

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

**FORMA URBANA, DENSIDADE DA POPULAÇÃO E ZONAS
CLIMÁTICAS LOCAIS: INFLUÊNCIAS E AVALIAÇÃO DA
ILHA DE CALOR URBANA EM BOGOTÁ, COLÔMBIA**

EDWIN ALEJANDRO RAMÍREZ AGUILAR

São Carlos

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

**FORMA URBANA, DENSIDADE DA POPULAÇÃO E ZONAS
CLIMÁTICAS LOCAIS: INFLUÊNCIAS E AVALIAÇÃO DA
ILHA DE CALOR URBANA EM BOGOTÁ, COLÔMBIA**

EDWIN ALEJANDRO RAMÍREZ AGUILAR

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

Orientação: Prof^a. Dr^a. Léa Cristina Lucas de Souza

São Carlos

2019

Ramírez Aguilar , Edwin Alejandro

Forma urbana, densidade da população e zonas climáticas locais:
influências e avaliação da ilha de calor urbana em Bogotá, Colômbia / Edwin
Alejandro Ramírez Aguilar . -- 2019.
165 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus São
Carlos, São Carlos

Orientador: Léa Cristina Lucas de Souza

Banca examinadora: Érico Masiero, Gianna Melo Barbirato

Bibliografia

1. Ilha de Calor Urbana. 2. Densidade da população. 3. Forma urbana. I.
Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

Bibliotecário(a) Responsável: Ronildo Santos Prado – CRB/8 7325



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Edwin Alejandro Ramirez Aguilar, realizada em 15/03/2019:

Profa. Dra. Lea Cristina Lucas de Souza
UFSCar

Prof. Dr. Érico Masiero
UFSCar

Profa. Dra. Gianna Melo Barbirato
UFAL

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância do(s) membro(s) Gianna Melo Barbirato e, depois das arguições e deliberações realizadas, o(s) participante(s) à distância está(ão) de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora redigido neste relatório de defesa.

Profa. Dra. Lea Cristina Lucas de Souza

Para Alejandra, por su cariño y compañía pese a la distancia.

Agradecimentos

Quero agradecer a todas as pessoas que me apoiaram e me encorajaram durante o tempo em que esta dissertação durou. É assim que concluo este desafio que assumi há dois anos, chamado mestrado.

Em primeiro lugar, agradeço especialmente à minha orientadora, a prof^a Dr^a Léa Cristina Lucas de Souza, por ter me mostrado novos temas e campos de pesquisa que têm sido muito interessantes, também pela dedicação, apoio e constante compromisso ao longo deste processo. Da mesma forma, quero agradecer ao programa de pós-graduação em Engenharia Urbana por ter me proporcionado um espaço de trabalho e diferentes ferramentas que facilitaram o desenvolvimento deste trabalho. Estou particularmente grato ao programa de parceria para educação e treinamento (PAEC) da Organização dos Estados Americanos (OEA) e ao Grupo Coimbra de Universidades Brasileiras (GCUB), que, com seu programa de bolsas, me deu a oportunidade de melhorar profissional e pessoalmente. Da mesma forma, agradeço à Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior (CAPES), que, sem seu grande apoio financeiro, esse tipo de programa não seria possível.

Também estou muito agradecido com outras pessoas e instituições que contribuíram em algum momento no desenvolvimento desta dissertação:

- Aos meus colegas do laboratório, Ana Favretto, Maria Eugénia Fernandes, Leonel Laboissière e Lucas Delloso, pela ajuda ao longo deste processo, pelos momentos de discussão e aprendizagem, pela companhia e amizade.
- Ao Instituto de Meteorologia e Estudos Ambientais da Colômbia (IDEAM) e ao Instituto de Infraestrutura de Dados Espaciais do Distrito Capital (IDECA) por ter me fornecido dados fundamentais para esta dissertação.
- Aos organizadores da 10^a International Conference on Urban Climate (ICUC10), por me dar a oportunidade de conhecer um novo país e poder compartilhar os primeiros resultados desta dissertação graças ao seu apoio financeiro.
- Ao Juan David Ramirez, Iván Diaz e María Alejandra Bernal por sua assistência, apoio e companhia na coleta de dados durante minha visita de campo à cidade de Bogotá.
- Aos meus pais, Henry Ramírez e Olga Aguilar, pelo seu apoio incondicional, quando eu mais precisava e por estarem sempre comigo.

Resumo

RAMÍREZ-AGUILAR, Edwin Alejandro. *Forma urbana, densidade da população e zonas climáticas locais: influências e avaliação da ilha de calor urbana em Bogotá, Colômbia*. 2019. 165f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Urbana). Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

O estudo da Ilha de Calor Urbana (ICU), como o principal fenômeno de alteração climática causado pela urbanização, é fundamental para entender o efeito das áreas urbanas sobre o seu clima regional. Esta dissertação apresenta um estudo baseado, primeiramente, na compreensão da influência da forma urbana, criada pelo tamanho (população) e concentração de sua população (densidade da população) na ICU da cidade de Bogotá, Colômbia. Em segundo lugar, as mudanças térmicas que ocorrem dentro da área urbana são exploradas através da classificação das Zonas Climáticas Locais (ZCL), com base nos parâmetros da forma urbana. A primeira parte é caracterizada pelos contrastes térmicos urbanos, suburbanos e rurais de acordo com as diferenças anuais da temperatura (ΔT_{u-r}). Para isto, dados da temperatura do ar (obtidos a partir de onze estações meteorológicas) foram organizados e tratados estatisticamente de modo que os dados de População (p) e Densidade da população (DP) foram associados. Diferentes variáveis de cobertura do solo e morfologia urbana foram extraídas e analisadas para cada setor ao redor das estações. Entre os dados, foi encontrada uma relação significativamente positiva entre DP e ΔT_{u-r} . Da mesma forma, os parâmetros da forma urbana mais correlacionados com DP e ΔT_{u-r} foram o Fator de Visão do Céu (FVC) e a Fração da Superfície Permeável ($\%Imp$). Um modelo de predição baseado em DP foi proposto e aplicado na criação de um mapa térmico da cidade. A segunda parte é caracterizada pela classificação das ZCL das estações e suas áreas de influência. Observações diárias da Temperatura máxima (T_{max}), mínima (T_{min}) e média (T_{med}) e horárias ($T_{7:00}$, $T_{13:00}$ e $T_{19:00}$) foram obtidas. A sua distribuição e variação foram analisadas, bem como os índices baseados na temperatura e sensação térmica, que foram calculados para serem identificados padrões no comportamento e diferenças térmicas ($\Delta T_{ZCLX-ZCLD}$) entre as estações e suas ZCL. Os resultados mostraram que densidades maiores do que 14500 habitantes/km² podem causar $\Delta T_{u-r} > 1^\circ\text{C}$, maior obstrução do céu ($SVF < 0,45$) e uma diminuição muito grande nas áreas verdes e cobertura vegetal ($\%Imp < 30\%$). Por outro lado, as observações e índices baseados na temperatura e sensação térmica, criados pelos dados de T_{min} , $T_{7:00}$ e $T_{19:00}$, mostram claramente as variações e diferenças entre as estações e suas ZCL. Valores de $\Delta T_{ZCLX-ZCLD} > 5^\circ\text{C}$ foram encontrados nas ZCL densamente urbanizadas. Esta dissertação conclui que a forma urbana, causada pela Densidade da População, tem um grande efeito sobre as diferenças da temperatura, estas mudanças térmicas são mais claras entre as ZCL de áreas abertas e compactas dentro da cidade de Bogotá.

