



Análise do Efeito de Ilha de Calor Urbano da Cidade de Bragança (2013-2022)

Victor Pereira Rodrigues

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança
para obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia Ambiental no
âmbito da dupla diplomação com a Universidade Tecnológica
Federal do Paraná*

Orientado por

Artur Jorge de Jesus Gonçalves

Joseane Débora Peruço Theodoro

Bragança

2024



Victor Pereira Rodrigues

**Análise do Efeito de Ilha de Calor Urbano da Cidade de
Bragança (2013-2022)**

Bragança

2024

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradeço a Deus, fonte de toda inspiração e sabedoria, por guiar cada passo desta jornada e me conceder forças nos momentos de dificuldade. “Mas os que esperam no Senhor renovarão as suas forças. Subirão com asas como águias; correrão, e não se cansarão; caminharão, e não se fatigarão” (Isaías 40:31). Sem Sua presença, este trabalho não teria sido possível.

À minha mãe, minha maior inspiração, minha gratidão eterna. Seu amor, sua dedicação e seus ensinamentos foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Este trabalho é tanto meu quanto seu, pois foi seu apoio incondicional que me deu coragem para persistir nos dias mais difíceis.

Agradeço profundamente ao meu orientador, Prof. Dr. Artur Jorge de Jesus Gonçalves, e à minha coorientadora, Profa. Dra. Joseane Débora Peruço Theodoro, pelo apoio, paciência e orientação inestimáveis ao longo de todo o percurso. O conhecimento e a confiança que me transmitiram foram essenciais para a realização deste trabalho.

Aos amigos que se tornaram uma verdadeira família durante essa jornada, meu sincero agradecimento. Ao Régis e ao João, com quem dividi um lar e muitas experiências, e ao Tuba e Pepe, que me acolheram na famosa Bragança, tornando cada dia mais leve e cheio de alegria. Agradeço também a Marcos Kohler, Juan Moraes e J. Vianna, pela amizade e apoio que foram essenciais para superar os desafios. Vocês celebraram cada pequena vitória e estiveram ao meu lado nas dificuldades, tornando essa trajetória muito mais significativa. Um agradecimento especial ao Éric, que se tornou mais que um amigo; tornou-se praticamente um irmão ao longo desta jornada.

Minha mais profunda gratidão ao meu pai, cuja sabedoria, e apoio foram fundamentais ao longo da realização deste trabalho. Seus conselhos perspicazes e sua confiança em minha capacidade de superar desafios foram uma fonte constante de inspiração. Obrigado por sempre acreditar em mim.

Por último, meus sinceros agradecimentos às instituições que tornaram possível a realização deste sonho. Ao programa de Dupla Diplomação entre a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e o Instituto Politécnico de Bragança (IPB), que me proporcionou uma oportunidade única de aprendizado e crescimento acadêmico.

RESUMO

Esta dissertação examinou dados climáticos de temperatura em Bragança, utilizando a rede meteorológica do Instituto Politécnico de Bragança (IPB) instalada na cidade, composta por 23 sensores (dos quais 21 foram utilizados na análise). O objetivo principal foi analisar os dados de temperatura do ar, com foco no Efeito de Ilha de Calor Urbano (EICU), durante o período de 2013 a 2022, totalizando 10 anos de dados. A metodologia incluiu a correção altimétrica dos dados, técnicas de médias móveis, análises dos efeitos de ilha de calor urbano e análise estatística por Correlação de Pearson. Foram avaliados padrões sazonais, tendências temporais e anomalias climáticas, como noites tropicais e dias com temperaturas máximas acima de 35°C, dias frios e noites frias. Os resultados apontaram uma maior intensidade do EICU nas ZCLs mais urbanizadas, com intensidades significativamente elevadas durante o verão. Foi notável o Efeito de Ilha de Frio Urbano (EIFU), que ocorre com maior intensidade nas estações quentes. A análise de médias móveis e de tendências indicou um aumento gradual de 1,5°C na temperatura do ar ao longo do período estudado, atribuível tanto à urbanização quanto às mudanças climáticas globais. O ano de 2022 destacou-se como o mais quente da série analisada. Através desta dissertação, concluiu-se que a urbanização intensifica o EICU e exacerba os eventos climáticos extremos, impactando diretamente a qualidade de vida urbana. Reforça-se a importância de políticas públicas voltadas para o aumento de áreas verdes e o uso de materiais que minimizem a retenção de calor, promovendo cidades mais sustentáveis e resilientes. O estudo contribuiu para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), destacando a interseção entre saúde, bem-estar e ação climática no planeamento urbano.

Palavras-Chave: Clima Urbano; Média Móvel; Anomalia Térmica; Efeito de Ilha de Calor.

ABSTRACT

This dissertation examined climatic air temperature data in Bragança, utilizing the meteorological network of the Polytechnic Institute of Bragança (IPB) installed in the city, comprising 23 sensors (21 of which were used in the analysis). The primary objective was to analyze air temperature data, focusing on the Urban Heat Island Effect (UHIE), over the period from 2013 to 2022, encompassing a total of 10 years of data. The methodology included altitude correction of the data, moving average techniques, analyses of urban heat island effects, and statistical evaluation using Pearson Correlation. Seasonal patterns, temporal trends, and climatic anomalies were evaluated, such as tropical nights, days with maximum temperatures above 35°C, cold days, and cold nights. The results indicated a higher intensity of the UHIE in the more urbanized Local Climate Zones (LCZs), with significantly elevated intensities during the summer. The Urban Cool Island Effect (UCIE) was notable, occurring with greater intensity during the warm seasons. The analysis of moving averages and trends indicated a gradual increase of 1.5°C in air temperature over the study period, attributable to both urbanization and global climate change. The year 2022 stood out as the warmest in the analyzed series. Through this dissertation, it is concluded that urbanization intensifies the UHIE and exacerbates extreme climatic events, directly impacting urban quality of life. The importance of public policies focused on increasing green areas and using materials that minimize heat retention is emphasized, promoting more sustainable and resilient cities. The study contributes to the Sustainable Development Goals (SDGs), highlighting the intersection between health, well-being, and climate action in urban planning.

Keywords: Urban Climate; Moving Average; Thermal Anomaly; Urban Heat Island Effect.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	II
ABSTRACT	III
ÍNDICE	IV
LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE SIGLAS	IX
1. Introdução	1
1.1 Objetivo Geral	2
1.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Estrutura do trabalho	2
2. Revisão Bibliográfica	4
2.1 Clima Urbano	4
2.1.1 Escalas Climáticas	5
2.2 Variáveis Meteorológicas	6
2.2.1 Vento	6
2.2.2 Humidade Relativa do Ar	6
2.2.3 Radiação Solar	7
2.2.4 Temperatura do Ar	8
2.3 Zonas Climáticas Locais	8
2.3.1 Morfologia Urbana	11
2.4 Efeito de Ilha de Calor	13
2.6 Anomalias Térmicas de Calor e Frio	15
3. Materiais e Métodos	17
3.1 Caracterização da Área de Estudo	17
3.2 Rede de monitorização do clima urbano	18

3.3 Estruturação e tratamento dos dados	20
3.4 Definição das ZCLs (Zonas Climáticas Locais)	21
3.5 Média Móvel da Temperatura do Ar	22
3.6 Análise dos EICU (Efeitos de Ilha de Calor Urbano)	23
3.7 Análise de Anomalias Térmicas	24
3.7.1 Noites Tropicais	25
3.7.2 Temperaturas Máximas Acima de 35°C	25
3.7.3 Percentil 95% das Temperaturas Máximas (p95)	25
3.7.4 Percentil 10% das Temperaturas Máximas (p10)	25
3.7.5 Percentil 10% das Temperaturas Mínimas (p10)	26
3.8 Métodos Estatísticos (Correlação de Pearson)	26
4.1 Análise da Temperatura do Ar	28
4.1.1 Comportamento da Série Temporal da Temperatura do Ar	28
4.1.2 Comportamento da Temperatura do Ar por Estação	32
4.2. Caracterização dos EICU (Efeitos de Ilha de Calor Urbano)	46
4.2.1 Análise dos valores extremos do EICU	46
4.3 Análise de extremos de temperatura do ar	55
4.4 Correlação de Pearson aplicada aos EICU para cada tipologia de ZCL	62
5. Conclusões	64
6. Bibliografia	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Efeitos da ilha de Calor Urbano. Fonte: Adaptado de Oke, (1987).	13
Figura 2 – Localização geográfica da área de estudo.....	17
Figura 3 – Localização geográfica dos sensores.....	18
Figura 4 – Sensor meteorológico do estudo.....	19
Figura 5 – Cilindro protetor.....	19
Figura 6 - Temperatura do ar por pontos e por ZCL da série temporal.	28
Figura 7 - Temperatura do ar por ZCLs na série temporal.....	30
Figura 8 - Normal Climatológica de Temperatura do ar IPMA (1981-2010).....	32
Figura 9 - Temperatura do ar por pontos e por ZCL em cada Estação.....	33
Figura 10 - Temperatura do ar por ZCL em cada estação.....	35
Figura 11 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ 2 (grau 1000).....	37
Figura 12 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ 2 (grau 5000).....	39
Figura 13 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ C (grau 1000).....	41
Figura 14 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ C (grau 5000).....	43
Figura 15 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ 2 e LCZ C (grau 7500).	45
Figura 16 - Diagrama de erro dos EICU máximos (°C) por ZCL com IC 95%.....	47
Figura 17 - Diagrama de erro dos EICU mínimos (°C) por ZCL com IC 95%.....	48
Figura 18 - Variação do comportamento de EICU por ano da ZCL 2 (em °C).....	51
Figura 19 - Variação do comportamento de EICU por ano da ZCL A (em °C).....	54
Figura 20 – Número de Ultrapassagens do Limiar dos 35°C por estações do ano para o período de 2013 a 2022.	56
Figura 21 - Ocorrência de Noites Tropicais por estações do ano.....	57
Figura 22 - Percentil 95% (Dias quentes) por estações do ano.	59
Figura 23 - Percentil 10% (Dias Frios) por estação do ano.....	60
Figura 24 - Percentil 10% (Noites Frias) por estação do ano.....	61
Figura 25 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ 3 (grau 1000).....	73
Figura 26 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ 3 (grau 5000).....	73
Figura 27 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ 5 (grau 1000).....	74
Figura 28 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ 5 (grau 5000).....	74
Figura 29 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ 8 (grau 1000).....	75
Figura 30 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ 8 (grau 5000).....	75
Figura 31 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ 9 (grau 1000).....	76

Figura 32 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ 9 (grau 5000).	76
Figura 33 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ A (grau 1000).	77
Figura 34 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ A (grau 5000).	77
Figura 35 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ 3, LCZ 5 e LCZ 8 (grau 7500).	78
Figura 36 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ 9 e LCZ A (grau 7500).	78
Figura 37 - Variação do comportamento de EICU por ano da ZCL 3 (em °C).	79
Figura 38 - Variação do comportamento de EICU por ano da ZCL 5 (em °C).	80
Figura 39 - Variação do comportamento de EICU por ano da ZCL 8 (em °C).	81
Figura 40 - Variação do comportamento de EICU por ano da ZCL 9 (em °C).	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das zonas climáticas locais de tipologia (construção) Fonte: Adaptado de Stewart & Oke (2012).	10
Tabela 2 - Classificação das zonas climáticas locais de tipologia (cobertura do solo) Fonte: Adaptado de Stewart & Oke (2012).	11
Tabela 3 - Classificação das zonas climáticas locais Fonte: Adaptado de Carvalho (2020).	22
Tabela 4 - Anomalias térmicas Fonte: Autoria própria (2024).....	24
Tabela 5 - Categorização da Correlação de Pearson Fonte: Adaptado de Callegari (2009).	27
Tabela 6 - Correlação de Pearson aplicada a intensidade dos EICU por ZCLs Fonte: Autoria própria (2024).....	62

LISTA DE SIGLAS

AT – Anomalia Térmica

CP – Correlação de Pearson

EICU – Efeitos de Ilha de Calor Urbano

EIFU – Efeitos de Ilha de Frio Urbano

FVC – Fator de Visão do Céu

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera

IC – Intervalo de Confiança

LCZ - Local Climate Zones (Zonas Climáticas Locais)

T_{máx} – Temperatura Máxima

T_{mín} – Temperatura Mínima

ZCL – Zonas Climática Local

ZCLs – Zonas Climáticas Locais

1. Introdução

O processo de urbanização tem gerado uma série de desafios de natureza socioambiental. Em diversos centros urbanos, observa-se a modificação na dinâmica do clima local como uma preocupação recorrente. O crescimento acelerado e desordenado das áreas urbanas, juntamente impermeabilização do solo, tem contribuído para o surgimento e a intensificação de fenômenos relacionados com as mudanças climáticas em cidades de diversas dimensões (Silva *et al.*, 2015).

A crescente atenção às questões climáticas tem-se destacado nos diversos meios de comunicação contemporâneos, encontrando espaço numa variedade de plataformas informativas como: periódicos impressos, revistas científicas, programas educativos, redes sociais, entre outros. Quando esses canais abordam o tema das condições climáticas ambientais numa perspectiva mundial, centram-se no aquecimento global e destacam como as ações humanas inconsequentes têm resultado em danos significativos para o planeta e todos os seus habitantes (Fialho, 2011).

De acordo com Lima (2013), as cidades representam uma mudança radical na paisagem natural. O autor destaca que os impactos desses espaços urbanos não se restringem apenas aos lugares onde estão construídos, criando climas particulares mais extensos, que, associados ao crescente número de centros urbanos, afetam as condições climáticas e ambientais em amplas parcelas do planeta.

As mudanças que acontecem no ambiente urbano, resultantes da urbanização, têm levado à necessidade de estudos focados na climatologia urbana. Conforme destacado por Oke (1987), as alterações nos parâmetros da superfície e da atmosfera, combinadas com a morfologia urbana, contribuem para efeitos notáveis no perfil climático das cidades. O clima é caracterizado por modificações que ocorrem no espaço, nesse sentido, as cidades alteram o clima com um conjunto de fatores que interferem nas suas particularidades, com impacto em diferentes componentes do clima.

Segundo Oke (1987), o Efeito de Ilha de Calor Urbano (EICU) destaca-se como o fenômeno mais representativo da influência das áreas urbanas sobre o clima, sendo responsável por elevadas temperaturas em regiões urbanizadas quando comparadas a áreas rurais.

Nessa perspectiva, a necessidade de realizar estudos direcionados a diferentes espaços urbanos é enfatizada pela variação espacial do EICU, como discutido por Givoni (1998) e Stewart & Oke (2012). Este enfoque alinha-se ao conceito de ZCL proposto por

Oke (2006), uma vez que a compreensão dos factores locais e a monitorização contínua, baseada em dados meteorológicos, são essenciais.

As abordagens para identificar e medir as mudanças climáticas estão a progredir, possibilitando uma compreensão mais aprofundada das características térmicas da superfície urbana e suas relações com o uso e cobertura do solo. Dessa forma, pode-se obter uma compreensão mais realista das relações entre a transformação das características climáticas das cidades e as características urbanas da morfologia (Monteiro, 2018).

O presente estudo alinha-se diretamente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), contribuem com o cumprimento de alguns de seus objetivos, tais como, ODS 3 “Saúde e Bem-Estar”, ODS 11 “Cidades e Comunidades Sustentáveis” e ODS 13 “Ação Contra a Mudança Global do Clima”.

1.1 Objetivo Geral

Esta dissertação tem como objetivo realizar uma análise do clima urbano na cidade de Bragança durante o período de 2013 a 2022 utilizando dados meteorológicos, e em particular os dados de temperatura do ar, com o objetivo de compreender as mudanças climáticas com ênfase nos Efeitos de Ilha de Calor Urbano.

1.2 Objetivos Específicos

- Descrever e analisar o efeito de ilha de calor urbano tendo como referência as ZCLs;
- Identificar tendências temporais e médias móveis de curto prazo;
- Analisar anomalias climáticas relacionadas com a temperatura do ar.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado em cinco tópicos de discussão e análise do tema e dados abordados:

- O primeiro contém a Introdução, onde contextualiza-se o tema e se formula o problema para a relevância do estudo.
- O segundo contém o Referencial Teórico deste trabalho. Nesta parte são descritos e exemplificados os conceitos gerais do clima urbano com foco na morfologia urbana e nos efeitos de Ilha de Calor Urbana, ZCLs e Anomalias Térmicas.

- No terceiro, Materiais e Métodos, explica-se a caracterização da área de estudo, as informações relativas à rede de sensores utilizados para a monitorização meteorológica, descrição dos indicadores de morfologia urbana utilizados e a explicação dos métodos de análise de dados utilizados para o estudo em questão.
- No quarto, Resultados e Discussão, avaliam-se os resultados obtidos através das análises mencionadas na metodologia.
- O quinto tópico apresentam-se as principais conclusões retiradas a partir da análise do estudo desenvolvido na dissertação.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Clima Urbano

O ambiente climático urbano é um sistema complexo, exclusivo para cada cidade, marcado por transformações significativas nos parâmetros atmosféricos. Essas modificações envolvem factores como circulação, turbulência, dispersão do ar, albedo, armazenamento de calor, evapotranspiração e o equilíbrio de energia na superfície (Taha, 1997; Arnfield, 2003; Kanda, 2006). O clima urbano ocorre como uma das principais consequências da elevada concentração populacional e da intensa atividade antrópica. As transformações nas paisagens naturais correlacionadas são contínuas, resultando na criação de um ambiente construído e artificializado. A impermeabilização do solo, a verticalização das construções e a diminuição das áreas verdes nas zonas urbanas provocam uma alteração significativa nas condições climáticas em comparação com as áreas não urbanizadas circundantes (Teles, 2013).

A formação de um clima urbano segundo Ganho (1999), ocorre a partir da substituição da cobertura natural do solo por materiais como pedra, cimento e asfalto, da geometria urbana peculiar e das modificações na composição da baixa atmosfera originada pelas atividades construtivas humanas. Monteiro e Mendonça (2003) acrescentam que as características físicas da cidade e as atividades dela decorrentes ocasionam mudanças nos balanços energéticos, térmicos e hídricos, resultando em modificações significativas nas propriedades físicas e químicas da atmosfera. Isso, por consequência, favorece a formação de condições climáticas distintas em relação às áreas não urbanizadas.

A precipitação é mais intensa nas cidades do que nas áreas rurais devido ao ar ascendente, à turbulência causada por elementos urbanos e à presença de partículas na atmosfera urbana. Nas cidades, a velocidade do vento é mais lento próximo ao solo e pode mudar de direção ao encontrar construções ou ruas. A velocidade do vento é influenciada pela textura da superfície construída, e a disposição das vias e edifícios pode afetar esse padrão (Barbirato *et al.*, 2007).

O clima urbano, como parte integrante do ambiente nas cidades, é resultado da interação entre factores humanos e naturais (Andrade, 2005). Essa interação desempenha um papel crucial, influenciando tanto diretamente quanto indiretamente o conforto e a saúde dos habitantes, além de impactar o consumo de energia dos edifícios (Alcoforado *et al.*, 2010).

Para entender plenamente os fenômenos climáticos urbanos é fundamental levar em consideração suas diversas escalas espaciais e temporais, examinando os conceitos de microescala, escala local e mesoescala, conforme destacado por Andrade (2005).

2.1.1 Escalas Climáticas

Diversos estudiosos têm proposto sistemas taxonômicos para classificar os fenômenos climáticos, como evidenciado por Oliver e Fairbridge (1987) e Atkinson (1987). Esses autores compartilham, de maneira convergente, a identificação de três níveis distintos: a macroescala ou escala planetária, a mesoescala e a microescala ou pequena escala.

- **Nível Macroclimático:** Esse nível envolve a análise de padrões climáticos de grande escala, influenciados pela radiação solar, pela forma e pelos movimentos da Terra, como rotação e translação. A macroclimatologia busca compreender como esses fatores afetam o clima de regiões extensas, abordando os processos atmosféricos que ocorrem numa escala global (Ayoade, 1988).
- **Nível Mesoclimático:** Aqui, a análise se foca em regiões de tamanho intermediário, que geralmente variam entre 10 e 100 quilômetros de extensão. Esse nível considera os efeitos da energia disponível em processos como evaporação e formação de campos de pressão, levando em conta as características do ambiente local. A mesoclimatologia é especialmente relevante para estudar climas urbanos e fenômenos climáticos específicos, como tempestades e tornados (Ayoade, 1988).
- **Nível Microclimático:** refere-se a áreas muito pequenas, com extensão menor que 100 metros, este nível explora como sistemas ambientais próximos à superfície influenciam o clima local. A microclimatologia analisa a variação de fluxos de energia, humidade e momentum em ambientes restritos, proporcionando uma visão detalhada das condições climáticas em espaços limitados (Ayoade, 1988).

Neste contexto, as três escalas interagem de forma dinâmica, exercendo influências mútuas. Essa interação complexa transpõe-se na configuração do clima urbano específico de uma determinada cidade.

2.2 Variáveis Meteorológicas

As variáveis meteorológicas desempenham papéis interconectados no clima, influenciando-se reciprocamente. Essas variáveis incluem vento, humidade relativa do ar, radiação solar, temperatura do ar e entre outros parâmetros. Além disso, são impactadas pelo ambiente urbano (Barbirato *et al.*, 2007).

2.2.1 Vento

Conforme mencionado por Ganho (1999), observa-se que a velocidade do vento diminui ao atravessar a cidade em comparação com a velocidade sobre áreas rurais. Essa redução é atribuída à maior rugosidade existente no tecido urbano, ocasionando atrito devido ao edificado. É importante destacar que, abaixo de um limite crítico, a velocidade do vento pode aumentar devido à turbulência gerada pelo incremento do gradiente térmico vertical associado à ilha de calor (Ganho, 1999). Esta dinâmica influencia directamente o contexto urbano, sendo um ponto crucial a ser considerado em análises e estratégias urbanísticas.

Os ventos desempenham um papel crucial no controle da temperatura e da humidade. Em condições elevadas de temperatura e humidade, a acção dos ventos contribui para melhorar o conforto térmico, reduzindo as diferenças de temperatura no microclima. Além disso, facilitam a transferência de calor entre a pele das pessoas e a atmosfera, pela evaporação do suor e pela convecção, favorecendo a evapotranspiração em temperaturas altas e diminuindo a temperatura do ar facilitando a convecção (Hernández, 2013).

2.2.2 Humidade Relativa do Ar

No contexto urbano, a impermeabilização da superfície e a redução da cobertura vegetal resultam na diminuição da quantidade de água liberada para a atmosfera através da evapotranspiração (Ganho, 1999). Apesar dessa condição, observam-se emissões de vapor de água decorrentes das actividades humanas, como indústria, circulação e aquecimento interno dos edifícios (Sisterson e Dirks, 1978).

A presença da ilha de calor, caracterizada por temperaturas mais altas em relação ao entorno, pode contribuir para o aumento da evapotranspiração em áreas com cobertura vegetal remanescente. Em áreas predominantemente impermeabilizadas, no entanto, a evaporação é reduzida, exacerbando os baixos níveis de humidade relativa (Ganho, 1999).

A humidade relativa do ar directamente relacionada à temperatura ambiente, que, por sua vez, é influenciada pelo tipo de cobertura do solo. Segundo Mascaró (1987), num estudo sobre áreas urbanas, áreas arborizadas apresentam um aumento significativo na humidade relativa devido à evapotranspiração e ao sombreamento proporcionado pelas árvores. Em contraste, áreas pavimentadas ou com pouca vegetação têm menor humidade relativa, devido à ausência desses mecanismos naturais de regulação. Esses dados ressaltam a influência positiva das áreas verdes na moderação climática urbana, um aspecto crucial para o planeamento sustentável.

2.2.3 Radiação Solar

Ao longo do dia, a radiação solar atinge a superfície terrestre, sendo parte absorvida e parte reflectida, em proporções variáveis consoante as propriedades dos materiais onde incide. A radiação absorvida por uma superfície “seca” transforma-se em calor sensível, com um conseqüente aumento da temperatura, enquanto as superfícies húmidas e as folhas das plantas a convertem parte dessa radiação em calor latente. A radiação solar reflectida para a atmosfera não contribui para o aumento de temperatura, enquanto a emissão contínua de radiação com grande comprimento de onda pela terra para o espaço, processo que ocorre continuamente e que depende da emissividade e da temperatura dos materiais, resulta na perda de calor para a atmosfera. O balanço entre a radiação solar incidente e a reflectida depende da estação do ano, sendo este positivo no período de Verão e negativo no período de Inverno (Gonçalves, 2004).

Durante o dia, a radiação solar incide sobre a superfície terrestre, sendo parte absorvida e parte reflectida, em proporções que variam conforme as propriedades dos materiais onde ela incide. Esse comportamento está relacionado ao albedo, que é a capacidade de uma superfície refletir a radiação solar. Superfícies com alto albedo, como neve ou áreas claras, reflectem uma maior quantidade de radiação, enquanto superfícies com baixo albedo, como solos escuros ou asfaltos, absorvem mais energia solar. A radiação absorvida por superfícies “secas” é transformada em calor sensível, resultando num aumento da temperatura local. Em contraste, superfícies húmidas e as folhas das plantas utilizam parte dessa radiação em processos de evapotranspiração, convertendo-a em calor latente, o que contribui para o arrefecimento do ambiente. A radiação solar que é reflectida de volta para a atmosfera não contribui para o aquecimento da superfície terrestre. Além disso, a Terra emite continuamente radiação de onda longa para o espaço,

processo que depende da emissividade e da temperatura dos materiais, resultando na perda de calor para o atmosfera. O balanço entre a radiação solar incidente e a emitida depende da estação do ano, sendo o balanço positivo no período de verão, quando há maior absorção de energia devido ao ângulo de incidência solar e dias mais longos, e negativo no período de inverno, quando a perda de calor supera a absorção (Gonçalves, 2004).

2.2.4 Temperatura do Ar

A temperatura é definida como a medida da energia cinética presente em um determinado ambiente, resultante da incidência dos raios solares ou da libertação de calor por algum corpo. Esta variável é explicada pela física como uma grandeza termodinâmica comum a todos os elementos que estão em equilíbrio térmico (Pécora & Silva, 2005).

A temperatura do ar, devido à sua fácil medição e monitoramento, destaca-se como um indicador essencial das condições térmicas ambientais. Pode ser fundamental para identificar características climáticas regionais que determinem diferentes condições de conforto térmico (Jentsch, 2002). A temperatura do ar é um parâmetro crucial para áreas urbanas, com foco na sua evolução (Hernández Aja *et al.*, 2013).

2.3 Zonas Climáticas Locais

Com o avanço do processo de urbanização, as transformações aplicadas à natureza produzem alguns impactos adversos tanto para o ambiente natural quanto para os seres humanos. Essas alterações derivam das mudanças no uso e ocupação do solo, bem como da utilização de materiais de construção nas edificações que compõem esse espaço (Oke, 1987).

Oke (1981) enfatiza que a densidade populacional urbana é um dos indicadores que revelam a verticalização das edificações em regiões já providas de infraestrutura, resultado da atração do desenvolvimento imobiliário.

A partir da abordagem metodológica das ZCLs, Stewart e Oke (2012) elaboraram um sistema de categorização da paisagem que se fundamenta nas características climáticas de áreas urbanas e rurais. O propósito é estabelecer uma padronização nos estudos relacionados com as ilhas de calor.

As ZCLs abrangem extensões horizontais que variam de centenas de metros a dezenas de quilômetros. São caracterizadas por regiões que compartilham materiais,

estruturas e cobertura de superfície uniformes, além de atividades humanas semelhantes. Cada ZCL exibe particularidades relacionadas a um regime específico de temperatura sobre superfícies secas, em condições de atmosfera calma e noites claras, especialmente em áreas com relevo suave. A definição destas zonas estabelece um diâmetro mínimo de 400 a 1000 metros, equivalente a um raio de 200 a 500 metros (Stewart e Oke, 2012).

