



**Análise do Clima Urbano da Cidade de Bragança (2012-2016):  
Estudo da Ilha de Calor.**

Gabriella de Ornelas Menezes

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança para obtenção do  
Grau de Mestre em Tecnologia Ambiental*

Orientada por:  
Artur Jorge de Jesus Gonçalves  
Aulus R. R. Bineli  
António Castro Ribeiro

**Bragança  
2017**





**Gabriella de Ornelas Menezes**

**Análise do Clima Urbano da Cidade de Bragança (2012-2016):  
Estudo da Ilha de Calor.**

**Bragança  
2017**



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ser meu sustento, me dar forças para concluir essa caminhada e por presentear minha vida com pessoas tão especiais. Aos meus pais Alberto e Cristiane e minha irmã Mirella, que sempre demonstraram confiança e parceria, e, mesmo que distante, nunca faltaram com cuidado e afeto, sempre me dando coragem e suporte.

Ao professor e orientador Artur Gonçalves, que sempre com dedicação e paciência foi essencial para a conclusão deste trabalho. Obrigada pelo convívio, compreensão e confiança. Aos meus coorientadores Aulus Bineli e António Castro Ribeiro e aos técnicos superiores do Departamento de Ambiente e Recursos Naturais do Instituto Politécnico de Bragança, Eng. Ângelo Saraiva e Eng. Arsénio Araújo, por toda ajuda prestada.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR e ao Instituto Politécnico de Bragança - IPB, por tornarem essa experiência possível através da parceria no Programa de Dupla Diplomação.

Aos verdadeiros amigos do Brasil, que permaneceram bons amigos apesar da distância, saudade e correrias do dia-a-dia. Especialmente Stephanie Luri Kacuta e Isabela Haiek, sempre presentes na minha vida.

Aos amigos conquistados em Portugal, por ajudarem a superar as dificuldades, por compartilharem bons e maus momentos, tornando essa experiência muito mais leve e gratificante. Em especial: Aline Cavalli, Fabiana Hoffmann, Gabriele Abellonio, Natália Fereguetti e Paula Remor, que me fazem tão bem e cuja presença diária vai fazer muita falta.

A todos, muito obrigada!



## RESUMO

O desenvolvimento urbano interfere nas características do clima local, criando um clima urbano resultante da cobertura de solo, da geometria urbana local e da presença de atividades antrópicas (ex. libertação de calor). Essas alterações no clima das cidades, levam a que, entre outros efeitos, as temperaturas nos espaços urbanos sejam frequentemente mais altas do que no meio rural, resultando no Efeito de Ilha de Calor Urbano (EICU). A Ilha de Calor Urbano é resultado de uma maior inércia térmica nas áreas urbanas que levam ao arrefecimento tardio nessas áreas. Considerando a importância de estudar o clima urbano e especialmente a Ilha de Calor Urbano, esse estudo teve como objetivo caracterizar esse fenômeno na cidade de Bragança (Portugal). Para isso, uma rede de monitorização de 23 sensores complementada com uma estação meteorológica automática foi instalada na área urbana e rural da cidade conforme o conceito de Zona Climática Local, de modo a recolher dados de temperatura, humidade relativa do ar, precipitação, velocidade e direção do vento. Os resultados demonstraram a existência do EICU na cidade em todas as estações do ano, com maior destaque no verão. Nessa estação verificou-se as maiores diferenças entre zonas urbanas e rurais com média de 1,27°C e máximo de 7,57°C. No inverno a intensidade do EICU caiu para média de 0,77°C embora tenha sido registrado valor máximo de 5,28°C. As máximas intensidades foram observadas poucas horas antes do nascer do sol e em condições de vento fraco e baixa precipitação. Observou-se ainda o fenômeno de Ilha de Frio durante o período diurno, ainda mais intenso nas primeiras horas após o nascer do Sol, com valores máximos que chegaram a -5,30°C no verão e -7,35°C no inverno. Os mapas de isolinhas vieram ainda confirmar a ocorrência de maiores temperaturas onde também há maior intensidade do EICU e as menores temperaturas nos pontos mais altos da cidade ou em locais com influência de rio, no período diurno e noturno respectivamente. Portanto, a partir dos resultados encontrados, conclui-se que especial atenção deve ser dada às zonas mais urbanizadas, responsáveis pelas máximas intensidades do EICU, incorporando medidas mitigadoras (ex. superfícies de elevado albedo, presença de vegetação, etc.), para além da preservação dos espaços verdes existentes, uma vez que contribuíram para diminuição da temperatura em épocas mais quentes.

**Palavras-chave: Clima urbano. Ilha de Calor Urbano. Monitorização. Bragança.**



## ABSTRACT

The urban development changes the local climate and creates the so called Urban Climate as a result of ground cover, urban geometry and human activities (ex. releasing heat). Therefore temperatures are frequently higher cause higher in urbanized areas than in rural areas, resulting in the Urban Heat Island Effect (UHI). The UHI is consequence of higher thermal inertia in urban areas resulting in late cooling in these areas. This effect is more intense during the night and as less impact during the day, when it can be replaced by the Urban Cold Island Effect. Considering the importance of studying the urban climate and especially the UHI, this study aimed to characterize this phenomenon in Bragança (Portugal). The monitoring network used in this study includes 23 sensors and an automatic weather station, installed inside the city and in its rural surrounding according to the Local Climate Zone concept, in order to collect data on temperature, relative humidity, precipitation and wind speed and direction. Results demonstrated the existence of the UHI inside the city in all seasons of the year, with more prominence in the summer. In this season, the greatest differences were found between urban and rural areas with an average of  $1.27^{\circ}\text{C}$  and a maximum of  $7.57^{\circ}\text{C}$ . In winter the UHI intensity dropped to an average of  $0.77^{\circ}\text{C}$ , although a maximum value of  $5.28^{\circ}\text{C}$  was recorded. The maximum intensities were observed a few hours before sunrise, in low wind and low precipitation conditions. The phenomenon of Urban Cold Island was identified during the daytime period, being more intense in the first hours after sunrise, with maximum values that reached  $-5.30^{\circ}\text{C}$  in the summer and  $-7.35^{\circ}\text{C}$  in winter. The isolines maps also estimated the occurrence of higher temperatures where there is also a greater intensity of the UHI, corresponding to the more urbanized areas. In addition, lower temperatures were noticed in the highest points of the city and in places with influence of the river. Particular attention should be given to the more urbanized areas, which are responsible for the maximum intensities of the EICU, as attenuation measures should be implemented, and to the preservation the green spaces, as such areas contributed to a decrease in temperature in warmer period.

**Keywords: Urban Climate. Urban Heat Island. Monitoring. Bragança.**



## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. CLIMA URBANO E O ESTUDO DA ILHA DE CALOR.....</b>	<b>3</b>
2.1 CLIMA URBANO .....	3
2.1.1 O Clima e as Áreas de Montanha.....	5
2.1.2 Escalas Climáticas.....	6
2.1.2.1 Escala Horizontal.....	6
2.1.2.2 Escala Vertical.....	7
2.1.3 Balanço Energético.....	9
2.2 ILHA DE CALOR URBANO .....	11
2.2.2 Conforto Térmico.....	14
2.3 MONITORIZAÇÃO CLIMÁTICA .....	16
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>19</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	19
3.2 MONITORIZAÇÃO DO CLIMA URBANO.....	20
3.3 DEFINIÇÃO DOS LOCAIS DE MEDIÇÃO .....	21
3.4 ANÁLISE DOS DADOS.....	25
3.4.1 Avaliação do EICU.....	27
3.4.2 Construção de Mapas de Isolinhas de Temperatura.....	28
3.5 PROPOSTAS DE MELHORIAS .....	28
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>29</b>
4.1 ANÁLISE METEOROLÓGICA.....	29
4.2 ANÁLISE DA INTENSIDADE DO EICU.....	31
4.2.1 Comportamento Diário e Anual do EICU.....	32
4.2.2 Taxas de Aquecimento e Arrefecimento.....	35
4.2.3 Efeito do Vento e da Precipitação na Diminuição do EICU.....	37
4.2.4 Isolinhas de Temperatura.....	39
4.3 MEDIDAS DE MITIGAÇÃO.....	42
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>45</b>
<b>5. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>47</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Elementos do estudo do clima urbano .....	3
Figura 2 - Representação esquemática das escalas local (a) e microescala (b) das áreas urbanas (CEU -camada da estrutura urbana).....	7
Figura 3 - Representação esquemática da mesoescala e das camadas verticais das áreas urbanas (CLP - camada limite planetária; CLU - camada limite urbana; CLR - camada limite rural).....	7
Figura 4 - Perfil típico do Efeito de Ilha de Calor Urbano .....	11
Figura 5 - Fatores atmosféricos com efeito bioclimáticos.....	14
Figura 6 - Enquadramento geográfico de Bragança .....	19
Figura 7 - Sensores de temperatura, humidade, velocidade e direção do vento.....	21
Figura 8 - Metodologia para retirada de fotografia para FVC.....	23
Figura 9 - Localização dos sensores .....	24
Figura 10 - Gradiente vertical de temperatura médio horário para o mês de fevereiro de 2016. ....	27
Figura 11 - Variação mensal de precipitação, velocidade do vento e temperatura para o período de estudo.....	29
Figura 12 - Comportamento das temperaturas para as diferentes zonas climáticas (em °C). .....	30
Figura 13 - Comportamento das temperaturas máximas e mínimas para as diferentes zonas climáticas (em °C) .....	30
Figura 14 - Distribuição dos valores médios horários na diferença de temperaturas entre as zonas climáticas urbanas e rural para as estações do ano (em °C).....	32
Figura 15 - Variação ao longo do dia e do ano para o efeito de EICU nas diferentes ZCLs	33

Figura 16 - Taxa média sazonal de aquecimento e arrefecimento por hora para cada zona climática (°C/h). .....	36
Figura 17 - Valores de intensidade do EICU em função da velocidade do vento e da precipitação.....	38
Figura 18 - Isolinhas das temperaturas médias mínimas do Inverno (em °C).....	39
Figura 19 - Isolinhas das temperaturas médias mínimas do Verão (°C) .....	40
Figura 20 - Isolinhas das temperaturas médias máximas do Inverno (°C).....	41
Figura 21 - Isolinhas das temperaturas médias máximas do Verão (°C) .....	41

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Zonas Climáticas e indicadores de caracterização da morfologia urbana.....	22
Tabela 2 - Características dos pontos .....	25
Tabela 3 - Dados estatísticos sazonais para a intensidade do EICU.....	31

## LISTA DE SIGLAS

<b>EICU</b>	Efeito de Ilha de Calor
<b>FVC</b>	Fator de Visão de Céu
<b>ZCL</b>	Zona Climática Local
<b>ICU</b>	Ilha de Calor Urbano
<b>CEU</b>	Camada de Estrutura Urbana
<b>CLU</b>	Camada Limite Urbana
<b>CLP</b>	Camada Limite Planetária

## LISTA DE ACRÓNIMOS

<b>Q*</b>	Radiação líquida de todas as ondas
<b>Q<sub>f</sub></b>	Liberação de calor de origem antrópica
<b>Q<sub>h</sub></b>	Fluxo de calor latente
<b>Q<sub>e</sub></b>	Fluxo de calor sensível
<b>ΔQ<sub>s</sub></b>	Variação de calor acumulado
<b>ΔQ<sub>a</sub></b>	Advecção de calor líquido
<b>K*</b>	Balanço de radiação de pequeno comprimento de onda
<b>L*</b>	Balanço de radiação de grande comprimento de onda



## 1. INTRODUÇÃO

O incremento da população em áreas urbanas leva à conversão de áreas naturais em espaços urbanos, verificando-se casos que resultam em problemas ambientais devido ao aumento de necessidades básicas de transporte, habitações e empregos, induzindo a um maior consumo de energia, produção de resíduos, de emissões atmosféricas e na libertação de calor de origem antropogénica (Grimmond *et al.*, 2010).

O clima em áreas urbanizadas é caracterizado pela sua transformação por alterações das condições que ocorrem no espaço, pois, como é conhecido, as cidades alteram o clima e apresentam condições meteorológicas singulares. A singularidade do clima urbano resulta da combinação de um conjunto de fatores que, nas cidades, interferem com o clima nas suas componentes.

Entre os fatores mais relevantes, as cidades interferem no balanço térmico e radiativo (Oke, 1987) devido à geometria dos edifícios, das características de superfície, da poluição atmosférica, da emissão de calor dos edifícios, do tráfego e metabolismo dos seres vivos (Oke, 1987; Harman *et al.*, 2004).

O Efeito da Ilha de Calor Urbano (EICU) é o fenómeno mais representativo da influência das cidades no clima (Oke, 1987; He *et al.*, 2007), sendo o responsável por temperaturas mais altas em áreas urbanizadas se comparadas a áreas rurais (Oke, 1987; Rizwan *et al.*, 2008). O resultado são maiores intensidades do EICU em locais mais urbanizados, em que predominam superfícies com menor albedo e baixo Fator de Visão de Céu (FVC) (Oke, 1987; He *et al.*, 2007; Rizwan *et al.*, 2008).

A variação espacial desse efeito faz com que se deva promover estudos que estejam orientados para os diferentes espaços urbanos (Givoni, 1998; Stewart & Oke, 2012), conforme o conceito de Zona Climática Local (ZCL) definido por Oke (2006), uma vez que há a necessidade da compreensão dos fatores locais e uma monitorização continuada baseada em dados meteorológicos.

O presente estudo remete para a continuação dos trabalhos desenvolvidos no Instituto Politécnico de Bragança, centrados no clima local, tendo como referência uma rede de monitorização com 23 sensores de temperatura e humidade relativa do ar, três anemómetros e uma estação meteorológica automática com medição da temperatura e humidade relativa do ar, velocidade e direção do vento e radiação solar.

Com a realização deste trabalho, procurou-se desenvolver estudos de análise do clima urbano com a finalidade de caracterizar padrões de processos climáticos, especialmente o EICU, de modo a identificar e estabelecer relações entre os dados meteorológicos e os dados de caracterização dos locais, tendo em conta que o estudo incidiu sobre dados de 2012 a 2016, com um alcance centrado nos espaços urbanos, periurbanos e rurais próximos da cidade de Bragança.

Para isso, foi acompanhado o funcionamento da rede de monitorização do clima urbano, nomeadamente a recolha de dados e caracterização da envolvente, que permitiram a realização de análises climáticas através de *softwares* específicos, como o *SPSS Statistics* e *ArcGis*.

Este trabalho está organizado em quatro partes: Referencial Teórico, Materiais e Métodos, Resultados e Discussão e Conclusões.

O Referencial Teórico traz uma breve abordagem das principais particularidades do clima urbano, com ênfase nas escalas climáticas e balanço energético, além da abordagem do clima em regiões de montanhas. Além disso, apresenta as características da Ilha de Calor Urbano, assim como sua interferência no conforto térmico e a importância na escolha da rede de monitorização.

Em Materiais e Métodos encontra-se a caracterização da área de estudo, para a seguir, introduzir as informações referentes à rede de monitorização e as maneiras de obtenção e tratamento dos dados, que permitiram a realização das análises climáticas e de Ilha de Calor Urbano (ICU).

No tópico dos Resultados e Discussão avalia-se os resultados obtidos acerca das análises sobre o clima urbano e ilha de calor. No primeiro, foram analisadas as temperaturas médias mensais e sua relação com a precipitação e velocidade do vento, assim como análise das temperaturas em diagrama de caixas, para visualização da amplitude das temperaturas nas diferentes ZCLs estudadas. No segundo, avaliou-se as intensidades de ilha de calor nas diferentes zonas climáticas, assim como seu comportamento ao longo do dia e do ano e em situações de ocorrência de chuva e vento. Finalmente, são apresentados alguns aspetos benéficos na mitigação do EICU.