Palavras-chave: Ilha de Calor Urbana, Densidade da população, Temperatura do ar, Forma urbana, Zonas Climáticas Locais, Índices baseados na temperatura.

Abstract

The study of the Urban Heat Island (UHI), as the main phenomenon of climatic alteration caused by urbanization, is fundamental to understand the effect of urban areas on their regional climate. This dissertation presents a study based, first, on understanding the influence of the urban form, created by the size (population) and concentration of its population (population density) in UHI of the city of Bogotá, Colombia. Second, the thermal changes that occur within the urban area are explored through the classification of the Local Climate Zones (LCZ), based on the urban form parameters. The first part is characterized by the urban, sub-urban and rural thermal contrasts according to the annual temperature differences (ΔT_{u-r}). For this, air temperature data (obtained from eleven meteorological stations) were sampled and statistically treated to associate Population (p) and Population Density (PD) data for each station. Different variables of the urban land cover and the urban morphology were extracted and analyzed for each sector around the stations. Among the data, a significant positive relationship was found between PD and ΔT_{u-r} . In the same way, the parameters of the urban form most correlated with PD and ΔT_{u-r} , were the Sky View Factor (SVF) and the Permeable Surface Fraction ($\%PSF$). A prediction model based on PD was proposed and applied in the creation of a city thermal map. The second part is characterized by the stations and their areas of influence LCZ classification. Daily observations of the maximum (T_{max}), minimum (T_{min}) and mean (T_{mean}) and hourly ($T_{7:00}$, $T_{13:00}$ and $T_{19:00}$) air temperature were obtained. Their distribution and variation were analyzed, as well as the air temperature-based indices and thermal sensation indices that were calculated to identify patterns in the behavior and thermal differences ($\Delta T_{ZCLX-ZCLD}$) between the stations and their ZCL. The results showed that densities higher than 14500 inhabitants/km² can cause $\Delta T_{u-r} > 1^{\circ}\text{C}$, greater sky obstruction ($SVF < 0.45$) and a great green areas and vegetation cover decrease ($\%PSF < 30\%$). On the other hand, observations, air temperature-based indices and thermal sensation indices, created by T_{min} , $T_{7:00}$ and $T_{19:00}$ data, clearly show the variations and differences between the stations and their LCZ. Values of $\Delta T_{ZCLX-ZCLD} > 5^{\circ}\text{C}$ were found in the densely urbanized LCZ. This dissertation concludes that the urban form, caused by the population density, has a great effect on temperature differences, these thermal changes are most clear between open and compact LCZ areas within the city of Bogotá.

Keywords: Urban Heat Island, Population Density, Air Temperature, Urban form, Local Climate Zones, Temperature-based indices.

Resumen

El estudio de la Isla de Calor urbano (ICU), como principal fenómeno de alteración climática causada por la urbanización, es fundamental para comprender el efecto de las áreas urbanas en su clima regional. Esta disertación presenta un estudio basado, en primer lugar, en entender la influencia de la forma urbana, creada por el tamaño (población) y concentración de su población (densidad de la población) en ICU de la ciudad de Bogotá, Colombia. En segundo lugar, los cambios termales que se presentan dentro del área urbana son explorados por medio de la clasificación de las Zonas Climáticas Locales (ZCL), apoyada en los parámetros de la forma urbana. La primera parte es caracterizada por los contrastes térmicos urbanos, suburbanos y rurales según las diferencias de temperatura anual (ΔT_{u-r}). Para esto, datos de la temperatura del aire (obtenidos de once estaciones meteorológicas) fueron organizados y estadísticamente tratados para que los datos de la Población (p) y Densidad de la Población (DP) fueran asociados. Diferentes variables de la cobertura de la tierra y la morfología urbana fueron extraídas y analizadas para cada sector alrededor de las estaciones. Entre los datos, se encontró una significativa relación positiva entre DP y ΔT_{u-r} . De la misma manera, los parámetros de la forma urbana más correlacionados con DP y ΔT_{u-r} , fueron el Factor de Visión del Cielo (FVC) y la Fracción de Superficie Permeable ($\%Imp$). Un modelo de predicción basado en DP fue propuesto y aplicado en la creación de un mapa térmico de la ciudad. La segunda parte es caracterizada por la clasificación de las ZCL de las estaciones y sus áreas de influencia. Observaciones diarias de la temperatura máxima (T_{max}), mínima (T_{min}) y media (T_{med}) y horarias ($T_{7:00}$, $T_{13:00}$ y $T_{19:00}$) fueron obtenidas. Su distribución y variación fueron analizadas, al igual que los índices basados, en la temperatura y sensación térmica, que fueron calculados con estos datos para encontrar patrones en el comportamiento y diferencias térmicas ($\Delta T_{ZCLX-ZCLD}$) entre las estaciones y sus ZCL. Los resultados mostraron que densidades superiores a 14500 habitantes/km² pueden causar $\Delta T_{u-r} > 1^{\circ}\text{C}$, mayor obstrucción del cielo ($SVF < 0.45$) y una gran disminución en áreas verdes y cobertura vegetal ($\%Imp < 30\%$). Por otro lado, observaciones e índices basados, en la temperatura y sensación térmica, creados por datos de T_{min} , $T_{7:00}$ y $T_{19:00}$ muestran claramente las variaciones y diferencias entre las estaciones y sus ZCL, encontrándose $\Delta T_{ZCLX-ZCLD} > 5^{\circ}\text{C}$ en las ZCL densamente urbanizadas. Esta disertación concluye que la forma urbana, causada por la densidad de la población, tiene un gran efecto en las diferencias de temperatura, estos cambios termales son más claros entre ZCL de áreas abiertas y compactas dentro de la ciudad de Bogotá.

Palabras clave: Isla de Calor Urbano, Densidad de la población, Temperatura del Aire, Forma urbana, Zonas Climáticas Locales, Índices basados en la temperatura.

Lista de Figuras

- Figura 1.** Unidades urbanas e escalas horizontais às quais pertencem (a-microescala, b- escala local, c-meso-escala), com sua dimensão física típica.....9
- Figura 2.** Estrutura vertical da atmosfera urbana junto com as escalas horizontais em que são enquadradas (a-microescala, b-escala local, c-meso-escala) 11
- Figura 3.** Representação esquemática gráfica da Ilha de Calor Urbana na Camada de Cobertura Urbana. (a) mapa isotérmico e (b) seção transversal da espacialização típica da ICU.....14
- Figura 4.** Representação esquemática dos parâmetros da morfologia urbana obtidos de acordo com a geometria do cânion urbano (a), onde a relação entre a altura dos edifícios ($Alt.Edif = H$)/largura da rua (W) expressa H/W (b). A fração do céu visível para um ponto no meio do cânion urbano expressa o Fator de Visão do Céu (FVC) (c), que pode ser ilustrado projetando os ângulos dos elementos urbanos em um plano horizontal (d).....33
- Figura 5.** Esquema da formação das subclasses das ZCL.....42
- Figura 6.** Características observáveis para identificar as ZCL desde o Sensoriamento Remoto.....50
- Figura 7.** Representação de dois procedimentos metodológicos.55
- Figura 8.** Localização da área de estudo (a), localização das estações meteorológicas com suas Unidades de Planejamento Zonal (UPZ) associadas (b) e imagens dos setores das estações pegadas do Google Steet View (c).....56
- Figura 9.** Mapa de referência da cidade proporcionado pela “Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital” (2018), em diferentes camadas (“layers”) em formato SIG (“Shape”) que agrupa os polígonos dos edifícios (a), ruas (b), bairros (c) y parques (d).....60
- Figura 10.** Cálculo dos dados da Cobertura de Solo, Geometria e Morfologia Urbana.....61