O sistema inclui a classificação de dezessete ZCLs (Tabela 01 e 02), sendo quinze delas determinadas pela morfologia da superfície e cobertura do solo, e duas pela utilização do solo e pelos materiais de construção associados a esse uso. Estas categorias padrão são subdivididas em dois conjuntos: as tipologias construídas, representadas pelas LCZ 1 a 10, e as tipologias de cobertura do solo, identificadas como LCZ A a G.

Tabela 1 - Classificação das zonas climáticas locais de tipologia (construção) Fonte:

Adaptado de Stewart & Oke (2012).

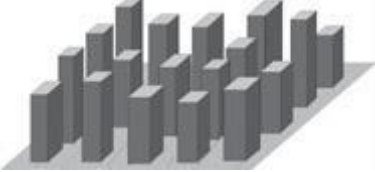











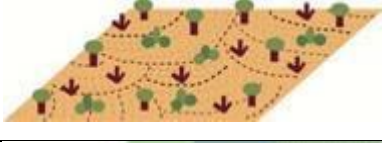

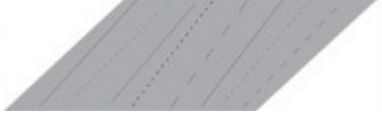


Tipos de construção		Definição
Edificações altas compactadas (1)		Presença concentrada de estruturas elevadas. Escassez de vegetação, com ausência significativa de árvores. Superfície do solo predominantemente pavimentada. Utilização predominante de materiais como betão, aço, pedra e vidro na construção.
Edificações médias e compactadas (2)		Paisagem urbana caracterizada pela presença predominante de construções de média altura, variando de 3 a 9 andares. A vegetação é escassa ou inexistente, com o solo coberto por pavimentação. Os materiais de construção utilizados incluem pedra, tijolo, telha e betão.
Edificações baixas e compactadas (3)		Concentração compacta de construções de pequena altura, variando de 1 a 3 andares. Escassez de vegetação, com a presença mínima ou ausência de árvores. O solo é predominantemente revestido por pavimentação, materiais de construção utilizados incluem pedra, tijolo, telha e betão.
Edificações altas e espaçadas com presença de vegetação (4)		Prédios altos separados por bastante espaço. Muita pavimentação com áreas permeáveis com plantas e árvores espalhadas. Utilização predominante de betão, aço, pedra e vidro na construção.
Edificações médias e espaçadas com presença de vegetação (5)		Prédios médios espaçados, com 3 a 9 andares. Muita área permeável, com plantas e árvores espalhadas. Usam principalmente betão, aço, pedra e vidro na construção.
Edificações baixas e espaçadas com presença de vegetação (6)		Construções baixas e espaçadas, com 1 a 3 andares. Muita área permeável, incluindo vegetação rasteira e árvores dispersas. Utilizam principalmente materiais como madeira, tijolo, pedra, telha e betão.
Edificações baixas e compactadas sem pavimentação (7)		Construções concentradas com apenas um andar. Escassez de árvores, e o solo é compactado. Utilização de materiais leves na construção, como madeira e estruturas metálicas leves.
Edificações largas e espaçadas (8)		Construções de baixa altura, amplas e espaçadas, com 1 a 3 andares. Escassez de árvores, solo geralmente pavimentado. Utilização predominante de materiais como aço, betão, metal e pedra na construção.
Edificações escassas e em meio natural (9)		Construções de baixa altura distribuídas de forma espaçada. Muita área com solo permeável, incluindo plantas baixas e árvores dispersas.
Indústria pesada (10)		Setor industrial de médio porte, caracterizado por uma escassa presença de árvores. Terrenos predominantemente cobertos por pavimentação ou compactação. Utilização de materiais de construção como metal, aço e betão.

Tabela 2 - Classificação das zonas climáticas locais de tipologia (cobertura do solo) Fonte:

Adaptado de Stewart & Oke (2012).

Tipos de cobertura do solo		Definição
Árvores densas (A)		Paisagem formada por árvores de folhas caducas e/ou perenes. Solo permeável. Inclui áreas florestais, cultivo de árvores ou parque urbano.
Árvores espaçadas (B)		Área com poucas árvores de folhas que caem e/ou permanecem verdes. O solo é permeável. Inclui áreas florestais, de plantio de árvores ou espaços urbanos para lazer.
Arbustos e sem pavimentação (C)		Área ampla com predominância de vegetação arbustiva. Solo que permite a passagem de água, seja solo nu ou areia. Presença de matos naturais ou áreas destinadas à agricultura.
Gramíneas (D)		Ambiente caracterizado pela presença predominante de plantas herbáceas, sem a presença de árvores. Pode incluir prados naturais, áreas de solo agricultável ou parques urbanos.
Pavimentação (E)		Ambiente coberto por pavimentação, com escassa presença ou ausência de árvores e plantas. Caracterizado por uma paisagem natural desértica, como rochas, ou por infraestruturas de transporte urbano.
Areia (F)		Solo coberto por areia. Escassa presença ou ausência de árvores. Pode ser um deserto natural ou áreas destinadas à agricultura.
Água (G)		Amplas extensões de água, como mares e lagos, ou corpos d'água menores, como rios, reservatórios e lagoas.

A determinação de cada ZCL é derivada da análise de dados que descrevem e identificam as propriedades geométricas, de cobertura de superfície, além das características térmicas, radiativas e metabólicas.

Esse sistema de categorização foi desenvolvido com ênfase na investigação do EICU. Ele proporciona uma estrutura de análise, uniformiza a apresentação de dados sobre a temperatura urbana e tem aplicações diversas para urbanistas, ecologistas de paisagens e pesquisadores dedicados ao estudo das mudanças climáticas globais.

2.3.1 Morfologia Urbana

Na área da climatologia urbana, têm-se desenvolvido estudos específicos relacionados com a morfologia urbana e às edificações, visando integrar o urbanismo com a climatologia. O clima representa um dos factores preponderantes que afetam o

desempenho térmico dos edifícios. Além disso, o ambiente urbano não apenas é capaz de influenciar e modificar o clima local, mas também os edifícios, considerados células estruturais do ambiente construído na área urbana, representam um papel crucial no estabelecimento das condições climáticas a níveis local e urbano (Gonçalves, 2004).

Quando há uma modificação na morfologia urbana de uma região específica, resultando na "verticalização" das superfícies, ocorre um aumento na absorção da radiação solar e uma diminuição na transferência de calor por convecção. Esse processo resulta em uma redução na perda de calor por radiação de ondas longas. O sol emite ondas curtas de radiação, que são absorvidas e/ou reflectidas pelas superfícies e edificações. Quando essas ondas curtas são absorvidas, a energia é convertida em calor e reemitida na forma de ondas longas. Devido às propriedades das ondas longas, elas têm menor capacidade de dissipar para a atmosfera, levando a um aumento da retenção de calor nas áreas urbanas (Souza, Tente, Giunta, & Nakata, 2010).

Para avançar no estudo, é essencial compreender um conceito denominado albedo, que representa a razão entre a radiação recebida e reflectida por uma determinada superfície (Romero, 2001).

O albedo atua determinadamente na absorção e retenção do calor irradiado em direção à superfície terrestre. Dessa forma, um maior coeficiente de albedo resulta numa maior quantidade de energia reflectida da superfície terrestre de volta para a atmosfera, contribuindo para manter o planeta em equilíbrio energético. Por outro lado, um menor coeficiente de albedo leva a uma maior absorção e retenção de calor pelas superfícies. Conseqüentemente, áreas densamente urbanizadas tendem a apresentar temperaturas mais elevadas do que áreas rurais em determinadas horas do dia (Taha, Sailor & Akbari, 1992).

A configuração física das cidades influencia diversas variáveis, tais como o fluxo de ar, o equilíbrio das ondas de radiação solar e o transporte de calor atmosférico. Paralelamente, a pavimentação impacta numa região a disponibilidade de água e a capacidade de arrefecimento e aquecimento do solo. Destaca-se, assim, a interconexão dessas duas variáveis, evidenciada em áreas urbanas densamente edificadas que apresentam maior extensão pavimentada, resultando num albedo menor e na retenção de mais radiação solar (Stewart & Oke, 2012).

Portanto, a estrutura urbana de uma cidade desempenha um papel crucial na formação do Efeito de Ilha de Calor Urbano, especialmente em regiões com maior

concentração de edificações, resultando numa influência significativa no aumento da intensidade do EICU (Nóbrega, dos Santos, & Moreira, 2016).

A realização de estudos mais detalhados sobre o ambiente construído e o clima urbano em Portugal deve informar a construção e reabilitação de edifícios de maneira alinhada com as características específicas do microclima urbano. Isso visa promover a criação de ambientes construídos energeticamente eficientes (Gonçalves, 2004).

2.4 Efeito de Ilha de Calor

No início do século XIX, em 1833, o cientista Howard iniciou as primeiras investigações em climatologia urbana, as quais, posteriormente, fundamentaram a análise da ilha de calor urbano. Ao comparar a temperatura na área urbana com a zona rural, observou-se que na cidade os valores eram consideravelmente mais elevados, ultrapassando 2°C (Stewart, 2011). Já em meados do século XX, Manley (1958) foi o pioneiro ao atribuir o termo "ilha de calor" ao gradiente térmico mais pronunciado identificado na cidade.

O principal fenômeno climático urbano observado é o Efeito de Ilha de Calor Urbano, caracterizado pela elevação da temperatura do ar dentro das cidades em comparação com as áreas circundantes (Figura 1) (Gartland, 2011; Landsberg, 1981; Oke, 2002; Oke *et al.*, 2017).

A intensidade do EICU é definida pela diferença nas temperaturas registradas no ambiente urbano e rural (Oke, 1987).

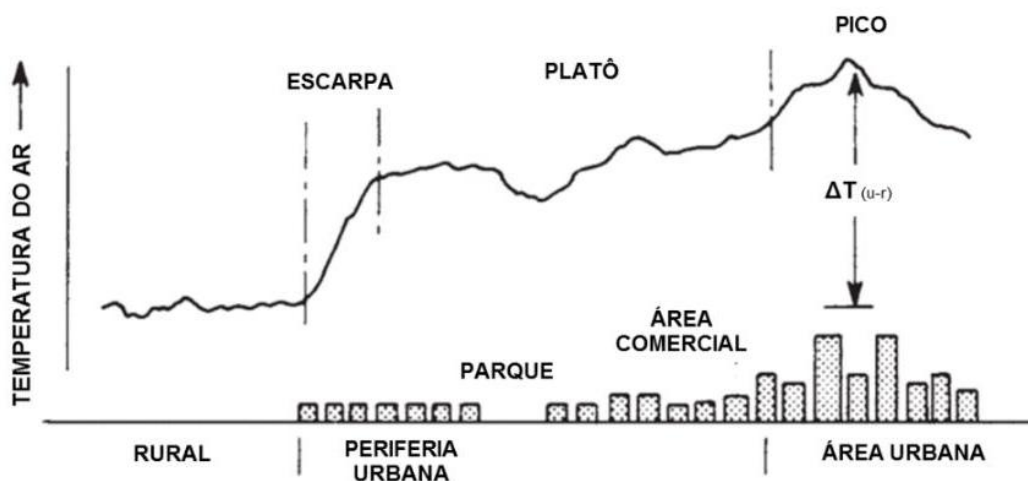


Figura 1 – Efeitos da ilha de Calor Urbano. Fonte: Adaptado de Oke, (1987).

O EICU é uma consequência das alterações na cobertura do solo e da diferente composição atmosférica em ambientes urbanos e rurais, sendo definido pelas intensidades específicas de cada localidade, conforme destacado por Oke (1987).

As repercussões do Efeito de Ilha de Calor Urbano podem ser interpretadas de maneira positiva ou negativa, dependendo das características climáticas da cidade sob análise. Em climas mais frios, o EICU pode ser benéfico, uma vez que contribuirá para a redução dos custos associados ao aquecimento residencial, proporcionará um ambiente externo mais confortável e criará condições mais propícias para a sustentabilidade de fauna e flora, conforme discutido por Lopes (2006). Por outro lado, em cidades de clima quente, esse comportamento térmico pode ser visto como uma limitação, pois tende a aumentar o consumo de energia para refrigerar os espaços urbanos (Lopes, 2006).

O efeito complementar conhecido como Efeito de Ilha de Frio Urbano (EIFU) ocorre nas primeiras horas da manhã, quando a temperatura na cidade tende a ser mais baixa em comparação com as áreas envolventes. Isso se deve à dificuldade de os raios solares atingirem diretamente o solo urbano devido à presença das edificações (Lopes, 2006).

A ilha de calor apresenta três características principais: a forma, intensidade e localização do seu ponto mais quente. Esses atributos variam entre as cidades devido à hora do dia, estação do ano, condições meteorológicas, localização geográfica, incluindo sua morfologia natural, como colinas, corpos d'água e áreas verdes, e as propriedades térmicas dos materiais que compõem a superfície urbana (Lucena, 2013).

A variação ao longo do dia e ao longo das estações é de grande relevância. Durante o período diurno, torna-se possível identificar e contrastar os momentos mais propícios para a manifestação da ilha de calor, tanto no auge do aquecimento diurno quanto durante o resfriamento noturno (Sun *et al.*, 2009).

Segundo Oke *et al.* 2017, grande parte das cidades sofrem o EICU, nos núcleos urbanos as temperaturas do ar são mais quentes (aproximadamente 1°C a 3°C) do que nas áreas circundantes.

De maneira sazonal, diferentes sistemas atmosféricos exercem influência, seja no verão ou no inverno, determinando condições mais secas que, em geral, são associadas a ilhas de calor mais intensas, ou mais húmidas, frequentemente caracterizadas por ilhas de calor mais amenas (Roth, 2007).

A utilização desses modelos apresenta oportunidades para atenuar o efeito de ilha de calor, como examinar o papel dos sistemas de condicionamento de ar ou avaliar o impacto da dinâmica urbana. No entanto, é crucial validar os diversos modelos urbanos por meio da parametrização das variáveis urbanas (Lucena, 2013).

2.5 Fator de Visão do Céu

Em estudos climatológicos urbanos, o Fator de Visão do Céu (FVC) é fundamental para estudar fenômenos das ilhas de calor urbanas. FVC é a relação que indica a proporção de céu visível a partir de um ponto central ao nível do solo.

Conforme Oke (1978), quanto menor o fator de visão do céu, ou seja, maior a obstrução da visão do céu, maiores tendem a ser os efeitos de retenção de calor no ambiente urbano.

O FVC possui valores que variam de 0 a 1, onde o valor 1 indica uma área sem qualquer obstrução entre o ponto selecionado e o céu (Minella *et al.*, 2011)

Segundo Oke (1981), o FVC é uma medida eficaz para caracterizar a geometria de radiação de um local específico, pois quantifica a fração do céu disponível para a troca de calor. O FVC representa a proporção de céu visível a partir de um ponto de observação na área urbana, relacionada a diversos processos ambientais urbanos. Assim, essa fração visível é definida pelos limites impostos pelos elementos urbanos e suas inter-relações.

A configuração urbana, descrita pelo FVC, é apontada por Oke (1982) como uma das principais causas da formação de ilhas de calor urbanas, já que o arrefecimento das superfícies é diretamente proporcional à área de céu visível a partir de um determinado ponto.

2.6 Anomalias Térmicas de Calor e Frio

Anomalias térmicas de calor e frio são considerados eventos de calor ou frio extremo quando as temperaturas extremas (quentes ou frias) ocorrem, podendo desencadear problemas à saúde pública. Estes eventos são geralmente caracterizados pela permanência da temperatura máxima superiores ou temperaturas mínimas inferiores a determinados limites, sendo críticos em áreas urbanas devido à intensificação causada pelos efeitos de ilha de calor (Fante, 2024). Estudos indicam que o aumento da intensidade e frequência das anomalias térmicas está associado às alterações climáticas, particularmente o aumento das concentrações de gases com efeito estufa (IPCC, 2013).

Em áreas urbanizadas, o calor extremo pode agravar os efeitos da poluição do ar e causar sobrecarga térmica, especialmente em populações vulneráveis, como idosos e crianças (Fante, 2024).

A intensificação das anomalias térmicas nas áreas urbanas é um fenômeno estudado relacionado aos EICU. Segundo a descrição de Meng *et al.* (2011), as ilhas de calor urbanas são caracterizadas por temperaturas mais elevadas, em comparação as áreas suburbanas e rurais adjacentes, devido a uma combinação de factores que incluem, a estrutura das cidades, a composição dos materiais de construção e a actividade humana. Neste estudo, os autores demonstram que os efeitos de ilha de calor urbanos amplificam a intensidade e a duração destes eventos de calor extremo. Durante o dia, as superfícies urbanas absorvem uma maior quantidade de energia solar devido ao menor albedo e à reduzida presença de vegetação, o que limita o efeito de arrefecimento por evapotranspiração. À noite, o calor armazenado no solo e nas edificações é liberado lentamente, mantendo as temperaturas elevadas.

Founda & Santamouris (2017) informam que o calor absorvido pelo ambiente urbano durante o dia é libertado durante a noite de modo mais lento, retardando significativamente o mecanismo de arrefecimento, mantendo assim a cidade muito mais quente quando comparada com o meio rural. O aumento da temperatura durante o evento de calor induz alterações não simétricas de libertação de calor sensível e latente entre as zonas urbanas, possivelmente contribuindo para a interação entre anomalias térmicas e EICU.

Em particular, cidades que sofrem temperaturas acima de 35°C enfrentam uma série de obstáculos, incluindo um aumento no consumo de energia, aumento do risco de incêndios e impactos negativos sobre a agricultura e os ecossistemas locais (Silva & Ferreira, 2020). Portanto, compreender possíveis interações entre EICU e anomalias térmicas na modulação das condições térmicas urbanas é de vital importância.

3. Materiais e Métodos

3.1 Caracterização da Área de Estudo

Este estudo concentra-se na análise da cidade de Bragança, situada no extremo nordeste de Portugal continental (Figura 2). Rodeada pela Serra de Montesinho ao norte e pela Serra da Nogueira a oeste, Bragança possui um relevo de elevada complexidade, caracterizado por variações altimétricas significativas em curtas distâncias (Gonçalves *et al.*, 2014).

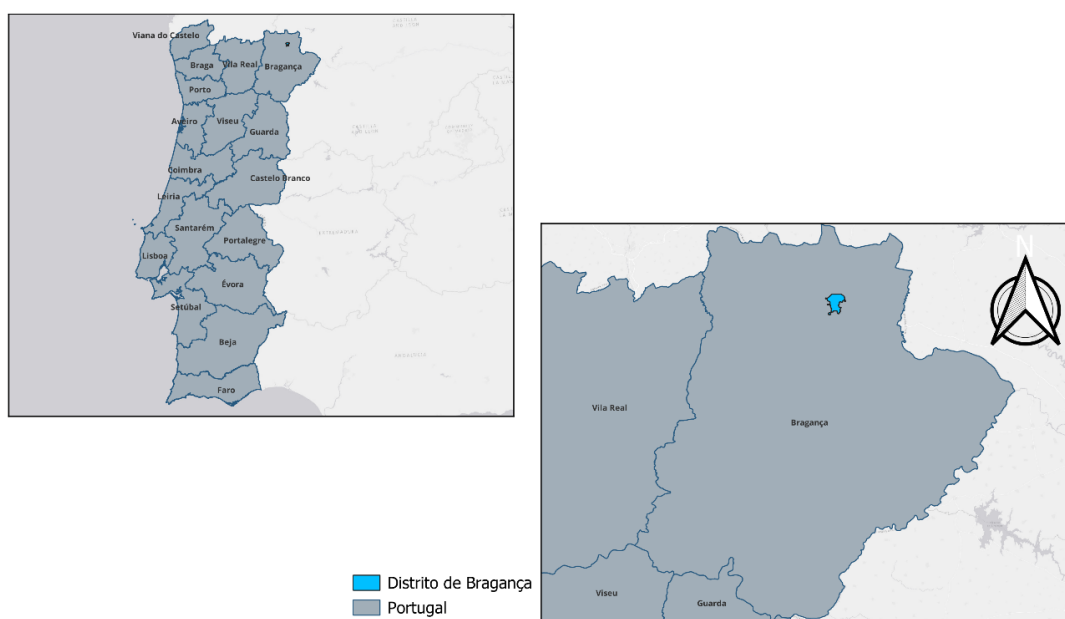


Figura 2 – Localização geográfica da área de estudo.

Segundo Gonçalves *et al.* 2014, as zonas urbanas da cidade apresentam uma diversidade arquitetónica marcante, abrangendo edifícios plurifamiliares e unifamiliares, assim como áreas com densa vegetação e espaços verdes mais escassos. A economia local é predominantemente sustentada por empresas de serviços, em sua maioria públicas.

A topografia de Bragança, com suas variações altitudinais notáveis, é influenciada por dois cursos de água, o rio Fervença, que percorre a cidade e exerce impacto na vida da população, e o rio Sabor, localizado na periferia, com influência mais discreta no quotidiano urbano. As séries históricas de dados meteorológicos indicam que o inverno registra a maior parte da precipitação anual, enquanto o verão tende a ser seco, com a radiação solar máxima em julho e mínima em dezembro (Gonçalves *et al.*, 2014).

Conforme a classificação climática de Köppen-Geiger e informações do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), o clima de Portugal Continental pode ser categorizado em duas regiões de clima temperado. Uma delas possui invernos húmidos e verões secos, caracterizada pelo tipo Csa, enquanto a outra, Csb, também tem invernos chuvosos, mas com verões menos quentes e secos. Na cidade de Bragança, o clima é classificado como Csb, que inclui verões quentes e secos e invernos húmidos, com temperaturas geralmente variando de amenas a frias (Köppen, 1936).

3.2 Rede de monitorização do clima urbano

A rede de monitorização climática de Bragança é composta por vinte e três sensores meteorológicos distribuídos estrategicamente pela cidade, cobrindo tanto áreas urbanas quanto rurais (Figura 3).

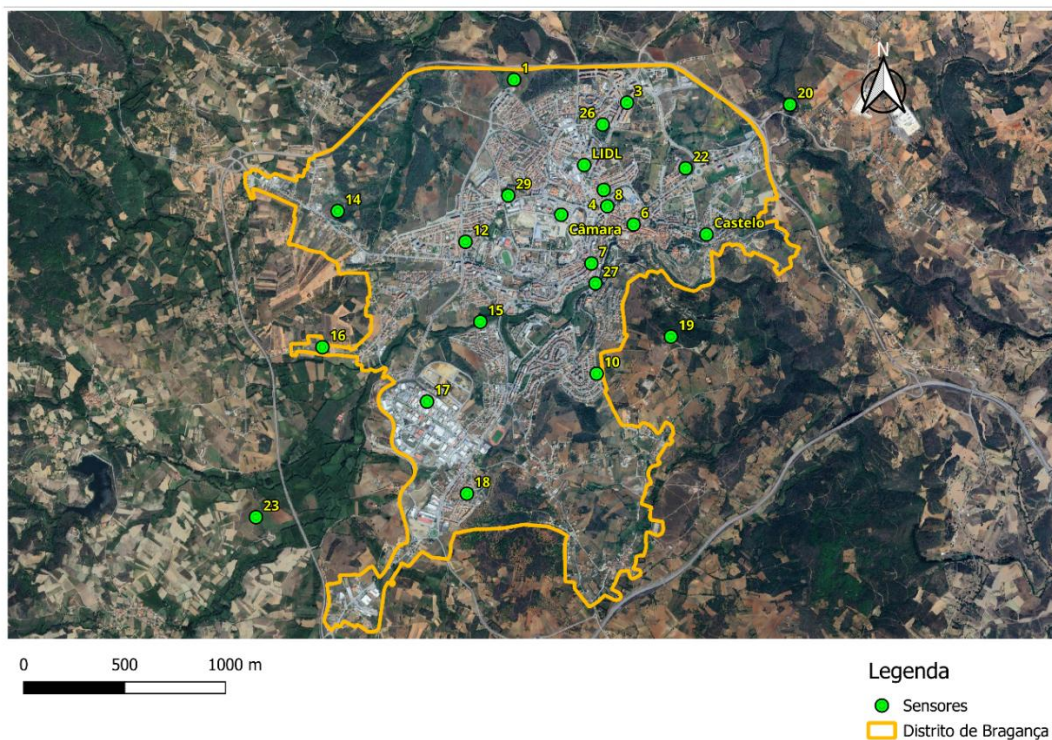


Figura 3 – Localização geográfica dos sensores.

Os sensores desta rede registram variáveis fundamentais como temperatura do ar e a humidade relativa. Esses dados são coletados a cada dez minutos, proporcionando uma cobertura detalhada ao longo do tempo.

Os sensores utilizam o equipamento Tinytag TGP-4500 (Figura 4), capaz de medir temperaturas que variam de -25°C a 85°C e humidade de 0 a 100%. São instalados a uma altura de três metros em relação a superfície do solo com ventilação natural. Para garantir a precisão e integridade dos dados, os sensores são protegidos por cilindros de PVC na cor branca, minimizando o aquecimento radiativo e evitando possíveis adulterações nos resultados (Figura 5).



Figura 4 – Sensor meteorológico do estudo.



Figura 5 – Cilindro protetor.

A capacidade de armazenamento dos sensores regista aproximadamente 100 dias de dados, com registo a cada dez minutos, antes da necessidade de recolha e validação. A recolha é realizada a cada três meses para assegurar a qualidade dos dados armazenados. Além disso, são registradas as temperaturas máximas, mínimas e médias diárias em cada sensor, proporcionando uma análise abrangente das condições climáticas.

Os dados analisados no presente estudo abrangem um período significativo, iniciando no inverno de 2013 e estendendo-se até o inverno de 2022. Esta extensa janela temporal permite uma compreensão abrangente das variações climáticas ao longo das estações.

Em síntese, a implementação e evolução da rede de monitorização climática de Bragança destacam-se como ferramentas essenciais para compreender e enfrentar os desafios climáticos nas áreas urbanas. A recolha sistemática e abrangente de dados proporciona uma base sólida para análises e tomadas de decisão informadas, contribuindo para a adaptação e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas na cidade de Bragança.

3.3 Estruturação e tratamento dos dados

No decorrer deste estudo, foram utilizadas as séries temporais das temperaturas diárias, máximas e mínimas, considerando médias horárias, diárias, mensais e sazonais dos sensores meteorológicos instalados na cidade. Os dados foram recolhidos em um espaçamento de dez em dez minutos durante todo o período. As informações foram recolhidas e estruturadas no programa Microsoft Excel, abrangendo um período contínuo de 2013 a 2022, totalizando dez anos completos de análise.

Alguns registros de dados de temperatura no período analisado apresentaram falhas, devido a diversos factores, como falhas de carga das baterias, bloqueios ou falhas técnicas dos sensores. Para lidar com essas falhas, foi empregado o software RStudio. Inicialmente, analisou-se a percentagem de dados ausentes em cada sensor pelo programa Microsoft Excel, seguido pela aplicação de uma técnica de imputação múltipla. Utilizando uma fórmula de regressão linear, foram adicionadas as temperaturas ausentes com base em dados anteriores e posteriores do período omitido, bem como em informações de sensores próximos.

Para dois sensores, não foi possível a imputação de dados omissos (sensores 16 e 27), pois eles possuem mais de 10% de dados omissos, o que poderia implicar em um preenchimento irregular; portanto, foram retirados da análise, totalizando vinte e um pontos de coleta a ser analisados.

No ano de 2014, existiu um problema de recolha, englobando quatro meses de dados omissos na maioria dos sensores (fevereiro a maio), portanto, foi decidido a retirada desses valores para manter a variabilidade dos dados, assim mantendo a estruturação da série temporal.

