicas, pouca ou nenhuma vegetação, infraestrutura urbana amplamente pavimentada, tráfego intenso e calor residual antrópico resultante de atividades industriais têm sido reconhecidos como fatores contribuintes para a formação de ICUs, ou seja, regiões urbanas com temperaturas mais elevadas concentram-se em regiões industriais devido à exploração e utilização de matérias-primas naturais para a produção de energia e produtos comercializáveis cujo impacto direto no ecossistema natural é observado através do aumento da temperatura superficial intraurbana (Bechtel *et al.*, 2019; Mao, 2020; Flanner, 2009; Croce *et al.*, 2021; Meng *et al.*, 2022).

O impacto destas infraestruturas nas zonas envolventes pode afetar drasticamente o clima urbano e as condições de conforto e saúde na zona envolvente. A intensidade do ICU é influenciada tanto pela paisagem urbana como pelo tipo de desenvolvimento urbano (Bechtel *et al.*, 2019). Os diferentes tipos de cobertura do solo e a distância dos aglomerados industriais impactam na velocidade de resfriamento dos cortes, principalmente em relação à LST: grandes extensões impermeabilizadas dominam o padrão LST, diferentemente do registrado em corpos hídricos (Gao *et al.*, 2022).

Mohan *et al.* (2020) obtiveram valores acima de 2 °C para a intensidade da ICU noturna, variando as classes de uso e cobertura do solo sendo os locais de mineração, que apresentaram a maior intensidade (2,52 °C), seguidos pelos distritos industriais (2,32 °C) e assentamentos rurais e urbanos (2,13 °C). Singh *et al.* (2017) concluíram que houve um acúmulo constante de calor ao longo dos anos na aglomeração industrial em Jharsuguda/Índia com impacto no aumento da temperatura do ar noturno, atribuído a mudanças na cobertura do solo, intensas atividades industriais e processos de mineração. De acordo com Meng *et al.* (2022) a tendência decrescente na variação da LST do interior para a periferia dos centros industriais, comprovando o impacto de tais regiões nas ICUs. Quando comparadas às estações climáticas, a maior disparidade entre as LST dos espaços estudados ocorreu durante as estações quentes; a intensidade da ICU foi maior na primavera e no verão.

A identificação de focos de calor, por exemplo a partir dos estudos citados, permite classificar o tipo de clima local e os diferentes padrões térmicos urbanos através do estudo dos microclimas de uma cidade (Reis; Lopes; Nouri, 2022). Porém, a obtenção de dados meteorológicos com alta resolução temporal, essenciais para a análise de fenômenos climáticos em escala local ou microescala, em geral, encontra obstáculos logísticos e financeiros, segundo Reis *et al.* (2020), dificultando ou, por vezes, impossibilitando o estudo.

Diante do exposto, entende-se que grande parte dos estudos existentes sobre ICUs em regiões industriais, abordam o tema a partir da análise da LST em função do tipo de cobertura e uso do solo. Portanto, torna-se interessante ampliar tal análise inserindo outras variáveis climáticas como contribuição aos estudos de conforto térmico urbano, especialmente em distritos industriais. Nesse sentido, são utilizados alguns modelos numéricos e computacionais para análise de clima urbano em espaços abertos, com destaque para o software ENVI-met, que fornece resultados para propriedades como temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade e direção do vento, o albedo das superfícies, entre outros. Simulações térmicas micrometeorológicas auxiliam na compreensão da dinâmica da formação de ICU e também na estimativa da eficácia de

possíveis medidas de mitigação. (Noro; Busato; Lazzarin, 2015; Silva, 2017; Spinzato; Duarte, 2018; Mao, 2020; Rapti; Kantzioura, 2021; Zhao *et al.*, 2022).

A escolha das cidades de Uberlândia/BR e Sintra/PT justifica-se pela oportunidade de estudar duas localidades com características únicas. A primeira é uma cidade brasileira em processo de crescimento acelerado, na qual é possível constatar um excessivo processo de verticalização da ocupação urbana em áreas centrais e diversas áreas com infraestrutura inadequada para habitação (Silva, 2017). Soma-se a essas características a identificação de processos de expansão de extensas áreas industriais na periferia, que suprimem ainda mais as áreas vegetadas do município e contribuem para a alteração do microclima urbano, seria interessante estender o estudo do microclima, amplamente explorado na capital portuguesa, Lisboa, a um município localizado na região metropolitana.

Neste estudo, o microclima de recortes urbanos industriais é analisado através do software de simulação tridimensional ENVI-met (V 5.0.1), que possibilita a obtenção dos dados meteorológicos. A simulação é realizada através de um modelo tridimensional do microclima urbano, por meio de interações superfície-vegetação-atmosfera. O balanço de energia é calculado utilizando as variáveis radiação, reflexão e sombreamento das edificações e vegetação, fluxo de ar, temperatura, umidade, turbulência local e sua taxa de dissipação, bem como trocas de água e calor do solo (Ozkeresteci; Crewe, 2003).

Assim, este estudo teve como objetivo analisar quais variáveis, além da LST, têm maior impacto no microclima urbano de distritos industriais de duas cidades, Sintra/PT e Uberlândia/BR, de acordo com o tipo de clima e a composição física do aglomerados urbanos, utilizando análise multivariada com os dados obtidos do modelo de microclima ENVI-met e posteriormente comparando-os com os dados das variáveis obtidas de estações meteorológicas posicionadas em locais abertos, chamados de pontos de controle, para identificar as especificidades de cada microclima.

## **2 Método – Artigo 2**

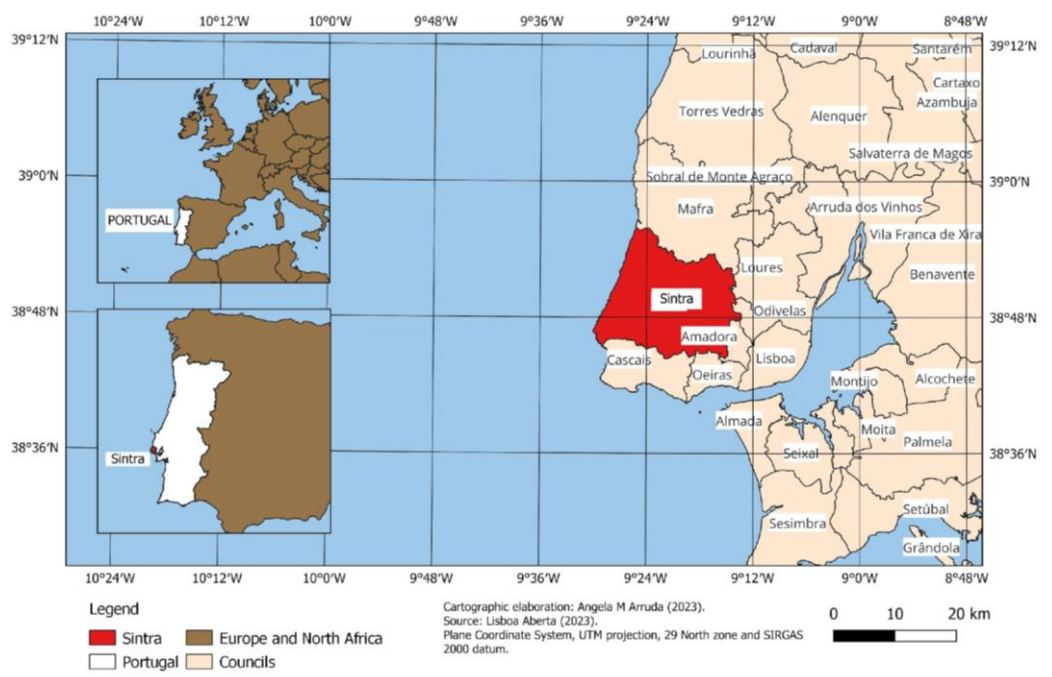
Para desenvolver este estudo foram selecionados recortes representativos de áreas urbanas industriais nas cidades de Sintra e Uberlândia, identificando percentuais de vegetação, áreas cobertas e impermeabilizadas, bem como a geometria urbana, representada pelo SVF e o albedo das superfícies, calculado a partir de imagens de satélite Landsat 8, obtidas através do arquivo de dados USGS Landsat, acessadas através de ferramentas especiais de busca e solicitação on-line: USGS Global Visualization Viewer (GLOVIS) disponível em: <http://glovis.usgs.gov>, EarthExplorer

(<http://earthexplorer.usgs.gov/>) e software QGIS para calcular o albedo das superfícies e caracterizar os recortes.

O concelho de Sintra, em Portugal, tem um Plano Diretor Municipal desde 1999, que inclui áreas agrícolas e de reserva ecológica. Mesmo com planejamento e leis sobre uso e ocupação do solo, estudos sugerem que as áreas agrícolas contidas na área metropolitana de Lisboa tendem a ser pressionadas para se tornarem urbanas, o que impõe maiores desafios ao plano de confinamento urbano (Abrantes, 2016).

A área metropolitana de Lisboa é composta por 18 municípios, agrupados em duas sub-regiões: a Grande Lisboa e a Península de Setúbal. O concelho de Sintra, cuja localização é apresentada na Figura 11, tem 319,23 km<sup>2</sup> e 385 954 habitantes (INE, 2023) e está subdividido em 11 freguesias. É o segundo concelho mais populoso de Portugal e apresenta grande heterogeneidade no seu território, com as freguesias costeiras e nortenhas com características florestais e rurais, enquanto no Sul encontram-se as freguesias urbanizadas, objeto deste estudo. Possui clima temperado com inverno chuvoso, verão seco e baixo calor (Csb), segundo a classificação de Koppen-Geiger, com altitude média de 206 m e temperatura média anual de aproximadamente 15°C (IPMA,2023). (Figura 12).

Figura 12: Localização de Sintra/PT

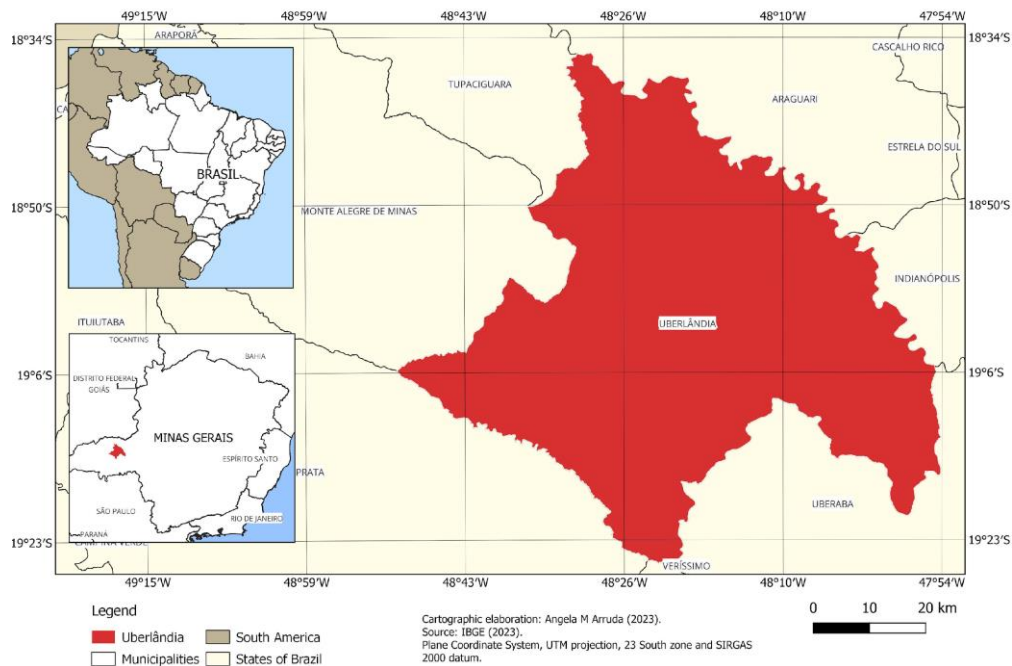


Fonte: Lisboa Aberta (2023)

A cidade de Uberlândia, Brasil, está localizada no interior do estado de Minas Gerais, 18° 55' 08" S, 48° 16' 37" O (Figura 13), com população estimada de 706.597

habitantes (IBGE, 2022) e possui uma área total de 4.115.206 km<sup>2</sup>. É um importante centro industrial e logístico regional e sua economia é baseada em atividades industriais e de serviços. O clima é tropical com estação seca (Aw) na classificação de Köppen-Geiger, temperatura média anual de 22,3°C, altitude de 863 m e IDH de 0,789 (IBGE, 2022).

Figura 13: Localização de Uberlândia/MG



Fonte: IBGE (2023)

A escolha das cenas, apresentadas na Figura 14, justifica-se por pertencerem a uma LCZ industrial, denominada LCZ 8, semelhante às duas cidades abordadas, segundo os princípios de classificação de Stewart e Oke (2012) e Demuzere *et al.* (2022).

Figura 14: Recortes estudados (a) e (c) DI Sintra; (b) e (d) DI Udia (Escala: 1:5000)



(a)



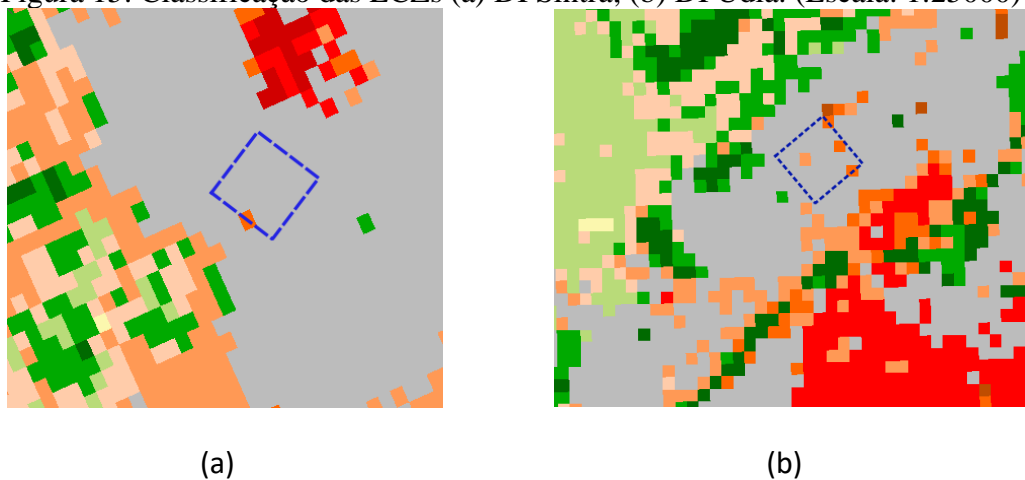
(b)



Fonte: GoogleEarth (2023)

Na Figura 15 tem-se a distribuição das LCZs ao longo do território industrial e entorno de Sintra (Sin) e Uberlândia (Udia), com LCZ 8 representada em cinza, predominantemente ocupada por grandes construções, cobertura de solo majoritariamente pavimentada, albedo superficial entre 0,15 e 0,25, e materiais de construção presentes: aço, concreto, metal e pedra (Stewart, Oke, 2012). O residencial LCZ 3 é representado pelas cores vermelho e laranja: variando, respectivamente, desde alta densidade construtiva com edifícios de até 2 pavimentos até baixa densidade, caracterizada por construções mais espaçadas.

Figura 15: Classificação das LCZs (a) DI Sintra; (b) DI Udia. (Escala: 1:25000)



Fonte: Adaptado de Demuzere *et al.* (2022)

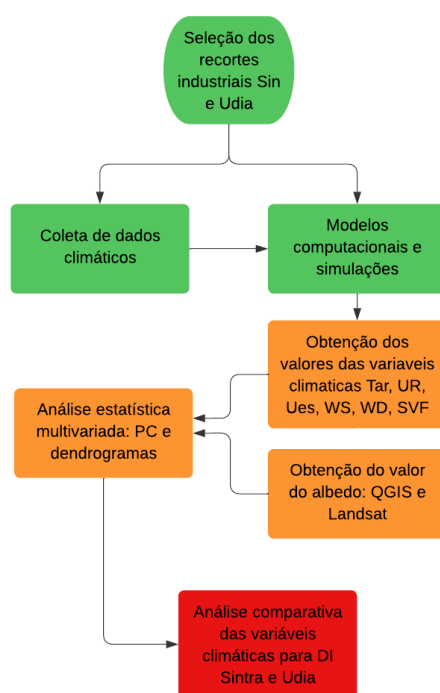
Posteriormente, os valores dos parâmetros de entrada para as simulações computacionais foram coletados em Climate.OneBuilding.Org (2023). A partir das características físicas dos recortes urbanos representativos das áreas industriais e das informações climáticas, foram elaborados modelos dos recortes urbanos para o

desenvolvimento das simulações no software ENVI-met, a fim de identificar um dia típico para cada área, correspondente o percentil 5% dos dias mais quentes do ano, com ventos calmos, sem chuva e pouca nebulosidade.

Ressalta-se que o modelo microclimático ENVI-met v. 5.0 apresenta, segundo Lopes *et al.* (2020), a limitação de ainda não ser uma solução viável para previsão da intensidade de futuras ICUs, uma vez que está restrita a pequenas áreas urbanas, em torno de 3 km<sup>2</sup>, principalmente pela capacidade de processamento computacional. Neste caso, o uso de técnicas estatísticas e o desenvolvimento de modelos preditivos para determinados contextos climáticos mostram-se interessantes para ampliar espacialmente os estudos microclimáticos urbanos (Masiero *et al.*, 2022). Croce *et al.* (2021) acrescentam que os resultados dos modelos microclimáticos dependem fortemente das condições de contorno da área urbana em estudo definidas no arquivo de configuração, o que pode afetar os resultados da simulação.

A Figura 16 mostra as etapas resumidas do método.

Figura 16: Resumo dos procedimentos metodológicos



### 2.1 Parâmetros de entrada para ENVI -met

Os valores dos parâmetros de entrada para as simulações foram coletados em Climate.One- Building.Org (2023), que fornece as médias de temperatura e umidade específicas do ar, velocidade e direção do vento, precipitação e radiação dos anos de 2007 a 2021. Tal arquivo é inserido na opção *Full Forcing* no ENVI-met e os dados de entrada resumidos são apresentados na Tabela 1 para os dias selecionados.

A escolha de 23/01/22 e 17/07/22 para as simulações em Uberlândia e Sintra, respectivamente, justifica-se pelo fato destes dois dias corresponderem ao percentil 5% dos dias mais quentes dos últimos dez anos com temperaturas acima de 30°C.

Tabela 1: Dados de entrada

<b>Categoria</b>	<b>Entrada</b>	
<b>Área de modelagem (L, W, H) (m) Grids (x, y, z)</b>	500 x 500 x 50 4 x 4 x 2	
<b>Cidades</b>	Uberlândia	Sintra
<b>Arquivo de configuração Início da simulação Fim da simulação Período da simulação</b>	05 h (23/01/22) 04 h 59 (24/01/22) 24h	05 h (17/07/22) 04 h 59 (18/07/22) 24h
<b>Dados meteorológicos</b>	Tar max = 41°C – 17:00 h. Tar min = 29°C - 06:00 h. Uesp max = 12.5 g/kg – 22:00 h Uesp min = 8 g/kg – 13:00 h WS max = 3.6 m/s – 11:00 h. WS min = 0 – 5:00 h.	Tar max = 29°C – 12:00 h. Tar min = 15°C - 05:00 h. Uesp max = 13 g/kg – 13:00 h. Uesp min = 9 g/kg – 21:00 h. WS max = 6 m/s – 15:00 h. WS min = 0 – 7:00 h.
<b>Materiais</b>	telhado- telha sanduiche Pavimento – asfalto escuro Vegetação – grama e árvores	telhado- telha sanduiche Pavimento – asfalto claro Vegetação – grama e árvores

## 2.2. Cálculo do Albedo

Para calcular o albedo exoatmosférico, seguiu-se o método sugerido por Lopes (2023). Primeiramente, é necessário definir a área, o período e o percentual de cobertura de nuvens no banco de dados USGS Earth Explorer (2023); após selecionar o conjunto de dados Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2, é possível selecionar as imagens desejadas e as bandas B2, B3, B4, B5 e B6 no formato TIF; no software QGIS®, é aplicado através da ferramenta calculadora raster o algoritmo de Olmedo *et al.* (2016) com os coeficientes apresentados na equação 1, para obter uma imagem com os dados de albedo calculados para cada pixel:

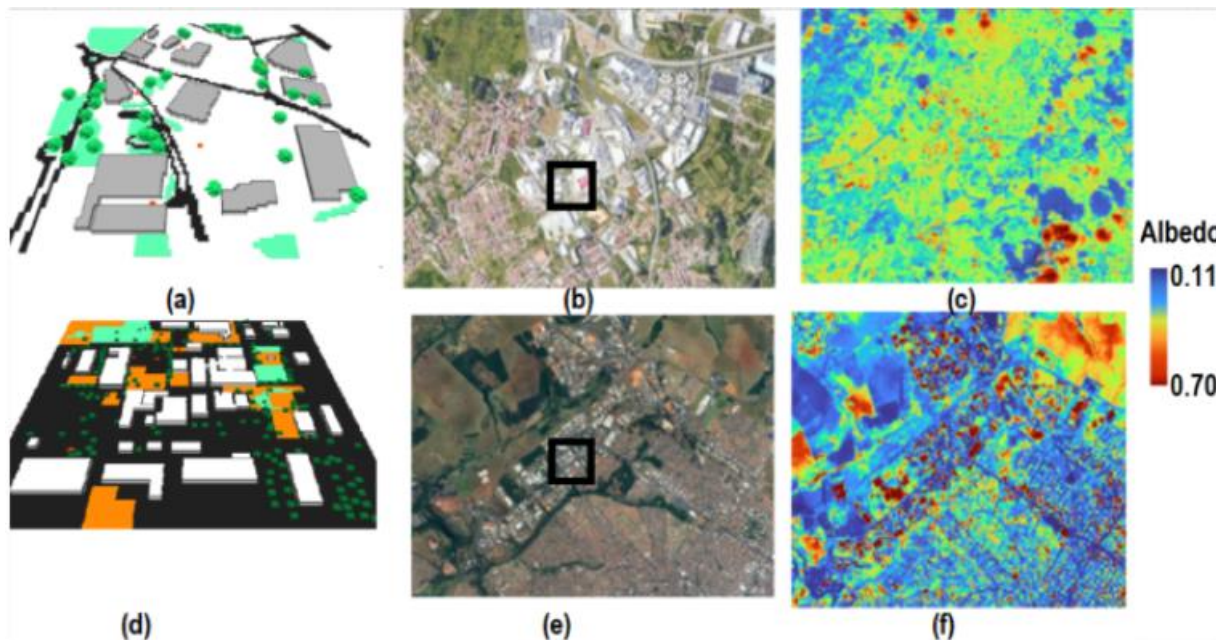
$$\text{Albedo} = r_{s,B} (0.246) + r_{s,G} (0.146) + r_{s,R} (0.191) + r_{s,NIR} (0.304) + r_{s,SWIR1} (0.105) + r_{s,SWIR2} (0.008) \quad (1)$$

onde  $r_{s,B}$  é o SWIR, bandas 2 a 6 do Landsat (após ser transformado em refletâncias).



Aplicando esta metodologia obtemos a figura 17, que mostra a variação do albedo nos DIs de Sintra e Uberlândia.

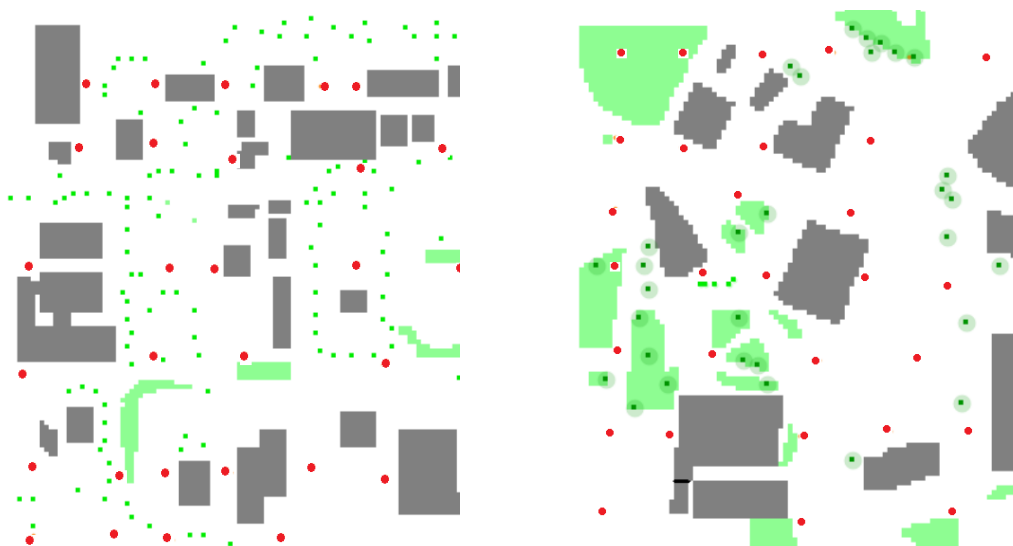
Figura 17: DIs de Sintra e Udia e albedo (a) DI Sintra; (b) Imagem Landsat 8 Sintra; (c) DI Udia; (d) Imagem Landsat 8 Udia.

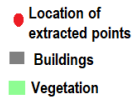


### 2.3. Análise multivariada

Após as simulações, foram extraídos 30 pontos aleatórios de cada recorte estudado, para o horário das 14h, a 9 m de altura do solo (figura 18). Estes pontos foram identificados de acordo com a inicial da cidade e localização do ponto, U1 - referente ao ponto 1 de Udia, S1 - referente ao ponto 1 de Sintra, por exemplo.

Figura 18: Locais onde foram extraídos os pontos de estudo (a) Udia; (b) Sin.





(a)

(b)

Os dados foram organizados e posteriormente tratados no software R-Studio. O pacote Multivariate - Analysis (Azevedo, 2022) foi utilizado para desenvolver as ferramentas estatísticas conhecidas como componentes principais e dendograma.

