



Análise do clima urbano da cidade de Bragança e a sua relação com as variáveis de morfologia urbana (2016-2019)

Bernardo Brugger Carvalho

Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Dupla Diplomação do Instituto Politécnico de Bragança – Portugal em parceria com a Universidade FUMEC - Brasil, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Tecnologia Ambiental.

Orientado por

Prof. Dr. Artur Gonçalves - Instituto Politécnico de Bragança

Prof. Dr. António Castro Ribeiro - Instituto Politécnico de Bragança

Prof. Dr. Eduardo Neto Ferreira - Universidade FUMEC

Bragança

Fevereiro/2020

Bernardo Brugger Carvalho

Análise do clima urbano da cidade de Bragança e a sua relação com as variáveis de morfologia urbana (2016-2019)

Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Dupla Diplomação do Instituto Politécnico de Bragança - Portugal em parceria com a Universidade FUMEC - Brasil, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Tecnologia Ambiental.

Professor Orientador: Prof. Doutor Artur Gonçalves - IPB

Co-orientadores: Prof. Dr. António Castro Ribeiro - IPB

Prof. Doutor Eduardo Neto Ferreira - Universidade FUMEC

Bragança

Fevereiro/2020

AGRADECIMENTOS

Toda grande jornada é galgada pouco a pouco, passo a passo, e durante essa caminhada estamos acompanhados de pessoas que fazem tudo se tornar mais fácil, nos ajudando a superar cada momento difícil que passamos e mantendo a cabeça erguida rumo ao nosso objetivo.

Primeiramente agradeço a Deus por me presentear com o melhor ano da minha vida, recheado de ótimos momentos e de pessoas que ficarão pra sempre na minha memória.

Agradeço meus orientadores por toda ajuda e acompanhamento, em especial ao professor Artur Gonçalves, obrigado por todo conhecimento passado ao longo desses meses, pela paciência e pela disponibilidade em me atender, eu não teria chegado até aqui sem o seu suporte.

Agradeço principalmente aos meus pais, Karla e Alfredo, por me proporcionarem viver essa grande aventura, por serem meus maiores espelhos de amor, determinação e de nunca desistir dos meus sonhos, a vocês, meu amor eterno.

Agradeço a todos os professores que tive a oportunidade de ter aula, pelo conhecimento e experiência que me foram passados.

Agradeço a minha namorada Maria Clara, por muitas vezes ter sido meu porto seguro e um ponto fundamental para que eu conseguisse chegar até aqui. Agradeço a todos meus amigos de Bragança, em especial ao Marcus, Renan, Lucas Almeida, Lucas Garcia, Verônica, João, Nathalya, Raynner, Letícia e Izabela, vocês tornaram tudo mais leve e prazeroso.

Por último, agradeço a Universidade FUMEC e ao Instituto Politécnico de Bragança por me darem a oportunidade de me profissionalizar fora do Brasil.

Obrigado!

RESUMO

O clima urbano resulta da interação direta entre dois grupos de variáveis, as climáticas e antrópicas. O crescente desenvolvimento urbano, ao longo dos anos, com a verticalização das cidades, a impermeabilização do solo e a presença de atividades antrópicas acarretam uma maior libertação de calor e gases poluentes para o ambiente, fazendo com que o clima esteja cada vez mais suscetível a alterações. Desta forma, tais mudanças dão origem a um fenômeno denominado de Efeito de Ilha de Calor Urbano (EICU) que ocorre quando as temperaturas em zonas urbanas são mais elevadas que nas zonas rurais, e ao Efeito da Ilha de Frio, que ocorre quando a temperatura das zonas urbanas é mais baixa face às zonas rurais. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo analisar os dados de temperatura das estações meteorológicas da cidade de Bragança, no período compreendido entre o outono de 2016 até o verão de 2019, e relacioná-los com indicadores de morfologia urbana, como o nível de ocupação do terreno, o Fator de Visão do Céu, a impermeabilização do solo, entre outros, analisando a relação da intensidade do EICU com a morfologia urbana da cidade. Os resultados mostram que o fenômeno do EICU ocorre em todas as zonas climáticas locais (ZCL) da cidade e em todas as estações do ano, com maior intensidade nas estações quentes (primavera e verão) e nas zonas climáticas que apresentam maiores valores de indicadores de morfologia, atingindo uma intensidade média de até 4°C. Com relação aos indicadores de morfologia urbana e o EICU, através dos métodos estatísticos de Pearson e Kruskal – Wallis foi possível realizar análises entre os grupos de variáveis de morfologia urbana e as tipologias de Zonas Climáticas Locais (ZCL), estabelecendo algumas relações com o EICU. Desta forma, observou-se através do método de Pearson que os indicadores possuem forte correlação e proporcionalidade entre si. Além disso, partindo para a interação entre os indicadores de morfologia e o EICU, pôde-se constatar que a correlação mais forte e significativa das variáveis com a intensidade máxima do EICU ocorre no verão e no inverno. Portanto, concluiu-se que as variáveis de morfologia urbana, traduzem diferentes padrões de interação com o clima urbano que apresentam alguma coerência na interpretação das ZCL e exercem influência na intensidade máxima do EICU, principalmente nas estações de temperaturas mais extremas, verão e inverno.

Palavras chaves: Clima urbano, morfologia, Efeito de Ilha de Calor Urbano.

ABSTRACT

The urban climate is a consequence of the interaction between two groups of variables, climatic and anthropic. The increasing urban development, over the years, with the cities verticalization, the soil sealing and the intensification of human activities leads to a greater release of heat and polluting gases to the environment, making the climate more susceptible to changes. Consequently, those changes are known to generate an effect called the Urban Heat Island Effect (UHI) that occurs when temperatures in urban areas are higher than in rural areas, many times coexisting with the Urban Cold Island Effect (UCI), which occurs when the urban areas temperatures are lower than rural areas. In this sense, the present study aimed to analyze the data for temperature collected from meteorological stations located in the city of Bragança, for the period ranging from autumn 2016 and summer 2019, in order to relate these data with urban morphology indicators, such as the land occupation level, the Sky View Factor, the soil sealing, among others, as a method to better understand the relation between the intensity of the UHI and the urban morphology. Results show that the UHI is a phenomenon that occurs in all the local climate zones (LCZ) of the city and in all seasons, with greater intensity in the hot seasons (spring and summer) and in the climatic zones that present higher values of morphology indicators, reaching an intensity up to 4°C. Regarding the interaction between urban morphology indicators and the UHI, using Pearson Correlation and Kruskal - Wallis statistical methods, it was possible to carry out analyzes between the urban morphology groups of variables and the typologies of Local Climate Zones (LCZ), establishing some relations with the EICU. Therefore, it was observed through the Pearson method that the indicators have a strong and proportionality relation with each other, such as the land occupation with the construction index, the volumetric index, the SVF and the H/W ratio and are mostly consistent with LCZ visual definition. In addition, starting with the interaction between the morphology indicators and the medium maximum UHI intensity, results show that the strongest variables correlation occurs in summer and winter. Therefore, it was concluded that the urban morphology variables, translate different patterns that present some coherence in the interpretation of the LCZ and exert influence on the maximum intensity of the UHI, especially in the seasons of extreme temperatures, summer and winter.

Key words: Urban climate, morphology, Urban Heat Island Effect.

PUBLICAÇÕES

Dissertação de mestrado apresentada em formato de resumo e pôster no VI Encontro de Jovens Investigadores do Instituto Politécnico de Bragança em Portugal, ocorrido no dia 05 de Dezembro de 2019, com o título de “Análise de clima urbano de Bragança relacionando com variáveis de morfologia urbana” (Este trabalho obteve o prêmio de melhor apresentação da sessão de Ciências Agrárias e Recursos Naturais).

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	I
LISTA DE TABELAS	II
LISTA DE SIGLAS.....	III
1. Introdução.....	1
1.1. Objetivo Geral.....	1
1.2. Objetivos Específicos.....	2
1.3. Organização de conteúdos.....	2
2. Clima Urbano e a sua relação com a Morfologia Urbana.....	3
2.1. Escalas climáticas.....	3
2.2. Variáveis climáticas	4
2.2.1. Temperatura.....	4
2.2.2. Humidade do ar.....	5
2.2.3. Vento	5
2.2.4. Radiação Solar.....	7
2.3. Efeito da Ilha de Calor Urbano (EICU).....	8
2.4. Monitorização Climática.....	10
2.5. Classificação das Zonas Climáticas Locais	11
2.6. Morfologia Urbana	15
2.7. Fator de Visão do Céu (FVC)	18
3. Materiais e Métodos	21
3.1. Apresentação da área de estudo.....	21
3.2. Rede de monitorização climática	22
3.3. Tratamento dos dados de temperatura.....	24
3.4. Escalas de aplicação dos indicadores de morfologia urbana	26
3.4.1. Zonas urbanas (subsecções)	26
3.4.2. Envolvente dos sensores meteorológicos	27
3.5. Indicadores de morfologia urbana	28
3.5.1. Fator de Visão do Céu.....	28
3.5.2. Indicadores intermediários	32
3.5.2.1. Superfície do terreno (St).....	32
3.5.2.2. Superfície global (Sg)	32
3.5.2.3. Área de implantação (Ao)	32

3.5.2.4. Área de construção (Aj)	33
3.5.2.5. Volume (V).....	33
3.5.3. Indicadores finais	33
3.5.3.1. Percentagem de ocupação do terreno (Ot)	33
3.5.3.2. Índice de construção (Ic).....	33
3.5.3.3. Número médio de pisos(Nmp)	34
3.5.3.4. Índice volumétrico (Iv).....	34
3.5.3.5. Percentagem de área permeável (Ap)	34
3.5.3.6. Percentagem de área impermeável	34
3.5.3.7. Relação H/L.....	34
3.5.3.8. Albedo médio.....	36
3.6. Distribuição dos indicadores de morfologia por metodologia.....	37
3.7. Métodos estatísticos utilizados	38
3.7.1. Correlação de Pearson.....	38
3.7.2. Kruskal – Wallis.....	38
3.8. Definição das ZCLs.....	39
4. Resultados e discussão	40
4.1. Análise do Efeito de Ilha de Calor Urbano	40
4.2. Análise dos indicadores de morfologia urbana	45
4.2.1. Por zonas urbanas	45
4.2.1.1. Ocupação do terreno	45
4.2.1.2. Índice de construção.....	46
4.2.1.3. Número médio de pisos	47
4.2.1.4. Índice volumétrico.....	48
4.2.1.5. Percentagem impermeável	49
4.2.1.6. Relação H/L.....	50
4.2.1.7. FVC	51
4.2.1.8. Análise estatística entre indicadores e ZCL	52
4.2.2. Por envolvente	56
4.3. Correlação entre indicadores e a intensidade máxima do EICU.....	60
4.4. Propostas de Intervenção	62
5. Considerações Finais	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66
WEBGRAFIA	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Formação dos ventos. Fonte: Santos (2018)	6
Figura 2 - Distribuição da Radiação solar. Fonte: Quadrado (2008).....	7
Figura 3 - Efeito da Ilha de Calor Urbano (EICU). Fonte: Adaptado de Silva, Ferreira & Santos (2016).	8
Figura 4 - Exemplo de fotografia usada para cálculo do FVC Fonte: O autor (2019).....	19
Figura 5 - Localização da área de estudo. Fonte: O autor (2019)	21
Figura 6 - Localização dos sensores meteorológicos. Fonte: O autor (2019).....	23
Figura 7 - Sensor meteorológico.	23
Figura 8 - Cilindro protetor	23
Figura 9 - Exemplo de envolvente aos sensores (50m). Fonte: O autor (2019).....	27
Figura 10 - Metodologia de captura de foto para o SVF. Fonte: O autor (2019)	29
Figura 11 - Ilustração da relação H/L. Fonte: Vallati (2016)	35
Figura 12 - Representação do EICU por estação (em °C). Fonte: O autor (2019).....	40
Figura 13 - Variação do EICU ao longo do dia e do ano nas ZCLs (em °C).	42
Figura 14 - Mapa de Ocupação do terreno. Fonte: O autor (2020).....	45
Figura 15 - Mapa de Índice de construção. Fonte: O autor (2020).	46
Figura 16 - Mapa do Número médio de pisos. Fonte: O autor (2020).....	47
Figura 17 - Mapa de Índice volumétrico. Fonte: O autor (2020).	48
Figura 18 - Mapa de impermeabilidade. Fonte: O autor (2020).....	49
Figura 19 - Mapa da relação H/L. Fonte: O autor (2020).....	50
Figura 20 - Mapa quantitativo do FVC. Fonte: O autor (2020).....	51
Figura 21 - Gráficos dos indicadores por ZCL. Fonte: O autor (2020).	54
Figura 22 - Gráficos dos valores dos indicadores por envolvente dos sensores. Fonte: O autor (2020).	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Efeitos da Ilha de Calor Urbano	9
Tabela 2 - Classificação das zonas climáticas locais (construção).....	12
Tabela 3 - Classificação das zonas climáticas locais (cobertura do solo).....	14
Tabela 4 - Alguns valores médios de albedo.....	16
Tabela 5 - Altitudes sensores meteorológicos.....	25
Tabela 6 - Valores de SVF por sensor com vegetação	30
Tabela 7 - Valores de albedo utilizados	36
Tabela 8 - Distribuição dos indicadores de morfologia por metodologia de estudo	37
Tabela 9 - Classificação zonas climáticas locais.....	39
Tabela 10 - Correlação de Pearson dos indicadores de morfologia urbana	52
Tabela 11 - Teste de Kruskal-Wallis de significância	53
Tabela 12 - Teste Kruskal-wallis com indicação de ordem de maior a menor valor.....	53
Tabela 13 - Dados indicadores por sensor.....	56
Tabela 14 - Dados indicadores por sensor, parte 2.....	57
Tabela 15 - Correlação de Pearson entre a intensidade máxima do EICU e indicadores de morfologia urbana.....	60
Tabela 16 - Correlação de Pearson entre a intensidade média do EICU e indicadores de morfologia urbana.....	61

LISTA DE SIGLAS

Ac – Área construída

Ai – Área impermeável

Aj – Área de construção

Alb - Albedo

Ao – Área de implantação

Ap – Área permeável

EICU – Efeito da Ilha de Calor Urbano

EIFU – Efeito da Ilha de Frio Urbano

FVC – Fator de Visão do Céu

Ic – Índice de construção

INE – Instituto Nacional de Estatística

Iv – Índice volumétrico

Nmp – Número médio de pisos

Ot – Ocupação do terreno

Sg – Superfície global

St – Superfície do terreno

SVF – Sky View Factor

V – Volume

ZCL – Zona Climática Local

1. Introdução

Desde o princípio da industrialização mundial, iniciada na Revolução Industrial no século XVIII, que teve como objetivo e resultado um intenso desenvolvimento industrial e urbano nas cidades, um dos temas que mais adquire relevância mundialmente são as alterações climáticas. Tal crescimento urbano, acelerado e contínuo até aos dias atuais acarretam enormes consequências para o clima urbano das cidades devido à construção de indústrias, superfícies pavimentadas e excesso de automóveis (Cavalcante & Silva, 2011).

O clima urbano é originado através de diversas alterações que as superfícies, materiais, atividades antrópicas e naturais provocam nos balanços de energia na atmosfera. Na composição do microclima, evidencia-se a relevância das variáveis climáticas e das características das zonas urbanizadas, existindo diversos componentes que irão influenciar as particularidades do clima de uma região, sendo eles naturais e antrópicos. Dentre as variáveis climáticas podem-se citar a precipitação, a radiação solar e a vegetação (Silva & Alvarez, 2015).

Por outro lado, as características das zonas urbanizadas estão relacionadas com a tipologia urbana, volumetria, os afastamentos e a taxa de ocupação das zonas, e consequentemente as variáveis climáticas que mais sofrem com a influência da ação das características urbanas são a temperatura, a humidade e os ventos (Silva & Alvarez, 2015).

Os processos de urbanização através desses diversos elementos irão originar as áreas ocupadas, as áreas livres, com vegetação ou pavimentação, com edificação densa ou não e com diversidade de materiais e cores (Marins & Roméro, 2012).

Em razão da diversidade de materiais e superfícies presentes em uma zona densamente urbanizada, existem variados padrões de reflectividade ou de albedo (relação entre a energia refletida e a energia incidente sobre um corpo). Devido a isso, a absorção da radiação por parte das superfícies será variável conforme o albedo da mesma, quanto maior o albedo mais energia a superfície irá refletir, fazendo com que mais radiação e calor sejam liberados para a atmosfera (Moreira & Nóbrega, 2011).

Portanto, os versáteis processos de urbanização correlacionados com o elevado crescimento populacional irão afetar não somente as superfícies urbanizadas, como também as condições climáticas de uma determinada cidade, interferindo na qualidade de vida da população (Martins, Bonhomme, & Adolphe, 2013).

1.1. Objetivo Geral

Esta dissertação teve como objetivo analisar a influência das características das zonas climáticas urbanas sobre o clima de Bragança, e em particular a prevalência do efeito de ilha de calor urbano (EICU). Para melhor compreender este efeito, esta dissertação teve

também como objetivo proceder à análise da relação entre variáveis quantitativas de caracterização da morfologia urbana (área construída, volume de edificações, percentagem de ocupação do terreno, índice volumétrico e entre outros indicadores, fração de zonas verdes) e os registos microclimáticos em diversos locais da cidade.

1.2. Objetivos Específicos

- Analisar a intensidade do EICU nas diferentes Zonas Climáticas Locais.
- Definir indicadores de morfologia urbana e aplicá-los em diferentes contextos de análise (Zonas Climáticas e espaços de proximidade).
- Aplicar duas escalas da análise, a escala mais ampla (subsecções) e a escala mais específica (envolvente dos sensores), na avaliação dos contextos urbanos na envolvente dos sensores.
- Compreender a influência dos indicadores de morfologia urbana no microclima de cada zona climática definida para a cidade de Bragança, incluindo o efeito de ilha de calor urbano.

1.3. Organização de conteúdos

O presente trabalho foi estruturado em quatro capítulos, a primeira, engloba o Referencial Teórico, a segunda envolve os Materiais e Métodos, seguido dos Resultados/Discussão e por último as Conclusões.

O Referencial Teórico é onde são descritos e exemplificados cada assunto a ser retratado no trabalho, tal como a definição de clima urbano, com ênfase nas classificações das variáveis climáticas, na relação entre o clima urbano e os indicadores de morfologia urbana estudados, no estudo do Efeito da Ilha de Calor Urbano e suas consequências para o meio ambiente e para a população dos centros urbanos.

Em Materiais e Métodos encontra-se a caracterização da área de estudo, informações referentes à rede meteorológica da cidade de Bragança tal como a localização e altitude dos sensores de temperatura, a forma de como os dados foram coletados e tratados para serem utilizados no trabalho e por fim, estão descritos os indicadores de morfologia urbana adotados e sua metodologia de cálculo. Na etapa dos Resultados e Discussão avaliaram-se os resultados obtidos acerca das análises sobre o clima urbano e o estudo da intensidade do efeito da Ilha de Calor Urbano da cidade de Bragança, a influência que o clima urbano recebe dos diversos indicadores de morfologia urbana adotados e uma análise comparativa entre as duas escalas adotadas nesta dissertação.

Por fim, no último tópico, as conclusões, apresentam-se as principais observações que foram feitas após a realização da dissertação.

2. Clima Urbano e a sua relação com a Morfologia Urbana

O clima urbano pode ser classificado de diversas formas, para Landsberg (1981) existem duas escalas climáticas, sendo a primeira, o clima sinóptico e a segunda, o clima local. O clima sinóptico é entendido como um clima de larga escala, de porte regional, já o clima local, se refere ao clima de uma determinada cidade ou contexto. Portanto, basicamente o clima local é o clima próprio de uma cidade e o sinóptico é o clima que a envolve como um todo, em larga escala de abrangência (Hernández, 2013).

O clima sinóptico caracteriza-se por algumas variáveis, são elas: a pressão atmosférica, a nebulosidade, a precipitação, a humidade, a velocidade do ar e o gradiente vertical de temperatura a grandes alturas. Já o clima local é caracterizado pelas seguintes componentes: concentração de poluentes, a distribuição horizontal de temperaturas, o gradiente vertical de temperatura em alturas inferiores a 10 metros e a visibilidade (Hernández, 2013).