Após a imputação dos dados omissos, realizou-se uma correção altimétrica das temperaturas, por forma a atenuar a variação associada à variação da altimetria, para a análise do EICU. Esta correção baseou-se nas diferenças de temperatura e altitude entre três sensores, 19, 20 e 23, escolhidos por apresentarem uma envolvente semelhante (rural), evitando assim interferências de efeitos urbanos nas correções dos dados. A correção foi realizada considerando a altitude de cada sensor, nivelando os pontos à cota de seiscentos e oitenta metros, que é o nível médio de Bragança. A partir dessas correções, calculou-se um gradiente térmico vertical médio horário para cada mês dos anos analisados; tal correção refere-se à determinação da variação da temperatura em relação à altitude, aplicando-se uma curva polinomial de 5º grau como base para o cálculo do gradiente vertical de temperatura horário. Com base nessa correção, foi desenvolvida uma automatização no sentido da recolha desses dados; o cálculo do gradiente é feito de forma automatizada dentro da folha de cálculo modelo de correção desenvolvida, assim tornando a correção mais fluido ano a ano (Menezes, 2017).

A correção da temperatura baseada na altimetria foi realizada com o objetivo de mitigar o efeito da altitude nos dados, conforme a Equação 1.

$$T_{final} = T_{inicial} - [G * (H - 680)] \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

T_{final} é a temperatura após correção em graus Celsius (°C);

$T_{inicial}$ é a temperatura antes da correção (°C);

G é o gradiente vertical de temperatura por metro (°C/m);

H é a altitude do sensor (m).

3.4 Definição das ZCLs (Zonas Climáticas Locais)

A definição das ZCLs ocorrerá a partir das definições já compreendidas por Carvalho (2020). Como descrito por Stewart e Oke (2012), anteriormente neste trabalho foi listada tal metodologia de classificação por observação da área envolvente.

Portanto, foi atribuída a classificação com a avaliação do entorno. Foram considerados pelo menos três sensores por classificação (Tabela 3).

Tabela 3 - Classificação das zonas climáticas locais **Fonte:** Adaptado de Carvalho (2020).

ZCL	Descrição	Sensores
2	A presença predominante de construções de média altura, variando de 3 a 9 andares, caracteriza a paisagem urbana. A vegetação é escassa ou inexistente, com o solo coberto por pavimentação. Os materiais de construção utilizados incluem pedra, tijolo, telha e betão.	3, 7, 29
3	Concentração compacta de construções de pequena altura, variando de 1 a 3 andares. Escassez de vegetação, com a presença mínima ou ausência de árvores. O solo é predominantemente revestido por pavimentação, materiais de construção utilizados incluem pedra, tijolo, telha e betão.	4, 6, 22
5	Prédios médios espaçados, com 3 a 9 andares. Muita área permeável, com plantas e árvores espalhadas. Usam principalmente betão, aço, pedra e vidro na construção.	10, 12, 18
8	Construções de baixa altura, amplas e espaçadas, com 1 a 3 andares. Escassez de árvores, solo geralmente pavimentado. Utilização predominante de materiais como aço, betão, metal e pedra na construção.	Câmara, 17, LIDL
9	Construções de baixa altura distribuídas de forma espaçada. Muita área com solo permeável, incluindo plantas baixas e árvores dispersas.	1, 14, 15
A	Paisagem formada por árvores de folhas caducas e/ou perenes. Solo permeável. Inclui áreas florestais, cultivo de árvores ou parque urbano.	8, Castelo, 26
C	Área ampla com predominância de vegetação arbustiva. Solo que permite a passagem de água, seja solo nu ou areia. Presença de matos naturais ou áreas destinadas à agricultura.	19, 20, 23

Foi avaliado o envolvente de cada sensor e detetado que durante os anos estudados não houve nenhuma alteração substancial das ZCLs, então ainda se comportam com seis tipos de ZCLs e uma rural.

3.5 Média Móvel da Temperatura do Ar

Primeiramente, foi feita uma caracterização da temperatura para uma visualização mais detalhada dos comportamentos específicos em cada tipologia de ZCL.

A análise da série temporal foi desenvolvida por meio da visualização dos perfis sazonais, avaliando tendências e identificando padrões temporais no ambiente urbano, por meio da técnica muito utilizada em séries temporais denominada média móvel.

A média móvel (MM) é uma técnica estatística utilizada para suavizar flutuações em dados ao longo do tempo. Funciona calculando a média de um número fixo de pontos de dados consecutivos numa série temporal, como indica a equação 2 (Ferreira, 2017).

$$Z_t = \frac{z_t + z_{t-1} + \dots + z_{t-r+1}}{r} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde Z_t é o valor da média móvel no tempo t , $z_t, z_{t-1}, \dots, z_{t-r+1}$, representam os valores da série temporal nos momentos de tempo $t, t-1, t-2, \dots, t-r+1$ e r é o número de grau considerado na média móvel.

Para implementar esta técnica, utilizou-se o software Rstudio. A análise foi realizada sobre um conjunto de dados com observações registradas a cada dez minutos, totalizando 525600 (quinhentos e vinte cinco mil e seiscentos) dados para cada tipologia de ZCL ao longo de dez anos. Para execução do modelo foram utilizados os dados a partir de 2015, devido à lacuna de dados existente no ano anterior. Foram definidos intervalos de suavização em cinco, três e dois anos para análise, acompanhados de uma linha de tendência para cada partição, facilitando a visualização de tendências e padrões sazonais nas temperaturas do ar observadas. A suavização da série foi definida em diferentes graus da média móvel (7500, 5000, 1000).

Vale ressaltar que o contexto utilizado visa avaliar o comportamento da ZCL urbana dois em contraste da ZCL rural C. As restantes zonas climáticas, menos urbanizadas, estão alocadas entre esses extremos. Para visualização do comportamento das demais ZCL, consulte-se o Anexo A. O modelo de aplicação para uma maior compreensão encontra-se disponibilizado no Anexo C.

3.6 Análise dos EICU (Efeitos de Ilha de Calor Urbano)

A análise consiste na utilização da equação desenvolvida por Oke (2012), que define a intensidade do efeito de ilha de calor pela diferença da temperatura do ambiente urbano e a média da temperatura nos pontos do meio rural, como na Equação 3.

$$T_{EICU} = T_{urbana} - \bar{T}_{rural} \quad (\text{Equação 3})$$

Foi utilizada uma técnica de isolinhas, no qual demonstra o comportamento dos EICU e EIFU em cada Zona Climática Local (ZCL), conforme sua intensidade, para melhor visualização das áreas que o efeito é mais intenso. No âmbito desta dissertação, foi dado maior destaque à análise da ZCL 2 em contraste com a ZCL A. Como todos os pontos são distribuídos na cidade, abrange uma larga escala de análise. Em conjunto, também foram analisadas as variações temporais sazonais, avaliando tendências e identificando padrões no ambiente urbano.

Em conjunto, foram plotados gráficos *boxplot*, avaliando *outliers*, identificando padrões nas intensidades do efeito das ZCLs em suas respectivas estações durante os dez anos de recolha e diagramas de erro avaliando as intensidades dos EICU nas diferentes estações e verificando comportamentos similares entre as zonas climáticas locais.

3.7 Análise de Anomalias Térmicas

Para a aplicação desta análise, foi feito um tratamento de dados a partir do banco de dados completo recolhidos de dez em dez minutos nos anos de 2013 a 2022, calculando as temperaturas máximas ($T_{m\acute{a}x}$) e temperaturas mínimas ($T_{m\acute{i}n}$) diárias com recurso ao software Microsoft Excel, por via de tabela dinâmica.

Para identificação e quantificação das anomalias térmicas, foram utilizados cinco critérios principais (Tabela 4): a ocorrência de noites tropicais, que são as noites em que as temperaturas mínimas se mantem acima de 20°C ; o limiar 35°C em que temperaturas máximas são superiores a 35°C ; e o uso de percentis para identificar eventos extremos de temperatura, sendo que no presente trabalho foi utilizado o percentil 95; a ocorrência de dias frios e noites frias, ambas avaliadas pelo uso do percentil 10. O percentil foi definido a partir da média dos percentis dos pontos estudados. Foi verificado a ocorrência de dias de ambos os critérios durante os dez anos de dados. Esses critérios são amplamente utilizados para a intensidade, frequência e duração de eventos de calor extremo, especialmente em áreas urbanizadas, onde o fenómeno de efeitos de ilha de calor intensifica efeitos de aquecimento (Fante, 2024; Vital, 2022).

Tabela 4 - Anomalias térmicas **Fonte:** Autoria própria (2024).

Indicador	Descrição	Unidade
Limiar 35°C	Número de dias com $T_{m\acute{a}x}$ acima de 35°C .	Dias
Noites Tropicais	Número de dias com $T_{m\acute{i}n}$ acima de 20°C .	Dias
Dias Quentes	Número de dias com $T_{m\acute{i}n}$ acima do percentil 95.	Dias
Dias Frios	Número de dias com $T_{m\acute{a}x}$ abaixo do percentil 10.	Dias
Noites Frias	Número de dias com $T_{m\acute{i}n}$ abaixo do percentil 10.	Dias

3.7.1 Noites Tropicais

Para a identificação de noites tropicais foi utilizado o critério em que a temperatura mínima diária (que ocorre a noite) permanece acima de 20°C. Esse parâmetro é importante em estudos que avaliam impactos no período noturno, pois o aumento da temperatura durante a noite pode agravar o desconforto térmico e aumentar riscos à saúde, podendo ser amplificado em áreas densamente urbanizadas. As noites tropicais foram quantificadas a partir de dados diários da temperatura mínima, considerando a variação na ocorrência ao longo dos anos (Vital, 2022). Esse critério é frequentemente utilizado em estudos em que a relação entre o calor extremo traz efeitos adversos à saúde.

3.7.2 Temperaturas Máximas Acima de 35°C

O indicador utilizado para caracterizar a anomalia térmica foi a temperatura máxima diária superior a 35°C. Esse limiar é amplamente aceite como um indicativo de calor extremo, devido aos efeitos significativos sobre a saúde humana e as infraestruturas urbanas. Para cada dia em que a temperatura máxima excedeu 35°C, a ocorrência foi registrada, e sua frequência foi avaliada em intervalos anuais. A identificação desses dias é importante para entender padrões de aquecimento e os impactos associados a ambientes urbanos (Silva & Ferreira, 2020).

3.7.3 Percentil 95% das Temperaturas Máximas (p95)

O critério utilizado do percentil 95 também foi aplicado com intuito para avaliar o calor extremo. Os dias com temperaturas máximas diárias superiores ao percentil 95 foram identificados como episódios de calor particularmente intensos. O uso do percentil 95 é amplamente recomendado em estudos de alterações climáticas e eventos extremos, como forma de capturar os 5% de dias mais quentes da série analisada (IPCC, 2013).

A aplicação desse método segue as diretrizes de diversos trabalhos, permitindo uma avaliação comparativa em diferentes períodos.

3.7.4 Percentil 10% das Temperaturas Máximas (p10)

O critério utilizado do percentil 10 foi aplicado com intuito de avaliar o frio extremo durante o período diurno. Assim como estudado no trabalho de Rusticucci & Renom (2008) esse indicador representa o limite inferior das temperaturas máximas, abaixo do qual estão alocados os 10% dos dias mais frios em Bragança.

3.7.5 Percentil 10% das Temperaturas Mínimas (p10)

Como o critério anterior, o percentil 10 também é aplicado com intuito de avaliar o frio extremo, porém durante o período noturno. Esse indicador representa o limite inferior a temperaturas mínimas, abaixo do qual estão os 10% das noites mais frias, assim como explorado no trabalho de Rusticucci & Renom (2008).

3.8 Métodos Estatísticos (Correlação de Pearson)

De acordo com Montgomery e Runger (2021), a correlação de Pearson é uma medida estatística amplamente utilizada para quantificar a força e a direção da relação linear entre duas variáveis numéricas, geralmente em escala de intervalo ou razão. Este coeficiente, representado por “r”, assume valores entre -1 e 1, sendo que os extremos indicam correlações lineares perfeitas. O valor de “r” igual a 1 indica uma correlação positiva perfeita, ou seja, quando uma variável aumenta, a outra também aumenta de forma proporcional. O valor de r igual a -1 indica uma correlação negativa perfeita, onde o aumento de uma variável corresponde à diminuição proporcional da outra. Por outro lado, o valor de r igual a 0 sugere a ausência de correlação linear entre as variáveis.

O coeficiente de Pearson é apropriado para identificar relações exclusivamente lineares entre variáveis. Assim, em casos em que as variáveis possuem uma relação não linear, o uso desse coeficiente pode ser inadequado, subestimando ou mesmo ignorando a real relação entre os dados.

Um ponto importante ao interpretar os valores de “r” é que, entre os limites de -1 e +1, existe uma ampla gama de valores possíveis, o que leva diferentes autores a categorizarem a intensidade da correlação de maneiras variadas.

Desta forma Callegari (2009) dita a categorização das intensidades de correlação conforme a Tabela 4.

Tabela 5 - Categorização da Correlação de Pearson **Fonte:** Adaptado de Callegari (2009).

Coeficiente de Correlação	Classificação
$0 < r \leq 0,1 $	Nula
$ 0,1 < r \leq 0,3 $	Fraca
$ 0,3 < r \leq 0,6 $	Moderada
$ 0,6 < r \leq 0,9 $	Forte
$ 0,9 < r < 1 $	Muito Forte
$r = 1$	Perfeita

Nesse contexto, para aplicação do teste de correlação foi testado a normalidade dos dados e posteriormente a implicação do teste e compreensão da correlação dos efeitos de ilha de calor urbano entre as ZCLs. Ambos foram executados no software Rstudio.

4. Resultados e Discussão

4.1 Análise da Temperatura do Ar

4.1.1 Comportamento da Série Temporal da Temperatura do Ar

Para a análise do comportamento da série temporal de 2013 a 2022 da temperatura do ar, foram considerados os pontos de recolha classificados por tipologia, conforme ilustrado na Figura 6. A figura 6 representa o comportamento específico de cada ponto de recolha. Observa-se que os pontos da tipologia ZCL 2, localizados nas áreas mais densamente urbanizadas, apresentam uma mediana de temperatura mais elevada, quando comparadas com as restantes ZCLs. Esse fenómeno está relacionado a capacidade das edificações, materiais e pavimentação de reterem mais calor ao longo do dia, resultando em aquecimento adicional da área e aumento das temperaturas, porém, com uma menor radiação de comprimento de ondas longas no período nocturno.

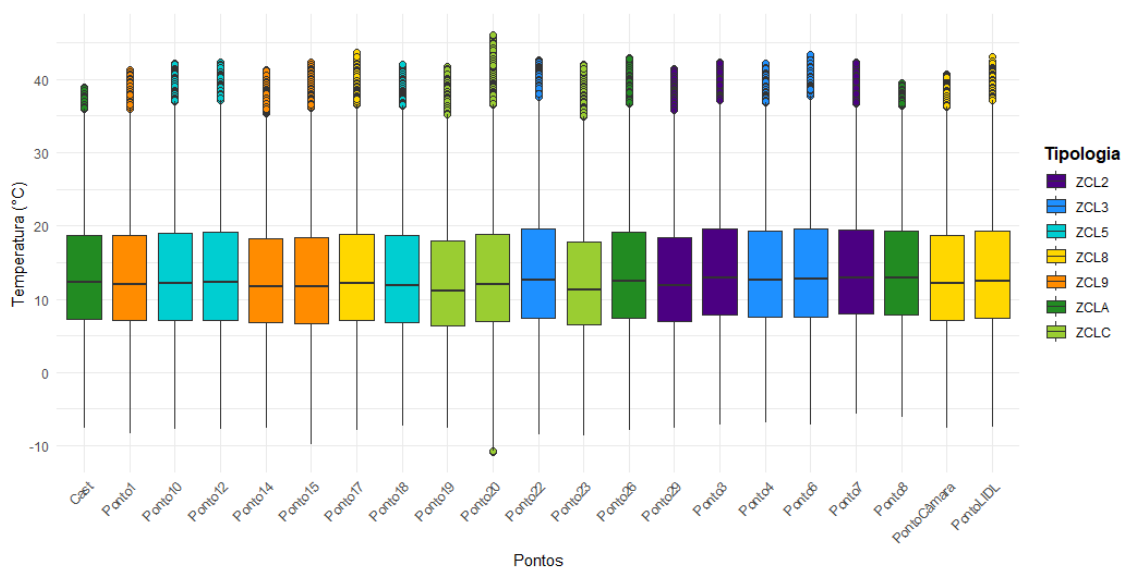


Figura 6 - Temperatura do ar por pontos e por ZCL da série temporal.

A ZCL A corresponde às áreas verdes, ou seja, regiões compostas por árvores de folhas caducas e/ou perenes em ambientes urbanizados. Nessas áreas, observa-se uma amplitude térmica menor em dois pontos específicos (8 e Cast), pois os valores extremos de temperatura não ultrapassam 40 °C. Isso ocorre devido ao sombreamento proporcionado pelas árvores durante o período diurno, o que ajuda a reduzir o aquecimento da superfície, e à capacidade das árvores reterem calor.

Segundo Meili *et al.* (2021), as árvores desempenham um papel essencial na redução do calor urbano ao oferecer sombra e promover a evapotranspiração, especialmente durante o verão e a primavera. Esses efeitos contribuem para a diminuição das temperaturas superficiais em áreas urbanizadas, já que o sombreamento das copas bloqueia a radiação solar direta, reduzindo o aquecimento excessivo das superfícies.

Por outro lado, nas estações mais frias (inverno e outono), devido à ausência de folhas, essas áreas ficam mais suscetíveis a receber radiação solar direta, resultando em um aquecimento maior. Takács *et al.* (2016) observaram que a perda de folhagem nas árvores caducifólias no outono aumenta a permeabilidade à radiação solar, aquecendo as superfícies urbanas em comparação aos períodos de maior sombreamento no verão.

Com base na figura 6, é possível notar que a amplitude térmica é maior em alguns pontos específicos, como o ponto 20 (ZCL C), sugerindo a influência de características locais. Nesse contexto, o estudo de He *et al.* (2011) apoia a interpretação de que áreas com vegetação arbustiva e solo permeável, associadas a pouca cobertura de sombra, promovem um maior aquecimento durante o dia devido à exposição direta ao sol. Enquanto isso, a dissipação de calor ocorre mais rapidamente à noite, resultando em temperaturas mais baixas. Essa dinâmica contrasta com o comportamento térmico em áreas urbanizadas, que tendem a reter mais calor por causa da presença de superfícies impermeáveis e da maior densidade de construções.

Nesse sentido, para avaliar a sazonalidade da série temporal, foram considerados a média da temperatura de cada ponto sendo englobados na sua tipologia, assim demonstrando o comportamento da zona climática local correspondente. A Figura 7, representa o comportamento da temperatura por zona climática local. Nesta figura é possível observar um padrão cíclico bem claro, com temperaturas ascendente no verão e decrescente no inverno, típico comportamento de variações sazonais anuais.

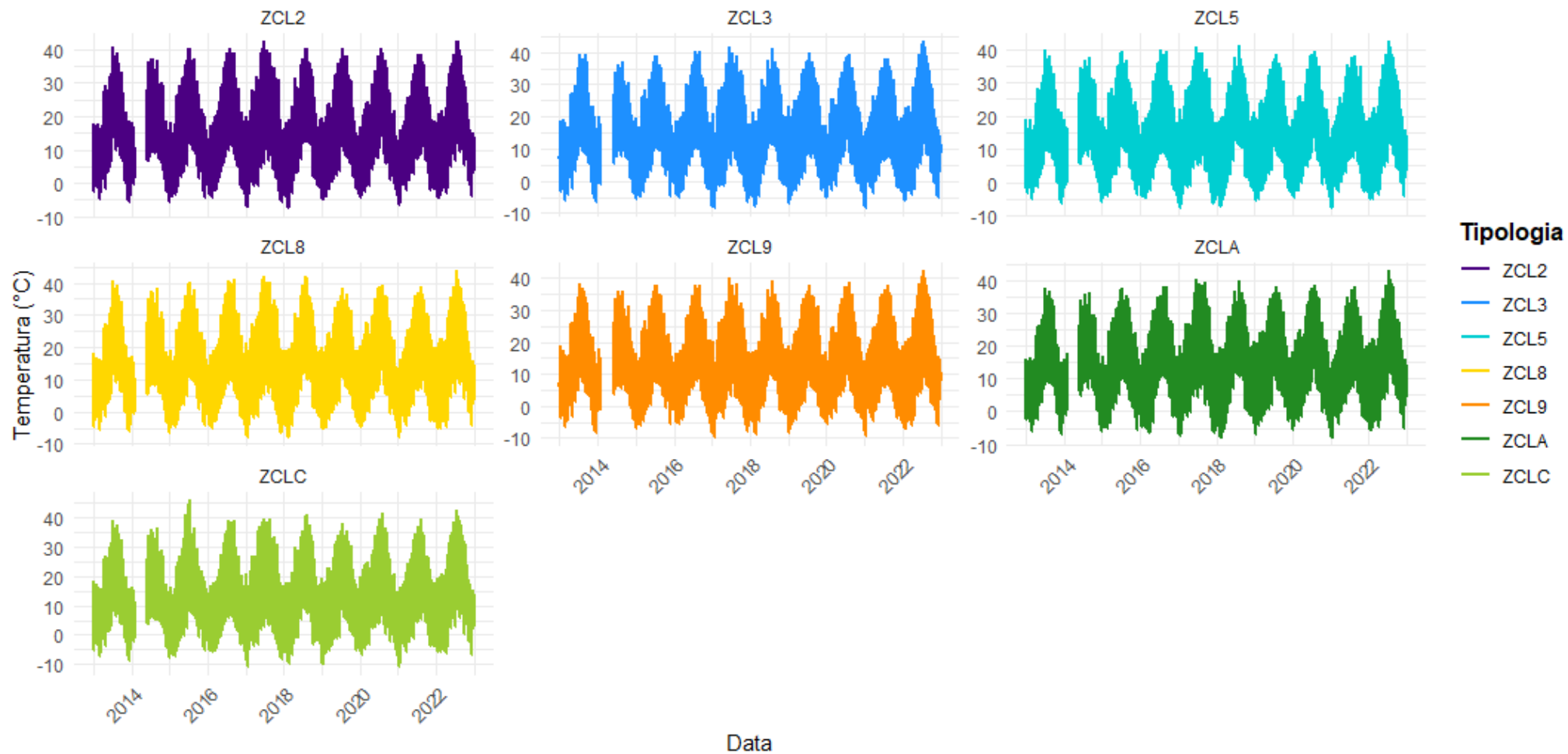


Figura 7 - Temperatura do ar por ZCLs na série temporal.

Essa consistência sazonal é importante para caracterizar o clima de Bragança e reforça a análise dos padrões climáticos dominantes. A ZCL 2, apresenta picos mais consistentes de temperatura elevada durante os períodos de verão, chegando a ultrapassar claramente os 40°C em diversos anos. Isso indica que essas áreas têm uma maior absorção e retenção de calor, possivelmente devido à densidade de construções e materiais que retêm maior quantidade de calor.

Segundo Qin (2015), pavimentos convencionais com superfícies escuras e elevada inércia térmica tendem a absorver e reter calor, reduzindo a capacidade de arrefecimento natural em áreas urbanas. A ausência de arrefecimento evaporativo nestas superfícies contribui para o aumento da temperatura noturna, intensificando o efeito de ilha de calor urbano, mesmo no inverno.

A ZCL A, a temperatura do ar apresenta uma variação de temperatura menos extrema em comparação as áreas densamente urbanizadas, com menores taxas de aquecimento diurno e de arrefecimento noturno. Já nos locais da ZCL C é perceptível o potencial de arrefecimento noturno que chegou a temperaturas do ar menores na série chegando a alcançar -10 °C

De acordo com a normal climatológica de Bragança para o período de 1981 a 2010, fornecida pelo IPMA, a temperatura média do ar atinge seu valor mais alto em julho, com 21,7 °C, enquanto em janeiro registra o valor mais baixo, de 4,5 °C, conforme a Figura 8 apresenta. Destaca-se as temperaturas mínimas próximas de 0 °C, em dezembro e janeiro, indicando períodos frios na cidade e a necessidade de planeamento para combater esses desafios.

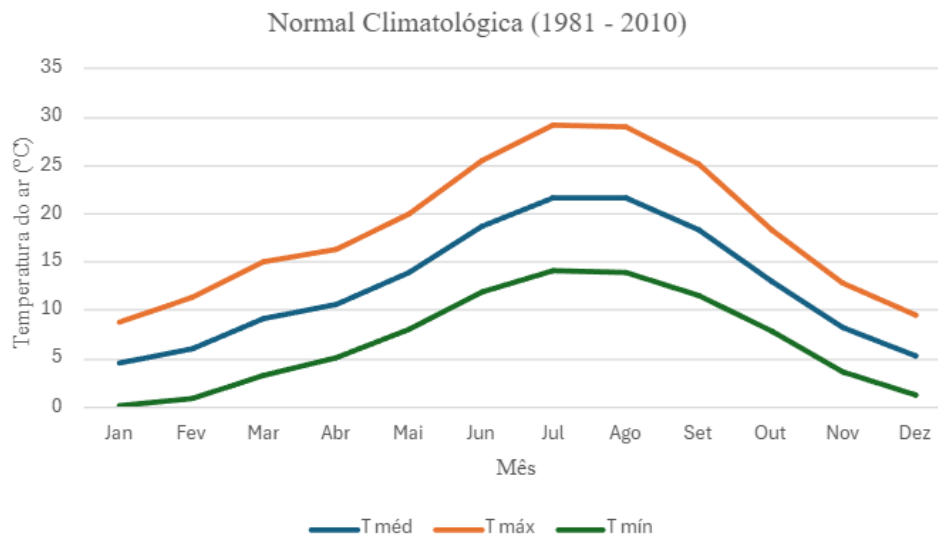


Figura 8 - Normal Climatológica de Temperatura do ar IPMA (1981-2010).

Contudo, em geral, as áreas com mais densidade urbana estão associadas a uma maior temperatura do ar devido à retenção de calor nessas áreas, por via de estruturas e materiais presentes, que retêm mais calor durante o período diurno e libertam mais lentamente durante o período noturno (Stewart & Oke, 2012). Sobretudo, esse comportamento é relaciona o balanço térmico recorrente nesse contexto. Em conjunto, as ZCLs rurais absorvem calor de modo mais lento ao longo do período diurno, quando comparadas com espaços urbanizados de baixo albedo; já no período noturno tendem a arrefecer mais rapidamente pela sua exposição direta, sem obstrução de estruturas ou vegetação ao céu, transferindo radiação de grande comprimento de onda de forma mais eficiente e conseqüentemente arrefecendo mais rapidamente.

4.1.2 Comportamento da Temperatura do Ar por Estação

Para a seguinte análise, consideramos aspetos de distribuição da temperatura em cada estação do ano (Primavera, Verão, Outono e Inverno). A Figura 9 demonstra os padrões de distribuição da temperatura, em cada estação do ano, para cada ponto de coleta durante os dez anos.

Os dados permitem observar um padrão comparando as estações mais quentes (Primavera e Verão) e as mais frias (Outono e Inverno). A amplitude térmica é notável para cada estação, sinalizando seus padrões.