Para a análise dos resultados optou-se por aplicar técnicas de análise multivariada, especialmente análise fatorial e análise de cluster, que, segundo Hongyu, Sandanielo e Junior (2016), é uma alternativa viável e eficiente para a análise dos resultados, pois permite reduzir a dimensionalidade das variáveis, agrupar os indivíduos de acordo com suas semelhanças e, portanto, analisar as variáveis mais importantes para cada grupo envolvido. Além disso, é amplamente difundido em estudos de fenômenos climatológicos e identificação de zonas climáticas, como Zscheischer *et al.* (2012), Amiri, Mesgari (2017), Silva *et al.* (2017), Leoni; Sampaio; Corrêa (2017), Santos; Sousa (2018), Praene *et al.* (2019), Valverde *et al.* (2020).

A análise de componentes principais (PCA) é um dos métodos mais difundidos de análise fatorial. Utiliza a modelagem da matriz de covariância dos dados e consiste em transformar linearmente um conjunto de variáveis originais, correlacionadas entre si, em combinações lineares delas, linearmente independentes, reduzindo o total de dados e extraindo apenas aquelas que descrevem a maior parte dos dados. variabilidade total, com a menor perda de dados possível (Hongyu; Sandanielo; Junior, 2016).

Para que a escolha dos componentes principais (PCs) seja retida, pode-se recorrer ao Screen Plot, onde se busca o gráfico que representa o autovalor versus o percentual de variância explicado, o “ponto de salto” a partir do qual os PCs não têm tanta importância para a variância total (Silva *et al.*, 2017); Critério de Kaiser (Kaiser, 1958), que seleciona os PCs de acordo com o valor de seus autovalores, autovalores  $>1$  pertencem aos PCs que explicam a maior variação do espaço amostral total (Hongyu; Sandanielo; Junior, 2016); e também a análise de representatividade em relação à variância total, em que o pesquisador pré-determina um percentual de explicação da variância total, de acordo com o fenômeno estudado, sendo comumente aceitos valores acima de 70%.

Associada à PCA, a análise de cluster é utilizada para dividir os elementos da amostra em grupos de acordo com sua proximidade e características comuns. A distância entre dois objetos pode ser medida de acordo com vários critérios, sendo a distância

euclidiana, a medida de dissimilaridade mais comum e adequada para variáveis quantitativas: quanto maior este valor, mais diferentes, ou dissimilares, são os objetos (Santos; Sousa, 2018). Já o método de agrupamento hierárquico agrupa elementos semelhantes e o processo se repete em vários níveis formando uma árvore chamada dendograma (Santos; Sousa, 2018). A ligação entre os elementos pode ser o vizinho mais próximo, o vizinho mais distante ou a ligação média.

Após o agrupamento, é possível avaliar o grau em que as distâncias originais e as distâncias pareadas são mantidas pelo dendograma por meio do coeficiente de correlação cofenética, onde mais próximo de 1 significa melhor correlação. A existência de comportamentos semelhantes entre variáveis e a formação de grupos internamente homogêneos e internamente heterogêneos a partir do estudo de determinadas variáveis podem ser verificadas por meio de tais ferramentas exploratórias (Leoni; Sampaio; Corrêa, 2017).

### **3. Resultados – Artigo 2**

Neste artigo, os resultados foram estruturados em 3 seções:

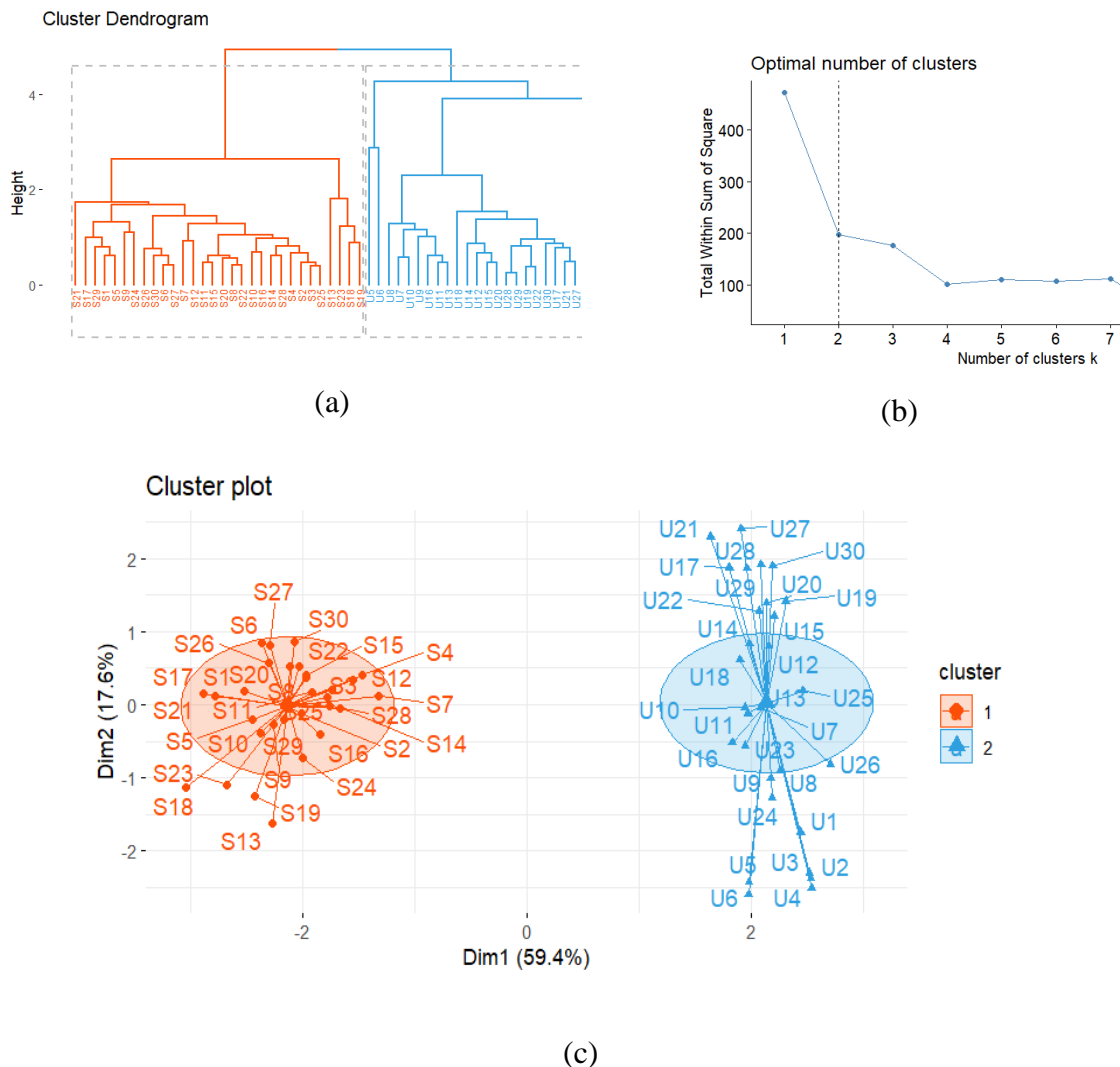
- Agrupamento hierárquico e Análise de Componentes Principais (PCA): Avaliação para revelar semelhanças nos padrões de distribuição de dados, estabelecer possíveis associações entre as principais variáveis no estudo microclimático de cada recorte e o impacto de cada variável para o cenário estudado;
- Composição física dos recortes e albedo: apresentação da caracterização física e albedo dos recortes, que influenciam o microclima urbano;
- Análise descritiva: Avaliação dos resultados da simulação para as variáveis de maior impacto para cada recorte.

#### *3.1. Clustering hierárquico e análise de componentes principais*

Os resultados do agrupamento hierárquico revelaram semelhanças nos padrões de distribuição dos dados entre 60 pontos coletados nos DIs de Uberlândia e Sintra. O método da média foi utilizado para determinar os clusters ótimos ( $k$ ), interpretar e validar os clusters de dados. Tal método levou à correlação entre a distância cofenética e a distância original de 0,94, confirmando que a matriz de dissimilaridade está bem representada no dendograma. Como resultado, através do Screen Plot percebe-se que  $k=2$ , e portanto foram identificados dois clusters principais com base nas suas características

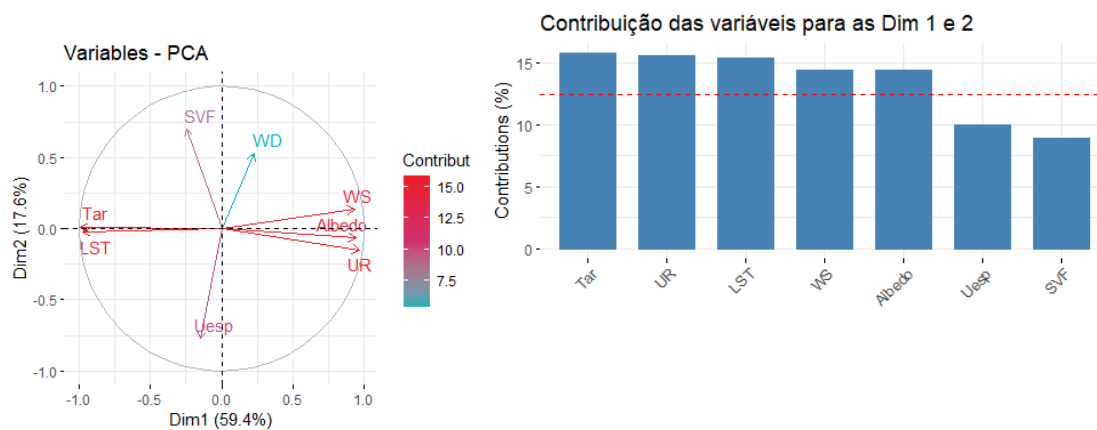
distintivas no conjunto de dados (Figura 19), com tamanhos de 30 compostos exclusivamente por elementos de Sintra ou Udia.

Figura 19: (a) Dendrograma mostrando os dois clusters identificados. (b) Gráfico de tela mostrando uma diminuição lenta na inércia após  $k = 2$ . (c) Visualização do gráfico de cluster k-means.



O conjunto de dados da pesquisa continha inicialmente oito variáveis: Tar, UR, Uesp, SVF, WS, WD, albedo, LST. Para simplificar as descrições para análises posteriores, a análise de componentes principais (PCA) foi implementada para reduzir a dimensionalidade dos dados. As variáveis que apresentam maior contribuição estão destacadas no gráfico de barras (Figura 20). A linha tracejada apresentada no gráfico corresponde à percentagem média esperada da variância explicada, nomeadamente 12,5%.

Figura 20: (a) A maior contribuição da variância para o círculo de correlação PC1 e PC2 (a) e gráfico de barras da contribuição do PC em 8 variáveis (b).

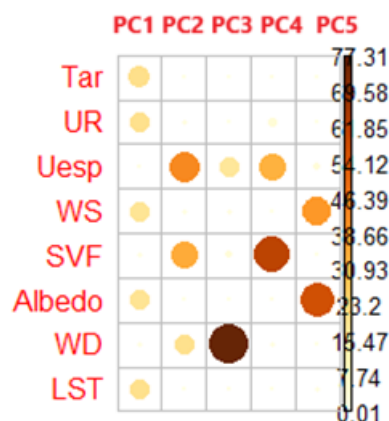


(a)

(b)

A Figura 21 apresenta todos os cinco PCs e os coeficientes de ponderação de cada variável de estudo para o PC, onde se destacam as três primeiras: para o PC1 destacaram-se as variáveis Tar, UR, WS, albedo e LST; para PC2, Uesp e SVF tiveram maior contribuição, enquanto WD teve destaque para PC3.

Figura 21: PCs e contribuições variáveis

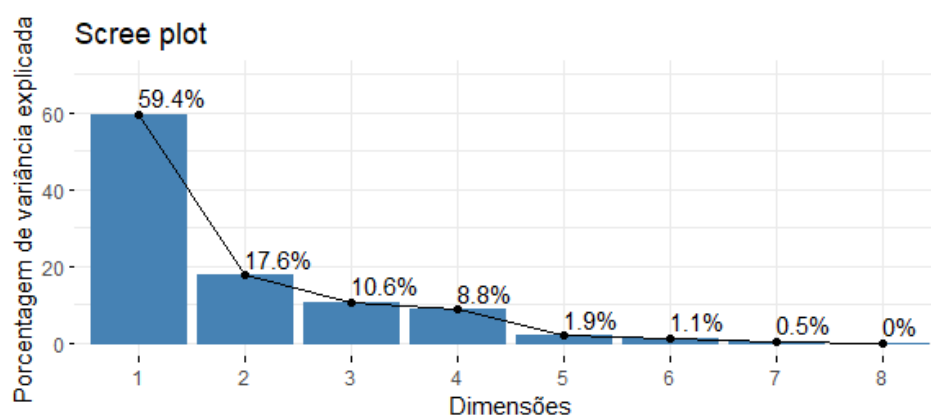


Como critérios de escolha dos componentes principais podem ser escolhidos os autovalores  $> 1$ , conforme critério de Kaiser (1958), ou selecionar os componentes que permitem explicar 70% da variância. Os dois primeiros componentes satisfazem ambos os critérios simultaneamente, conforme tabela 2. Também pode ser utilizado o screen plot, que facilita a visualização do ponto onde a variância explicada tende a se estabilizar, ou seja, os dois primeiros PCs possuem 77,02% da variância e, portanto, resumem efetivamente a variância total da amostra e podem ser usados para estudar o conjunto de dados (Figura 22).

Tabela 2: Autovalores e variações percentuais dos componentes principais

	<b>Autovalor</b>	<b>Porcentagem de variação</b>	<b>Porcentagem de variação acumulada</b>
PC1	4.75	59.40	59.40
PC2	1.40	17.62	77.02
PC3	0.84	10.61	87.63
PC4	0.70	8.75	96.39
PC5	0.15	1.90	98.29
PC6	0.09	1.14	99.43
PC7	0.04	0.53	99.97
PC7	0.002	0.028	100

Figura 22: Os dois primeiros PCs cobrem 77,02% da variação



Para compreender a importância de cada variável na construção dos dois componentes, foi calculada a correlação entre as variáveis originais e os componentes e as correlações entre os dois PCs, e seus coeficientes de ponderação para cada característica são apresentados na tabela 3.

Tabela 3: Coeficientes de ponderação das características e sua correlação com os dois PCs

<b>Variável</b>	<b>Coefficiente de ponderação</b>		<b>Correlação</b>	
	<b>PC1</b>	<b>PC2</b>	<b>PC1</b>	<b>PC2</b>
Tar	-0.45	-0.009	-0.99	0.01
UR	0.44	0.12	0.97	-0.15
Uesp	-0.06	0.65	-0.15	-0.77
WS	0.42	-0.12	0.93	0.14
SVF	-0.11	-0.58	-0.25	0.70

Albedo	0.43	0.05	0.94	-0.07
WD	0.10	-0.45	0.23	0.53
LST	-0.44	0.02	-0.97	-0.03

Hongyu, Sandanielo e Júnior, (2016) avaliaram a decisão de selecionar dois PCs dentre 8 variáveis originais como razoável e, portanto, pode-se utilizar apenas os dois primeiros PCs para a composição das equações 2 e 3:

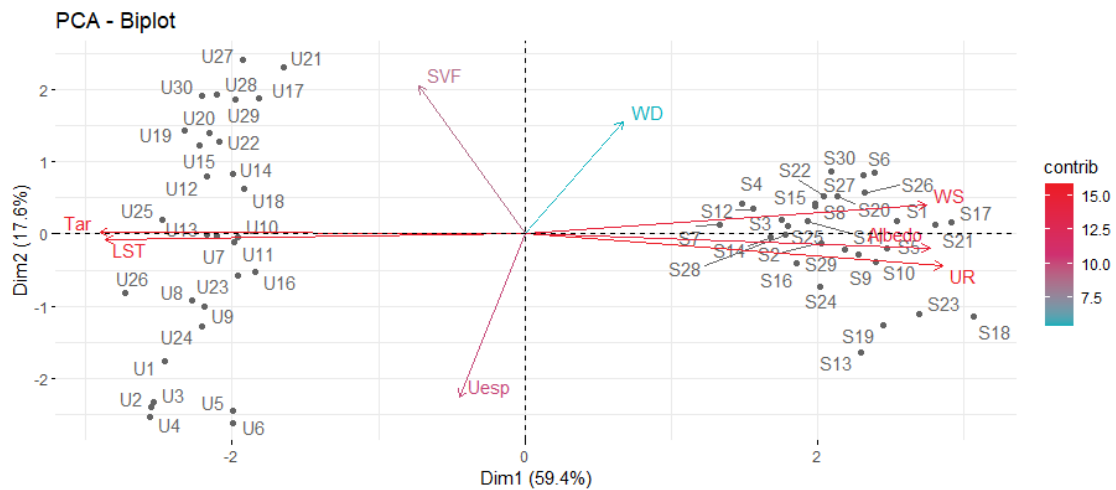
$$PC1 = -0.45 Tar + 0.44 UR - 0.06 Uesp + 0.42 WS - 0.11 SVF + 0.43 Albedo + 0.10 WD - 0.44 LST \quad (2)$$

$$PC2 = -0.009 Tar + 0.12 UR - 0.65 Uesp - 0.12 WS - 0.58 SVF + 0.054 Albedo - 0.45 WD + 0.02 LST \quad (3)$$

Conforme equação 2 e tabela 3, no PC1 destacam-se as variáveis Tar, UR, WS, albedo e LST, sendo evidente o contraste entre TA e UR, que pode ser chamado de componente de contraste entre temperatura do ar e umidade relativa. Na equação 3 destacam-se o Uesp, SVF e WD, pois a variação explicada no PC1 é independente da variação explicada no PC2.

A análise de componentes principais mostra o carregamento dos conglomerados amostrais com base em sua similaridade (Figura 23). Os pontos cinzas são as amostras, enquanto as linhas correspondem aos autovetores dos componentes principais. As variáveis WS e albedo apresentaram contribuições semelhantes ao PC1 porque essas variáveis possuem vetores de comprimento semelhante e estão mais próximas do eixo PC1. As contribuições das variáveis Tar e UR são semelhantes, mas com sinais opostos evidenciando o comportamento inversamente proporcional de tais variáveis. As variáveis do mesmo lado aproximam a variância do valor de acordo com sua similaridade. Os pontos extraídos do recorte Udia estão fortemente correlacionados com Tar e LST, enquanto os pontos de Sintra estão fortemente correlacionados com as variáveis WS, albedo e UR.

Figura 23: Visualização da análise de componentes principais para dois clusters

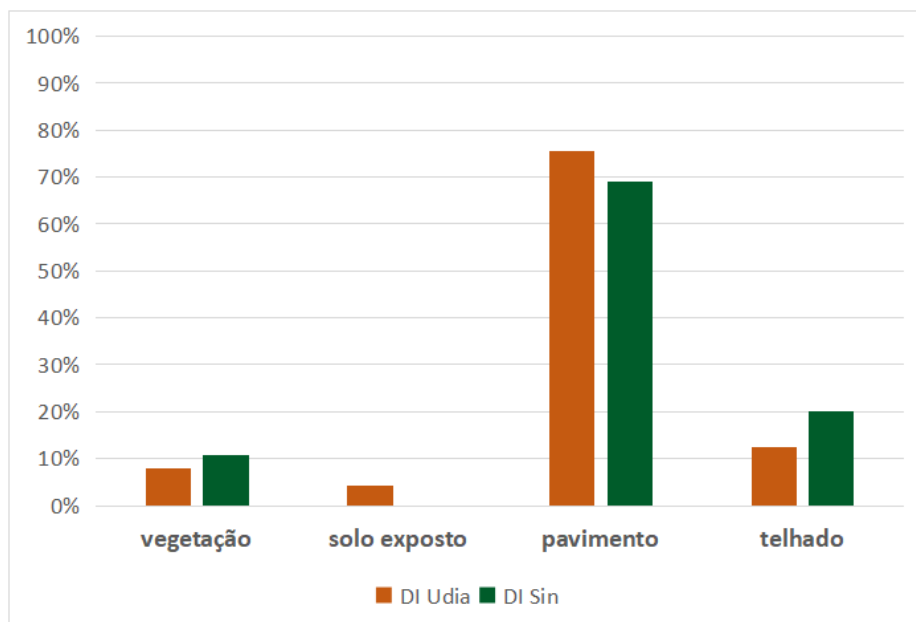


Com base nesta análise multivariada, é necessário analisar a composição física de cada recorte que certamente influencia as variáveis Tar, LST, WS, albedo e UR.

### 3.2 Composição física e albedo dos recortes

Ao analisar a composição física dos recortes e comparar os recortes industriais de Sintra (DI Sin) e Uberlândia (DI Udia), alguns dados relevantes podem ser percebidos: os percentuais de vegetação e coberturas são, respectivamente, 2,81% e 8% maiores em O DI Sintra, enquanto o DI Udia apresenta superfície 6,52% mais impermeável que o DI Sintra e a presença de solo exposto (4,17%), conforme pode ser observado na figura 24.

Figura 24: Composição física dos recortes estudados





Um grande espaço impermeável pode modificar os balanços de energia e massa, o que prejudica o balanço hídrico local, pois aumenta o escoamento superficial e diminui a evapotranspiração, reflexo da retirada da vegetação para a construção de infraestrutura, como apontado por Oke (2002).

A importância da vegetação e dos corpos hídricos na mitigação da intensidade das ICUs é explicada por Gunawardena, Poços, Kershaw (2017): espaços verdes dominados por árvores tendem a oferecer maior alívio do estresse térmico e sua maior rugosidade é responsável pelo resfriamento da camada limite, enquanto os “espaços azuis” demandam mais planejamento para produzir melhorias na temperatura do ar circundante.

Tal análise sugere que a influência do resfriamento baseado na evapotranspiração dos espaços verdes e azuis é principalmente relevante para as condições da camada de dossel urbano, e que os espaços verdes dominados por árvores oferecem o maior alívio do estresse térmico quando são mais necessários. No entanto, a magnitude e o transporte do arrefecimento experimentado dependem do tamanho, extensão e geometria dos espaços verdes, uma vez que alguns grandes parques solitários só são capazes de oferecer um arrefecimento mínimo da camada limite (Gunawardena; Poços; Kershaw, 2017).

Além da evapotranspiração, o sombreamento proporcionado pelas árvores contribui para a redução das temperaturas do ar e da superfície, reduzindo em até 21% o número de horas de desconforto térmico pela inserção de estrutura verde e 30% pela vegetação, segundo pesquisa desenvolvida por Palomo Amores *et al.* (2023) em Sevilha, Espanha.

Rodrigues de Mello, Martins, Sant'anna Neto (2017) estudaram a influência dos materiais de construção, principalmente das telhas, no clima urbano do interior do Brasil. As amostras estudadas foram: cerâmica, metálica e fibrocimento. Os resultados mostraram que as coberturas de fibrocimento produziram temperaturas entre 10°C e 12°C superiores às do ar circundante, enquanto as coberturas cerâmicas produziram entre -0,1°C e -0,3°C e as coberturas metálicas, utilizadas em galpões e serviços, entre 16°C e 20°C superiores. Foi comprovado que as temperaturas médias da cidade de Presidente Prudente/SP aumentaram cerca de 2,5°C nos últimos 30 anos, com diferença entre áreas rurais e urbanas de até 10°C.

A Tabela 4 apresenta uma breve comparação das propriedades de albedo teóricas e medidas da calçada, do telhado e da vegetação. Ao analisar o albedo das superfícies utilizando imagens do satélite Landsat 8 e os cálculos apresentados na equação 1 e

mostrados na figura 24, é possível extrair dados desta propriedade, apresentados na tabela 4.

Tabela 4: Comparação do Albedo

Categoria	Albedo teórico		Albedo medido	
	DI Sin	DI Udia	DI Sin	DI Udia
Vegetação	0.27*	0.27*	0.28	0.21
Telhado	0.57**	0.57**	0.50	0.26
Pavimento	0.50*	0.20*	0.30	0.15
Média	0.44	0.34	0.36	0.20
Desvio padrão	0.12	0.16	0.09	0.04

\* extraído de ENVI-met; \*\*Ferreira (2003)

Num primeiro momento, assumiu-se que o albedo envelhecido das coberturas metálicas de Sintra e Udia seria o mesmo por se tratarem de telhas sanduíche. No entanto, os resultados da Tabela 4 mostram que o albedo da cobertura do DI de Sintra é 48% superior ao apresentado no DI Udia. O albedo médio medido em Sintra é, em média, 45% superior ao albedo de Uberlândia para a região estudada. Este resultado teve como contribuição mais significativa os albedos das coberturas e calçadas.

Segundo Alchapar *et al.* (2017), o aumento do albedo no ambiente urbano pode melhorar as condições térmicas dos espaços exteriores, principalmente pela diminuição da temperatura máxima, quando combinado com cenários com percentagem de vegetação superior a 20%. Além da diminuição da temperatura do ar durante o dia, tal mudança pode melhorar a qualidade do ar, além de reduzir os custos com ar condicionado e a absorção da radiação solar pelas superfícies. O uso de materiais refletivos em telhados e pisos pode aumentar o albedo de cada superfície em 0,25 e 0,15, respectivamente, e o albedo total em 0,1 (Akbari; Menon; Rosenfeld, 2009).

As coberturas desempenham um papel fundamental na diminuição da temperatura interna dos edifícios e do seu entorno: segundo estudo de Murguia *et al.* (2019), o albedo de telhados frios pode diminuir o consumo de energia no interior dos edifícios levando à economia de energia em edifícios comerciais nos EUA, devido à ação de dois mecanismos: albedo e emissividade térmica. O albedo é a quantidade de energia solar refletida pelo telhado e tende a diminuir com o tempo. Um alto albedo economiza energia ao refletir a radiação solar recebida no espaço e tende a diminuir com o tempo.

Para a análise de WS, Tar, LST e UR optou-se por selecionar pontos de controle localizados em áreas abertas, sem edificações e com vegetação rasteira e calcular a diferença entre eles e os 30 pontos aleatórios dentro de cada recorte de Sintra e Udia para possibilitar a comparação dessas variáveis para as duas cidades estudadas. Os dados de WS, Tar e UR foram obtidos na base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia de Uberlândia (INMET, 2022) e o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA, 2022) para Sintra através de estações meteorológicas.