Lowry (1977) expressou a origem do clima urbano através da seguinte equação:

$$M_{(i,t,x)} = C_{(i,t,x)} + L_{(i,t,x)} + E_{(i,t,x)}$$

em que (M) é o valor de uma variável climática, em determinada zona urbana (x), em um instante de tempo (t) e com o tipo de clima (i). (C) é o comportamento do clima local, (L) é o componente local da topografia/relevo e (E) os efeitos da urbanização local no clima.

Os elementos (i), (t) e (x) são de grande relevância, visto que o comportamento climático (C), a topografia (L) e a urbanização (E) são extremamente voláteis, sofrem mudanças constantes em dias, anos e décadas devido à interação com essas variáveis.

O valor de (C) pode ser compreendido como o elemento meteorológico que sofre alterações devido à ação dos componentes (E) e (L), mas estaria presente também na ausência de ambos, como a incidência solar e a precipitação que ocorrem independentemente da ação dessas duas componentes.

A componente (L) é um valor que exerce influência em (C) através das características do relevo, e por fim, (E) é o valor das componentes urbanas que também exercem alterações diretas nos valores de (C).

Portanto, o clima urbano resulta da interação dos fatores climáticos locais, do meio físico existente (relevo) e do grau de urbanização local.

2.1. Escalas climáticas

Segundo Andrade (2005), o clima urbano possui três de escalas climáticas, sendo elas a escala do microclima, do clima local e do mesoclima.

- Mesoclima: compreende diversos climas locais, os efeitos da mesoescala são denominados de extra-urbanos, como o regime de ventos e o relevo.

- Clima local: é determinado como clima de uma região com uma série de características, sejam elas de ocupação do solo ou topografia. O clima local pode ser compreendido por um conjunto de microclimas que ocorrem de forma regular durante um período de tempo.
- Microclima: demonstra a influência dos aspectos urbanos individuais, tais como os edifícios, ruas, praças e áreas verdes no geral.

Desta forma, as três escalas interagem e exercem influência entre si, a escala do mesoclima interfere no clima local, que conseqüentemente exerce influência no microclima, originando assim o clima urbano de determinada cidade.

2.2. Variáveis climáticas

O clima urbano é basicamente o resultado da relação de dois conjuntos de variáveis, as climáticas e as do ambiente construído. Assim, dentre as variáveis climáticas pode-se citar a temperatura, a humidade do ar, os ventos e a radiação solar como as variáveis que mais sofrem influência da morfologia urbana de uma determinada cidade (Silva & Alvarez, 2015).

2.2.1. Temperatura

Entende-se por temperatura como a quantidade de energia cinética que está presente em determinado ambiente, sendo resultado da incidência dos raios solares ou da liberação de calor de algum corpo. Tal variável é explicada através da física como uma grandeza termodinâmica que é comum a todos os indivíduos que estão em equilíbrio térmico (Pécora & Silva, 2005).

O sol emite radiação a superfície terrestre, porém, de forma desigual. Assim, tal distribuição de calor associada aos diferentes valores de albedo das superfícies e materiais presentes na Terra, acarreta uma distribuição irregular de energia solar que tem como consequência os movimentos de massa de ar e água, como as correntes marinhas, e trocas de energia através da evaporação de corpos hídricos (Romero, 2001).

A temperatura do ar é fortemente influenciada pela relação entre as taxas de aquecimento e resfriamento da superfície terrestre. A camada de ar localizada próxima a superfície da terra não age como um obstáculo à transição da radiação solar, tendo um efeito mínimo na temperatura do ar, pois a mesma depende da quantidade de calor adquirido ou perdido pela superfície terrestre (Romero, 2001).

Por outro lado, o ar quando entra em contato com uma camada que obteve ganhos de calor, é aquecido pelo fenômeno da condução (transferência de calor entre dois corpos em um mesmo meio), assim, o calor absorvido é transferido para as camadas superiores por convecção (troca de posição do ar quente com o ar frio devido às suas diferentes

densidades) e por fim as camadas mais inferiores se tornam instáveis misturando-se constantemente com as camadas mais elevadas (Romero, 2001).

2.2.2. Humidade do ar

Entende-se por humidade a quantidade de vapor d'água presente no ar atmosférico. Assim, esta presença de vapor d'água pode ser descrita quantitativamente de diversas formas, sendo a pressão de vapor, a humidade absoluta e relativa e a razão de mistura (Grimm, 1999).

O vapor d'água presente no ar é originado através da evaporação da água, seja de rios ou mares, e também da evapotranspiração da vegetação. A capacidade de o ar conter vapor d'água é proporcional com a temperatura, quanto maior a temperatura maior a capacidade do ar de reter o vapor d'água (Romero, 2001).

Desta forma, a quantidade de vapor d'água presente na atmosfera está diretamente relacionada com a temperatura do ar, visto que, quanto maior for a temperatura do ar maior será a tendência de ocorrerem os fenômenos de evapotranspiração e evaporação de corpos d'água, acarretando assim em uma maior liberação de vapor d'água para a atmosfera (Hernández, 2013).

Assim como a radiação solar, a distribuição do vapor d'água também não é uniforme, ela tende a ser maior em zonas equatoriais e menor próxima aos pólos. Com isso, pode-se concluir que a humidade varia de acordo com a região em questão e que está sujeita à mudança das estações, possuindo valores maiores no verão e menores no inverno (Romero, 2001).

Portanto, em relação à quantidade de vapor d'água presente no ar, pode-se dizer que quando o ar contém somente vapor d'água é classificado como saturado e que a humidade relativa é de 100%. Por outro lado, quando o vapor d'água contido é menor o potencial de retenção de vapor no ar atmosférico, na mesma temperatura, a humidade relativa é menor que 100% (Romero, 2001).

2.2.3. Vento

Os ventos são formados através de variações de pressão que ocorrem devido ao desequilíbrio atmosférico, que tem como causa principal a variável absorção de energia solar e da diversidade das trocas energéticas ao longo do globo terrestre (Romero, 2001).

O vento pode ser definido também como o movimento do ar em relação à superfície terrestre. É representado pelo deslocamento horizontal de uma massa de ar, devido às variações de pressão atmosférica, quando duas massas de ar com diferentes densidades e pressões se unem (Ataíde *et al.*, 2015).

Portanto, forma-se um fluxo de ar da região com a maior pressão atmosférica para a região de menor pressão (Figura 1), até que as ambas as massas se estabilizem formando o que se entende como vento (Ataíde *et al.*, 2015).

Portanto, os ventos são basicamente correntes de convecção na atmosfera que tendem a igualar o aquecimento e pressão diferencial em determinada zona. Assim, o diferencial de pressão ou de temperatura entre dois locais na atmosfera gera um fluxo de ar que é direcionado das regiões de baixa pressão para as regiões de alta pressão, que juntamente com o movimento de rotação da Terra determinará a próxima circulação geral da atmosfera (Romero, 2001).

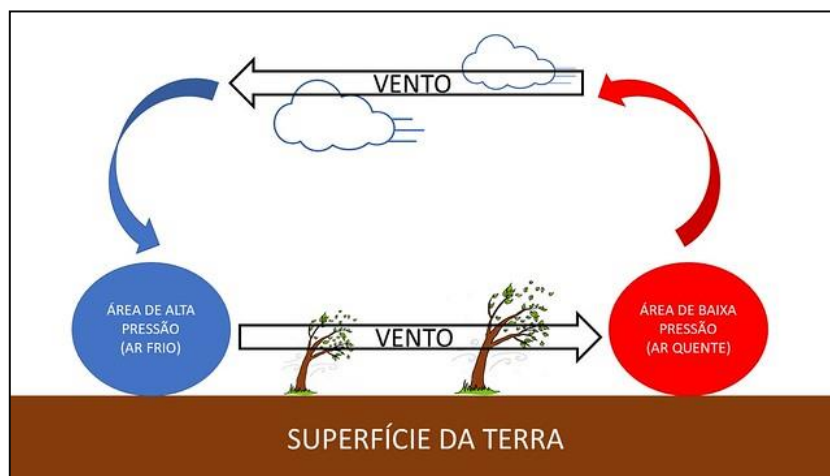


Figura 1 - Formação dos ventos. Fonte: Santos (2018)

A Terra em sua porção de máximo aquecimento, localizada entre os trópicos, o ar se expande ao aquecer, diminuindo sua pressão, assim, é deslocado em direção às zonas mais frias do globo terrestre, os pólos. Já o ar mais frio e conseqüentemente mais pesado, é direcionado para o Equador (Romero, 2001).

Um dos fatores que influencia na dinâmica de formação e velocidade dos ventos é a altitude. Zonas de baixa para elevada altitude, como vales, acarretam um fenômeno denominado de canalização dos ventos, onde as correntes de ar se estreitam aumentando consideravelmente a velocidade dos ventos. Além disso, zonas laterais de colinas e no inferior de encostas também possuem a tendência de elevarem a velocidade do vento naquela região (Ataíde *et al.*, 2015).

Por outro lado, os ventos interferem na dinâmica térmica da atmosfera, visto que contribui para o fenômeno de convecção. Desta forma, os fluxos de ar durante o inverno, por exemplo, são considerados negativos, visto que, irá contribuir para um arrefecimento da temperatura em determinado período de tempo, já no verão, tal fenômeno é considerado benéfico (Hernández, 2013).

Os ventos são de suma importância para o controle da temperatura e da humidade, ou seja, quando a temperatura e a humidade estiverem elevadas a ação dos ventos contribui para um aumento do conforto térmico, visto que, o movimento de ar gera uma diminuição nas diferenças de temperatura no microclima. Além disso, favorece a transferência de calor entre a pele das pessoas e a atmosfera, facilitando a evapotranspiração quando as temperaturas estiverem elevadas e na diminuição da temperatura do ar pelas correntes de ar frio quando as temperaturas estiverem baixas (Hernández, 2013).

2.2.4. Radiação Solar

A radiação solar é compreendida por toda radiação eletromagnética proveniente do Sol. Tal radiação é de extrema importância para a manutenção da vida no planeta por ser responsável pelos principais processos físicos, químicos e biológicos existentes. Além disso, é responsável também pela disposição de energia primária para que todos os processos terrestres ocorram de maneira adequada, como a fotossíntese (Querino *et al.*, 2006).

Além desses fatores, a energia disponível numa determinada cidade é originada através de uma combinação de fatores, incluindo o albedo. O albedo é a capacidade que cada superfície possui de absorver e refletir parte da energia que recebe, variando de acordo com o material que possui em sua composição e de acordo com o tipo de radiação que lhe é infringido, seja radiação solar direta ou difusa quando incide em alguma outra superfície, como pode ser observado na Figura 2 (Querino *et al.*, 2006).

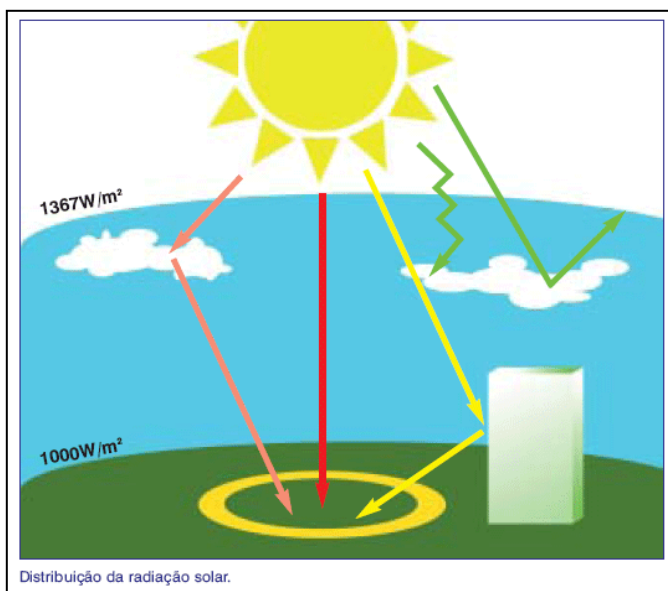


Figura 2 - Distribuição da Radiação solar. Fonte: Quadrado (2008)

2.3. Efeito da Ilha de Calor Urbano (EICU)

O termo Efeito da Ilha de Calor Urbano (EICU) foi usado primeiramente em 1940 e é entendido pelo maior aquecimento atmosférico de uma cidade quando comparado com a sua envolvente (Figura 3). Este fenômeno ocorre em quase todas as cidades, independentemente do seu porte ou tipo de clima. O EICU é originado através do aquecimento da região central de uma cidade devido às edificações e à pavimentação que tende a reter a radiação solar incidida sobre ela, onde o calor absorvido pelas estruturas é liberado gradativamente depois do entardecer (Stewart & Oke, 2012).

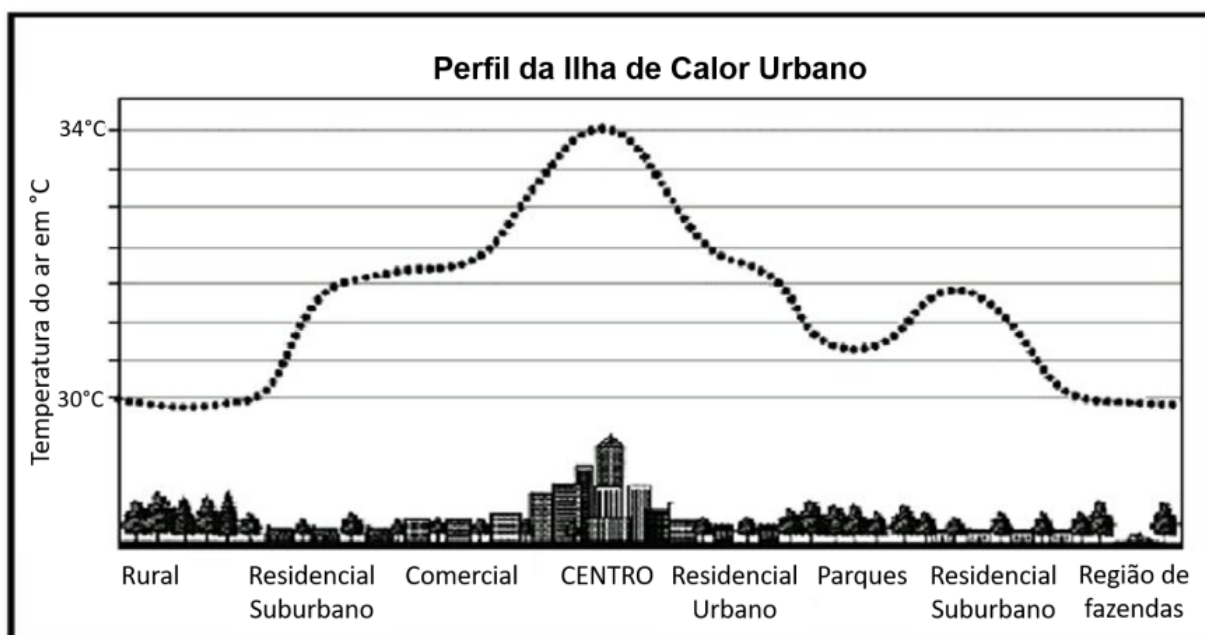


Figura 3 - Efeito da Ilha de Calor Urbano (EICU). Fonte: Adaptado de Silva, Ferreira & Santos (2016).

A geração do fenômeno do EICU ocorre através (Parsaee, Joybari, Mirzaei, & Haghghat, 2019): da absorção das ondas de radiação nos materiais urbanos existentes (cimento, asfalto, etc.); da liberação de calor através do metabolismo humano; da liberação do calor pelos edifícios; da liberação de calor dos motores a combustão e atividade industrial, fornos e fogões das residências e dos restaurantes; e da maior produção de CO₂ nos centros urbanos gerando também um aumento do efeito estufa.

As implicações do EICU podem ser compreendidas como positivas ou negativas, isso dependerá do tipo climático da cidade analisada. Perante um clima mais frio, o EICU pode ser positivo, pois irá reduzir os custos com o aquecimento das casas, proporcionará um maior conforto exterior e irá gerar condições mais favoráveis para animais e plantas (Lopes A., 2006).

Por outro lado, em condições de clima mais quente, o EICU poderá acarretar um aumento do desconforto térmico, aumentando a mortalidade por calor, a poluição e o

consumo de água, além de aumentar os custos com o funcionamento de sistemas de ar condicionado e o consumo de energia em geral (Lopes A., 2006).

Existem diversos outros efeitos desse fenômeno no balanço energético/calorífico da atmosfera, sendo exemplificados na Tabela 1.

Tabela 1 - Efeitos da Ilha de Calor Urbano

1- Maior absorção da radiação solar devido à reflexão da radiação pela verticalização das cidades	A maior absorção não se deve somente ao baixo albedo dos materiais
2- Maior retenção da radiação infravermelha nas ruas entre as edificações devido à restrição da visão do céu	A visão do céu se torna cada vez menor com edifícios altos e compactados
3- Maior absorção e menor liberação de calor pelos edifícios e pavimentação	Efeito não somente ocasionado pelas propriedades dos materiais, como também pela redução das perdas por convecção
4- Maior parte da radiação solar absorvida na superfície é convertida em calor sensível ao invés de latente.	Este efeito deve-se à substituição dos solos com vegetação por superfícies pavimentadas e impermeabilizadas, e conseqüentemente à diminuição da evaporação/evapotranspiração
5- Maior liberação de calor através da combustão de combustíveis nas atividades urbanas	O metabolismo humano também libera calor, porém, é um pequeno valor no balanceamento energético

Fonte: Adaptado de Stewart & Oke (2012)

Como é possível observar na Tabela 1, existem diversos fatores que causam o EICU. A grande maioria dessas causas está relacionada à irradiação de radiação solar, e sua absorção e reflexão pelos edifícios e pela pavimentação (Stewart & Oke, 2012).

Tal fenômeno é sentido com maior intensidade durante a noite, quando a radiação absorvida pelas estruturas começa a ser dissipada, alcançando o maior valor antes do amanhecer. Num efeito complementar, durante as primeiras horas da manhã, a temperatura na cidade é habitualmente mais baixa do que a sua envolvente pelo fato das edificações dificultarem a incidência dos raios solares, este fenômeno é conhecido como Efeito de Ilha de Frio Urbano (EIFU) (Lopes A., 2006).

Existem diversos fatores que influenciam o EICU, que podem ser caracterizados como controláveis (Fator de Visão do Céu e as edificações) e incontroláveis (estações do ano, velocidade do vento e a obstrução pelas nuvens) e podem também ser categorizados como variáveis de efeito permanente (áreas verdes, o tipo de material de construção, pavimentação e o fator de visão do céu), temporário (incidência/velocidade dos ventos) ou de forma cíclica (radiação solar e a emissão de calor pelas pessoas) (Rizwan, Dennis, & Chunho, 2008).

Em relação à amenização do EICU, as medidas devem basear-se na redução do armazenamento de calor, através do aumento da refletividade das superfícies (aumentando o albedo), assim, podem-se citar as seguintes medidas (Viveiros, 2017):

- Aumento de áreas verdes, gerando, entre outros, um aumento da quantidade de sombras, libertando vapor de água (evapotranspiração), incorporando a radiação de pequeno comprimento de onda nos processos fotossintéticos (calor latente), contribuindo assim para o aumento da humidade relativa do ar e redução das temperaturas.
- Telhados e paredes verdes: implantação de solo e vegetação nos telhados de edificações.
- Implantação de pavimentação refletora (aumento da reflectância do pavimento e consequentemente diminuição da temperatura de superfície).

2.4. Monitorização Climática

Os estudos climáticos, de uma forma geral, dependem de uma série de fatores para sua análise, sendo um deles, a monitorização climática. Tal fator permite analisar e quantificar dados meteorológicos para que possam ser utilizados em diversos estudos. Com isso, os dados meteorológicos são utilizados com o objetivo de verificar e registrar as condições meteorológicas de um determinado local e seu progresso, com a finalidade de se caracterizar o clima de uma determinada localidade (AEMET, 2011).

Tendo em vista ao estudo de dados meteorológicos de diversas regiões, tornou-se necessário estabelecer critérios e parâmetros internacionais de procedimento para as estações de medição de variáveis climáticas (AEMET, 2011).

Segundo Oke (2006), a primeira etapa deve consistir em estabelecer os locais a serem instaladas as estações climáticas baseado na natureza física do terreno em questão, realizando uma classificação de zonas climáticas locais. Tais zonas podem ser classificadas com base nas características da estrutura urbana, cobertura do solo, materiais de construção e metabolismo.