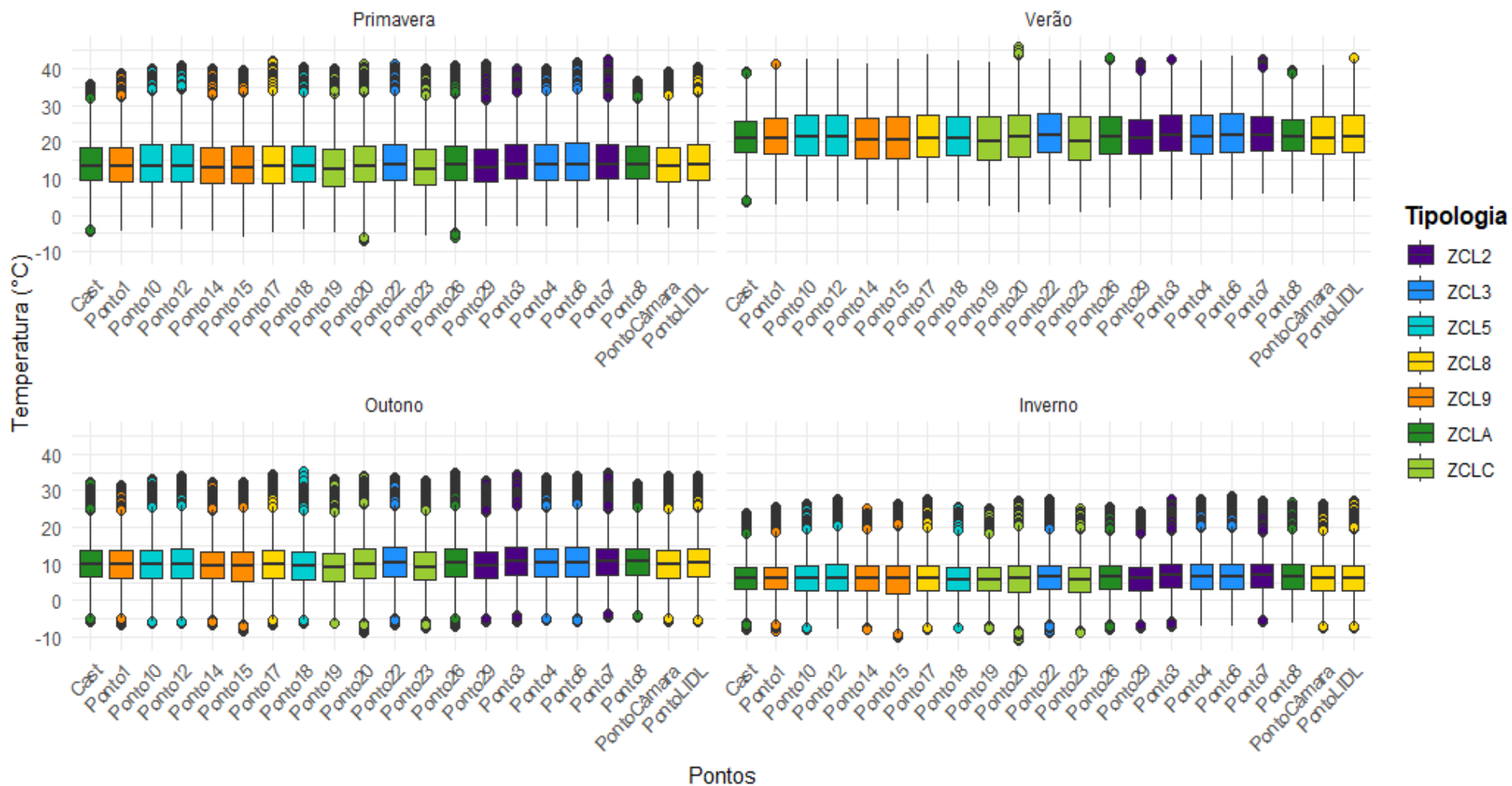


Figura 9 - Temperatura do ar por pontos e por ZCL em cada Estação.

O comportamento segue um padrão sazonal, que se comporta sequencialmente, primeiramente pela Primavera, de forma razoavelmente quente, após segue o Verão com as temperaturas mais elevadas, depois começa um padrão de arrefecimento da temperatura, de forma que indica a estação Outono e depois um arrefecimento com maior intensidade que indica o Inverno. Após esse ciclo, ano após ano, ele volta a repetir-se, mostrando-nos o padrão sazonal da série, reforçando o ciclo climático de Bragança.

Nesse sentido, vale ressaltar, o impacto da urbanização no Verão, pois as áreas urbanizadas se mantêm com temperaturas mais elevadas onde recorrentemente se alcançam temperaturas do ar acima de 35 °C. Isso ocorre devido a uma maior absorção de radiação de pequeno comprimento de onda no período diurno, e libertação de calor (radiação de grande comprimento de onda). Esses efeitos têm origem nas características locais, que influenciam o microclima, pois as ZCL 2 e ZCL 3, são caracterizadas pela alta densidade de construções e predominância de superfícies pavimentadas (asfalto e betão) e baixa densidade de vegetação. Esses materiais absorvem e retêm uma quantidade significativa de calor durante o dia (Qin, 2015).

Durante a noite, áreas com o céu desobstruído tendem a arrefecer mais rapidamente, liberando de forma mais eficiente o calor acumulado. Já nas áreas urbanas, a inércia térmica dos materiais, para além da maior obstrução do céu dificultam o arrefecimento nocturno. Isso contribui para que as ZCLs urbanas mantenham temperaturas mais elevadas durante a noite. Esse efeito de retenção de calor nas áreas urbanas é um dos componentes principais do EICU.

No inverno, as ZCLs urbanizadas apresentam temperaturas relativamente altas em comparação com áreas menos urbanizadas, embora a intensidade do EICU seja menor devido como resultados do menor aquecimento das superfícies durante o dia. No entanto, mesmo no inverno, a falta de vegetação e a presença de superfícies pavimentadas resultam num menor arrefecimento nas zonas urbanas.

A Figura 10, ilustra o comportamento da temperatura por ZCL ao longo das estações, fornecendo uma visualização detalhada de como as diferentes ZCLs respondem às variações sazonais.

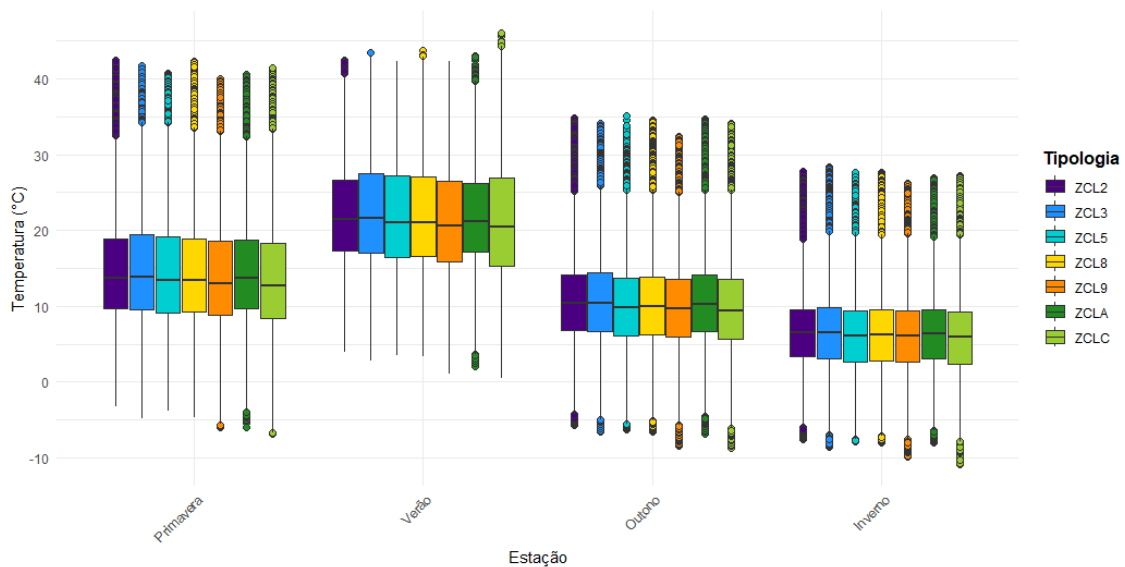


Figura 10 - Temperatura do ar por ZCL em cada estação.

O impacto da sazonalidade durante os anos de análise é visível, e é notável durante as várias estações, diferenciando-se apenas na intensidade nas ZCLs.

A distribuição da temperatura, na primavera, começa por aumentar em todas as ZCLs, mas ainda apresentam uma amplitude moderada, com máximas e mínimas variando significativamente. As ZCLs urbanas apresentam temperaturas medianas mais elevadas em relação às outras ZCLs rurais. Esse comportamento, conforme discutido anteriormente, indica um aquecimento em superfícies pavimentadas e construções, devido à absorção de calor.

As ZCLs rurais, mostram uma maior amplitude de variação de temperatura, no qual se remete a uma maior dinâmica térmica, com temperaturas mínimas mais baixas durante o período noturno.

No verão, as temperaturas atingem seus valores máximos, nesse contexto observa-se que as temperaturas do ar das áreas urbanizadas se mantêm genericamente mais altas. Nos locais com áreas arborizadas (ZCL A), a vegetação contribui para a regulação térmica por meio de evapotranspiração e sombra, o que ajuda a manter temperaturas do ar mais amenas durante o dia. Entretanto, devido à cobertura arbórea, seu Fator de Visão do Céu (FVC) é baixo, o que dificulta seu arrefecimento noturno, mantendo temperaturas ligeiramente mais elevadas em comparação com áreas rurais, onde a perda de atmosfera é mais rápida.

4.2. Médias Móveis aplicadas à temperatura do ar

Nesta secção é feita a avaliação do modelo de média móvel, suavizando a série e demonstrando o comportamento e tendências da temperatura do ar. A Figura 11, apresenta as médias móveis de dois em dois anos, sendo possível observar claramente a sazonalidade da série temporal, com uma clara tendência no período estudado.

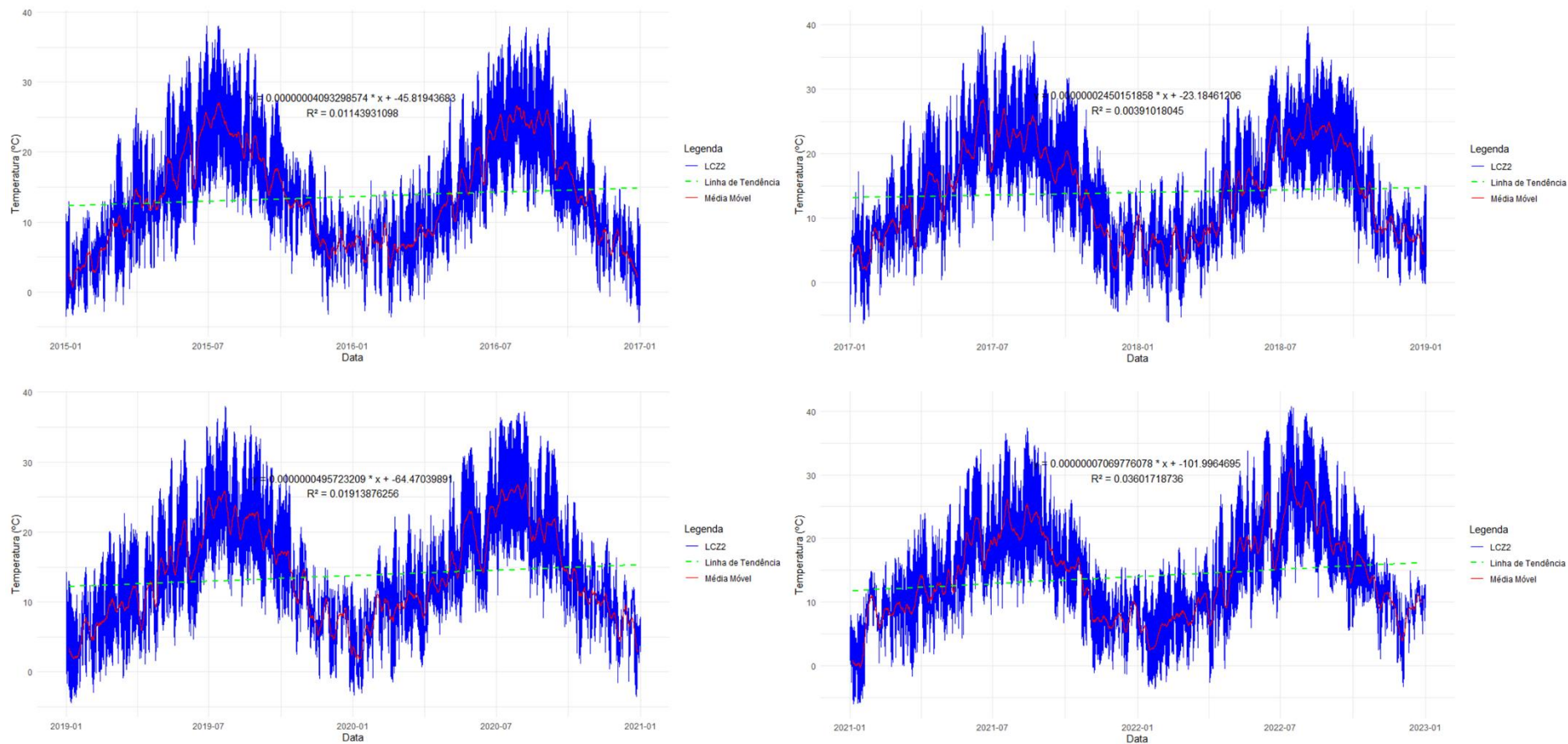


Figura 11 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ 2 (grau 1000).

Em geral, a linha de tendência (linha tracejada verde), mostra-nos um aumento de aproximadamente 2°C nas médias móveis da ZCL 2. Em termos das máximas e mínimas observadas, as maiores temperaturas ocorreram no ano de 2022, porém, as menores temperaturas ocorreram nos anos 2017 e 2021. A média móvel, indicada pela linha vermelha, suaviza flutuações durante o período de cada partição. O aumento da temperatura indicado pela linha de tendência pode estar associado a alterações no nível de urbanização na área envolvente dos pontos. Especificamente, na área envolvente do Ponto 7 (ZCL 2), onde ocorreu uma mudança de níveis de urbanização entre o ano de 2021 a 2022, que pode influenciar nos dados em questão. Segundo o boletim do IPMA em 2022 foi o ano mais quente desde 1931, o que também poderá ter influenciado os resultados.

Os dados relatam uma tendência de ligeiro aumento de temperatura do ar, o que pode estar associado a tipologia da ZCL 2, que é mais densamente urbanizada. Isto sugere que a urbanização intensa nesta área está contribuindo para um efeito de ilha de calor, onde as superfícies construídas, como betão e asfalto, absorvem e retêm mais calor durante o dia, libertando-o lentamente durante a noite. Esta característica das zonas urbanas provoca um aumento gradual nas temperaturas médias do ar, especialmente nos períodos mais quentes.

Esta análise inicial deve ser confrontada com dados climatológicos mais amplos para verificar se esta tendência se sustenta ao longo dos anos e como está relacionada a factores regionais, como a topografia e as alterações climáticas que afetam Bragança.

Na Figura 12, observam-se os dados das médias móveis para o período de três em três anos, com o grau de média móvel 5000. As suas flutuações ainda são visíveis e a linha de média móvel ajuda a observar o comportamento e amplitudes anuais.

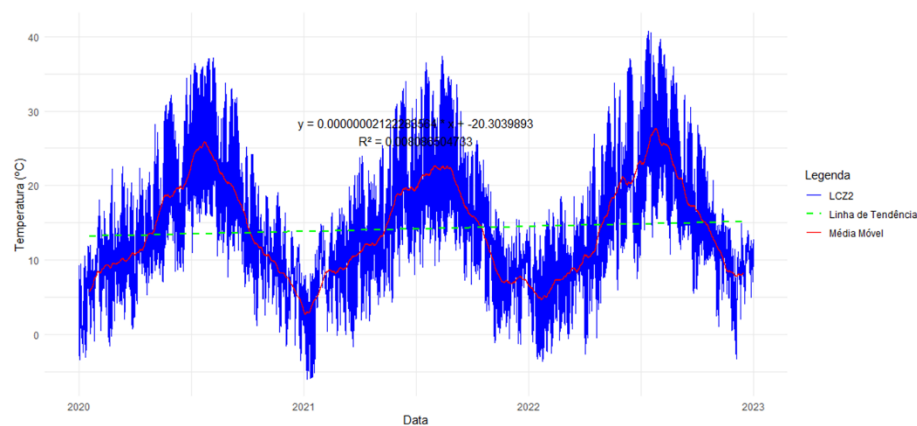
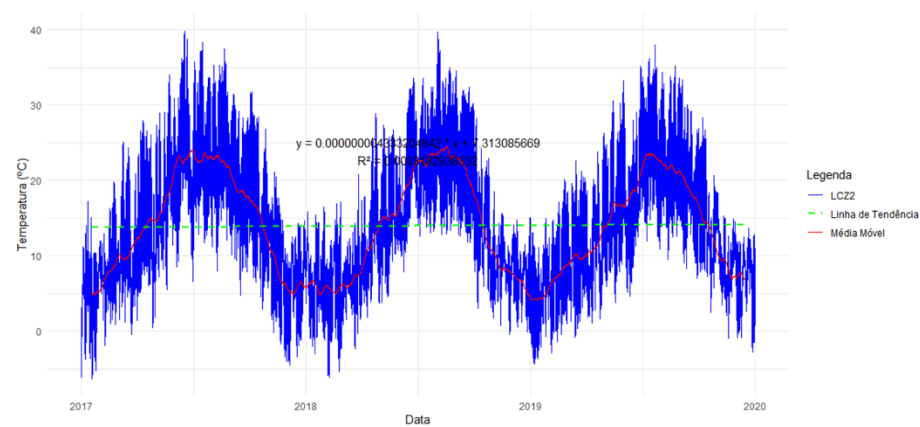
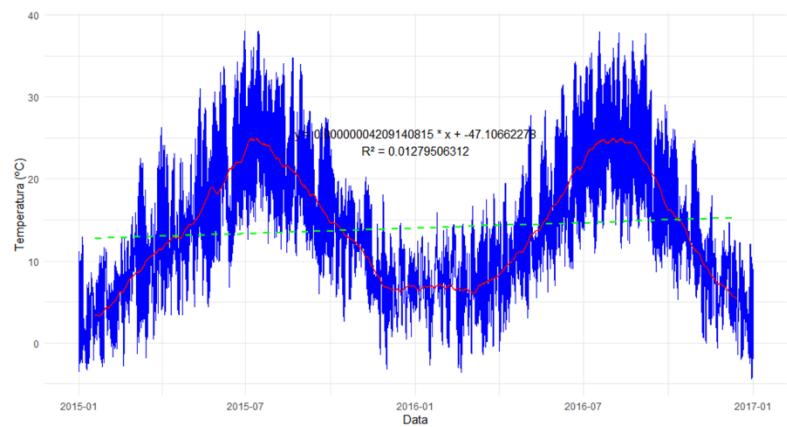


Figura 12 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ 2 (grau 5000).

A presente análise conduz a um entendimento similar ao anterior, embora o período aumentado confirme uma tendência de aumento de temperatura ao longo dos anos; porém, essa tendência apresenta-se de forma menos intensa do que a observada em períodos menores. Assim, embora exista um leve aumento na temperatura do ar ao longo do período, ele é insuficiente para sugerir uma alteração climática significativa causada apenas pela urbanização da ZCL 2.

Em contraste, a avaliação de outra zona climática é importante para compreendermos o comportamento da temperatura do ar. Portanto, vale analisar as ZCL rurais (ZCL C), que são caracterizadas por áreas abertas sem influência de estruturas; com seu FVC alto, tendem a receber radiação solar direta desde o amanhecer. Assim, conseguimos comparar os extremos (ZCL 2 e ZCL C) urbano-rural. A Figura 13 mostra-nos o comportamento da temperatura do ar da ZCL C, com suas respectivas médias móveis e tendências.

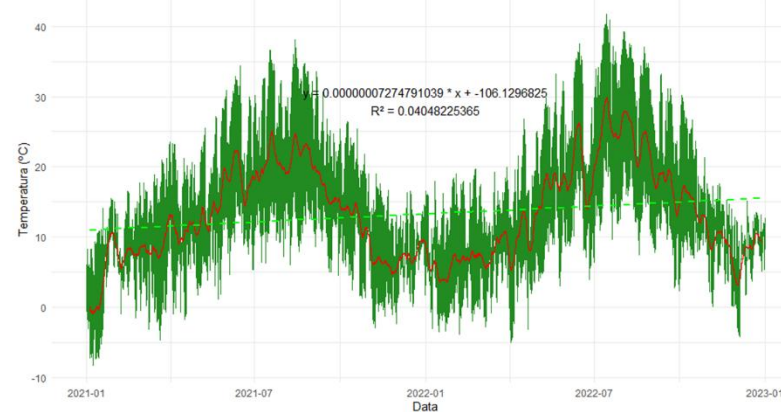
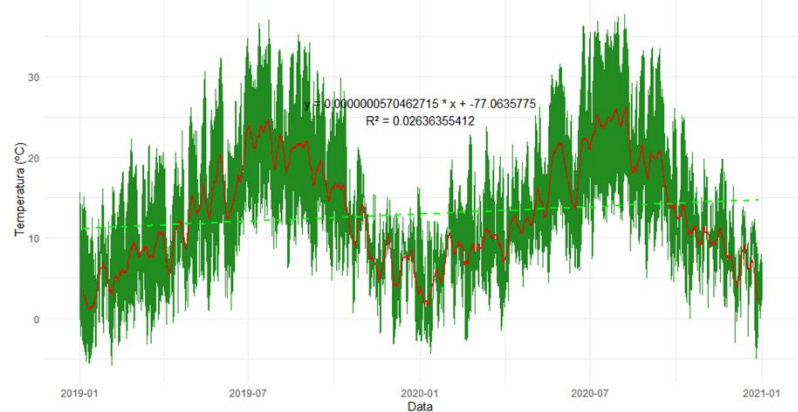
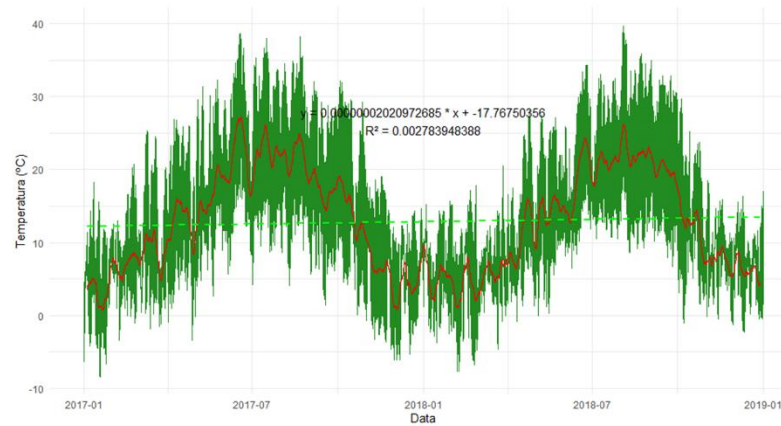
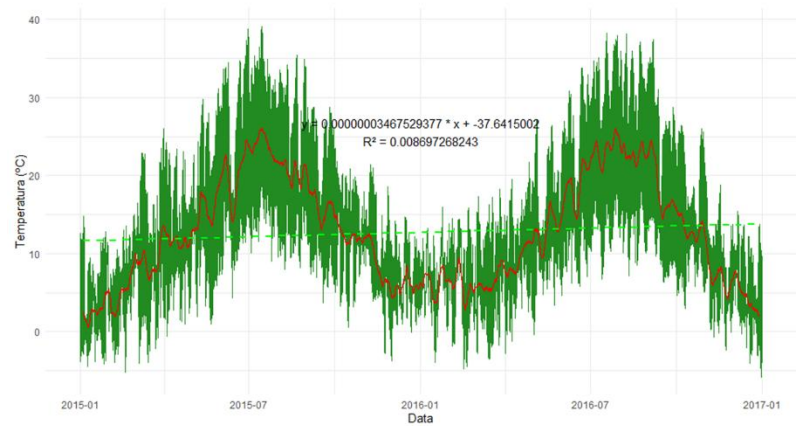


Figura 13 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ C (grau 1000).

Nessa análise, os dados da ZCL C demonstram um comportamento sazonal bem definido, apresentando tendências de aumento ligeiro. Nessas áreas, predominam espaços abertos e vegetação natural. Isso permite uma maior troca térmica com o ambiente, uma libertação de calor mais rápida durante os períodos noturnos e um aquecimento mais rápido durante as primeiras horas do dia, onde a radiação solar incide diretamente na área.

A Figura 14 mostra o comportamento da média móvel da temperatura do ar para a ZCL C, com um grau de suavização maior (5000), facilitando a análise das tendências de temperatura de forma mais clara, suavizando as flutuações diárias e sazonais.

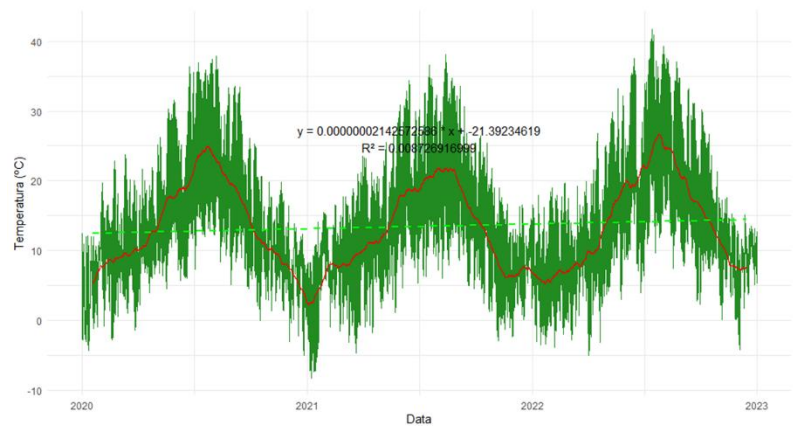
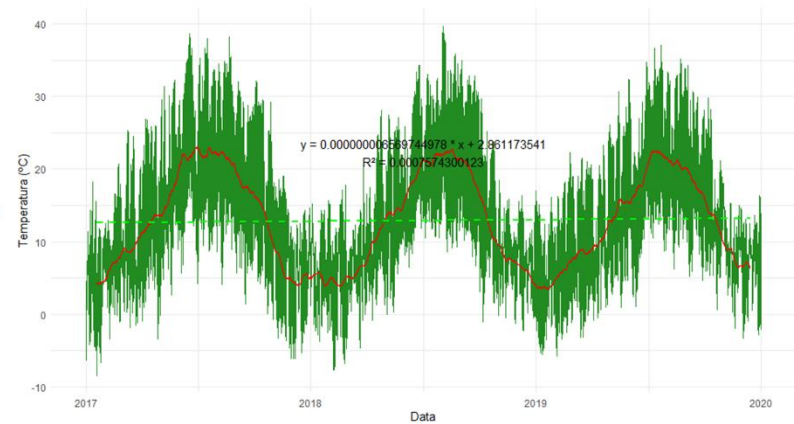
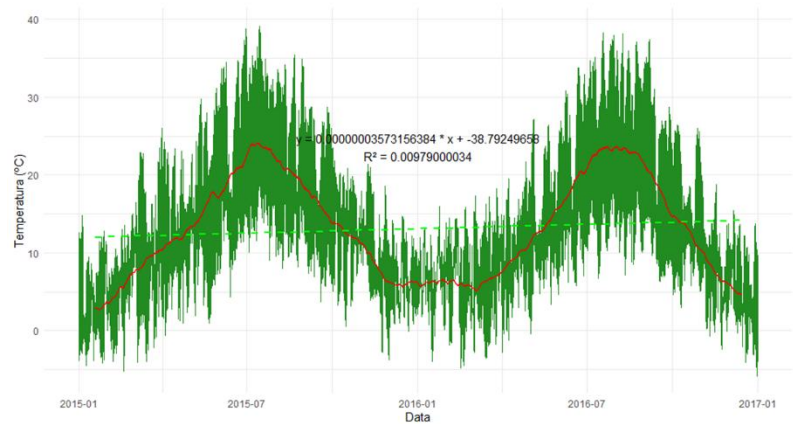


Figura 14 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ C (grau 5000).