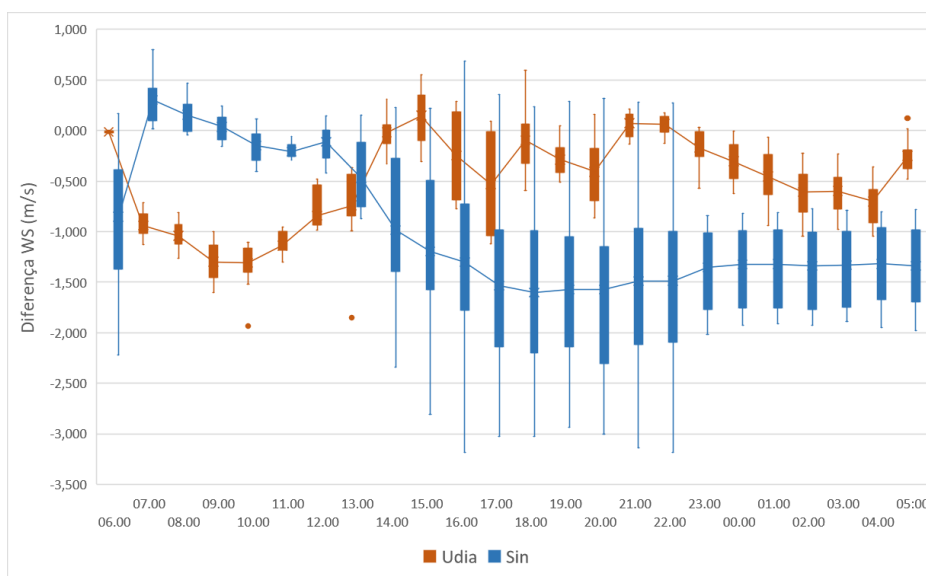
Devido à indisponibilidade de dados do LST nessas bases de dados, o LST será comparado apenas entre os dois cortes industriais estudados.

### 3.3 Análise descritiva

Nesta seção serão apresentados os resultados das variáveis mais importantes para DI Sin e DI Udia, determinados a partir da análise multivariada, a saber: WS, Tar, LST e UR comparados aos pontos de controle, exceto LST.

Os recortes Udia e Sintra apresentaram comportamento discrepante ao longo do dia, quanto à diferença de WS entre os pontos de controle e os pontos dos DIs, apresentada na Figura 25. O WS no DI Sintra apresenta queda acentuada, de até -1,5 m/s, começando às 13h e estendendo-se noite adentro. No mesmo período, o WS no DI Udia permaneceu próximo aos pontos de controle apresentando uma queda média de -1,2 m/s.

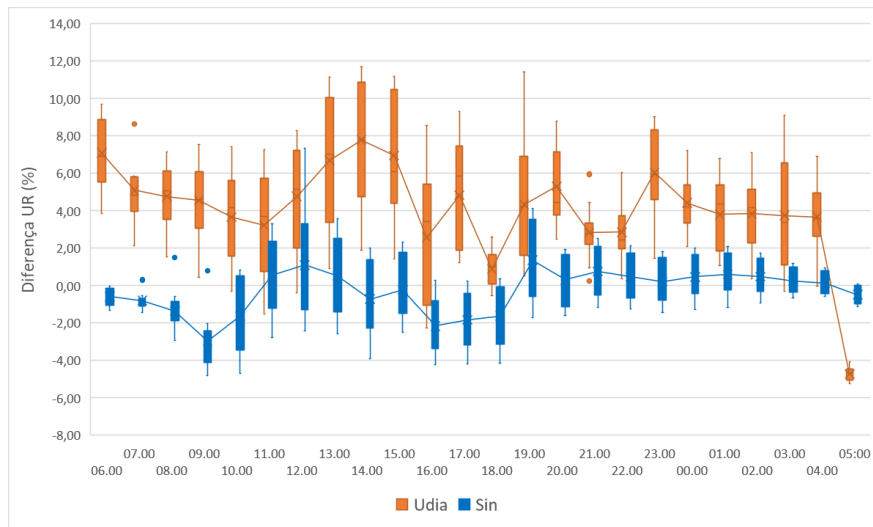
Figura 25: Diferença da velocidade do vento para DI Sin e Udia durante dias quentes



Analisando a diferença de UR entre os pontos recolhidos para os DIs de Sintra e Udia e os pontos de controle localizados em espaços abertos, verifica-se que existe uma

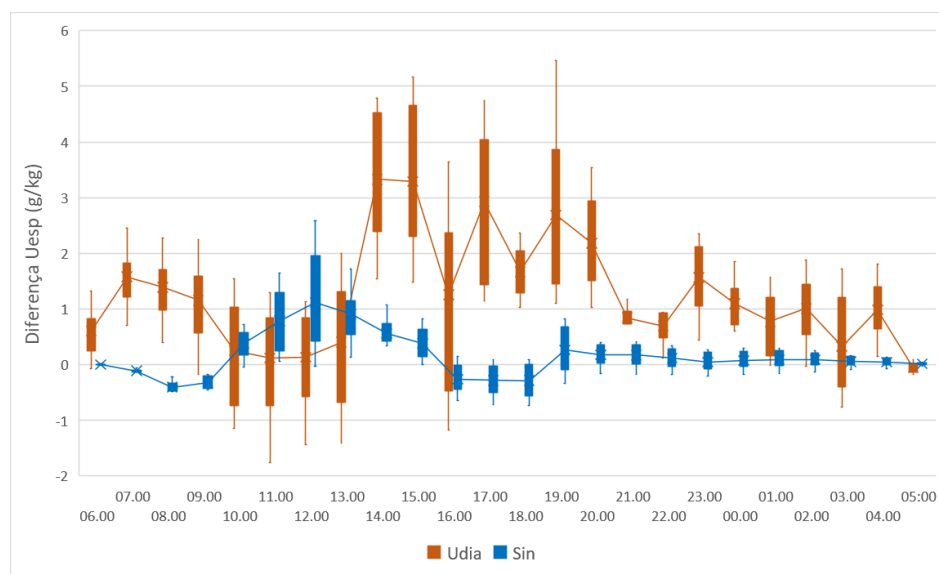
maior variação máxima positiva para os dados de Udia (10%), enquanto em Sintra existe - 4%, ou seja, o DI Sin apresentou a menor UR. Para ambas as cidades, as maiores diferenças de UR ocorrem no período de aquecimento das superfícies das 11 às 15 h, conforme mostra a figura 26.

Figura 26: Diferença UR dos DIs Sin e Udia



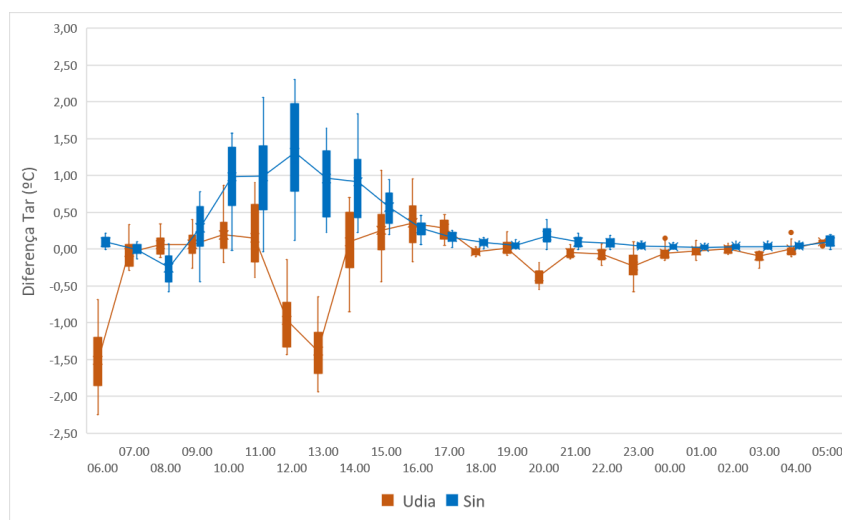
Quanto à diferença de umidade específica, apresentada na figura 27, as maiores diferenças foram registradas para o DI Udia (3g/kg), com todos os valores positivos, o que indica que o Uesp no DI Udia foi maior que o registrado nos pontos de controle. Por outro lado, DI Sin não apresentou diferenças consideráveis de Uesp em relação aos pontos de controle.

Figura 27: Diferença Uesp de DIs Sin e Udia



A Figura 28 mostra a diferença de Tar de Udia e Sintra e dos pontos de controle: após o pôr do sol, por volta das 19 h, os dois recortes apresentam uma diminuição da diferença de Tar, mantendo-se aproximadamente constante. Para o DI de Sintra, a diferença entre a temperatura do ponto de controlo e a temperatura no interior do DI manteve-se positiva durante quase todo o período, atingindo o seu pico às 12 horas, com uma diferença de 1,2°C. Já o recorte Udia apresentou comportamento inverso, durante o período de incidência da radiação, os pontos dentro do DI apresentaram temperaturas do ar mais baixas que os pontos controle, atingindo diferença máxima de -1,5°C, às 13 h.

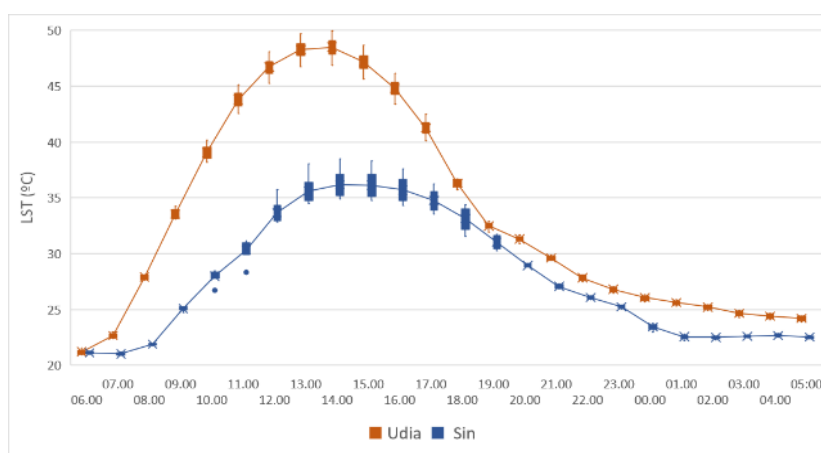
Figura 28: Diferença Tar dos DIs Sin e Udia



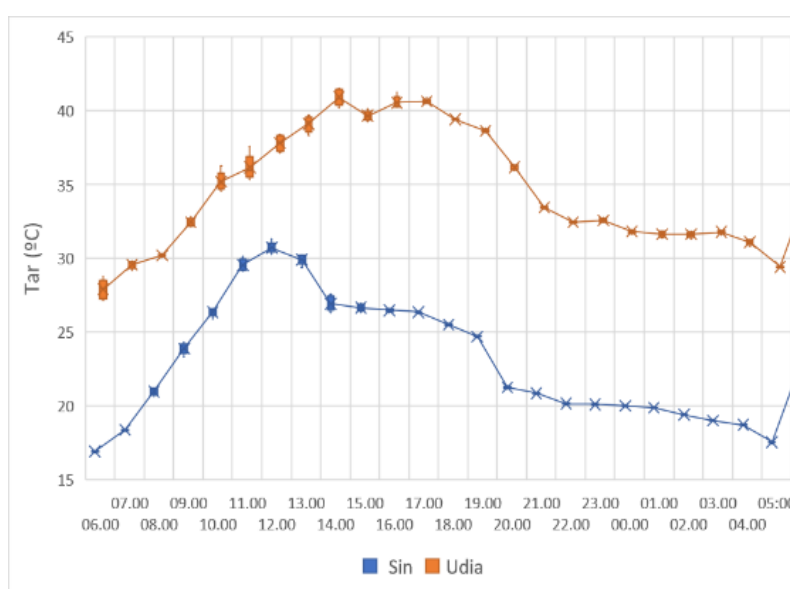
O comportamento apresentado pelos pontos dentro do DI Udia pode ser explicado analisando conjuntamente a diferença no Tar, UR, Uesp e WS: o período de 13h às 15h corresponde ao período com maior variação de UR (8%), maior variação de Uesp (g/kg), sendo o interior do DI o que apresenta maior UR, comparado aos pontos controle, associado ao baixo WS.

Ao comparar o LST nos cortes industriais, apresentado na figura 29, nota-se que o pico de LST no DI Sin é 25,5% inferior ao registado no DI Udia, sendo que os horários de pico coincidem com o Tar máximo independentemente da localização.

Figura 29: Comparativo (a) Tar e (b) LST dos DIs Sin e Udia



(a)



(b)

#### 4 Discussões e conclusões – Artigo 2

Esta seção apresenta os principais tópicos envolvidos no estudo do microclima de cada cenário estudado. A partir dos resultados obtidos, através de simulação computacional e análise multivariada, foi possível determinar a existência de grupos heterogêneos consoante a localidade, Sintra ou Udia. Este estudo permitiu analisar entre as variáveis Tar, UR, Uesp, WS, WD, SVF, albedo e LST quais apresentaram maior influência no microclima urbano industrial de Udia e Sintra. Para o DI da Udia, o Tar e o LST foram fatores determinantes, enquanto a UR, o WS e o albedo apresentaram influência significativa em Sintra.

Através da caracterização dos trechos estudados, percebem-se as principais discrepâncias identificadas entre os dois trechos cujo impacto nas variáveis estudadas

serão discutidas: o percentual de área construída e área pavimentada e o albedo. O DI Udia teve um percentual de superfície impermeabilizada 6,52% maior que o DI Sin, enquanto esta última teve 2,81% mais vegetação. O albedo do DI Sin foi 45% superior ao do DI Udia, ou seja, os materiais de construção presentes nesta amostra e sua composição física contribuíram para um maior albedo que o DI Udia, comprovando o impacto desta variável no microclima do DI Sin segundo a análise do PCA.

Galusic (2019) destaca que os pisos também desempenham um papel importante na temperatura do ar urbano, uma vez que superfícies com alto albedo e emissividade permanecem mais frias quando expostas à radiação solar, pois absorvem menos radiação e emitem mais radiação térmica para o espaço e, portanto, menos calor para o ambiente.

Como parâmetro comparativo, foram adotados pontos de controle em cada cidade, localizados em regiões com vegetação rasteira e sem edificações, ficam totalmente expostos à radiação solar e perdem umidade com mais facilidade, além de não se beneficiarem do efeito de sombreamento. Comparando a UR e a Uesp entre os DIs e os pontos controle, constatou-se que tanto a UR quanto a Uesp do DI Udia foram superiores às encontradas nos pontos controle, com picos de 8% e 3 g/kg, respectivamente, ao contrário do DI Sin, cuja diferença permaneceu próxima de zero.

O DI Sin e o DI Udia apresentaram valores próximos, em módulo, para a diferença entre o Tar e os pontos de controle, durante o período de aquecimento das superfícies (9h às 16h) e o DI Sin apresentou um pico 1,2°C maior no DI às 13 h, e no mesmo horário DI Udia apresentou -1,3 °C. Ou seja, o comportamento em relação ao Tar, UR e Uesp dos DIs estudados foi diferente.

Em Uberlândia, Silva *et al.* (2017) demonstraram diferenças de temperatura do ar de até 2,2°C para bairros periféricos, com muitos terrenos baldios, solo exposto e vegetação esparsa no inverno e 1,2°C no verão, através de transecto noturno móvel.

A LST do DI Udia foi superior ao apresentado no DI Sin durante todo o período simulado, atingindo pico de 48,49 °C às 15 h, seguindo a tendência do Tar. A LST é influenciada principalmente pela Tar devido ao seu controle sobre a troca de calor sensível entre a superfície da Terra e a atmosfera, com o calor fluindo da superfície mais quente para a atmosfera mais fria (Oke, 2002).

A correlação positiva de LST e Tar pode ser percebida em ambos os recortes em decorrência do calor emitido pelas indústrias e fábricas, intenso tráfego de veículos pesados e alto consumo de energia. Para áreas urbanas, a LST mais elevado devido ao efeito das ICUs pode causar um aumento na Tar, criando uma área de baixa pressão que atrai ar mais frio das áreas circundantes (Oke, 2002).

A fração de cobertura superficial impermeável está positiva e exponencialmente correlacionada com a LST, ao contrário da vegetação e da água. O impacto da superfície impermeável nas alterações regionais da LST pode ser seis vezes maior do que a soma das contribuições da vegetação e da água. Em termos percentuais, Xu, Lin e Tang (2013) apontam que uma adição de 10% de espaço verde ou água para cada 10% de redução de superfície impermeável pode diminuir a LST em até 2,9°C ou 2,5°C, respectivamente.

Quanto à importância da vegetação, Xiao *et al.* (2022) estudaram o impacto das áreas verdes em distritos industriais na China e os resultados mostram que o efeito de resfriamento e umidificação dos espaços verdes de médio porte foi mais significativo durante os horários de altas temperaturas durante o dia. Além disso, o resultado mostra que a forma e o tamanho da área dentro de um espaço verde têm uma influência significativa no resfriamento e na umidificação local.

O efeito da impermeabilização do solo provoca aumento da temperatura do ar e diminuição da umidade. Assim, evitar o processo de evaporação da água é um dos aspectos mais relevantes a ser considerado na escolha de materiais para superfícies urbanas. A porosidade e rugosidade dos edifícios, as condições de ventilação e os materiais das coberturas verticais impactam de forma complementar nas condições microclimáticas de um local (Galusic, 2019).

Comparando a diferença entre a WS nos DIs e nos pontos de controle, identificam-se valores negativos para os DI Sin e DI Udia atingindo até -1,9 m/s e -1,2 m/s, respectivamente, ou seja, o WS nos pontos de controle é maior do que o registrado nos DIs. A diferença menos pronunciada para o DI Udia poderá ser consequência da menor percentagem de área construída (-40%) comparativamente ao DI Sintra, uma vez que a maior densidade construída proporciona obstáculos físicos à passagem do vento, reduzindo a sua velocidade (Oke, 2002).

A região da grande Lisboa beneficia de ventos fortes, considerados fatores cruciais para a diminuição da intensidade da ICU ao anoitecer, atuando como fator de alívio no sobreaquecimento da região, segundo o Relatório de Identificação de ICU, porque em zonas críticas, a maior intensidade de ICU ocorre ao entardecer, com anomalias > 2°C, podendo ultrapassar 4°C, diminuindo para 1,1°C - 1,5°C ao entardecer (Lopes *et al.* 2020; Oliveira *et al.*, 2021).

O papel da ventilação na cidade de Lisboa foi evidenciado nos estudos de Lopes (2003), Lopes *et al.* (2013) e Matias e Lopes (2020) sobre o balanço de radiação superficial de materiais urbanos e o seu impacto na temperatura do ar em microescala num bairro de Lisboa. Os autores concluíram que tanto as temperaturas como o equilíbrio radiativo das fachadas e superfícies respondem diretamente à radiação solar incidente e



que quando as ruas não são beneficiadas pela direção predominante do vento, as temperaturas do ar tendem a ser mais elevadas em comparação com as ruas expostas ao vento. No entanto, em Sintra, um menor WS no DI Sin comparativamente aos pontos de controle teve um impacto negativo na redução da LST especialmente durante a tarde.

Assim, comparando os DIs de Sintra e Udia, pode-se concluir que embora o DI Udia possua materiais com menor albedo, que necessitam de mais tempo para aquecer e a perda de calor ocorre mais lentamente após o pôr do sol, e também apresenta menores porcentagens de vegetação, umidade relativa e velocidade do vento do que o DI Sin, as temperaturas do ar dentro dele podem ser mais baixas do que em ambientes sem sombra.

Embora o microclima do DI Sin seja dependente de outras variáveis, o WS, cuja função é o resfriamento e perda de calor da superfície para o ambiente (Oke, 2002) teve um impacto significativo e uma diferença de -1,9 m/s, em relação aos pontos de controle, este parâmetro causou um pico de 1,5°C no ambiente industrial, às 13 h. Portanto, o planejamento da ventilação urbana pode contribuir para o desenvolvimento urbano sustentável, considerando corredores de ventilação primária onde a direção do vento é predominante, parques e espaços verdes, e corredores de ventilação secundária complementares (Zhen *et al.*, 2022).

Este estudo é uma ferramenta útil para identificar as variáveis mais importantes para o microclima industrial de duas cidades diferentes. Para pesquisas futuras, pretende-se realizar medições *in loco* para verificar se as conclusões obtidas através das simulações se confirmam e expandir o estudo de outros tipos de LCZs. Dado que o albedo das coberturas e passeios de Sintra foi responsável pela elevação do albedo do recorte como um todo, propõe-se aumentar o albedo da cobertura Udia através da aplicação de uma tinta acrílica com elevada refletividade e um passeio com maior albedo. Espera-se que tais alterações tenham um impacto positivo na diminuição do Tar no DI Udia, tal como no DI Sintra, embora careça de demonstração.

## Referências

ABRANTES, P. Ordenamento e Planeamento do Território. **AML- Área Metropolitana de Lisboa.** Atlas Digital, 2016. Disponível em: <https://www.aml.pt/susProjects/susWebBackOffice>.

AKBARI, H.; MENON, S.; ROSENFELD, A. Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO<sub>2</sub>. **Climatic Change**, vol. 94, no. 3–4, p. 275–286, Jun. 2009. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10584-008-9515-9>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

ALCHAPAR, N. L. *et al.* The impact of different cooling strategies on urban air temperatures: the cases of Campinas, Brazil and Mendoza, Argentina. **Theoretical and Applied Climatology**, vol. 130, no. 1–2, p. 35–50, Oct. 2017. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00704-016-1851-5>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

ALCOFORADO, M. J. Fontes instrumentais e documentais para a reconstrução do clima do passado debatidas em conferência internacional. **Finisterra**. vol. 43 n.º 86, 2012. Disponível em: <https://revistas.rcaap.pt/finisterra/article/view/1403>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

AMORIM, M. C. de C. T.; DUBREUIL, V.; CARDOSO, R. D. S. Modelagem espacial da ilha de calor em Presidente Prudente/SP. **Revista Brasileira de Climatologia**, vol. 16, 30 Jun. 2015. Disponível em: <http://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/40585>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

AZEVEDO, A. M. MultivariateAnalysis para-R. 2022. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/MultivariateAnalysis/MultivariateAnalysis.pdf>. Acessado em: 25 Mar. 2023.

BECHTEL, B. *et al.* SUHI analysis using Local Climate Zones—A comparison of 50 cities. **Urban Climate**, vol. 28, p. 100451, Jun. 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212095519300239>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

CLIMATE.ONEBUILDING.ORG. Disponível em: <https://www.climate.onebuilding.org/>. Acessado em: 27 Jan. 2023.

CROCE, S. *et al.* The Use of Cool Pavements for the Regeneration of Industrial Districts. **Sustainability**, vol. 13, no. 11, p. 6322, 2 Jun. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/11/6322>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

DEMUZERE, M. *et al.* A global map of local climate zones to support earth system modelling and urban-scale environmental science. **Earth System Science Data**, vol. 14, no. 8, p. 3835–3873, 29 Aug. 2022. Disponível em: <https://essd.copernicus.org/articles/14/3835/2022/>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

FERREIRA, F. L. **Medição do albedo e análise da sua influência na temperatura superficial dos materiais utilizados em coberturas de edifícios no Brasil**. 2003. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001319699>.

FLANNER, M. G. Integrating anthropogenic heat flux with global climate models: anthropogenic heat flux and climate. **Geophysical Research Letters**, vol. 36, no. 2, Jan. 2009. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1029/2008GL036465>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

GALUSIC, B. **Ilhas de calor urbanas em São Carlos, SP e os impactos da permeabilidade dos revestimentos urbanos horizontais**. 2019. Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/102/102131/tde-09092019-103920/>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

GAO, J. *et al.* How does the ambient environment respond to the industrial heat island effects? An innovative and comprehensive methodological paradigm for quantifying the varied cooling effects of different landscapes. **GIScience & Remote Sensing**, vol. 59, no. 1, p. 1643–1659, 31 Dec. 2022. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15481603.2022.2127463>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

GARTLAND, L. **Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**. 1<sup>a</sup>. Editora Oficina de Textos, 2010.

GUNAWARDENA, K. R.; WELLS, M. J.; KERSHAW, T. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. **Science of The Total Environment**, vol. 584–585, p. 1040–1055, Apr. 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969717301754>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; JUNIOR, G. J. de O. Análise de Componentes Principais: Resumo Teórico, Aplicação e Interpretação. **E&S Engineering and Science**, vol. 5, no. 1, p. 83–90, 29 Jun. 2016. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/eng/article/view/3398>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

HUANG, X.; WANG, Y. Investigating the effects of 3D urban morphology on the surface urban heat island effect in urban functional zones by using high-resolution remote sensing data: A case study of Wuhan, Central China. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 152, p. 119–131, Jun. 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924271619301066>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Censo Demográfico 2022. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br). Acessado em: 26 Apr. 2022.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Fundamentos das Normas Climatológicas do Brasil, 2020. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em 18 de janeiro de 2021.

Instituto Nacional de Estatística (INE). Portugal. Acessado em: 28 Mar. 2023a.

Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA). Portugal. Disponível em: <https://www.ipma.pt/pt/index.html>. Acessado em: 28 Mar. 2023b.

KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, vol. 23, no. 3, p. 187–200, Sep. 1958. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/BF02289233>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

LEONI, R. C.; SAMPAIO, N. A. de S.; CORRÊA, S. M. Estatística Multivariada Aplicada ao Estudo da Qualidade do Ar. **Revista Brasileira de Meteorologia**, vol. 32, no. 2, p. 235–241, Jun. 2017. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-77862017000200235&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862017000200235&tlng=pt). Acessado em: 31 Mar. 2023.

LOPES, A. Cidades e alterações climáticas: Caderno de trabalhos práticos, Instituto de Ordenação do Território (IGOT). 2023.

LOPES, A. **Lisbon Climate Modification due to the Urban Growth Wind, Surface Heat Island and Energy Balance**. 2003. Tese de Doutoramento – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2003. Disponível em: [http://zephyrus.ulisboa.pt/sites/default/files/pub/ts/phd\\_al\\_2003.pdf](http://zephyrus.ulisboa.pt/sites/default/files/pub/ts/phd_al_2003.pdf).