No último tópico apresentam-se as principais conclusões retiradas de cada um dos tópicos anteriores.

## 2. CLIMA URBANO E O EFEITO DE ILHA DE CALOR

### 2.1 CLIMA URBANO

O desenvolvimento de uma área científica dedicada ao estudo do impacto das cidades no clima local conduziu à definição do Clima Urbano, assumindo-se como uma área multidisciplinar que inclui o estudo de processos meteorológicos, fenómenos atmosféricos e o clima em áreas submetidas a desenvolvimento urbano, sendo um encontro conveniente de meteorologia urbana, climatologia e planeamento/desenho urbano. Nesse campo de estudo, relaciona-se interações entre atmosfera e núcleos urbanos, o que inclui o impacto da atmosfera sobre as pessoas, infraestruturas e atividades nas cidades, além dos efeitos desses espaços na atmosfera (Oke, 2006).

O clima urbano é uma componente do ambiente urbano que resulta da interação entre fatores antrópicos e naturais (Figura 1) (Andrade, 2005), sendo determinado por interações complexas entre a atmosfera, oceanos e continentes que envolvem processos físicos, químicos e biológicos (Molion, 2010) e que influenciam direta e indiretamente no conforto e na saúde dos habitantes, além de afetar o consumo de energia dos edifícios (Alcoforado *et al.*, 2010).

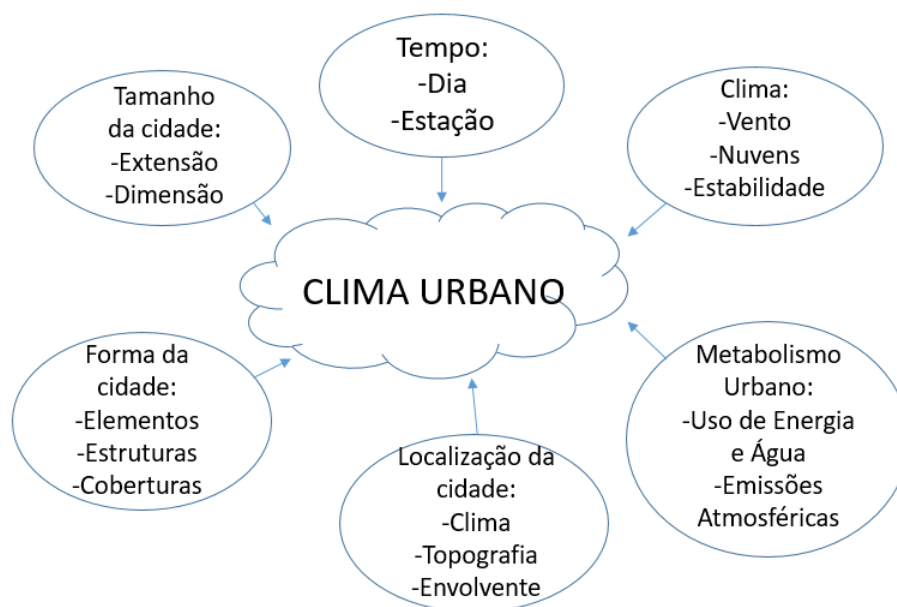


Figura 1- Elementos do estudo do clima urbano (Fonte: Adaptado de Oke, em Voigt, 2007, em Gonçalves *et al.*,2014)

O fenômeno climático é constituído por um conjunto de elementos de naturezas diversas que convivem ao mesmo tempo no mesmo espaço, em regime de trocas energéticas recíprocas e independentes (Ribeiro, 1993) e resulta das interações que ocorrem na interface multiespectral que altera os balanços de energia devido as modificações de superfícies, materiais e atividades de áreas urbanas e que repercutem no estado da atmosfera, interferindo em variáveis como humidade relativa, temperatura e vento (Oke, 1987; Ribeiro, 1993; He *et al.*, 2007).

A dinâmica dos efeitos do clima parte da radiação solar que aquece a superfície terrestre e de acordo com as características térmicas das superfícies, criam áreas de baixa ou alta pressão. Consequentemente, há circulação diferenciada do ar e diferença de temperaturas. Mesmo com maior quantidade de vapor na atmosfera urbana por conta das atividades antropogénicas, a humidade relativa é menor na cidade quando comparada com áreas rurais devido ao incremento da temperatura urbana, uma vez que o grande número de superfícies impermeabilizadas nessas áreas provoca o escoamento pluvial e reduz o índice de evapotranspiração (Barbirato *et al.*, 2007).

O aumento da precipitação no ambiente urbano quando comparada com os campos é devido principalmente aos movimentos ascendentes do ar sobre a cidade, da turbulência resultante de obstáculos próprios desse ambiente e da nebulosidade urbana, proveniente da presença de partículas na atmosfera da cidade. Nos centros urbanos, a velocidade do vento é mais baixa que nos arredores e o ar tende a mover-se mais devagar próximo ao solo, aumentando sua velocidade com a altura. Além disso, ao chegar na cidade o vento pode mudar sua direção, por conta dos túneis criados por ruas e edifícios, ou ao incidir em edificações perpendiculares à direção original do vento. A diminuição da velocidade do vento é relacionada à rugosidade da superfície edificada, porém a configuração das vias e edifícios pode aumentar a velocidade (Barbirato *et al.*, 2007).

Para compreender os fenômenos climáticos urbanos é preciso considerar ainda as suas escalas espaciais e temporais, analisando os conceitos de microescala, escala local e mesoescala (Andrade, 2005).

### 2.1.1 O Clima e as Áreas de Montanha

A topografia de montanha é resultado tanto de processos tectônicos que elevam a superfície da Terra com a rocha sob ela, quanto de processos erosivos, que dependem, entre outros fatores, do clima. A altitude ocasiona uma série de mudanças definidas nos elementos climáticos dessas áreas. Como exemplo temos os efeitos na temperatura do ar, uma vez que com o aumento da altitude, o ar é menos carregado de partículas que absorvem as radiações solares e as difundem, ocorrendo uma diminuição da temperatura (Barbirato *et al.*, 2007; Barry, 2008).

As montanhas exercem três tipos de efeitos no clima na sua envolvente. Primeiramente, uma modificação dos sistemas meteorológicos sinópticos ou fluxos de ar através de processos dinâmicos e termodinâmicos. Em seguida, há geração recorrente de condições climáticas regionais distintas, envolvendo sistemas induzidos de ventos dinâmicos e térmicos, nebulosidade, regimes de precipitação, etc. O terceiro tipo de efeito de montanha é resultado dos declives e variações da morfologia do terreno. Os dois primeiros aspetos contribuem para moldar o caráter anual do clima de montanha, embora cada um ocorra em tipos particulares de situação sinóptica. Por exemplo, regimes de vento térmico são melhores desenvolvidos em baixos gradientes de pressão e céu limpo (Barry, 2008).

Os climas de montanha são determinados, principalmente, pela sua altitude e relevo, que modificam fortemente as influências da latitude e do mar ou da terra (Barry, 2008). Os contrastes de relevo de montanha resultam num clima composto por uma grande variedade de tipos contraditórios: calor tórrido e seco nas vertentes expostas ao sol, calor sufocante nos vales fechados e frio nesses mesmos vales durante as noites de inverno, nevoeiro e intensa insolação, chuvas torrenciais e grande aridez (Miller, 1982).

As dimensões globais e a orientação da montanha em relação aos ventos dominantes são importantes na análise de processos em larga escala, enquanto o relevo e a forma do terreno são importantes em escala regional. O ângulo de inclinação e a vertente causam uma marcante diferenciação no clima local (Barry, 2008).

A interação entre a topografia montanhosa e o sistema de circulação atmosférica envolve uma ampla gama de escalas da atmosfera e superfície. O sistema de circulação

atmosférica é convencionalmente definido em termos de escalas espaciais e temporais (Barry, 2008).

### 2.1.2 Escalas Climáticas

Para compreender o clima, que tem interferência de diversos fatores e escalas de análise, como o sistema climático urbano, é preciso que se considere o enquadramento à escala global, regional e local, sendo que em uma análise temporal, os fenômenos meteorológicos podem acontecer em questão de segundos ou por um período de dias, semanas ou meses (Marques, 2012).

O clima é largamente determinado, em análise global e regional, pela latitude, continentalidade, dinâmica atmosférica, topografia envolvente e a proximidade de massas de água. Em nível local, o clima pode registrar ainda a interferência das condições topográficas (Andrade, 2005; Grimmond *et al.*, 2010).

#### 2.1.2.1 Escala Horizontal

Em uma análise horizontal, Oke (1987 e 2006) propõe três níveis no contexto urbano: mesoescala, escala local (ou topoclimática) e microescala, cada uma com suas particularidades.

Na microescala (Figura 2b), definida da escala milimétrica até algumas centenas de metros, são analisadas as características climáticas de cada elemento (edifícios, ruas, praças, jardins) que faz parte da morfologia urbana no nível da Camada de Estrutura Urbana (CEU). Desse modo, cada superfície tem o seu próprio microclima, e assim, temperatura e humidade podem variar significativamente em distâncias pequenas ou interferir nos padrões locais de circulação do ar (Oke, 2006).

A escala local (Figura 2a) relaciona-se com as áreas urbanas de morfologia homogênea, com uso de solo, estrutura urbana e topografia semelhantes, e ocorre entre 100 metros até alguns quilômetros. Cada clima local resulta de um mosaico de microclimas que definem as características climáticas de um determinado local (Andrade, 2005; Oke, 2006).

As estações meteorológicas convencionais encontram-se preparadas para monitorizar esta escala (Oke, 2006).

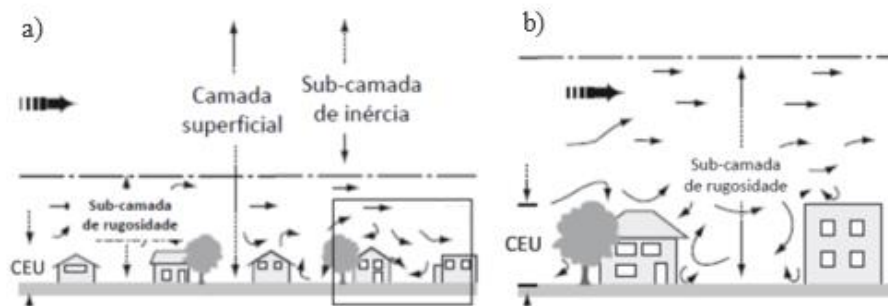


Figura 2 - Representação esquemática das escalas local (a) e microescala (b) das áreas urbanas (CEU -camada da estrutura urbana). (Fonte: Adaptado de WMO, 2007 em Gonçalves et al., 2014)

Na mesoescala (Figura 3), a cidade influencia as características dos elementos climáticos da cidade e das áreas envolventes, podendo compreender uma extensão de até dezenas de quilômetros (de acordo com a dimensão da cidade), e nesse caso, uma única estação meteorológica não é representativa desta escala (Oke, 2006).

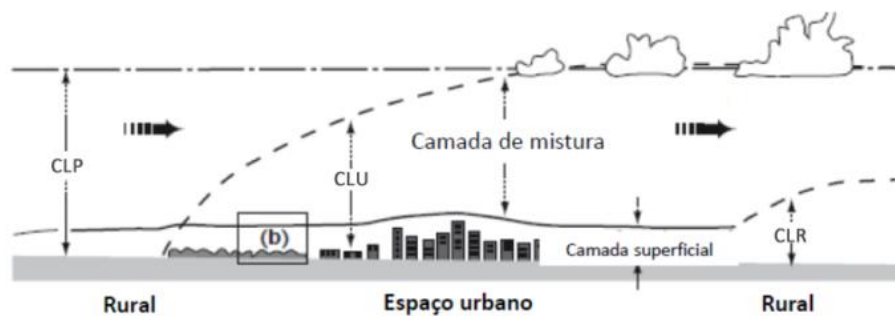


Figura 3 - Representação esquemática da mesoescala e das camadas verticais das áreas urbanas (CLP - camada limite planetária; CLU - camada limite urbana; CLR - camada limite rural). (Fonte: Adaptado de WMO, 2007 em Gonçalves et al., 2014)

### 2.1.2.2 Escala Vertical

A divisão vertical da atmosfera urbana compartilhada por Oke (1984 e 1987) é amplamente utilizada. Essa estrutura vertical apresenta-se em camadas horizontais que são

definidas baseadas em variáveis como pressão, temperatura, densidade, composição química, estado molecular elétrico e magnético (Marques, 2012).

Abaixo da superfície ativa urbana, correspondente ao nível dos telhados de edifícios, o volume de ar entre as construções é designado Camada de Estrutura Urbana - CEU, sendo fortemente influenciada pelas condições envolventes. Acima da superfície ativa urbana encontra-se a Camada Limite Urbana – CLU, que envolve a influência térmica da cidade (Figuras 2 e 3).

Uma diferença essencial entre o clima das áreas urbanas e das áreas rurais é que nas cidades as trocas verticais de energia, calor e humidade ocorrem na CEU, designada canópia urbana (Oke, 2006). A superfície urbana, por conta da sua volumetria, é mais rugosa que áreas rurais, levando a temperaturas mais altas e um ar mais seco, o que faz com que essa camada tenha uma estrutura mais complexa, com uma camada de atrito mais extensa verticalmente (Grimmond & Oke, 2002). Nessa camada, mudanças de vento, temperatura e humidade do ar podem ocorrer em locais próximos, por conta de diferentes traçados e larguras de redes viárias, tipos de solos, materiais de construção e alturas/orientações de edifícios, formando uma rede microclimas diferentes (Oke, 1987).

A CLU é um conceito de escala local ou mesoescala, que se refere à porção da camada limite planetária em que as características são afetadas pela presença de área urbana em seu limite inferior, como a elevada rugosidade, o uso de materiais artificiais em construções e pela impermeabilização das superfícies naturais (Oke, 1976 e 1987). Essa camada inclui desde o nível médio dos telhados até a zona de influencia da cidade na atmosfera, sendo ainda mais intensa em locais com maior rugosidade, que proporcionam uma aerodinâmica particular (Oke, 1987). Um dos importantes fatores nas propriedades desta camada relaciona-se com o FVC, que corresponde a fração visível do céu. O topo da CLU é normalmente tapado por uma inversão de temperatura (Oke, 1976).

A Camada Limite Planetária (CLP) é a camada em que se sente os efeitos da superfície terrestre através do atrito superficial, da transferência de calor e ainda os desvios na circulação atmosférica provocada pela topografia (Stull, 1988). A estrutura desta camada pode ser modificada através de mudanças antrópicas no território, como as diferenças das características termodinâmicas, aerodinâmicas e radiativas nos espaços urbanos e rurais (Oke, 1976). Esta camada apresenta um ciclo diário bem definido, com entrada de energia e

mistura do ar durante o dia, e pela noite, o arrefecimento do ar superficial diminui a turbulência e conseqüentemente, provoca a diminuição da espessura dessa camada (Stull, 1988).

Depois da CLP até o topo da troposfera, existe a Camada Livre, onde a teoria geostrófica assume relevância, através do balanço entre a força de Coriolis e a força do gradiente de pressão (Oke, 1987).

O ciclo diário de espessura e temperatura na CLP e CLU é originado pelas trocas que ocorrem entre a superfície e a atmosfera, e, uma vez que essas trocas dependem da quantidade de radiação líquida que chega a superfície, essa dependência é caracterizada pelo balanço energético na superfície (Stull, 1988).

### 2.1.3 Balanço Energético

Segundo Oke (1987), o processo de urbanização produz mudanças radicais na natureza da superfície e nas propriedades atmosféricas do contexto de inserção. Isso envolve a transformação da radiação, temperatura, teor de humidade e características aerodinâmicas, deslocando assim os balanços solares e hidrológico.