Figura 11. Exemplo de representação do Fator de Visão do Céu (<i>FVC</i>) usando fotografias de “olho de peixe” (a), que foram posteriormente editadas para destacar a área visível do céu (b).....	62
Figura 12. Distribuição e proporções dos parâmetros da Cobertura de Solo Urbano.....	63
Figura 13. Distribuição e proporções da Altura dos Edifícios (<i>Alt.Edif</i>). Pró. A é a proporção baseada nos números de construções (<i>n</i>) (polígonos). Pro. B. é a proporção baseada na área do solo ocupada pelos edifícios (polígono) (<i>A.Edi.p</i>) para cada valor de <i>Alt.Edif</i>	66
Figura 14. Esquemas das metodologias adotadas por Nakata-Osaki, Souza e Rodrigues (a) e Zheng et al (b) para o cálculo da relação <i>H/W</i>	67
Figura 15. Valores medidos do Fator de Visão do Céu (<i>FVC</i>) e valor estimado de <i>H/W</i> e dados associados para o cálculo.....	71
Figura 16. Mapas das áreas de influência das estações meteorológicas e seus valores representativos dos parâmetros da Forma Urbana.....	72
Figura 17. Classificação das estações meteorológicas e suas áreas de influência dentro das Zonas Climáticas Locais.....	76
Figura 18. Variação sazonal da intensidade da Ilha de Calor Urbana (ΔT_{u-r}) durante um período de 12 meses para cada estação meteorológica e diferenças de ΔT_{u-r} entre estações suburbanas e urbanas.....	85
Figura 19. Relação entre a média anual de ΔT_{u-r} e $\log p$ (a) e relação entre a média de ΔT_{u-r} e DP (b) para estações meteorológicas na cidade de Bogotá.....	86
Figura 20. Distinção das relações entre a média anual de ΔT_{u-r} e $\log p$ e ΔT_{u-r} e DP em as estações suburbanas (a, c) e estações urbanas (b, d)	88
Figura 21. Comparação entre os valores preditos de ΔT_{u-r} dados pelos valores reais da Equação (7) e ΔT_{u-r} relacionados ao $\log P$	90
Figura 22. Comparação e distinção entre os valores preditos de ΔT_{u-r} dados pelos valores reais da Equação (8) e ΔT_{u-r} relacionados a DP em estações suburbanas e urbanas (a) e comparação	

entre os valores preditos de ΔT_{u-r} dados pela Equação (9) e ΔT_{u-r} relacionados a DP em só estações urbanas (b).....91

Figura 23. Mapas térmicos expressos por isotérmicas mostrando a distribuição espacial ΔT_{u-r} baseada em dados reais de ΔT_{u-r} obtidos pelas estações suburbanas e urbanas (a) (Tabela Fonte 8), dados ΔT_{u-r} preditos usando a Equação (9) localizados em pontos diferentes da cidade (pontos de previsão) juntamente com os dados reais ΔT_{u-r} (b) e a espacialização de Densidade da População (DP) de acordo com as Unidades de Planejamento Zonal (UPZ) (c).....95

Figura 24. Comparação entre os valores preditos de ΔT_{u-r} dados pela Equação (10) formulada por Oke (1973) e os valores reais de ΔT_{u-r} relacionados a $\log P$97

Figura 25. Comparação entre ΔT_{u-r} predito dado pela Equação (11) formulada por Oke (1973, 1976) e ΔT_{u-r} valores reais relacionados ao $\log P$. Velocidade média do vento regional 2.90 m/s.....98

Figura 26. Comparação entre ΔT_{u-r} e DP com os parâmetros da Cobertura do Solo para Fração de Superfície Edificada (%*Edif*) (a), para Fração de Superfície Permeável (%*Perm*) (b) e para Fração de Superfície Impermeável (%*Imp*) (c).....100

Figura 27. Comparação entre ΔT_{u-r} e DP com os parâmetros morfológicos urbanos. (a) para Alturas dos Edifícios (Alt.*Edif*), (b) para Fator de Visão do Céu (*FVC*) e (c) para a relação *H/W*.....101

Figura 28. Relações entre $DP - \log \%Edif$ (a) e $\log \%Imp$ (b) e relações entre $\Delta T_{u-r} - \log \%Edif$ (c) e $\log \%Imp$ (d).....103

Figura 29. Relações entre $DP - \log Alt.Edif$ (a) e *H/W* (b) e relações entre $\Delta T_{u-r} - \log Alt.Edif$ (c) e *H/W* (d).....104

Figura 30. Relação entre DP e $\log \%Perm$ (a) - $\log FVC$ (b).....105

Figura 31. Relação entre a média anual de ΔT_{u-r} e $\log \%Perm$ (a) - $\log FVC$ (b).....106

Figura 32. Propriedades da Cobertura de Solo Urbano (a, b, c) e da Geometria e Morfologia urbana (d, e, f) das ZCL de diferentes setores da cidade de Bogotá, comparadas com as faixas ou intervalos dos parâmetros sugeridos por Stewart e Oke (2012) para cada ZCL.....108

Figura 33. Distribuição das observações diárias da temperatura do ar para os valores da Temperatura máxima (T_{max}) (a), Temperatura mínima (T_{min}) (b) e Temperatura média (T_{med}) (c) para os diferentes setores e suas Zonas Climáticas Locais em que eles foram classificados. Tr corresponde à estação de referência rural (ZCLD) (Figura 8).....	111
Figura 34. Distribuição das observações horárias da temperatura do ar para o início da manhã ($T_{7:00}$) (a), meio dia ($T_{13:00}$) (b) e início da noite ($T_{19:00}$) (c) para os diferentes setores e suas ZCL em que foram classificados. Tr corresponde à estação de referência rural (ZCLD) (Figura 8).....	114
Figura 35. Porcentagens de ocorrências para os diferentes índices baseados na temperatura do ar de acordo com os dados de Temperatura média (T_{med}) (“Dias de Aquecimento” = DDA e “Dias de Resfriamento” = DDR) (a), Temperatura máxima (T_{max}) (“Dias Quentes” = Dq e “Dias Frescos” = Df) (b) e Temperatura mínima (T_{min}) (“Noites Frias” NFr e “Noites Temperadas” = Nt) (c) para os diferentes setores e suas ZCL em que foram classificados.....	116
Figura 36. Porcentagens de ocorrências para as categorias baseadas na sensação térmica (Muito Frio <20°C, Frio = 10-14°C, Agradável = 14-18°C, Cálido = 18-24°C e Quente = > 24°C) para a temperatura do ar de acordo com os dados da Temperatura Média (T_{med}) para os diferentes setores e suas ZCL nos quais foram classificados.....	118
Figura 37. Percentual de ocorrências para os diferentes índices baseados na temperatura do ar horaria (“Dias de Aquecimento” = DDA e “Dias de Resfriamento” = DDR) para o início da manhã ($T_{7:00}$) (a), meio dia ($T_{13:00}$) (b) e início da noite ($T_{19:00}$) (c) para os diferentes setores e suas ZCL em que foram classificadas.....	119
Figura 38. Porcentagens de ocorrências para as categorias baseadas na sensação térmica (Muito Frio <20°C, Frio = 10-14°C, Agradável = 14-18°C, Cálido = 18-24°C e Quente = > 24°C) de acordo com as observações da temperatura do ar horárias para o início da manhã ($T_{7:00}$) (a), meio dia ($T_{13:00}$) (b) e início da noite ($T_{19:00}$) (c) para os diferentes setores e suas ZCL em que foram classificadas.....	120
Figura 39. Variações da Intensidade da Ilha de Calor Urbana ($\Delta T_{ZCLX-ZCLD}$) para os diferentes setores classificadas dentro das ZCL de acordo com as observações da temperatura diária (T_{min} , T_{med} e T_{max}) (a) e temperatura horária ($T_{7:00}$, $T_{13:00}$ e $T_{19:00}$) (b)	122