LOPES, A. *et al.* Lisbon Urban Heat Island Updated: New Highlights about the Relationships between Thermal Patterns and Wind Regimes. **Advances in Meteorology**, vol. 2013, p. 1–11, 2013. Disponível em: <http://www.hindawi.com/journals/amete/2013/487695/>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

LOPES, A. S. *et al.* Identificação das Ilhas de Calor Urbano e Simulação para as áreas críticas da cidade de Lisboa. 2020. Disponível em: <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.26117.99047>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

LU, M. *et al.* Quantifying cooling benefits of cool roofs and walls applied in building clusters by scaled outdoor experiments. **Sustainable Cities and Society**, vol. 97, p. 104741, Oct. 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2210670723003529>. Acessado em: 28 Jul. 2023.

MAO, N. Analysis of Urban Street Microclimate Data Based on ENVI-met. *In*: ATIQUZZAMAN, M.; YEN, N.; XU, Z. (eds.). **Big Data Analytics for Cyber-Physical System in Smart City**. Advances in Intelligent Systems and Computing. Singapore: Springer Singapore, 2020. vol. 1117, p. 759–767. Disponível em: [http://link.springer.com/10.1007/978-981-15-2568-1\\_104](http://link.springer.com/10.1007/978-981-15-2568-1_104). Acessado em: 31 Mar. 2023.

MASIERO, É. *et al.* Urban morphology and prediction models of microclimatic phenomena in dry atmospheric context. **Revista Brasileira de Climatologia**, vol. 31, p. 259–284, 24 Aug. 2022. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/15707>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

MATIAS, M.; LOPES, A. Surface Radiation Balance of Urban Materials and Their Impact on Air Temperature of an Urban Canyon in Lisbon, Portugal. **Applied Sciences**, vol. 10, no. 6, p. 2193, 24 Mar. 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/6/2193>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

MENG, Q. *et al.* Do industrial parks generate intra-heat island effects in cities? New evidence, quantitative methods, and contributing factors from a spatiotemporal analysis of top steel plants in China. **Environmental Pollution**, vol. 292, p. 118383, Jan. 2022.

Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0269749121019655>.  
Acessado em: 31 Mar. 2023.

MOHAMMAD ARAB AMIRI; MESGARI, M. Modeling the Spatial and Temporal Variability of Precipitation in Northwest Iran. **Atmosphere**, vol. 8, no. 12, p. 254, 17 Dec. 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/8/12/254>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

MOHAN, M. *et al.* Industrial heat island: a case study of Angul-Talcher region in India. **Theoretical and Applied Climatology**, vol. 141, no. 1–2, p. 229–246, Jul. 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s00704-020-03181-9>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

MURGUIA, C.; VALLES, D.; PARK, Y.; KRAVI, S. Effect of high aged albedo cool roofs on commercial buildings energy savings in USA climates. **International Journal of Renewable Energy Research**, no. v 9, 2019. Disponível em: <https://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/8600>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

NORO, M.; BUSATO, F.; LAZZARIN, R. M. Urban heat island in Padua, Italy: Experimental and theoretical analysis. **Indoor and Built Environment**, vol. 24, no. 4, p. 514–533, Jul. 2015. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1420326X13517404>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. Routledge, 2002. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781134951345>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

OKE, T. R. *et al.* Simulation of surface urban heat islands under ideal conditions at night part 2: Diagnosis of causation. **Boundary-Layer Meteorology**, vol. 56, no. 4, p. 339–358, Sep. 1991. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/BF00119211>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

OLIVEIRA, A. *et al.* Heatwaves and Summer Urban Heat Islands: A Daily Cycle Approach to Unveil the Urban Thermal Signal Changes in Lisbon, Portugal. **Atmosphere**, vol. 12, no. 3, p. 292, 24 Feb. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/12/3/292>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

OLMEDO, G. *et al.* Tools and Functions to Estimate Actual Evapotranspiration Using Land Surface Energy Balance Models in R. **The R Journal**, vol. 8, no. 2, p. 352, 2016. Disponível em: <https://journal.r-project.org/archive/2016/RJ-2016-051/index.html>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

OZKERESTECI, I.; CREWE, K. Use and evaluation of the ENVI-met model for environmental design and planning: an experiment on linear parks. **Cartographic Renaissance**, Jan. 2003.

PALOMO AMORES, T. R. *et al.* Effect of green infrastructures supported by adaptative solar shading systems on livability in open spaces. **Urban Forestry & Urban Greening**,

vol. 82, p. 127886, Apr. 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1618866723000572>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

PELUSO, P.; PERSICHETTI, G.; MORETTI, L. Effectiveness of Road Cool Pavements, Greenery, and Canopies to Reduce the Urban Heat Island Effects. **Sustainability**, vol. 14, no. 23, p. 16027, 30 Nov. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/23/16027>. Acessado em: 28 Jul. 2023.

PRAENE, J. P. *et al.* GIS-based approach to identify climatic zoning: A hierarchical clustering on principal component analysis. **Building and Environment**, vol. 164, p. 106330, Oct. 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132319305402>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

PRASOON SINGH *et al.* Heat Island Effect in an Industrial Cluster – Identification, Mitigation and Adaptation. 2017. Disponível em: <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.34462.64322>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

RAPTI, T.; KANTZIOURA, A. Study of urban microclimate conditions in a commercial area of an urban centre and the environmental regeneration potential. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, vol. 899, no. 1, p. 012017, 1 Nov. 2021. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/899/1/012017>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

REIS, C. *et al.* Local Weather Types by Thermal Periods: Deepening the Knowledge about Lisbon's Urban Climate. **Atmosphere**, vol. 11, no. 8, p. 840, 8 Aug. 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/11/8/840>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

REIS, C.; LOPES, A.; NOURI, A. S. Assessing urban heat island effects through local weather types in Lisbon's Metropolitan Area using big data from the Copernicus service. **Urban Climate**, vol. 43, p. 101168, May 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212095522000864>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

RODRIGUES DE MELLO, M. A.; MARTINS, N.; SANT'ANNA NETO, J. L. A influência dos materiais construtivos na produção do clima urbano. **Revista Brasileira de Climatologia**, vol. 5, 3 Feb. 2017. Disponível em: <http://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/50473>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

SANTOS, E. F. N.; SOUSA, I. F. Análise estatística multivariada da precipitação do estado de Sergipe através dos fatores e agrupamentos. **Revista Brasileira de Climatologia**, vol. 23, 23 Oct. 2018. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/58267>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

SHINZATO, P.; DUARTE, D. H. S. Impacto da vegetação nos microclimas urbanos e no conforto térmico em espaços abertos em função das interações solo-vegetação-atmosfera. **Ambiente Construído**, vol. 18, no. 2, p. 197–215, Apr. 2018. Disponível em:

[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1678-86212018000200197&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212018000200197&lng=pt&tlng=pt). Acessado em: 31 Mar. 2023.

SILVA, C. M. A. da *et al.* Análise das variáveis climáticas das estações agrometeorológicas do estado de Sergipe através de métodos multivariados (2011 – 2013). **Gaia Scientia**, vol. 11, no. 1, 31 Mar. 2017. Disponível em: <http://www.periodicos.ufpb.br/index.php/gaia/article/view/34943>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

SILVA, I. C. S. **Índice ambiental urbano (IAU): uma contribuição ao estudo do planejamento e do conforto térmico em espaços abertos**. Doutorado (Arquitetura e Urbanismo) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

STEWART, I. D. **Redefining the urban heat island**. Doutorado em Filosofia. The Faculty of Graduate Studies, The University of British Columbia, Vancouver, 2011.

STEWART, I.D.; OKE, T. R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, vol. 93, no. 12, p. 1879–1900, 1 Dec. 2012. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

SUSCA, T.; ZANGHIRELLA, F.; DEL FATTO, V. Building integrated vegetation effect on micro-climate conditions for urban heat island adaptation. Lesson learned from Turin and Rome case studies. **Energy and Buildings**, vol. 295, p. 113233, Sep. 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778823004632>. Acessado em: 28 Jul. 2023.

USA. USGS Earth Explorer. 2023. **USGS Earth Explorer**. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acessado em: 27 Jan. 2023.

VALVERDE, M. C. *et al.* Urban climate assessment in the ABC Paulista Region of São Paulo, Brazil. **Science of The Total Environment**, vol. 735, p. 139303, Sep. 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969720328205>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

XIAO, X. *et al.* Influence of spatial characteristics of green spaces on microclimate in Suzhou Industrial Park of China. **Scientific Reports**, vol. 12, no. 1, p. 9121, 1 Jun. 2022. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-13108-1>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

XU, H.; LIN, D.; TANG, F. The impact of impervious surface development on land surface temperature in a subtropical city: Xiamen, China. **International Journal of Climatology**, vol. 33, no. 8, p. 1873–1883, 30 Jun. 2013. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.3554>. Acessado em: 29 Jul. 2023.

XU, X. *et al.* The cooling and energy saving effect of landscape design parameters of urban park in summer: A case of Beijing, China. **Energy and Buildings**, vol. 149, p. 91–100, Aug. 2017. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778816319764>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

WERNECK, D. R. **Estratégias de mitigação das ilhas de calor urbanas: estudo de caso em áreas comerciais em Brasília–DF**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)—Universidade de Brasília, Brasília, 2018. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/31816>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

YAN, S. *et al.* Cooling Effect of Trees with Different Attributes and Layouts on the Surface Heat Island of Urban Street Canyons in Summer. **Atmosphere**, vol. 14, no. 5, p. 857, 11 May 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/14/5/857>. Acessado em: 28 Jul. 2023.

ZHAO, X. *et al.* An analytical method to determine typical residential district models for predicting the urban heat island effect in residential areas. **Urban Climate**, vol. 41, p. 101007, Jan. 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212095521002376>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

ZHENG, Z. *et al.* Urban ventilation planning and its associated benefits based on numerical experiments: A case study in beijing, China. **Building and Environment**, vol. 222, p. 109383, Aug. 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132322006163>. Acessado em: 29 Jul. 2023.

ZSCHEISCHLER, J.; MAHECHA, M. D.; HARMELING, S. Climate Classifications: The Value of Unsupervised Clustering. **Procedia Computer Science**, vol. 9, p. 897–906, 2012. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877050912002177>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

### **Artigo 3: Simulação computacional e análise multivariada das variáveis microclimáticas de uma cidade tropical: industrial x residencial**

**Resumo:** Os efeitos das ICUs têm se intensificado com a maior urbanização e industrialização do ambiente natural. A gradual substituição da vegetação por edificações construídas com materiais de baixo albedo e alta inércia térmica e a alta densidade de construções têm contribuído para o aumento da temperatura atmosférica e superficial. Para identificar este fenômeno é crucial entender as correlações entre fatores físicos e o microclima local, além da correlação entre a temperatura superficial e as ICUs. O objetivo deste trabalho é identificar a formação de ICU em um distrito industrial a partir da análise das possíveis correlações existentes entre as variáveis que influenciam o microclima urbano. Neste contexto, foi proposta a coleta de dados in loco durante 15 dias de temperatura e umidade relativa do ar de um distrito industrial (DI) e uma área residencial central (R) em Uberlândia/MG. Estas informações foram utilizadas para a calibragem de



simulações computacionais, por meio do software ENVI-met, dos dois recortes urbanos. Para estimativa da intensidade de ICU, foram utilizados os dados da estação meteorológica situada no aeroporto, cujo pico máximo ocorreu às 21 h, atingindo 1,5°C para R e 5°C para DI. A partir dos resultados obtidos pelas simulações, 60 pontos aleatórios foram analisados em função da temperatura do ar (Tar), da umidade relativa (UR), da umidade específica (Uesp), da velocidade (WS), da direção do vento (WD), do Fator de Visão do Céu (SVF), da taxa de energia cinética turbulenta (TKE) e correlacionadas por meio de uma análise multivariada. Constatou-se que no recorte R, as variáveis WS e SVF (0,505), UR e TKE (0,603) estão fortemente correlacionadas positivamente, Tar e UR estabeleceram forte correlação negativa (-0,981); no recorte industrial (DI), as variáveis com forte correlação foram LST e Tar (0,603), SVF e WS (0,704), WS e WD (0,643), WD e SVF (0,694) e novamente UR e TKE (0,705), demonstrando a importância do vento para este local, principalmente quando este é favorecido pela orientação das ruas principais. Frente à intensidade de ICU registrada e às variáveis mais impactantes detectadas para o DI, um planejamento urbano com foco na melhor distribuição e disposição das ruas e avenidas e maior arborização do espaço e aplicação criteriosa de materiais superficiais poderiam contribuir para o arrefecimento do local e consequentemente para a redução do calor acumulado durante o dia.

### **1 Introdução – Artigo 3**

O efeito da ilha de calor urbano (ICU) ocorre como resultado do aumento do fluxo de calor sensível da superfície terrestre para a atmosfera próxima às cidades (Kato; Yamaguchi, 2005). A diminuição na evaporação e na evapotranspiração é ocasionada pelos parâmetros de superfície relacionados à substituição da cobertura vegetal, zonas úmidas e superfícies de água por superfícies artificiais, podendo causar um aumento na temperatura atmosférica e superficial entre 4°C a 6°C (Jain *et al.*, 2021; Xi *et al.*, 2012; Renard *et al.*, 2019).

Somado a esta substituição gradual, tem-se o efeito causado por edificações construídas de materiais de baixo albedo e alta inércia térmica, responsáveis por absorver e armazenar calor por um tempo maior, por parâmetros morfológicos interligados à rugosidade urbana, que podem reduzir a velocidade do vento, e pelo fator de visão do céu (SVF), que pode limitar a perda de calor à noite (Qaid *et al.*, 2018).

Os procedimentos propostos por Stewart e Oke (2012), fornecem uma abordagem confiável para investigar quais variáveis climáticas têm maior impacto nos microclimas locais e na ocorrência de ICUs. A partir da classificação da paisagem em LCZ – Zonas Climáticas Locais –, a influência da morfologia urbana, de sua estrutura, do metabolismo e da cobertura do solo no microclima local pode ser investigada (Stewart, Oke, 2012; Mu *et al.*, 2020). Tal classificação permite entender o impacto potencial das propriedades das

superfícies sobre as ICUs, além de considerar a amplitude dos elementos envolvidos no balanço energético (Oke *et al.*, 2017).

O SVF, conceito geométrico que descreve a fração desobstruída do céu, é um dos fatores físicos amplamente utilizado em estudos do clima urbano e trocas de energia entre superfície e atmosfera, seja através do ganho de ondas curtas ou da perda de ondas longas em escala urbana (Oke, 1988). Este parâmetro permite avaliar as condições micrometeorológicas dentro dos espaços urbanos (Qaid *et al.*, 2018; Yıldız *et al.*, 2023) e as condições de conforto térmico (He *et al.*, 2015; Hwang; Lin; Matzarakis, 2011; Krüger; Minella; Rasia, 2011).

O fluxo de ar entre áreas rurais e urbanas é um dos parâmetros que regem a formação de ICU e acúmulo de poluição (Oke, 1982). A alta rugosidade da superfície urbana tem impacto sobre a velocidade horizontal do vento, diminuindo-a devido à alta densidade de estruturas construídas (Oke, 1988; Wong *et al.*, 2010).

O fluxo de calor sensível é composto por dois componentes: calor antropogênico liberado e a radiação de calor devido à incidência de raios solares (Kato; Yamaguchi, 2005). Utilizando imagens de satélite, os pesquisadores estimaram a contribuição de cada parcela em Nagoya, Japão, durante as quatro estações do ano. O fluxo de calor sensível durante o outono, à noite, foi quase nulo, exceto em áreas urbanas e sobre corpos d'água. Durante o inverno, o calor antropogênico foi responsável pela totalidade de fluxo de calor sensível nas áreas urbanas e se manteve alto nas áreas industriais ao longo do ano.

A superfície de grandes centros urbanos residenciais armazena calor durante o dia e o libera à noite. Em particular, o fluxo de calor de armazenamento negativo aparece em várias edificações, pois a alta temperatura da superfície na área industrial é resultado do consumo de energia em massa, ou seja, a maior parte da descarga de calor antropogênico é transferida para a atmosfera como calor sensível, podendo variar de 13 Wm<sup>-2</sup> para 50 Wm<sup>-2</sup> em áreas comerciais e industriais, respectivamente (Kato; Yamaguchi, 2005; Chow *et al.*, 2014).

Há diversas maneiras de se quantificar e avaliar gradientes térmicos em áreas urbanas. Para a medição da temperatura do ar comumente são usadas medições fixas com estações meteorológicas portáteis ou apenas termo-higrômetros. Em função da limitação da quantidade de equipamentos disponíveis para uma pesquisa, é possível recorrer a medições por transectos móveis (Liu *et al.*, 2017; Megda; Masiero, 2021) que consiste em planejar trajetos pelo ambiente urbano e rural em períodos específicos para registrar

a variação de temperatura, de umidade do ar, de radiação solar, ventos entre outras variáveis microclimáticas.

Quanto ao estudo da correlação entre as temperaturas superficiais e temperatura do ar, o sensoriamento remoto por meio de imagens de satélites é um procedimento bastante usado. Consiste inicialmente na medida da radiação térmica ascendente convertida posteriormente através de algoritmos (Yıldız *et al.*, 2023; Keeratikasikorn; Bonafoni, 2018). Werneck (2018) explica que para avaliar as condições climáticas e de conforto térmico urbano destacam-se os softwares TownScope, RayMan, SOLWEIG, Umi e o ENVI-met, sendo este último, o mais utilizado (Perera *et al.*, 2022; Werneck, 2018; Noro, Marco; Lazzarin, 2015) e a realização de medição das variáveis *in loco* para validação do modelo computacional, a exemplo de Li *et al.* (2013), Alchapar *et al.* (2017), Pezzuto, Alchapar, Correa (2022) e que será utilizado como parte da metodologia deste trabalho.

Roth, Oke e Emery (1989) foram os pioneiros ao desenvolverem um importante estudo com uso de imagens de satélite de três cidades costeiras dos Estados Unidos e Canadá. Ao analisarem a climatologia urbana das três cidades, concluíram, por meio da temperatura radiante de superfície, que a intensidade de ICUs é maior durante o dia e na estação quente. Atestam que os padrões térmicos durante o dia dentro das cidades estão fortemente correlacionados à temperatura superficial.

Mallick, Rahman e Singh (2013) estudaram a temperatura superficial do centro comercial de Nova Delhi, Índia, e áreas comerciais/industriais, analisando imagens noturnas do satélite ASTER e concluíram que tais regiões apresentaram temperatura superior a 4°C em comparação com os subúrbios. Este aumento é atribuído ao impacto cumulativo das atividades humanas, mudanças no padrão de cobertura do solo e densidade de vegetação.

A associação da LST ao aumento da Tar e à formação de ICUs é amplamente explorada em estudos de Chorudhury, Das e Das (2019) no Egito, Ullah *et al.* (2019) no Paquistão, Saha *et al.* (2021) na Índia, Bokaie *et al.* (2016), no Irã, Santos, Simionatto e Felici (2020), Paracatu/Brasil, (Almeida *et al.* 2015; Zanzarini *et al.*, 2013; Conceição *et al.* 2018; Cruz, 2018; Wang *et al.*, 2023). A maioria destes estudos associaram a LST ao Normalized Difference Vegetation Test (NDVI) e comprovaram que este índice tem impacto direto sobre a LST e que a cobertura por árvores e edificações explicam juntos mais de 68% a variação da LST. Portanto, mudanças no percentual deste fator tem elevado potencial de impacto sobre a LST urbana (Alexander, 2020).

O cálculo do NDVI envolve a composição de bandas espectrais próximas ao infravermelho e ao visível, que resulta em uma única processada nas bandas 4 e 5 de imagens do satélite *Landsat 8*. A equação proposta por Rouse *et al.* (1973) é a mais aplicada:

$$NDVI = \frac{(NIR-VIS)}{(NIR+VIS)} \quad (4)$$

Onde

NIR (*near infra-red*) = infravermelho próximo; VIS (*visible*) = vermelho

O índice varia de -1 a 1, e quanto mais próximo de 1 maior a densidade de vegetação da área estudada.

O efeito da vegetação sobre a temperatura do ar foi monitorado, via imagens de satélite, por Renard *et al.* (2019), em espaços de Lyon, França. A cidade passou por uma reestruturação e uma redefinição de funcionalidade, isto é, locais antes ocupados por áreas industriais foram submetidos a uma “reabilitação” aumentando, por exemplo, o percentual de vegetação com o intuito de combater as altas temperaturas urbanas. Os resultados se mostraram promissores, pois o aumento da vegetação foi acompanhado da diminuição da temperatura da superfície e aumento da umidade. Segundo Perera *et al.* (2022) a vegetação tem a capacidade de reduzir a temperatura do ar de 2,07°C (a 5°C. O efeito da evapotranspiração, a umidificação e o sombreamento das superfícies da área são essenciais no processo de arrefecimento (Akbari; Menon; Rosenfeld, 2009). O aumento da quantidade real de vapor de água na atmosfera induzida pela evapotranspiração pode aumentar a umidade relativa e diminuir a temperatura do ar (Pretzsch *et al.*, 2015).

A taxa de energia cinética turbulenta (TKE) tem sido amplamente utilizada em pesquisas para entender como a transformação de florestas em plantações impacta nos parâmetros biofísicos da superfície (June *et al.*, 2018). Há uma interrelação entre a atmosfera e a vegetação que cobre a superfície (Richardson *et al.*, 2013). Os parâmetros biofísicos da superfície terrestre incluem a rugosidade da superfície, velocidade de atrito, que indica a força da turbulência, os fluxos de calor latente e sensível e os fluxos de CO<sub>2</sub> (Arya, 2001). Tais parâmetros de rugosidade são utilizados para descrever as trocas de calor, vapor de água e gases de efeito estufa entre a superfície e atmosfera, como o CO<sub>2</sub>.

A rugosidade da superfície determina a velocidade vertical do vento e o perfil da temperatura do ar (Raupach, 1994), a troca de energia superfície-atmosfera (Yang, Friedl, 2003) e a mistura turbulenta de ar abaixo, dentro e acima do cânion.

O cálculo da TKE é realizado pela equação, durante o dia por conta das condições atmosféricas mais instáveis se comparado à noite, isto é, durante o dia o gradiente

potencial de temperatura do ar torna-se negativo, à medida que o fluxo de calor sensível transfere calor da superfície mais quente para a atmosfera mais fria, condição que se inverte durante a noite (Stull, 2000; Arya, 2001).

$$TKE = 0.5 [\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2] \quad (4)$$

onde  $\sigma_u^2$ ,  $\sigma_v^2$  e  $\sigma_w^2$  são as variações das componentes longitudinais, laterais e verticais da velocidade do vento.

Segundo June *et al.* (2017), a existência de turbulência (TKE) impulsiona o processo de transferência de calor, e que a turbulência atinge um máximo quando o aquecimento da superfície é máximo sob condições instáveis, resultando em alta fluabilidade e cisalhamento do vento próximo da superfície.

Como os fenômenos de ICU envolvem diversas variáveis, como SVF, vegetação, calor antropogênico, umidade, superfícies impermeabilizadas, radiação incidente e fluxos de ar, a análise multivariada, em especial a análise fatorial, é uma alternativa viável e eficiente para analisar resultados. Tais procedimentos possibilitam reduzir a dimensionalidade das variáveis, portanto, analisar as variáveis de maior importância para cada grupo envolvido (Hongyu; Sandanielo; Junior, 2016) e estabelecer pesos de influência de cada um deles sobre o fenômeno.

Leoni *et al.* (2017), Santos e Sousa (2018), Praene *et al.* (2019), Valverde *et al.* (2020), Pezzuto, Alchapar e Correa (2022) são exemplos de estudos que procuraram aplicar ferramentas da análise de componentes principais (PCA) para determinar a importância de cada variável no contexto microclimático de recortes urbanos, sobretudo, a correlação existente entre tais variáveis.

A região em que Uberlândia está localizada possui raros estudos sobre ICUs. Os trabalhos desenvolvidos por Silva *et al.* (2018) e Vieira, Machado (2019), por exemplo, apontaram uma intensidade máxima de 2.2 °C de ICU para o inverno e 1.2°C no verão, com ênfase para bairros periféricos cuja intensidade de ICU é maior se comparada a outros bairros. Entretanto, é importante ressaltar que tais trabalhos, embora tenham identificado ocorrência de ICUs, não se aprofundaram nas discussões de suas causas e suas possíveis consequências de cenários microclimáticos futuros em função da ocupação urbana do município.

O objetivo deste trabalho é identificar a formação de ICU em um distrito industrial e em um bairro residencial em uma região tropical, bem como analisar as possíveis correlações existentes entre as variáveis que influenciam o microclima urbano como a temperatura do ar (Tar), umidade relativa (UR) e umidade específica (Uesp), velocidade

(WS) e direção do vento (WD), fator de visão do céu (SVF) a taxa de energia cinética turbulenta (TKE).

## 2 Metodologia – Artigo 3

A presente pesquisa fez uso da coleta de dados *in loco*, a simulação microclimática com o uso do programa computacional ENVI-met 5.0 e a análise multivariada para verificar os fatores mais influentes no microclima em duas LCZs. Neste sentido, os procedimentos metodológicos podem ser resumidos à caracterização física dos recortes estudados, a simulação da LST, da temperatura do ar (Tar), da umidade relativa (UR), da umidade específica (Uesp), da velocidade (WS) e direção do vento (WD), do fator de visão do céu (SVF), da taxa de energia cinética turbulenta (TKE), da ocorrência de ICUs, bem como o desenvolvimento de uma análise multivariada para identificar as correlações entre tais fatores no microclima urbano.

Primeiramente, foram selecionados recortes representativos de uma região residencial central e outra industrial na periferia de Uberlândia/MG. A escolha do município justifica-se pela escassez de estudos sobre o tema e por sua importância no estado de Minas Gerais.

O município está situado no Triângulo Mineiro, é um grande polo logístico e industrial, que segundo IBGE (2022), cresceu 20% em comparação com o Censo de 2010, alcançando o posto de cidade com maior aumento populacional em Minas Gerais e ocupa, em relação ao país, a posição 28ª no ranking de maior população. A cidade possui 173,32 hab/km<sup>2</sup>, totalizando 713.232 habitantes. O clima é tropical com estação seca (Aw) na classificação de Köppen-Geiger, altitude de 863 m, IDH de 0,789 segundo IBGE (2022).