Em seguida, é necessário analisar o mapa, imagens e fotografias do local a ser estudado, com o objetivo seleccionar locais possíveis para instalação de sensores meteorológicos. Posteriormente, é necessário identificar áreas suficientemente homogêneas, sem grandes anomalias estruturais, como a existência de edifícios muito altos em regiões com uma maior presença de edifícios de pequeno porte (Oke, 2006).

Além dos fatores mencionados, para ser possível reduzir ainda mais a interferência nos dados a serem amostrados, é necessário que os sensores sejam posicionados de acordo com a angulação de nascer e pôr do Sol, o que no hemisfério norte pressupõe que o mesmo esteja orientado a sul. Tal prática tem a finalidade de evitar que o suporte dos

sensores sobre o equipamento, interferindo na medição dos dados meteorológicos (Oke, 2006).

2.5. Classificação das Zonas Climáticas Locais

Segundo Rolim *et al* (2007) com o objetivo de analisar e definir os climas de diferentes localidades foram criados sistemas de classificações climáticas, que englobam diversos elementos climáticos simultaneamente, facilitando a propagação de informações e análises posteriores para diferentes objetivos. Esta classificação é muitas vezes referida como Zonas Climáticas Locais (ZCLs) ou Zonas Climáticas Urbanas.

Para um sistema de classificação de zonas climáticas eficiente ser desenvolvido, o mesmo deve abranger alguns fatores importantes, como (Stewart & Oke, 2012):

- Possuir uma nomenclatura simples e lógica, facilitando a aceitação e entendimento do sistema;
- Ser de fácil transferência de informações do mundo real para o sistema;
- Simplificar os objetos e as áreas de estudo e, em seguida, gerar relatórios sobre suas propriedades e relações.

Stewart e Oke (2012) desenvolveram uma classificação simples e genérica para as zonas urbanas e rurais das cidades, com o objetivo de facilitar o posicionamento dos instrumentos meteorológicos. Assim, a classificação abrange dez regiões homogêneas chamadas de zonas climáticas urbanas (ZCU) que são segregadas pelo tipo de construção e tipo de cobertura do solo, variando desde lugares intensamente desenvolvidos até locais com uma menor urbanização, conforme é possível observar nas Tabela 2 e Tabela 3.

As zonas climáticas urbanas de Stewart e Oke (2012) foram baseadas em cinco grandes classes. Com isso, tais classes foram definidas como, a estrutura urbana (edifícios, dimensões das ruas), a pavimentação (permeabilidade), a fabricação (materiais), o metabolismo (atividade biológica humana) e o potencial de mudança do clima superficial (micro-clima).

Tabela 2 - Classificação das zonas climáticas locais (construção)

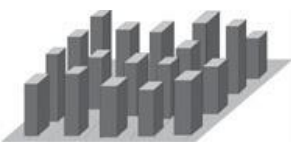
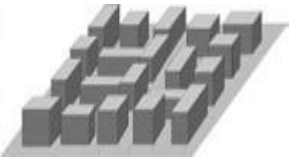
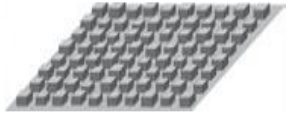









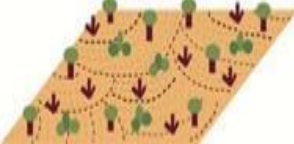




Tipos de construção		Definição
Edificações altas e compactadas		Densa presença de edifícios altos. Pouca ou nenhuma árvore. Cobertura do solo pavimentada. Materiais de construção em concreto, aço, pedra e vidro.
Edificações médias e compactadas		Densa mistura de edifícios de altura média (3 a 9 andares). Pouca ou nenhuma árvore. Cobertura do solo pavimentada. Materiais de construção em pedra, tijolo, telha e concreto.
Edificações baixas e compactadas		Densa mistura de edifícios baixos (1 a 3 andares). Pouca ou nenhuma árvore. Cobertura do solo pavimentada. Materiais de construção em pedra, tijolo, telha e concreto.
Edificações altas e espaçadas com presença vegetação		Edifícios altos e espaçados. Abundância de pavimentação permeável (plantas baixas, árvores dispersas). Materiais de construção em concreto, aço, pedra e vidro.
Edificações médias e espaçadas com presença de vegetação		Edifícios médios e espaçados (3 a 9 andares). Abundância de cobertura permeável (plantas baixas, árvores dispersas). Materiais de construção em betão/cimento, aço, pedra e vidro.
Edificações baixas e espaçadas com presença de vegetação		Edifícios baixos e espaçados (1 a 3 andares). Abundância de cobertura permeável (Vegetação herbácea, árvores dispersas). Materiais de construção em madeira, tijolo, pedra, telha ou betão/cimento.

Tabela 2 (cont.) - Classificação das zonas climáticas locais (construção)

Tipos de construção		Definição
Edificações baixas e compactadas sem pavimentação		Edificações densas de um único andar. Pouca ou nenhuma árvore. Cobertura do solo compactada. Materiais de construção leves (ex. madeira e estruturas metálicas leves).
Edificações largas e espaçadas		Edificações baixas, largas e espaçadas (1 a 3 andares). Pouca ou nenhuma árvore. Cobertura do solo pavimentada. Materiais de construção em aço, concreto, metal e pedra.
Edificações escassas e em meio natural		Edificações baixas e espaçadas. Abundância de cobertura de terra permeável (plantas baixas, árvores dispersas).
Indústria pesada		Indústria pesada de médio porte. Pouca ou nenhuma árvore. Terrenos cobertos principalmente pavimentados ou compactados. Materiais de construção em metal, aço e concreto.

Fonte: Adaptado de Stewart & Oke (2012)

Tabela 3 - Classificação das zonas climáticas locais (cobertura do solo)

Tipos de cobertura do solo		Definição
Árvores densas		Paisagem composta de árvores de folhas caducas e/ou perenes. Solo permeável. Espaços Florestais, cultivo de árvores ou parque urbano.
Árvores espaçadas		Paisagem ligeiramente arborizada de árvores de folhas caducas e/ou perenes. Solo permeável. Florestais, de cultivo de árvores ou parque urbano.
Arbustos e sem pavimentação		Espaço aberto com predomínio de vegetação arbustiva. Solo permeável (solo nu ou areia). Matos naturais ou espaços agrícolas.
Gramíneas		Paisagem com predominância de plantas herbáceas. Sem árvores. Prados naturais, solos agrícolas ou parque urbano.
Pavimentação		Paisagem pavimentada. Poucas ou nenhuma árvores ou plantas. Deserto natural (rocha) ou infraestruturas de transporte urbano.
Areia		Cobertura de areia. Poucas ou nenhuma árvores. Deserto natural ou espaços agrícolas.
Água		Grandes corpos d'água abertos, como mares e lagos, ou pequenos corpos, como rios, reservatórios e lagoas.

Fonte: Adaptado de Stewart & Oke (2012)

2.6. Morfologia Urbana

As mudanças climáticas estão diretamente associadas aos efeitos de transformação de energia que acontecem em áreas urbanas. Tais transformações ocorrem em função da morfologia, das propriedades térmicas dos materiais e da produção de calor antrópico de cada região. Com isso, tem-se como consequência uma redução nas taxas de arrefecimento evaporativo e convectivo devido à impermeabilização do solo, à diminuição de áreas com vegetação e à redução da velocidade dos ventos pelo aumento da rugosidade superficial urbana (Assis, 2005).

Quando a morfologia urbana de um determinado local é alterada e as superfícies são “verticalizadas”, ocorre um aumento da absorção de radiação solar e uma diminuição da transferência de calor por convecção, gerando assim, uma redução na perda de calor por ondas de grande comprimento, visto que, o Sol irradia ondas de curto comprimento e ao refletirem em edificações se transformam em ondas de grande comprimento (Souza, Tente, Giunta, & Nakata, 2010).

Além disso, é notável que a influência das características urbanas no comportamento climático de uma região pode variar muito. Tal variação pode ocorrer devido ao tipo de clima da região e da sua envolvente, com áreas urbanas ou rurais, o tipo de relevo e a interferência de grandes massas d'água (Assis, 2005).

As propriedades físicas dos materiais que estão presentes numa zona urbana ou rural estão diretamente relacionadas com a quantidade de energia térmica que é absorvida e refletida pelas estruturas em direção a atmosfera, colaborando para que as temperaturas se elevem (Carvalho, 2001).

Para a continuação desse estudo, é necessário entender um elemento conhecido como albedo, que é a proporção de radiação recebida e refletida por uma superfície (Romero, 2001).

O albedo é responsável pela absorção e retenção do calor irradiado em direção a superfície terrestre. Assim, quanto maior o albedo, maior será a energia refletida de uma superfície terrestre de volta para a atmosfera, mantendo o planeta em equilíbrio energético. No entanto, quanto menor o albedo, maior será a absorção

e retenção de calor pelas superfícies, com isso, zonas densamente urbanizadas tendem a apresentar temperaturas mais elevadas que zonas rurais em determinadas horas do dia (Taha, Sailor & Akbari, 1992).

Conforme se pode observar na Tabela 4, o asfalto, por ter um albedo mais baixo, tende a reter muito mais energia que uma superfície composta de gramíneas. Portanto, a temperatura em áreas mais urbanas, com mais pavimentação (asfalto), tende a ser mais elevada que em áreas rurais cobertas por vegetação. Por outro lado, espaços com vegetação, embora apresentem um valor de albedo próximo ao do asfalto, porém, essa radiação é convertida em grande medida em calor latente, sendo incorporada no processo de fotossíntese, ao contrário do asfalto que liberta muita dessa energia de volta à atmosfera na forma de calor sensível.

Tabela 4 - Alguns valores médios de albedo

Superfície	Albedo
Tinta branca	0,80
Tijolos	0,30
Solo seco	0,30
Betão	0,22
Gramíneas	0,22
Calçadas/passeio	0,20
Solo molhado	0,175
Florestas	0,135
Aço corrugado	0,130
Asfalto	0,125
Vidro limpo	0,08

Fonte: Adaptado de Hernández (2013)

A estrutura física das cidades afeta diversas variáveis como: o fluxo de ar, o balanço das ondas de radiação solar e o transporte de calor atmosférico. Já a pavimentação altera: o albedo médio de uma região, a disponibilidade de água e a capacidade de arrefecimento e aquecimento do solo. Portanto, entende-se que estas duas variáveis estão diretamente relacionadas, regiões com alta concentração de

edifícios possuem mais áreas pavimentadas e conseqüentemente um menor albedo, retendo mais radiação solar (Stewart & Oke, 2012).

Além do albedo, outros fatores influenciam diretamente no clima da cidade, como a altura dos edifícios. Edifícios altos funcionam como uma espécie de barreira para os ventos, assim, zonas com alta concentração desses edifícios, tendem a possuir temperaturas mais elevadas, não somente pela altura dos edifícios, mas também pelo fato de possuírem em sua construção materiais com baixo albedo (Ho, Ren, & Ng, 2015).

Assim, quando a velocidade dos ventos é reduzida, aumenta a retenção de calor durante o dia e em função das características dos materiais ocorre uma lenta libertação deste calor ao longo da noite, sendo este um dos fatores responsáveis pela formação de ilhas de calor noturnas (C. D. C. M. Ferreira, 2014).

A retenção e liberação de calor pelas superfícies são alteradas conforme a morfologia urbana é modificada. O aumento da impermeabilização do solo e da verticalização das edificações faz com que uma quantidade grande de calor seja acumulada, além disso, menor será a fração visível do céu, acumulando assim o calor absorvido, diminuindo a dissipação de calor nos ambientes urbanos e elevando as temperaturas (Rocha, Souza, & Castilho, 2011).

Mesmo com a verticalização e ocupação das zonas urbanas gerando uma dissipação de calor durante o período noturno, tais estruturas podem ser benéficas durante o dia, pois possibilitam sombreamento durante as horas de Sol. Zonas com uma menor concentração de edifícios, baixa verticalização e uma maior fração do céu disponível fazem com que tais espaços recebam uma maior quantidade de radiação solar direta durante o dia, fazendo com que as trocas de calor entre a superfície terrestre e atmosférica ocorram da maneira adequada, evitando assim a ocorrência do EICU em maior intensidade (Rocha *et al.*, 2011).

Portanto, pode-se concluir que a tipologia urbana de uma cidade tem enorme contribuição na formação do EICU, principalmente em zonas com uma maior

densidade de edificações, gerando forte influência no aumento da intensidade do EICU (Nóbrega, dos Santos, & Moreira, 2016).

2.7. Fator de Visão do Céu (FVC)

O Fator de Visão do Céu (FVC) ou *Sky View Factor (SVF)* é uma variável responsável por representar uma relação geométrica da Terra com o céu, constituindo-se uma estimativa da área visível de abóbada celeste. Assim, o FVC representa a fração do céu que está disponível para que as trocas de calor e o balanço energético ocorram da maneira adequada (Souza, Tente, Giunta & Nakata, 2010).

O FVC possui valores entre 0 (zero) e 1 (um), sendo que quanto mais próximo de 1 corresponde à uma área sem obstruções de visualização que esteja no campo de visão do ponto escolhido para captura e o céu. Tal fator é importante pelo fato do céu apresentar uma temperatura inferior a da superfície terrestre, sendo fundamental para o balanço de energia do planeta (Ferreira & Fialho, 2016)

Por definição geométrica, qualquer componente urbana ou rural, como árvores e edifícios, que pertençam ao plano de visão do ponto que será calculado o FVC representa uma obstrução do céu (Souza *et al.*, 2010).

O FVC pode ser calculado através de diversas metodologias, como, por fotografia utilizando uma lente de olho de peixe que permite uma visão de 180° (Figura 4), por gráficos, por processamento de imagens ou por modelação tridimensional (Ferreira & Fialho, 2016).



Figura 4 - Exemplo de fotografia usada para cálculo do FVC Fonte: O autor (2019)

A variação dos valores de FVC ao longo de uma cidade traduz diferentes condições de incidência e armazenamento de energia. Uma determinada região com FVC igual a 1, significa que recebe mais radiação de pequeno comprimento de onda durante o dia e emite uma maior fração de radiação de grande comprimento de onda durante a noite. Por outro lado, um ambiente densamente urbanizado, recebe menos radiação de pequeno comprimento de onda, devido à presença das edificações, recebendo uma maior fração de radiação de grande comprimento de onda, através da reflexão nos edifícios, para além de reter uma maior quantidade de energia no período nocturno (Collischonn & Ferreira, 2015).

Portanto, zonas mais edificadas e pavimentadas estão propensas a reter mais calor durante o dia e a libertá-lo gradualmente ao anoitecer, visto que, ao longo do dia as trocas de calor entre a superfície terrestre e atmosférica é prejudicada pelas obstruções do céu existentes, como as edificações (Collischonn & Ferreira, 2015).

rio Fervença que percorre toda a cidade e exerce influência na população e o rio Sabor que se localiza na região periférica exercendo pouca influência sobre o cotidiano da cidade (Gonçalves *et al.*, 2014).

Com relação ao clima da cidade, Bragança é marcada pela elevada amplitude térmica (variação entre as temperaturas máximas e mínimas) anual e mensal. Já em relação à precipitação, Bragança tem características de clima mediterrâneo com uma elevada precipitação no inverno e menor no verão, a radiação solar segue o mesmo sentido da precipitação, sendo maior no mês de julho e menor em dezembro (Gonçalves *et al.*, 2014).

Portanto, através dessa análise, pode-se concluir que baseado na classificação de Köppen, a cidade de Bragança está incluída no tipo de clima Csb que corresponde a um clima temperado com invernos mais suaves (classe C), verão seco (subclasse Cs) e verão longo e fresco (sub-subclasse Cb) (Gonçalves *et al.*, 2014). Por último, Bragança possui uma temperatura média anual de 12,3°C e uma temperatura média mínima de 6,7°C (AEMET, 2011).

3.2. Rede de monitorização climática

A rede de monitorização climática de Bragança é composta por 23 sensores meteorológicos, distribuídos por toda a cidade de Bragança (Figura 6) em zonas urbanas e rurais que monitorizam a temperatura e humidade do ar, sendo que em dois locais é adicionalmente monitorizada a velocidade e direção do vento.

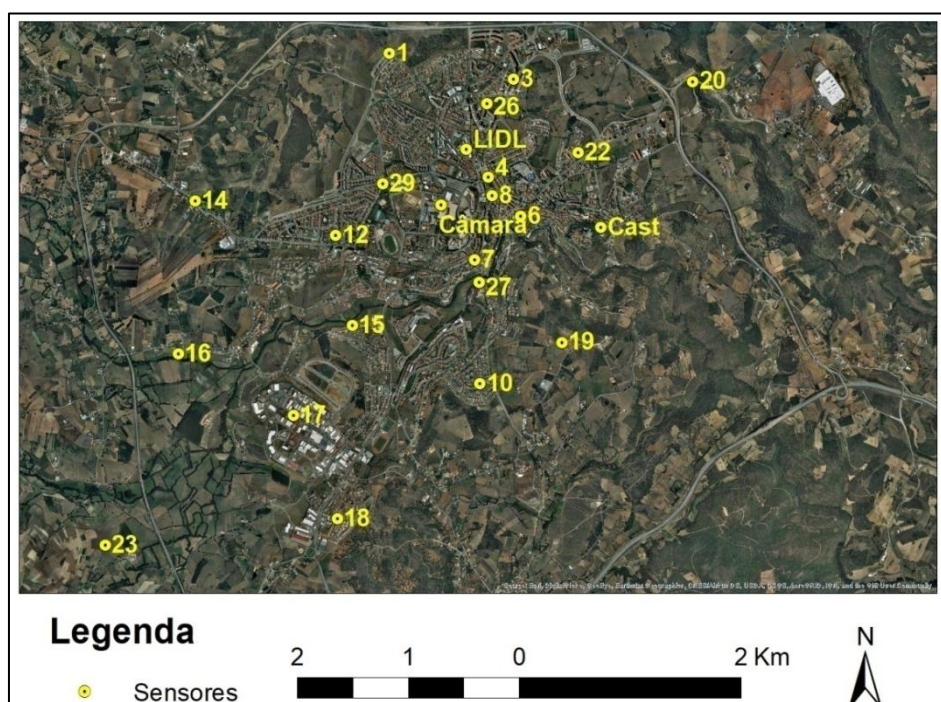


Figura 6 - Localização dos sensores meteorológicos. Fonte: O autor (2019)

As leituras de temperatura e humidade do ar são realizadas pelo mesmo equipamento (Tinytag TGP-4500) com capacidade de medir temperaturas de -25°C até 85°C e humidade de 0 até 100% (Figura 7), além disso, para proteção desse equipamento é utilizado um cilindro de PVC de cor branca, cor que evita um aquecimento em excesso do sensor para não adulterar os dados a serem amostrados (Figura 8).



Figura 7 - Sensor meteorológico. Fonte: O autor (2019).



Figura 8 - Cilindro protetor de PVC. Fonte: O autor (2019).

Os dados são registados de 10 em 10 minutos, e os sensores tem capacidade de armazenamento de aproximadamente 100 dias de dados. Aproximadamente a cada dois meses é realizada uma coleta desses dados para validação e arquivamento. Para além dos dados de temperatura e humidade, medidos a cada 10 minutos, são também registradas as temperaturas máximas, mínimas e médias, em cada sensor.

Os dados presentes neste estudo correspondem ao período compreendido entre o início do outono de 2016 até o final do verão de 2019.

3.3. Tratamento dos dados de temperatura

No presente trabalho foram utilizadas as temperaturas diárias, máximas, mínimas e médias diárias, mensais e por estação dos sensores meteorológicos instalados na cidade, para isso, foram realizadas recolhas de dados e os mesmos foram registados no programa Microsoft Excel, com valores registados de modo contínuo desde 2011, porém, para este estudo, sendo apenas utilizados os dados do outono de 2016 até o verão de 2019, totalizando três anos de análise. A escolha deste intervalo temporal permite assumir a correspondência entre as condições do contexto urbano estudadas e os dados de clima urbano analisados.

Alguns dados de temperatura, do período analisado, estavam omissos, isto se deveu a diferentes fatores, como sejam o facto de alguns sensores terem ficado sem bateria, terem bloqueado ou tido outro tipo de avaria. Com isso, foi necessária a utilização do software *SPSS Statistics*, que foi utilizado primeiramente para analisar percentagem de dados omissos de cada sensor e em seguida, através da ferramenta de imputação múltipla por aplicação de uma fórmula de regressão linear utilizando dados de temperatura anteriores e posteriores do período omissos e com base nos dados de sensores próximos, foram adicionadas as temperaturas que estavam omissas.