Lista de Tabelas

Tabela 1. Níveis metodológicos para estudos do clima urbano.....	4
Tabela 2. Níveis metodológicos para esta dissertação.....	4
Tabela 3. Caracterização dos métodos de interpolação.....	16
Tabela 4. Causas sugeridas da Ilha do Calor Urbano. Cada modificação urbana tem como consequência uma alteração no fluxo e no balanço de energia que causa as anomalias térmicas.....	18
Tabela 5. Definições e classes das ZCL.....	40
Tabela 6. Valores dos parâmetros geométricos e da cobertura do solo para as ZCL.....	41
Tabela 7. Valores dos parâmetros termais, radiativos e metabólicos para as ZCL.....	41
Tabela 8. Intensidade da Ilha de Calor Urbana (ΔT_{u-r}) durante um período de 12 meses para três estações meteorológicas suburbanas e seis estações urbanas. Cada estação está associada a uma ou várias UPZ (Figura 8) que determinam a População (P) e os dados da Densidade da População (DP) de densidade populacional para cada estação. Os valores de ΔT_{u-r} para cada mês são obtidos a partir da média da temperatura diária.....	59
Tabela 9. Valores médios da temperatura diária do ar para as Temperaturas máxima (T_{max}), mínima (T_{min}) e média (T_{med}) e para a Temperatura horária do ar para as 7:00, 13:00 e 19:00 ($T_{7:00}$, $T_{13:00}$ e $T_{19:00}$), obtidas das 9 estações meteorológicas por um período de 365 dias.....	77

Tabela 10. Frequência, número de dias e percentagens dos índices baseados na temperatura do ar (T_{ma} , T_{min} e T_{med}) e as categorias de sensação térmica (T_{med}) para as estações meteorológicas e suas ZCL nas quais estão classificadas.....	79
Tabela 11. Frequência, número de dias e percentagens dos índices baseados na temperatura do ar e as categorias de sensação térmica ($T_{7:00}$, $T_{13:00}$ e $T_{19:00}$) para as estações meteorológicas e suas ZCL nos quais eles estão classificados.....	80
Tabela 12. Intensidade da Ilha de Calor Urbana de acordo com as ZCL durante um período de 1 ano de acordo com os valores médios (tabela 9) das observações diárias da temperatura do ar (T_{ma} , T_{min} e T_{med}) e as observações horárias ($T_{7:00}$, $T_{13:00}$ e $T_{19:00}$) para as estações meteorológicas e suas ZCL nos quais são classificadas.....	81
Tabela 13. Valores previstos de ΔT_{u-r} por três diferentes modelos de regressão (equações).....	89
Tabela 14. Listas dos valores preditos de ΔT_{u-r} pela Equação (9) em diferentes pontos de previsão dentro da cidade e suas UPZ relacionadas que determinaram os valores da Densidade da População (DP) para cada ponto de previsão.....	93
Tabela 15. Valores de ΔT_{u-r} preditos pelo modelo de Oke (1973)	96
Tabela 16. Valores de ΔT_{u-r} preditos pelo modelo de Oke (1973, 1976)	98

Lista de siglas e abreviaturas

AD	APTO EL DORADO (Estação meteorológica)
AUD	C.UNIV. AGROP.UDCA (Estação meteorológica)
BMP	BOLBAO MAXIMO POTI (Estação meteorológica)
CCU	Camada de Cobertura Urbana
CLU	Camada de Limite Urbana
CM	Camada da Mistura
CS	Camada de superfície
CSP	COL SANTIAGO PEREZ (Estação meteorológica)
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DGC	Dias Grau de Aquecimento
Eq	Equação
HD	COL H DURAN (Estação meteorológica)
ICU	Ilha do Calor Urbano
IDEAM	Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales
IDW	Distância inversa ponderada
IK	INEM KENNEDY (Estação meteorológica)
JB	JARDIN BOTANICO (Estação meteorológica)
MapaCU	Mapas Climáticos Urbanos
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NGU	NVA GENERACION AUT (Estação meteorológica)

R2	Coeficiente de determinação
SCI	Sub-Camada Inercial
SCR	Sub-Camada de Rugosidade
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
UC	UNISALLE CENTRO (Estação meteorológica)
UPR	Unidades de Planejamento Zonal rural
UPZ	Unidades de Planejamento Zonal
WUDAPT	World Urban Database and Access Portal Tools
ZCL	Zonas Climáticas Locais

Lista de símbolos

<i>Acanion</i>	Área do cânion urbano	(m ²)
<i>A.Edi.i</i>	Área do solo ocupada para cada edifício (polígono)	(m ²)
<i>Alt.Edif</i>	Altura dos Edifícios - Altura média ponderada	(m)
<i>Alt.Edif.i</i>	Altura de cada edifício (polígono)	(m)
<i>CExi</i>	Comprimento total dos eixos traçados	(m)
<i>DDA</i>	Dias de Aquecimento	(%)
<i>DDR</i>	Dias de Resfriamento	(%)
<i>Df</i>	Dias Frescos	(%)
<i>DP</i>	Densidade da População	(habitantes/km ²)
<i>Dq</i>	Dias Quentes	(%)
<i>FVC</i>	Fator de Visão do Céu	
<i>H/W</i>	Relação H (<i>Alt.Edif</i>) / W	
<i>n</i>	Número de edifícios – eixos (polígono/traços)	
<i>NFr</i>	Noites Frias	(%)
<i>Nt</i>	Noites Temperadas	(%)
<i>P</i>	População	(habitantes)
Pro. A	Proporção de acordo com o número (n) de edifícios	(%)
Pro. B	Proporção de acordo com a área ocupada pelos edifícios	(%)
<i>T_{max}</i>	Temperatura do ar Máxima diária	(°C)
<i>T_{med}</i>	Temperatura do ar Média diária	(°C)
<i>T_{min}</i>	Temperatura do ar Mínima diária	(°C)
<i>T_{7:00}</i>	Temperatura do ar as 7:00 horas	(°C)

$T_{13:00}$	Temperatura do ar as 13:00 horas	(°C)
$T_{19:00}$	Temperatura do ar as 19:00 horas	(°C)
\bar{u}	Velocidade do vento regional	(m/s)
W	largura do cânion urbano	(m)
$\%Edif$	Fração de Superfície Edificada	(%)
$\%Imp$	Fração de Superfície Impermeável	(%)
$\%Perm$	Fração de Superfície Permeável	(%)
ΔT_{u-r}	Intensidade da Ilha de Calor Urbana	(°C)
$\Delta T_{ZCLX-ZCLD}$	Intensidade da Ilha de Calor Urbana de acordo às ZCL	(°C)
$\Delta T_{ZCLX-ZCLZ}$	Comparação entre duas ZCL	(°C)