O balanço energético à superfície terrestre é associado à radiação líquida que chega até ela. O ciclo diário de aquecimento e arrefecimento do planeta é devido à radiação solar. A radiação, por sua vez, é uma perturbação ondulatória eletromagnética caracterizada por um comprimento de onda ( $\lambda$ ) que se propaga à velocidade da luz (Miranda, 2001 em Maia, 2013). Os processos radiativos atmosféricos envolvem um amplo conjunto de comprimentos e frequências de ondas, sendo cada um deles relacionados com uma determinada energia. A radiação observada entre 0,15 $\mu\text{m}$  e 3,0 $\mu\text{m}$  é dada como onda de pequeno comprimento e entre 3,0 $\mu\text{m}$  e 100 $\mu\text{m}$  considera-se radiação de grande comprimento de onda (Oke, 1987).

A radiação solar incidente na superfície terrestre é classificada como de pequeno comprimento de onda, enquanto a radiação emitida pela Terra é associada a grandes comprimentos de onda. Pequenos comprimentos de onda são predominantes em período diurno e sofrem atenuações até atingir a superfície terrestre através de transmissão,

absorção e reflexão, associados a fração de nuvens e das propriedades radiativas dos gases e partículas que constituem a atmosfera (Oke, 1987).

A superfície recebe ondas de pequeno comprimento provenientes da radiação solar e de grande comprimento emitidas pelas nuvens e pela atmosfera. A radiação absorvida aquece a superfície e é refletida em ondas de grande comprimento. A quantidade de radiação absorvida e refletida depende das propriedades de absorvidade e emissividade dos materiais (Oke, 1987).

Este processo de geração e acumulação de calor em ambiente urbano pode ser descrito pela Equação 1 (Oke, 1987):

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{Equação 1})$$

em que:  $Q^*$  é a radiação líquida de todas as ondas;  $Q_F$  é a liberação de calor de origem antrópica;  $Q_H$  é o fluxo de calor latente;  $Q_E$  é o fluxo de calor sensível;  $\Delta Q_S$  é a variação do calor acumulado;  $\Delta Q_A$  é a advecção do calor líquido.

O fluxo de calor sensível é relacionado ao aquecimento da atmosfera pela superfície enquanto o fluxo de calor latente representa a quantidade da radiação líquida dos processos de evaporação, sublimação e de fusão do gelo, que resulta em arrefecimento do ar (Oke, 1988).

A radiação líquida ( $Q^*$ ), por sua vez, é dada pela Equação 2:

$$Q^* = K^* + L^* \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo  $K^*$  o balanço de radiação de pequeno comprimento de onda (diferença entre a radiação solar global de pequeno comprimento e a radiação solar refletida de pequeno comprimento de onda) e  $L^*$  o balanço de radiação de grande comprimento de onda (diferença entre a radiação emitida pela atmosfera e a radiação emitida pela superfície).

Alguns estudos relatam uma redução dos fluxos de pequeno comprimento de onda que chegam à atmosfera urbana, principalmente em áreas com alta atividade industrial. Um exemplo foi relatado por Stanhil & Kalma (1995 em Arnfield, 2003) na cidade de Hong Kong, com registro da diminuição dessa radiação em 33% em um período de 35 anos.

Os principais aspectos contrastantes entre ambientes urbanos e rurais são causados pelas diferenças no balanço energético, que se traduzem na ocorrência do efeito de Ilha de Calor Urbano.

## 2.2 ILHA DE CALOR URBANO

Um dos fenômenos mais observados nas cidades é a temperatura mais alta no espaço urbano quando comparado com seu entorno (Figura 4); conhecido como Efeito de Ilha de Calor Urbano (Oke, 1987; Wong & Yu, 2005; He *et al.*, 2007; Rizwan *et al.*, 2008), é o fenômeno mais representativo das modificações dos elementos climáticos (Oke, 1987; He *et al.*, 2007), sendo uma consequência das modificações na cobertura do solo e na composição da atmosfera devido ao desenvolvimento urbano e às atividades antrópicas nas cidades (Oke, 1973; Alcoforado *et al.*, 2005).

As diferenças registradas entre o ambiente urbano e rural são definidas pela intensidade do EICU (Oke, 1987).

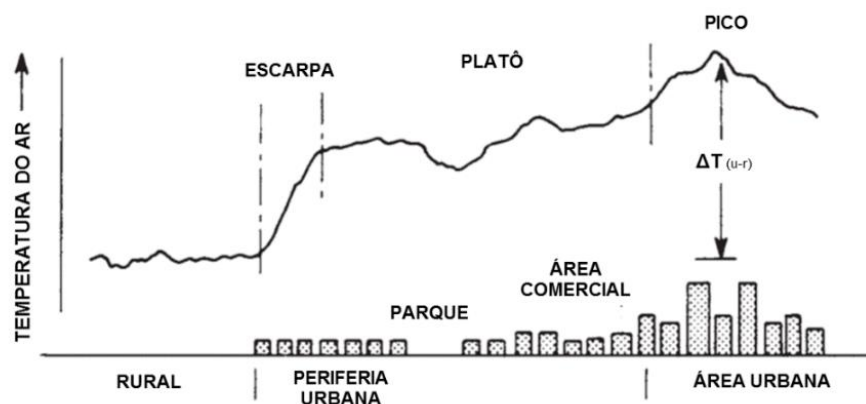


Figura 4 - Perfil típico do Efeito de Ilha de Calor Urbano (Fonte: Adaptado de Oke, 1987)

Os fatores de influência da Ilha de Calor podem ser considerados controláveis e incontroláveis, e são categorizados como variáveis temporárias, permanentes ou de efeito cíclico. Entre as temporárias encontram-se, por exemplo, a velocidade do ar e cobertura de nuvens; entre as permanentes estão as áreas verdes, o material de construção e o FVC e de efeito cíclico, as radiações solares e fontes de calor antropogênicas (Rizwan *et al.*, 2008).

O uso de materiais de construção e a diminuição do FVC fazem com que a radiação solar seja armazenada como energia térmica e depois gradualmente emitida (Rizwan *et al.*, 2008). O FVC corresponde à medida mais apropriada para a geometria de radiação, uma vez que representa a fração de céu disponível para trocas de calor (Oke, 1981; Minella *et al.*, 2011).

Diferentes valores de FVC significam diferentes balanços de radiação e, como consequência, diferentes armazenamentos de energia. Locais com FVC mais elevados, em condições de céu claro, recebem radiação de pequeno comprimento de onda e emitem radiação de grande comprimento de onda. Já em ambiente mais obstruído, com FVC mais baixo, normalmente recebe menor radiação de pequeno comprimento de onda diretamente, mas pode recebê-la por reflexão de paredes ou outras estruturas e está suscetível a radiações adicionais de ondas longas provenientes destas superfícies, assim pode aquecer-se mais e prolongar o período de emissão a noite (Collischonn, 2015).

Os processos de arrefecimento noturno são induzidos, principalmente, pela radiação de grandes comprimentos de onda. Nas cidades, a configuração de *canyon* urbano desempenha um papel importante na regulação da perda de calor radiativo de grandes comprimentos de onda, que tem saída mais restrita nas áreas urbanas do que nas áreas rurais (Unger, 2004).

A ICU varia ainda com o nível em que se forma: a primeira é de atmosfera urbana inferior, que ocorre entre o nível do solo e o topo dos edifícios, a segunda é de atmosfera urbana superior, que se sobrepõe à primeira e pode estender-se até a atmosfera livre (Oke, 1987).

Para a ilha de calor de atmosfera inferior, que é comumente mais estudada, as principais causas são relacionadas a interferência da estrutura urbana no balanço de energia, sendo descritas a seguir (Oke, 1987; Rizwan *et al.*, 2008):

- Geometria urbana: maior absorção radiativa devido à maior área de absorção e ao albedo reduzido, como resultado das reflexões entre os edifícios motivada pela configuração de *street canyon* e também dos materiais, sendo uma das principais causas de altas temperaturas. Ocorre ainda aumento de radiação de grande comprimento de onda originária da atmosfera poluída e através da emissão dos edifícios em locais com pouco FVC. A obstrução da cúpula celeste juntamente com a

redução da velocidade do vento causada pela alta rugosidade das estruturas urbanas e as características térmicas dos materiais de cobertura levam ainda à diminuição da perda de radiação de grande comprimento de onda, ocasionando elevado armazenamento de calor nas estruturas de construção.

- Poluição do ar: os poluentes do ar, em especial os aerossóis, podem absorver e refletir a radiação de grande comprimento de onda, produzindo um efeito de pseudo-estufa.
- Emissão de calor por parte de edifícios, tráfego e metabolismo dos organismos vivos: através do aumento da entrada de energia em áreas urbanas.
- Materiais de construção e de cobertura do solo: armazenam o calor sensível devido às características térmicas dos materiais, à redução da evapotranspiração e às transferências de fluxo turbulento de calor latente motivado pela redução de áreas verdes e pelo aumento de superfícies impermeabilizadas.

Além desses fatores, a inércia térmica superior em ambientes urbanos representa um importante fator para estudo do EICU, uma vez que descreve a capacidade de um material em transportar e acumular calor. Usa-se esse indicador para medir a capacidade do solo em armazenar calor durante o dia e liberar calor a noite (Yannas & Maldonado, 1995 em Papst, 1999). A inércia térmica e as diferentes interações no balanço radiativo são responsáveis pelas taxas de aquecimento e arrefecimento e permitem perceber os comportamentos registados em diferentes ambientes, uma vez que as condições térmicas diferem entre as áreas urbanas e rurais. Ao fim do dia a temperatura decresce mais rapidamente em meio rural devido ao intenso arrefecimento radiativo e em áreas urbanas o aquecimento é mais lento depois do nascer do sol (Lopes, 2006).

Alguns fatores naturais são responsáveis por interferências no comportamento expectável do EICU. O vento apresenta-se como um fator de amenização de contrastes térmicos entre zonas urbanas e rurais, de maneira que o aumento da turbulência e as trocas de energia por advecção suavizam esses contrastes (Oke, 1987). Além do vento, em condições de precipitação, o calor armazenado nas superfícies urbanas é normalmente reduzido pela diminuição de radiação de pequeno comprimento de onda, assim como pela evaporação da água da chuva capturada em superfícies urbanas. O arrefecimento radiativo noturno, por sua vez, é limitado por nuvens e humidade elevada, sendo que a maior

humidade nas zonas rurais aumenta a entrada térmica e reduz, então, a diferença de admissão térmica entre áreas urbanas e rurais (Arnfield, 2003; Lee & Baik, 2010).

Desse modo, as trocas de energia turbulenta e radiativa afetadas pela velocidade do vento e nebulosidade são consideradas fatores importantes que afetam a Ilha de Calor (Lee & Baik, 2010).

### 2.2.2 Conforto Térmico

A saúde e o bem-estar humanos podem ser afetados pelo clima urbano, com influência em diversos fatores, demonstrados na Figura 5, sendo aspectos considerados de conforto e de risco (Andrade, 2005).

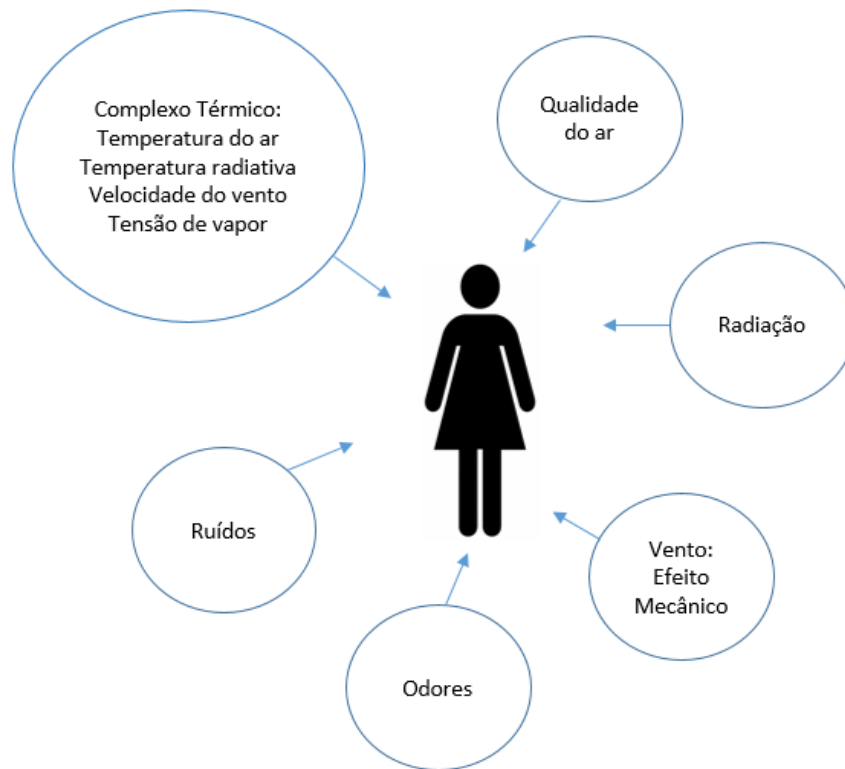


Figura 5 - Fatores atmosféricos com efeito bioclimáticos (Fonte: Adaptado de Andrade, 2005)

O conforto térmico está associado à condição psicológica, pela qual se deve encontrar uma expressão de satisfação com o ambiente térmico, com implicações no uso cotidiano dos espaços exteriores. Do ponto de vista ambiental, é cômodo o ambiente que ofereça condições que permitam a manutenção da temperatura corporal sem que sejam ativados

mecanismos de termorregulação (Nóbrega & Lemos, 2011). Este processo é função das atividades desenvolvidas pela população, da vestimenta e de variáveis ambientais responsáveis pela troca de calor entre o corpo e o ambiente (Barbirato, 2007).

O desconforto causado pelo EICU condiciona a prejuízos econômicos, sociais e de qualidade de vida e pode ser diferente em distintas regiões climáticas assim como durante as estações do ano (Givoni, 1998; Shams *et al.*, 2009).

Os efeitos mais importantes da ICU no conforto humano precisam ser avaliados (Givoni, 1998) e, considerando que o nosso corpo é arrefecido pelos processos de radiação e evaporação, qualquer fator que favoreça algum destes fenômenos contribui para a sensação de menor temperatura (Miller, 1982).

A temperatura marcada no termômetro, por sua vez, nem sempre concorda com a sensação que é produzida no corpo humano. A sensação depende de outras condições atmosféricas, sendo que as mais importantes neste aspecto são o movimento do ar e a humidade (Miller, 1982; Alcoforado *et al.*, 2010; Nóbrega & Lemos, 2011) e é uma condicionante termofisiológica influenciada por fatores psicológicos, culturais e pessoais, como produção metabólica de calor e vestuário (Höppe, 2002; Alcoforado *et al.*, 2010; Nóbrega & Lemos, 2011).

Uma vez que a manifestação da ilha de calor urbano ocorre durante a noite, quando em presença de temperaturas elevadas (superiores a 25°C), pode resultar em dificuldades para descansar, podendo, em casos extremos, acarretar graves problemas de saúde, pois mesmo que se tire todas as roupas, não é possível eliminar o *stress* do calor, principalmente em climas quentes e secos (Givoni, 1998).

Nas áreas externas, as atividades ativas e passivas dos habitantes necessitam de ambientes que sejam confortáveis termicamente, uma vez que a utilização desses espaços se dá em função das condições de conforto oferecida. Nesse contexto, a arborização atua de maneira positiva na mitigação do desconforto térmico, pois, entre outros fatores, controla a temperatura ambiente e propicia o arrefecimento passivo dessas áreas (Shams *et al.*, 2009).