Com isso, notou-se que o sensor 27 foi o que apresentou a maior percentagem de dados omissos, aproximadamente de 47%, seguido pelo sensor 16 com 35% e os demais 21 sensores apresentaram valores abaixo dos 18%. Portanto,

com o objetivo de manter a confiabilidade dos dados, os sensores 16 e 27 foram retirados do estudo devido à alta taxa de dados omissos, prosseguindo os estudos com 21 dos 23 sensores disponíveis.

Depois de realizada a imputação dos dados omissos, foi necessário realizar uma correção dos dados de temperatura para a análise do EICU, visto que, a altitude é uma variável climática que exerce influência no EICU, assim, optou-se por retirar da análise esta variável para ser possível analisar somente a influência urbana no efeito. Desta forma, a correção foi baseada nas altitudes dos 21 sensores do estudo, procurando atenuar o efeito da complexidade topográfica (grandes variações de altitudes) da cidade nos dados da temperatura, procurando concentrar a análise nos efeitos do contexto urbano. Tal correção foi baseada na altitude de cada sensor (Tabela 5) nivelando os pontos à cota de 680 metros, o nível médio de Bragança.

Tabela 5 - Altitudes sensores meteorológicos

Ponto	Altitude (m)
1	695
26	657
3	651
4	690
Câmara	704
6	657
7	679
8	680
10	732
Cast	651
12	701
29	715
14	730
15	680
17	720
18	742
19	814
20	579
LIDL	692
22	641
23	725

A correção de dados foi baseada nas diferenças de temperatura e altitude de dois sensores, 19 e 23. A escolha destes sensores se deveu ao fato de possuírem uma envolvente semelhante (rural), evitando assim uma interferência de efeitos urbanos nas correções dos dados.

Como base nesta correção, calculou-se um gradiente térmico vertical médio horário para cada mês dos anos de análise e, em seguida, aplicou-se uma curva polinomial do 5º grau servindo de base para o cálculo do gradiente vertical de temperatura horário.

A correção da temperatura baseada na altimetria foi realizada com objetivo de retirar dos dados o efeito da altitude. Assim, após o cálculo dos dois gradientes mencionados anteriormente, a correção foi realizada a partir da equação abaixo.

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

Onde: T_{final} é a temperatura após correção (°C);

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

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

H é a altitude do sensor (m).

3.4. Escalas de aplicação dos indicadores de morfologia urbana

Para o cálculo e análise dos indicadores de morfologia urbana foram adotadas duas escalas/metodologias: zonas urbanas (subsecções) e envolvente dos sensores meteorológicos, sendo a primeira mais ampla e a segunda mais detalhada.

Através da análise destas duas metodologias, é possível realizar uma comparação dos dados por aproximação a duas escalas climáticas: à escala de zonas climáticas locais (zonas urbanas/subsecções): e à escala do microclima (envolvente dos sensores).

3.4.1. Zonas urbanas (subsecções)

Nessa primeira metodologia, sendo uma escala mais ampla, a cidade de Bragança foi segmentada em diversas zonas urbanas ou subsecções.

Desta forma, tais zonas urbanas foram definidas tendo por base as subsecções estatísticas como definidas pelo Instituto Nacional de Estatística de Portugal (INE), pelas quais se subdividiu a cidade em diversas unidades contendo dados alfanuméricos e geográficos. Com isso, o cálculo dos indicadores foi baseado na área de cada subsecção existente dentro do limite urbano da cidade de Bragança.

3.4.2. Envolvente dos sensores meteorológicos

O outro âmbito de análise, depois do das subsecções (zonas urbanas) corresponde à envolvente dos sensores meteorológicos. Assim procedeu-se a uma análise numa escala mais detalhada, na qual aplicar novamente os indicadores de análise da morfologia urbana.

Com isso, para ser possível relacionar diretamente a morfologia urbana da cidade de Bragança e o microclima, optou-se por definir uma envolvente para cada um dos 21 sensores de temperatura, correspondente a um raio de 50 metros (Figura 9).



Figura 9 - Exemplo de envolvente aos sensores (50m). Fonte: O autor (2019)

Para definir e aplicar esse raio foi utilizada a ferramenta *Buffer* do programa ArcMap, que aplica uma auréola na envolvente dos sensores de temperatura de acordo com o raio definido, de 50 metros.

Assim, o cálculo dos indicadores de morfologia urbana, nessa envolvente, com raio de 50 metros, foi baseado numa nova área de superfície de terreno, de aproximadamente 7830 m^2 ($A = \pi \cdot r^2$) para $r = 50$ metros.

3.5. Indicadores de morfologia urbana

Os indicadores de morfologia urbana têm como função descrever numericamente as características do espaço urbano. A sua aplicação neste trabalho pretende demonstrar, através de cálculos e análises, como diversas variáveis de morfologia urbana podem interferir no clima de uma cidade.

Os cálculos de todos os indicadores, com exceção do SVF (Saga Gis), foram realizados através do programa de Sistemas de Informações Geográficas ArcMap (ESRI), para ambas as metodologias já citadas.

Para esses cálculos, os valores de altura e número de pisos dos edifícios foram agregados, seja por subsecção ou por envolvente dos sensores, gerando um valor único por zona urbana ou envolvente.

3.5.1. Fator de Visão do Céu

O FVC conforme já foi descrito, representa a fração de céu disponível para que ocorram as trocas de calor com a atmosfera terrestre e consequentemente o balanço de energia da Terra.

O valor do FVC varia de 0 (zero) a 1 (um), sendo o valor 1 correspondente a uma área sem qualquer obstrução de visualização que se interponha entre o ponto escolhido para captura e o céu (Ferreira & Fialho, 2016).

Para o cálculo do SVF, neste trabalho, foram utilizadas duas metodologias, sendo a primeira através do uso do ArcMap juntamente com o SAGA Gis e a segunda através do processamento de imagens utilizando o Adobe Photoshop CS6.

Para a primeira metodologia mencionada, o cálculo do FVC foi realizado tendo por base um ficheiro da rugosidade do terreno calculada através da adição de dois shapes no programa de mapeamento ArcMap; o shape do modelo digital do terreno de Bragança (que constitui um modelo topográfico tridimensional); e o shape das edificações presentes na cidade com informações sobre a altura de cada edificação.

Após a geração do shape, foi utilizado o programa SAGA Gis, onde se aplicou a ferramenta de cálculo do SVF, primeiramente para uma matriz de 1x1 metro (escala) e depois calculando a média para todas as subsecções presentes na cidade de Bragança, desconsiderando os telhados. Esta primeira metodologia foi adotada somente para o cálculo do FVC dos pontos que não possuíam vegetação em seu entorno (quatorze pontos), visto que, o programa de geoprocessamento considerou somente a massa edificada para o cálculo do indicador, não contabilizando a influência da vegetação no valor de FVC.

Já para a segunda metodologia, o FVC foi calculado através do processamento de fotos capturadas a partir da utilização da lente olho de peixe, conforme a metodologia da Figura 10.



Figura 10 - Metodologia de captura de foto para o SVF. Fonte: O autor (2019)

Observa-se, na Figura 10, a posição da câmara equipada com a lente olho de peixe que é direcionada para o céu e alinhada corretamente com o auxílio de uma régua de nível.

Esta metodologia de cálculo do FVC através de captura de fotos foi utilizada para os pontos que possuem vegetação em seu entorno (sete pontos), visto que, o SAGA Gis contabiliza apenas as edificações no seu cálculo de FVC. Essa prática de captura de fotos pode ser considerada uma prática mais exata de cálculo do FVC, pois contabiliza todas as obstruções existentes (vegetação e edificações). No entanto, esta metodologia foi aplicada apenas para a análise da envolvente dos pontos de monitorização, nos restantes casos, os valores utilizados têm como limitação não considerar a vegetação presente.

Assim, para se chegar ao valor correto do FVC foi necessário realizar uma contagem de pixels nas fotos, onde os pixels pretos (vegetação, edifícios e entre outras obstruções) representam uma parcela, os pixels brancos (céu) representam outra parcela e o somatório de ambos os grupos de pixels representam o número total de pixels da fotografia.

Com isso, o cálculo do valor de FVC é feito através da equação a seguir:

$$\text{FVC} = 1 - \frac{\text{Número de pixels pretos}}{\text{Número total de pixels}}$$

Assim, o cálculo do FVC para as zonas com presença de vegetação teve como resultado os dados apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores de SVF por sensor com vegetação








Sensor	Fotos	FVC
4		0,51

Tabela 6 (cont.) - Valores de SVF por sensor com vegetação

Sensor	Fotos	FVC
8		0,18
14		0,76
19		0,71
20		0,60
26		0,47
Cast		0,25

Fonte: O autor (2019)

3.5.2. Indicadores intermediários

Para o cálculo dos indicadores finais, sendo eles a ocupação do terreno, índice de construção, número médio de pisos, índice volumétrico, percentagem de área impermeável e permeável, relação H/L e o albedo, foi necessário realizar o cálculo de algumas variáveis intermediárias, como as superfícies e as áreas.

O cálculo das superfícies do terreno (S_t) foi realizado através da ferramenta de geometria do programa ArcMap, onde foi gerada a área de cada terreno.

Os cálculos das áreas foram baseados na área de cada edifício presente na cidade, gerando a área de implantação (A_o) e a área de construção (A_j). Com isso, foram registrados o número de andares e a altura de cada edificação presente na cidade de Bragança, onde, para cada andar de cada edificação eram somados 3 metros de altura e ao final da somatória era acrescido 1 metro para a correção.

3.5.2.1. Superfície do terreno (S_t)

A superfície do terreno é a área de cada zona existente na cidade em questão (Lobo, Pardal, Correia, & Lobo, 1995).

3.5.2.2. Superfície global (S_g)

A superfície global do terreno é entendida como a superfície de um espaço territorial, sendo um bairro, cidade ou país (Lobo *et al.*, 1995). Portanto, para o cálculo da superfície global (S_g) foi necessário somar as áreas de todas as superfícies de terreno (S_t) existentes na cidade.

$$S_g = \sum S_t$$

3.5.2.3. Área de implantação (A_o)

A área de implantação das edificações é a área da base das edificações, ou seja, é a área da superfície de construção de uma casa, prédio ou indústria (Lobo *et al.*, 1995).

Com isso, pode ser calculada através do somatório da área de implantação (A_i) de cada edificação.

$$A_o = \sum A_i$$

3.5.2.4. **Área de construção (A_j)**

A área de cobertura é a área total de pisos cobertos de uma edificação, sendo baseada na área de implantação e no seu número de pisos (Lobo *et al.*, 1995).

Assim, é calculada através da multiplicação do somatório da área de implantação (A_o) das edificações pela somatória do seu número de pisos (N_p).

$$A_j = \sum A_o * \sum N_p$$

3.5.2.5. **Volume (V)**

O volume de edificações é composto pela relação entre a área de implantação (A_o) de cada edificação pela sua altura (H).

Assim, é calculado de modo aproximado, através do somatório da multiplicação da área de implantação das edificações pela altura das edificações, tendo como resultado o volume total das edificações presentes em cada subsecção.

$$V_{total} = \sum (A_o * H)$$

3.5.3. Indicadores finais

Após o cálculo dos indicadores intermediários de superfície, área e volume procedeu-se para o cálculo dos indicadores finais, sendo eles a ocupação do terreno, índice de construção, número médio de pisos, índice volumétrico, percentagem de área permeável e impermeável, relação H/L e o albedo.

3.5.3.1. **Percentagem de ocupação do terreno (O_t)**

A percentagem de ocupação do terreno ou índice de implantação é calculada através da relação da área de implantação (A_o) das edificações e a superfície do terreno (S_t) (Lobo *et al.*, 1995).

$$O_t = \frac{\sum A_o}{\sum S_t} * 100$$

3.5.3.2. **Índice de construção (I_c)**

O índice de construção (I_c) é calculado através da fração entra a área de construção (A_j) das edificações pela superfície do terreno (S_t) (Lobo *et al.*, 1995).

$$I_c = \frac{\sum A_j}{\sum S_t}$$

3.5.3.3. **Número médio de pisos (N_{mp})**

O número médio de pisos é a quantidade média de andares que cada edificação apresenta, e pode ser calculado pela fração entre a somatória da área de construção (A_j) e da área de implantação (A_o) de cada edifício (Lobo *et al.*, 1995).

$$N_{mp} = \frac{\sum A_j}{\sum A_o}$$

3.5.3.4. **Índice volumétrico (I_v)**

O índice volumétrico é a relação entre o volume dos espaços ocupados pelos edifícios e a superfície do terreno (S_t). Portanto, é calculado através da fração entre o volume das edificações (V) pela a superfície do terreno (S_t) (Lobo *et al.*, 1995).

$$I_v = \frac{\sum V}{\sum S_t}$$

3.5.3.5. **Percentagem de área permeável (A_p)**

A percentagem de área permeável foi gerada recorrendo a um shape no ArcMap onde todos os espaços verdes/permeáveis se encontravam cadastrados (dados de 2008). Essa base de dados foi atualizada e os dados permitiram calcular a área dos espaços livres permeáveis e dos espaços impermeáveis.

A percentagem de área verde é aquela que representa a fração da área coberta por superfície permeável (A_p) pela superfície do terreno (S_t).

$$A_p = \frac{\sum A_p}{\sum S_t} * 100$$

3.5.3.6. **Percentagem de área impermeável**

A percentagem de área impermeável é aquela que representa a fração da área de construção (A_o), ruas e passeios, pela superfície do terreno (S_t). Foi calculada pela diferença face à superfície permeável.

$$A_i = 100 \% - A_p$$

3.5.3.7. **Relação H/L**

A relação H/L representa a razão entre a altura média dos edifícios e a largura média das ruas (Figura 11).

Na aplicação deste indicador foi utilizado o shape do edificado da cidade, da área das subsecções (zonas urbanas), do limite da envolvente definida (50 metros) e

através do uso do ArcMap gerou-se a relação final da média da altura dos edifícios pela média da largura das ruas.

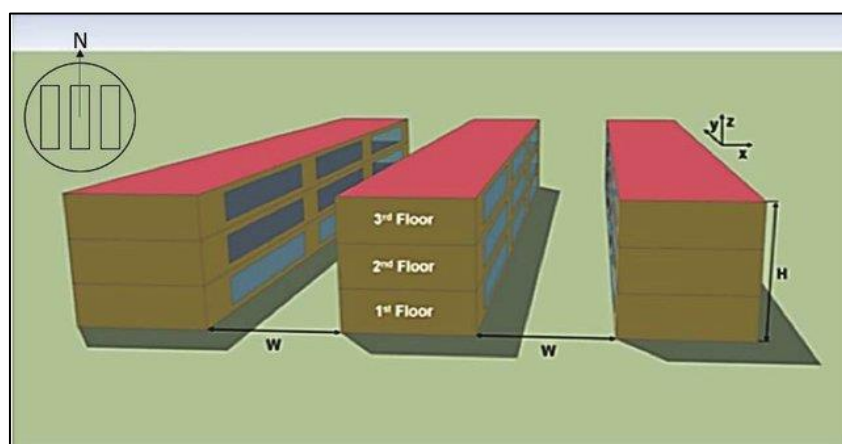


Figura 11 - Ilustração da relação H/L. Fonte: Vallati (2016)

Desta forma, para o cálculo desta relação, a variável de altura(H) foi calculada através da média da altura dos edifícios com base nos valores individuais de altura de cada edificação, já a variável de largura (L) foi calculada através da utilização da ferramenta *Euclidean distance* (ArcMap), pela qual foi possível elaborar uma matriz de distância entre edifícios, através da qual se calcularam os valores médios para o contexto de análise.

Por exemplo, uma zona urbana menos compacta (com uma menor relação H/L) tende a ser mais satisfatória do ponto de vista climático para uma cidade, pois significa que os edifícios são mais baixos e com a largura das ruas mais elevada, assim não irão interferir tanto na troca de calor nem na incidência de ventos numa determinada cidade (Ho *et al.*, 2015).

Por outro lado, uma maior relação H/L significa que há presença de edifícios altos e uma urbanização mais densa, e tal fato pode funcionar como uma espécie de “barreira de ventos” e um espaço de retenção de calor, fazendo com que esses espaços urbanos fiquem mais quentes que os demais locais (Ho *et al.*, 2015).

3.5.3.8. Albedo médio

O albedo de um determinado material ou superfície é compreendido pela razão entre a energia refletida pela energia incidente, sendo considerada uma medida indireta da quantidade de energia solar absorvida pelo material (Correia, Alvalá, Gielow, Manzi, & Souza, 2002).

Assim, através do uso do programa ArcMap, foram criados polígonos para cada superfície existente nas envolturas dos sensores (calçada/passeio, asfalto, gramíneas e floresta).

Com isso, para cada tipo de superfície foi atribuído um valor médio de albedo (Tabela 7).

Tabela 7 - Valores de albedo utilizados

Superfície	Albedo
Solo exposto (seco)	0,30
Gramíneas	0,22
Calçadas/passeio	0,20
Florestas	0,135
Asfalto	0,125

Fonte: Adaptado de Hernández (2013)

Após a atribuição dos valores de albedo, para cada superfície presente nas envolturas dos sensores, foi realizada uma média ponderada pela superfície para se ter um valor médio de albedo para cada envoltura. Assim, foi calculada uma média por unidade de superfície.

$$\text{Alb} = \frac{\sum(\text{albedo} * \text{área superfície})}{\sum \text{área superfícies}}$$

3.6. Distribuição dos indicadores de morfologia por metodologia

No presente trabalho foram ainda definidas duas escalas de aplicação dos indicadores de morfologia urbana, uma escala mais ampla por zonas urbanas (subsecções) e uma escala mais específica (por envolvente dos sensores).

A seguir, na Tabela 8, estão representados os indicadores de morfologia urbana adotados nesse estudo divididos por metodologia de aplicação, exibindo que indicadores foram calculados para cada metodologia, seja para as subsecções ou para a envolvente dos sensores meteorológicos.

Tabela 8 - Distribuição dos indicadores de morfologia por metodologia de estudo

Indicador	Subsecções	Envolvente
FVC	X	X
Percentagem de ocupação do terreno	X	X
Índice de construção	X	X
Número médio de pisos	X	X
Índice volumétrico	X	X
Percentagem de área impermeável	X	X
Relação H/L	X	X
Albedo	-	X

Fonte: O autor (2020).

3.7. Métodos estatísticos utilizados

Para ser possível analisar cada indicador de morfologia urbana adotado, suas interrelações e sua relação com as zonas climáticas locais foram realizadas algumas análises estatísticas através do software *SPSS Statistics*.

3.7.1. Correlação de Pearson

A correlação de Pearson (CP) é um método estatístico onde é definido um coeficiente de correlação linear que mede o grau de associação entre variáveis quantitativas, sendo variável de -1 até +1 e o valor p^1 . Essa variação indica o grau de proporcionalidade de uma relação, sendo ela inversamente proporcional se for negativa ou diretamente proporcional se positiva. Além disso, essa variação indica também o grau de intensidade de interação entre as variáveis, quanto mais próximo de +1 ou -1, maior é a intensidade dessa relação (Reis, 1998).

3.7.2. Kruskal – Wallis

O segundo método estatístico utilizado foi o de Kruskal - Wallis, tal método é um teste não paramétrico utilizado para comparar vários grupos de variáveis e avaliar se os valores analisados possuem ou não diferenças significativas (Reis, 1997).

¹ O valor de probabilidade ou *p value* mede o nível de significância das variáveis ou grupos de variáveis a serem analisados. Desta forma, se o valor resultante for menor que 5% ($p < 0,05$), conclui-se que existem diferenças significativas entre os grupos de variáveis analisadas e que a correlação é significativa, ou seja, quanto menor o p , maior a significância (Benjamin *et al.*, 2018).

3.8. Definição das ZCLs

A partir das definições das zonas climáticas locais de Stewart e Oke (2012), mencionadas anteriormente neste trabalho, da análise por método de observação da envolvente dos 21 sensores meteorológicos estudados e das zonas urbanas, foram atribuídas classificações para ambas as metodologias. Após a exclusão inicial de dois dos sensores, foram considerados três sensores por cada ZCL (Tabela 9), com exceção da ZCL B, que foi atribuída apenas para as subsecções por não possuírem qualquer sensor localizado nesse tipo de ZCL.