Sumário

Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	x
Lista de siglas e abreviaturas	xii
Lista e símbolos	xiv
1 Introdução	1
1.1 Objetivos da dissertação.....	3
1.2 Síntese metodológica.....	3
1.3 Estrutura da dissertação.....	6
2 Atmosfera e Ilha de Calor Urbana	7
2.1 Unidades urbanas e escalas horizontais da atmosfera urbana.....	8
2.2 Estrutura vertical da atmosfera urbana.....	10
2.3 Ilha do Calor Urbano na Camada da Cobertura Urbana.....	12
2.4 Espacialização e visualização da Ilha do Calor Urbano.....	13
2.5 Causas, consequências e mitigação da Ilha de Calor Urbana.....	18
3 Temperatura do ar no ambiente urbano	22
3.1 Temperatura do ar e temperatura da superfície.....	23
3.2 Valores mínimos e máximos da temperatura do ar.....	24
3.3 Índices baseados na temperatura do ar.....	25

4 População, Densidade da População e Forma Urbana.....	28
4.1 Intensidade da Ilha do Calor Urbana e População da Cidade.....	29
4.2 Cobertura de Solo Urbano.....	30
4.3 Geometria e Morfologia Urbana.....	32
5 Zonas Climáticas Locais.....	36
5.1 Classificação.....	38
5.2 variações da temperatura e intensidades da Ilha do Calor Urbano na ZCL.....	43
5.2.1 Variações das ZCL de acordo com a temperatura do ar.....	43
5.2.2 Diferenças na intensidade da ICU de acordo com as ZCL.....	45
5.2.3 Diferenças entre zonas classificadas dentro da mesma ZCL e influência da localização.....	47
5.2.4 Índices baseados na temperatura do ar e as ZCL.....	47
5.3 ZCL e modelos climáticos urbanos.....	48
5.4 Mapeamento das ZCL.....	49
6 Metodologia.....	52
6.1 Introdução.....	53
6.1.1 Fase 1.....	53
6.1.2 Fase 2.....	54
6.2 Materiais e Métodos da Fase 1.....	57
6.2.1 A área de estudo e coleta de dados climáticos e demográficos.....	57
6.2.2 Coleta de dados e cálculo de parâmetros da Forma Urbana.....	60
6.2.3 Análises dos dados da Cobertura de Solo Urbano.....	63
6.2.4 Estimação da Altura dos Edifícios e análises dos dados.....	64
6.2.5 Cálculo da relação H/W e análises de dados.....	67
6.2.6 Cálculo do Factor de Visão do Céu e análise de dados.....	69
6.2.7 Correlações entre parâmetros demográficos e da Forma Urbana e sua relação com a Intensidade da Ilha de Calor Urbana.	73
6.3 Materiais e Métodos da Fase 2.....	73

6.3.1	Classificação das Zonas Climáticas Locais.....	73
6.3.2	Coletas de dados diários y horários da temperatura do ar.....	75
6.3.3	Cálculo dos Índices Baseados na Temperatura.....	78
6.3.4	Diferenças da Temperatura do ar Urbana – Rural de acordo com as ZCL.....	81
7	Resultados e Discussões.....	83
7.1	Prevendo a Intensidade da Ilha de Calor Urbana baseada na Densidade da População..	84
7.1.1	Intensidade da Ilha de Calor Urbana.....	84
7.1.2	Correlações entre ΔT_{u-r} – População e ΔT_{u-r} – Densidade da População.....	86
7.1.3	Diferenças nas relações entre as estações sub-urbanas e urbanas.....	87
7.1.4	Modelo de Predição da Intensidade da Ilha de Calor Urbana.....	89
7.1.5	Visualização e distribuição da Intensidade da Ilha de Calor Urbana em Bogotá...	92
7.2	Aplicação de outros modelos baseados na População na cidade de Bogotá.....	94
7.2.1	Modelo de previsão da América do Norte (Oke 1973) em Bogotá.....	94
7.2.2	Modelos com outros parâmetros da Camada de Cobertura urbana.....	97
7.3	Influências da forma urbana e sua relação com a Densidade da População na Intensidade da Ilha de Calor.....	99
7.3.1	Comparação da variabilidade dos valores da Forma Urbana, Densidade da População e a Intensidade da Ilha de Calor Urbana.....	99
7.3.2	Correlações entre os Parâmetros da Forma urbana com ΔT_{u-r} e DP	102
7.4	Diferenças térmicas baseadas em observações da temperatura do ar nas Zonas Climáticas Locais de Bogotá, Colômbia.....	107
7.4.1	Propriedades das Zonas Climáticas Locais em Bogotá.....	107
7.4.2	Diferenças no comportamento térmico das Zonas Climáticas Locais em Bogotá.....	110
7.4.3	Variação das Zonas Climáticas Locais de acordo com os Índices baseados na temperatura.....	115
7.4.4	Diferenças entre as Zonas Climáticas Locais e suas Intensidade da Ilha de Calor Urbana.....	121
8	Conclusões e Considerações finais.....	124

8.1 Efeito da Forma Urbana (criada pela Densidade da População) na intensidade da Ilha do Calor Urbano.....	125
8.2 Espacialização da Ilha de Calor Urbana e aplicação de outros modelos de predição em Bogotá.....	126
8.3 Aplicação e variação da temperatura do ar nas Zonas Climáticas Local de Bogotá.....	127
8.4 Futuros Estudos.....	129
Referências.....	131

1

Introdução

De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia da Colômbia, o dia 8 de fevereiro de 2017 correspondeu ao dia mais quente registrado em Bogotá (Instituto Nacional de Metrología, 2017). Normalmente, com uma temperatura média de 15°C, esse dia atingiu um pico de temperatura de 25.5°C. Esses eventos, e o fato de que a Colômbia sofre a influência de fenômenos climáticos como “El Niño”, resulta no aumento da temperatura em algumas regiões do país e no aumento da precipitação em outras regiões, provocando, a partir das cidades - os locais mais afetados - um interesse de diferentes atores urbanos em levar em conta aspectos climáticos na tomada de decisões.

Devido a isso, identificou-se que, atualmente, existe uma vulnerabilidade nas áreas urbanas devido à falta de desenho, desenvolvimento e planejamento urbano adequados que levem em conta o clima e o meio ambiente. Por esse motivo, existe uma preocupação de que as cidades se adaptem às mudanças climáticas. Nesse sentido, as diferentes instituições têm questionado como as cidades têm que enfrentar os fenômenos climáticos que surgem e como precisam se adaptar. A resiliência urbana torna-se, portanto, um desafio para o planejamento urbano, pois ainda há grande dificuldade por parte das instituições e organizações na compreensão do clima urbano, não havendo clareza sobre como essa adaptação vai ser feita.

Em cidades tropicais, o estudo do clima urbano e seu principal fenômeno, a Ilha do Calor Urbano (ICU), que consiste num aumento na temperatura do ar em áreas urbanas em comparação com a área rural circundante (Tzavali *et al.*, 2015), não tem sido muito pesquisado como em outras partes do mundo. Segundo Roth (2007), até a última década, não mais de 20% dos estudos de clima urbano foram feitos nessas partes do planeta. No caso específico da Colômbia, de acordo com o IDEAM, o país parece ter uma deficiência em pesquisas

relacionadas ao clima, clima urbano e adaptação às mudanças climáticas (Tercera Comunicación nacional de Cambio Climático, 2016). Até o ano 2015, pesquisas ou estudos de caso realizados na Colômbia representavam apenas 0,92% da produção mundial.