Conclui-se então que a qualidade climática pode ser alcançada se forem considerados parâmetros físicos para o ambiente urbano juntamente com os aspectos ambientais (Shams *et al.*, 2009).

## 2.3 MONITORIZAÇÃO CLIMÁTICA

As observações meteorológicas têm por finalidade registrar as condições meteorológicas locais e a sua evolução, a fim de caracterizar os climas. No intuito de comparar resultados de áreas distintas, sentiu-se a necessidade de definir critérios e procedimento para as redes de estações (Im & AEmet, 2011), uma vez que é primordial selecionar estações de observação representativas para zonas urbanas e rurais pelo fato de a intensidade da Ilha de Calor estimada poder variar com diferentes comparações de estações (Lee & Baik, 2010).

Oke, em 2006, contribuiu para a elaboração do relatório de Instrumentos e Métodos de Observação da Organização Meteorológica Mundial, que constitui um importante referencial metodológico para a disseminação das orientações relativas à observação de elementos meteorológicos nas áreas urbanas. Este tópico apresenta as principais recomendações que constam neste documento.

O primeiro passo, essencial para selecionar locais de estações urbanas, é avaliar a natureza física do terreno, a partir da classificação de zonas climáticas, ou seja, revelar a homogeneidade e heterogeneidade, uma vez que vários tipos de terrenos compreendem a área urbana. Para se construir uma imagem do clima de um local, é preciso várias estações meteorológicas, procurando que os microclimas não interfiram no objetivo de medir o clima local. Uma estação com boas descrições é aquela que permite relacionar as medições com o terreno circundante.

Na escolha das zonas climáticas, é importante optar por áreas com características homogêneas, sem grandes variedades de estruturas, coberturas ou materiais, além de se evitar áreas de transição entre zonas climáticas e locais em que possa existir redensolvimento urbano.

O princípio orientador para a exposição dos sensores na zona climática local é localizá-los para que estes monitorizem as condições representativas do ambiente selecionado e sobre superfícies que, dentro de um raio de microescala, representem o ambiente urbano em escala local.

O uso de sensores para medição de temperatura é apropriado para áreas urbanas, porém deve ser dada uma especial atenção à sua proteção contra radiação e ventilação. Por

isso, devem ser instaladas proteções que boqueiem a radiação de forma eficaz, enquanto permitem a ventilação do sensor. Em estações não-urbanas, é recomendado uma altura do sensor entre 1,25 e 2 metros acima do nível do solo. Esse valor é aceitável também para locais urbanos, mas pode-se alargar para maiores alturas.

Os instrumentos normalmente utilizados para medição de humidade relativa do ar também são aplicáveis em áreas urbanas, sendo que as diretrizes para temperatura se aplicam igualmente para os sensores de humidade.

A orientação do eixo da rua é relevante quando relacionados com os padrões sistemáticos de sombra e sol. Se ocorrer uma monitorização em contínuo, as ruas com orientação norte-sul são favorecidas sobre este-oeste por conta da menor distinção de fase.

A medição de direção e velocidade do vento é sensível quanto à distorção do fluxo por obstáculos, que criam alterações no fluxo médio do vento e na turbulência, como os efeitos de alívio local devido à presença de colinas, vales e falésias, mudanças de rugosidade ou elevação da superfície, perturbação do fluxo ao redor de aglomerados de árvores e edifícios. Diante dessa realidade, os sensores devem ser montados de modo a que o seu sinal não seja comprometido pela sua estrutura e suporte.



### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O presente estudo utiliza uma rede de monitorização meteorológica, constituída de 23 sensores de temperatura e humidade relativa do ar, uma estação meteorológica automática e três sensores de velocidade e direção do vento para o estudo do clima da cidade de Bragança. Localizada no extremo nordeste de Portugal continental (Figura 6), é semi-cercada pela Serra de Montesinho ao Norte e a Oeste pela Serra da Nogueira. A cidade tem altimetria complexa, com variações que atingem de até 200m em curta distância no seu interior.

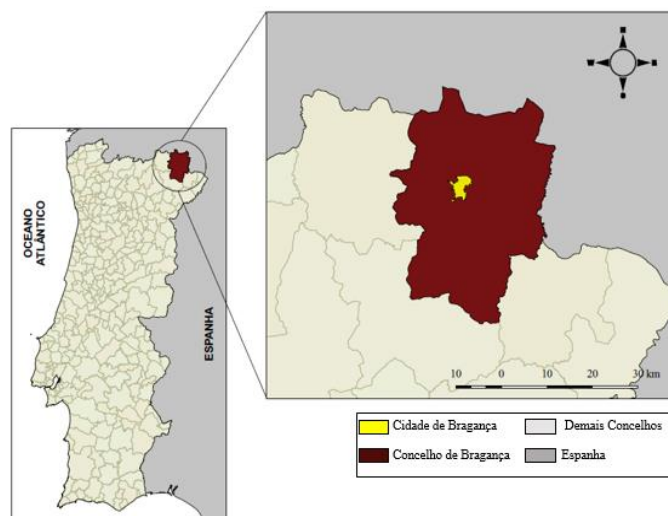


Figura 6 - Enquadramento geográfico de Bragança

Em Bragança, o espaço urbano é marcado pela diversidade de tipologias de construções que inclui bairros de edifícios plurifamiliares, contrastando com grandes espaços de moradias unifamiliares, além de espaços verdes. A envolvente da cidade é marcada pelo uso agrícola e, em menor expressão espacial, pelo uso florestal. A indústria é pouco representativa na cidade e a economia local é sustentada basicamente de instituições de prestação de serviços e pelo comércio.

A localização da cidade é marcada por elevada complexidade orográfica, comum em espaços montanhosos, com grande variação de altitude. A cidade sofre influência dos vales

de dois rios: Fervença, que atravessa a cidade, com maior influência na vida dos residentes e o Sabor, na periferia da cidade.

Até o século XX a cidade teve evolução lenta e compacta, mas a partir daí, registrou-se grande crescimento da população urbana, e, nesse contexto, a cidade expandiu-se sobre o território e adotou uma crescente complexidade nas relações cidade-clima (Gonçalves *et al.*, 2014).

A região está fechada às influências marítimas através do sistema Galaico-Duriense e pelos montes Cantábricos à norte e oeste, do planalto Castelhana-Leonês de oriente e do Planalto Beirão e do Maciço Central a sul. Estas características refletem em um mesoclima com características de influência continental conjugadas com um regime tipicamente mediterrânico (Gonçalves, 1991 em Gonçalves *et al.*, 2014).

A precipitação em Bragança é típica do clima mediterrânico, apresentando uma alta concentração de precipitação na estação fria e escassa precipitação em meses mais quentes. A radiação solar e a insolação apresentam valores máximos em Julho e mínimos em Dezembro, de maneira semelhante à temperatura. As encostas que ficam expostas a sul recebem mais radiação solar quando comparadas com as zonas de planalto e encostas expostas a norte, influenciando os climas locais e microclimas (Gonçalves *et al.*, 2014).

Bragança é caracterizada pelo clima Csb segundo a classificação de Köppen, que corresponde a um clima temperado com invernos suaves (Classe C), verão seco (Subclasse Cs) e verão longo e fresco (Sub-subclasse Cb).

### 3.2 MONITORIZAÇÃO DO CLIMA URBANO

As estações meteorológicas instaladas na rede de monitorização da cidade de Bragança são integradas por instrumentos que medem temperatura, humidade relativa, velocidade e direção do vento. Os sensores de temperatura e humidade do ar são incorporados no mesmo equipamento (modelo TGP-4500, TinyTag, Gemini Data Loggers), que, para proporcionar um nível de segurança adequado, são introduzidos em abrigos de PVC pintados na cor branca para minimizar o aquecimento radiativo, com ventilação natural, a uma altura de 3 metros em relação ao solo (Figura 7).



Figura 7 - Sensores de temperatura, humidade, velocidade e direção do vento

Esses sensores têm capacidade de armazenamento de 32.000 leituras, de medição de temperatura entre  $-25^{\circ}\text{C}$  e  $85^{\circ}\text{C}$  e de humidade relativa de 0 a 100%. Recolhem e registam os dados a cada 10 minutos, momento na qual é gravada a média correspondente, tendo sido depois convertidas em médias horárias. Valores de máximos e mínimos das variáveis também são registados pelos sensores.

Assim como para a humidade e temperatura, a velocidade e direção do vento são medidas em um único aparelho, que contém um anemómetro de copos e um cata-vento (modelo 03002-L, R.M. Young). Os sensores são instalados a 3 metros de altura em relação ao solo.











Os dados analisados neste estudo correspondem ao período entre os anos 2012 e 2016, sendo que algumas das análises foram realizadas por estação sazonal, nomeadamente o Inverno, entre dezembro e fevereiro, a Primavera, entre março e maio, o Verão entre junho e agosto e o Outono entre setembro e novembro.

### 3.3 DEFINIÇÃO DOS LOCAIS DE MEDIÇÃO

Os locais de monitorização foram definidos a partir do conceito de ZCL descrito por Oke (2006), abrangendo seis das sete zonas climáticas locais, excluindo-se a zona de classificação de maior densidade, pela inexistência dessa característica na área estudada, e adicionando-se uma sétima categoria referente às áreas de espaços verdes urbanos. Baseado

nessa metodologia adaptada para a cidade de Bragança, a Tabela 1 apresenta as descrições das ZCLs e os indicadores de caracterização da morfologia urbana.

Tabela 1 - Zonas Climáticas e indicadores de caracterização da morfologia urbana

<b>Descrição ZCL</b>	<b>FVC</b>	<b>Rugosidade</b>	<b>Superfície Artificial (%)</b>
PMA - Edificado moderno de altura média-alta, elevada densidade e superfícies pavimentadas.	0,43 	1,54 – 2,5	94 - 99
BDT – Núcleo antigo da cidade, com edificado de altura média-baixa, elevada densidade, edificado em pedra e tijolo.	0,75 	0,93 – 1,07	88-99
UMR – Média densidade, ruas de habitações de baixa altura em banda ou isoladas.	0,72 	0,74 – 0,76	90 - 99
ZCS – Comercial e industrial, densidade média baixa com edifícios baixos e de elevada envergadura com estacionamento pavimentado.	0,78 	0,82 – 0,99	99
EVU – Espaços verdes urbanos, cobertura predominantemente verde com vegetação rasteira e arbórea.	 0,71  0,42	0,08 – 2,00	2 - 81
TUR – Espaço de transição entre o meio urbano e rural, casas dispersas com envolvente agrícola e florestal.	 0,92  0,90	0,00 – 0,15	23 - 57
ZRE – Áreas rurais isoladas nos subúrbios da cidade representativas das características da paisagem local.	 0,88  0,84	0	0 - 20

Os sensores foram dispostos com a intenção de alcançar uma distribuição equilibrada do espaço, ocorrendo em diferentes contextos orográficos e topográficos e as ZCLs contam com três pontos de medição, com exceção dos espaços rurais envolventes e dos espaços verdes urbanos, com quatro pontos de medição.

Para cálculo do FVC foram retiradas fotografias com uma câmara fotográfica Canon EOS 1100D acoplada com lente olho de peixe Sigma 4,5mm posicionada junto ao solo sobre um tripé *gorillapod*. Com o auxílio de uma bússola de navegação orientou-se a câmara para norte e nivelou-se a lente com o auxílio de um nível de bolha. Por fim, com a câmara apontada para o Zenit, fez-se um conjunto de registos fotográficos, como indicado na Figura 8.



Figura 8 - Metodologia para retirada de fotografia para FVC

Uma simples maneira de obter o valor de FVC é com o intermédio do programa de domínio público *Rayman*, de grande utilidade para estudos de climatologia e de planeamento urbano, em que as fotografias com lente olho de peixe são importadas pelo programa para o cálculo do FVC (Minella *et al.*, 2011). Antes de serem trabalhadas no *software*, as imagens foram preparadas no *Adobe Photoshop*, de maneira a deixar somente a imagem da circunferência com o céu branco e as obstruções (terra, edifícios e vegetação)

em preto. As imagens foram salvas em Bitmap, único formato que o *Rayman* importa. Nesse programa, na barra de ferramentas Input foi selecionada a opção *Sky View Factor* e com a ferramenta *Open Horizon Limitation*, importou-se a imagem que permitiu a obtenção do valor de FVC.

A partir das definições de ZCLs, os 23 sensores foram distribuídos pelas sete classes, como pode ser observada na Figura 9, que apresenta a localização dos sensores nos diferentes contextos urbanos e rurais.

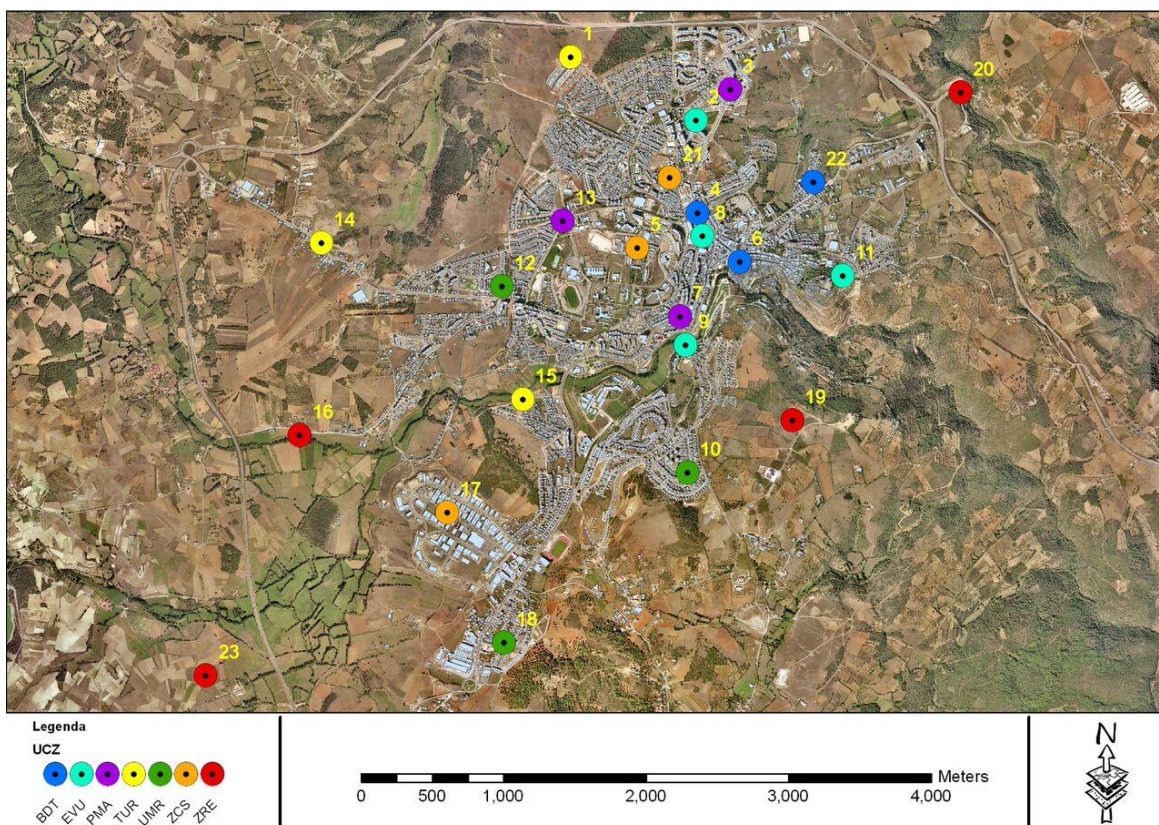


Figura 9 - Localização dos sensores

Em complemento à Figura 9, a Tabela 2 apresenta as características dos pontos monitorados, sendo possível perceber grande variedade de altitudes, com pontos que variam entre 558,1m e 811,8m.