Os recortes urbanos foram classificados a partir da metodologia de *Local Climate Zones* proposta por Stewart e Oke (2012). A escolha dos recortes, apresentados na figura 30, justifica-se por pertencerem a um bairro residencial central (R) classificado como LCZ 3, caracterizado por densa área construída, com poucas árvores, maior parte da área pavimentada e presença de materiais construtivos concreto, aço, rocha e vidro; e o recorte do Distrito Industrial (DI), classificado como LCZ 8, composto por construções e árvores baixas, alto percentual impermeabilizado, segundo classificação de Stewart, Oke (2012) e Demuzere *et al.* (2022).

Na figura 30a são apresentados o perímetro urbano de Uberlândia, a localização dos recortes e a distribuição de LCZ no território do município (figura 30b).

Figura 30: (a) Localização dos recortes estudados no perímetro urbano de Uberlândia; (b) LCZs (escala 1:100000)



Fonte: Adaptado de Demuzere *et al.* (2022)

Foram realizadas medições *in loco* da temperatura (Tar) e umidade relativa (UR) do ar, durante 15 dias consecutivos, de 16/05/2023 a 30/05/2023, utilizando-se dez termo-higrômetros posicionados a 1,8 m do solo, cinco em cada recorte, cuja localização é mostrada na figura 31a e 31b. Os dias de coleta foram caracterizados por céu claro, isento de precipitação e ventos calmos. Os recortes estudados foram quadrados de 500 m de lado, devido às limitações computacionais para modelagem no ENVI-met 5.0.

Figura 31: Posicionamento dos termo-higrômetros nos recortes; (a) R; (b) DI



Os termo-higrômetros foram posicionados em locais de ampla exposição ao sol, visando reduzir os efeitos de sombreamento sobre as variáveis medidas.

Os dados de temperatura do ar e umidade relativa coletados foram utilizados como *input* para a validação do modelo de simulação na ferramenta *Simple Forcing*. A simulação foi realizada durante 24 horas iniciando às 19:00 h.

Tabela 5: Dados de *input* para simulação ENVI-met

Dados de entrada	Valores adotados	Fonte
Umidade específica a 2500 m (g/kg)	8	Universidade de Wyoming
Velocidade do vento (m/s)	2	A 507 Uberlândia/MG (-18,91, -48,25°), altitude de 874,77 m (INMET, 2023)
Rugosidade	0,01 (industrial) 0,1 (central)	Oke (1988)

Para o cálculo da intensidade de ICU em cada recorte, foi calculada a diferença horária dos dados obtidos via simulação e os dados da estação meteorológica situada no aeroporto de Uberlândia/MG, A 507, para o dia 25/05/23.

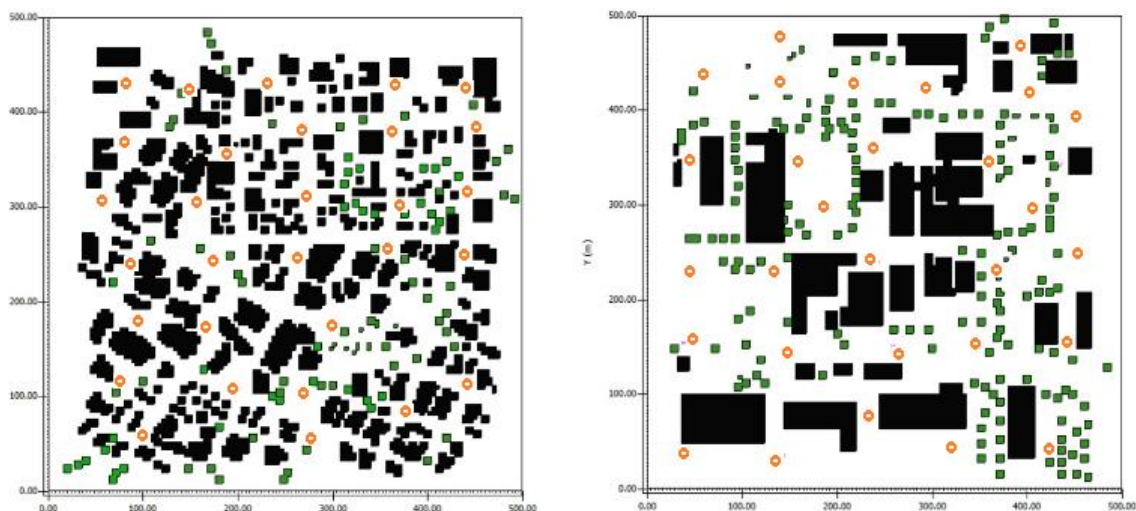
Após as simulações, foram extraídos os seguintes dados de 30 pontos aleatórios para cada recorte, às 14h, cujas posições são mostradas na figura 32:

- Temperatura potencial do ar (Tar);
- Umidade relativa (UR);
- Umidade específica do ar (Ues);
- Velocidade do vento (WS);
- Direção do vento (WD);
- Fator de visão do céu (SVF);
- Energia cinética turbulenta (TKE);
- Temperatura superficial (LST).

Os dados foram analisados utilizando análise multivariada implementada no *software R* para identificar os componentes principais de cada recorte, a correlação entre as variáveis estudadas, o agrupamento de dados e as variáveis mais expressivas para o microclima de 30 pontos de cada recorte.



Figura 32: Locais aleatórios de extração de dados dos 30 pontos (a) R; (b) DI



A caracterização dos recortes foi realizada com o levantamento das áreas dos recortes ocupadas por vegetação, área construída e área asfaltada utilizando-se o *software QGIS*<sup>®</sup>. Para análise do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) utilizou-se o aplicativo *GreenExplorer* que permite obter, entre outros índices de vegetação, o NDVI, a partir de 1984 para uma determinada região. Os dados são extraídos das imagens de satélite *Landsat 5, 7 e 8* (Salazar *et al.*, 2021). Optou-se por comparar os dados de NDVI dos últimos 10 anos.

A Rosa dos Ventos foi obtida com o auxílio dos *softwares WRPlot e Google Earth Pro*, a partir dos dados de velocidade do vento extraídos da estação meteorológica A507, situada no aeroporto (INMET, 2023) para o dia simulado.

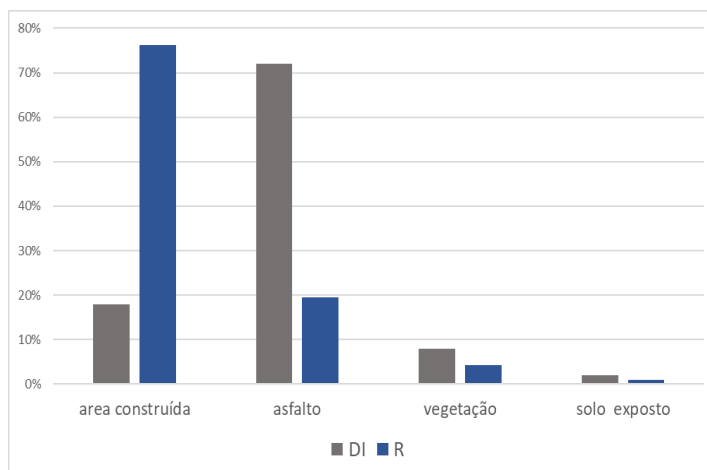
### 3. Resultados e Discussão – Artigo 3

Primeiramente será mostrada uma visão geral dos resultados obtidos via simulação para os recortes estudados. Então serão analisados os recortes separadamente para verificar a influência de cada variável no recorte e suas correlações.

#### 3.1 Caracterização dos recortes estudados

Na figura 33, é mostrada a constituição física dos recortes estudados. O recorte residencial (R) é densamente construído, com percentual de vegetação próximo a 1%. Já o recorte industrial (DI), apresenta amplo espaço impermeabilizado, porém baixo percentual de área construída. Por se tratar de um distrito industrial em expansão, ainda apresenta espaços vazios.

Figura 33: Composição física dos recortes estudados

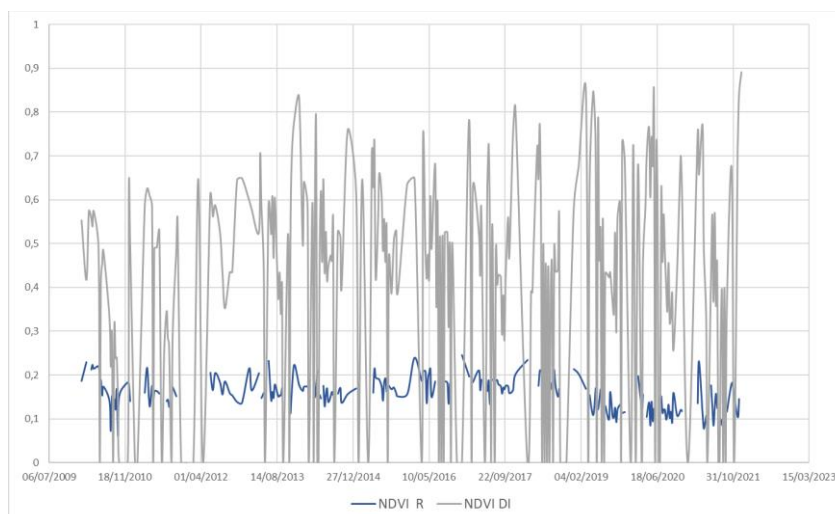


Mesmo a taxa de vegetação sendo próxima para os dois locais, nota-se que o DI é cercado por vegetação, enquanto no recorte R, a vegetação é quase inexistente. A influência da vegetação no microclima pode ser verificada pela da evapotranspiração, que converte energia solar em água evaporada, e pelo sombreamento, que diminui o calor armazenado pelas superfícies cobertas mantendo a Tar mais baixa (Gartland, 2010).

Para avaliar a efetiva contribuição da vegetação na melhoria das condições microclimáticas é interessante avaliar o NDVI destas áreas, pois segundo Barbosa *et al.* (2019), existe uma correlação entre a redução do vigor de biomassa da vegetação no processo de urbanização e o aumento da temperatura das superfícies e do ar.

Ao verificar o NDVI, cuja variação nos últimos dez anos é apresentada na figura 34, percebe-se que este índice apresenta ampla variação dependente da estação analisada para o DI: nos períodos de seca (inverno e início da primavera) atinge -0,2, enquanto nos períodos chuvosos (primavera e verão) atinge 0,8. Para o recorte R, o NDVI varia de 0,1 a 0,2, para os dez anos analisados.

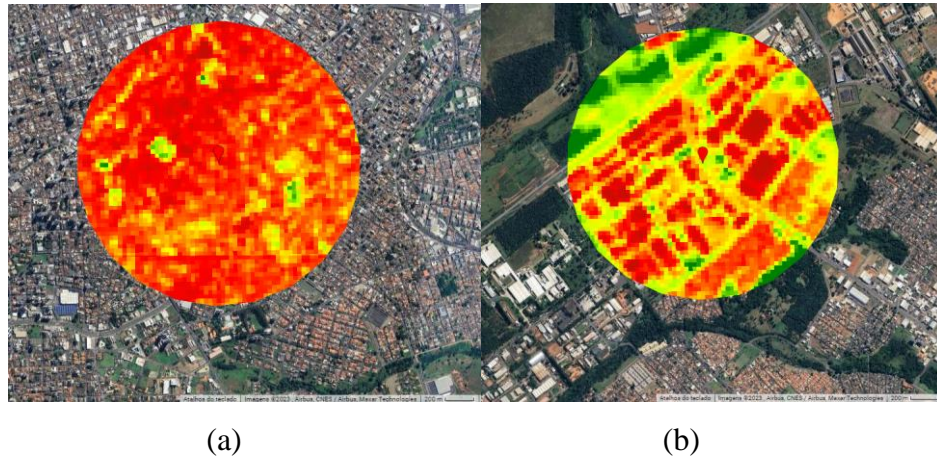
Figura 34: Variação do NDVI nos últimos 10 anos



Fonte: Adaptado de *GreenExplorer* (2023)

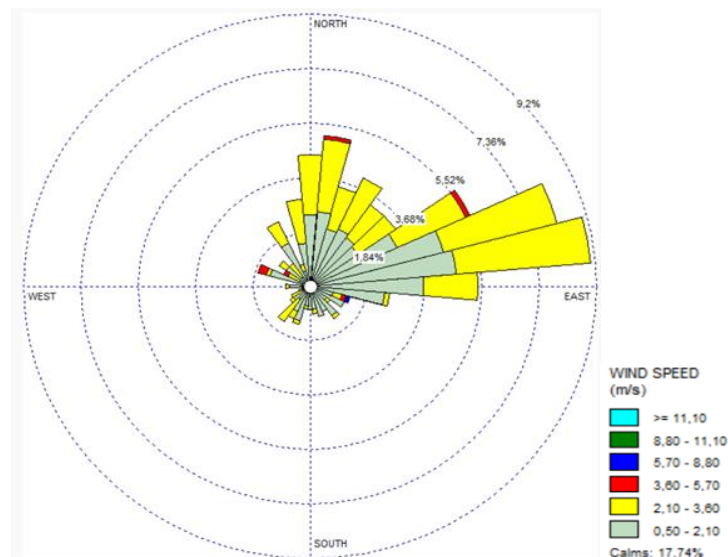
O NDVI atual, das regiões estudadas, pode ser visto em imagens de satélite obtidas via *GreenExplorer* (Figura 35). As cores mais claras indicam NDVI maiores presentes no recorte DI, ou seja, com maior vigor da vegetação, enquanto o vermelho representa NDVI próximo a 0, característico dos centros densamente povoados, recorte R.

Figura 35: Imagens de satélite para identificar o NDVI (a) R; (b) DI



O vento também desempenha papel de destaque no estudo do microclima. No dia em questão, 25/05/23, os ventos predominantes para Uberlândia foram a NE e a maior frequência de ventos com velocidade de 2.10 m/s a 3,6 m/s, apresentada na Rosa dos Ventos (figura 36).

Figura 36: Rosa dos Ventos de Uberlândia/MG



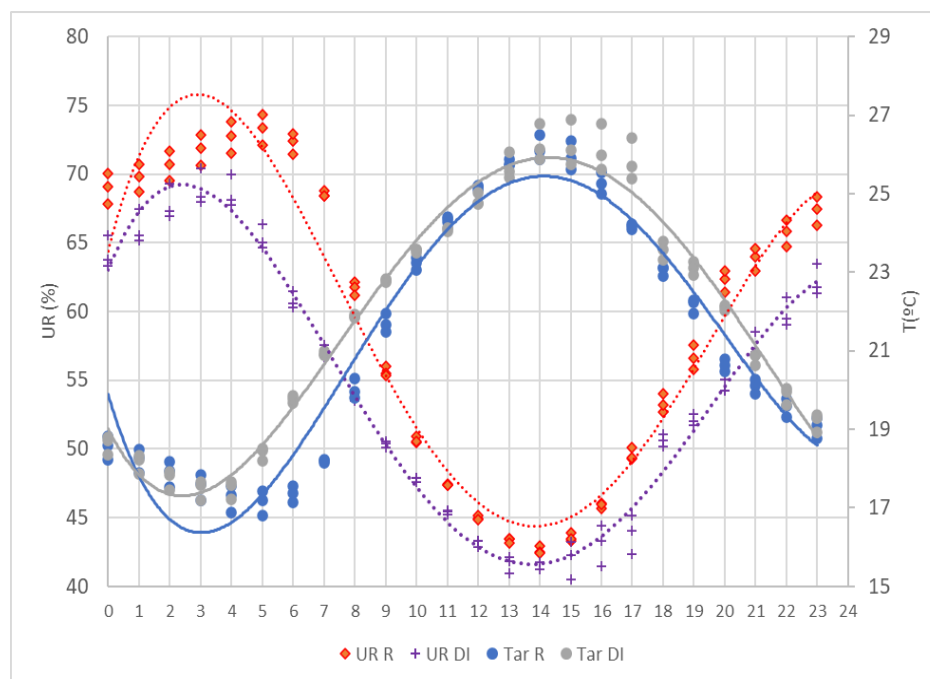
Fonte: Adaptado de *WRPLOT* (2023) para estação A507

A caracterização do espaço estudado fornece uma perspectiva preliminar dos mecanismos envolvidos no microclima urbano, todavia, o microclima é resultado da interação de variáveis climáticas e da composição do espaço físico.

### 3.2 Tar, UR e intensidade de ICU

Para a análise do microclima de um local, a Tar e a UR são algumas das variáveis mais importantes e, portanto, na figura 37 são apresentados seus valores ao longo das 24 h simuladas do dia 25/05/23 para o DI e residencial.

Figura 37: Tar e UR simulados para os recortes estudados



A Tar ao longo das 24 h simuladas se manteve maior no DI se comparada ao recorte residencial, atingindo até 1,3° C superior no início da manhã. O recorte residencial possui a maior UR em todo período analisado.

A caracterização dos recortes estudados mostra que as principais discrepâncias identificadas entre os dois recortes se relacionam ao percentual de área construída e de área pavimentada. No DI, é comum pavimentar os estacionamentos ou áreas abertas destinadas a depósito ou fabricação de produtos (concreto, pré-fabricados). Mesmo o recorte residencial tendo ampla área impermeabilizada por construções, estas utilizam telhas cerâmicas, enquanto na área industrial é predominante o uso de telhas metálicas do tipo sanduíche, que tendem a refletir calor com maior intensidade.

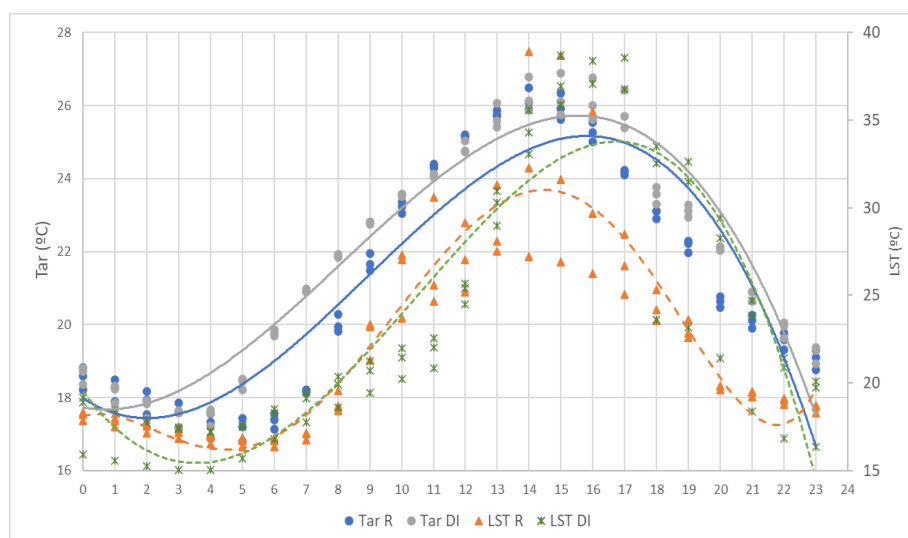
Ao analisar a contribuição dos materiais construtivos no microclima de um ambiente, deve-se atentar às propriedades térmicas destes materiais, em especial, a emissividade térmica e o albedo. Considera-se um material fresco aquele que possui alta albedo e alta emissividade térmica (Gartland, 2010). Portanto, comparando estas propriedades para os materiais predominantes nas coberturas e na impermeabilização do solo tem-se que a emissividade das telhas cerâmicas e de aço galvanizado é semelhante.

Porém, o albedo da telha cerâmica é aproximadamente 80% superior às telhas metálicas (Andrade, 2011).

O asfalto, presente em aproximadamente 72% da superfície do DI, possui alta emissividade térmica (90%) e após sua instalação atinge 5-10% de albedo, com o tempo tende a clarear, e seu albedo pode atingir 20%, ou seja, considerada baixo.

As propriedades térmicas dos materiais construtivos que compõem os recortes DI e R podem auxiliar na explicação para a diferença na Tar e LST registradas na figura 38. A maior taxa de vegetação presente no DI não é capaz de superar o efeito da alta taxa de impermeabilização por asfalto e das coberturas dos amplos galpões, compostas por telhas metálicas sem revestimento, que tendem a reter calor, possuem emissividade térmica baixa e geralmente se aquecem a 50 °C - 70 °C sob o sol (Gartland, 2010).

Figura 38: Tar e LST para DI e R

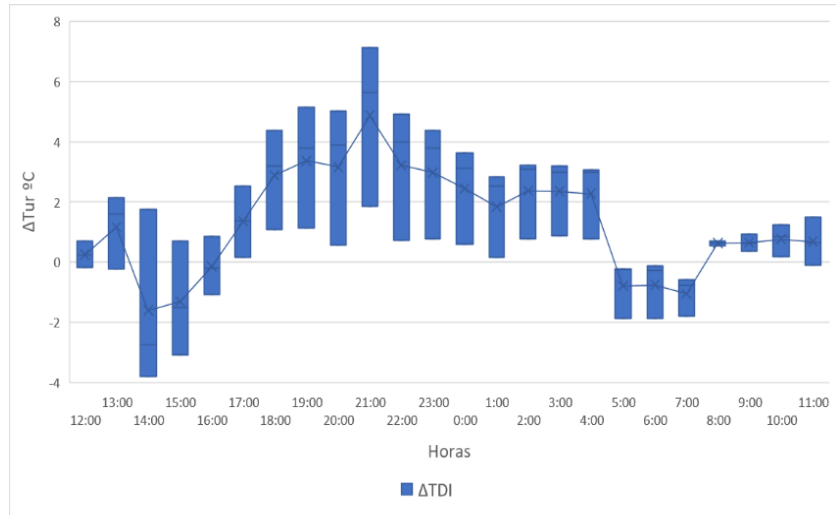


Quando se compara a LST dos recortes DI e R, esta mantém a tendência da Tar e permanece o mesmo para os dois recortes até às 14 h, a partir deste horário a LST do DI fica até 2,5°C mais elevada que o residencial.

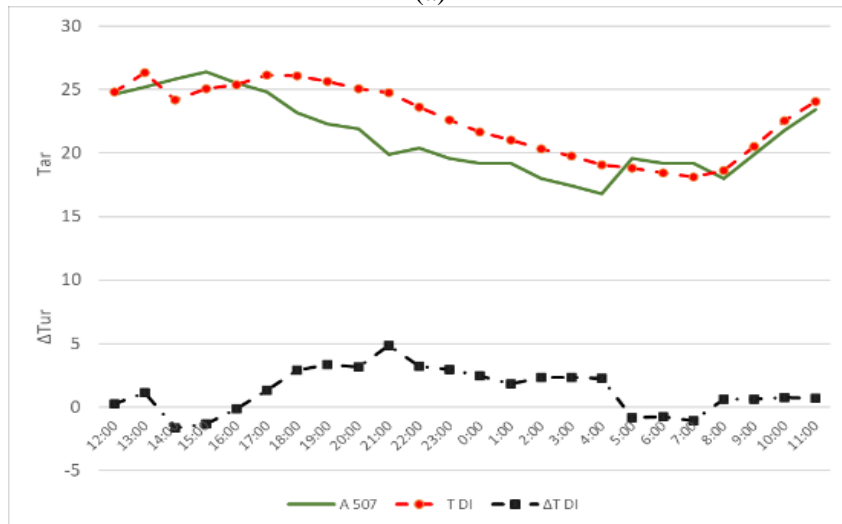
Quanto à intensidade da ICU, Oke (1988) afirma que a característica mais notável é a redução do resfriamento na área urbana no final da tarde e à noite, resultando em uma temperatura mínima noturna mais elevada na cidade. O aquecimento da área urbana também é mais lento após o nascer do sol. A intensidade da ICU normalmente cresce do meio ao final da tarde, até atingir o pico máximo, cerca de 3 a 5 horas do pôr do sol. Podem ocorrer exceções, por exemplo, o pico ser atingido depois do nascer do sol ou algumas cidades,  $\Delta T_{u-r}$  pode até ser negativa ao meio-dia período, ou seja, centro urbano mais frio do que o campo (Oke, 1988).

A intensidade de ICU observada para os recortes estudados é apresentada na figura 39:

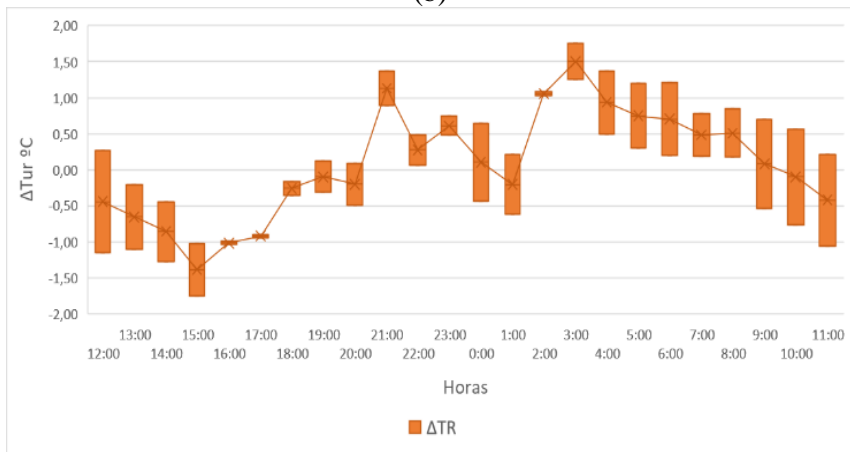
Figura 39: (a) Intensidade de ICU no DI e (b) Tar no DI; (c) Intensidade de ICU em R e (d) Tar residencial



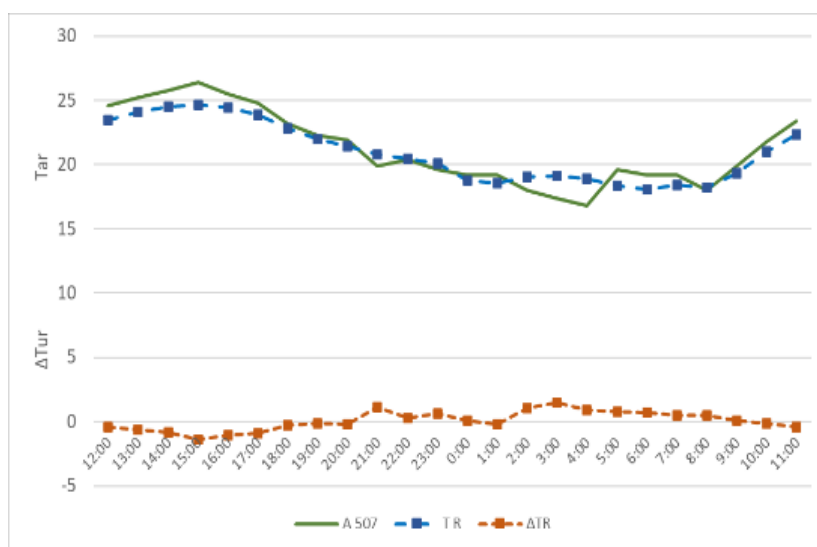
(a)



(b)



(c)



(d)

Na atual pesquisa, a intensidade da ICU aumenta das 18 h às 21 h, para o DI sendo o pico às 21 h (5°C). No recorte residencial, um pico ocorre às 21:00 h e o máximo às 3 h apresentando maior oscilação se comparado ao recorte anterior, porém menor intensidade (1,5°C).