Observa-se diferenciação dos picos ano a ano. A linha de tendência demonstra um aumento relativamente baixo, indicando uma tendência de aumento de temperatura de aproximadamente 2°C. Vale destacar, que conforme a consideração do período de dados for maior, a temperatura mostra mais estabilidade, fazendo com que o aumento da temperatura seja cada vez menos significativo.

Observa-se uma variação sazonal similar à ZCL 2, com temperaturas mais elevadas no verão e mínimas durante os meses mais frios (inverno). No entanto, o comportamento térmico da ZCL C mostra amplitudes expressivas em comparação as áreas mais densamente urbanizadas (ZCL 2), o que já era esperado devido a área rural ser aberta com exposição direta a radiação solar, resultando num aquecimento expressivo; já no período noturno, essas áreas arrefecem mais rapidamente, devido ao FVC ser alto, portanto, o seu arrefecimento é mais eficiente devido a irradiação direta ao céu. Já na ZCL 2, isso não ocorre de forma mais lenta, como discutido anteriormente.

A Figura 15 apresenta a média móvel das temperaturas para duas ZCLs, representadas como os dois extremos do presente trabalho: ZCL 2 e ZCL C, urbano e rural, respetivamente.

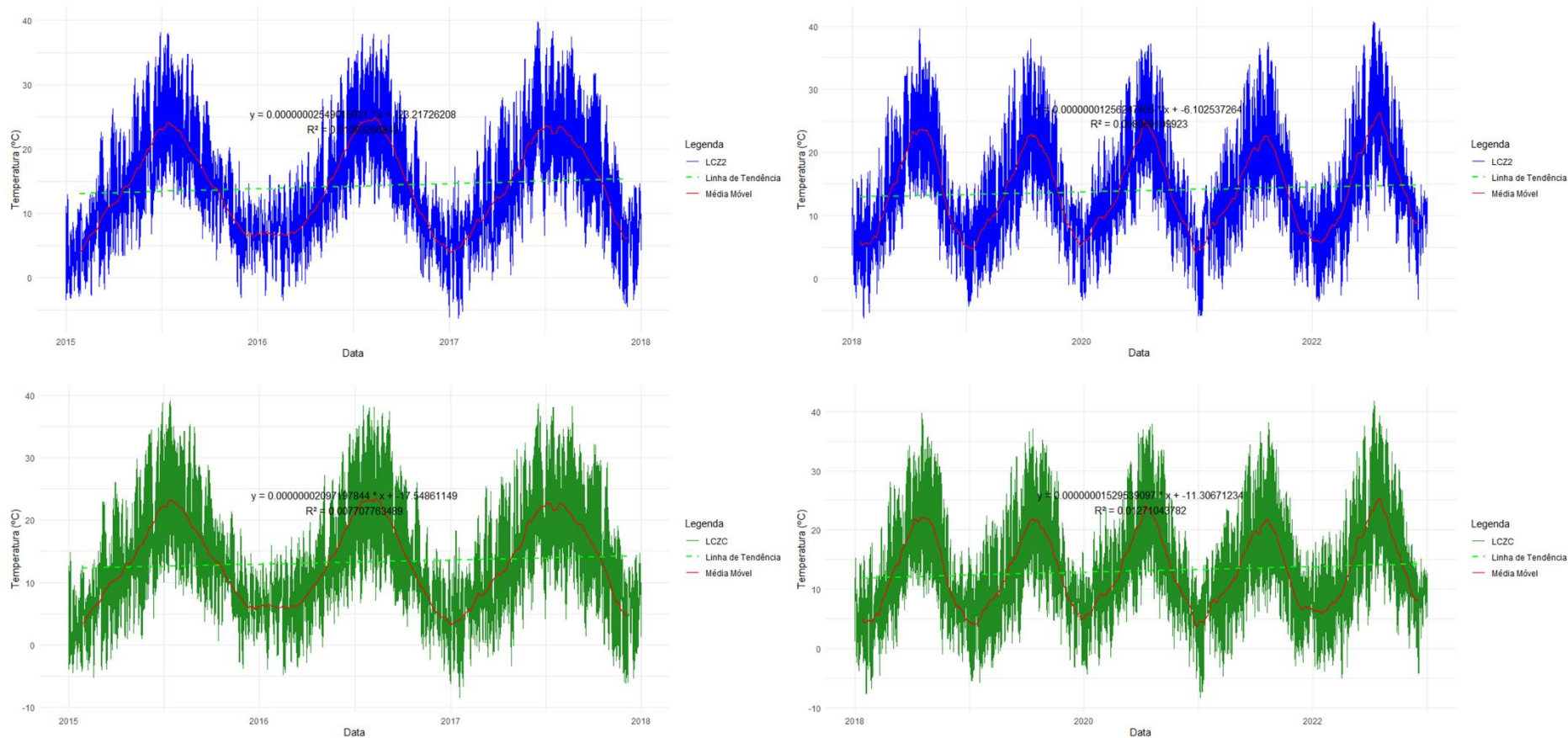


Figura 15 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ 2 e LCZ C (grau 7500).

Observa-se que a média móvel das temperaturas na ZCL 2 apresenta uma variação sazonal com as suas temperaturas máximas nos meses de verão e temperaturas mínimas durante o inverno.

A linha de tendência para a ZCL 2 possui uma leve inclinação positiva, sugerindo um aumento sutil e gradual das temperaturas do ar ao longo do tempo. Esta tendência de aumento pode ser influenciada por alterações no uso e ocupação do solo nas áreas urbanizadas. Esta condição foi observada no ponto 7, em cuja envolvente se intensificou o processo de densificação do espaço construído.

Já a ZCL C também apresenta variações sazonais evidentes, com valores de temperatura do ar maiores no verão e menores no inverno, refletindo o comportamento natural da temperatura do ar ao longo do ano. Esta zona, composta por campos abertos e sem construções significativas, permite uma maior dissipação de calor, o que contribui para o arrefecimento nocturno mais eficiente.

A linha de tendência na ZCL C possui também uma leve inclinação positiva, com um aumento sutil das temperaturas do ar: refletindo, mesmo que a área natural apresente uma estabilidade térmica, ocorre uma tendência de aumento, mesmo que mínima. Portanto, a figura 15, mostra uma tendência de aumento de aproximadamente 1,5°C na ZCL C e 1,6°C na ZCL 2.

Verifica-se assim uma leve tendência de ligeiro aumento em ambas ZCLs, o que sugere que esse aumento pode também estar relacionados com as alterações de escala regional, nas quais, se regista uma tendência para o incremento das temperaturas médias.

4.2. Caracterização dos EICU (Efeitos de Ilha de Calor Urbano)

4.2.1 Análise dos valores extremos do EICU

4.2.1.1 Máximos

A análise do diagrama de erros para o EICU foi embasada nas temperaturas máximas diárias dos EICU, avaliando aspetos fornecidos pelo banco de dados. Na avaliação dos diagramas de erro dos EICU, foram avaliadas tendências sazonais, comparação das tipologias das zonas climáticas locais e as relações entre o EICU e as estações do ano.

A presente análise consiste numa avaliação da confiança que os dados fornecem, indicando as variabilidades nos dados nos períodos máximos. A Figura 16 abaixo representa os diagramas de erro definidos por estações para cada tipologia de ZCLs,

demonstrando o comportamento das zonas climáticas locais. As barras de erro consistem num intervalo de confiança de 95%.

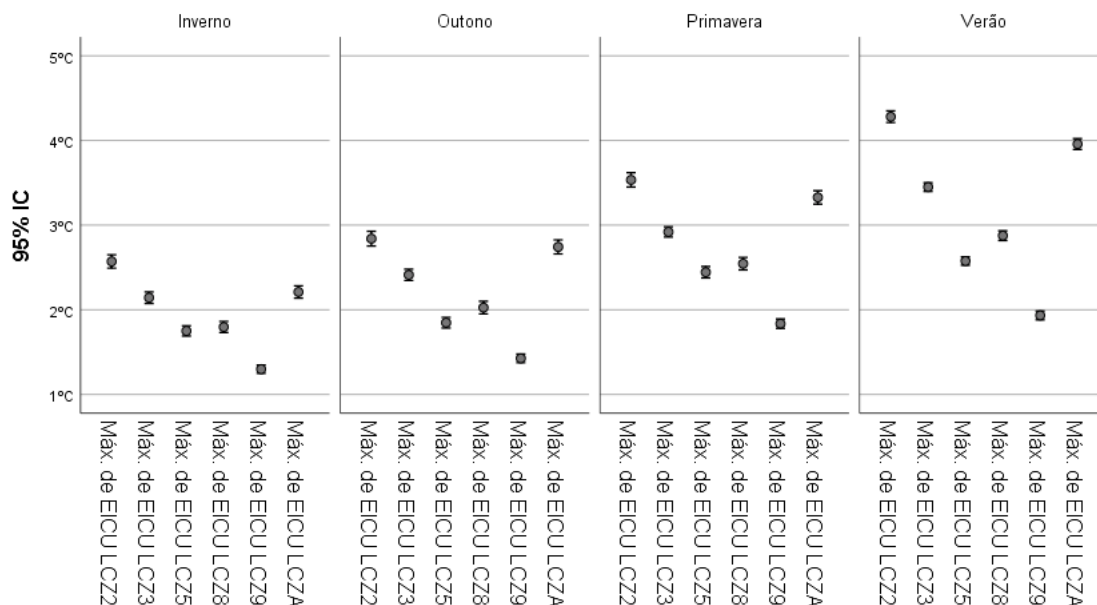


Figura 16 - Diagrama de erro dos EICU máximos (°C) por ZCL com IC 95%.

A presente figura revela uma variação significativa nos valores máximos de EICU entre as estações. Um dos aspetos mais evidentes nos diagramas é a diferença marcante dos valores máximos da EICU entre as estações do ano. Durante o inverno, os valores máximos de EICU mantêm-se relativamente baixos, com valores que oscilam de 2,7°C a 2,5°C (95% de confiança) na zona climática local mais urbanizada (ZCL 2). Isso é esperado, uma vez que a radiação solar é menor nesta estação. Em contrapartida, o gráfico referente ao verão revela um aumento considerável no EICU, com valores médios de 4,2°C. Esse aumento é esperado, pois o verão é uma estação com maior intensidade solar. Em áreas urbanizadas, caracterizadas por menor cobertura vegetal e mais superfícies impermeabilizadas, e menor Fator de Visão do Céu (FVC), limita-se sua dispersão de calor direta ao céu e, conseqüentemente, estas áreas tendem a ficar mais quentes quando comparadas com o espaço rural, resultando em maiores intensidades de EICU. Este comportamento do EICU, associado a temperaturas mais elevadas, pode ter implicações na saúde pública, como aumento na incidência de doenças respiratórias e cardiovasculares, além de maior demanda por energia elétrica devido ao uso intensivo de ar-condicionado.

Adicionalmente, a ZCL A, denominada como áreas verdes, embora não possua temperaturas do ar tão elevadas durante o dia, tem uma menor diminuição das temperaturas durante o período noturno. Este processo ocorre pelo baixo FVC devido a presença de árvores na envolvente dos pontos, o que leva para uma menor redução na radiação dissipada diretamente ao céu.

4.2.1.2 Mínimos

Esta análise tem por base os diagramas de erro dos EICU mínimos, estes gráficos indicam a variabilidade nos dados, para um intervalo de confiança de 95%. A Figura 17 representa o comportamento sazonal entre estações durante o período de dados avaliado.

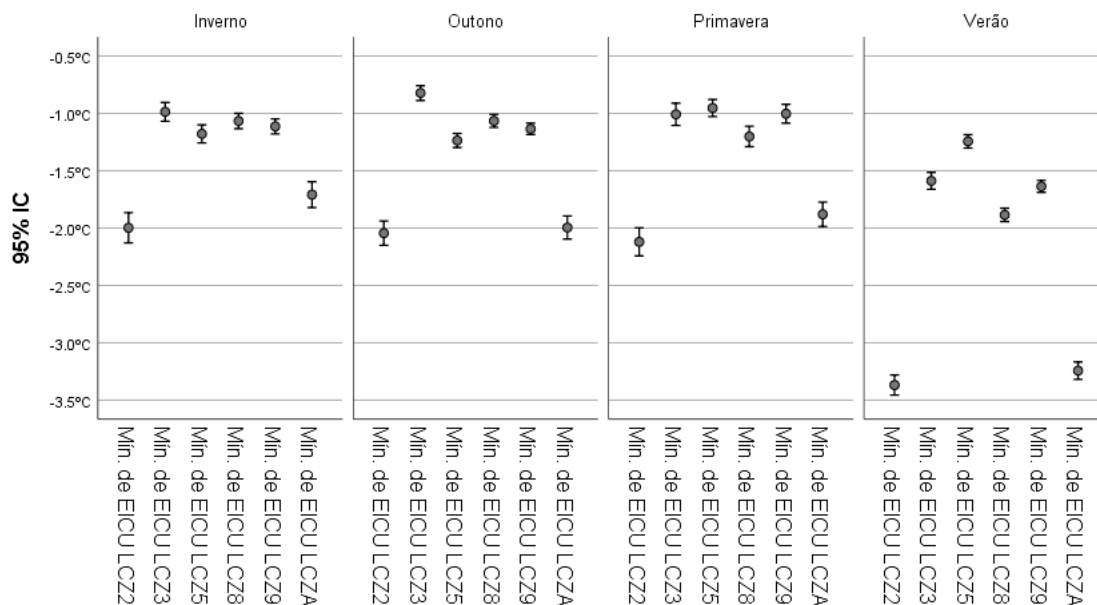


Figura 17 - Diagrama de erro dos EICU mínimos (°C) por ZCL com IC 95%.

Os resultados correspondem a variação na intensidade do Efeito de Ilha de Frio Urbano (EIFU), que é um aspeto tão relevante quanto os EICU. Intensidades mínimas mais elevadas indicam que áreas urbanas têm dificuldade de aquecimento nas primeiras horas do dia, logo após o amanhecer. Esse fenómeno pode ser explicado pelo FVC. Em áreas urbanas com FVC baixo, com visão do céu obstruída, podendo ser por edifícios e construções, ou até mesmo, árvores como a ZCL A. Esta condição limita a dispersão do calor no período noturno, mantendo o ambiente mais quente. Por outro lado, limita a capacidade de receber calor radiante nas primeiras horas do dia (manhã), devido à

interceção por edifício, projetando sombras. Consequentemente, o menor aquecimento destas áreas, intensifica o EIFU.

Durante o inverno, os valores mínimos dos EIFU variam entre $-0,9^{\circ}\text{C}$ a cerca de $-2,1^{\circ}\text{C}$, com a ZCL 2 mostrando o valor mais baixo (ou seja, menor taxa de aquecimento ao amanhecer). Contudo, a ZCL A, caracterizada como áreas verdes, exhibe também um valor baixo, próximo de $-1,7^{\circ}\text{C}$. Isso indica que ZCL 2 aquece mais devagar durante a manhã do que as outras ZCLs. O efeito de sombreamento, especialmente nas primeiras horas do dia, limita a entrada de radiação solar direta, e a evapotranspiração, intensificada pela presença de humidade, contribui significativamente para a redução da temperatura do ar observada (Bowler *et al.*, 2010).

No outono, o comportamento do EIFU nas zonas climáticas locais é relativamente semelhante ao do inverno, mas a amplitude dos valores dos EIFU mínimos aumenta, variando de $-0,7^{\circ}\text{C}$ a $-2,1^{\circ}\text{C}$.

Na primavera, a amplitude dos valores de EIFU comporta-se de forma similar à do outono. Destacando a mudança de comportamento dos EIFU na primavera, nas zonas climáticas locais 5 e 8. Os locais da ZCL 5 apresentam intensidades menores e a ZCL 8 intensidades maiores.

No verão, observa-se uma situação mais acentuada, os valores mínimos de EIFU oscilam entre $-1,2^{\circ}\text{C}$ a $-3,5^{\circ}\text{C}$. Estes valores demonstram que os efeitos ficam ainda mais evidentes com o aumento da temperatura da ZCL. Como se trata de um diferencial de temperatura (urbano – rural), indica que as estruturas ou áreas com vegetação (árvores) contribuem para que o EIFU aconteça. Visto que, em zonas rurais aquecem mais rapidamente durante as primeiras horas do dia em relação ao perímetro urbano, isto reforça a discussão anterior, mostrando uma relação com o FVC, onde a receção de radiação solar nas primeiras horas do dia em áreas com baixo FVC (alta obstrução ao céu) é mais limitada. O que impacta diretamente o aquecimento dessas áreas ao amanhecer.

4.2.1.3 Análise do comportamento dos EICU para as ZCLs por ano

Conforme a análise da ZCL 2, representados na Figura 18, demonstram o comportamento médio horário mensal nos seus respetivos anos. Os dados obtidos comprovam a existência de EICU. Contudo, também é notável a relação da ocorrência do

Efeito de Ilha de Frio Urbano durante o dia em muitas ZCLs, devido seu FVC reduzido. Essa condição reduz a exposição direta à radiação solar, permitindo que estas áreas permaneçam mais frescas em comparação a áreas abertas.

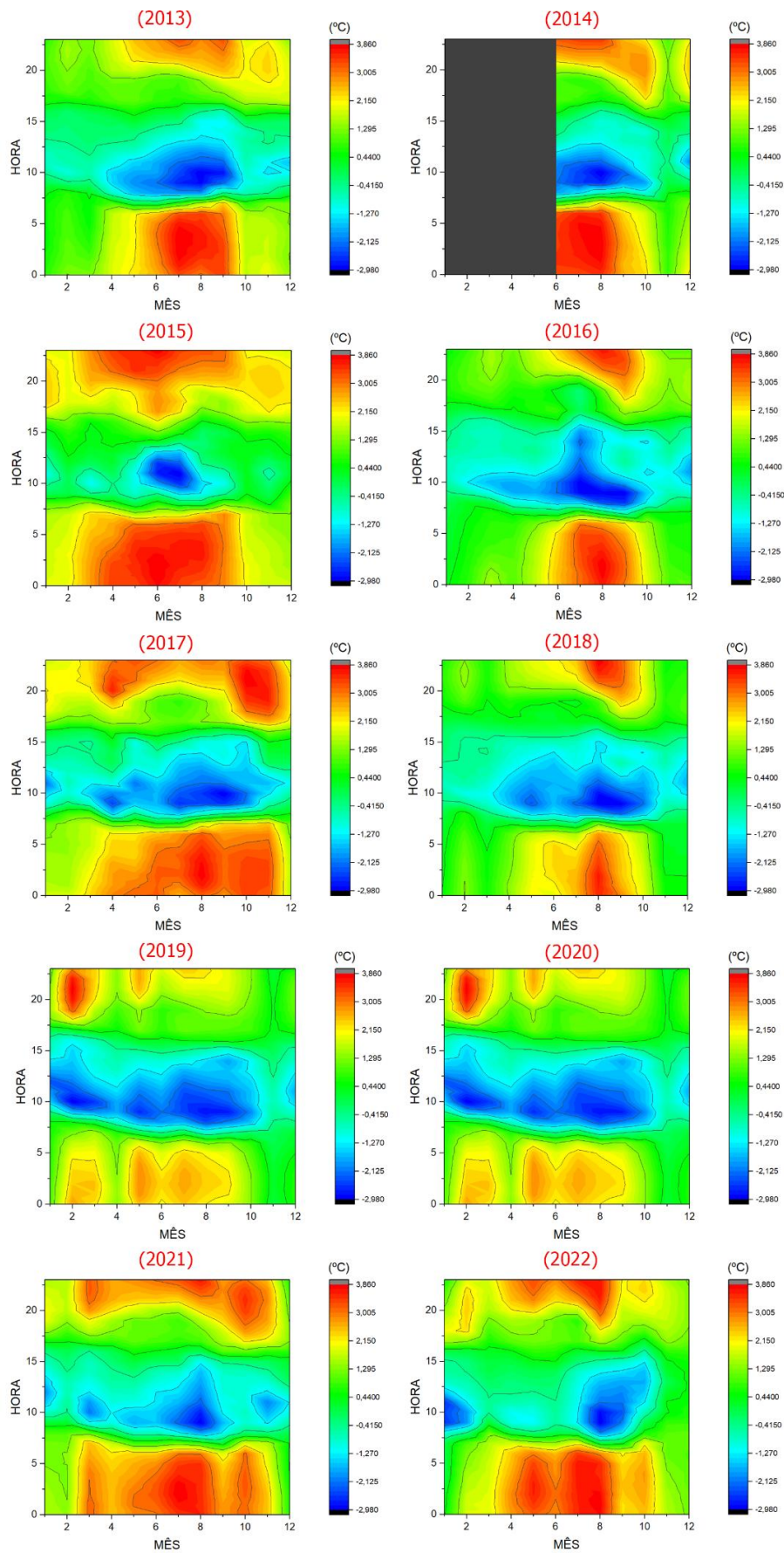


Figura 18 - Variação do comportamento de EICU por ano da ZCL 2 (em °C).

Como expectável, nesta representação é clara que a formação do efeito positivo é principalmente no período nocturno.

O aumento da urbanização é a principal causa do efeito de ilha de calor urbano, e reduzir esses efeitos requer uma combinação de técnicas de mitigação e de inclusão de espaços verdes (Mohajerani *et al.*, 2017). Durante o dia, as áreas urbanizadas tendem a aquecer mais rapidamente devido à baixa capacidade de retenção térmica das superfícies construídas, enquanto as áreas verdes ajudam a mitigar esse aquecimento. No entanto, à noite, as áreas verdes, especialmente aquelas com árvores, apresentam um processo de arrefecimento mais lento devido à maior capacidade de retenção de calor dos elementos naturais (árvores e vegetação), que libertam o calor acumulado de forma gradual, combinado com uma menor perda de calor por radiação (menor FVC) e uma presença de calor latente pela maior presença de vapor de água (Bowler *et al.*, 2010).

O EIFU ocorre quando a temperatura da ZCL C (rural) é mais altas que a zona climática local em questão. Esse efeito pode ser explicado devido à baixa angulação do sol durante as primeiras horas do dia, resultando numa projeção de sombras na superfície urbana, tornando-a mais fria em relação a zona climática local rural, onde o ambiente é aberto e não apresenta limitações para passagem de sol durante as primeiras horas do dia. Com o passar das horas, devido a incidência de radiação solar na ZCL C, o EIFU persiste até às primeiras horas da tarde. Esse comportamento é consistente durante todos os meses.

À medida que chega o período nocturno, a ZCL urbana tende a se resfriar mais lentamente em comparação com as áreas rurais. Isto ocorre porque os materiais de construção, como betão e asfalto, libertam o calor acumulado durante o dia de forma mais gradual, emitindo radiação de onda longa a um ritmo mais lento. Além disso, o FVC nas áreas urbanas é reduzido devido à presença de edificações, o que limita a dissipação de calor diretamente para atmosfera no período nocturno, portanto, acarretando o EICU mais intenso, chegando a atingir temperaturas de até 4°C.

No outono, as temperaturas voltam a baixar, à medida que a estação traz dias mais frios. Por outro lado, as ZCLs urbanas (2, 3, 5, 8 e 9) mantêm temperaturas mais elevadas, incluindo as áreas verdes (ZCL A). Como discutido anteriormente, este fato ocorre pelo FVC reduzido.

No inverno, durante a noite, as áreas rurais (ZCL C) mostram um arrefecimento mais acentuado. Enquanto nas áreas urbanas se mantêm temperaturas mais elevadas. Este

comportamento indica como a urbanização influencia o clima ao reduzir seu arrefecimento noturno. O que é de grande importância para o conforto térmico nos meses mais frios. Para a análise dos EICU e do comportamento anual da ZCL A, observa-se a Figura 19, que ilustra o comportamento horário médio mensal. Pela análise dos dados, constata-se o impacto que a presença de vegetação, exerce no controle das temperaturas diurnas (entre 7h e 16h), contribuindo para o efeito de ilha de frio. As árvores oferecem sombra e reduzem a radiação solar direta, contribuindo para o arrefecimento através da evapotranspiração e diminuindo o aquecimento do solo e do ar durante o dia (Zhu & Kensek, 2024; EPA, 2024).

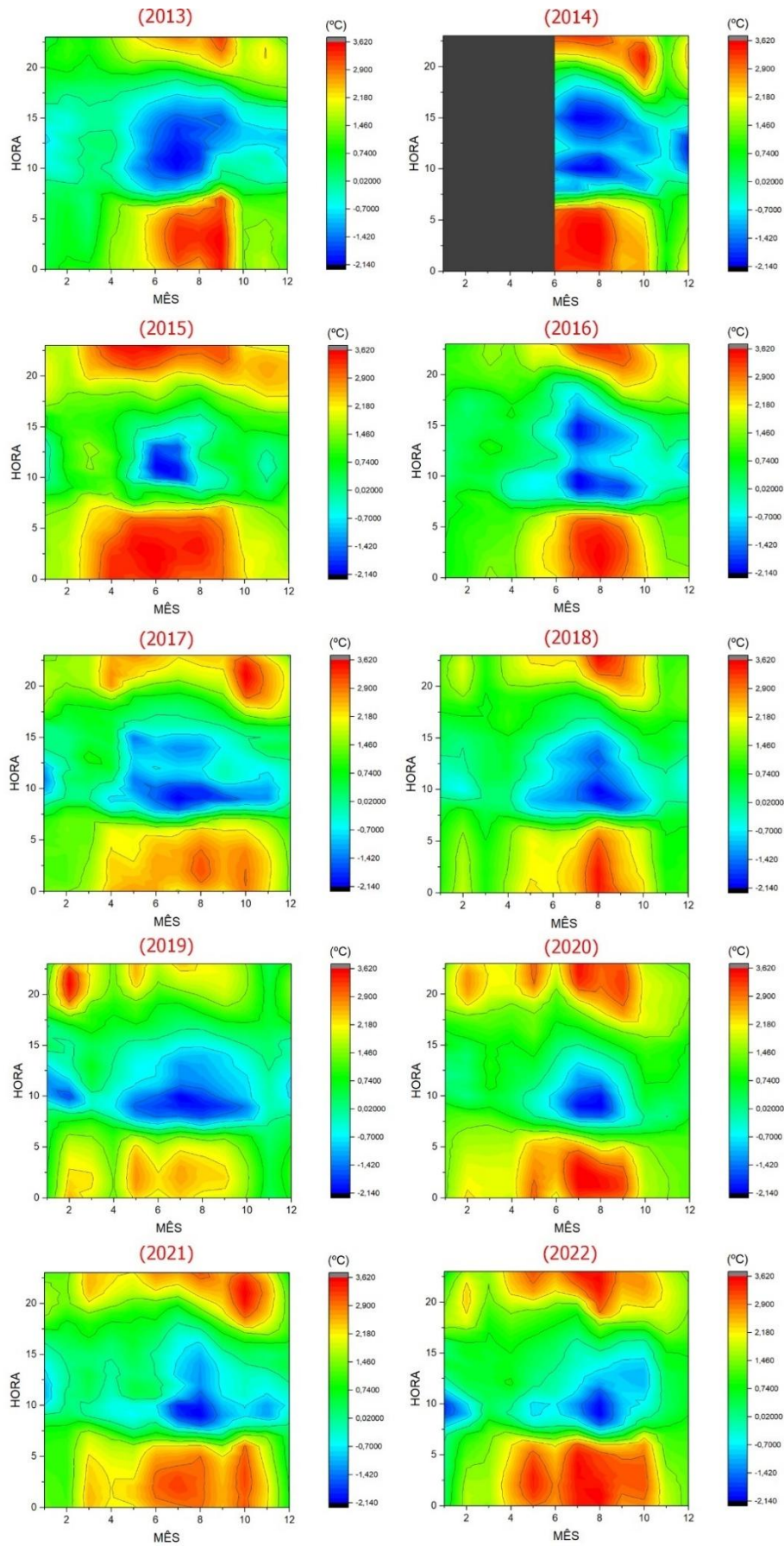


Figura 19 - Variação do comportamento de EICU por ano da ZCL A (em °C).