Tabela 2 - Características dos pontos

Ponto	ZCL	Altitude (m)	Latitude (°)	Longitude (°)
1	TUR	679,8	-6,77	41,818
2	EVU	644,9	-6,76	41,814
3	PMA	651,4	-6,757	41,815
4	BDT	670,8	-6,76	41,808
5	ZCS	712,9	-6,765	41,806
6	BDT	641,9	-6,757	41,805
7	PMA	677,9	-6,762	41,801
8	EVU	672,1	-6,76	41,806
9	EVU	659,7	-6,761	41,799
10	UMR	720,9	-6,761	41,791
11	EVU	664,9	-6,748	41,804
12	UMR	678,6	-6,777	41,803
13	PMA	710,2	-6,771	41,807
14	TUR	709,9	-6,792	41,806
15	TUR	660,7	-6,775	41,796
16	ZRE	673,6	-6,794	41,794
17	ZCS	714,2	-6,782	41,789
18	UMR	736,8	-6,777	41,781
19	ZRE	811,8	-6,753	41,795
20	ZRE	558,1	-6,738	41,815
21	ZCS	681,6	-6,763	41,810
22	BDT	629,8	-6,751	41,809
23	ZRE	709,6	-6,803	41,779

### 3.4 ANÁLISE DOS DADOS

Os dados recolhidos foram convertidos para formatos compatíveis e trabalhados de maneira a complementar a análise climática, apresentando uma leitura do clima da cidade e analisando aspetos da variação do clima de Bragança.

Primeiramente, foi preciso compilar e validar os dados, verificando a consistência dos dados a partir da identificação de lacunas e erros. No Excel foram organizados os dados de temperatura e humidade relativa do ar, com os valores correspondentes à média registada a cada 10 minutos, por estações.

Camposano *et al.* (2014) realizaram análises com 25% de lacunas de dados, mas afirmam que segundo a literatura consultada é recomendável que se façam análises quando ocorre até 10% de dados omissos. A percentagem de dados faltantes foi analisada no software *SPSS Statistics*, apresentando a série em estudo 4,7% de dados omissos, porém, deve-se destacar que três pontos apresentaram mais de 10% de lacunas nos dados, sendo 10,4%, 10,5% e 12,4% e que dos 23 pontos, apenas quatro não apresentaram falta de dados. Optou-se por seguir com as análises para todos os pontos. Estas omissões deveram-se a um de três fatores por ordem de ocorrência: Furto dos sensores, falha das pilhas ou avaria.

As lacunas encontradas nos dados foram preenchidas pelo método de regressão linear automática do *software SPSS Statistics*, uma vez que, segundo avaliações de Campozano *et al.* (2014), os métodos baseados em regressão são os que apresentam melhor desempenho para preenchimento de dados. Além disso, através de análise de correlação por Coeficiente de Pearson, todos os pontos são significativamente correlacionados, dando consistência ao preenchimento por regressões lineares. Uma vez selecionado e aplicado o método com um menor erro estimado, aplicou-se o mesmo método para pontos com séries de dados completa, obtendo-se igualmente resultados satisfatórios.

Para o estudo do EICU foi realizada uma correção prévia dos dados de entrada para atenuar distorções incorporadas pela complexidade topográfica da cidade de Bragança. Uma vez que o estudo do Efeito de Ilha de Calor Urbano reflete esses fatores, tornou-se necessário minimizar essa dependência. Normalmente são aplicadas correções de gradiente adiabático seco (9,8°C/Km) ou gradiente para atmosfera média (6,5°C/Km), mas, neste estudo, a variedade de pontos de monitorização permitia calcular um gradiente térmico real, baseado em dois pontos a diferentes alturas e com envolvente semelhante. Foram selecionados os pontos rurais 19 e 23 para evitar interferências de efeitos urbanos. Baseado nestes pontos, calculou-se um gradiente térmico vertical médio horário para cada mês dos anos em estudo e aplicou-se uma curva polinomial do 5º grau que serviu de cálculo para o gradiente vertical de temperatura horário. O objetivo da correção foi retirar dos dados o efeito da altitude, nivelando a uma cota média de 680 metros, o nível médio de Bragança, a partir da Equação 3.

$$T_{final} = T_{inicial} - [\tau_{calculado} * (H - 680)] \quad (\text{Equação 3})$$

em que:  $T_{final}$  é a Temperatura após correção (°C);

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

$\tau_{calculado}$  é o Gradiente vertical de temperatura (°C/m);

H é a Altura do ponto (m).

Como exemplo, apresenta-se a Figura 10, com o perfil médio horário do gradiente vertical de temperatura de fevereiro de 2016. Ficando evidenciada a variação diária através

deste método, este apresentou-se como a melhor alternativa frente aos gradientes adiabáticos.

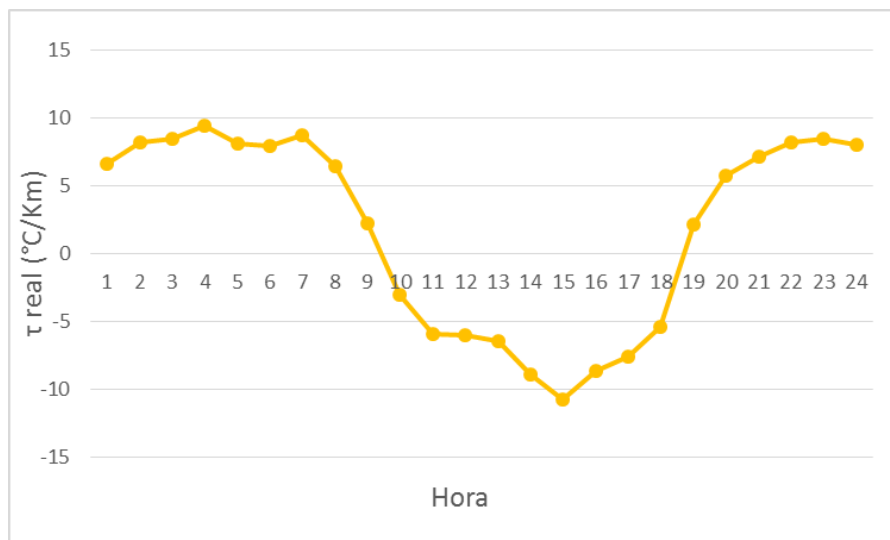


Figura 10 - Gradiente vertical de temperatura médio horário para o mês de fevereiro de 2016

Devido à localização dos sensores, este trabalho focou-se na análise do EICU da canóvia urbana, uma vez que essa análise deve ser coerente com a escala de análise em estudo, havendo diferenças entre o efeito ocorrente na canóvia urbana daquele que ocorre na camada limite urbana (Oke, 1976), embora Arnfield (2003) conclua que, embora haja diferenças, ambos levam a temperaturas mais altas nos espaços urbanos.

Assim como Lee e Baik (2010), este trabalho é baseado nas médias horárias dos sensores de cada tipologia de ZCL, sendo a análise da intensidade do EICU dada pelas diferenças entre as classes urbanas com a classe rural, tornando possível identificar as diferenças do comportamento do EICU ao longo dos anos para essas classes, demonstrando o comportamento do ambiente térmico.

### 3.4.1 Avaliação do EICU

As análises referentes ao EICU, nomeadamente sua intensidade e amplitude nas diferentes ZCLs e de forma sazonal, seu comportamento em situações de ocorrência de chuva e vento, além das taxas de aquecimento e arrefecimento foram realizadas com o auxílio do *software SPSS Statistics*.

### 3.4.2 Construção de Mapas de Isolinhas de Temperatura

Ao contrário das outras análises, na produção de mapas de isolinhas não se aplica a prévia correção dos dados devido à altitude, uma vez que se pretende representar os efeitos específicos.

A geração desses mapas é possível por diferentes métodos de interpolação que são realizados e interpretados através de *softwares* específicos, nesse caso, o *ArcGis* através da ferramenta *Geostatistic Analyst*. Entre as opções, foi utilizado o processo *Kriging* (ou *krigagem*), que é normalmente utilizado. Seu funcionamento consiste em assumir que o valor num local é tanto mais próximo dos registrados nos pontos de amostragem quanto mais próximos eles estão entre si e perdem a relação conforme a distância entre os pontos aumenta (Gonçalves *et al.*, 2014). Nesta análise foi aplicada a *krigagem* simples de modo a descrever graficamente a variabilidade espacial aproximada dos dados de temperaturas médias máximas e médias mínimas por estação.

### 3.5 PROPOSTAS DE MELHORIAS

Após terminadas as análises, foram elaboradas propostas de melhorias da qualidade do clima urbano a partir da identificação e descrição de medidas que contribuirão para a melhoria do clima urbano, especialmente na redução da intensidade do EICU.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ANÁLISE METEOROLÓGICA

O EICU é dependente, entre outros aspetos, das condições meteorológicas locais e, por conta disso, na Figura 11 são apresentadas as principais características para o período em análise. Com base nos dados registados na estação meteorológica automática, é possível notar alguns períodos com maior precipitação, principalmente Janeiro e Outubro, observando-se as médias mais baixas nos meses mais quentes. As maiores velocidades médias de vento ocorreram entre Janeiro e Abril. Nos meses de Julho e Agosto observaram-se as maiores médias de temperatura, apresentando-se na faixa de 23°C em contraste com os meses de Janeiro, Fevereiro e Dezembro, com média de aproximadamente 6°C.

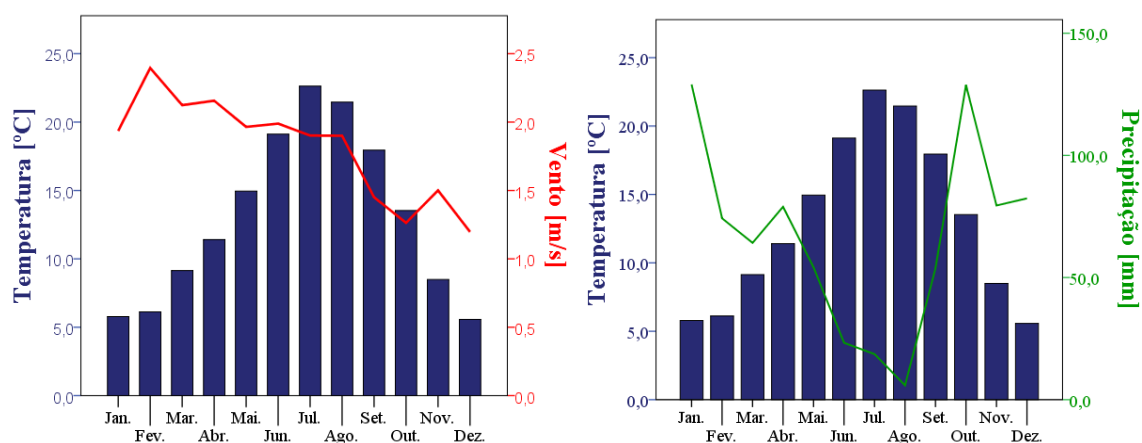


Figura 11 - Variação mensal de precipitação, velocidade do vento e temperatura para o período de estudo

A partir das estações de monitorização, foi possível uma análise da temperatura para as diferentes zonas climáticas, como pode observar-se na Figura 12, em que se apresenta a variação das temperaturas médias horárias para as zonas climáticas estudadas.

Como expectável, no verão são observadas temperaturas mais elevadas, quando as temperaturas medianas mais baixas são observadas na zona rural envolvente (ZRE). Nota-se ainda a importância dos espaços verdes em áreas urbanas para a amenização da temperatura média em períodos mais quentes, sendo esse fato confirmado na Figura 13, a partir da apresentação das temperaturas médias máximas e mínimas.

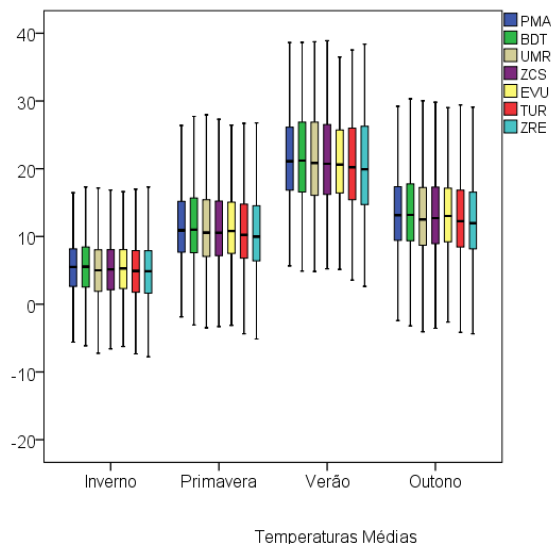


Figura 12 - Comportamento das temperaturas para as diferentes zonas climáticas (em °C)

No verão, as temperaturas máximas observadas nos espaços verdes urbanos (EVU) são menores quando comparadas com as outras classes, enquanto as temperaturas mais altas são registadas nas áreas urbanas e na zona rural envolvente. No verão, registaram-se temperaturas máximas mais elevadas nas duas classes mais urbanizadas (PMA e BDT) e na zona rural (ZRE), podendo ter afetado a qualidade de vida das populações devido ao desconforto térmico, que por sua vez poderá ter motivado um maior uso de aparelhos de climatização.

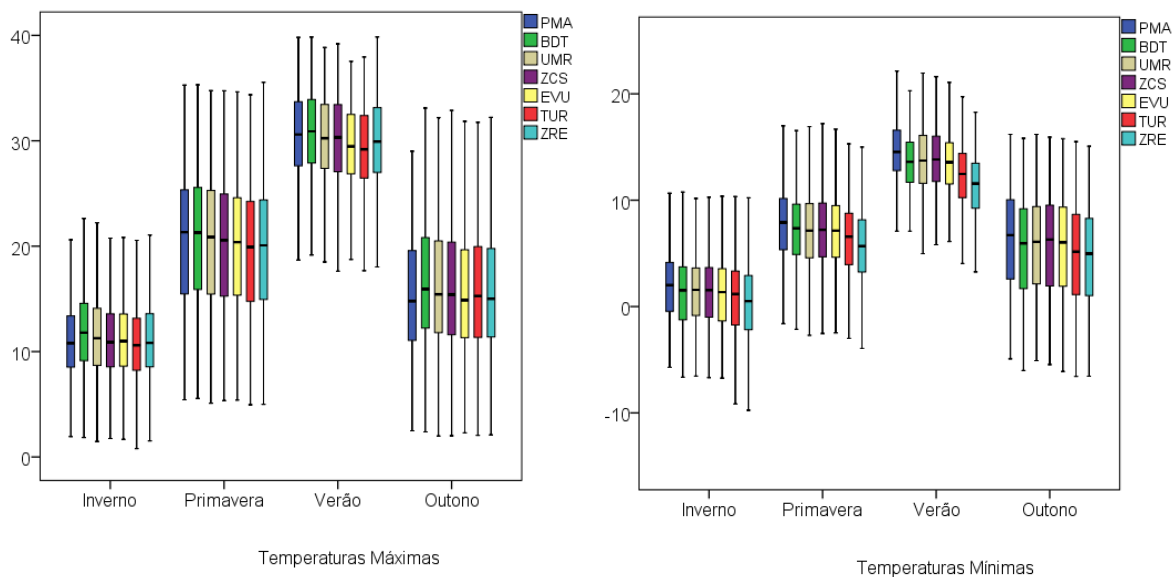


Figura 13 - Comportamento das temperaturas máximas e mínimas para as diferentes zonas climáticas (em °C)

## 4.2 ANÁLISE DA INTENSIDADE DO EICU

Foi estudada a intensidade do EICU baseado nas diferenças das temperaturas (corrigidas) entre as ZCLs urbanas frente à média dos valores das estações rurais ( $\Delta_{\text{urbano-rural}}$ ). Alguns parâmetros estatísticos da caracterização deste fenómeno estão descritos da Tabela 3, nomeadamente a intensidade média e o seu desvio padrão, os valores mínimos e máximos sazonais no período entre 2012 e 2016. É possível perceber que a segunda classe mais urbanizada (BDT) apresenta médias mais elevadas, com pouca variação entre as estações. Foi no verão que se observaram os maiores valores médios, com exceção de EVU e TUR, que apresentaram esses valores na primavera. Os valores máximos foram registados na época do verão e os mínimos, com exceção de ZCS, no inverno. A classe PMA, com um grau de urbanização mais intenso, destaca-se por apresentar maiores intensidades, com registo de  $7,57^{\circ}\text{C}$  e  $-7,35^{\circ}\text{C}$ . Em contrapartida, a zona de transição entre a área urbana e rural (TUR) apresentou valores menos intensos para esse mesmo fenómeno.