Tabela 9 - Classificação zonas climáticas locais

ZCL	Descrição	Sensores
2	Densa mistura de edifícios de altura média (3 a 9 andares). Pouca ou nenhuma árvore. Cobertura do solo pavimentada. Materiais de construção em pedra, tijolo, telha e concreto.	3, 7, 29
3	Densa mistura de edifícios baixos (1 a 3 andares). Pouca ou nenhuma árvore. Cobertura do solo pavimentada. Materiais de construção em pedra, tijolo, telha e concreto.	4, 6, 22
5	Edifícios médios e espaçados (3 a 9 andares). Abundância de cobertura permeável (plantas baixas, árvores dispersas). Materiais de construção em betão/cimento, aço, pedra e vidro.	10, 12, 18
8	Edificações baixas, largas e espaçadas (1 a 3 andares). Pouca ou nenhuma árvore. Cobertura do solo pavimentada. Materiais de construção em aço, concreto, metal e pedra.	Câmara, 17, LIDL
9	Edificações baixas e espaçadas. Abundância de cobertura de terra permeável (plantas baixas, árvores dispersas).	1, 14, 15
A	Paisagem composta de árvores de folhas caducas e/ou perenes. Solo permeável. Espaços Florestais, cultivo de árvores ou parque urbano.	8, Cast, 26
B	Paisagem ligeiramente arborizada de árvores de folhas caducas e/ou perenes. Solo permeável. Florestais, de cultivo de árvores ou parque urbano.	Aplicada apenas nas subsecções
C	Espaço aberto com predomínio de vegetação arbustiva. Solo permeável (solo nu ou areia). Matos naturais ou espaços agrícolas.	19, 20, 23

Fonte: O autor (2020).

4. Resultados e discussão

4.1. Análise do Efeito de Ilha de Calor Urbano

A análise da intensidade do EICU foi baseada nas diferenças de temperaturas das zonas climáticas locais (ZCLs) urbanas frente à média dos valores das zonas rurais. Portanto, foi calculada a diferença entre as temperaturas médias das zonas climáticas urbanas 2, 3, 5, 8, 9 e A e a média de temperatura da zona rural C ($\Delta_{\text{urbana}} - \text{rural}$).

A Figura 12 representa a variação das temperaturas médias horárias do EICU por estação nas diferentes ZCLs. É possível observar na ZCL 2, a mais densamente urbanizada, uma maior amplitude e consequentemente uma maior intensidade do EICU, principalmente no verão. Essa elevada amplitude está relacionada com a tendência das edificações e da pavimentação de reterem o calor irradiado com o passar das horas do dia, fazendo com que essa área comece a aquecer, elevando as temperaturas e formando o Efeito da Ilha de Calor Urbano com maior intensidade após o pôr do sol até um pouco antes do amanhecer, mas também está relacionada com a ocorrência da Ilha de Frio Urbana durante o dia.

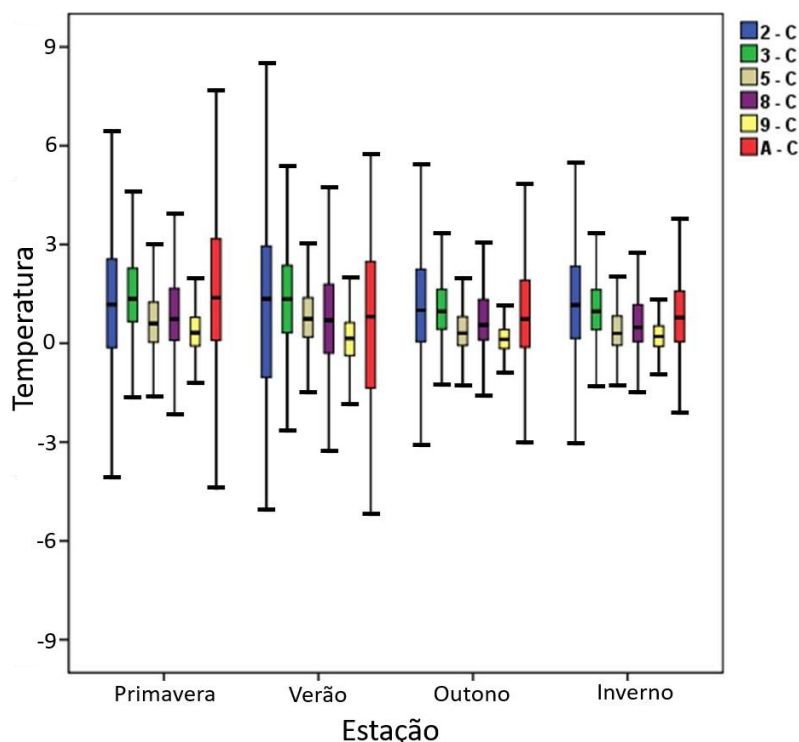


Figura 12 - Representação do EICU por estação (em °C). Fonte: O autor (2019)

A zona climática local A, representada por uma paisagem arborizada com árvores caducifólias e/ou perenes em áreas urbanas, também apresenta grande amplitude nos valores de intensidade do EICU. Tal fato ocorre devido ao efeito de sombra que as árvores exercem sobre a superfície terrestre nas estações mais quentes, primavera e verão. Por outro lado, nas estações mais frias, outono e inverno, devido à ausência de folhas, a área está mais sujeita a receber radiação solar direta fazendo com que a amplitude dos valores de EICU diminua.

As menores amplitudes da intensidade do EICU ocorrem na ZCL 9, que representa um arranjo de pequenos ou médios edifícios localizados em um ambiente periurbano, ou seja, um espaço de transição entre uma zona urbana e rural, com amplas superfícies permeáveis e vegetação na maior parte composta por gramíneas, ocorrendo uma baixa diferença de temperatura entre ambas as zonas.

A evolução do Efeito da Ilha de Calor Urbano ao longo do dia para os meses do ano em cada uma das zonas climáticas locais analisadas é exibida na Figura 13. Os dados apresentados permitem identificar a ocorrência de dois efeitos diametralmente opostos, o de ilha de calor e o de ilha de frio. Estes processos são recorrentes durante o período de análise em cada uma das zonas, variando apenas na sua intensidade, horário e duração.

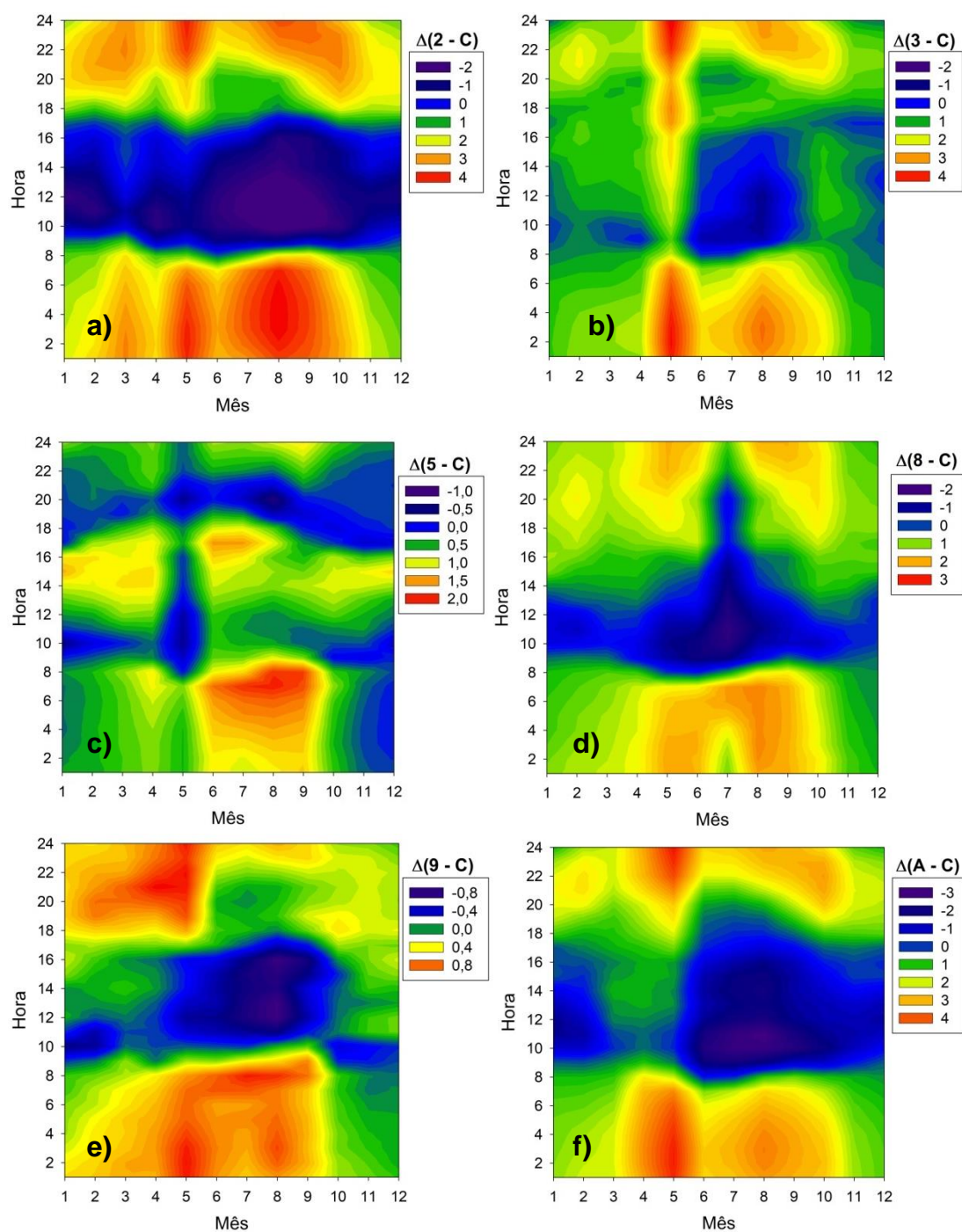


Figura 13 - Variação do EICU ao longo do dia e do ano nas ZCLs (em °C).

Fonte: O autor (2019).

A Figura 13a, correspondente aos valores das médias diárias mensais da intensidade do efeito de ilha de calor (ou de frio) para as zonas climáticas locais na categoria mais densamente urbanizada (2). Nesta representação é possível observar a formação da ilha de calor, principalmente no período noturno.

O efeito de Ilha de Frio ocorre quando as temperaturas na zona em questão são mais baixas que na zona rural (C). Este efeito ocorre devido à baixa angulação do sol durante as primeiras horas do dia, fazendo com que as edificações projetem sombras na superfície terrestre tornando-a mais fria em relação ao ambiente rural durante as primeiras horas do dia. Ao longo do dia, devido à incidência de radiação solar e a uma maior retenção de calor nas superfícies, o ambiente urbano em questão começa a se aquecer, elevando as temperaturas e formando o EICU, sendo mais intenso após o pôr do Sol e antes do amanhecer (Lopes A., 2006), assim as maiores intensidades do EICU podem ser observadas nas estações mais quentes do ano, na Primavera e o Verão, entre os meses de maio a setembro.

Além disso, é possível observar que em todas as zonas ocorrem quebras na intensidade do EICU geralmente nos meses mais frios (Novembro a Janeiro), isso se deve a uma maior ocorrência da precipitação e dos ventos, fazendo com que o aquecimento dessas zonas seja amenizado, diminuindo o EICU, como constatado por Gonçalves *et al* (2018).

Já a Figura 13f, representa a intensidade do EICU nos espaços verdes em áreas urbanas (A), sendo observável a formação de ilha de Frio. Tal fenômeno ocorre devido ao sombreamento da superfície terrestre pelas árvores, fazendo com que o local não receba radiação solar direta e conseqüentemente possua temperaturas mais baixas durante o dia. Desse modo, este efeito é causa direta do baixo valor do fator de visão do céu (Taha, 1997) para os três sensores presentes na ZCL A (0,18, 0,25 e 0,47), condicionando as trocas de calor entre a superfície terrestre e a atmosférica.

Como a ZCL C é composta predominantemente por vegetação de pequeno porte (pequenas árvores e gramíneas) e a ZCL A possui árvores de maior porte, a

tendência é que ocorra também o EICU e o EIFU nessa ZCL, conforme é observado na Figura 13f. Esses efeitos são formados devido à copa das árvores dificultarem a incidência de radiação solar, mas com o passar das horas começa a receber e reter calor irradiado, libertando-o após o pôr do sol até um pouco antes do amanhecer.

Na Figura 13e, observa-se a menor intensidade média do EICU (0,8°C). Esta baixa intensidade ocorre devido à ZCL 9 ser um espaço de transição entre o meio urbano e rural, ou seja, possui uma superfície mais semelhante com a ZCL C, acarretando assim em uma baixa diferença de temperatura entre ambas as zonas climáticas.

As estações do ano influenciam a duração e a intensidade do efeito da ilha de calor e da ilha de frio nas zonas climáticas em análise. Durante as estações da primavera e do verão (final de Março até final Setembro), o EICU tem início mais tarde que nas outras estações, tal fato ocorre porque durante esse período os dias amanhecem mais cedo e escurecem mais tarde, assim, as zonas passam mais tempo recebendo e retendo calor. Por outro lado, a ilha de frio, durante as estações da primavera e verão (final de Março até final Setembro), se forma um pouco mais cedo que nas outras estações, devido ao dia amanhecer mais cedo, aquecendo mais rapidamente a zona rural C.

O efeito da ilha de calor urbano assume seus maiores valores de intensidade média nas zonas climáticas 2 e 3, por serem as zonas com a maior densidade de edificações e superfícies pavimentadas. Nestes contextos, a intensidade média do EICU, ronda os 4°C, já para as classes menos urbanizadas, como as ZCLs 5 e 8, apresentam valores entre 2°C e 3°C e por último, para a ZCL 9, de transição entre meio urbano e rural, apresenta valor menor de 1°C.

A ocorrência e intensidade do EICU em Bragança já havia sido relatada anteriormente, segundo Gonçalves *et al* (2018), no período de 2012 até 2016, na cidade de Bragança, as mesmas ZCL mais densamente urbanizadas apresentaram os maiores valores de intensidade de EICU, em torno dos 3°C até valores um pouco maiores que 4°C no verão.

4.2. Análise dos indicadores de morfologia urbana

4.2.1. Por zonas urbanas

A seguir, estão representados por mapas os indicadores de morfologia urbana calculados para a metodologia por zonas urbanas (subsecções).

4.2.1.1. Ocupação do terreno

Observa-se na Figura 14, em percentagem, o mapa de ocupação do terreno das zonas urbanas. A ocupação do terreno varia de 0 até 75%, ou seja, a cidade de Bragança é composta por zonas rurais com 0% de ocupação do terreno até zonas com 75% de sua área ocupada por edificações. Tamaña variação de ocupação do terreno é um indicador da falta de homogeneidade do território da cidade.

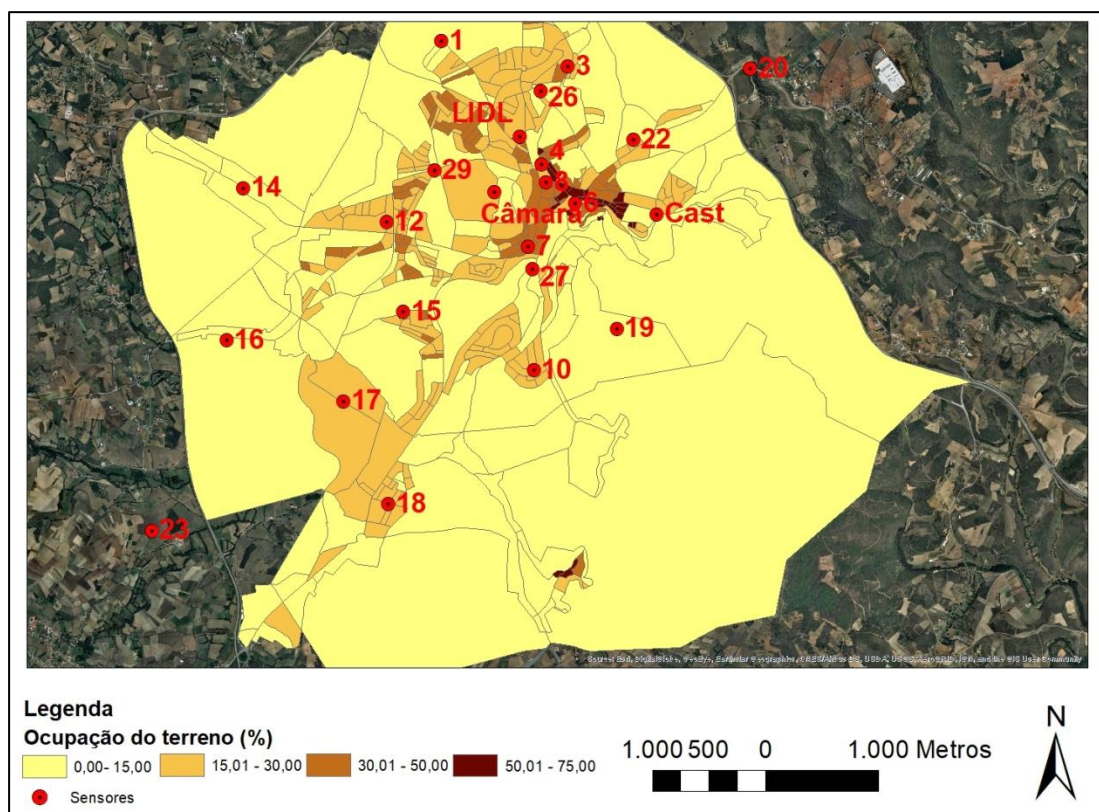


Figura 14 - Mapa de Ocupação do terreno. Fonte: O autor (2020).

4.2.1.2. Índice de construção

Na Figura 15, se pode observar o mapa do índice de construção, respectivo ao terreno das zonas urbanas. Tal indicador varia de 0 até 3,20, possuindo os maiores valores na região central da cidade, na Avenida Sá Carneiro e suas proximidades. Apresenta também valores mais altos na região norte da cidade, próximo ao Parque Quinta da Braguinha, onde possui edifícios com um maior número de pisos.

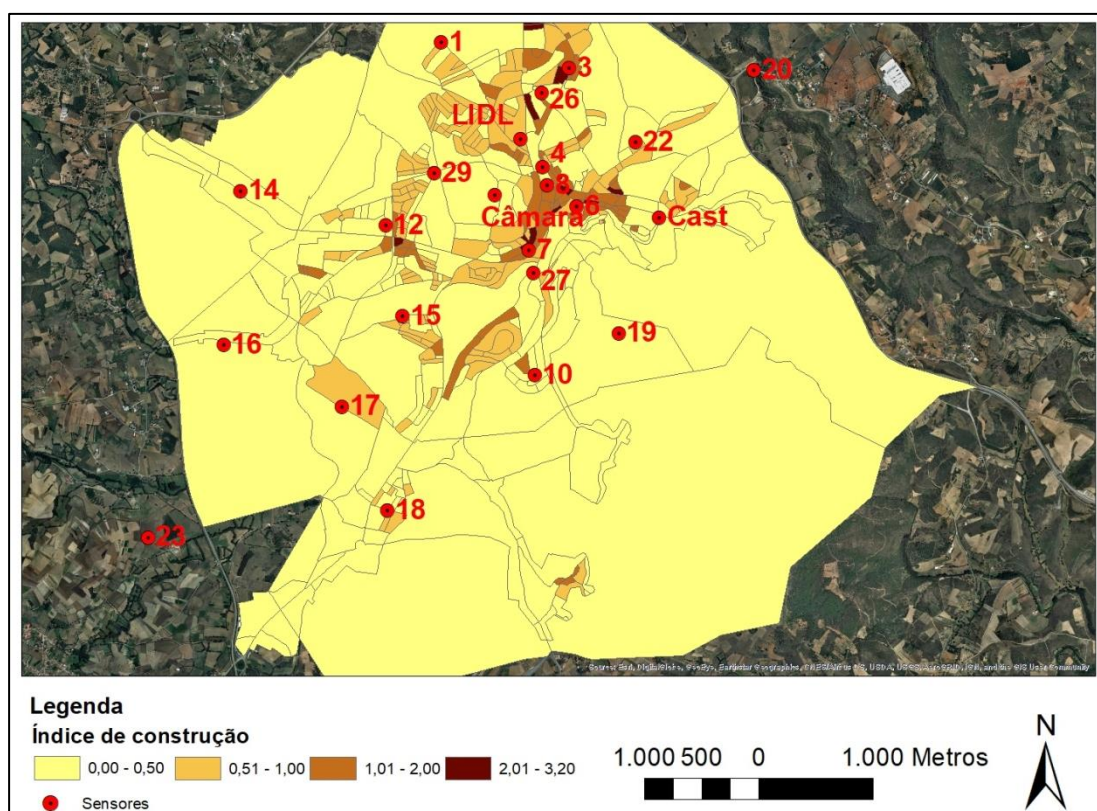


Figura 15 - Mapa de Índice de construção. Fonte: O autor (2020).