A composição e a configuração da área urbana, características que têm sido o produto do processo de urbanização, tem causado a redução da cobertura vegetal, a qual vem sendo substituída por edifícios e ruas (Whitford, Ennos e Handley, 2001). Essa mudança no ambiente físico provoca alterações nas condições da superfície da Terra e nas trocas de energia com a camada limite superior (Oke, 1981). Problemas ambientais, como a poluição do ar, inundações e a presença da Ilha de Calor Urbana como um dos principais fenômenos descritos e estudados para a compreensão deste impacto (Arnfield, 2003; Memon, Leung e Chunho, 2008), mostram que a configuração atual da cidade, expressa na sua morfologia urbana, não é a mais adequada para o meio ambiente, porque não gera um baixo impacto (Touchaei e Wang, 2015). Considerações climáticas devem se tornar um fator determinante no desenho urbano. Portanto, primeiro é importante entender a relação entre a configuração espacial e as condições climáticas de cada cidade. É necessário entender que cada região climática necessita de uma configuração e uma forma urbana diferentes, que ajudem na melhoria do ambiente térmico da cidade (Golany, 1996).

Nesse sentido, os estudos sobre o clima urbano desenvolvidos por Stewart e Oke (2012) parecem oferecer um potencial promissor como ferramenta para entender e avaliar a Ilha do Calor Urbano, entender o impacto do ambiente construído no ambiente térmico e classificar a estrutura urbana. Esses autores sugerem um novo sistema de classificação da área urbana e rural da cidade, denominado Zonas Climáticas Locais (ZCL). Este sistema de caracterização da cidade oferece uma oportunidade para integrar o conhecimento oferecido pelo estudo do clima urbano com outras áreas, como o desenho e o planejamento urbano. As Zonas Climáticas Locais foram desenvolvidas com o objetivo de criar uma classificação padronizada, que facilite os estudos das observações da Ilha de Calor Urbana e da temperatura.

Por tudo isso, há uma necessidade de conhecimento sistematizado e de um estudo descritivo que estabeleça uma relação entre os diferentes parâmetros e indicadores para entender o fenômeno da Ilha do Calor Urbano (Bai *et al.*, 2018) na cidade de Bogotá, a capital da Colômbia. Esse estudo foca principalmente a descrição da cobertura da superfície ou do solo, a morfologia urbana e o impacto produzido pela população da cidade sobre as diferenças na temperatura do ar presentes nas áreas urbana.

1.1 Objetivos da dissertação

O objetivo geral desta dissertação é reconhecer e explorar a intensidade da Ilha de Calor Urbana. Procura-se assim, identificar a relação entre os parâmetros demográficos (População e Densidade da População) e a forma urbana, descrita por parâmetros das Zonas Climáticas Locais, para perceber a influência do ambiente construído nas diferenças e variações da temperatura do ar presentes na cidade de Bogotá, Colômbia.

Para ajudar a cumprir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos devem ser atingidos:

- Desenvolver um modelo de predição simples da Intensidade da Ilha de Calor Urbana, baseado no parâmetro demográfico (População ou Densidade da População), que permite identificar as diferenças de temperatura presentes nos setores da cidade, caracterizados de acordo com o seu contexto rural, suburbano e urbano.
- Calcular e analisar os parâmetros da forma urbana (Cobertura de Solo, Geometria e Morfologia urbana), destacando seus efeitos sobre a Intensidade da Ilha de Calor Urbana e na relação com a População ou Densidade da População da cidade.
- Classificar diferentes setores da cidade de Bogotá de acordo com as Zonas Climáticas Locais, para identificar se o comportamento térmico é similar entre os setores que compõem cada ZCL e, ao mesmo tempo, se existem diferenças entre elas, para avaliar o comportamento, as condições e as diferenças termais entre a área urbana da cidade.

1.2 Síntese metodológica

Os métodos utilizados nesta investigação possuem caráter descritivo, a fim de compreender as possíveis relações e influência do número e da concentração de habitantes e das características de cobertura e da morfologia urbana sobre as mudanças na temperatura do ar apresentadas pelos diferentes setores da cidade. Da mesma forma, essas mudanças térmicas também são exploradas através de uma classificação baseada justamente nos parâmetros da forma urbana.

A fim de cumprir o objetivo geral e os objetivos específicos acima mencionados, foi necessário estabelecer diferentes níveis metodológicos com base nos níveis descritos por Terjung (1976) e Oke (1982) e resumidos por Arnfield (2006) (Tabela 1), que descrevem níveis

que vão desde o reconhecimento de um fenômeno baseado em inventários qualitativos e quantitativos, até a construção de modelos físico-matemáticos para prever esses fenômenos.

Tabela 1. Níveis metodológicos para estudos do clima urbano. Fonte: adaptado de Terjung (1976) Oke (1982) e Arnfield (2006).

Terjung (1976)		Oke (1982)
1	Inventario qualitativo e associações	Reconhecimento e descrição do fenômeno
2	Correlações estruturais quantitativas	Ligações (estatísticas) de uma característica com outros fatores
3	Funcionamento dos processos	Estudo dos processos que causam o fenômeno
4	Modelos físicos de previsão	Construção de modelos para prever o comportamento do fenômeno

Considerando que esta pesquisa procura ser um estudo descritivo, os diferentes métodos que desenvolvem este trabalho estão enquadrados nos dois primeiros níveis metodológicos propostos por Terjung (1976) e Oke (1982). Esses são ajustados ou rerepresentados para esta dissertação em quatro níveis, que podem ser repetidos na mesma etapa e com diferentes métodos. Além disso, um nível neutro de caracterização é proposto, o qual definirá as duas fases desta dissertação (Tabela 2).

Tabela 2. Níveis metodológicos para esta dissertação.

Nível	
1	Inventario quantitativo das vareáveis
2	Reconhecimento e descrição das variáveis
3	Associações e comparações das variáveis
4	Correlações das variáveis
Neutro	Caracterização das variáveis

O objetivo do nível metodológico 1, é a coleta de dados de diferentes fontes. Por exemplo, para variáveis climáticas, são utilizadas estações meteorológicas; da mesma forma, entidades públicas e administrativas da cidade são fontes para obtenção de dados demográficos e dados cadastrais da cidade, como mapas de planejamento. Essas fontes primárias foram atualizadas e complementadas por uma visita de campo à cidade. Com tudo isso, o objetivo principal deste nível é o tratamento dos dados coletados para o cálculo dos parâmetros urbanos climáticos, demográficos e morfológicos que permitam atingir níveis metodológicos mais elevados e que são usados nas diferentes etapas que compõem esta dissertação.

A finalidade do nível 2 é fazer uma descrição aprofundada dos dados de cada parâmetro. Deste jeito, frequências e proporções, valores maiores e menores são analisados e são calculados valores da tendência central que representam cada um deles. Assim, é possível reconhecer os valores em que alguns efeitos ou fenômenos tendem a aparecer pela análise de um determinado parâmetro, e permitem o desenvolvimento de produtos visuais, como mapas térmicos que podem descrever a Ilha do Calor Urbano como um fenômeno. Este é um dos níveis metodológicos dominantes, devido à necessidade de compreender a complexidade que se apresenta nos diferentes parâmetros morfológicos, demográficos ou climáticos, especialmente nos parâmetros da forma urbana. A diversidade que apresenta alguns setores da cidade na sua superfície urbana, fazem com que o cálculo, análises dos dados e a procura de um valor central ou representativo que permite a comparação com outras variáveis, seja extenso.