Tabela 3 - Dados estatísticos sazonais para a intensidade do EICU

		$\Delta\text{PMA-ZRE}$	$\Delta\text{BDT-ZRE}$	$\Delta\text{UMR-ZRE}$	$\Delta\text{ZCS-ZRE}$	$\Delta\text{EVU-ZRE}$	$\Delta\text{TUR-ZRE}$
<b>Inverno</b>	Média	0,67±1,43	0,77±0,84	0,27±0,74	0,39±0,87	0,43±1,13	0,10±0,58
	Mínimo	-7,35	-4,13	-5,10	-3,96	-7,00	-4,73
	Máximo	5,28	4,08	3,86	3,89	4,25	2,91
<b>Outono</b>	Média	0,93±1,85	1,18±0,96	0,55±0,89	0,73±1,06	0,73±1,38	0,20±0,58
	Mínimo	-5,88	-2,90	-3,43	-2,85	-5,10	-2,75
	Máximo	6,10	5,09	4,81	4,98	5,78	4,40
<b>Primavera</b>	Média	0,93±1,79	1,16±1,01	0,78±0,90	0,75±1,07	0,76±1,21	0,30±0,60
	Mínimo	-6,46	-3,21	-2,81	-3,49	-3,60	-3,77
	Máximo	5,97	4,96	4,72	4,93	4,87	3,33
<b>Verão</b>	Média	1,07±2,42	1,27±1,40	0,99±1,09	0,94±1,51	0,62±1,90	0,23±0,89
	Mínimo	-5,30	-3,57	-2,67	-4,01	-4,23	-4,17
	Máximo	7,57	6,18	5,20	5,89	5,64	3,92

A Figura 14 apresenta a variação do EICU nas diferentes ZCLs, permitindo observar uma maior amplitude de valores na classe PMA, assim como as maiores e menores intensidades, especialmente no verão.

A zona EVU, que representa pequenos espaços verdes em ambientes urbanizados, também apresenta grande amplitude nos valores de intensidade de EICU, por conta do efeito de sombra que ocorre nas estações mais quentes, assim como pela ausência de folhas no inverno, que permite que a área receba mais radiação. Percebe-se menor amplitude da intensidade do EICU na classe TUR.

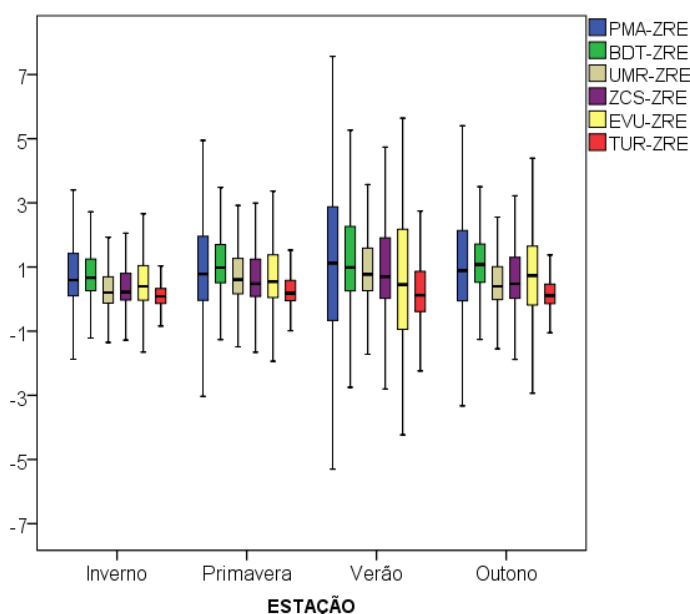


Figura 14 - Distribuição dos valores médios horários na diferença de temperaturas entre as zonas climáticas urbanas e rural para as estações do ano (em °C)

#### 4.2.1 Comportamento Diário e Anual do EICU

A evolução do EICU ao longo do dia e no decorrer dos meses nas zonas climáticas analisadas é apresentada na Figura 15, que possibilita identificar um comportamento de EICU diurno e outro noturno que se diferenciam em intensidades.

Os resultados apresentam efeitos diferenciados ao longo do dia e do ano, principalmente após o amanhecer. O aquecimento nas primeiras horas do dia ocorre mais rapidamente na área rural, o que leva à formação de uma *ilha de frio* nas áreas urbanas, ainda mais intenso nas classes PMA e EVU.

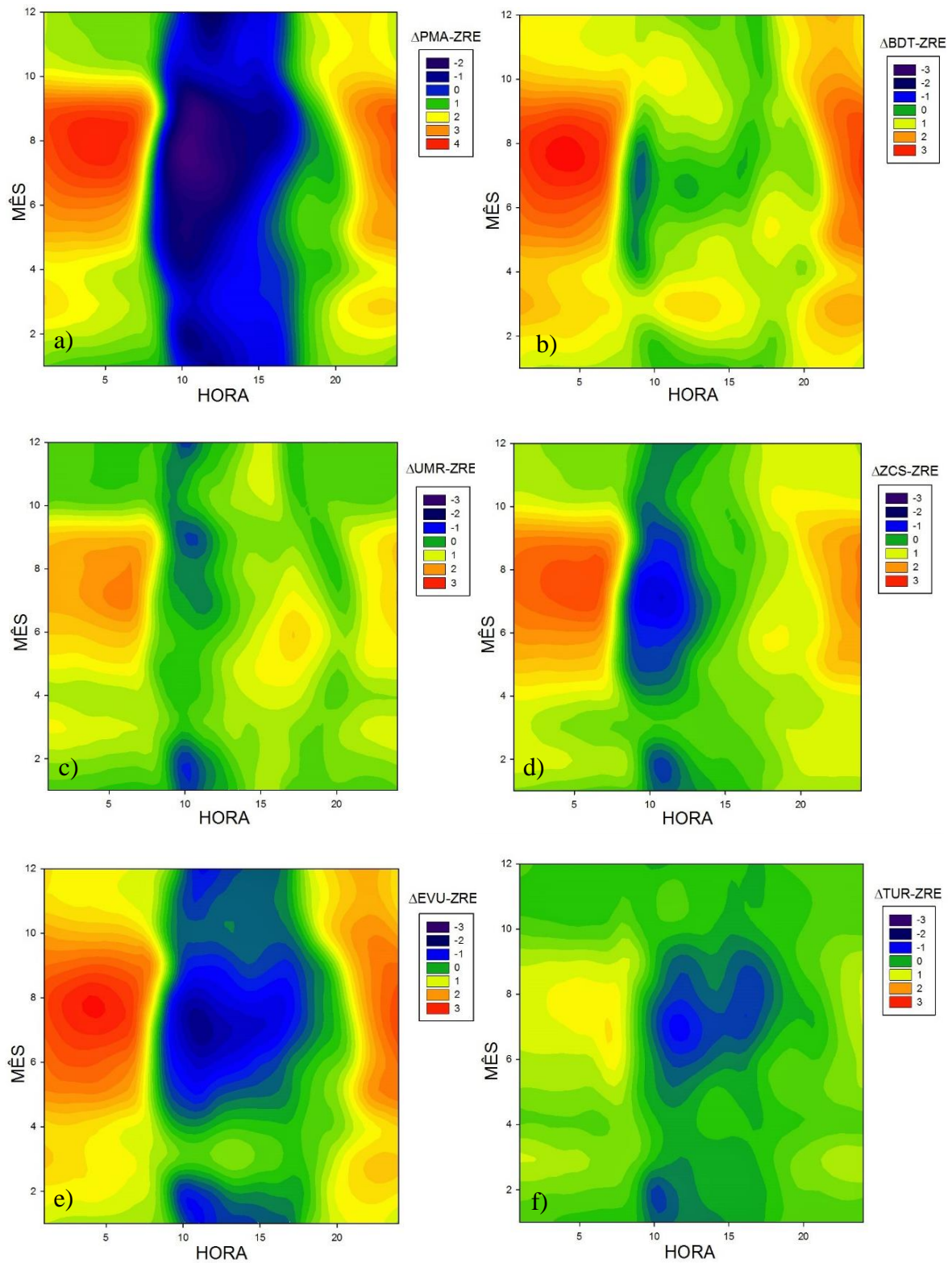


Figura 15 - Variação ao longo do dia e do ano para o efeito de EICU nas diferentes ZCLs

Os espaços verdes em áreas urbanas (EVU) produzem uma diminuição da temperatura durante o dia devido ao resfriamento evaporativo e do sombreamento e excessos durante a noite como resultado do baixo fator de visão de céu dentro da camada de vegetação (Taha, 1997). Nos locais de monitorização em PMA, a baixa elevação do sol no início do dia cria áreas de sombra, que levam a área a permanecer sombreada por mais tempo, porém, a inércia térmica superior e a baixa taxa de evapotranspiração levam ao aumento das temperaturas no decorrer do dia, com a incidência de radiação solar.

O efeito de ilha de frio diminui com o passar do dia até que se torna neutro nas zonas de menor densidade urbana, especialmente ZCS e TUR, momento após o qual o saldo se torna positivo nas ZCLs urbanas. Começa então a formar-se o EICU, com considerável aumento depois do pôr-do-sol e com valores ainda mais significativos antes do nascer do sol, observada com maior intensidade na época do verão.

A ocorrência de ilha de frio no período diurno e ilha de calor com maior intensidade no período noturno já foi relatada anteriormente em diversos estudos (Alcoforado *et al.*, 2005; Lee & Baik, 2010; Lopes *et al.*, 2013), porém Tan *et al.* (2010) constataram em Shangai uma maior intensidade do EICU durante o dia do que no período noturno, ainda mais intensa no período do meio dia, quando a temperatura máxima diária é atingida.

A variação sazonal do amanhecer, devida à localização geográfica de Bragança, percebe-se nos meses de primavera e verão, quando a ilha de frio tem início aproximadamente uma hora mais cedo que nos meses de outono e inverno. O mesmo pode ser observado após o pôr-do-sol, quando o EICU na primavera e verão começa a ser sentido mais tarde que no inverno e outono.

Este efeito assume maior intensidade média mensal na classe PMA, com valores em torno de 3°C e 4°C nas madrugadas de verão (Figura 15a). O verão de Bragança apresenta condições para a ocorrência do EICU devido à maior estabilidade atmosférica percebida, uma vez que o EICU assume maior intensidade em condições de céu limpo (Oke, 1987).

Como pode ser observado ainda na Figura 15, registam-se quebras na formação dos efeitos de EICU e de ilha de frio. Estas atenuações dos efeitos expectáveis podem ser corrigidas pela análise de fatores que enfraquecem a sua intensidade, em particular aquelas que se relacionam com a instabilidade atmosférica, com a ocorrência de períodos de maior

intensidade do vento e da precipitação atmosférica (Oke, 1982), assunto a ser abordado mais adiante.

#### 4.2.2 Taxas de Aquecimento e Arrefecimento

O aumento e diminuição da intensidade da Ilha de Calor Urbano pode ser diretamente explicado pela diferença na taxa de aquecimento/arrefecimento entre áreas urbanas e rurais (Lee & Baik, 2010). A Figura 16 exhibe as variações horárias de taxa de aquecimento e arrefecimento por hora para as ZCLs, sendo que os valores positivos indicam aquecimento enquanto os valores negativos indicam arrefecimento.

A radiação solar é absorvida pelas superfícies artificiais em meios urbanos durante o dia e retarda a queda da temperatura do ar no período noturno. Em áreas rurais, o resfriamento noturno ocorre mais rapidamente e forma-se uma camada de inversão noturna forte. Essa diferença de balanço energético superficial entre áreas urbanas e rurais, ajuda a explicar a formação da Ilha de Calor Urbano, mais forte em condições climáticas favoráveis. No estudo de Lee & Baik (2010), nos dias de precipitação a amplitude e a diferença da taxa de aquecimento/arrefecimento entre as áreas urbanas e rurais foram reduzidas e resultaram em ICU mais fracas sob condições meteorológicas chuvosas.

Os dados confirmaram a maior taxa de aquecimento matinal na área rural (ZRE), apresentando maior amplitude no verão, com diferença máxima de aproximadamente  $2^{\circ}\text{C/h}$  em relação a área mais urbanizada (PMA), próximo das 8h00. A classe PMA permanece por mais tempo a armazenar calor pela manhã e à noite apresenta valores mais baixos de arrefecimento, enquanto a zona ZRE apresenta maiores valores de taxa de arrefecimento noturna, corroborando com os resultados apresentados por Lopes (2006). Embora os padrões diários de aquecimento e arrefecimento sejam semelhantes em áreas urbanas e rurais, observou-se uma maior amplitude na área rural em todas as estações, assim como foi observado por Lee & Baik (2010).

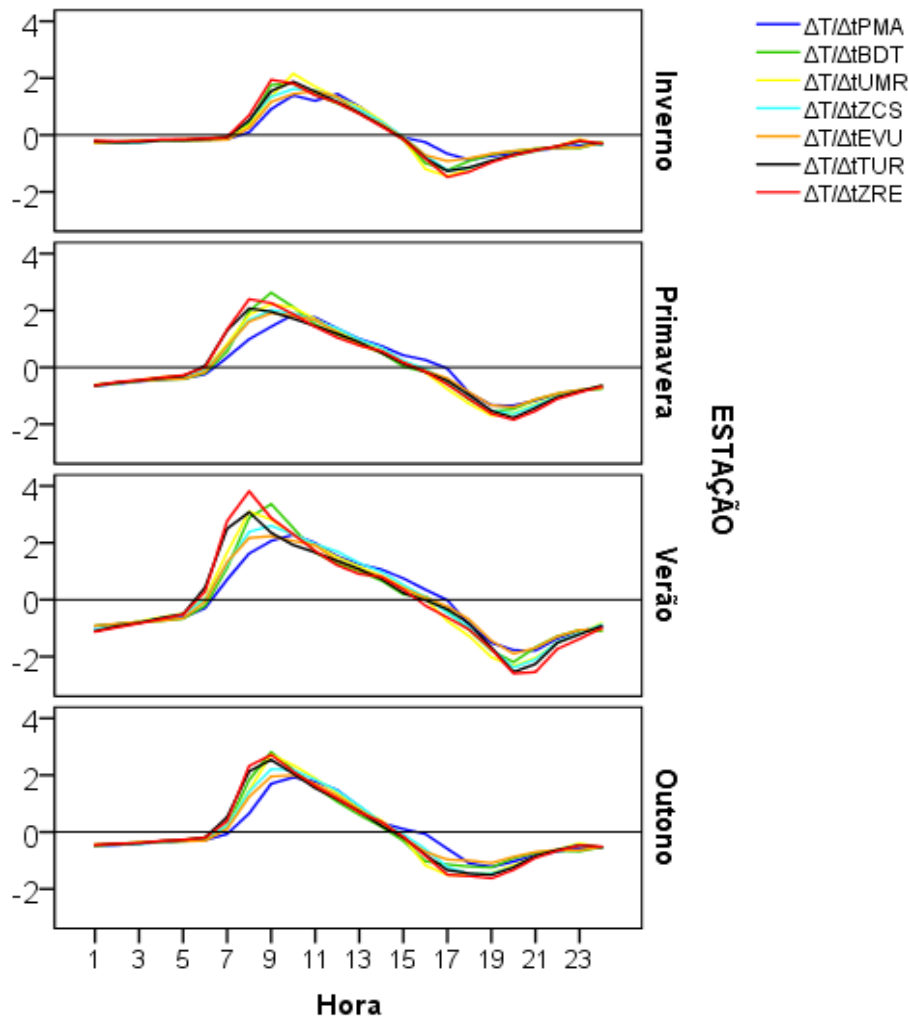


Figura 16 - Taxa média sazonal de aquecimento e arrefecimento para cada zona climática (°C/h)

Em todas as classes observou-se um período máximo de arrefecimento correspondendo ao período próximo do pôr-do-sol, aproximadamente as 17h00 no inverno e as 20h00 no verão.