O índice de construção é similar com o indicador de ocupação do terreno, porém, não considera somente a área de implantação (A_o) das edificações, mas também a sua área de construção (A_j).

4.2.1.3. Número médio de pisos

No mapa da Figura 16, está representado o indicador de número médio de pisos. Nota-se que, os valores do indicador variam de 0 até 9 pavimentos, ou seja, a cidade de Bragança possui uma grande variedade de edificações com diferentes alturas.

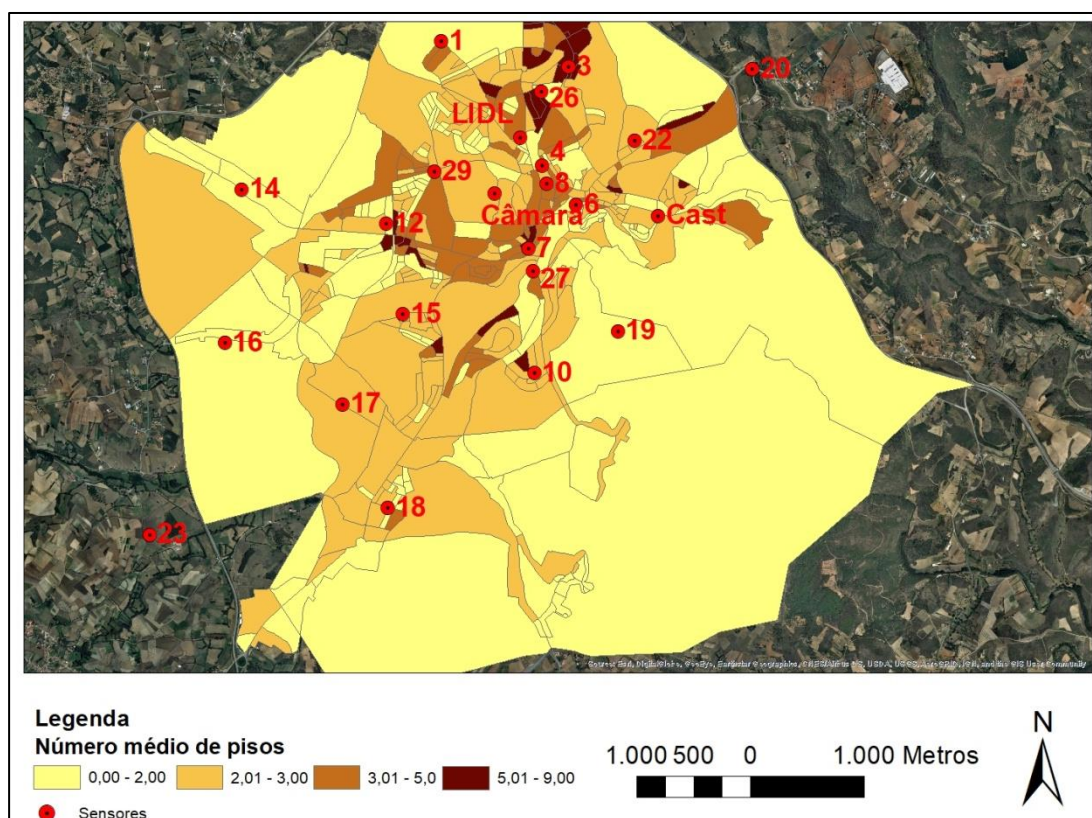


Figura 16 - Mapa do Número médio de pisos. Fonte: O autor (2020).

Os maiores valores de número médio de pisos são encontrados no Bairro da Braguinha, próximo ao parque com o mesmo nome e um pouco mais ao norte. Nesta região podem ser localizadas zonas urbanas com uma média de até 9 pisos, tornando-a a área com as edificações mais altas da cidade.

4.2.1.4. Índice volumétrico

Na Figura 17, está representado o mapa do índice volumétrico da cidade. Este indicador está relacionado ao volume do espaço que as edificações ocupam na área do terreno das zonas urbanas, levando em consideração sua altura e sua área de construção (Ao).

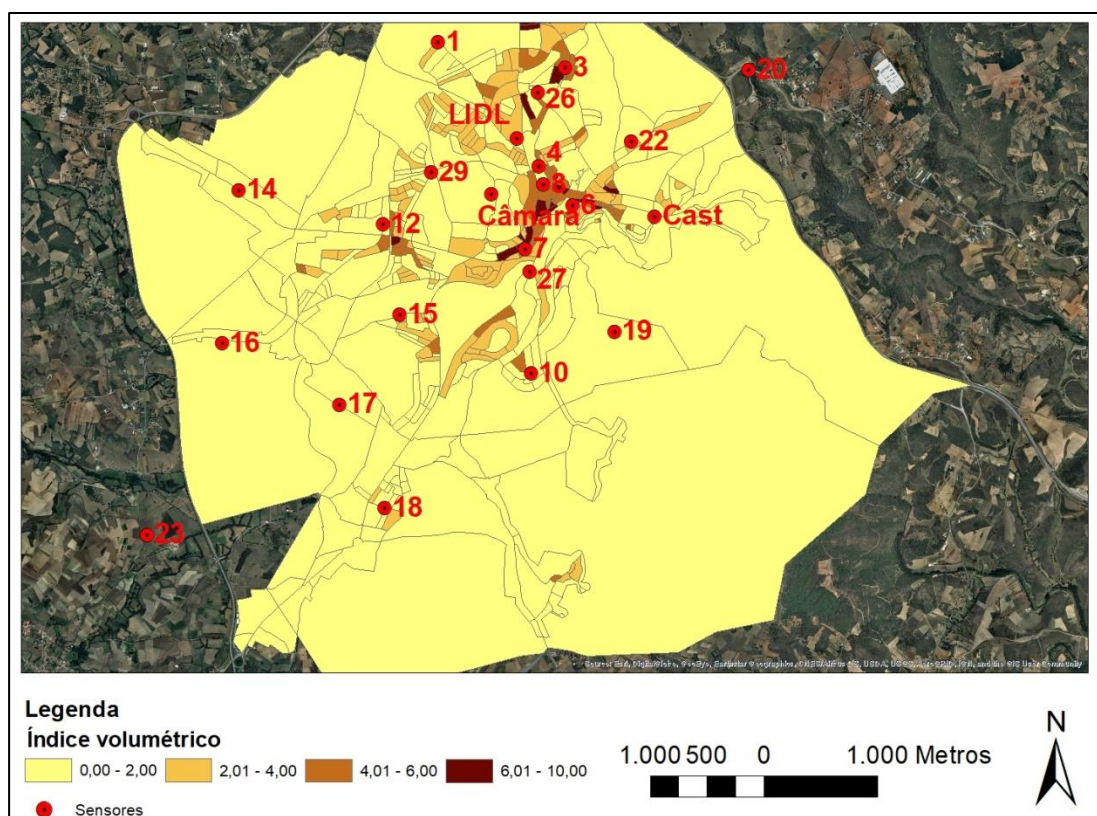


Figura 17 - Mapa de Índice volumétrico. Fonte: O autor (2020).

Constata-se no mapa que, os valores do índice volumétrico variam de 0,00 até 10,00, sendo que, quanto maior esse valor, maior é a presença de edifícios altos, ou seja, maior a concentração de edifícios volumosos. Observa-se que a maior concentração de valores altos está localizada nas proximidades da Avenida Sá Carneiro e no Bairro da Braguinha.

4.2.1.5. Percentagem impermeável

Na Figura 18, está representado o mapa relativo à percentagem da porção impermeável de cada zona urbana, variando de 0% até 100% de impermeabilidade. As zonas impermeáveis levam em consideração às edificações e às superfícies pavimentadas, gerando assim, um valor de impermeabilidade do solo.

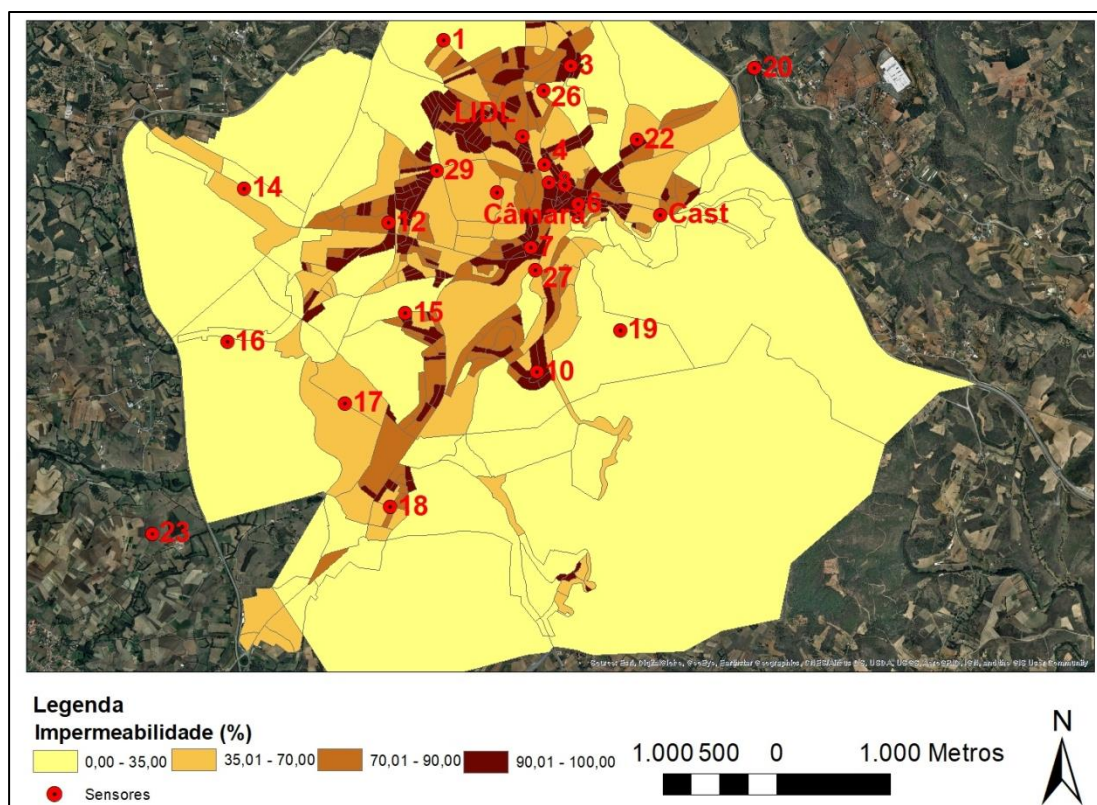


Figura 18 - Mapa de impermeabilidade. Fonte: O autor (2020).

Observa-se que os maiores valores de impermeabilidade do terreno estão localizados nas proximidades da Avenida Sá Carneiro e principalmente nas regiões residenciais, como o Bairro da Braguinha, nas proximidades do supermercado LIDL e na região que se localiza o Parque do Eixo Atlântico.

Nota-se que os valores de impermeabilidade do solo e de ocupação do terreno são diretamente proporcionais, quanto maior o valor de ocupação do terreno em uma determinada zona, maior será o valor de impermeabilidade do solo nessa mesma zona.

4.2.1.6. Relação H/L

No mapa da Figura 19, estão representados os valores da relação da altura dos edifícios pela largura das ruas (H/L). Esses valores variam de 0 até 6,50, sendo que, quanto maior esse valor, maior a presença de edifícios altos em regiões com uma menor largura de ruas e avenidas.

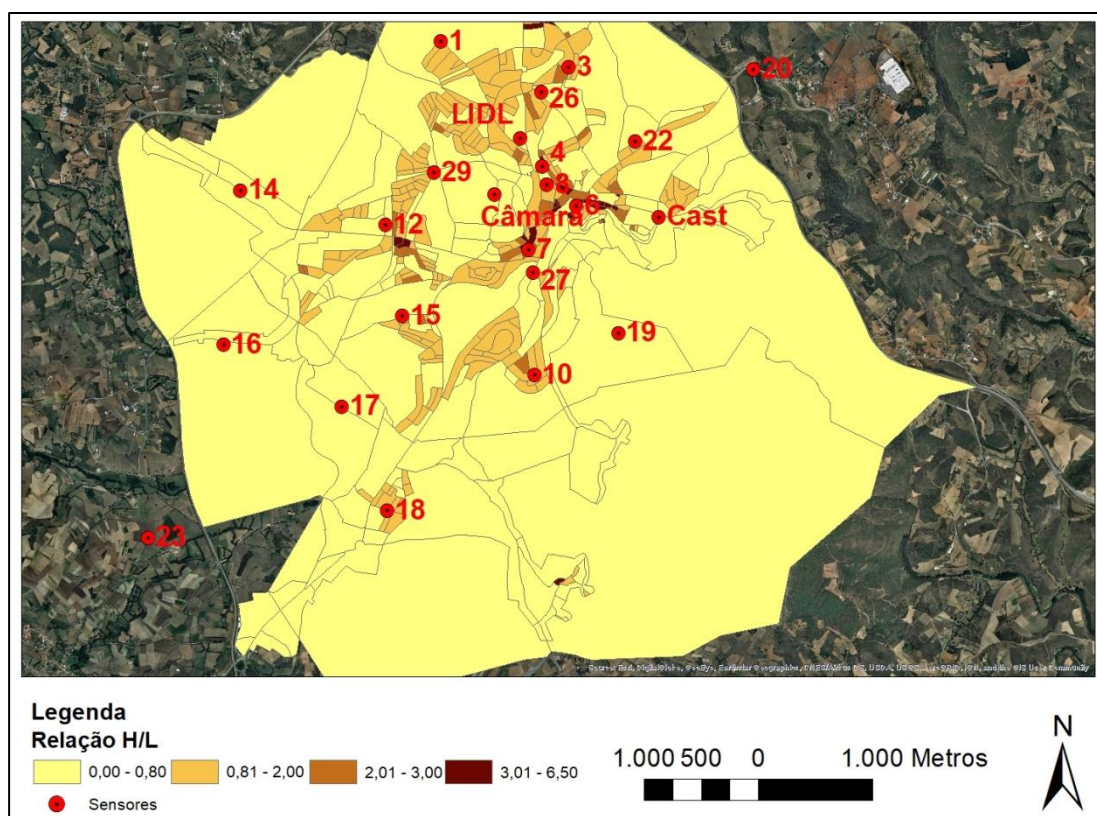


Figura 19 - Mapa da relação H/L. Fonte: O autor (2020).

Desta forma, zonas com edificações altas e ruas largas apresentarão um valor de H/L próximo às zonas com edificações baixas e ruas estreitas, representando zonas proporcionais.

Desse modo, zonas com baixos valores de H/L representam uma situação ideal, permitindo que os raios solares sejam irradiados sem grandes obstruções e que os ventos adentrem nas áreas, gerando uma diminuição do Efeito da Ilha de Calor Urbano.

4.2.1.7. FVC

Por último, no mapa da Figura 20, estão representado os valores de Fator de Visão do Céu (FVC) calculados através da metodologia do SAGA Gis 3.2. Tais valores variam de 0 até 1, e conforme já mencionado anteriormente, os valores mais próximos de 1 representam áreas com menos ou sem obstruções da visão do céu e valores mais próximos de 0, representam áreas com uma grande quantidade de obstrução, sejam elas edificações ou vegetação.

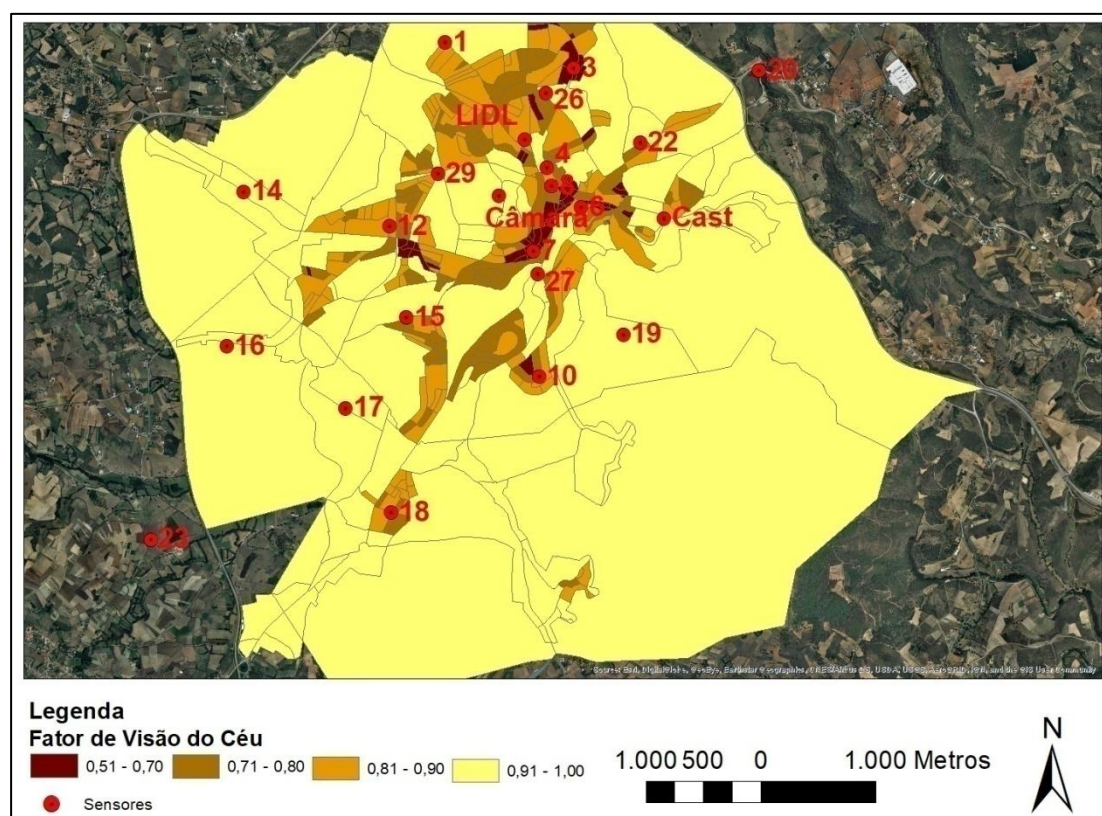


Figura 20 - Mapa quantitativo do FVC. Fonte: O autor (2020).

Observa-se que, as zonas com um menor FVC são áreas que possuem um índice volumétrico elevado. Desta forma, conclui-se que esses indicadores são inversamente proporcionais, quando o índice volumétrico aumenta, o FVC tende a diminuir devido a uma maior obstrução na visão do céu e vice-versa.

Portanto, as zonas com o FVC baixo são áreas densamente urbanizadas ou áreas com vegetação de grande porte. Além disso, zonas com alto FVC são áreas com baixa concentração de edifícios ou com vegetação de pequeno porte ou gramíneas.

4.2.1.8. Análise estatística entre indicadores e ZCL

Na Tabela 10, é apresentada uma análise do coeficiente da correlação de Pearson (CC) entre os valores dos diversos indicadores de morfologia urbana para a metodologia de zonas urbanas, e o valor p. Para essa análise, foi realizada uma classificação de intensidade da correlação, assim, se for forte estará representada pelas cores vermelhas e laranjas, se fraca, pelas cores verdes.

Tabela 10 - Correlação de Pearson dos indicadores de morfologia urbana

Indicadores		OT	IC	Nmp	IV	FVC	Pimp	H/L
OT	CC	1,000	0,773	0,142	0,806	-0,777	0,761	0,842
	p	-	0,000*	0,004*	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*
IC	CC	0,773	1,000	0,671	0,998	-0,853	0,601	0,895
	p	0,000*	-	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*
Nmp	CC	0,142	0,671	1,000	0,638	-0,540	0,212	0,466
	p	0,004*	0,000*	-	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*
IV	CC	0,800	0,998	0,638	1,000	-0,861	0,624	0,906
	p	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*	-	0,000*	0,000*
SVF	CC	-0,770	-0,853	-0,540	-0,861	1,000	-0,781	-0,889
	p	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*	-	0,000*	0,000*
Pimp	CC	0,761	0,601	0,212	0,624	-0,781	1,000	0,684
	p	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*	-	0,000*
H/L	CC	0,842	0,895	0,466	0,906	-0,889	0,684	1,000
	p	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*	-

Intensidade da correlação

Fraca Média Forte

Fonte: O autor (2020).