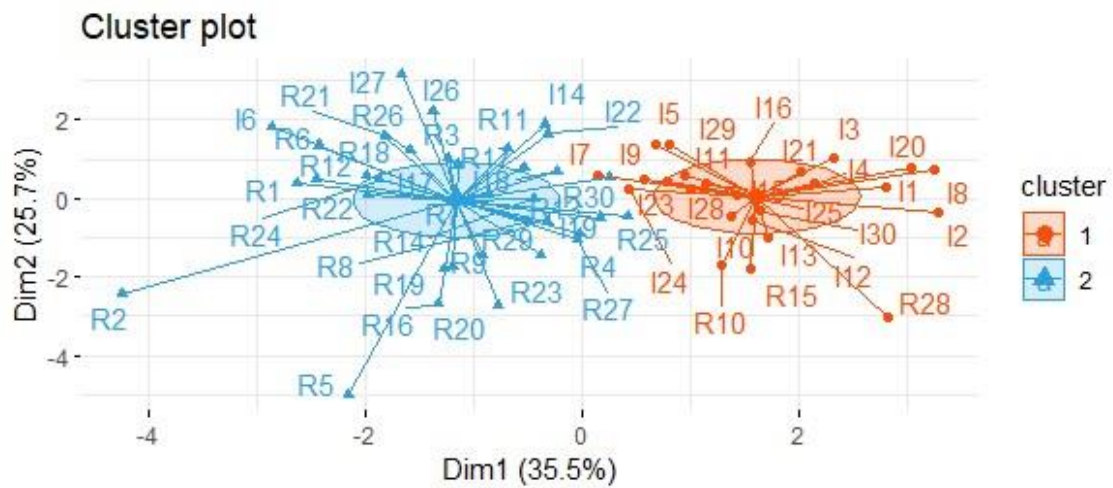
Quanto ao horário de ocorrência, Yang *et al.* (2018) afirmam que o efeito da ICU se torna mais acentuado após o pôr do sol, e esta tendência permanece até duas horas após o nascer do sol. Oke *et al.* (2017) ressaltam que o horário de ocorrência pode variar de acordo com os materiais construtivos, materiais que liberam calor mais lentamente, como o concreto e a rocha, tendem a contribuir para o aumento da temperatura com um atraso, se comparado a materiais que liberam o calor mais rapidamente. No período analisado nesta pesquisa, que corresponde ao inverno, o sol nasce aproximadamente às 6 h e se põe às 18:00 h, portanto o horário de pico (21 h) ocorre cerca de 3 h após o pôr do sol.

### 3.4 Análise multivariada

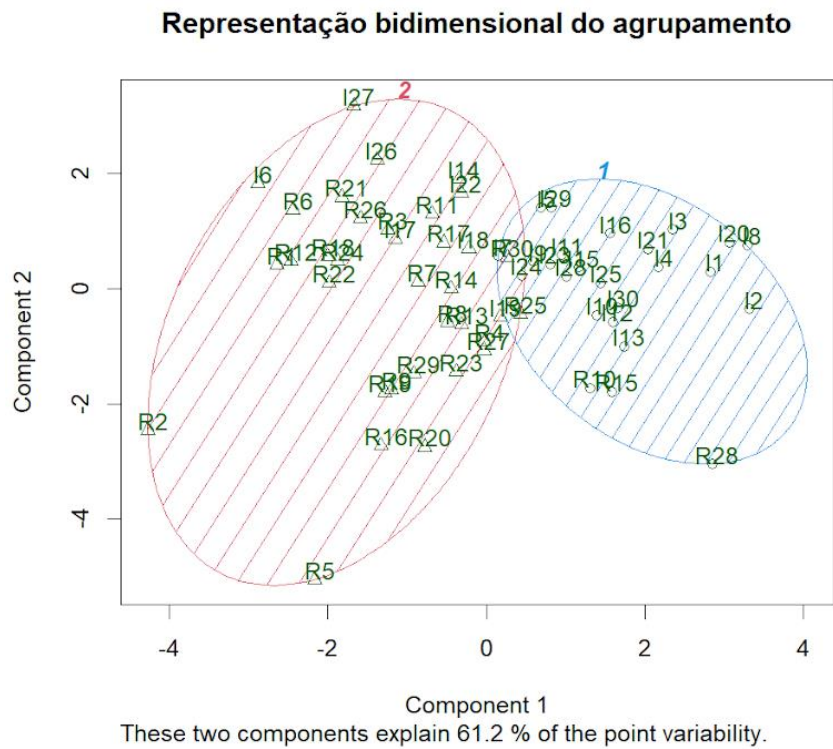
O pico de Tar ocorre aproximadamente às 14h, logo optou-se por estudar as variáveis dos 30 pontos extraídos dos recortes urbanos neste horário.

Uma sondagem exploratória dos dados residenciais e industriais conjuntamente, por meio da análise de componentes principais PCA, percebe-se na figura 40a, a formação de dois grupos com alguns pontos de interseção. Ou seja, somente alguns pontos mostram comportamento semelhante quando são analisadas as variáveis de estudo. Na figura 40 b tem-se a representação bidimensional do agrupamento: somente os dois primeiros PCs explicam 61,2% da variabilidade da amostra.

Figura 40: (a) Clusters e (b) representação bidimensional do agrupamento para os dados analisados R e DI



(a)

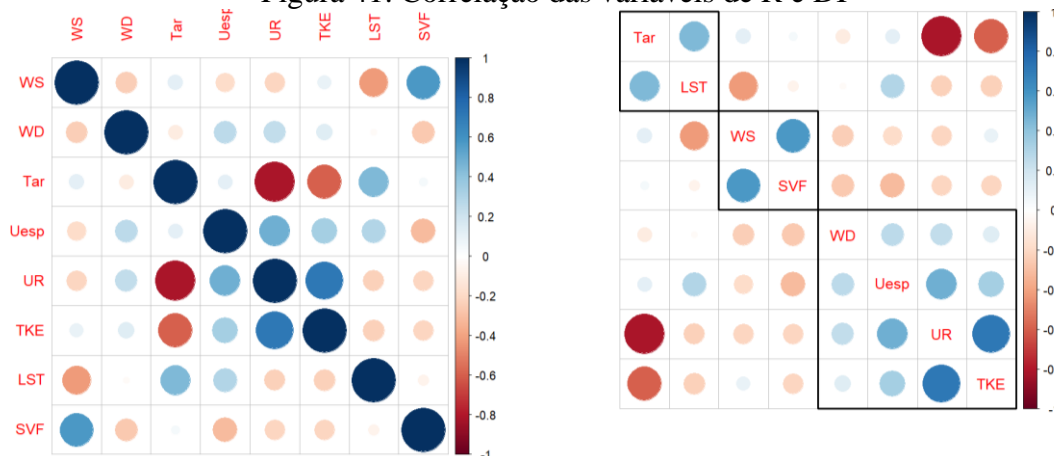


(b)

As variáveis com correlação mais forte são apresentadas na figura 41, onde percebe-se que as variáveis formam “nichos” de correlação: Tar e LST, WS e SVF, UR e TKE.

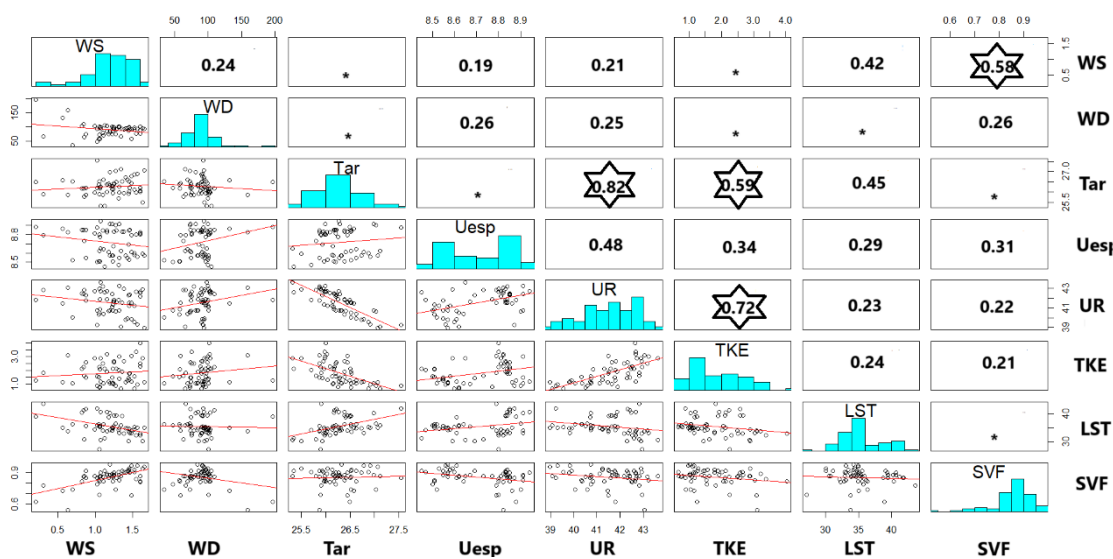


Figura 41: Correlação das variáveis de R e DI



A matriz de correlação dos dados, da figura 42, mostra a distribuição dos dados e os valores das correlações, sendo a Tar a variável que mantém correlações fortes com UR, TKE, também merecem destaque as correlações entre SVF e WS e UR e TKE. Todavia, torna-se interessante aprofundar o estudo das variáveis de cada recorte separadamente.

Figura 42: Matriz de correlação das variáveis R e DI



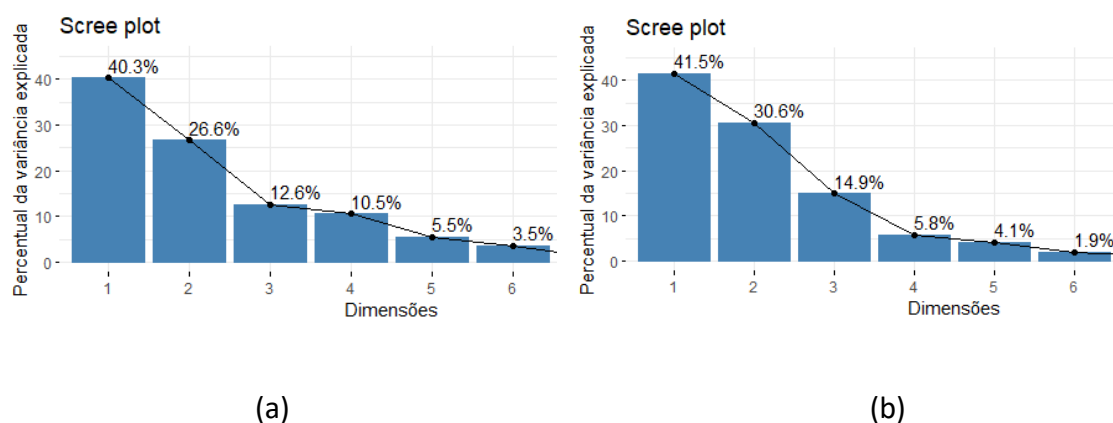
\*valores não significativos < 0.5

As medidas descritivas média, desvio padrão e coeficiente de variação das variáveis são apresentadas na tabela 6. Observa-se que o coeficiente de variação da variável TKE é o maior, independentemente do local analisado, comparando-se às demais variáveis, indicando alta dispersão relativa, seguido por WS e WD. As variáveis LST e SVF para o recorte residencial apresentaram aproximadamente o dobro de variação do encontrado para o recorte industrial. Este fato demonstra a dependência destas variáveis a alta densidade construtiva presente no recorte residencial central. O sombreamento em determinadas horas do dia pode influenciar significativamente nos resultados.

Tabela 6: Medidas descritivas

Variáveis	Média		Desvio padrão		Coeficiente de variação (%)	
	R	I	R	I	R	I
WS (m/s)	1,13	1,24	0,60	0,24	32,02	19,20
WD (°)	95,6	83,41	27,10	17,90	28,35	21,45
Tar (°C)	26,3	26,27	0,38	0,47	1,46	1,79
Uesp (g/kg)	8,84	8,58	0,04	0,07	0,44	0,85
UR (%)	42,11	40,95	0,87	1,17	2,07	2,86
TKE (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	2,21	1,39	0,80	0,57	36,14	41,05
LST (°C)	36,38	34,45	3,99	2,02	10,97	5,87
SVF	0,83	0,89	0,09	0,06	11,23	6,37

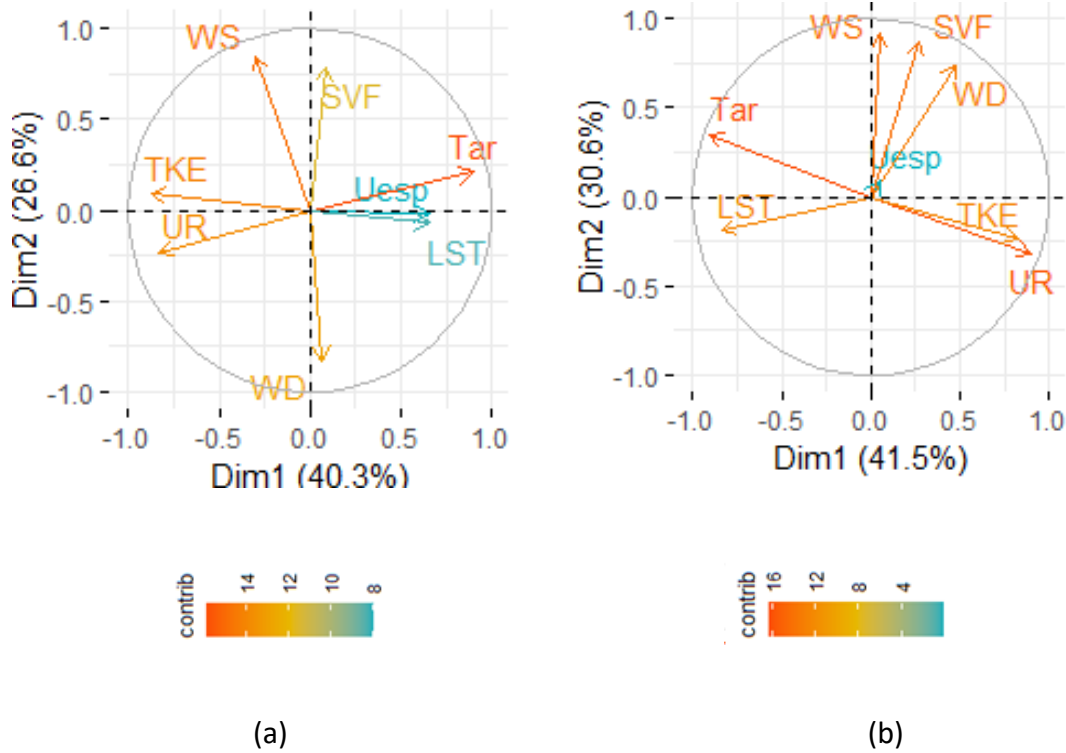
A análise dos componentes principais (PCA) para os recortes residencial e industrial separadamente é apresentada no *scree plots* – figura 43. A partir do segundo PC ocorre uma queda brusca no percentual de variância explicada, e então pode-se restringir a análise aos dois primeiros componentes principais (PCs) em ambos os casos, pois eles são capazes de representar cerca de 70% da variabilidade total dos dados e reduzir as dimensões das variáveis originais sem perda de informação.

Figura 43: *Scree plots* dos recortes (a) R; (b) DI

A plotagem dos gráficos do mapa fatorial dos PCs (figura 44), apresenta o panorama do comportamento das variáveis. Percebe-se que, independentemente do local, a variável Uesp não apresenta importância para o microclima estudado. Os vetores de maior comprimento e cores mais quentes demonstram as maiores contribuições. Ou seja, Tar, WS, UR, TKE para residencial e Tar, UR, TKE e LST para o industrial. Vetores em

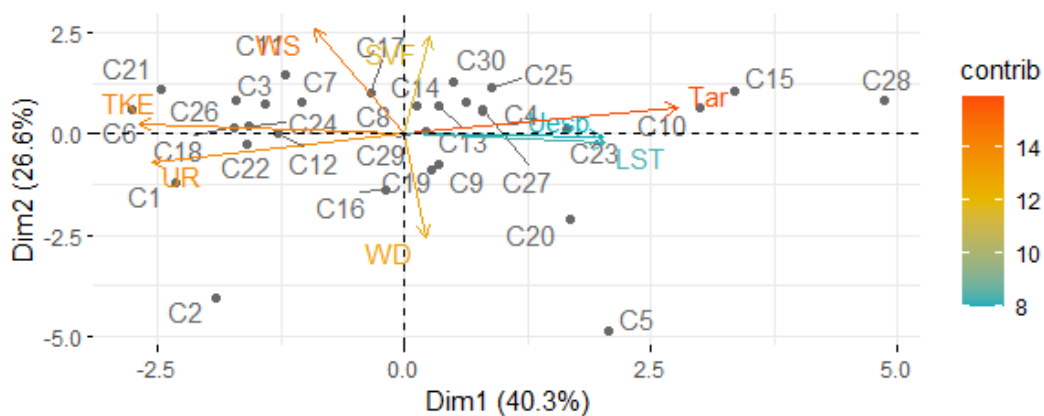
direções opostas, como Tar e UR demonstram correlação negativa. Existem correlações altas entre TKE e UR, SVF e WS (residencial), Tar e LST (industrial), pois formam ângulos agudos entre as variáveis. A formação de ângulos retos entre as variáveis indica a não detecção de correlação, por exemplo, entre WS e UR, WS e Tar (residencial) e SVF e Tar, SVF e UR (industrial).

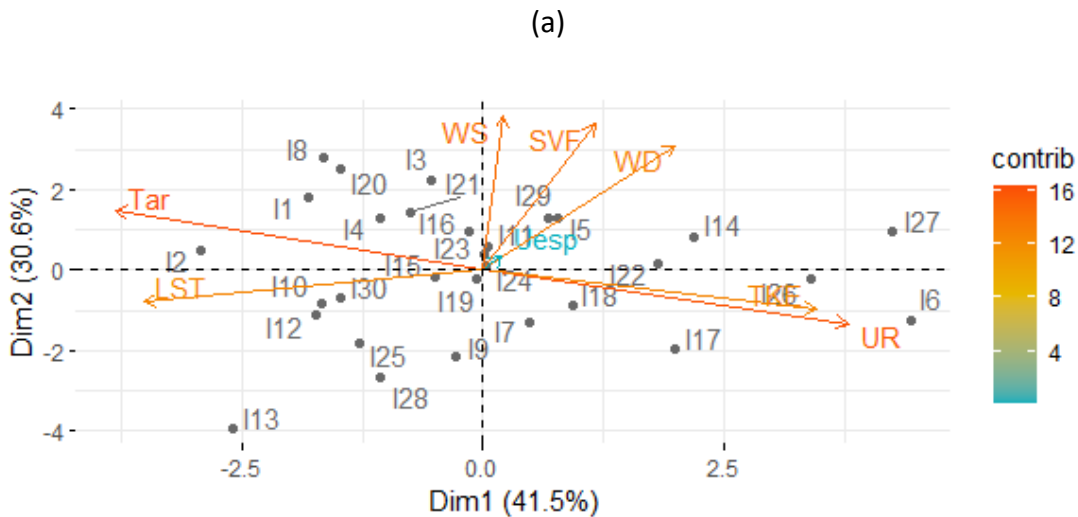
Figura 44: Mapa fatorial dos PCs (a) R; (b) DI.



A distribuição dos pontos no mapa fatorial da figura 45 mostra maior dispersão dos dados para o recorte industrial, reflexo da maior heterogeneidade do espaço, visto que apresenta aglomerações de edificações e também terrenos desocupados.

Figura 45: Distribuição dos pontos no mapa fatorial (a) R; (b) DI.

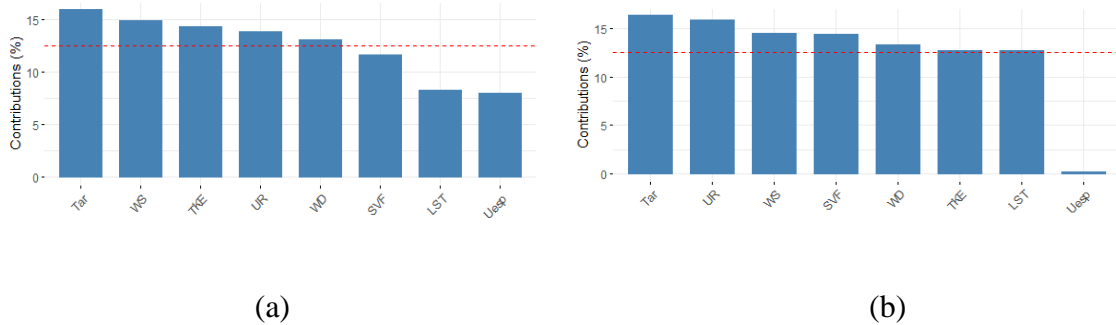




(b)

Em suma, o PCA evidencia que as variáveis com maior contribuição para o estudo do microclima residencial são Tar, WS, TKE, UR, WD. Para o recorte industrial das 8 variáveis estudadas, somente a variável Uesp pode ser desprezada, como mostra a figura 46.

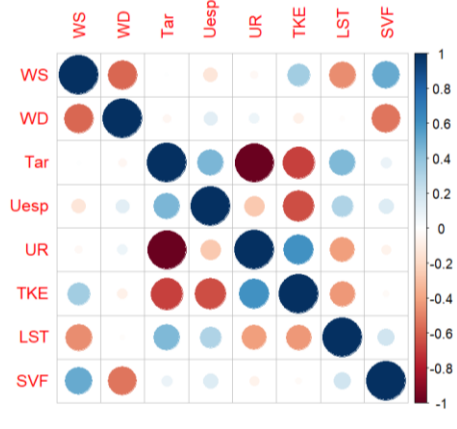
Figura 46: Contribuição de cada variável para os componentes principais (a) R e (b) DI



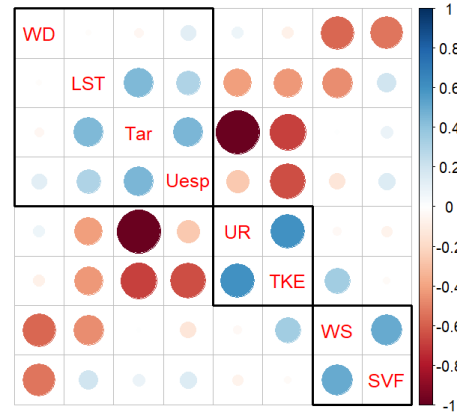
Na figura 47 são ilustradas as correlações entre as variáveis quantitativas envolvidas no estudo, e se assemelham a gráficos de calor, onde as cores de cada correlação indicam a força e o sinal da correlação. Quanto mais próximo do azul escuro maior a correlação positiva, e inversamente, quanto mais próximo do vermelho, maior a correlação negativa encontrada. No recorte residencial, as variáveis WS e SVF, UR e TKE estão fortemente correlacionadas positivamente, Tar e UR estabeleceram forte correlação negativa; no recorte industrial, as variáveis com alta correlação foram LST e Tar e novamente UR e TKE.

A correlação encontrada entre as variáveis LST e Tar vai ao encontro dos estudos supracitados que mencionam tal correlação e justificam o estudo da Tar através da análise da LST.