Tan *et al.* (2010) afirmam que variações médias horárias acima de 4°C podem causar problemas à saúde, porém valores próximos, mas inferiores, apenas se registam na ZRE no verão. As demais classes encontraram-se em situações intermediárias entre a classe PMA e ZRE.

#### 4.2.3 Efeito do Vento e da Precipitação na Diminuição do EICU

Como mencionado anteriormente, no inverno, registaram-se menores intensidades de EICU devido à ocorrência de condições meteorológicas que atenuam esse efeito, com ventos de maior intensidade e maior precipitação, mais comuns em contextos de menor instabilidade atmosférica e curta duração dos dias. Além do inverno, na Figura 15, pôde-se perceber uma descontinuidade da intensidade do EICU nos meses de Abril e Outubro que podem estar relacionados às condições apresentados na Figura 11.

Este trabalho vem relacionar o efeito do vento e da precipitação na diminuição do EICU a partir da distribuição das médias horárias de intensidade do EICU relacionadas com valores de precipitação e velocidade do vento, como apresentado na Figura 17.

Os resultados apresentados confirmam a relação negativa do EICU com a velocidade do vento e precipitação (Oke, 1982), demonstrando que com o aumento da velocidade do vento e da precipitação, os valores de intensidade do EICU são amenizados progressivamente, assim como foi também registado por Alcoforado *et al.* (2005).

Todas as classes estudadas apresentaram um padrão de afunilamento dos valores de intensidades de EICU em torno de zero devido ao aumento da velocidade do vento ou da precipitação. Esse efeito é ainda mais marcado em condições de chuva, uma vez que dias de maior pluviosidade apresentaram a concentração de valores de intensidade de EICU na faixa de 0°C, uma vez que, com precipitação, o calor armazenado nas superfícies urbanas é normalmente reduzido devido à menor entrada de radiação de pequeno comprimento de onda e à existência de superfícies impermeáveis, que levam a evaporação da água. Por outro lado, as zonas rurais têm maior capacidade de armazenar humidade, aumentando a entrada térmica e reduz, então, as diferenças entre zonas urbanas e rurais (Arnfield, 2003; Lee & Baik, 2010).

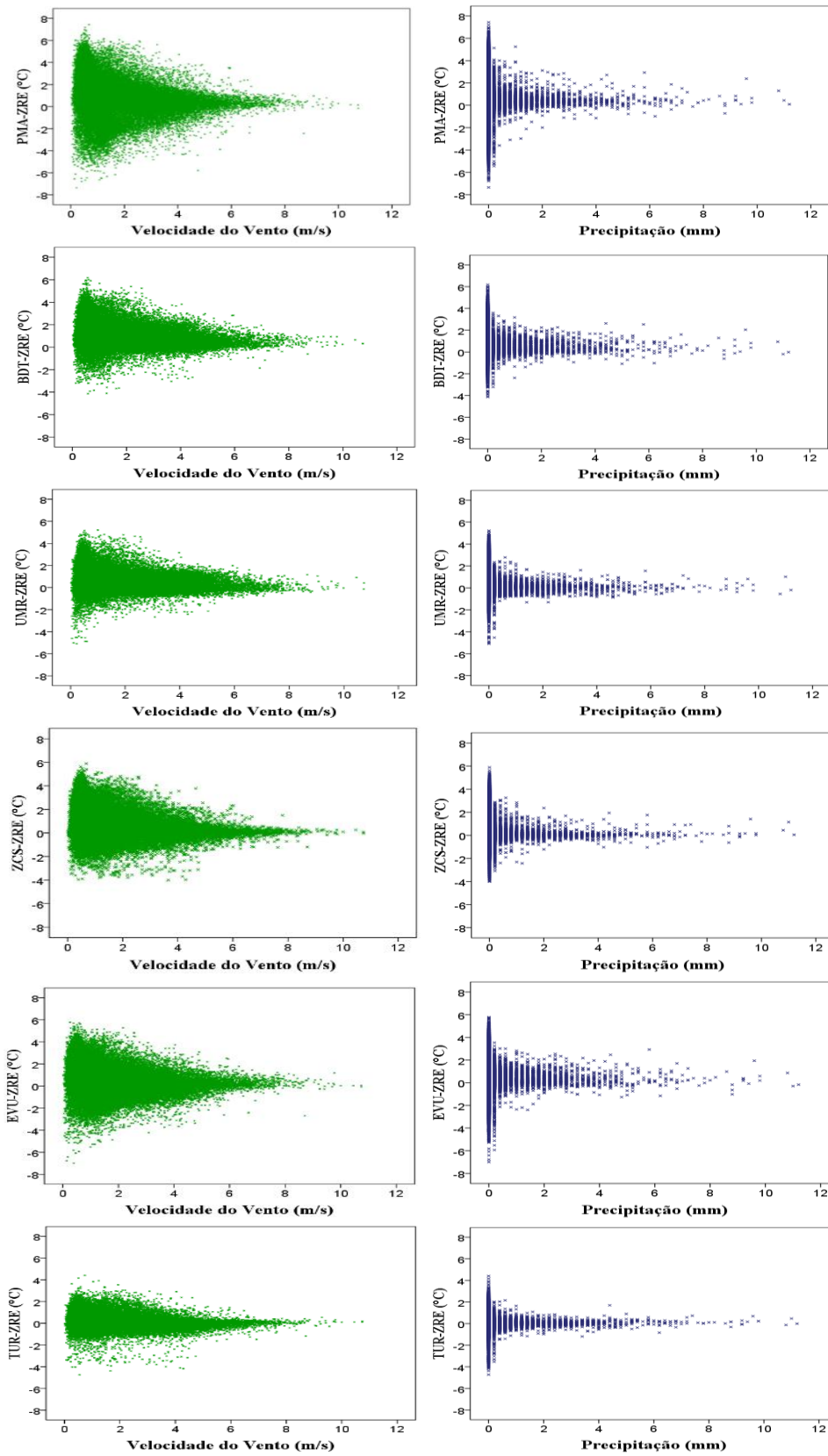


Figura 17 - Valores de intensidade do EICU em função da velocidade do vento e da precipitação

#### 4.2.4 Isolinhas de Temperatura

Os mapas de isolinhas consistem em integrar dados para obter mapas que representem uma aproximação à variação dos dados entre os pontos de monitorização. Simplificando a interpretação das condições reais, estes mapas traduzem as diferenças espaciais que podem existir no espaço urbano. Diferentemente das demais representações, nesta não houve correção dos dados em relação a altitude dos pontos.

As isolinhas das médias de temperaturas máximas e mínimas são apresentadas para as duas estações extremas, nomeadamente o verão e inverno, como pode ser observado nas Figuras 18, 19, 20 e 21.

A análise das temperaturas mínimas permitiu a leitura dos valores mais baixos no contexto peri-urbano, nos vales e zonas influenciadas pela presença do rio, relacionados às massas de ar frio que ocorrem nos pontos mais baixos dos vales e às condições de ventilação/estagnação térmica nesses locais. Os maiores valores de temperaturas mínimas ocorreram em áreas com maior intensidade de EICU e correspondem aos pontos onde há maior quantidade de solos impermeabilizados e construções, mais evidenciada na área central da cidade, que ainda se encontram protegidos pela rugosidade urbana. Observou-se um aumento da temperatura mínima nos pontos mais altos da cidade, devido aos processos de inversão térmica noturna.

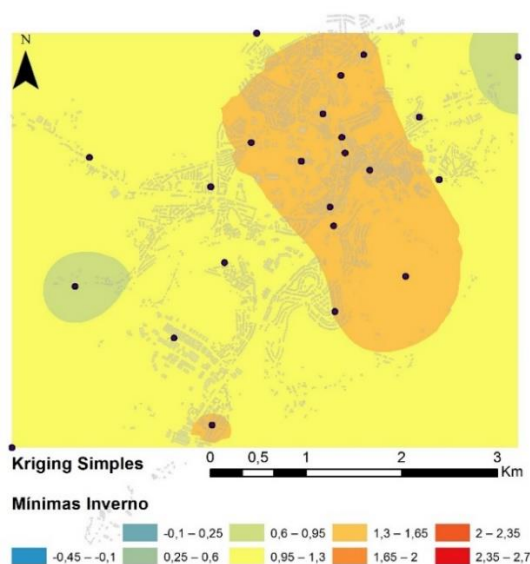


Figura 18 - Isolinhas das temperaturas médias mínimas do Inverno (em °C)

A temperatura apresenta uma variação ao longo das estações do ano, com uma intensificação do EICU na estação do verão, como observado na Figura 19, em que as diferenças das médias das mínimas demonstram uma maior amplitude, com uma diferença de aproximadamente 5°C, enquanto no inverno o seu valor desce para valores em torno de 3°C..

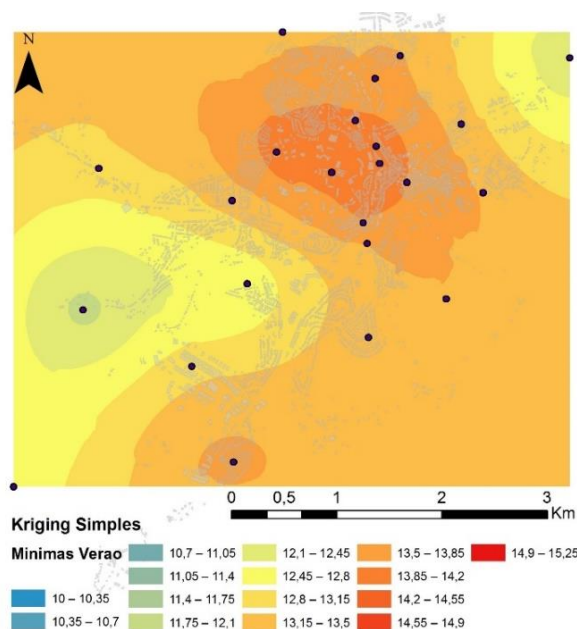


Figura 19 - Isolinhas das temperaturas médias mínimas do Verão (°C)

A interpretação das temperaturas médias máximas é mais complexa que para as médias mínimas, uma vez que estas são condicionadas pelo comportamento da radiação no contexto local, que é mais complexo durante o dia. Os valores obtidos e a sua representação por isolinhas reflete de processos de microescala, como no caso do efeito de sombra em alguns locais de monitorização. Apesar desse efeito, observou-se as médias das temperaturas máximas mais elevadas nos pontos mais densamente urbanizados. Os pontos de maior altitude, mesmo que inseridos em contexto urbano, apresentaram média das temperaturas máximas mais baixas enquanto os pontos mais baixos apresentaram os valores máximos mais elevados.

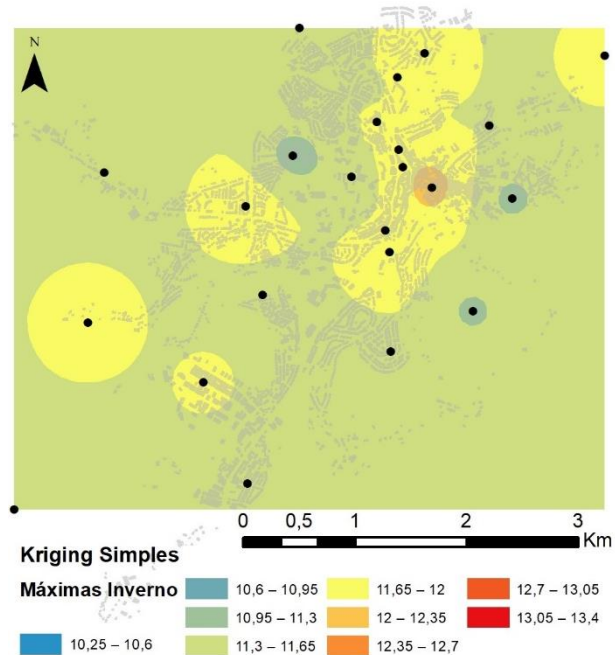


Figura 20 - Isolinhas das temperaturas médias máximas do Inverno (°C)

Os processos microclimáticos são responsáveis por um padrão que não é inteiramente coerente entre os pontos devido às variações de temperaturas que ocorrem em pontos muito próximos. Esse efeito pode ser ainda mais percebido na Figura 21.

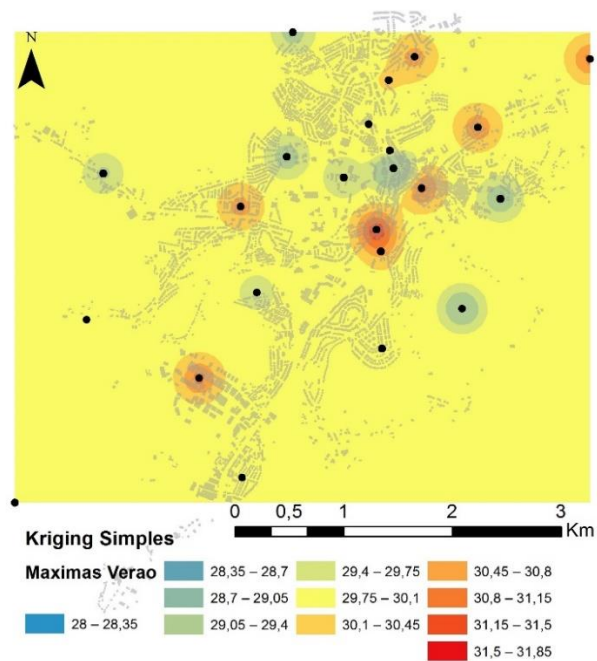


Figura 21 - Isolinhas das temperaturas médias máximas do Verão (°C)

### 4.3 MEDIDAS DE MITIGAÇÃO

A ilha de calor pode ser considerada benéfica no inverno e prejudicial no verão em climas temperados de classificação Csb, (Givoni, 1998), que determina o predomínio de baixas temperaturas grande parte do ano com valores abaixo do nível de conforto e na época mais quente, valores acima desse referencial.

A variedade de condições térmicas que se registam ao longo do ano dificulta a identificação de uma única estratégia para o espaço urbano, sendo preciso considerar as estratégias para os diferentes contextos que melhorem as condições climáticas locais.

Uma vez que a cidade de Bragança se insere num contexto de montanha, nas zonas mais altas, que frequentemente são mais expostas a ventos, deve-se evitar a introdução de edifícios residenciais, uma vez que o vento ao encontrar os edifícios pode acentuar as perdas térmicas e aumentar a necessidade de climatização nesses locais no período mais frio. De maneira semelhante, os pontos mais baixos dos vales de montanha também devem ser evitados, devido a ocorrência de temperaturas mais baixas especialmente durante a noite. Nos pontos mais baixos desses vales onde, no período noturno ocorre a drenagem e acumulação de massas de ar frio, assume especial importância a manutenção ou introdução de áreas verdes.