CC – Coeficiente de Correlação; p – p value; * - Correlações significativas

Da interpretação dos resultados, percebe-se que, por exemplo, que o indicador de ocupação do terreno é intenso e diretamente proporcional ao índice volumétrico e à relação H/L. Assim, quanto maior a ocupação do terreno, maior serão esses demais indicadores. Por outro lado, a ocupação do terreno é inversamente proporcional ao FVC, ou seja, quanto maior a ocupação do terreno, menor será o FVC, visto que a obstrução do céu será maior. Para estas correlações contribui o facto de alguns destes indicadores usarem parâmetros complementares

entre si. Por outro lado, ocorre uma interação fraca, valores próximos a 0, entre o Nmp com a Ot e a Pimp. Todas as correlações são significantes ($p < 0,05$).

Na Tabela 11, ainda para a metodologia das zonas urbanas, são apresentados os resultados da aplicação do teste Kruskal–Wallis. Os resultados mostram que existem diferenças significativas entre os indicadores, ou seja, as ZCL possuem características diferentes em função das variáveis de morfologia ($p < 0,05$), esta leitura é válida para todos os indicadores de morfologia urbana estudados.

Tabela 11 - Teste de Kruskal-Wallis de significância

	OT	IC	Nmp	IV	FVC	Pimp	H/L
Qui-quadrado	187,495	201,450	139,828	199,353	222,779	204,331	206,669
p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Fonte: O autor (2020).

Além disso, gerou-se a Tabela 12, onde os indicadores foram relacionados com as ZCL e foi elaborado um *ranking* com valores da ordenação pelo método Kruskal-Wallis. Este método descreve se as ZCL baseadas nos seus valores de indicadores de morfologia apresentam uma relação diretamente proporcional, ou seja, se quanto mais altos os valores dos indicadores, mais urbanizada é a ZCL.

Tabela 12 - Teste Kruskal-wallis com indicação de ordem de maior a menor valor

ZCL	OT	IC	Nmp	IV	FVC	Pimp	H/L
2	232,97 (2 ^o)	310,58 (1 ^o)	353,05 (1 ^o)	306,40 (1 ^o)	107,69 (9 ^o)	227,50 (2 ^o)	284,09 (1 ^o)
3	269,36 (1 ^o)	244,96 (2 ^o)	195,94 (3 ^o)	246,45 (2 ^o)	158,38 (8 ^o)	272,45 (1 ^o)	257,09 (2 ^o)
5	176,04 (3 ^o)	176,61 (3 ^o)	194,55 (4 ^o)	175,32 (3 ^o)	231,46 (7 ^o)	209,32 (3 ^o)	194,57 (3 ^o)
6	142,86 (5 ^o)	130,71 (5 ^o)	125,57 (7 ^o)	130,90 (5 ^o)	283,00 (6 ^o)	119,86 (5 ^o)	130,00 (4 ^o)
8	147,55 (4 ^o)	148,23 (4 ^o)	197,55 (2 ^o)	149,32 (4 ^o)	317,59 (5 ^o)	130,18 (4 ^o)	99,14 (5 ^o)
9	93,40 (6 ^o)	93,16 (6 ^o)	147,13 (6 ^o)	92,89 (6 ^o)	326,44 (4 ^o)	84,46 (6 ^o)	89,44 (6 ^o)
A	54,25 (7 ^o)	54,75 (7 ^o)	169,75 (5 ^o)	55,25(7 ^o)	329,25 (3 ^o)	46,75 (7 ^o)	64,25 (7 ^o)
B	12,43 (9 ^o)	12,43 (9 ^o)	90,71 (9 ^o)	12,43 (9 ^o)	392,14 (1 ^o)	22,86 (9 ^o)	10,71 (9 ^o)
C	24,14 (8 ^o)	25,05 (8 ^o)	121,71 (8 ^o)	24,81 (8 ^o)	387,76 (2 ^o)	25,90 (8 ^o)	27,62 (8 ^o)

Fonte: O autor (2020).

Observa-se que, as ZCL apresentam certa ordem proporcionalidade entre os valores dos indicadores e as definições das zonas, ou seja, as ZCL 2 e 3, geralmente, ocupam sempre as primeiras colocações de todos os indicadores, com exceção no FVC que é inversamente proporcional aos demais indicadores. Portanto, as ZCL mais urbanizadas estão sempre ocupando posições altas no *ranking* enquanto as menos urbanizadas estão em posições inferiores.

Na Figura 21, representam-se os gráficos de caixas com os valores dos indicadores por ZCL, sendo valores máximos, medianos e mínimos para cada uma das ZCL. É possível perceber nessa análise uma representação similar com a da Tabela 12, por exemplo, na ocupação do terreno, as ZCL de 2 até C apresentam certa ordem de proporcionalidade, com valores mais altos nas ZCL 2 e 3 por serem as mais densamente urbanizadas e valores mais baixos nas ZCL B e C, por serem zonas mais rurais. Por outro lado, o FVC possui uma proporcionalidade inversa ao da ocupação do terreno, visto que, a ZCL B e C são as que apresentam menos obstruções a visão do céu, logo, um FVC maior que da ZCL 2, por exemplo.

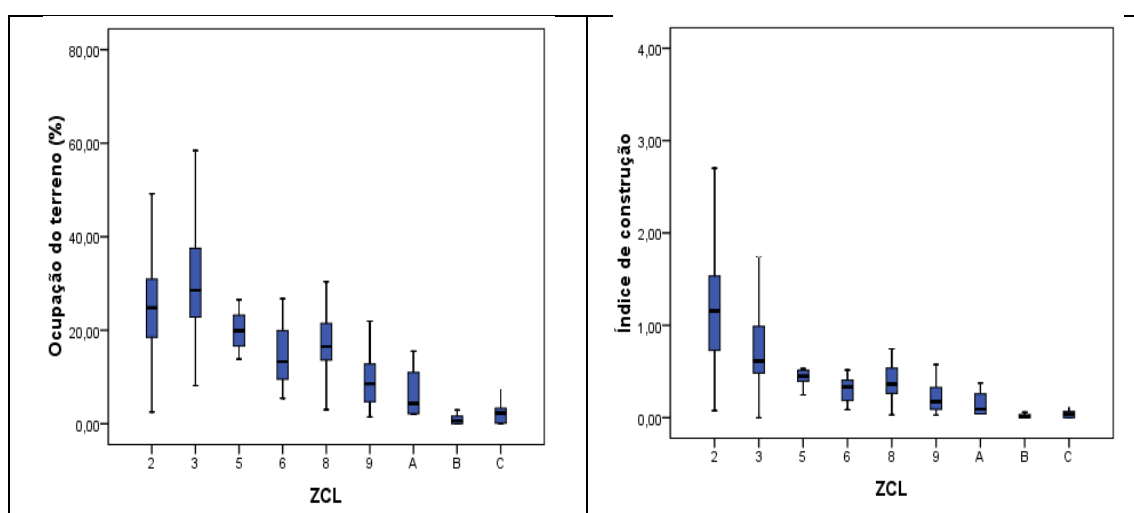


Figura 21 - Gráficos dos indicadores por ZCL. Fonte: O autor (2020).

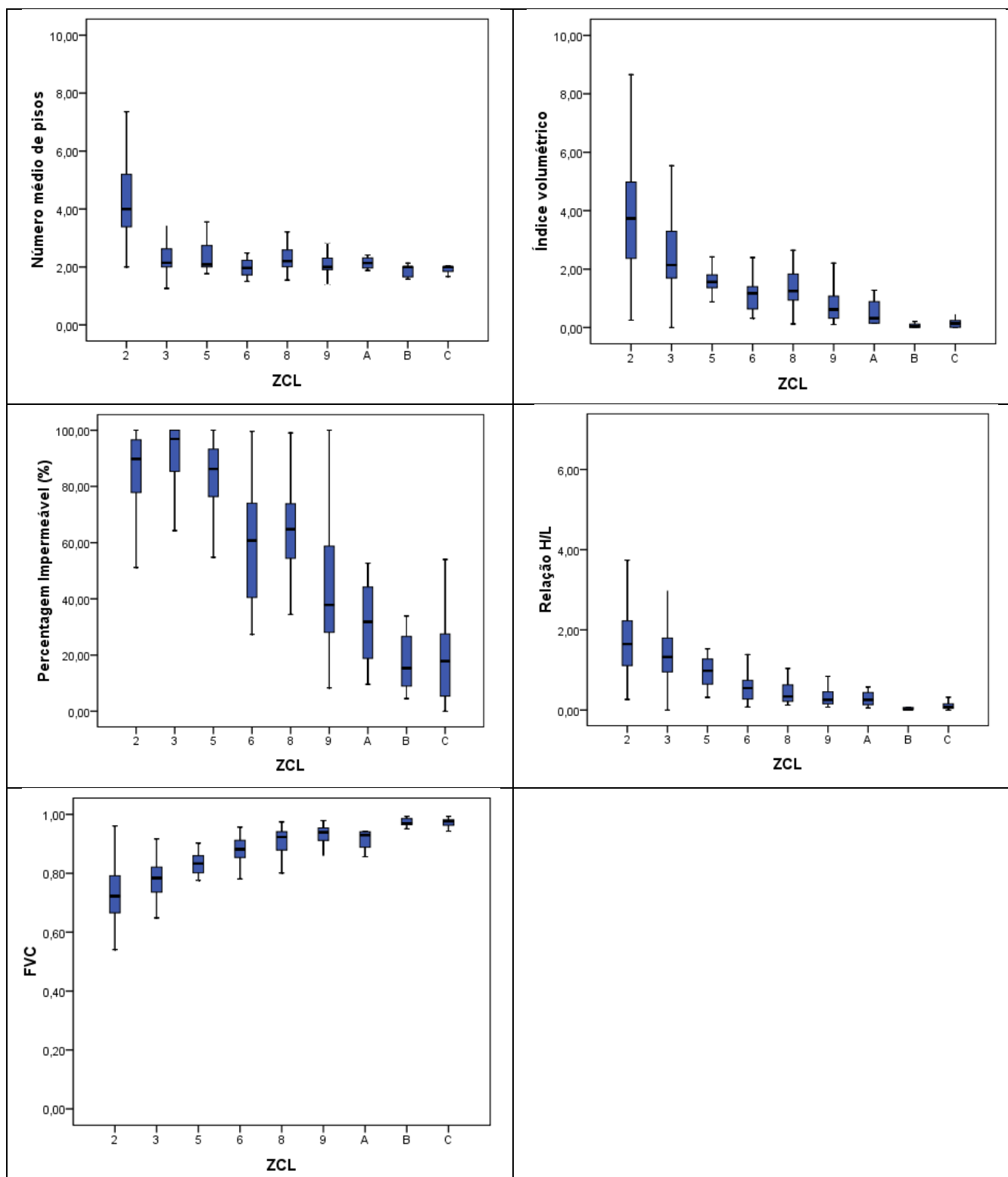


Figura 21 (cont.) - Gráficos dos indicadores por ZCL. Fonte: O autor (2020).

4.2.2. Por envolvente

Após o cálculo dos indicadores de morfologia urbana, para a metodologia de zonas urbanas (subsecções), os mesmos indicadores em conjunto do albedo foram reaplicados e calculados para a metodologia de envolvente dos sensores meteorológicos.

Assim, como resultado disso, tem-se os valores médios dos indicadores por envolvente dos sensores (Tabela 13 e Tabela 14).

Tabela 13 - Dados indicadores por sensor

Sensores	ZCL	Ocupação do terreno (%)	Índice de construção	Número médio de pisos	Índice volumétrico
1	9	4,57	0,23	5	0,73
26	A	1,94	0,15	8	0,48
3	2	32,76	2,38	7	7,28
4	3	25,80	0,83	3	2,63
Câmara	8	9,54	0,10	1	0,41
6	3	34,25	0,87	3	3,31
7	2	48,89	2,56	5	5,85
8	A	11,65	0,35	3	1,17
10	5	21,71	0,43	2	1,52
Castelo	A	3,19	0,06	2	0,19
12	5	35,16	0,70	2	2,46
29	2	22,97	1,60	7	3,68
14	9	3,39	0,07	2	0,24
15	9	13,02	0,38	3	1,27
17	8	36,56	0,85	2	2,97
18	5	20,62	0,41	2	1,44
19	C	10,85	0,11	1	0,33
20	C	8,98	0,09	1	0,36
LIDL	8	39,59	0,69	2	2,56
22	3	30,41	0,64	2	2,30
23	C	0,00	0,00	0	0,00

Fonte: O autor (2020).

Em relação ao Fator de Visão do Céu, estão representados os valores calculados através do SAGA Gis e através da captura de fotos pela lente olho de peixe e processamento de imagens, respectivamente.

Tabela 14 - Dados indicadores por sensor, parte 2

Sensores	ZCL	FVC	Albedo	Percentagem Impermeável (%)	Relação H/L
1	9	0,99	0,2	28,21	0,48
26	A	0,84 - 0,47	0,19	32,44	0,61
3	2	0,92	0,12	99,90	3,02
4	3	0,82 - 0,51	0,21	70,18	1,04
Câmara	8	0,88	0,18	84,79	0,21
6	3	0,68	0,18	99,89	0,94
7	2	0,64	0,12	100,00	3,14
8	A	0,67 - 0,18	0,15	38,85	0,56
10	5	0,91	0,17	92,51	1,06
Castelo	A	0,83 - 0,25	0,14	29,66	0,25
12	5	0,86	0,13	97,96	0,86
29	2	0,91	0,16	89,98	1,44
14	9	0,92 - 0,76	0,18	22,10	0,18
15	9	0,99	0,2	48,30	0,44
17	8	0,87	0,16	97,81	0,83
18	5	0,85	0,15	67,17	1,26
19	C	0,98 - 0,71	0,22	10,85	0,16
20	C	0,98 - 0,60	0,19	8,98	0,13
LIDL	8	0,89	0,14	96,11	0,87
22	3	0,99	0,15	96,96	1,75
23	C	0,99	0,22	0,00	0

Fonte: O autor (2020).

Por último, na Figura 22, estão representados os gráficos de valores máximos, intermédios e mínimos de cada indicador de morfologia urbana para as ZCL das envolventes dos sensores meteorológicos. Os três valores (máximo, intermédio e mínimo) correspondem a cada um dos três sensores meteorológicos presentes em cada zona climática local.

Além disso, é possível observar que em alguns gráficos não existe a linha de valor intermédio de indicador, isto ocorre quando algum dos valores apresentados é igual ao valor mínimo ou máximo, não existindo um valor intermédio para aquele indicador na respectiva zona climática local.

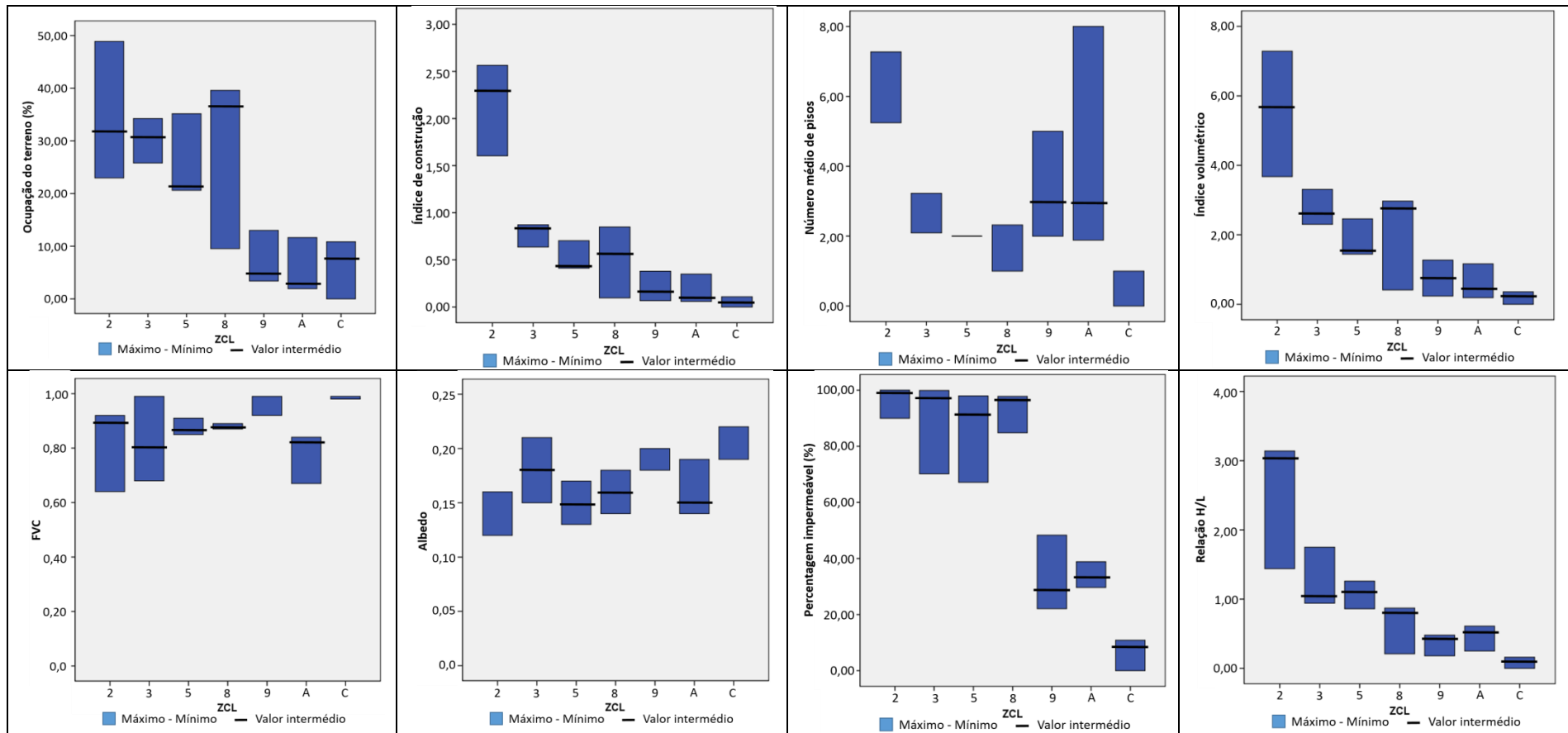


Figura 22 - Gráficos dos valores dos indicadores por envoltório dos sensores. Fonte: O autor (2020).

Através da análise dos gráficos com os três valores por envolvente dos sensores, é possível perceber que as ZCL apresentam uma relação direta de proporcionalidade quanto aos seus respectivos valores de indicadores de morfologia urbana.

Desta forma, nota-se que os maiores valores de Ot, Ic, Iv, Pimp e da relação H/L são registados nas ZCL 2, 3, 5 e 8, que são consideradas as zonas mais densamente urbanizadas na cidade. Já em relação ao FVC e ao albedo, essas zonas apresentam os menores valores, visto que, por possuírem uma maior concentração de edifícios e de uma superfície na sua maioria impermeável, e o FVC e o albedo refletem essa condição.

Os menores valores de Ot, Ic, Iv, Pimp e da relação H/L estão localizados nas ZCL 9, A e C por serem zonas de transição entre um espaço urbano/rural e zonas rurais da cidade. Por outro lado, em relação ao FVC e ao albedo, essas ZCL apresentam os maiores valores, visto que possuem menos obstruções na visão do céu, devido à menor concentração de edificações, e possuem materiais com uma menor capacidade de reter calor.

Em relação ao número médio de pisos, ocorre certa desproporcionalidade dos valores em relação às ZCL, tal fato pode ocorrer devido à classificação das ZCL ter sido realizada baseada na predominância de tipologia urbana ou cobertura do solo, fazendo com que alguns dos sensores tenham ficado localizados em uma porção dessas ZCL não muito condizente com sua classificação geral. Desta forma, por exemplo, a ZCL A que de acordo com Stewart e Oke (2012) não é caracterizada como uma zona de elevado Nmp, mas na análise apresentou um Nmp elevado, ao aplicar a metodologia de envolvente dos sensores é possível que apenas um ou dois edifícios estejam localizados nessa área, fazendo com que a média do número de pisos se eleve bruscamente.