Durante o período noturno, as ZCL A demonstram uma maior retenção de calor em comparação com áreas mais urbanizadas (Figura 19). Os dados mostram uma diminuição na escala positiva e negativa da intensidade do efeito. Para os EICU ocorre uma diminuição de 0,24°C; já para o EIFU, houve uma diminuição na intensidade de 0,84°C. Em ambos os casos, as áreas verdes demonstraram um efeito considerável de eficiência, o que reforça o conceito positivo de construção dessas áreas.

Importa salientar que, embora o EICU seja recorrente no contexto urbano, também existe a influência dessas áreas observada no EIFU durante o período diurno. Pelos factores anteriormente apresentados, essas áreas fornecem sombreamento, o que ajuda a manter as intensidades do efeito mais amenas durante o dia. Porém, durante o período noturno, as árvores reduzem a exposição direta ao céu (FVC reduzido), o que limita a quantidade de radiação térmica é dissipada para atmosfera, contribuindo para que essas áreas permaneçam mais quentes.

Nas estações mais frias, a presença de árvores caducas, que perdem as suas folhas, permite maior incidência de luz solar no solo, ajudando a manter uma estabilidade térmica moderada (Zhu & Kensek, 2024). Esta característica sazonal é importante para minimizar impactos negativos do EIFU (EPA, 2024.).

4.3 Análise de extremos de temperatura do ar

1. Temperatura máxima maior que 35°C

A análise desta anomalia foi realizada com base nos dados de temperatura recolhidos durante o período de observação, compreendido entre 2013 a 2022. A Figura 20 ilustra a quantidade de dias, em cada ponto de registo, nos quais a temperatura máxima diária ultrapassou 35°C, discriminando a sua ocorrência ao longo das quatro estações do ano (inverno, primavera, verão e outono). Como era expectável, os resultados evidenciam uma maior frequência destas situações no verão. A ocorrência noutras estações é residual, verificando-se apenas alguns registos adicionais na primeira.

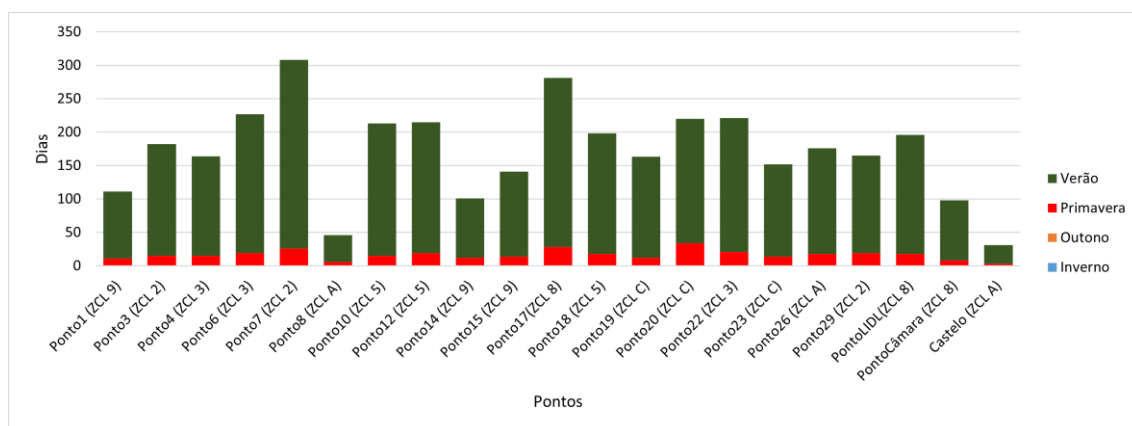


Figura 20 – Número de Ultrapassagens do Limiar dos 35°C por estações do ano para o período de 2013 a 2022.

A ocorrência de dias quentes durante o verão varia entre 28 dias (0,76%) (Castelo ZCL A) e 282 dias (7,72%) (Ponto7 ZCL 2). No entanto, alguns pontos, como Ponto17 e Ponto20, registram uma elevada frequência de dias quentes também na primavera.

Entre os diversos pontos analisados, observa-se uma possível influência de factores locais nas anomalias térmicas, tais como a densidade urbana, a presença de áreas verdes ou áreas rurais. Os pontos situados em zonas urbanizadas, como o Ponto 7 (ZCL 2) e Ponto17 (ZCL 8) registraram uma maior ocorrência de dias quentes, sugerindo um efeito de ilha de calor mais pronunciado.

Estes locais configuram-se como áreas prioritárias para estudos mais aprofundados sobre estratégias de mitigação de calor urbano, dado que concentram as condições mais extremas durante estações quentes. Por outro lado, também se verificam dias quentes nas zonas rurais, com destaque de ocorrência para os Pontos 20 (ZCL C) e 19 (ZCL C), onde foram registrados, respetivamente, 186 e 151 dias no verão (5,09% e 4,13%). Importa salientar que estas áreas apresentam elevada exposição à radiação solar direta devido seu Fator de Visão do Céu (FVC) elevado, o que contribui para um aquecimento mais rápido durante as primeiras horas do dia.

Por sua vez, os pontos localizados em áreas verdes (ZCL A), como o Pontos 8 e o Castelo, evidenciam uma menor ocorrência de dias quentes no verão, com 40 e 28 dias (1,09% e 0,76%, respetivamente). Tal resultado sublinha a relevância destas áreas em na redução da frequência de dias com temperaturas mais elevadas. Em particular, estes pontos caracterizam-se por uma cobertura arbórea extensa, que contribui para a mitigação dos efeitos da radiação solar direta, através da projeção de sombras durante o dia.

A ocorrência de dias com temperaturas extremas na primavera indica uma possível extensão das condições mais quentes para esta estação, fenómeno que pode estar associado a tendências globais de alterações climáticas. Este facto representa desafios adicionais para as estratégias de adaptação local. De acordo com Cardoso *et al.* (2018), projeções climáticas apontam para um aumento significativo na frequência e duração de eventos de calor extremo, como anomalias térmicas, durante a primavera em Portugal, particularmente em cenários de emissões elevadas (Cardoso *et al.*, 2018).

2. Temperatura mínima noturna maior que 20°C (Noites tropicais)

As noites tropicais são definidas como aquelas em que a temperatura mínima noturna se mantém acima de 20°C. A Figura 21 apresenta a frequência de ocorrência dessas noites nos diferentes pontos de medição, organizadas por estação, ao longo do período analisado. Este é um fenómeno tem um impacto significativo no conforto térmico nocturno, especialmente no verão.

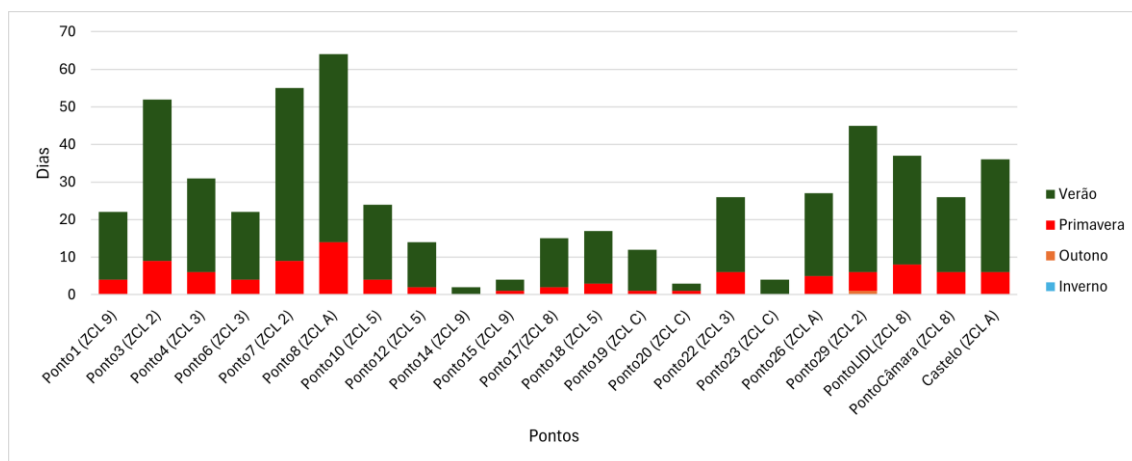


Figura 21 - Ocorrência de Noites Tropicais por estações do ano.

A partir da Figura 21, observa-se uma concentração significativa de noites tropicais durante o verão. Os pontos com maior frequência deste fenómeno foram o Ponto 8 (ZCL A) e o Ponto 7 (ZCL 2), com um total de 50 e 46 dias, respetivamente (1,36% e 1,25%).

A dissipação de radiação de comprimento de ondas longas é um fator determinante na análise desse fenómeno. Em áreas urbanas e densamente construídas, a radiação de comprimento de ondas longas é parcialmente limitada pelo FVC, que depende de elementos como edificações e árvores, entre outros. Este fator reduz a taxa de perda de calor por radiação direta ao céu, uma vez que, quanto mais baixo for FVC, mais limitada

é a dissipação da energia térmica acumulada durante o dia. Conseqüentemente, estas condições prolongam a retenção de calor próximo à superfície, aumentando a probabilidade de temperaturas mínimas noturnas se manterem elevadas e, assim, favorecendo a ocorrência de noites tropicais.

Além disso, constata-se a ocorrência de noites tropicais, embora com menor frequência, durante a primavera. Os pontos que registram o maior número de noites tropicais na primavera foram, igualmente, o Ponto 8 (ZCL A) e o Ponto 7 (ZCL 2), com 14 e 9 dias, respectivamente (0,38% e 0,24%). Este fenômeno sugere que, em áreas específicas, as condições de temperatura mínima noturna elevada podem estender-se além do verão, em função de efeitos microclimáticos locais, como a formação do efeito de ilha de calor urbano.

A análise revela que, para além das características de cobertura e uso do solo, a interação entre densidade urbana e o FVC exerce uma influência significativa na dissipação de radiação de comprimento de ondas longas, impactando diretamente a frequência de noites tropicais nestas regiões.

Nas zonas urbanas, as noites tropicais são, em média, mais frequentes, com temperaturas noturnas mais elevadas, sendo interanualmente mais ativas e recentemente mais intensas do que em estações rurais (Park *et al.*, 2022), como se verifica nos dados analisados.

3. Percentil 95% (p95)

A análise do percentil 95 (p95) estabelece, para os dados analisados, um limiar de 34,8°C, aplicável a todas as tipologias de zonas climáticas locais incluídas na base de dados. Este percentil é utilizado para identificar os dias de calor extremo, considerando aqueles em que a temperatura máxima diária ultrapassa o limiar de 34,8°C. A Figura 22 apresenta a ocorrência de dias em que a temperatura máxima diária excedeu esse limiar.

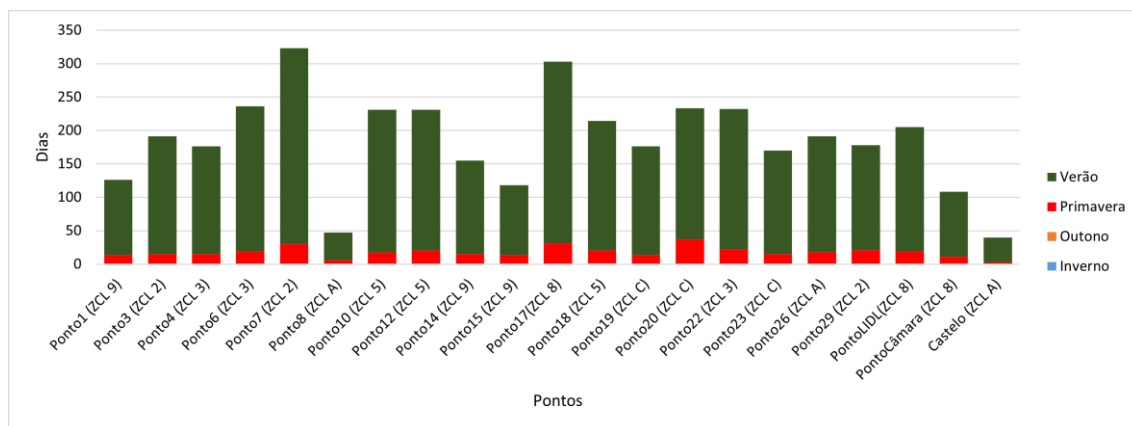


Figura 22 - Percentil 95% (Dias quentes) por estações do ano.

Observa-se uma elevada ocorrência de dias com temperaturas máximas acima do limiar definido durante o verão. Em destaque, os Pontos 7 e 17 (ZCL 2 e 8), registraram, respetivamente, 293 e 272 dias (8,02% e 7,44%), representando as maiores frequências de temperaturas extremas. Durante a primavera, embora a frequência seja menor, verifica-se ainda a ocorrência destes eventos nos Pontos 7 e 17, o que evidencia um período antecipado de temperaturas extremas nas áreas de estudo. Em termos de ZCL, a densidade urbana revela-se com um fator contributivo para intensificação destes eventos.

Em contraste, os Ponto 8 (ZCL A) e Castelo (ZCL A) apresentam frequências baixas tanto no verão quanto na primavera, o que sugere condições favoráveis para evitar temperaturas diurnas elevadas. Estas áreas distinguem-se pela presença de uma cobertura vegetal significativa, associada a um FVC baixo, o que favorece a projeção de sombras durante o dia. Este sombreamento contribui para a manutenção de temperaturas mais amenas. Além disso, nestas áreas, a evapotranspiração constitui um processo recorrente e relevante, desempenhando um papel essencial no arrefecimento destas zonas.

Com base no Boletim Climatológico do IPMA (2022), revelam tendências preocupantes de aquecimento e seca em Portugal Continental. O aumento na frequência e intensidade das anomalias térmicas, combinado a persistência de anos secos, agrava os desafios climáticos enfrentados pelo país.

4. Dias Frios

Os dias frios são definidos com base no critério do percentil 10 (p10), que corresponde ao limite inferior das temperaturas máximas. Esse limite abrange os 10% mais baixos das temperaturas registradas, situando-se abaixo de 9,16°C. A Figura 23

ilustra a ocorrência de dias frios ao longo da série temporal, com a distribuição destes eventos representada para diferentes estações do ano.

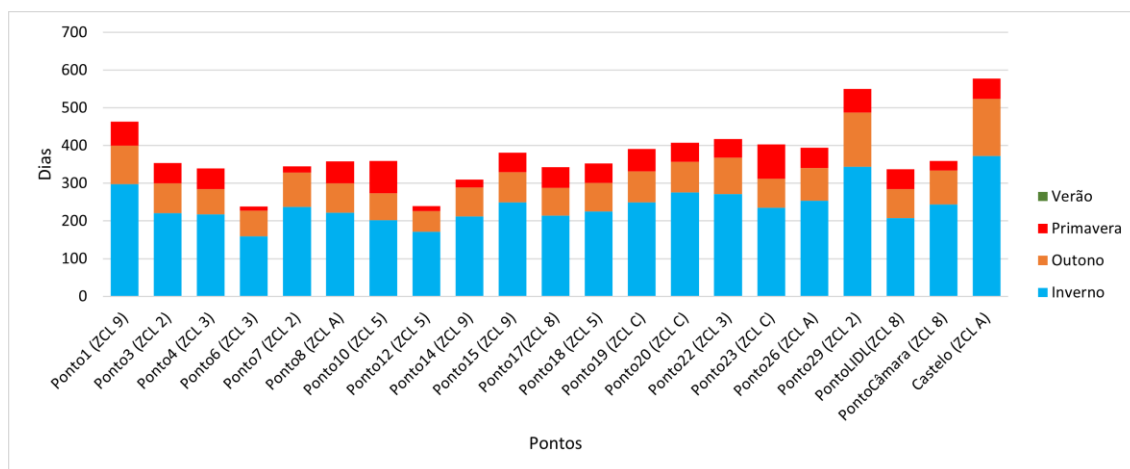


Figura 23 - Percentil 10% (Dias Frios) por estação do ano.

Observa-se uma ocorrência de dias com temperaturas máximas abaixo do limiar no principalmente inverno. Em destaque, os Pontos, Castelo (ZCL A), 29 (ZCL 2) e 1 (ZCL 9), apresentaram maior ocorrência de dias frios, 372, 344 e 298 dias (10,18%, 9,41% e 8,15%), respectivamente. Representando as maiores ocorrências dos dias frios com temperaturas máximas abaixo do limiar. No outono observa-se uma frequência menor, porém existente. Também ocorrem nas mesmas ZCLs que o inverno. O que mostra um período antecipado de dias frios nas áreas estudadas. Destacam-se três pontos específicos que, possivelmente, apresentam comportamentos diferenciados devido a factores microclimáticos locais, como variações na cobertura vegetal, proximidade de corpos d'água ou características da ocupação urbana. No entanto, não foi possível estabelecer uma relação clara entre as ZCLs para o contexto dos dias frios, indicando que outros fatores podem estar influenciando esses padrões.

No sentido dos EIFU, esse efeito pode ser considerado negativo, pois leva esses efeitos durante o dia ser potencializados. Visto que, as temperaturas máximas avaliadas ocorrem durante o período diurno.

5. Noites Frias

A ocorrência de noites frias é definida com base no critério do percentil 10 (p10), que corresponde ao limite inferior das temperaturas mínimas. Esse limite abrange os 10% mais baixos dos valores registrados, situando-se abaixo de $-0,66^{\circ}\text{C}$. A Figura 24 apresenta a distribuição das noites frias durante o período de estudo, organizada por estação do ano.

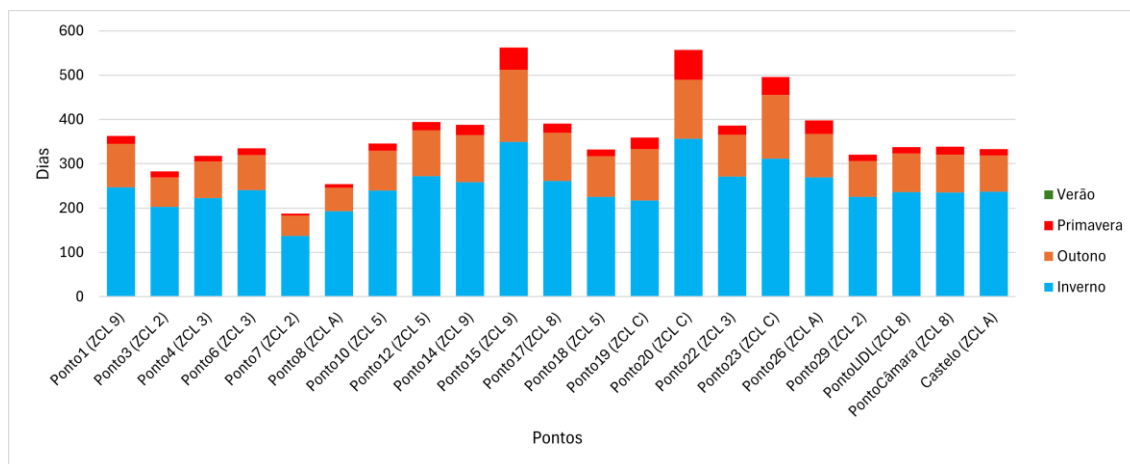


Figura 24 - Percentil 10% (Noites Frias) por estação do ano.

Observa-se uma ocorrência significativa de noites com temperaturas abaixo do limiar durante o inverno. Em destaque, os Pontos 15, 20 e 23 (ZCLs 9 e C) registraram 349, 357 e 312 dias (9,55%, 9,77% e 8,54%, respectivamente), representando as maiores incidências de noites frias com temperaturas mínimas inferiores ao limite estabelecido.

Conforme esperado, as ZCLs rurais (Pontos 20 e 23) apresentaram um número expressivo de ocorrências, reforçando a influência do FVC nessas áreas. Entretanto, o Ponto 19, também classificado como rural, mostrou valores inferiores aos das demais zonas rurais, sugerindo a influência de fatores microclimáticos locais específicos. Esse comportamento contrasta com o observado no Ponto 15 (ZCL 9), que registrou uma alta frequência de noites frias. Esses resultados ressaltam a necessidade de estudos adicionais que investiguem as particularidades microclimáticas desses pontos.

No outono, a ocorrência de noites frias também foi evidente nos pontos destacados, indicando uma possível antecipação dos períodos de temperaturas mais baixas.

No contexto do EICU, esse fenômeno pode ser considerado positivo, especialmente em ZCLs de alta densidade urbana, onde a intensidade do EICU durante a noite tende a atenuar a queda extrema das temperaturas mínimas.

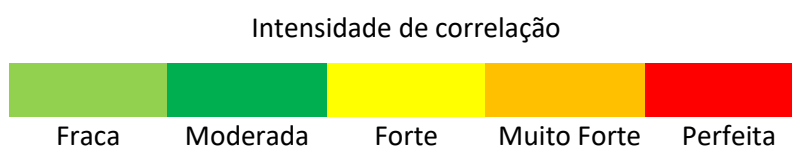
4.4 Correlação de Pearson aplicada aos EICU para cada tipologia de ZCL

Para a aplicação do teste, foi inicialmente realizado o teste de normalidade, que determina a adequação dos dados para a utilização da Correlação de Pearson.

A Tabela 6 apresentada abaixo ilustra os coeficientes de correlação (r) entre as variáveis de cada tipologia de ZCL. Estes coeficientes podem variar de -1 a +1, sendo interpretados da seguinte forma:

Tabela 6 - Correlação de Pearson aplicada a intensidade dos EICU por ZCLs **Fonte:** Autoria própria (2024).

	EICU ZCL2	EICU ZCL3	EICU ZCL5	EICU ZCL8	EICU ZCL9	EICU ZCLA
EICU ZCL2	1	.807**	.448**	.845**	.613**	.952**
EICU ZCL3		1	.528**	.783**	.505**	.840**
EICU ZCL5			1	.668**	.627**	.418**
EICU ZCL8				1	.696**	.810**
EICU ZCL9					1	.618**
EICU ZCLA						1



Valores próximos de +1 indicam uma forte correlação positiva, demonstrando que, conforme uma variável aumenta, a outra tende a aumentar também. Por outro lado, valores próximos de -1 revelam uma forte correlação negativa, ou seja, à medida que uma variável cresce, a outra tende a diminuir. Já valores próximos de 0 denotam uma correlação linear fraca ou inexistente. Os asteriscos (**) indicam que as correlações são estatisticamente significativas ($p < 0,05$), assegurando a confiabilidade dos resultados.

A análise das correlações revela que, na maioria dos casos, as variáveis apresentam correlações positivas, com intensidades variando de moderada a forte. Essa relação sugere uma consistência linear, na qual o aumento de uma variável está associado ao aumento de outras.

Entre as correlações mais significativas, destaca-se a relação muito forte entre a ZCL A (áreas verdes) e a ZCL 2 (densamente urbanizada). Esse comportamento pode ser explicado pelo baixo Fator de Visão do Céu (FVC) em ambas as zonas, resultado da proximidade de copas de árvores e edificações altas. Essas características limitam a incidência de radiação solar direta no solo durante o dia, o que gera temperaturas mais amenas nas primeiras horas da manhã devido à projeção de sombras. À noite, a dissipação de calor pela superfície é reduzida, uma vez que a radiação de ondas longas é atenuada pelas estruturas e pela vegetação, contribuindo para a elevada correlação observada.

Outras correlações fortes foram registradas entre EICU ZCL A e EICU ZCL 3 ($r = 0,840^{**}$) e entre EICU ZCL 3 e EICU ZCL 8 ($r = 0,845^{**}$). Tais relações refletem componentes semelhantes de densidade urbana, que resultam em efeitos térmicos similares, ainda que com intensidades menores.

Por outro lado, correlações moderadas, como a observada entre EICU ZCL A e EICU ZCL 5 ($r = 0,418^{**}$), evidenciam diferenças mais marcantes entre as tipologias das ZCLs. Essa interação moderada pode ser atribuída às distintas características das zonas: a ZCL A apresenta maior cobertura vegetal, enquanto a ZCL 5 possui densidade urbana média.

É importante destacar que, embora as ZCLs representem categorias bem definidas, existe uma significativa diversidade de condições microclimáticas nos locais onde os sensores estão instalados. Essa variabilidade nas condições ambientais locais pode influenciar diretamente os padrões de dados registrados. Por exemplo, fatores como a presença de vegetação, a proximidade de corpos d'água, a topografia e até mesmo a densidade de construções ao redor dos sensores podem criar microclimas únicos. Isso pode resultar em diferenças de comportamento térmico e meteorológico, mesmo entre pontos que pertencem à mesma classificação de ZCL. Portanto, ao analisar os dados coletados, é crucial considerar essas especificidades microclimáticas de cada local para obter uma interpretação mais precisa e contextualizada dos padrões climáticos observados.

5. Conclusões

Os resultados da análise de tendências permitiram identificar padrões de curto prazo, indicando um incremento das temperaturas registadas na cidade. Já a análise das anomalias térmicas possibilitou a identificação da incidência de eventos com temperaturas elevadas ao longo das estações do ano.

A análise da série temporal da temperatura do ar em Bragança revelou um padrão sazonal bem definido, com temperaturas mais elevadas no verão e mais baixas no inverno. As ZCLs mais urbanizadas, como a ZCL 2, apresentaram temperaturas médias mais altas, especialmente durante o verão. Adicionalmente, a análise da linha de tendência da média móvel da temperatura do ar evidenciou um aumento da temperatura ao longo dos dez anos estudados, o que pode estar relacionado ao processo de urbanização e com a intensificação do EICU.

No contexto da análise do EICU, foi possível observar a existência de um efeito complementar, o EIFU, ambos condicionados pelas características das ZCL. Assim, observou-se que a maior intensidade do EICU ocorre nas ZCLs mais densamente urbanizadas (ZCL 2), em conjunto com ZCLs com maior densidade de vegetação arbórea (ZCL A), especialmente no verão, após o entardecer e valores máximos antes do amanhecer. O EIFU manifesta-se com maior intensidade nas primeiras horas após o nascer do sol.

A análise das anomalias térmicas revelou uma concentração significativa de dias com temperaturas extremas durante o verão. As ZCLs mais urbanizadas registraram uma maior ocorrência de dias em que as temperaturas máximas se mantêm, à noite, acima de 20°C, evidenciando a intensificação do EICU nesses locais. Adicionalmente, a ocorrência desses dias durante a primavera sugere uma possível ampliação da temporada de calor, o que pode estar relacionado a mudanças sazonais ou ao processo de urbanização.

No que diz respeito à análise da ocorrência de dias em que as temperaturas mínimas permanecem abaixo dos limiares do percentil 10%, constatou-se a presença de anomalias térmicas de frio. Contudo, nesse contexto, o EICU pode ser considerado um fator positivo, pois contribui para a atenuação do frio extremo nas áreas urbanizadas, oferecendo certa mitigação aos impactos das baixas temperaturas.

Por último, na aplicação da análise da correlação de Pearson, foi possível identificar correlações com valores relativamente significativos, sendo a maior parte delas

fortes. Estes resultados estão relacionados com as características dos locais e com a sua classificação em ZCLs.

Os resultados obtidos com este estudo podem ser de grande utilidade para o planeamento urbano da cidade, levando em consideração os aspetos de cada tipologia de ZCL, como verticalização das cidades e a impermeabilização do solo, uma vez que estes factores influenciam directamente o clima urbano.