O nível 3 é muito importante porque ajuda a identificar padrões por meio da comparação e associação dos diferentes parâmetros. Estas comparações ajudam a estabelecer se a variação dos valores (valor representativo) de um parâmetro entre diferentes pontos ou setores da cidade, é semelhante a outro parâmetro, proporcional ou inversamente proporcional, para sugerir a existência de relacionamentos. Também dentro deste nível, está a comparação de métodos, classificações e modelos propostos por outros estudos aplicados a esta pesquisa, o que possibilita gerar discussões e validar propostas feitas por outros autores.

O último nível, tem a finalidade de confirmar as relações proporcionais ou inversamente proporcionais sugeridas no nível anterior por meio de análise de correlação. Isso ajuda a entender quais parâmetros têm influência sobre outros parâmetros e quais parâmetros podem produzir um determinado fenômeno, possibilitando a proposição de um modelo de predição baseado em alguns desses parâmetros.

Finalmente, um nível neutro caracteriza e ajuda a catalogar os pontos e setores de origem dos dados que são analisados nas diversas etapas da dissertação. Esta pesquisa é dividida em duas fases, e estas, por sua vez, são divididas em duas etapas. A primeira fase busca uma abordagem local das diferenças de temperatura entre diferentes setores da cidade de Bogotá e a influência das características desses setores nessas diferenças. Portanto, essa fase é caracterizada pelo tradicional contraste entre os setores rural, suburbano e urbano. A segunda fase aprofunda-se no estudo dessas diferenças térmicas, além de avaliar seu comportamento e condições. Por isso, a caracterização desta fase é mais aprofundada e baseada no método de

classificação das Zonas Climáticas Locais (Stewart e Oke, 2012) aplicada aos setores estudados da cidade.

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação foi dividida em 8 capítulos. Este primeiro capítulo serve de apresentação e contextualização dos temas abordados, englobando os objetivos da pesquisa, e apresenta uma síntese metodológica.

O segundo capítulo oferece uma estrutura conceitual das unidades e escalas urbanas, bem como uma descrição da atmosfera urbana e uma revisão do fenômeno da Ilha do Calor Urbano. Da mesma forma, o terceiro capítulo analisa a importância da temperatura do ar e seu estudo, como uma das principais variáveis na observação e compreensão do clima urbano. Da mesma maneira, o quarto capítulo faz uma revisão do impacto e influência da população, sua densidade e a forma urbana, no aumento, diferenças e variação na temperatura do ar. Da mesma forma, o quinto capítulo faz uma revisão teórica das Zonas Climáticas Locais e seu processo de classificação, além de mostrar exemplos baseados na literatura em que as ZCL são usadas no estudo do clima urbano.

O sexto capítulo apresenta os diferentes métodos utilizados para esta dissertação, que são agrupados em quatro etapas, e estas, por sua vez, compõem as duas etapas metodológicas da pesquisa. O sétimo capítulo contém as análises e discussões dos resultados desta dissertação. Finalmente, as conclusões e considerações finais são mostradas no oitavo capítulo.

2

Atmosfera e Ilha de Calor Urbana

Um dos exemplos mais claros de modificação climática feita por humanos é a Ilha de Calor Urbana (ICU), que é um fenômeno que mostra que as cidades são quase sempre mais quentes do que o ambiente natural (Arnfield, 2003; Oke, Mills, G., Christen e Voogt, J.A., 2017). Este fenômeno e outros impactos no meio ambiente são causados principalmente pelo processo de urbanização que afeta consideravelmente o entorno natural. Entender a conexão entre a área urbanizada e o clima urbano, que se expressa com a alteração do clima local pelas variações na característica da superfície urbana (Coutts, Beringer e Tapper, 2007; Memon, Leung e Chunho, 2008), é muito importante, pois gera alterações na troca de energia e as condições térmicas do local (Oke, 1981). Com base nisso, pode-se considerar que a ilha do calor urbano é um indicador importante para avaliar a severidade da urbanização (Memon, Leung e Chunho, 2008).

Oke (1982) define a Ilha de Calor Urbana (ICU), como uma anomalia térmica que tem dimensões horizontais, verticais e temporais, considerando isso, este capítulo apresenta os principais conceitos no estudo da ICU e do clima urbano. Uma contextualização é feita nas escalas horizontais e unidades urbanas que permitem explicar melhor a estrutura da cidade e, da mesma forma, explica a importância de entender como a estrutura vertical da atmosfera urbana é formada, isto nas duas primeiras seções. A terceira seção explica a distinção entre ICU de acordo com a estrutura vertical, concentrando-se na Camada de Cobertura Urbana. Finalmente, para as duas últimas seções, os métodos nos quais esse fenômeno foi representado graficamente são explorados e é feita uma descrição das causas, consequências e medidas de mitigação apresentadas por vários estudos.

2.1 Unidades urbanas e escalas horizontais da atmosfera urbana

No estudo do clima urbano e seu principal fenômeno, a Ilha de Calor Urbana, o conceito de escala é muito importante, especialmente na hora de propor estudos e realizar medições da temperatura do ar ou outras variáveis. Oke (2004) recomenda que no momento de fazer observações meteorológicas em locais urbanos, três escalas horizontais devem ser levadas em conta. Da mesma forma, para Arnfield (2003), o conceito de escala é fundamental para compreender as formas pelas quais os diferentes componentes da superfície urbana interagem com as camadas atmosféricas superiores. Na paisagem urbana se apresentam várias unidades urbanas que representam aqueles componentes urbanos enquadrados nas escalas horizontais.

Arnfield (2003) e Oke *et al.* (2017) explicam que a menor unidade urbana representada na paisagem urbana é a “faceta”, que representa principalmente elementos artificiais, como paredes e telhados, que dependendo de seu material, tem suas próprias propriedades térmicas. A próxima unidade são os “elementos urbanos”, cada um dos quais é composto de uma combinação de “facetas”, que definem edifícios, ruas, árvores e superfícies. A próxima unidade urbana é definida pela combinação geométrica intra-urbana das facetas verticais e horizontais dos elementos urbanos, o vácuo gerado entre estes elementos é ocupado por uma massa de ar, aquele espaço ocupado é conhecido como o “cânion urbano” (Nakata-Osaki, Souza e Rodrigues, 2018). Essas três primeiras unidades urbanas estão enquadradas na microescala (Figura 1-a). Nela cada superfície e objeto tem seu próprio microclima, a temperatura do ar e da superfície podem variar vários graus em distâncias muito curtas, e até pequenos objetos podem produzir uma alta perturbação no fluxo de ar - a extensão dessa escala vai de menos de um metro a centenas de metros. Por ser muito difícil caracterizar climas locais com essa escala, ela é usada para estudos muito específicos ou especializados (Oke, 2004a).