As áreas mais urbanizadas, onde o EICU apresentou maiores intensidades, precisam ser melhor planeadas, em particular no desenho das estruturas urbanas e particularmente a relação destas estruturas com o vento, a água e a humidade, vegetação e materiais de construção.

Além disso, é relevante que zonas industriais onde ocorre emissão de calor antrópico se mantenham distantes do contexto residencial por poderem, pela emissão de calor, contribuir para o EICU. Estes espaços devem, preferencialmente, ser rodeados por espaços verdes, pois estes podem atenuar esse efeito e comportam-se como um filtro para retenção de pó e reoxigenação do ar, podendo também atuar na atenuação do ruído sonoro, quando emitido pelas indústrias.

Os fatores do EICU que se podem controlar correspondem principalmente ao *design* e planeamento urbano, enquanto os fatores incontrolláveis são relacionados com as variações meteorológicas, uma vez que estão além do nosso controle. A redução da Ilha de Calor devida ao aquecimento solar indireto é complexa e tem especial importância, uma vez que a

maioria dos benefícios da mitigação do EICU são relatados pela redução do aquecimento solar indireto (Rizwan *et al.*, 2008).

Assim, uma das maneiras de mitigação do EICU passa pela aplicação nas superfícies (horizontais e verticais) de materiais de elevado albedo, que reduzem a quantidade de radiação solar absorvida pelas superfícies das estruturas urbanas, diminuindo o aquecimento das mesmas. Essa medida leva à redução da intensidade da radiação de grande comprimento de onda, contribuindo para a ocorrência de menores temperaturas do ar, através do baixo fluxo de calor convectivo das superfícies mais frias (Taha, 1997; Takebayashi & Moriyama, 2007).

É preciso considerar que diversos fatores contribuem para modificar a temperatura da superfície do pavimento ou cobertura, como as suas camadas, materiais e as condições climáticas locais. Em seu estudo, Roesler & Sen (2016), concluíram que o uso de concreto de baixa densidade reduz a inércia térmica e faz com que o calor seja armazenado perto da superfície e emitido rapidamente durante o dia, diminuindo a emissão de calor noturno.

O incremento da Ilha de Calor devido a pavimentação parte do princípio que grande parte dos materiais utilizados para esse fim absorve mais calor que superfícies naturais e alteram o fluxo de calor terrestre, incrementando a radiação forçada (que corresponde à mudança imposta na taxa de absorção de energia solar) (Roesler & Sen, 2016). O pavimento asfáltico, um dos mais utilizados no contexto urbano de Bragança é um dos materiais que apresentam as mais altas temperaturas superficiais no meio urbano e contribui para o aquecimento do ar nessas áreas, sendo um dos responsáveis pela formação da Ilha de Calor (Callejas *et al.*, 2015). A incorporação de nanopartículas de dióxido de titânio na pavimentação, por sua vez, faz com que o concreto forneça propriedades ambientais significativas, aumentando o albedo da superfície do pavimento. Quando incorporado a uma estrutura de Avaliação do Ciclo de Vida do Pavimento, o concreto com albedo superior reduz a temperatura do ar urbano e, portanto, a Ilha de Calor (Roesler & Sen, 2016).

Além dos aspetos já mencionados, a baixa taxa de evapotranspiração nas áreas urbanas é importante no aumento das temperaturas durante o dia (Taha, 1997), tornando assim as áreas verdes uma medida ecológica de combate aos problemas ocasionados pelo EICU. As áreas verdes têm capacidade de interceptar a radiação solar e resfriar o ar

circundante através do processo de evapotranspiração e de sombreamento, tendo o efeito positivo nas componentes térmica e de qualidade do ar do clima urbano (Taha, 1997; Streiling & Matzarakis, 2003). Essas áreas têm uma razão de Bowen (razão entre o fluxo de calor sensível e latente) diferente de uma superfície rígida, uma vez que a radiação solar recebida é transformada em energia para transpiração e fotossíntese, levando a um menor fluxo de calor sensível. Durante a noite, a energia da radiação líquida de saída de uma superfície verde é alimentada pelo fluxo de calor de latente. Assim, a temperatura próxima de áreas verdes é menor que a do ambiente construído, como já foi anteriormente identificado por Wong & Yu (2005) e Amorim *et al.* (2009), que confirmaram o efeito positivo das áreas verdes na mitigação do EICU, ainda mais perceptível em grandes áreas verdes.

Os telhados e paredes verdes também são sugeridos do ponto de vista do planeamento de construção, enquanto os parques verdes e árvores nas ruas são sugeridos do ponto de vista do planeamento urbano (Takebayashi & Moriyama, 2007).

A introdução de parques verdes em áreas urbanizadas além dos benefícios já referidos, atuam na mitigação da poluição atmosférica, contribuindo na melhoria da qualidade do ar urbano, sendo ainda correlacionados com o conforto urbano, uma vez que esses locais são propícios para recuperação do *stress* e da fadiga e podem ser considerados importantes elementos na saúde pública mental (Panagopoulos *et al.*, 2016). Foi relatado em um estudo conduzido por Spronken-Smith *et al.* (2000 em Rizwan *et al.*, 2008) que os parques poderiam ajudar a controlar temperaturas através da evaporação em mais de 300% comparadas com a sua envolvente.

Além disso, a vegetação arbórea tem importância em meses quentes devido à capacidade de interceptar a radiação de pequeno comprimento de onda, diminuindo os efeitos no balanço radiativo e amenizando sua incidência direta na população. Já a vegetação de folha caduca permite maior incidência radiativa em meses mais frios, enquanto interceptando a radiação nos meses mais quentes, fornecendo sombra, com os efeitos anteriormente descritos, trazendo benefícios para o conforto térmico da população.

As medidas enunciadas acima contribuem para a poupança de energia, através da redução do uso de aparelhos de climatização, pela diminuição da temperatura nos períodos mais quentes, contribuindo ainda para a redução da emissão de calor antropogénico.

## 5. CONCLUSÃO

A inserção de uma rede de monitorização com 23 sensores de temperatura e humidade relativa do ar, além de uma estação meteorológica automática tornou possível o estudo dos aspetos do clima urbano, além da caracterização do efeito de ilha de calor urbano na canópia urbana da cidade de Bragança para o período entre 2012 e 2016.

Constatou-se que as temperaturas mais altas foram observadas em julho e agosto, em oposição com janeiro, fevereiro e dezembro, que apresentaram os valores mais baixos. Como expectável para o contexto climático Csb, os meses em que a cidade apresenta as temperaturas mais elevadas é também quando ocorrem as mais baixas médias de precipitação e velocidade do vento.

No âmbito de um estudo, que visava a análise do Efeito de Ilha de Calor Urbano, foi possível caracterizar, para o período de análise, para além deste efeito, a ocorrência de um segundo fenómeno, o de Ilha de Frio Urbano, ambos relacionados à interferência do ambiente urbano no clima. O Efeito de Ilha de Frio, faz-se sentir nas primeiras horas do dia e encontra-se relacionado com os efeitos de sombreamento dos edifícios e estruturas urbanas e o diferente comportamento dos materiais de ambientes urbanos, aspeto que foi ainda confirmado através da análise de taxas de aquecimento e arrefecimento horária, em que a classe PMA apresentou menor taxa de aquecimento pela manhã, enquanto na classe ZRE se verificou as taxas mais altas de aquecimento nas primeiras horas do dia. As diferenças diárias de aquecimento chegam a 2°C no início da manhã, quando a área rural apresenta aquecimento mais rápido que a área urbana. Já o efeito de Ilha de Calor assume intensidades máximas poucas horas antes do nascer do sol, principalmente no verão. Os resultados obtidos permitiram avaliar que a classe mais urbanizada (PMA) apresenta maior valor desse efeito, alcançando valor médio de 1,07°C, além do valor extremo de 7,57°C no verão, enquanto no inverno esse valor é reduzido para 5,28°C. Além disso, os efeitos diferenciados ao longo do dia e do ano, permitiram perceber as maiores diferenças entre áreas urbanas e rurais nas madrugadas de verão, com valores que chegam a 4°C na classe PMA.

Os resultados deste estudo permitiram ainda constatar, que o vento intenso e a precipitação atenuam os efeitos de Ilha de Calor e de Ilha de Frio, aproximando as diferenças face ao contexto rural envolvente, observando-se uma correlação negativa entre

o incremento dessas variáveis e a intensidade de ambos os Efeitos. Isso pode ser explicado pelo facto de essas variáveis terem interferência no balanço de energia e amenizarem as diferenças entre áreas urbanas e rurais.

Foi verificado ainda, através dos mapas de isolinhas, uma maior temperatura nos pontos de monitorização de classes mais urbanizadas, assim como temperaturas mais baixas nos pontos mais altos da cidade ou áreas de influência de rios, no período diurno e noturno, respetivamente.

Na classe mais urbanizada, com valores mais intensos de ilha de calor e de frio, torna-se possível perceber que esse modo de urbanização precisa ser evitado, assim como o pavimento asfáltico. Foi ainda verificada a importância dos espaços verdes inseridos em contextos urbanos para a redução das temperaturas em épocas mais quentes, assim como para uma melhor qualidade do ar.

Os resultados aqui obtidos revelam-se importantes para o planeamento futuro do espaço urbano de modo a promover um melhor desenho bioclimático da cidade. Além disso, a informação recolhida e analisada, possibilita a realização de trabalhos futuros, através de análises aprofundadas sobre os efeitos nas alterações do uso do solo nesse período (2012-2016), o conforto térmico na cidade ou, ainda, os processos de microescala para melhor compreensão das diferenças registadas entre pontos.

## 6. REFERÊNCIAS

Alcoforado, M. J., Lopes, A., Andrade, H., & Vasconcelos, J. (2005). *Orientações Climáticas para o Ordenamento em Lisboa*. Lisboa: Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa.

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 Politecnico de Bragança.

Amorim, M. C. de C. T., Dubreuil, V., Quenol, H., & Neto, J. L. S. (2009). Características das ilhas de calor em cidades de porte médio: exemplos de Presidente Prudente (Brasil) e Rennes (França). *Revista Franco-Brasileira de Geografia*, 1–16.

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 of Climatology*, 23(1), 1–26.

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

Barry, R. (2008). *Mountain Weather and Climate* (3rd ed.). Boulder: Cambridge University Press.

Callejas, I. J. A., Durante, L. C., Rosseti, K. de A. C. (2015). Pavimentação Asfáltica: Contribuição no Aquecimento de Áreas Urbanas. *Engineering and Science*, 3(1), 64-72.

Campozano, L., Sánchez, E., Avilés, A., & Samaniego, E. (2014). Evaluation of infilling methods for time series of daily precipitation and temperature: The case of the Ecuadorian Andes. *Maskana*, 5(1), 99–115.

Collischonn, E. (2015). O fator de visão do céu e sua influência sobre as características térmico-higrométricas intraurbanas em pelotas/RS, BRASIL. *Geographia Meridionalis*, 1(1), 160–178.

Shams, J. C. A., Giacomeli, D. C., Sucomine, N. M. (2009). Emprego da arborização na melhoria do conforto térmico nos espaços livres públicos. *REVSBAU*, 4(4), 1-16.

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

Gonçalves, A., Ribeiro, A. C., Maia, F., & Feliciano, M. (2014). Análise do Clima Urbano de Bragança. Bragança: Instituto Politécnico de Bragança.

Grimmond, C. B. S., Roth, M., Oke, T. R., Au, Y. C., Best, M., ... Voogt, J. (2010). Climate and more sustainable cities: Climate information for improved planning and management of cities (Producers/Capabilities Perspective). *Procedia Environmental Sciences*, 1(1), 247–274.

Grimmond, C. S. B., & Oke, T. R. (2002). Turbulent Heat Fluxes in Urban Areas: Observations and a Local-Scale Urban Meteorological Parameterization Scheme (LUMPS). *Journal of Applied Meteorology*, 41(7), 792–810.

Harman, I. N., Best, M. J., & Belchier, S. E. (2004). Radiative Exchange in an Urban Street Canyon. *Boundary-Layer Meteorology*, 110, 301–316.

He, J. F., Liu, J. Y., Zhuang, D. F., Zhang, W., & Liu, M. L. (2007). Assessing the effect of land use/land cover change on the change of urban heat island intensity. *Theoretical and Applied Climatology*, 90(3–4), 217–226.

Höppe, P. (2002). Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and Buildings*, 34(6), 661–665.

Im, & AEmet. (2011). *Atlas Climático Ibérico - Iberian Climate Atlas*.

Lee, S. H., & Baik, J. J. (2010). Statistical and dynamical characteristics of the urban heat island intensity in Seoul. *Theoretical and Applied Climatology*, (100), 227–237.

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

Lopes, A., Alves, E., Alcoforado, M. J., & Machete, R. (2013). Lisbon urban heat island updated: New highlights about the relationships between thermal patterns and wind regimes. *Advances in Meteorology*, 2013.

Maia, F. M. da C. (2013). *Caracterização da ilha de calor urbano de Bragança*. Universidade de Aveiro.

Marques, D. (2012). *Contributo da climatologia para a sustentabilidade urbana: o caso da Figueira da Foz*. Universidade de Coimbra.

Minella, F. C. O., Rossi, F. A., & Kruger, 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.

Nóbrega, R. S., & Lemos, T. V. da S. (2011). O microclima e o (des)conforto térmico em ambientes abertos na cidade do Recife. *Revista de Geografia (UFPE)*, 28(1), 93–109.

Oke, T. R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment Pergamon Pres*, 7, 769–779.

Oke, T. R. (1976). The Distinction Between Canopy and Boundary-Layer Urban Heat Islands. *Atmosphere*, 14, 268–277.

Oke, T. R. (1981). Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, 1(3), 237–254.

Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24.

Oke, T. R. (1984). Methods in urban climatology, 14, 19–29.

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

Oke, T. R. (1988). The urban energy balance. *Progress in Physical Geography*, 12(4), 471–508.

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

Oke, T. (2006). Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. *World Meteorological Organization*, 81.

Panagopoulos, T., Duque, J. A. G., Dan, M. B. (2016). Urban planning with respect to environmental quality and human well-being. *Environmental Pollution*, 208, 137-144.

Papst, A. L. (1999). *Uso de inércia térmica no clima subtropical. Estudo de caso em Florianópolis - SC*. Universidade Federal de Santa Catarina.

Ribeiro, A. G. (1993). As escalas do clima. *Boletim de Geografia Teorética*, 23(46), 288–294.

Rizwan, A. M., Dennis, L. Y. C., & Liu, C. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 20(1), 120–128.

Roesler, J., Sen, S. (2016). Impact of pavements on the urban heat island. *Final Projects Report: University Transportation Center for Highway Pavement Preservation*.

Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *American Meteorological Society*, 1879–1900.

Streiling, S. & Matzarakis, A. (2003). Influence of single and small clusters of trees on the bioclimate of a city: a case study. *Journal of Arboriculture*, 29(6).

Stull, R. B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Vancouver: Kluwer Academic Publishers.

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

Takebayashi, H. & Moriyama, M. (2007). Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Building and Environment*, 42(8), 2971–2979.

Tan, J., Zheng, Y., Tang, X., Guo, C., Li, L., Song, G., ... Chen, H. (2010). The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. *Int. J. Biometeorol.*, 54, 75–84.

Unger, J. (2004). Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: review and new approach. *Climate Research*, 27, 253-264.

Wong, N. H., & Yu, C. (2005). Study of green areas and urban heat island in a tropical city. *Habitat International*, 29(3), 547–558.