4.3. Correlação entre indicadores e a intensidade máxima do EICU

Para ser possível avaliar e analisar a intensidade da relação dos indicadores de morfologia urbana com o EICU aplicou-se a correlação entre os dados pelo método de correlação Pearson, de entre os dados de síntese testados (médias de mínimas, médias e máximas por estação), apenas no caso dos valores das médias para a intensidade média e máxima de ilha de calor se registou uma ampla validação dos dados de correlação.

Assim, foi aplicado o método de correlação de Pearson para avaliar a relação entre as médias das intensidades máximas do EICU, por estação, pelos valores dos indicadores morfológicos da envolvente dos sensores (raio de 50 metros). Com o objetivo de facilitar a interpretação dos dados, as correlações significativas foram destacadas de vermelho (Tabela 15).

Tabela 15 - Correlação de Pearson entre a intensidade máxima do EICU e indicadores de morfologia urbana

Subgrupos		Ot	Ic	Nmp	Iv	FVC (1)	FVC (2)	Alb	Pimp	H/L
Outono	CC	0,408	0,561	0,531	0,573	-0,441	-0,287	-0,396	0,359	0,456
	p	0,093	0,016*	0,023*	0,013*	0,067	0,248	0,104	0,143	0,057
Primavera	CC	0,17	0,322	0,524	0,328	-0,436	-0,434	-0,253	0,069	0,398
	p	0,499	0,192	0,025*	0,185	0,071	0,072	0,31	0,787	0,102
Verão	CC	0,517	0,671	0,454	0,634	-0,53	-0,274	-0,459	0,474	0,605
	p	0,028*	0,002*	0,058	0,005*	0,024*	0,271	0,055	0,047*	0,008*
Inverno	CC	0,482	0,659	0,542	0,644	-0,383	-0,176	-0,282	0,444	0,477
	p	0,043*	0,003*	0,02*	0,004*	0,116	0,486	0,256	0,065	0,045*

Fonte: O autor (2020).

1 - FVC calculado através do ArcMap; 2 - FVC calculado através do tratamento das fotos;
CC - Coeficiente de Correlação; p – p value; * Correlações significativas

Em relação à proporcionalidade dos valores, nota-se que a tendência principal é que quanto maior a intensidade do EICU, maiores serão os valores dos indicadores de Ot, Ic, Nmp, Iv, Pimp e H/L, principalmente no verão, e menores serão os valores de FVC (para ambas as metodologias de cálculo) e do albedo. Tal

relação retrata a realidade, zonas mais densamente urbanizadas, ou seja, com altos valores de indicadores de morfologia, apresentam uma maior intensidade do EICU.

Na Tabela 15, estão também representados os valores de probabilidade de significância (valor p) representando as correlações significativas entre variáveis. Desta forma, conforme já mencionado, se o valor de p for menor que 0,05 significa que a correlação em questão é significativa. Tal significância é notada principalmente no EICU do verão possuindo intensas correlações com os indicadores de Ot, Ic, Iv, FVC 1, Pimp e relação H/L. O inverno apresenta algumas relações interessantes com os mesmos indicadores, em exceção ao FVC 1 e Pimp, mas acrescido o Nmp. Já o EICU do outono apresenta correlações com o Ic, Nmp e com o Iv. Por último, as correlações menos significativas estão na Primavera, existindo significância apenas com o número médio de pisos.

Na Tabela 16 estão representadas as correlações da intensidade média do EICU com os indicadores. Observa-se que os dados de intensidade média possuem um padrão semelhante aos dados de intensidade máxima, onde as estações com temperaturas extremas (inverno e verão) possuem o maior número de correlações significativas. Assim, nota-se que quanto maiores os valores de Ot, Ic, Iv e da relação H/L maior será a intensidade média do EICU. Já o EICU do outono apresenta correlações com o Ic, Iv e FVC (1). Por último, a primavera não apresentou correlações significantes.

Tabela 16 - Correlação de Pearson entre a intensidade média do EICU e indicadores de morfologia urbana

Subgrupos		Ot	Ic	Nmp	Iv	FVC (1)	FVC (2)	Alb	Pimp	H/L
Outono	CC	0,467	0,531	0,301	0,590	-0,526	-0,306	-0,372	0,400	0,562
	p	0,051	0,023*	0,225	0,010*	0,025*	0,216	0,128	0,100	0,015*
Primavera	CC	0,227	0,247	0,390	0,305	-0,345	-0,348	-0,184	0,156	0,354
	p	0,365	0,323	0,109	0,219	0,161	0,158	0,464	0,537	0,149
Verão	CC	0,607	0,519	0,237	0,573	-0,377	0,011	-0,358	0,615	0,614
	p	0,008*	0,027*	0,344	0,013*	0,123	0,966	0,144	0,007*	0,007*
Inverno	CC	0,490	0,675	0,456	0,685	-0,570	-0,292	-0,315	0,440	0,593
	p	0,039*	0,002*	0,057	0,002*	0,014*	0,240	0,203	0,068	0,009*

Fonte: O autor (2020).

O prosseguimento dos estudos no seguimento desta dissertação irá permitir a aplicação de outros métodos estatísticos que seguramente irão reforçar a análise base que resulta da aplicação deste método de análise.

4.4. Propostas de Intervenção

Após a análise dos resultados pode ser realizada uma discussão relativa a quais pontos podem ser melhorados no que diz respeito ao planeamento urbano orientado à diminuição da intensidade do EICU.

Em relação ao EICU, tal efeito pode ser benéfico ou nefasto em determinadas épocas do ano, como no inverno e no verão, respectivamente. O EICU durante o inverno pode acarretar uma melhorias das condições de conforto térmico da população nas zonas urbanas, visto que o espaço urbano estará mais quente que a envolvente rural. Por outro lado, no verão, o EICU tende a agravar as condições de desconforto térmico por calor, visto que, tal efeito elevará ainda mais as temperaturas, podendo intensificar efeitos nefastos como os que decorrem das vagas de calor. Tendo em consideração os processos de formação do EICU, algumas medidas de correção podem ser tomadas para reduzir o seu impacte.

Uma das medidas a serem utilizadas é a implantação de espaços verdes com árvores caducifólias (árvores que perdem suas folhas em determinada estação), que durante o inverno irão permitir uma maior incidência de radiação solar direta, pois as copas das árvores estarão sem folhas, fazendo com que não haja obstruções dos raios solares que incidem sobre a superfície terrestre, acarretando um aquecimento da área envolvente. Já durante o verão, essas as árvores terão folhas e por isso irão projetar sombra, entre outros benefícios, trazendo um maior conforto térmico para a população. Por outro lado, o plantio de árvores caducifólias acarreta em um grande acúmulo de folhas nas ruas entre o outono e o inverno, gerando assim um gasto mais elevado com os serviços de limpeza urbana da cidade.

Outras medidas a serem adotadas são a implantação de materiais de elevado albedo, como superfícies claras e pouco rugosas, acarretando uma maior reflexão dos raios solares incididos sobre as superfícies, evitando a retenção de calor e do aquecimento de determinadas zonas. Além disso, podem ser implantados corpos hídricos com o objetivo de elevar a humidade do ar em determinado local provocando o arrefecimento da temperatura atmosférica e diminuindo a amplitude térmica (Hernández, 2013).

Adicionalmente, o planeamento urbano da cidade pode ser repensado, evitando a presença de amplas superfícies urbanizadas e implantando áreas com vegetação, com o objetivo de gerar sombras e favorecer a ventilação, acarretando também um aumento da qualidade do ar. Adicionalmente, é importante promover a diminuição da verticalização das cidades, contribuindo igualmente para o aumento da ventilação em seu interior e aumentando a quantidade de calor dissipada no período nocturno.

A evolução presumível do efeito de aquecimento global (IPCC, 2018), que resultará num incremento das temperaturas, com especial impacte em regiões do globo como é o caso da Península Ibérica (Gil, *et al.*, 2019), pressupõe uma intensificação do risco de agravamento dos efeitos nefastos do EICU, pela intensificação da temperatura, razão pela qual especial atenção deve ser dada ao correto planeamento urbano e à intervenção no domínio da redução dos fatores de risco, que podem estar associados a variáveis como o albedo, as taxas de impermeabilização, o FVC ou os índices que expressam a volumetria do espaço construído, como a relação H/L ou os índices de construção e volumétrico. A evolução do processo de planeamento deverá determinar a incorporação de critérios que garantam uma melhor resiliência do espaço urbano, pela aplicação de indicadores como os que foram apresentados nesta tese.

5. Considerações Finais

No âmbito dessa dissertação foram analisados dados microclimáticos da rede meteorológica da cidade de Bragança, composta por 23 sensores, sendo 21 utilizados para análise, permitindo realizar este estudo com o objetivo de relacionar os dados de temperatura com as variáveis de morfologia urbana da cidade, pela análise do Efeito da Ilha de Calor Urbano, no período compreendido entre o início do outono de 2016 até o final do verão de 2019.

No contexto de análise do Efeito da Ilha de Calor Urbano, foi possível constatar a existência também da Ilha de Frio Urbano, sendo ambos os efeitos diretamente afetados pela morfologia urbana. Assim, verificou-se a ocorrência da maior intensidade do EICU nas zonas climáticas mais densamente urbanizadas 2 e 3, no verão, com maior expressão após o entardecer e com valores máximos pouco antes do amanhecer. Por outro lado, os menores valores de intensidade do EICU e de EIFU ocorreram na ZCL 9, que representa espaços de transição entre o meio urbano e rural.

Já na etapa de análise dos indicadores de morfologia urbana, foi possível obter resultados quanto à ocupação do terreno, fator de visão do céu, índice de construção, número médio de pisos, índice volumétrico, impermeabilização do solo, a relação H/L, FVC e albedo. Notou-se que as ZCL 2 e 3, zonas densamente urbanizadas, são as que possuem os mais altos valores para os indicadores de morfologia e menores valores do FVC e albedo. Já as ZCL 9 e A, apresentaram baixos valores dos indicadores de morfologia e altos valores de FVC e do albedo.

Por último, pela análise por aplicação da correlação de Pearson foi possível identificar correlações, entre a média dos valores médios e máximos de intensidade do EICU com as variáveis de morfologia, dos dados principalmente no verão e no inverno com as variáveis de O_t , I_c , I_v e com a relação H/L. Por outro lado, as correlações e significância menos intensas para a máxima estão localizadas na primavera, com o N_{mp} , e no outono com o FVC, Alb, P_{imp} e com a relação H/L. Já para a intensidade média a primavera não apresentou correlações significantes, e o

outono apresentou quanto ao Ic, Iv, FVC (1) e relação H/L. Portanto, através dessas correlações pode-se dizer que quanto maiores os valores dos indicadores citados, maiores serão as intensidades médias e máximas do EICU na cidade de Bragança.

Desse modo, os resultados alcançados com o desenvolvimento desse estudo podem ser importantes para um futuro planeamento urbano da cidade, levando em consideração que quanto maior a verticalização das cidades e maior impermeabilização do solo, maiores serão as temperaturas nessas zonas. Portanto, apesar de ser uma tarefa complicada de controlar a urbanização das cidades, é necessário que ela seja repensada para que a população não sofra com as consequências do EICU.

Os resultados obtidos nesse trabalho constituem um passo adicional na compreensão da relação entre as variáveis urbanas e o clima urbano, em particular na interpretação das características urbanas que determinam a ocorrência do EICU. Os elementos aqui reunidos deverão permitir o desenvolvimento de análises estatísticas complementares que permitam compreender com maior profundidade os fatores determinantes na interação da cidade de Bragança com o clima local.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEMET, I. (2011). Atlas Climático Ibérico–Temperatura do ar e Precipitação (1971-2000). *Agencia Estatal de Meteorología, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino e Instituto de Meteorología de Portugal, 978-84.*

ANDRADE, H. (2005). O clima urbano-natureza, escalas de análise e aplicabilidade. *Finisterra, 40(80).*

ASSIS, E. S. (2005). A abordagem do clima urbano e aplicações no planejamento da cidade: reflexões sobre uma trajetória. *ENCAC – ELACAC, 2005.*

ATAÍDE, G. D. M., CASTRO, R. V. O., CORREIA, A. C. G., REIS, G. G. D., REIS, M. D. G. F., & ROSADO, A. M. (2015). Interação árvores e ventos: aspectos ecofisiológicos e silviculturais. *Ciência Florestal, 25(2), 523-536.*

BENJAMIN, D. J., BERGER, J. O., JOHANNESSON, M., NOSEK, B. A., WAGENMAKERS, E. J., BERK, R., ... & CESARINI, D. (2018). Redefine statistical significance. *Nature Human Behaviour, 2(1), 6.*

CARVALHO, M. M. D. (2001). *Clima urbano e vegetação: estudo analítico e prospectivo do Parque das Dunas em Natal* (Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte).

CAVALCANTE, Z. V., & DA SILVA, M. L. S. (2011). A importância da revolução industrial no mundo da tecnologia. *VII Encontro Internacional de Produção Científica.*

COLLISCHONN, E., & FERREIRA, C. V. D. O. (2015). O fator de visão do céu e sua influência sobre as características térmico-higrométricas intraurbanas em Pelotas/RS, Brasil. *Geographia Meridionalis.*

CORREIA, F. W. S., ALVALÁ, R. D. S., GIELOW, R., MANZI, A. O., & SOUZA, A. D. (2002). Albedo do Pantanal Sul Matogrossense durante o período de transição seco-úmido de 2001–2002. *In Congresso Brasileiro de Meteorologia (Vol. 12, pp. 2794-2800).*

FERREIRA, C. D. C. M. (2014). Modelo para análise das variáveis de cobertura da terra e a identificação de microclimas, em centros urbanos. *Revista Brasileira de Climatologia, 14(1).*

FERREIRA, G. R., & FIALHO, E. S. (2016). Campo térmico x fator de visão do céu: estudo da área central do município de viçosa-mg em episódios de outono e inverno/2014. *Boletim Gaúcho de Geografia, 43(1).*

GIL, V., GAERTNER, M. A., GUTIERREZ, C., & LOSADA, T. (2019). Impact of climate change on solar irradiation and variability over the Iberian Peninsula using regional climate models. *International Journal of Climatology, 39(3), 1733-1747.*

GONÇALVES, A., RIBEIRO, A. C., MAIA, F., & FELICIANO, M. (2014). *Clima Urbano de Bragança*. Bragança: Instituto Politécnico de Bragança.

GONÇALVES, A., ORNELLAS, G., CASTRO Ribeiro, A., MAIA, F., ROCHA, A., & FELICIANO, M. (2018). Urban Cold and Heat Island in the City of Bragança (Portugal). *Climate, 6(3), 70.*

HERNÁNDEZ, Agustín (coord.). *Manual de Desenho Bioclimático Urbano. Manual de Orientações para a Elaboração de Normas Urbanísticas*. Redacção: José FARIÑA, Victoria FERNÁNDEZ, Miguel Ángel GÁLVEZ, Agustín HERNÁNDEZ e Nagore URRUTIA. Colaboradoras: Carolina ASTORGA e Itxaso CEBERIO. Coordenação editorial e tradução para português: Artur GONÇALVES, Antonio CASTRO e Manuel FELICIANO. Bragança [Portugal]: Instituto Politécnico de Bragança, 2013. ISBN: 978-972-745-157-9

HO, J. C., REN, C., & NG, E. (2015, Julho). A Review of Studies on the Relationship Between Urban Morphology and Urban Climate Towards Better Urban Planning Design in (Sub) Tropical Regions. *In 9th International Conference on Urban Climate*, Toulouse, France.

IPCC, 2018: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. In Press.

LANDSBERG, H. E. (1981). The urban climate (Vol. 28). *Academic press*.

LOBO, M. C., PARDAL, S., CORREIA, P., & LOBO, M. S. (1995). *Normas Urbanísticas-Princípios e Conceitos Fundamentais. 2ª edição, 1*.

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

LOWRY, W. P. (1977). Empirical estimation of urban effects on climate: a problem analysis. *Journal of Applied Meteorology, 16(2), 129-135*.

MARINS, K. R. D. C. C., & DE ANDRADE ROMÉRO, M. (2012). Integração de condicionantes de morfologia urbana no desenvolvimento de metodologia para planeamento energético urbano. *Ambiente Construído, 12(4), 117-137*.

MARTINS, T. A. D. L., BONHOMME, M., & ADOLPHE, L. (2013). Análise do impacto da morfologia urbana na demanda estimada de energia das edificações: um estudo de caso na cidade de Maceió, AL. *Ambiente Construído, 13(4), 213-233*.

MOREIRA, E. B. M., & NÓBREGA, R. S. (2011). Uso de imagens multiespectrais aplicada à análise espaço-temporal dos padrões de temperatura e albedo da superfície. *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, Curitiba, PR, Brasil, INPE, 0776.*

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

NÓBREGA, R. S., & VERÇOSA, T. (2011). O microclima e o (des) conforto térmico em ambientes abertos na cidade do Recife. *Revista de Geografia (Recife), 28(1), 93-109.*

OKE, T. R. (2006). *Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites.*

PARSAEE, M., JOYBARI, M. M., MIRZAEI, P. A., & HAGHIGHAT, F. (2019). Urban heat island, urban climate maps and urban development policies and action plans. *Environmental technology & innovation, 100341.*

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

QUERINO, C. A. S., MOURA, M. A. L., LYRA, R. D. F., & MARIANO, G. L. (2006). Avaliação e comparação de radiação solar global e albedo com ângulo zenital na região Amazônica. *Revista Brasileira de Meteorologia, 21(3a), 42-49.*

REIS, E., MELO, P., ANDRADE, R., & CALAPEZ, T. (1997). Estatística aplicada, Vol. II. *Edições Sílabo, Lisboa.*

REIS, E. (1998). Estatística Descritiva, 4ª edição. *Edições Sílabo, Lisboa.*

RIZWAN, A. M., DENNIS, L. Y., & CHUNHO, L. I. U. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 20(1), 120-128.

ROCHA, L. M. V., SOUZA, L. C. L., & CASTILHO, F. J. V. (2011). Ocupação do solo e ilha de calor noturna em avenidas marginais a um córrego urbano. *Ambiente Construído*, 11(3), 161-175.

ROMERO, M. A. B. (2001). Princípios bioclimáticos para o desenho urbano. *ProEditores Associados*.

SILVA, F. T., & DE ALVAREZ, C. E. A correlação entre variáveis climáticas em diferentes configurações urbanas. *EURO Elecs*, 2015.

SILVA, J. F., FERREIRA, H. S., & SANTOS, M. O. (2016). Considerações sobre os estudos em clima urbano| Considerations studies on urban climate. *Revista Geama*, 1(2), 162-175.

SOUZA ROLIM, G., DE CAMARGO, M. B. P., LANIA, D. G., & DE MORAES, J. F. L. (2007). Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. *Bragantia*, 66(4), 711-720.

SOUZA, L. C. L. D., TENTE, C. M., GIUNTA, M. B., & NAKATA, C. M. (2010). Fator de visão do céu e intensidade de ilhas de calor na escala do pedestre. *Ambiente construído*, 155-167.

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

TAHA, H., SAILOR, D. J., & AKBARI, H. (1992). *High-albedo materials for reducing building cooling energy use*.

TAHA, H. (1997). Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and buildings*, 25(2), 99-103.

VALLATI, A., GRIGNAFFINI, S., ROMAGNA, M., MAURI, L., & COLUCCI, C. (2016). Influence of Street Canyon's Microclimate on the Energy Demand for Space Cooling and Heating of Buildings. *Energy Procedia*, 101, 941-947.

VIVEIROS, R. R. (2017). *A influência da vegetação em pequenos espaços verdes na mitigação do efeito ilha de calor urbano em Lisboa*. (Doctoral dissertation).

WEBGRAFIA

GRIMM, A. M. (1999). *Meteorologia Básica*. Disponível em:
<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/>. Acesso em 03 de setembro de 2019.

QUADRADO, J. C. Medição da Radiação Solar. *Portal das energias renováveis*.
Disponível em:
http://www.energiasrenovaveis.com/DetalheNoticias.asp?ID_conteudo=102&ID_area=15. Acesso em 26 de junho de 2019.

SANTOS, R. *Como se formam os ventos?*. Brasil de Fato. Disponível em:
<https://www.brasildefato.com.br/2018/06/12/coluna-or-como-se-formam-os-ventos/>.
Acesso em 26 de junho de 2019.