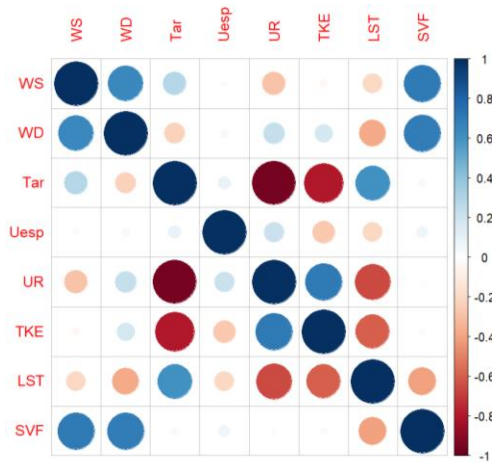
Figura 47: Correlação entre as variáveis (a) e (b) R; (c) e (d) DI



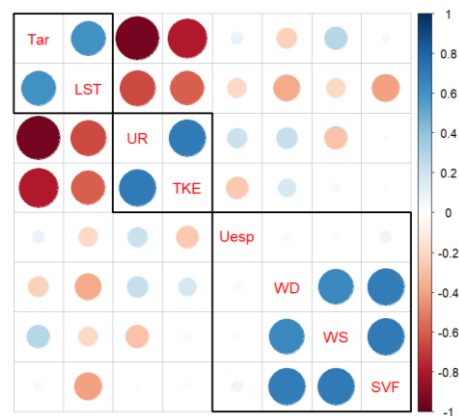
(a)



(b)



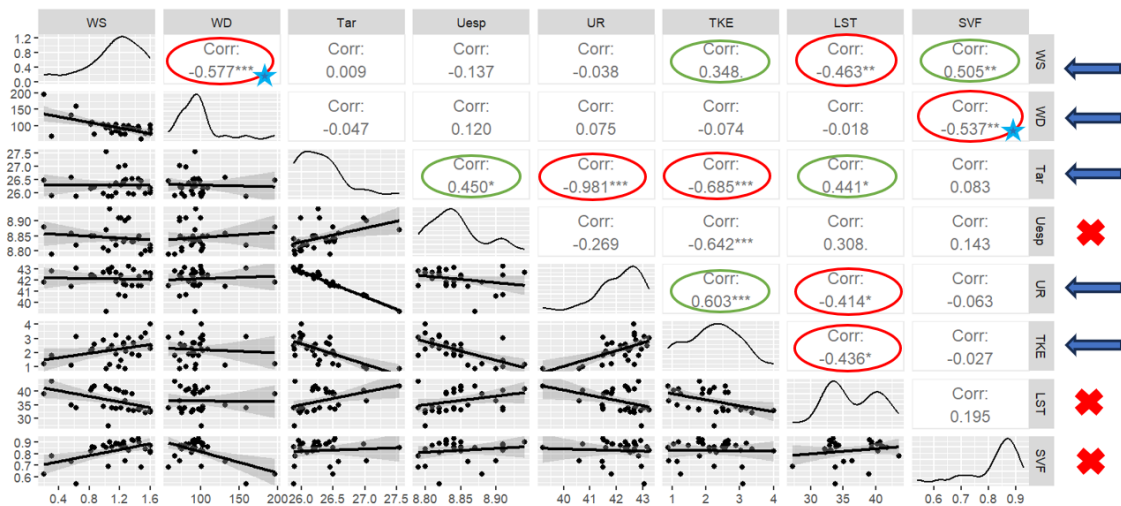
(c)



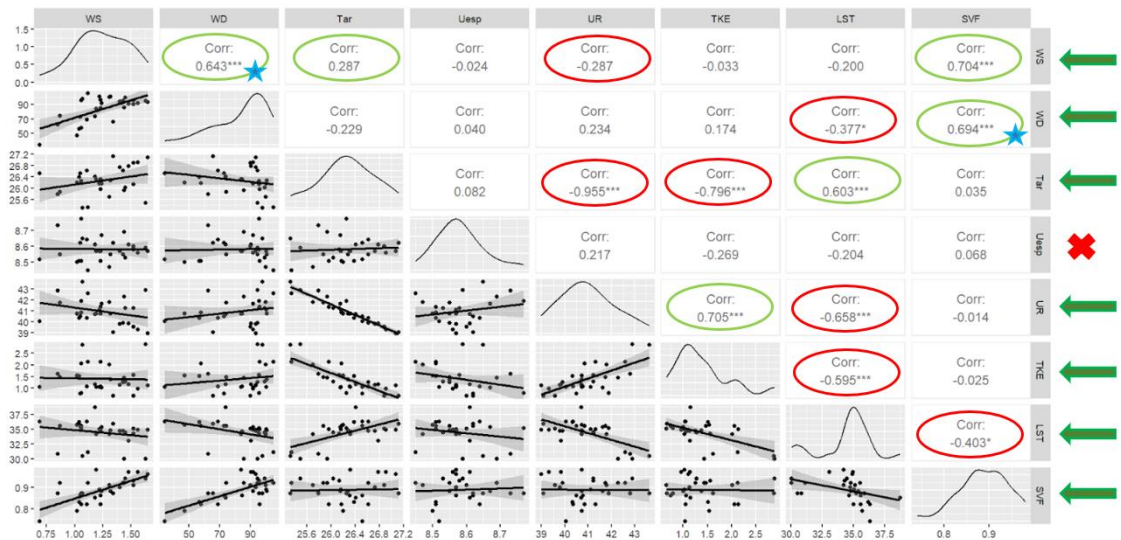
(d)

Explicitamente, com a matriz de correlação, pode-se agregar aos valores numéricos de tais correlações, a nuvem de pontos dos dados originais e avaliar a forma da distribuição, conforme visto na figura 48.

Figura 48: Matriz de correlação e distribuição dos pontos (a) recorte residencial; (b) industrial



(a)



(b)

As análises das matrizes de correlação e de PCA realizadas indicam que a variável Uesp pode ser excluída. Algumas considerações acerca das correlações encontradas podem ser estabelecidas:

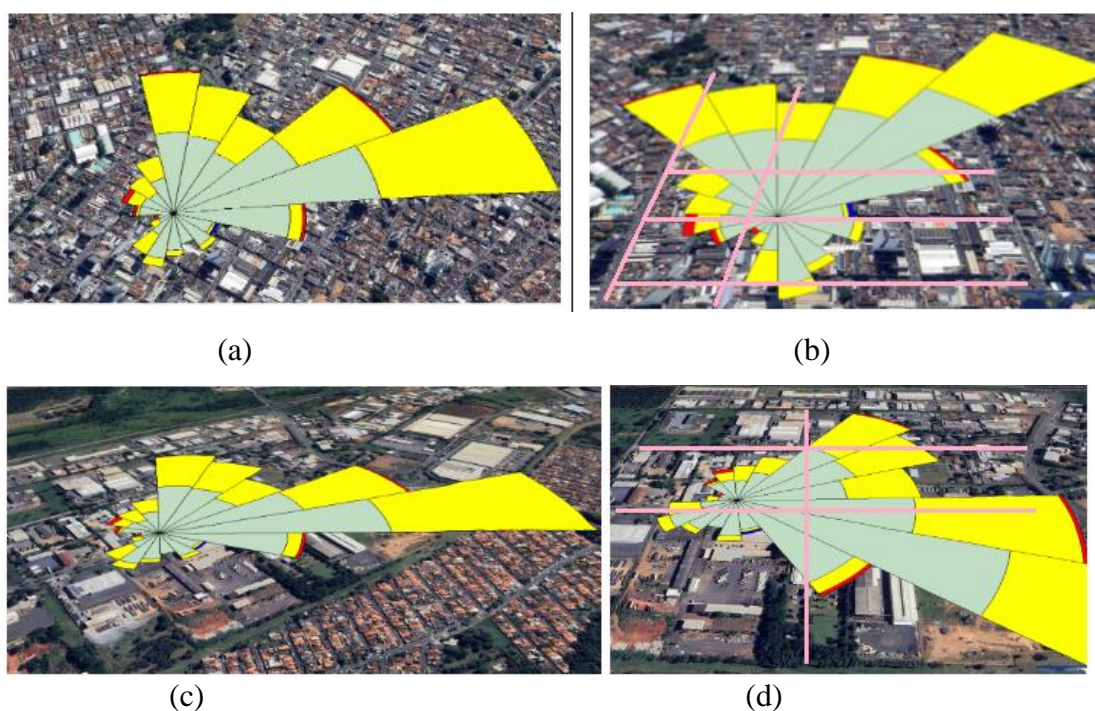
- *Influência do vento:*

A correlação entre WS e LST, para o recorte residencial, foi mais expressiva do que àquela apresentada para WS e Tar, pois foi registrada uma correlação negativa. Pode-se supor que a WS contribuiu efetivamente para o arrefecimento e a perda de calor da superfície para o ambiente na região central, pois quanto maior a WS, maior a troca de calor (Oke, 2002), o que justifica a correlação positiva entre WS e TKE.

Para o DI, em que a WS está positiva e fortemente correlacionada com WD, é demonstrada a importância do alinhamento das ruas à direção preferencial do vento, que favorece o arrefecimento local. Contudo, quando se analisa o recorte residencial, tal correlação torna-se negativa. Tal constatação possivelmente está associada ao alinhamento das ruas e avenidas presentes nos recortes, à direção do vento com maior velocidade, apresentado na figura 35.

Na figura 49a e 49c são representados os cortes residenciais central e industrial antes da rotação admitida durante a simulação. A Rosa dos Ventos posicionada sobre a imagem mostra a direção predominante do vento e velocidade mais frequente. Percebe-se na figura 49d que após a rotação, as ruas e avenidas presentes no DI, esquematizadas em linhas na cor rosa, formam caminhos livres para a passagem do vento ao contrário do que ocorre no recorte residencial. A presença de obstruções físicas causa diminuição na velocidade do vento, daí a importância do planejamento de corredores de vento.

Figura 49: Direção preferencial do vento (a) R; (b) R rotacionado; (c) DI; (d) DI rotacionado



Fonte: Adaptado de Google Earth (2023) e WRPLOT (2023)

Porém, não se pode definir se a correlação entre WD e SVF é positiva ou negativa, pois variam de acordo com o local analisado. Talvez devido ao alto coeficiente de variação apresentado por WD.

Além da velocidade, a direção do vento tem um papel crucial no planejamento de ventilação urbana que pode favorecer o desenvolvimento urbano sustentável. Conforme explica Zheng *et al.* (2022), em Pequim, a construção de corredores de ventilação diminui

a temperatura do ar média na área urbana em 0,18°C, e aumenta a velocidade do vento em 0.33m/s e a umidade relativa em 2.83%.

A vegetação disposta ao longo dos corredores de vento pode diminuir duas vezes mais a temperatura do ar e o calor sensível, se comparado à vegetação disposta no sentido perpendicular do vento predominante (Tan; Lau; Ng, 2016). Os benefícios da implementação de corredores de ventilação incluem o efeito da advecção induzido pelo aumento da velocidade do vento, a melhora do fluxo turbulento próximo à superfície urbana e a dispersão de poluentes do ar. Contudo, em cidades com inverno rigoroso, pode apresentar a desvantagem de diminuir o conforto térmico. O aumento do consumo energético para aquecimento de ambientes pode ter um efeito negativo (Zheng *et al.*, 2022).

A WS está fortemente correlacionada ao SVF que representa a influência indireta da geometria urbana no modelo estudado. Quanto maior o SVF, maior a WS registrada, ou seja, quanto menor a obstrução do céu, maior a WS. Contudo, a análise não pode se restringir ao valor do SVF. É importante verificar a posição do céu visível, pois este afeta o regime e a velocidade do vento, que por sua vez influenciam as condições micrometeorológicas (Qaid *et al.*, 2018). Esta conclusão foi registrada a partir da variação da relação H/W, para SVFs semelhantes no nível da rua, com simulações do ENVI-met. Este estudo abordou a influência do SVF e a posição do céu visível em relação à direção do sol em condições meteorológicas de conforto térmico.

- *Temperatura e umidade relativa do ar, temperatura superficial*

Como esperado, a Tar e UR possuem uma correlação forte e negativa, ou seja, quanto maior a Tar, menor a UR.

A taxa de Energia cinética turbulenta (TKE) manteve uma correlação negativa com a Tar, LST para ambos os recortes e uma forte e positiva correlação com UR. Tal constatação reflete a alteração no balanço energético urbano, consequência da diminuição da vegetação, do aumento das áreas impermeabilizadas e do uso de materiais construtivos com alta admitância térmica, como o concreto e asfalto. Tais efeitos decorrem do aumento do armazenamento de calor sensível, do decréscimo de evaporação e consequente redução no fluxo de calor latente (Oke, 1988).

Yu *et al.* (2023) estudaram as contribuições da Tar, precipitação, radiação solar e cobertura vegetal para as mudanças de LST de 2003 a 2020, ao redor do mundo por imagens de satélite. A LST é influenciada principalmente pela Tar por conta de seu



controle sobre a troca de calor sensível entre a superfície terrestre e a atmosfera, com o calor fluindo da superfície mais quente para a atmosfera mais fria (Carlson; Ripley, 1997).

A correlação positiva de LST e Tar pode ser notada em ambos os recortes, sendo mais intensa para o DI, como consequência do calor emitido pelas indústrias e fábricas, tráfego intenso de veículos pesados e alto consumo de energia. Para áreas urbanas, a LST mais alta devido ao efeito das ICUs pode causar um aumento da Tar, criando uma área de baixa pressão que atrai o ar mais frio das áreas ao redor (Oke, 1988).

Walawander *et al.* (2006) confirmaram que o padrão de LST depende das propriedades térmicas de diferentes superfícies, como a capacidade térmica e a condutividade. Na Polônia, onde o estudo foi desenvolvido, dois locais apresentaram LST mais elevadas, independente da estação e das condições climáticas: o centro da cidade e toda a área industrial composta por siderúrgicas. A capacidade de acúmulo de calor de superfícies artificiais e a emissão de calor antropogênico foram apontados como os responsáveis pelos altos valores de LST.

A fração de cobertura de superfície impermeável está positiva e exponencialmente correlacionada à LST, ao contrário da vegetação e da água. O impacto da superfície impermeável para a mudança regional de LST pode ser seis vezes maior do que a soma das contribuições da vegetação e da água. Em termos percentuais, Xu, Lin e Tang (2013), ressaltam que uma adição de 10% de espaço verde ou água para cada 10% de redução de superfície impermeável pode diminuir a LST em até 2,9°C ou 2,5°C, respectivamente.

A temperatura do ar aquece a superfície através do calor sensível e aumenta a radiação de onda longa descendente, enquanto a vegetação, representada pelo índice de área das folhas, esfria a superfície aumentando a redistribuição de energia em calor latente em vez de calor sensível durante o dia (Yu; Guo; Wu, 2014).

#### **4 Considerações finais – Artigo 3**

Foi possível estudar como o fenômeno de ICU ocorre em dois recortes urbanos distintos situados em uma cidade brasileira, por meio de simulações computacionais e medições *in loco*. A proposta foi ampliar a discussão acerca da correlação existente entre a LST e Tar, amplamente explorada no meio científico. Para a identificação da formação de ICU em um distrito industrial foi considerada a análise das possíveis correlações existentes entre as variáveis a temperatura do ar (Tar), umidade relativa (UR) e umidade específica (Uesp), velocidade (WS) e direção do vento (WD), fator de visão do céu (SVF), a taxa de energia cinética turbulenta (TKE), modelo para prever a turbulência do ar, para cada local estudado.

Os recortes foram caracterizados quanto à composição física cujas principais discrepâncias identificadas entre os dois recortes foram: o percentual de área construída e de área pavimentada. No DI, é comum pavimentar os estacionamentos ou áreas abertas destinadas a depósito ou fabricação de produtos (concreto, pré-fabricados). Mesmo o recorte residencial tendo ampla área impermeabilizada por construções, estas utilizam telhas cerâmicas, enquanto na área industrial é predominante o uso de telhas metálicas do tipo sanduíche, que tendem a acumular calor com maior facilidade.

As propriedades térmicas dos materiais construtivos que compõem os recortes DI e R podem auxiliar na explicação da Tar e LST apresentadas. A Tar ao longo das 24 h simuladas se manteve maior no DI se comparada ao recorte residencial, atingindo até 1,3°C superior no início da manhã. O recorte residencial possui a maior taxa de UR em todo período analisado. A maior taxa de vegetação presente no DI não é capaz de superar o efeito da alta taxa de impermeabilização por asfalto e das coberturas dos amplos galpões, compostas por telhas metálicas sem revestimento, que tendem a reter calor, possuem emissividade térmica baixa. Quando se compara a LST dos recortes DI e R, esta mantém a tendência da Tar e permanece o mesmo para os dois recortes até às 14 h, a partir deste horário a LST do DI fica até 2,5°C mais elevada que o residencial.

A simulação desenvolvida no software ENVI-met contribuiu para a obtenção de 30 pontos para cada recorte e cada variável estudada, às 14 h. Foram usados os dados da estação meteorológica A 507 situada no aeroporto de Uberlândia para estimativa da intensidade de ICU em cada recorte. Foi identificado que o pico de ICU ocorre por volta das 21 h para o DI (5°C), enquanto no recorte R ocorrem 2 picos, às 21 h e 3 h atingindo 1,5°C.

Com a Análise de Componentes Principais (PCA) foi possível identificar dentre as variáveis estudadas quais delas têm maior impacto sobre os microclimas residencial e industrial e suas correlações, sendo possível tecer considerações acerca das mais importantes. As variáveis com maior contribuição para o estudo do microclima residencial foram Tar, WS, TKE, UR, WD para o recorte industrial. Das 8 variáveis estudadas, somente a variável Uesp pode ser desprezada por ter influência muito pequena nas demais variáveis.

Quanto à correlação entre as variáveis do recorte residencial WS, SVF, UR e TKE estão fortemente correlacionadas positivamente. Tar e UR estabeleceram forte correlação negativa no recorte industrial, as variáveis com alta correlação foram LST e Tar, WS, WD e SVF e novamente UR e TKE. A correlação encontrada entre as variáveis LST e Tar vai ao encontro dos estudos supracitados que mencionam tal correlação e justificam o estudo da Tar através da análise da LST.

Constatou-se que no recorte R, as variáveis WS e SVF (0,505), UR e TKE (0,603) estão fortemente correlacionadas positivamente, Tar e UR estabeleceram forte correlação negativa (-0,981); no recorte industrial (DI), as variáveis com forte correlação foram LST e Tar (0,603), SVF e WS (0,704), WS e WD (0,643), WD e SVF (0,694) e novamente UR e TKE (0,705), demonstrando a importância do vento para este local, principalmente quando este é favorecido pela orientação das ruas principais. Frente à intensidade de ICU registrada e às variáveis mais impactantes detectadas para o DI, um planejamento urbano com foco na melhor distribuição e disposição das ruas e avenidas e maior arborização do espaço poderiam contribuir para o arrefecimento do local e conseqüentemente redução do calor acumulado durante o dia.

A correlação entre WS e LST, para o recorte residencial, foi mais expressiva do que àquela apresentada para WS e Tar, registrando uma correlação negativa. Pode-se supor que a WS contribuiu efetivamente para o arrefecimento e a perda de calor da superfície para o ambiente na região central.

Para o DI, percebe-se que a WS está positiva e fortemente correlacionada com WD, demonstrando a importância do alinhamento das ruas à direção preferencial do vento, que favorece o arrefecimento local. Contudo, quando se analisa o recorte residencial tal correlação torna-se negativa. Tal constatação possivelmente está associada ao alinhamento das ruas e avenidas presentes nos recortes, à direção do vento com maior velocidade.

Porém, através dos dados não se pode inferir se a correlação entre WD e SVF é positiva ou negativa, pois variaram de acordo com o local analisado, talvez devido ao alto coeficiente de variação apresentado por WD.

Frente à intensidade de ICU registrada e às variáveis mais impactantes detectadas para o DI, um planejamento urbano com foco na melhor distribuição e disposição das ruas e avenidas, uma maior arborização do espaço e a aplicação criteriosa de materiais frios para superfícies pavimentadas e coberturas poderiam contribuir para o arrefecimento do local e conseqüentemente redução do calor acumulado durante o dia.

## Referências

AKBARI, H.; MENON, S.; ROSENFELD, A. Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO<sub>2</sub>. **Climatic Change**, vol. 94, no. 3–4, p. 275–286, Jun. 2009. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10584-008-9515-9>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

ALCHAPAR, N. L. *et al.* The impact of different cooling strategies on urban air temperatures: the cases of Campinas, Brazil and Mendoza, Argentina. **Theoretical and Applied Climatology**, vol. 130, no. 1–2, p. 35–50, Oct. 2017. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00704-016-1851-5>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

ALEXANDER, C. Normalised difference spectral indices and urban land cover as indicators of land surface temperature (LST). **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, vol. 86, p. 102013, Apr. 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0303243419307275>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

ALMEIDA, A. J. P. de *et al.* Relação entre o Índice de Vegetação e a Temperatura de Superfície na estimativa e identificação das ilhas de calor na cidade de Maceió-AL. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa-PB, 2015.

ANDRADE, L. do L. **Estimativa de temperatura e emissividade com imagens do sensor HSS (hyperspectral scanner system) e suas relações com materiais urbanos**. Mestrado em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, 2011. Disponível em: [sid.inpe.br/mtc-m19/2011/11.21.01.21-TDI](http://sid.inpe.br/mtc-m19/2011/11.21.01.21-TDI).

ARYA, A. P. **Introduction to Micrometeorology**, Academic Press, 2001.

BARBOSA, H. A. *et al.* Assessment of Caatinga response to drought using Meteosat-SEVIRI Normalized Difference Vegetation Index (2008–2016). **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 148, p. 235–252, Feb. 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924271618303496>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

BOKAIE, M. *et al.* Assessment of Urban Heat Island based on the relation Uespip between land surface temperature and Land Use/ Land Cover in Tehran. **Sustainable Cities and Society**, vol. 23, p. 94–104, May 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2210670716300403>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

CARLSON, T. N.; RIPLEY, D. A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, vol. 62, no. 3, p. 241–252, Dec. 1997. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425797001041>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

CHOUDHURY, D.; DAS, K.; DAS, A. Assessment of land use land cover changes and its impact on variations of land surface temperature in Asansol-Durgapur Development Region. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, vol. 22, no. 2, p. 203–218, Aug. 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S110982317303411>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

CHOW, W. T. L. *et al.* A multi-method and multi-scale approach for estimating city-wide anthropogenic heat fluxes. **Atmospheric Environment**, vol. 99, p. 64–76, Dec. 2014. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231014007468>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

CRUZ, M. da S. Estudos climáticos em Vales Urbanos: Análise em cenários de ocupação do solo no Vale do Reginaldo em Maceió -AL. 2018.

DEMUZERE, M. *et al.* A global map of local climate zones to support earth system modelling and urban-scale environmental science. **Earth System Science Data**, vol. 14, no. 8, p. 3835–3873, 29 Aug. 2022. Disponível em: <https://essd.copernicus.org/articles/14/3835/2022/>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

GARTLAND, L. **Ihas de Calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas** / Lisa Gartland; Tradução Silvia Helena Gonçalves. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

HE, X. *et al.* Influence of sky view factor on outdoor thermal environment and physiological equivalent temperature. **International Journal of Biometeorology**, vol. 59, no. 3, p. 285–297, Mar. 2015. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00484-014-0841-5>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; JUNIOR, G. J. de O. Análise de Componentes Principais: Resumo Teórico, Aplicação e Interpretação. **E&S Engineering and Science**, vol. 5, no. 1, p. 83–90, 29 Jun. 2016. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/eng/article/view/3398>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

HWANG, R.-L.; LIN, T.-P.; MATZARAKIS, A. Seasonal effects of urban street Uespading on long-term outdoor thermal comfort. **Building and Environment**, vol. 46, no. 4, p. 863–870, Apr. 2011. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132310003094>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Censo Demográfico 2022. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br). Acessado em: 26 Apr. 2022.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Fundamentos das Normas Climatológicas do Brasil, 2020. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em 18 de janeiro de 2021.

JAIN, S. *et al.* Modeling of land-use and land-cover change impact on summertime near-surface temperature variability over the Delhi–Mumbai Industrial Corridor. **Modeling Earth Systems and Environment**, vol. 7, no. 2, p. 1309–1319, Jun. 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s40808-020-00959-8>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

JUNE, T. *et al.* The influence of surface roughness and turbulence on heat fluxes from an oil palm plantation in Jambi, Indonesia. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, vol. 149, p. 012048, May 2018. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/149/1/012048>. Acessado em: 23 Sep. 2023.

KATO, S.; YAMAGUCHI, Y. **Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux. Remote Sensing of Environment**. 2005. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-27144526615&doi=10.1016%2Fj.rse.2005.04.026&partnerID=40&md5=aea3d287849f9cac9e49fa1ed309310d>.

KEERATIKASIKORN, C.; BONAFONI, S. Urban Heat Island Analysis over the Land Use Zoning Plan of Bangkok by Means of Landsat 8 Imagery. **Remote Sensing**, vol. 10, no. 3, p.

440, 11 Mar. 2018. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2072-4292/10/3/440>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

KRÜGER, E. L.; MINELLA, F. O.; RASIA, F. Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil. **Building and Environment**, vol. 46, no. 3, p. 621–634, Mar. 2011. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132310002763>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

LEONI, R. C.; SAMPAIO, N. A. de S.; CORRÊA, S. M. Estatística Multivariada Aplicada ao Estudo da Qualidade do Ar. **Revista Brasileira de Meteorologia**, vol. 32, no. 2, p. 235–241, Jun. 2017. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-77862017000200235&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862017000200235&tlng=pt). Acessado em: 31 Mar. 2023.

LI, X.-X. *et al.* A multi-resolution ensemble study of a tropical urban environment and its interactions with the background regional atmosphere: STUDY OF TROPICAL URBAN ENVIRONMENT. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, vol. 118, no. 17, p. 9804–9818, 16 Sep. 2013. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/jgrd.50795>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

LIU, L. *et al.* An improved temporal correction method for mobile measurement of outdoor thermal climates. **Theoretical and Applied Climatology**, vol. 129, no. 1–2, p. 201–212, Jul. 2017. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00704-016-1769-y>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

MALLICK, J.; RAHMAN, A.; SINGH, C. K. Modeling urban heat islands in heterogeneous land surface and its correlation with impervious surface area by using night-time ASTER satellite data in highly urbanizing city, Delhi-India. **Advances in Space Research**, vol. 52, no. 4, p. 639–655, Aug. 2013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0273117713002536>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

MEGDA, O. R.; MASIERO, E. Análise das Ilhas de Calor Urbano sobre Zonas Climáticas Locais com o uso de VANT - Veículo Aéreo Não Tripulado - em uma cidade média. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, vol. 13, p. e20200333, 2021. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2175-33692021000100280&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2175-33692021000100280&tlng=pt). Acessado em: 16 Sep. 2023.

MU, Q. *et al.* Evaluation of employing local climate zone classification for mesoscale modelling over Beijing metropolitan area. **Meteorology and Atmospheric Physics**, vol. 132, no. 3, p. 315–326, Jun. 2020. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00703-019-00692-7>. Acessado em: 17 Sep. 2023.

MUNIZ-GÄAL, L. P. *et al.* Parâmetros urbanísticos e o conforto térmico de cânions urbanos: o exemplo de Campinas, SP. **Ambiente Construído**, vol. 18, no. 2, p. 177–196, Apr. 2018. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1678-86212018000200177&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212018000200177&lng=pt&tlng=pt). Acessado em: 17 Sep. 2023.

NORO, M.; LAZZARIN, R. Urban heat island in Padua, Italy: Simulation analysis and mitigation strategies. **Urban Climate**, vol. 14, p. 187–196, Dec. 2015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212095515000140>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. 0 ed.: Routledge, 2002. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781134951345>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

OKE, T. R. The urban energy balances. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, vol. 12, no. 4, p. 471–508, Dec. 1988. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/030913338801200401>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

OKE, T. R. *et al.* **Urban Climates**. 1st ed.: Cambridge University Press, 2017. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781139016476/type/book>. Acessado em: 17 Sep. 2023.