O trabalho representa um avanço significativo na compreensão das inter-relações entre as variáveis urbanas e o clima urbano, com destaque para aquelas que influenciam a ocorrência do EICU. Para estudos futuros, torna-se essencial avaliar a eficácia de diferentes estratégias de mitigação do EICU em diversos contextos climáticos. Além disso, a análise detalhada dos microclimas pode contribuir para identificar as causas específicas desse fenómeno. A criação de modelos preditivos para o EICU será uma ferramenta valiosa no apoio à tomada de decisões e na implementação de medidas preventivas, visando minimizar os impactos desse fenómeno no ambiente urbano.

6. Bibliografia

Alcoforado, M.J., Andrade, H., Lopes, A. (2010). Clima e ordenamento urbano na escala microclimática: o exemplo do bairro de Telheiras em Lisboa. In: Clima e Recursos Naturais: Conferências de Homenagem ao Prof. Doutor Dionísio Gonçalves. Instituto Politécnico de Bragança.

Andrade, H. (2005). O Clima Urbano - Natureza, escalas de análise e aplicabilidade. *Finisterra*, 40(80), 67–91.

Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water and the urban heat island. *International Journal Climatology*, 23, 1–26.

Ayoade, J. O. (1988). *Introdução à Climatologia para os trópicos (2ª ed.)*. Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil.

Barbirato, G., Souza, L., & Torres, S. (2007). Clima e cidade: a abordagem climática como subsídio para estudos urbanos. *Alagoas: UFAL*.

Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(4), 147–155.

Instituto Português do Mar e da Atmosfera. (2022). *Boletim Climatológico Anual – Portugal Continental*.

Callegari-Jacques, S. M. (2009). *Bioestatística: princípios e aplicações*. Artmed Editora.

Cardoso, R., Soares, P., Lima, D., & Miranda, P. (2018). Mean and extreme temperatures in a warming climate: EURO CORDEX and WRF regional climate high-resolution projections for Portugal. *Climate Dynamics*, 52, 129–157.

Carvalho, B. B. (2020). *Análise do clima urbano da cidade de Bragança e a sua relação com as variáveis de morfologia urbana (2016-2019)* (Master's thesis, Instituto Politécnico de Braganca (Portugal)).

Environmental Protection Agency. (2024). *Using trees and vegetation to reduce heat islands*. Disponível em <https://www.epa.gov/heatislands/using-trees-and-vegetation-reduce-heat-islands>. Acesso em 6 de novembro de 2024.

Fante, K. P. (2019). *Eventos extremos de temperatura e seus impactos no conforto térmico humano: Estudo de caso em Presidente Prudente, Brasil, na perspectiva da Geografia do Clima* (Tese de doutorado). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, SP.

Fante, K. P. (2024). *Eventos meteorológicos extremos de temperatura: A incidência de ondas de calor em Rio Claro - SP, com base em diferentes metodologias analíticas*. *Revista Brasileira de Climatologia*, 35, 336-348.

Fialho, E. S., Alves, R. S., & Lopes, D. I. (2011). Clima e sítio na Zona da Mata Mineira: uma análise em episódios de verão. *Revista Brasileira de Climatologia*, 7(8), 118-136.

Founda, D., & Santamouris, M. (2017). Synergies between Urban Heat Island and Heat Waves in Athens (Greece), during an extremely hot summer (2012). *Scientific Reports*, 7.

Ganho, N. (1999). Clima urbano e a climatologia urbana, fundamentos e aplicação ao ordenamento urbano. *Cadernos de Geografia*, 18, 97-127.

Gartland, L. M. (2011). Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas. *Oficina de Textos*.

Givoni, B. (1998). *Climate Considerations in Building and Urban Design*. Canadá: John Wiley & Sons.

Gonçalves, Artur; Ribeiro, A.C.; Maia, Filipe; Feliciano, Manuel (2014). Clima urbano de Bragança. *Relatório do Projeto "BIOURB"/POCTEP-UE*

Gonçalves, H., Panão, M. O., Camelo, S., Ramalho, A., Graça, J. M., & Aguiar, R. (2004). *Ambiente construído, clima urbano, utilização racional de energia*. Lisboa.

He, Y., De Wekker, S. F. J., & Fuentes, J. D. (2011). *Coupled land–atmosphere modeling of the effects of shrub encroachment on nighttime temperatures*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(12), 1693–1699.

Hernández Aja, A., Fariña Tojo, J., Gálvez Huerta, M. Á., Fernández Áñez, V., Gonçalves, A., Ribeiro, A., & Feliciano, M. (2013). *Manual de desenho bioclimático urbano: Manual de orientações para a elaboração de normas urbanísticas*.

Howard, L. (1833). *The Climate of London* (2ª ed., Vols. 1–3). Londres: W. Phillips.

IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Jentsch, P. V. (2002). *A temperatura como indicador essencial das condições térmicas ambientais: Implicações para a identificação de características regionais fora das condições de conforto*.

Kanda, M. (2006). *Progress in the scale modeling of urban climate: Review*. *Theoretical Applied Climatology*, 84, 23–33.

Köppen, W. (1936). *Das geographische System de Klimate*. *Handbuch der Klimatologie*.

Landsberg, H. E. (1981). *The urban climate*. *Academic Press*.

Lima, G. N. (2013). A temática da Paisagem nas pesquisas de climatologia. Uma análise baseada no Geossistema. *In 14º Encontro de geógrafos da América Latina*. Perú.

Lopes, A. (2006). O sobreaquecimento das cidades: Causas e medidas para a mitigação da ilha de calor de Lisboa. *Territorium, (15)*, 39-52.

Lucena, A. J. de. (2013). *Notas Conceituais e Metodológicas em Clima Urbano e Ilhas de Calor (2)*. 2, Artigo 2.

Manley, G. (1958). On the frequency of snowfall in metropolitan England. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 84*, 70–72.

Mascaró, J., Urbano, D., & de Urbanização, C. (1987). Brasília: MHU. SAM.

Meng, W., Zhang, Y., Li, J., Lin, W., Dai, G., & Li, H. (2011). *Application of WRF/UCM in the simulation of a heat wave event and urban heat island around Guangzhou*. Journal of Tropical Meteorology.

Menezes, G. d. O. (2017). *Análise do clima urbano da cidade de Bragança (2012-2016): estudo da ilha de calor* (Dissertação). Instituto Politécnico de Bragança. Bragança, Portugal.

Meili, N., Manoli, G., Burlando, P., & Carmeliet, J. (2021). Tree effects on urban microclimate: Diurnal, seasonal, and climatic temperature differences explained by separating radiation, evapotranspiration, and shading effects. *Urban Forestry & Urban Greening*.

Minella, F. C. O., Rossi, F. A., & Krüger, E. L. (2011). Análise do efeito diurno do fator de visão do céu no microclima e nos níveis de conforto térmico em ruas de pedestres em Curitiba. *Ambiente Construído, 11(1)*, 123-143.

Mohajerani, A., Bakaric, J., & Jeffrey-Bailey, T. (2017). The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete.. *Journal of environmental management*, 197, 522-538.

Monteiro, C. A. F., & Mendonça, F. (Orgs.). (2003). *Clima Urbano. São Paulo: Contexto.*

Monteiro, V. S. (2018). Zonas climáticas locais e a relação com a morfologia urbana: estudo de caso: Campinas/SP.

Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2021). Correlação de Pearson. In *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros (7ª ed., Cap. 11)*. LTC.

Nóbrega, R. S., Santos, P. F. C., & Moreira, E. B. M. (2016). Morfologia urbana e ilhas de calor na cidade do Recife/PE: distribuição espacial e intensidade. *Revista de Geografia*, 33(4).

Oliver, J. F., & Fairbridge, R. W. (1987). *Encyclopedia of Climatology*. New York: V. N. Reinhold.

Oke, T. R. (1981). *Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations*. *Journal of Climatology*, 1(1-4), 237-254.

Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates*. Routledge.

Oke, T. R. (2002). *Boundary layer climates*. Routledge.

Oke, T. R. (2006). Towards better scientific communication in urban climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 84(1-3), 179-190.

Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press.

Park, T., Lee, C., Chang, M., & Park, D. (2022). Regional characteristics of hot days and tropical nights in the Honam area, South Korea. *Atmospheric Science Letters*, 23.

Pécora, J. D., & Silva, R. G. (2005). *Unidades Métricas Correlacionadas à Temperatura*.

Qin, Y. (2015). A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 445–459.

Romero, M. A. B. (2001). Princípios Bioclimáticos para o Desenho Urbano. *ProEditores Associados*.

Roth, M. (2007). *Review of urban climate research in (sub) tropical regions*. *International Journal of Climatology*, 27, 1859–1873.

Silva, F. T., & de Alvarez, C. E. (2015). A correlação entre variáveis climáticas em diferentes configurações urbanas. *EURO Elecs*.

Silva, M. C., & Ferreira, C. C. M. (2020). Análise das temperaturas máximas e mínimas a partir da técnica do percentil para o município de Juiz de Fora entre os anos de 1975-2020. *Geociências*, 38(4), 400-415.

Sisterson, D. L., & Dirks, R. A. (1978). *Structure of the daytime urban moisture field*. *Atmospheric Environment*, 12, 1943-1949.

Souza, L. C. L. D., Tente, C. M., Giunta, M. B., & Nakata, C. M. (2010). *Fator de visão do céu e intensidade de ilhas de calor na escala do pedestre*. *Ambiente Construído*, 155-167.

Stewart, I. D. (2011). *A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature*. *International Journal of Climatology*, 31, 200–217.

Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). *Local climate zones for urban temperature studies*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900.

Sun, C. Y., Brazel, A. J., Chow, W. T. L., Hedquist, B. C., Prashad, L. (2009). *Desert heat island study in winter by mobile transect and remote sensing techniques. Theoretical and Applied Climatology*, 98, 323–335.

Taha, H. (1997). *Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. Energy and Buildings*, 25, 99-103.

Taha, H., Sailor, D. J., & Akbari, H. (1992). *High-albedo materials for reducing building cooling energy use.*

Teles, C. M. G. (2013). *Influência climática do Parque da Cidade de Guimarães.*

Vital, C. M. B. (2022). *Tendências recentes do clima e alterações do ambiente térmico nocturno em Portugal continental.* Universidade de Lisboa.

Zhu, Y., & Kensek, K. M. (2024). MITIGATING THE URBAN HEAT ISLAND EFFECT: The Thermal Performance of Shade-Tree Planting in Downtown Los Angeles. *Sustainability*, 16(20), 8768.

Anexo A

A.1

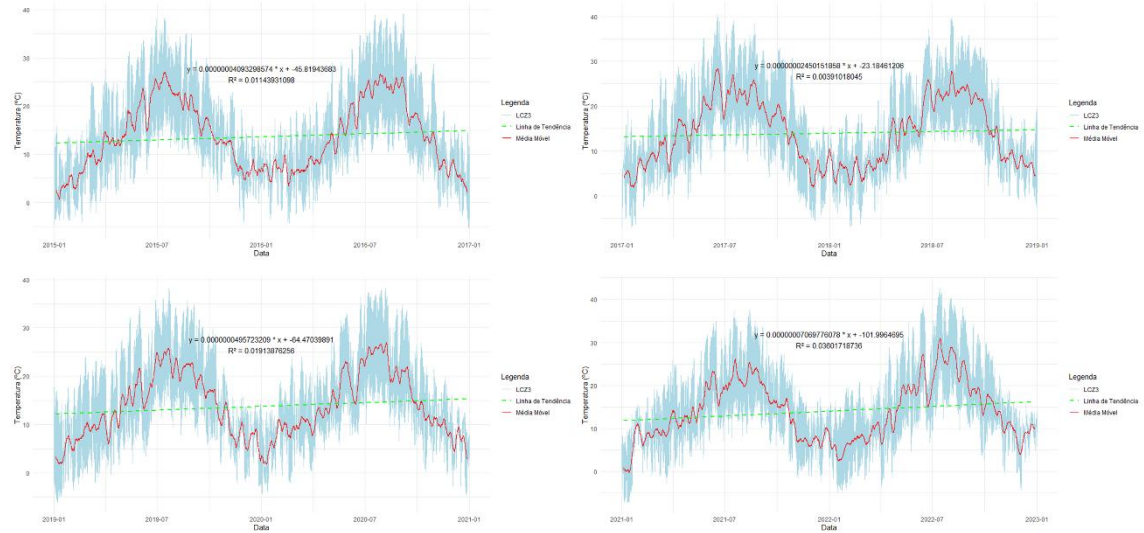


Figura 25 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ 3 (grau 1000).

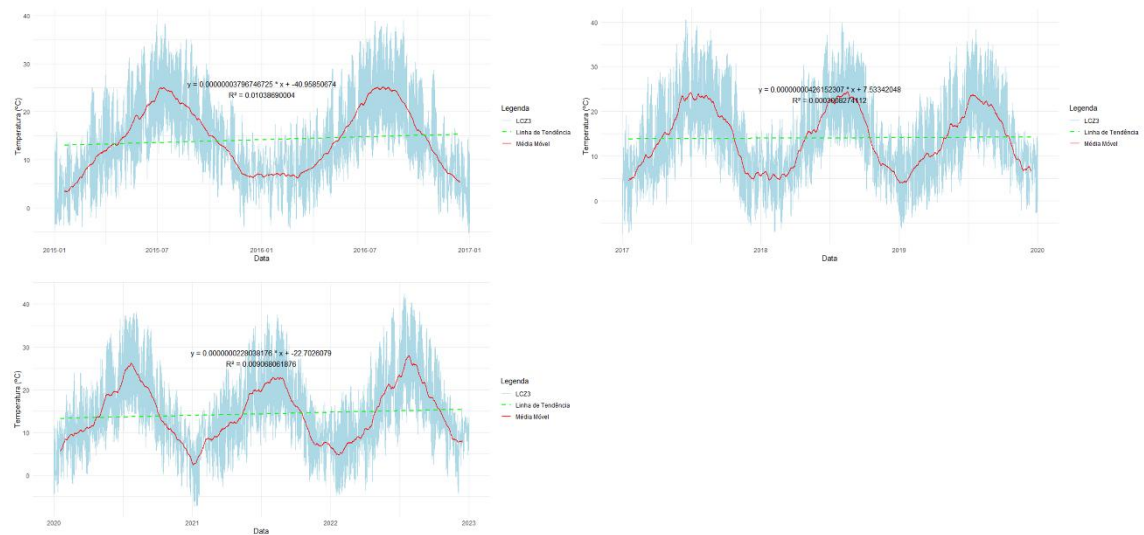


Figura 26 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ 3 (grau 5000).

A.2

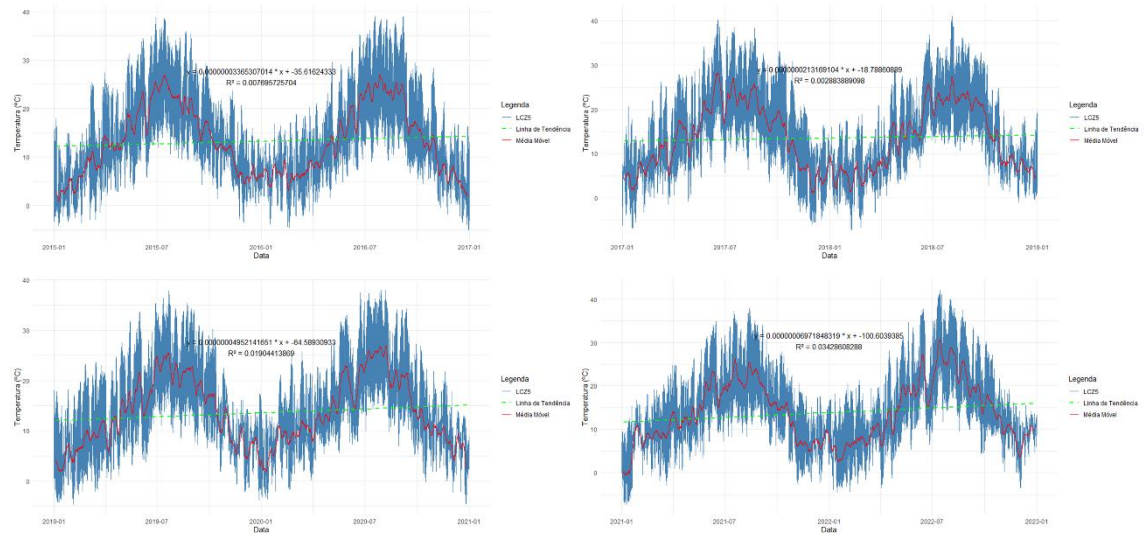


Figura 27 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ 5 (grau 1000).

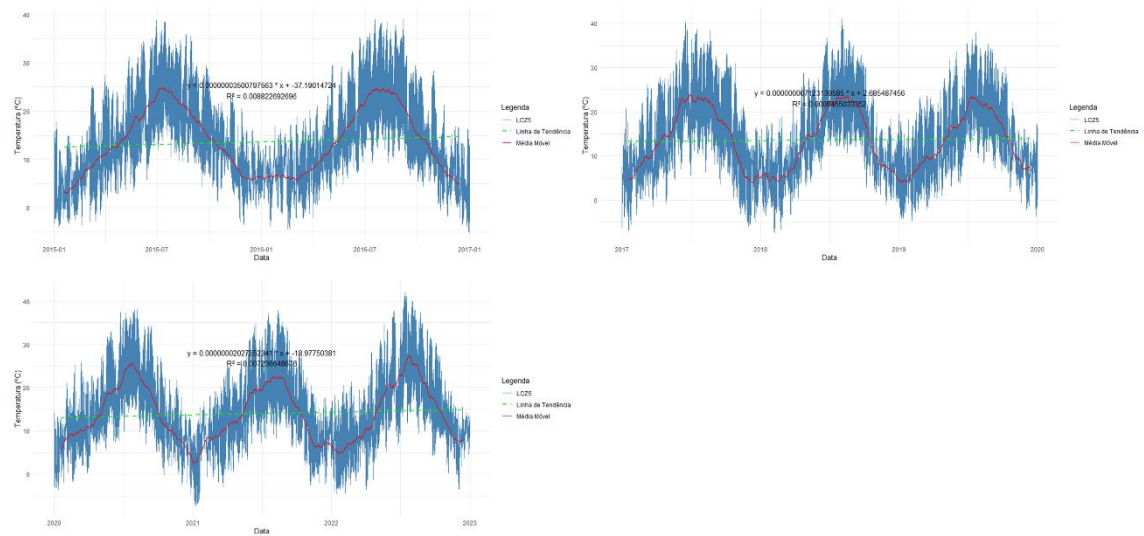


Figura 28 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ 5 (grau 5000).

A.3

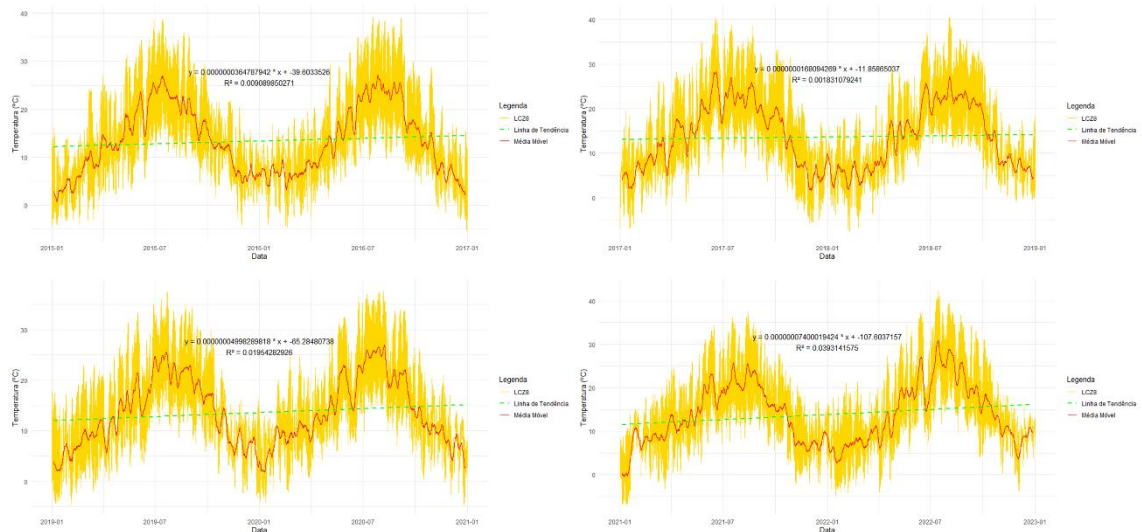


Figura 29 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ 8 (grau 1000).

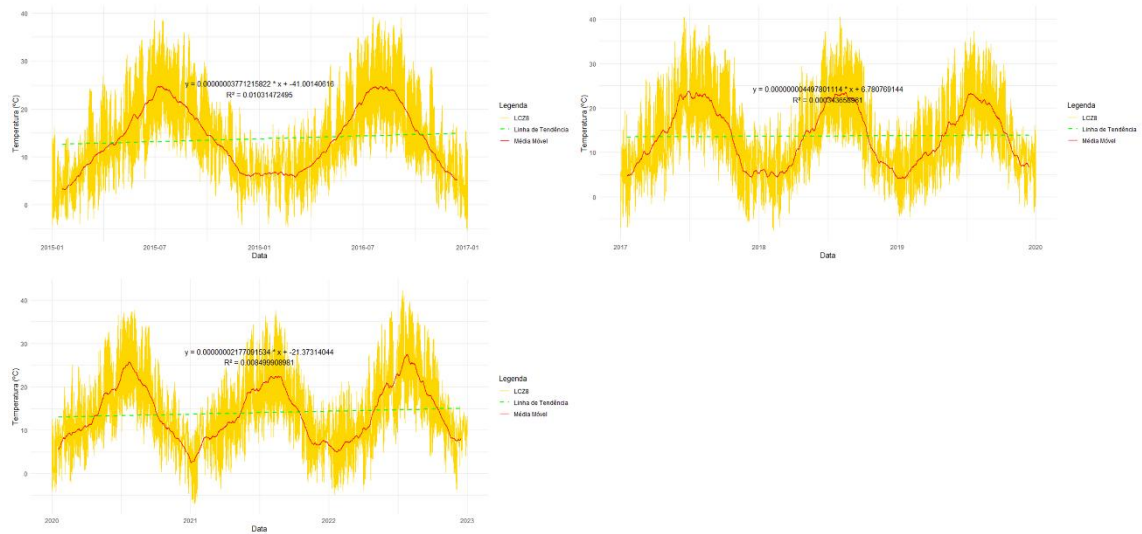


Figura 30 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ 8 (grau 5000).

A.4

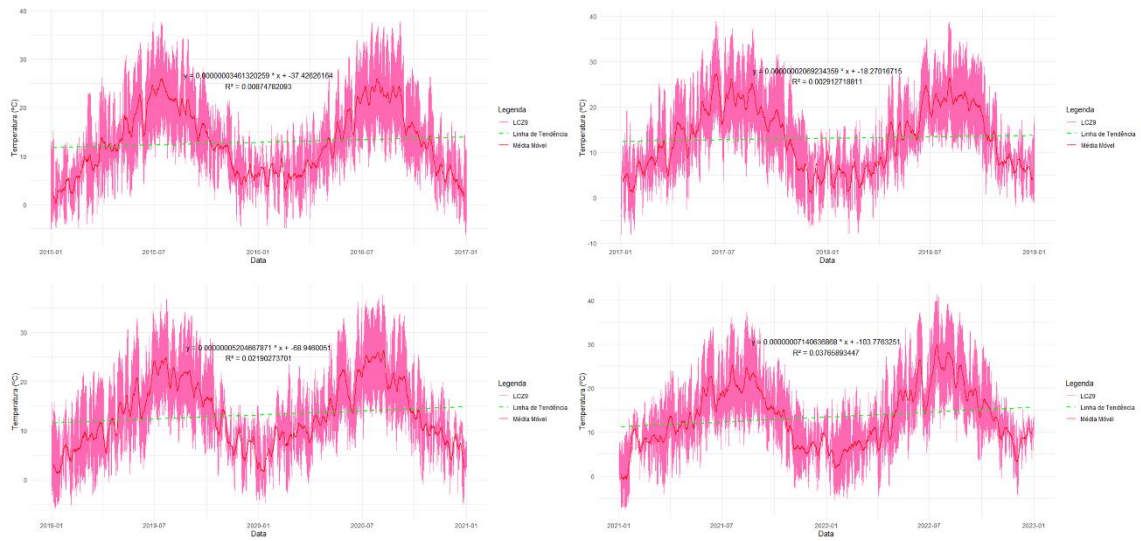


Figura 31 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ 9 (grau 1000).

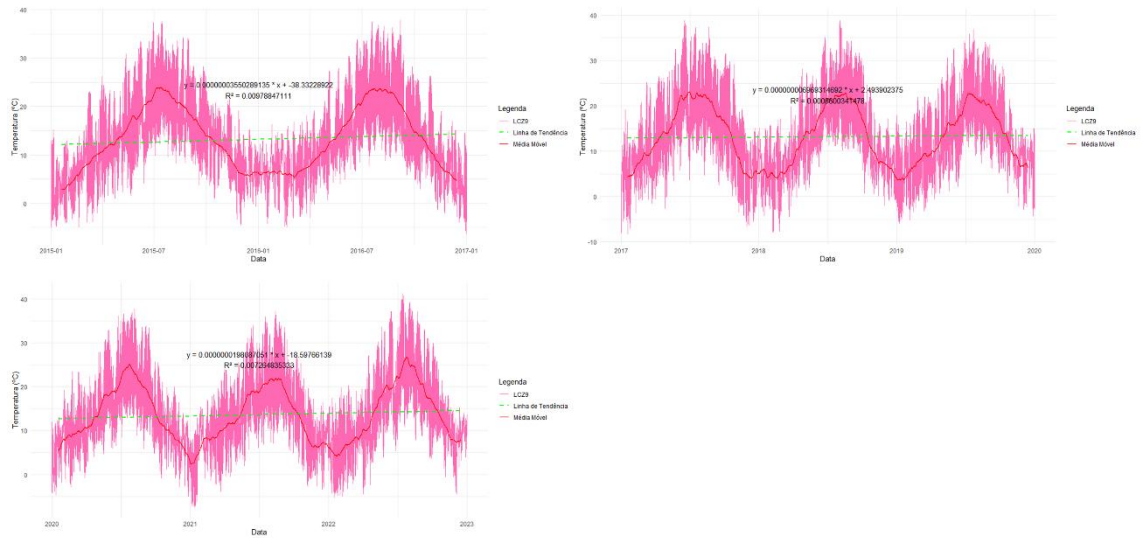


Figura 32 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ 9 (grau 5000).

A.5

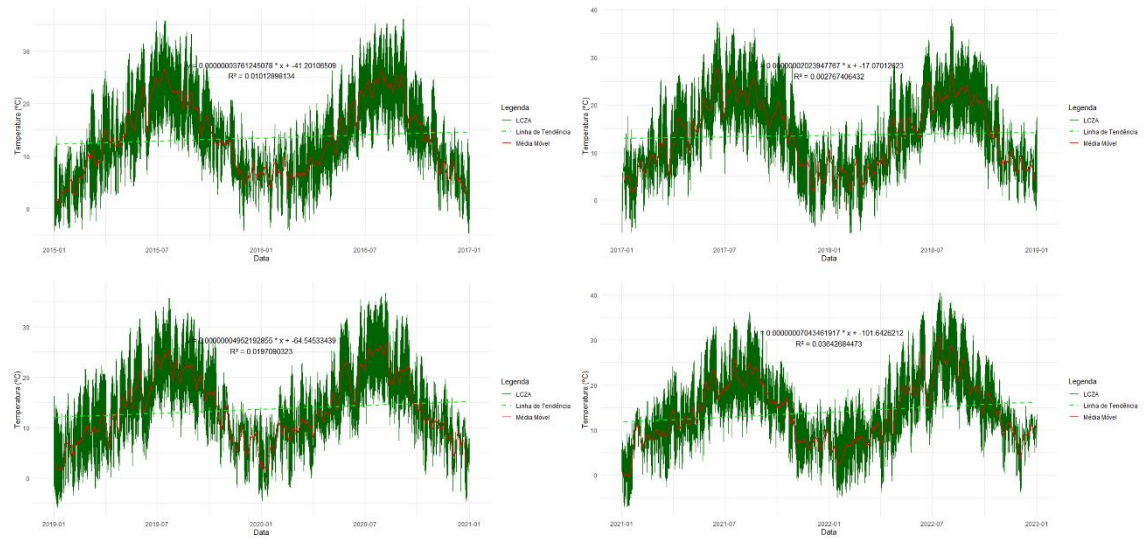


Figura 33 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ A (grau 1000).