PERERA, T. A. N. T. *et al.* Identification of thermal hotspots through heat index determination and urban heat island mitigation using ENVImet numerical micro climate model. **Modeling Earth Systems and Environment**, vol. 8, no. 1, p. 209–226, Mar. 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s40808-021-01091-x>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

PEZZUTO, C. C.; ALCHAPAR, N. L.; CORREA, E. N. Urban cooling technologies potential in high and low buildings densities. **Solar Energy Advances**, vol. 2, p. 100022, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2667113122000109>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

PRAENE, J. P. *et al.* GIS-based approach to identify climatic zoning: A hierarchical clustering on principal component analysis. **Building and Environment**, vol. 164, p. 106330, Oct. 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132319305402>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

PRETZSCH, H. *et al.* Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests. **Urban Forestry & Urban Greening**, vol. 14, no. 3, p. 466–479, 2015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1618866715000473>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

QAID, A. *et al.* Effect of the position of the visible sky in determining the sky view factor on micrometeorological and human thermal comfort conditions in urban street canyons. **Theoretical and Applied Climatology**, vol. 131, no. 3–4, p. 1083–1100, Feb. 2018. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00704-016-2023-3>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

RAUPACH, M. R. Simplified expressions for vegetation roughness length and zero-plane displacement as functions of canopy height and LAI. **Boundary Layer Meteorology**, vol. 71, p. 211–216, 1994.

RENARD, F. *et al.* **Evaluation of the effect of urban redevelopment on surface urban heat islands. Remote Sensing**. MDPI AG, 2019. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85061372107&doi=10.3390%2frs11030299&partnerID=40&md5=d6b1733a07bed0db2cfadc96632b650f>.

RICHARDSON, A. D. *et al.* Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. **Agricultural and Forest Meteorology**, vol. 169, p. 156–173, Feb. 2013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168192312002869>. Acessado em: 23 Sep. 2023.

ROTH, M.; OKE, T. R.; EMERY, W. J. **Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology**. *International Journal of Remote Sensing*. 1989. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0024856054&doi=10.1080%2f01431168908904002&partnerID=40&md5=4d52d3183f2c5dd335f56096c3d4b684>.

ROUSE, W.; HAAS, R. H. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERST. *Remote Sensing Center*, p. 309–317, 1973.

SAHA, S. *et al.* Analyzing spatial relation between land use/land cover (LULC) and land surface temperature (LST) of three urban agglomerations (UAs) of Eastern India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 22, p. 100507, Apr. 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352938521000434>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

SALAZAR, L.; PALACIOS, A.C.; SELVARAJ, M. Using Satellite Images to Measure Crop Productivity: Long-Term Impact Assessment of a Randomized Technology Adoption Program in the Dominican Republic. IDB WORKING PAPER SERIES, 2021. Disponível em: <https://publications.iadb.org/en/using-satellite-images-measure-crop-productivity-long-term-impact-assessment-randomized-technology>

SANTOS, A. P. dos; SIMIONATTO SILVA, H. H.; FELICI, E. M. Variação do índice ndvi e da temperatura da superfície terrestre na malha urbana do município de Paracatu – MG entre 1985 e 2005. *Colloquium Exactarum*, vol. 12, no. 2, p. 119–129, 4 Jul. 2020. Disponível em: <http://journal.unoeste.br/index.php/ce/article/view/863/958>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

SANTOS, E. F. N.; SOUSA, I. F. Análise estatística multivariada da precipitação do estado de Sergipe através dos fatores e agrupamentos. *Revista Brasileira de Climatologia*, vol. 23, 23 Oct. 2018. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/58267>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

SILVA, V. J. D. *et al.* Mobile transect for identification of intra-urban heat islands in Uberlândia, Brazil. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, vol. 13, no. 4, p. 1, 5 Jul. 2018. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1980-993X2018000400303&lng=en&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1980-993X2018000400303&lng=en&nrm=iso&tlng=en). Acessado em: 16 Sep. 2023.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 93, no. 12, p. 1879–1900, 1 Dec. 2012. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

STULL, R. *Meteorology for Scientist and Engineers*, 2nd Edition. USA: Brooks/Cole Thomson Learning, 2000.

TAN, Z.; LAU, K. K.-L.; NG, E. Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment. *Energy and Buildings*, vol. 114, p. 265–274, Feb. 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778815300566>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

ULLAH, S. *et al.* Analysis and simulation of land cover changes and their impacts on land surface temperature in a lower Himalayan region. *Journal of Environmental Management*, vol. 245, p.



348–357, Sep. 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479719306838>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

VALVERDE, M. C. *et al.* Urban climate assessment in the ABC Paulista Region of São Paulo, Brazil. **Science of The Total Environment**, vol. 735, p. 139303, Sep. 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969720328205>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

VIEIRA, M. G.; MACHADO, G. Caracterização do fenômeno das ilhas de calor na cidade de Uberlândia – MG. **Anais do I Simpósio Nacional de Geografia e Gestão Territorial e Semana Acadêmica de Geografia da Universidade Estadual de Londrina**, vol. 1, 2018.

WALAWENDER, J. **Use of landsat remotely sensed data and GIS in urban heat island research (exemplified by Krakow)**. 2006. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-38149073952&partnerID=40&md5=66548ee9d4babf96cd759aa0cf6e51c5>.

WANG, Y. *et al.* Impact of land use change on the urban-rural temperature disparity in Eastern China. **Atmospheric Environment**, vol. 308, p. 119850, Sep. 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231023002765>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

WERNECK, D. R. **Estratégias de mitigação das ilhas de calor urbanas: estudo de caso em áreas comerciais em Brasília–DF**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de Brasília, Brasília, 2018. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/31816>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

WONG, M. S. *et al.* A simple method for designation of urban ventilation corridors and its application to urban heat island analysis. **Building and Environment**, vol. 45, no. 8, p. 1880–1889, Aug. 2010. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132310000776>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

XI, T. *et al.* Study on the outdoor thermal environment and thermal comfort around campus clusters in subtropical urban areas. **Building and Environment**, vol. 52, p. 162–170, Jun. 2012. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132311003908>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

XU, H.; LIN, D.; TANG, F. The impact of impervious surface development on land surface temperature in a subtropical city: Xiamen, China: THE IMPACT OF IMPERVIOUS SURFACE DEVELOPMENT ON LAND SURFACE TEMPERATURE. **International Journal of Climatology**, vol. 33, no. 8, p. 1873–1883, 30 Jun. 2013. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.3554>. Acessado em: 29 Jul. 2023.

YANG, X. *et al.* Assessing the thermal behavior of different local climate zones in the Nanjing metropolis, China. **Building and Environment**, vol. 137, p. 171–184, Jun. 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132318302130>. Acessado em: 17 Sep. 2023.

YANG, R., FRIEDL, M. A. Determination of roughness lengths for heat and momentum over boreal forests. **Boundary Layer Meteorology**, vol.107, p. 581-603, 2003.

YILDIZ, N. D. *et al.* Analyzing the effect of view factors on surface heat flux, surface temperature, and vegetation cover. **Environmental Science and Pollution Research**, vol. 30, no.

15, p. 43843–43859, 21 Jan. 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s11356-023-25261-9>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

YU, X.; GUO, X.; WU, Z. Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between Radiative Transfer Equation-Based Method, Split Window Algorithm and Single Channel Method. **Remote Sensing**, vol. 6, no. 10, p. 9829–9852, 15 Oct. 2014. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2072-4292/6/10/9829>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

ZANZARINI, F. V. *et al.* Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat/ETM+ com atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol. 17, no. 6, p. 608–614, Jun. 2013. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43662013000600006&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662013000600006&lng=pt&tlng=pt). Acessado em: 16 Sep. 2023.

ZHENG, T. *et al.* Evaluating urban heat island mitigation strategies for a subtropical city centre (a case study in Osaka, Japan). **Energy**, vol. 250, p. 123721, Jul. 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544222006247>. Acessado em: 16 Sep. 2023.

ZHENG, Z. *et al.* Urban ventilation planning and its associated benefits based on numerical experiments: A case study in Beijing, China. **Building and Environment**, vol. 222, p. 109383, Aug. 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132322006163>. Acessado em: 29 Jul. 2023.

## CONCLUSÕES DA TESE

Inicialmente foi proposta uma análise sistemática, com o uso da base de dados Scopus, a plataforma web Bibliometrix e o software R, dos estudos publicados acerca das ICUs em distritos industriais. Foram identificados os termos mais recorrentes e as lacunas presentes nas pesquisas sobre o tema. Constatou-se que os pesquisadores chineses lideram o ranking de pesquisas, com fortes conexões com os países europeus. O Brasil configura entre os dez países mais relevantes nas pesquisas sobre conforto térmico e ICUs. Entretanto foi notada uma escassez de pesquisas cuja abordagem inclui o impacto de uma região específica sobre o microclima urbano, como por exemplo, um distrito industrial.

Verificou-se que estudos referentes ao impacto da industrialização no microclima urbano representam apenas 1% dos estudos focados em ICUs, sendo a maioria destes desenvolvidos na China e Índia. Geralmente tais estudos aplicaram técnicas de sensoriamento remoto para mapear a temperatura da superfície (LST) e associá-la à formação de ICUs nestes espaços.

Portanto, tal pesquisa constatou a necessidade de ampliação do estudo de ICUs considerando o impacto dos distritos industriais sobre o microclima urbano brasileiro e a expansão da análise das variáveis climáticas, além da associação entre LST e tal

fenômeno, incluindo a temperatura do ar (Tar), umidade relativa (UR) e umidade específica (Uesp), velocidade (WS) e direção do vento (WD), albedo, fator de visão do céu (SVF) a taxa de energia cinética turbulenta (TKE).

Frente à enorme dificuldade de coleta da maioria destes dados *in loco*, os recortes selecionados foram modelados e simulados com o software ENVI-met 5.0.

Dessa maneira foram modelados e simulados recortes de dois distritos industriais, sendo um localizado na cidade de Uberlândia/BR (DI Udia) e outro na cidade de Sintra/PT (DI Sin), em um dos dias mais quentes do ano. Por meio da análise multivariada dos dados obtidos para cada variável, verificou-se que a Tar e LST influenciam mais o microclima do DI Udia, enquanto para DI Sin, UR, WS e albedo foram determinantes.

Embora a UI Udia possua materiais com menor albedo (-45%), menores percentuais de vegetação (-20%) e WS (-40%) do que a DI Sin, a temperatura interna pode ser inferior à do ambiente sem sombra, em torno de 1,3°C. Para DI Sin, uma diferença de WS de -1,9m/s, em relação aos pontos de controle, provocou um pico de +1,5°C no ambiente industrial, às 13h, ao contrário do que aconteceu em DI Udia.

A influência do vento é notória sobre o microclima de Sintra, visto que estudos mostraram o efeito favorável deste parâmetro no arrefecimento noturno da região da grande Lisboa (Lopes *et al*, 2020). Portanto, o planejamento da ventilação urbana pode contribuir para o desenvolvimento urbano sustentável, considerando corredores de ventilação primária onde a direção do vento é predominante, parques e espaços verdes, e corredores de ventilação secundária complementares (Zheng *et al.*, 2022).

Aprofundando o estudo sobre as ICUs em Uberlândia, coletou-se os dados de Tar e UR durante 15 dias do mês de maio (outono), que serviram como parâmetro de entrada para o software ENVI-met, de dois recortes urbanos, sendo um residencial central (R) e outro industrial periférico (DI) a fim de verificar as especificidades de cada microclima em função da LCZ de origem, seguindo a classificação proposta por Dezumere (*et al* 2022).

As principais discrepâncias físicas encontradas nos dois recortes foram o percentual de área construída e de área pavimentada. Mesmo o recorte residencial tendo ampla área impermeabilizada por construções, estas utilizam telhas cerâmicas, enquanto na área industrial é predominante o uso de telhas metálicas do tipo sanduíche, que tendem a acumular calor com maior facilidade.

A Tar ao longo das 24 h simuladas se manteve maior no DI se comparada ao recorte residencial, atingindo até 1,3° C superior no início da manhã. O recorte residencial possui a maior UR em todo período analisado. A maior taxa de vegetação presente no DI não foi capaz de superar o efeito da alta taxa de impermeabilização por asfalto e das

coberturas dos amplos galpões, compostas por telhas metálicas sem revestimento, que tendem a reter calor e possuem emissividade térmica baixa. Quando se compara a LST dos recortes DI e R, esta mantém a tendência da Tar e permanece o mesmo para os dois recortes até às 14 h, a partir deste horário a LST do DI fica até 2,5°C mais elevada que o residencial.

Utilizaram-se os dados da estação meteorológica A 507 situada no aeroporto de Uberlândia para estimativa da intensidade de ICU em cada recorte: percebeu-se que o pico ocorre por volta das 21 h para o DI (5°C), enquanto no recorte R ocorrem 2 picos, às 21 h e 3 h atingindo 1,5°C. Tais resultados se mostraram condizentes ao apresentado em estudos anteriores (quadro 2).

As variáveis com maior contribuição para o estudo do microclima residencial foram Tar, WS, TKE, UR, WD; para o recorte industrial das 8 variáveis estudadas, somente a variável Uesp pode ser desprezada, segundo a Análise por Componentes Principais. Constatou-se que no recorte R, as variáveis WS e SVF (0,505), UR e TKE (0,603) estão fortemente correlacionadas positivamente, Tar e UR estabeleceram forte correlação negativa (-0,981); no recorte industrial (DI), as variáveis com forte correlação foram LST e Tar (0,603), SVF e WS (0,704), WS e WD (0,643), WD e SVF (0,694) e novamente UR e TKE (0,705), demonstrando a importância do vento para este local, principalmente quando este é favorecido pela orientação das ruas principais.

De forma geral, pôde-se concluir que ocorre o fenômeno de ICU com maior intensidade para os distritos industriais, certamente com implicação no microclima dos arredores urbanos. Nota-se a importância de incluir outras variáveis climáticas ao estudo para viabilizar o entendimento do comportamento térmico que ocorre em cada recorte com destaque para WS, WD, UR, Tar, LST e albedo, visto que o DI localizado em Sintra e Uberlândia se mostraram propensos a sofrer influência dos ventos, com maior intensidade para Sintra devido sua localização geográfica privilegiada quanto à atuação dos ventos marítimos.

As conclusões obtidas apontam para a dificuldade de implementação de medidas mitigadoras tradicionais aos distritos industriais, sejam por limitação de espaço físico ou viabilidade das intervenções necessárias. É importante destacar que distritos industriais demandam espaço livre e extensa impermeabilização do solo para facilitar a circulação de veículos grandes, inviabilizando plantio de árvores e espaços permeáveis.

Ações como substituição de materiais construtivos já implantados por materiais com propriedades térmicas adequadas, apresentam-se como alternativas viáveis para mitigar os efeitos das ICUs, principalmente quanto ao aumento da Tar noturna nos distritos industriais estudados.

O planejamento urbano focado na orientação das ruas e avenidas para otimizar a circulação dos ventos, e permitir a penetração no tecido urbano, bem como o aumento do albedo dos telhados e dos pavimentos, podem também ser alternativas interessantes para a mitigação das ICUs em áreas industriais. A aplicação de tintas acrílicas em coberturas e superfícies de edificações, ou a substituição de pisos de estacionamentos e pátios de manobras por pisos permeáveis e espaços abertos são também alternativas que deveriam orientar diretrizes construtivas para distritos industriais, sobretudo em cidades com clima tropical.

A integração entre o planejamento urbano, por parte da administração pública, e as empresas presentes nos DIs, pode transformar a longo prazo, o processo de ocupação das zonas industriais urbanas focado apenas na otimização da produção industrial.

Iniciativas que envolvam o poder público, a população afetada pelas condições deterioradas de conforto térmico e os interesses de indústrias devem convergir para estabelecer processos que integrem efetivamente tais espaços ao meio urbano do ponto de vista climatológico. Transformações nos conceitos de planejamento urbano de distritos industriais devem contribuir para o alívio térmico e mitigar os efeitos da ICU nas cidades.

## REFERÊNCIAS

ABRANTES, P. Ordenamento e Planeamento do Território. AML- Área Metropolitana de Lisboa. **Atlas Digital**, 2016. Disponível em: <https://www.aml.pt/susProjects/susWebBackOffice>.

AGATHANGELIDIS, I.; CARTALIS, C.; SANTAMOURIS, M. Urban Morphological Controls on Surface Thermal Dynamics: A Comparative Assessment of Major European Cities with a Focus on Athens, Greece. **Climate**, vol. 8, no. 11, p. 131, 11 Nov. 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2225-1154/8/11/131>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

AIDA, M. Urban albedo as a function of the urban structure? A model experiment: Part I. **Boundary-Layer Meteorology**, vol. 23, no. 4, p. 405–413, Aug. 1982. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/BF00116269>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

AMORIN, M. C. C. T. Ilhas de calor urbanas: métodos e técnicas de análise. **Revista Brasileira de Climatologia**, n. 15 – Edição Especial – XIII Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, p. 22-46, 2019. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/65136>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

ARNFIELD, A. J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **International Journal of**

**Climatology**, vol. 23, no. 1, p. 1–26, Jan. 2003. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.859>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

BECHTEL, B. *et al.* SUHI analysis using Local Climate Zones—A comparison of 50 cities. **Urban Climate**, vol. 28, p. 100451, Jun. 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212095519300239>. Acessado em: 20 Aug. 2023.

CARDOSO, R.; AMORIM, M. Estimativa da distribuição espacial da temperatura do ar com base em zonas climáticas locais (LCZ) e modelos de regressão. **GOT - Journal of Geography and Spatial Planning**, no. 12, p. 75–99, 30 Dec. 2017. Disponível em: <http://www.cegot.org/ojs/index.php/GOT/article/view/2017.12.004>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

COURY, S. B. **Influência das safras de cana de açúcar na configuração das ilhas de calor urbano em áreas periurbanas em Piracicaba, SP**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos, 2021.

CROCE, S. *et al.* The Use of Cool Pavements for the Regeneration of Industrial Districts. **Sustainability**, vol. 13, no. 11, p. 6322, 2 Jun. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/11/6322>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

DEMUZERE, M. *et al.* A global map of local climate zones to support earth system modelling and urban-scale environmental science. **Earth System Science Data**, vol. 14, no. 8, p. 3835–3873, 29 Aug. 2022. Disponível em: <https://essd.copernicus.org/articles/14/3835/2022/>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

EVRENDILEK, F.; BERBEROGLU, S. Quantifying spatial patterns of bioclimatic zones and controls in Turkey. **Theoretical and Applied Climatology**, vol. 91, no. 1–4, p. 35–50, Feb. 2008. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00704-006-0294-9>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

FANG, Y. *et al.* Assessment of green roofs' potential to improve the urban thermal environment: The case of Beijing. **Environmental Research**, vol. 237, p. 116857, Nov. 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013935123016614>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

FENG, Y. *et al.* Evaluating the Cooling Performance of Green Roofs Under Extreme Heat Conditions. **Frontiers in Environmental Science**, vol. 10, p. 874614, 13 Jul. 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2022.874614/full>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

GARTLAND, L. **Ilhas de Calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas** / Lisa Gartland; Tradução Silvia Helena Gonçalves. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

GOWARD, S.N. Thermal Behavior of Urban Landscapes and the Urban Heat Island. **Phys. Geogr.** 1981, 2, 19–33.

HERATH, H. M. P. I. K.; HALWATURA, R. U.; JAYASINGHE, G. Y. Evaluation of green infrastructure effects on tropical Sri Lankan urban context as an urban heat island adaptation strategy. **Urban Forestry & Urban Greening**, vol. 29, p. 212–222, Jan. 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1618866717301826>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

HU, J. *et al.* Highly reflective and fluorescent TiO<sub>2</sub> quantum dots modified asphalt coating: Engineering characterizations and microclimatic modelling. **Construction and Building Materials**, vol. 401, p. 132701, Oct. 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061823024170>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

IBRAHIM, M. H. *et al.* Effect of urbanization activities towards the formation of urban heat island in Cameron Highlands, Malaysia. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, vol. 148, p. 012022, Apr. 2018. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/148/1/012022>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

JOHNSON, R.A.; WICHERN, D.W. Applied multivariate statistical analysis. Madison: Prentice Hall International, 1998. 816p.

LOPES, A. S. *et al.* Identificação das ilhas de calor urbano e simulação para as áreas críticas da cidade de Lisboa. 2020. Disponível em: <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.26117.99047>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

MASIERO, E. *et al.* Estudo experimental de condicionamento ambiental com resfriamento evaporativo direto. **Ambiente Construído**, vol. 20, no. 2, p. 151–173, Jun. 2020. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1678-86212020000200151&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212020000200151&tlng=pt). Acessado em: 17 Sep. 2023.

MELO, C.G.B. *et al.* Variação espaço-temporal da evapotranspiração em áreas de caatinga no sudoeste piauiense. **Revista de Geociências do nordeste. Northeast Geosciences Journal**. V.7, n° 2. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2021v7n2ID24343>

MENG, Q. *et al.* Do industrial parks generate intra-heat island effects in cities? New evidence, quantitative methods, and contributing factors from a spatiotemporal analysis of top steel plants in China. **Environmental Pollution**, vol. 292, p. 118383, Jan. 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0269749121019655>. Acessado em: 31 Mar. 2023.

MESQUITA, F. C; ANDREOZZI, S. L. O início do processo de industrialização em Uberlândia: Uma análise das primeiras indústrias até o Estado Novo. **Observatorium: Revista Eletrônica de Geografia**, v.1, n.1, p.124-144, jan. 2009.

OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, vol. 108, no. 455, p. 1–24, Jan. 1982. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.49710845502>. Acessado em: 17 Sep. 2023.

OKE, T. R. The urban energy balance. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, vol. 12, no. 4, p. 471–508, Dec. 1988. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/030913338801200401>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

OLIVEIRA, A. *et al.* Heatwaves and Summer Urban Heat Islands: A Daily Cycle Approach to Unveil the Urban Thermal Signal Changes in Lisbon, Portugal. **Atmosphere**, vol. 12, no. 3, p. 292, 24 Feb. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/12/3/292>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

ONU ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. World Urbanization Prospects—Population Division — United Nations (2018). Disponível em: <https://population.un.org/wup/Download/>. Acessado em: agosto 2021.

OUYANG, W. *et al.* Evaluating the thermal-radiative performance of ENVI-met model for green infrastructure typologies: Experience from a subtropical climate. **Building and Environment**, vol. 207, p. 108427, Jan. 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132321008246>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

PEARSALL, H. Staying cool in the compact city: Vacant land and urban heating in Philadelphia, Pennsylvania. **Applied Geography**, vol. 79, p. 84–92, Feb. 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S014362281630827X>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

RAZIEI, T. A precipitation regionalization and regime for Iran based on multivariate analysis. **Theoretical and Applied Climatology**, vol. 131, no. 3–4, p. 1429–1448, Feb. 2018. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00704-017-2065-1>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

REIS, C. *et al.* Local Weather Types by Thermal Periods: Deepening the Knowledge about Lisbon's Urban Climate. **Atmosphere**, vol. 11, no. 8, p. 840, 8 Aug. 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/11/8/840>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

SAILOR, D. J. A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. **International Journal of Climatology**, vol. 31, no. 2, p. 189–199, Feb. 2011. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.2106>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

UESPARMA, A. *et al.* Green and cool roofs to mitigate urban heat island effects in the Chicago metropolitan area: evaluation with a regional climate model. **Environmental Research Letters**, vol. 11, no. 6, p. 064004, 1 Jun. 2016. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/6/064004>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

SILVA, I. C. S. **Índice ambiental urbano (IAU): uma contribuição ao estudo do planejamento e do conforto térmico em espaços abertos**. Doutorado (Arquitetura e Urbanismo) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal,



2017.

SIMON, H. *et al.* Modeling transpiration and leaf temperature of urban trees – A case study evaluating the microclimate model ENVI-met against measurement data. **Landscape and Urban Planning**, vol. 174, p. 33–40, Jun. 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169204618300720>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

SINGH, P.; MAHADEVAN, B. **Heat Island Effect in an Industrial Cluster – Identification, Mitigation and Adaptation**. The Energy and Resources Institute, 2017.

STANGANINI, F. N.; LOLLO, J. A. D. O crescimento da área urbana da cidade de São Carlos/SP entre os anos de 2010 e 2015: o avanço da degradação ambiental. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, vol. 10, no. suppl 1, p. 118–128, 8 Oct. 2018. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2175-33692018000400118&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2175-33692018000400118&lng=pt&tlng=pt). Acessado em: 15 Sep. 2023.

STEWART, I. D. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. **International Journal of Climatology**, vol. 31, no. 2, p. 200–217, Feb. 2011. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.2141>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, vol. 93, no. 12, p. 1879–1900, 1 Dec. 2012. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

SUSCA, T.; ZANGHIRELLA, F.; DEL FATTO, V. Building integrated vegetation effect on micro-climate conditions for urban heat island adaptation. Lesson learned from Turin and Rome case studies. **Energy and Buildings**, vol. 295, p. 113233, Sep. 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778823004632>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

TRAN, D. X. *et al.* Characterizing the relationUespip between land use land cover change and land surface temperature. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 124, p. 119–132, Feb. 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924271617300035>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

UGEDA JÚNIOR, J. C.; AMORIM, M. C. D. C. T. Reflexões acerca do sistema clima urbano e sua aplicabilidade: pressupostos teórico-metodológicos e inovações técnicas. **Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo**, no. spe, p. 160, 24 Oct. 2016. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/119402>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. **Remote Sensing of Environment**, vol. 86, no. 3, p. 370–384, Aug. 2003. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425703000798>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

WESTRA, S. *et al.* Interpreting variability in global SST data using independent component analysis and principal component analysis. **International Journal of Climatology**, p. n/a-n/a, 2009. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.1888>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

YANG, X. *et al.* Evaluation of a microclimate model for predicting the thermal behavior of different ground surfaces. **Building and Environment**, vol. 60, p. 93–104, Feb. 2013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036013231200306X>. Acessado em: 15 Sep. 2023.

ZHAO, X. *et al.* An analytical method to determine typical residential district models for predicting the urban heat island effect in residential areas. **Urban Climate**, vol. 41, p. 101007, Jan. 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212095521002376>. Acessado em: 15 Sep. 2023.