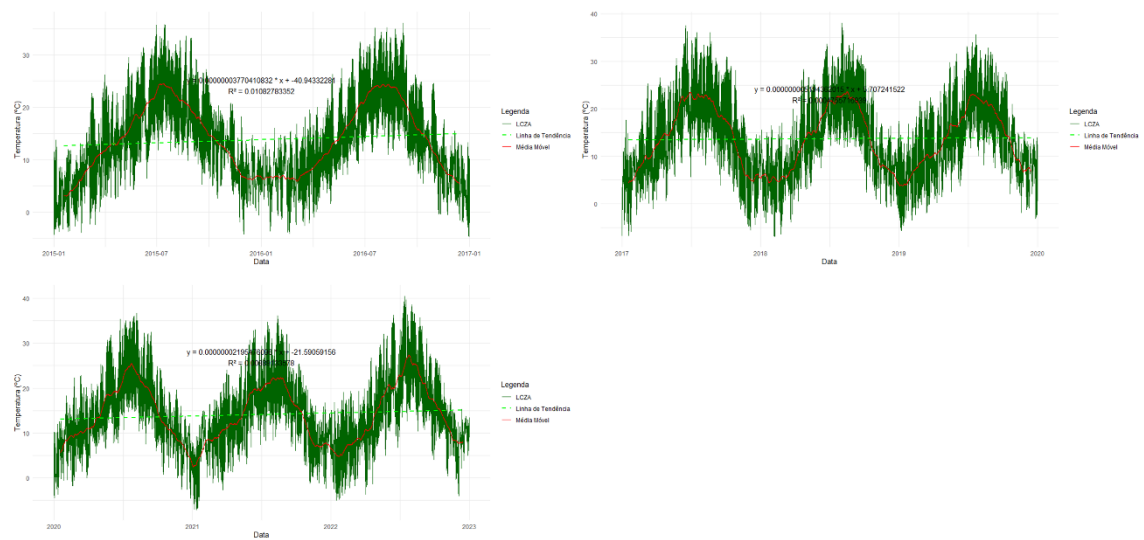


Figura 34 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ A (grau 5000).

A.6

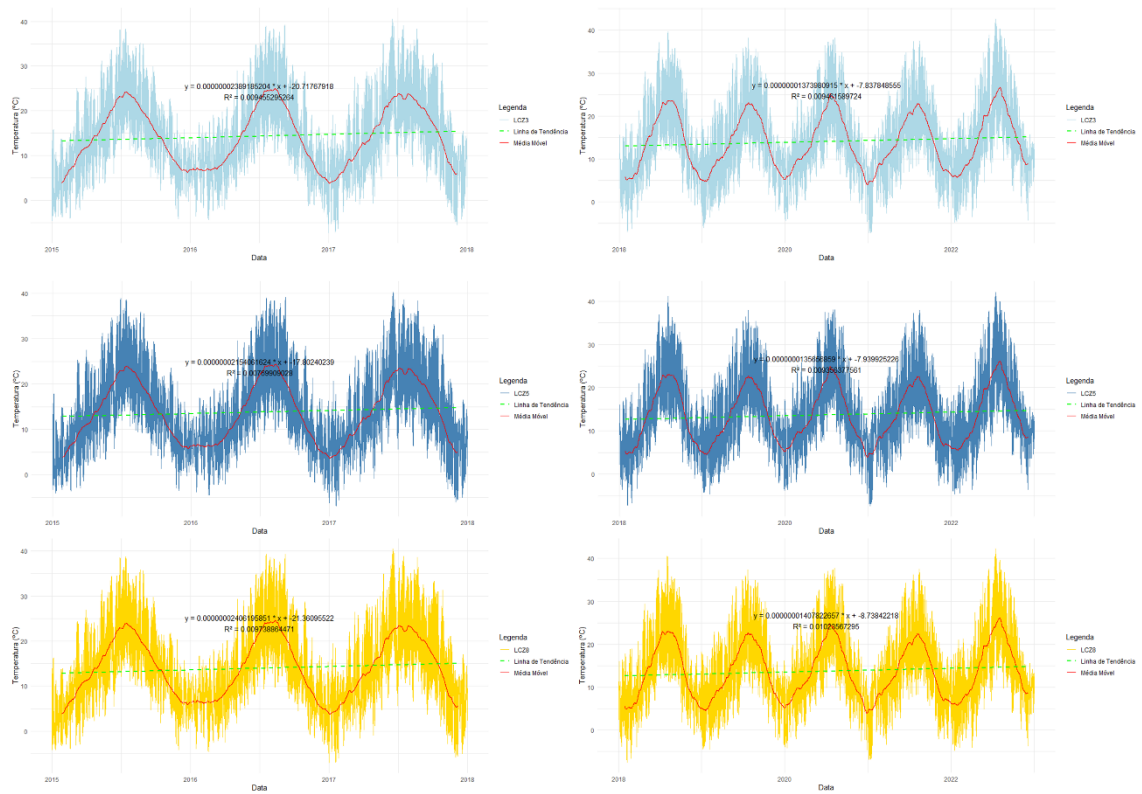


Figura 35 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ 3, LCZ 5 e LCZ 8 (grau 7500).

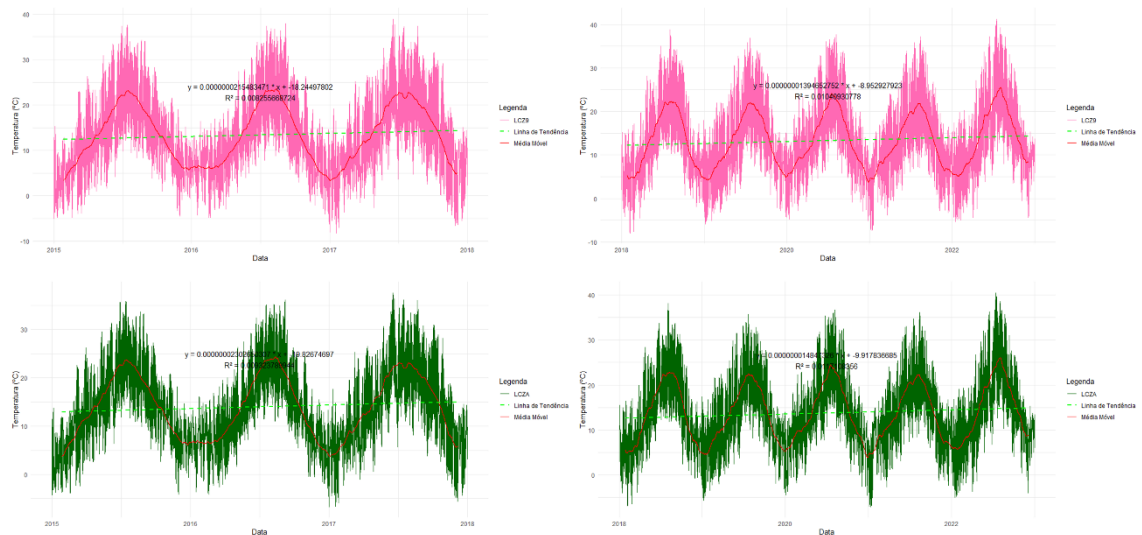


Figura 36 - Média Móvel da Temperatura (°C) LCZ 9 e LCZ A (grau 7500).

Anexo B

B.1

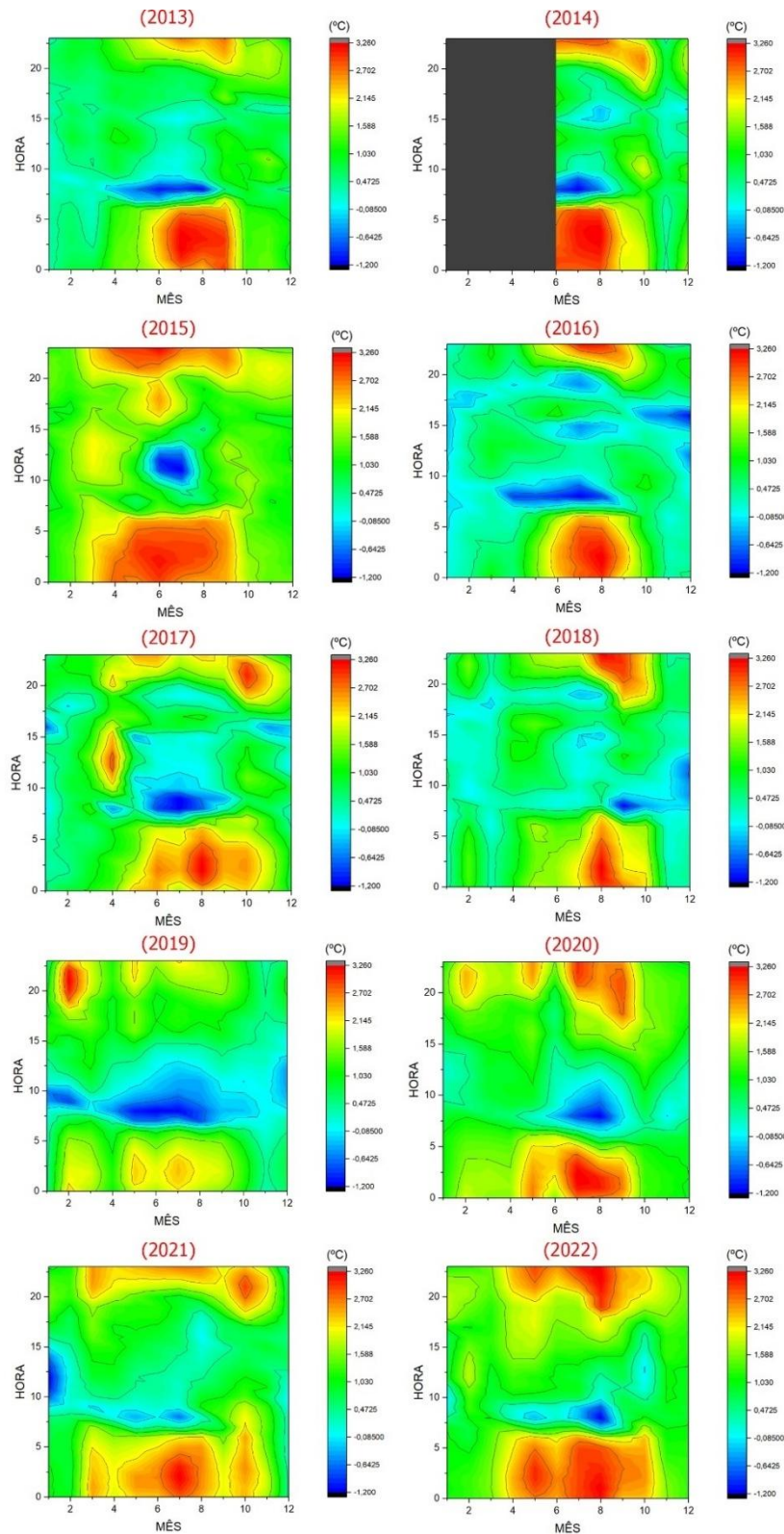


Figura 37 - Variação do comportamento de EICU por ano da ZCL 3 (em °C).

B.2

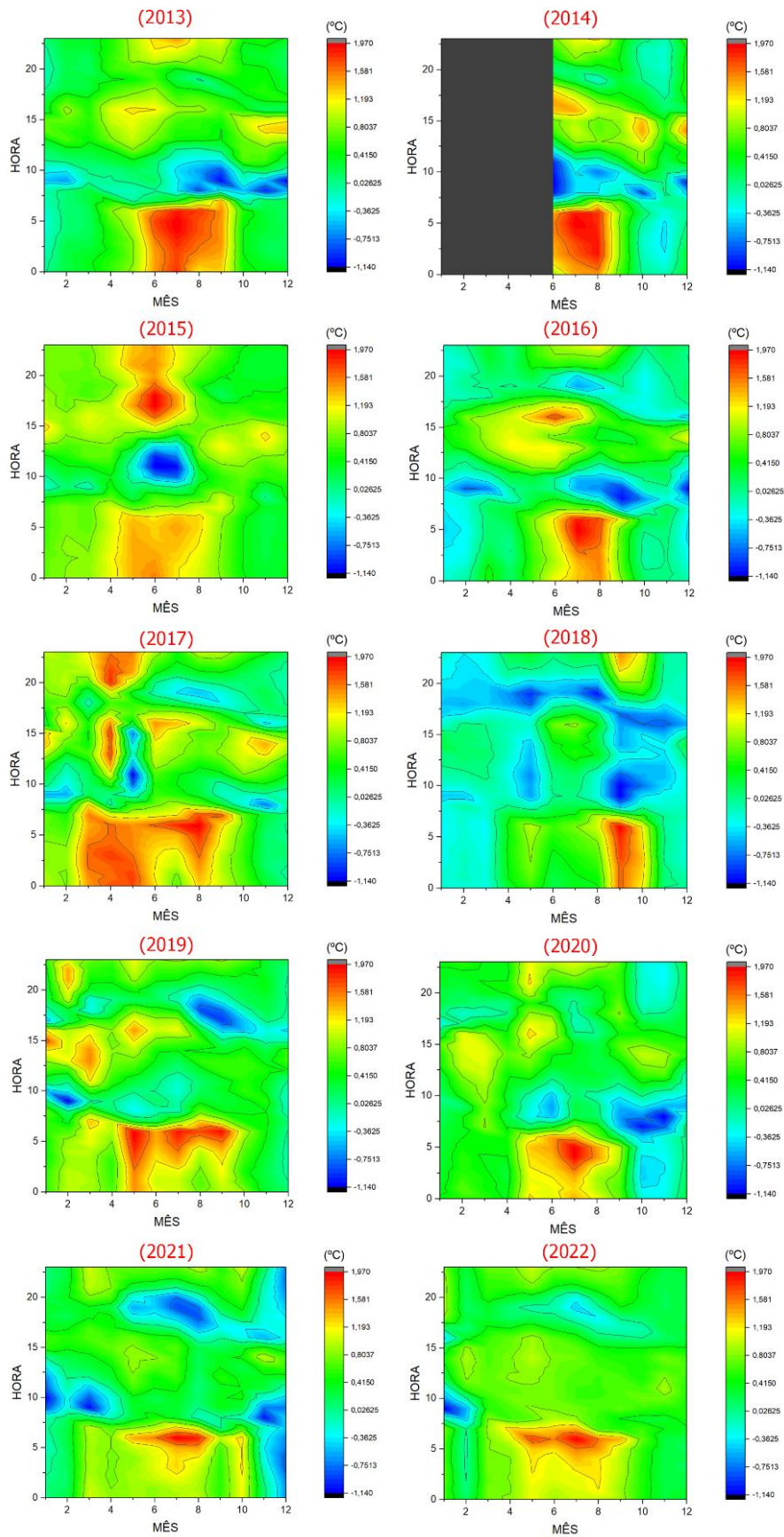


Figura 38 - Variação do comportamento de EICU por ano da ZCL 5 (em °C).

B.3

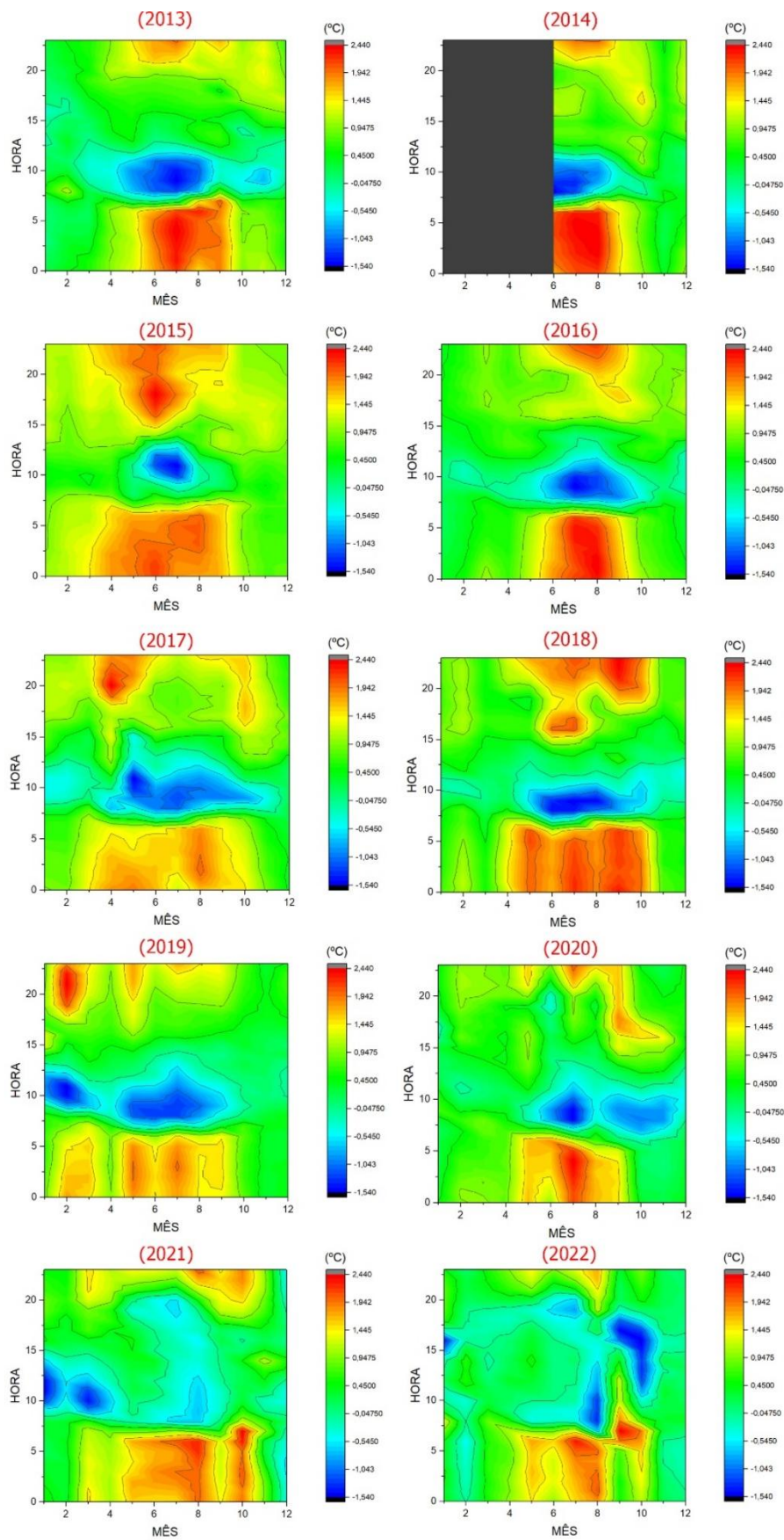


Figura 39 - Variação do comportamento de EICU por ano da ZCL 8 (em °C).

B.4

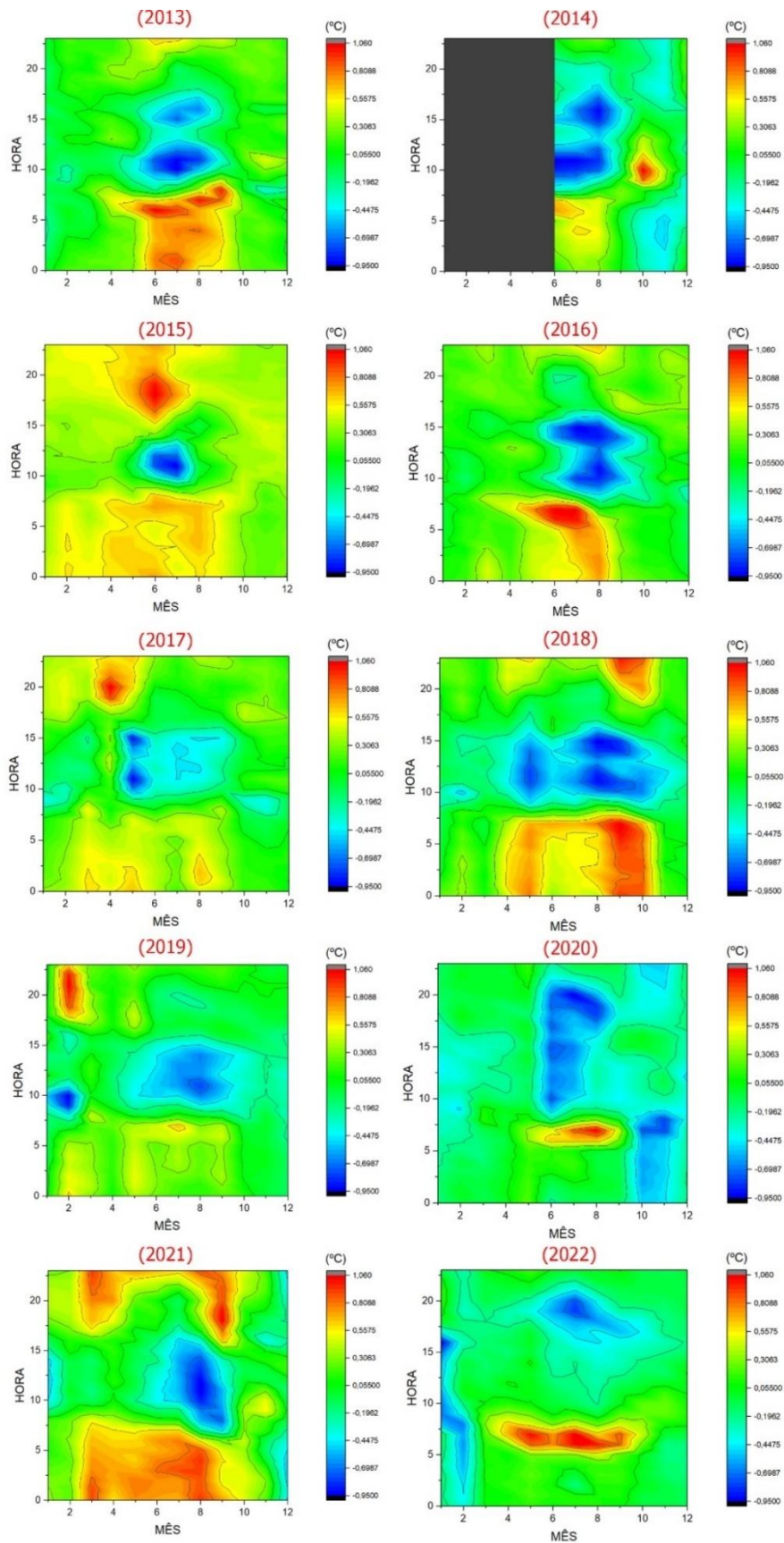


Figura 40 - Variação do comportamento de EICU por ano da ZCL 9 (em °C).

Anexo C

C.1. Modelo de Aplicação (Média Móvel).

```
library(dplyr)
library(ggplot2)
library(lubridate)
library(zoo)
library(readxl)

dados <-
read_excel("C:/Users/Victor/Desktop/Dissertação/Dados
Organizados/Média Móvel/Média Móvel dados.xlsx")

# Converter a coluna de data/hora para POSIXct
dados$`Data completa` <- as.POSIXct(dados$`Data
completa`, format = "%d/%m/%Y %H:%M", tz = "UTC")

# Definir as datas de início e fim para df
data_inicio <- as.POSIXct("01/01/2015 00:00", format =
"%d/%m/%Y %H:%M", tz = "UTC")
data_fim <- as.POSIXct("31/12/2017 23:50", format =
"%d/%m/%Y %H:%M", tz = "UTC")

# Filtrar os dados entre as datas especificadas
df_1p2a <- dados %>%
  filter(`Data completa` >= data_inicio & `Data completa` <=
data_fim)

# Verificar se o Dataframe filtrado não está vazio
if (nrow(df_1p2a) == 0) {
  stop("Nenhum dado encontrado no intervalo de datas
especificado.")
}

# Calcular a média móvel centralizada com janelas de 1000
dados
window_size <- 1000 # Ajuste conforme necessário

df_1p2a$`1000_1p2a_LCZ2` <- rollapply(
  data = df_1p2a$LCZ2,
  width = window_size,
  FUN = mean,
  align = 'center',
  fill = NA
)

# Renomear a coluna 'Data completa' para 'DataCompleta'
para evitar conflitos
df_1p2a <- df_1p2a %>%
  rename(DataCompleta = `Data completa`)

# Verificar se 'LCZ2' existe e é numérico
if (!'LCZ2' %in% colnames(df_1p2a)) {
  stop("A coluna 'LCZ2' não existe em 'df_1p2a'.")
}
if (!is.numeric(df_1p2a$LCZ2)) {
  df_1p2a$LCZ2 <- as.numeric(df_1p2a$LCZ2)
  if (any(is.na(df_1p2a$LCZ2))) {
    warning("Existem valores não numéricos em 'LCZ2' que
foram convertidos para NA.")
  }
}

# Calcular a média móvel
df_1p2a$MediaMovel <- rollapply(
  data = df_1p2a$LCZ2,
  width = window_size,
  FUN = mean,
  align = 'center',
  fill = NA
)

)

# Garantir que 'DataCompleta' esteja em POSIXct
df_1p2a$DataCompleta <-
as.POSIXct(df_1p2a$DataCompleta)

# Criar o modelo linear usando a média móvel
modelo_tendencia <- lm(MediaMovel ~
as.numeric(DataCompleta), data = df_1p2a)

# Extrair os coeficientes da regressão
intercepto <- coef(modelo_tendencia)[1]
slope <- coef(modelo_tendencia)[2]

# Criar a fórmula como string para exibir no gráfico
formula_texto <- paste0("y = ", round(slope, 4), " * x + ",
round(intercepto, 2))

# Determinar as coordenadas para posicionar a fórmula
# Posição no eixo X - data média entre início e fim
posicao_x <- mean(df_1p2a$DataCompleta)
# Posição no eixo Y - um pouco acima do máximo da série
'MediaMovel'
posicao_y <- max(df_1p2a$MediaMovel, na.rm = TRUE) *
1.05

# Plotar Linha de Tendência Linear baseada na Média Móvel
e Gráfico
ggplot(df_1p2a, aes(x = DataCompleta)) +
  geom_line(aes(y = LCZ2, color = 'LCZ2')) +
  geom_line(aes(y = MediaMovel, color = 'Média Móvel')) +
  # Adicionar uma linha de tendência linear com base na
Média Móvel
  geom_smooth(aes(y = MediaMovel, color = 'Linha de
Tendência'), method = 'lm', se = FALSE, linetype = 'dashed')
+
  labs(
    title = "",
    x = 'Data',
    y = 'Temperatura (°C)',
    color = 'Legenda'
  ) +
  scale_color_manual(
    values = c(
      'LCZ2' = 'forestgreen',
      'Média Móvel' = 'red',
      'Linha de Tendência' = 'green'
    )
  ) +
  theme_minimal() +
  theme(
    plot.title = element_text(hjust = 0.5),
    legend.position = "right", # Colocar a legenda no topo
    legend.box = "vertical"
  )

```