Um dos elementos urbanos mais comuns são os edifícios, o conjunto de vários edifícios adjacentes, compõem a próxima unidade urbana conhecida como o “bloco urbano”, da mesma forma, o conjunto de vários blocos urbanos com características semelhantes compõem a unidade urbana dos “bairros”, que representam áreas homogêneas da área urbana total (Arnfield, 2003; Oke, Mills, G., Christen e Voogt, J. A., 2017). Essas duas unidades urbanas podem ser caracterizadas dentro da escala local (Figura 1-b). Segundo Oke (2004), esta escala pode se estender de um a vários quilômetros, por isso, os dados climáticos fornecidos pelas estações meteorológicas representam essa escala. Fatores climáticos como vegetação, altitude e topografia influenciam a escala local.

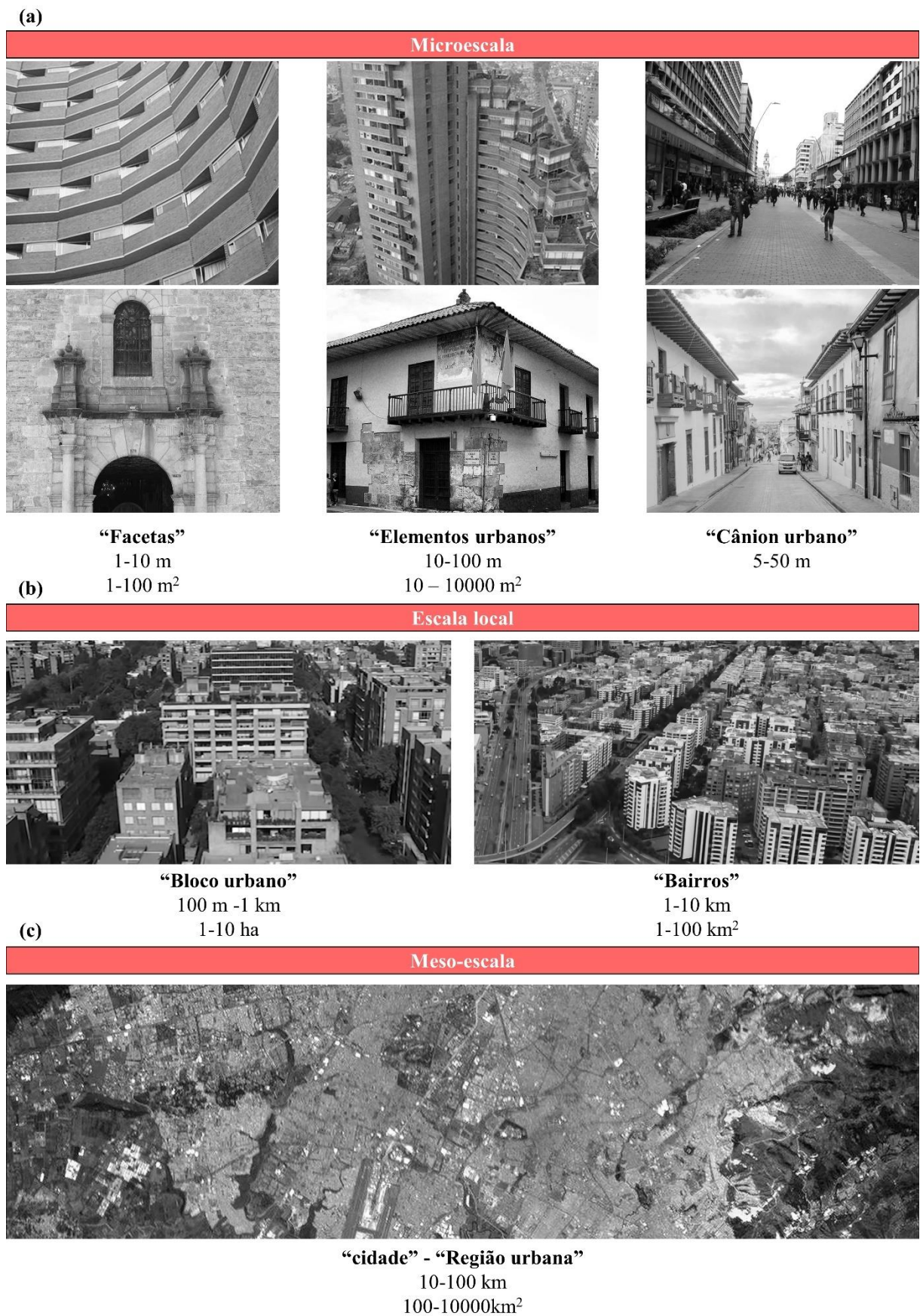


Figura 1. Unidades urbanas e escalas horizontais às quais pertencem (a-microescala, b- escala local, c-

meso-escala), com sua dimensão física típica. Fonte: Adaptado de Oke (2017).

A última escala descrita por Oke (2004) mede a influência da área urbana total, esta pode se estender por dezenas de quilômetros e é chamada de meso-escala (Figura 1-c). As unidades urbanas enquadradas nessa escala é a “cidade”, composta por diferentes bairros, que refletem o desenvolvimento e a realidade espacial, social e econômica da área urbana total, a unidade urbana da cidade, quando considera o meio rural e natural vizinhos, passa a ser a última unidade urbana descrita por Oke *et al.* (2017), denominada “região urbana”. Reconhecer essas unidades urbanas e as escalas horizontais é fundamental, porque cada uma delas tem trocas energéticas e balanços de energia diferentes (Arnfield, 2003).

2.2 Estrutura vertical da atmosfera urbana

Assim como as diferentes unidades urbanas descrevem a estrutura da área urbana a partir de vários níveis, na estrutura vertical da atmosfera urbana acontece o mesmo. A camada que é capaz de descrever a presença de uma área urbana inteira é a Camada de Limite Urbana (CLU), esta camada faz parte da camada limite atmosférica planetária, porém, a presença da cidade e suas diferentes superfícies homogêneas (bairros) presentes numa escala local afetam as características da massa de ar superior, influenciando seu fluxo e suas propriedades termodinâmicas (Arnfield, 2003; Oke, 2004a).

A estrutura vertical da atmosfera urbana está relacionada às diferentes escalas horizontais e unidades urbanas, de acordo com isso, a CLU é enquadrada na meso-escala como a camada superior na qual ela é dividida (Figura 2-a). De acordo com Oke *et al* (2017), a parte mais baixa da CLU (10%) corresponde à Camada de superfície (CS), assim, a parte superior da CLU corresponde à Camada da Mistura (CM) (Figura 2-a) .Aqui os efeitos locais da área urbana, presentes na CS, começam a ser diluídos e misturados, caracterizando a CLU, por isso, a profundidade de ambos é dependente, ou seja, a CLU aumenta ou diminui sua profundidade na época e de acordo com o comportamento da CM (Oke, 1982).

Os efeitos da cidade e suas diferentes superfícies são mais acentuados na Camada de superfície (CS), por isso, ela pode ser caracterizada na escala local (Figura 2-b) e na microescala (Figura 2-c). Oke *et al* (2017) explica que o CS é dividido entre duas sub-camadas, a primeira e a mais alta, é chamada Sub-Camada Inercial (SCI) (Figura 2-b)> Em escala local, SCI mostra os efeitos integrados dos bairros urbanos e seus elementos. A parte mais baixa do CS é a Sub-Camada de Rugosidade (SCR) (Figura 2-c), aqui os efeitos de diferentes edifícios e outros

elementos urbanos (microescala) são mostrados, por isso, a SCR é muito turbulenta. Segundo Oke (2004) e Roth (2000), a altura do SCR pode ser entre 1,5 a 3 vezes a altura dos edifícios e depende da densidade dos elementos urbanos, principalmente edifícios e da estabilidade atmosférica.

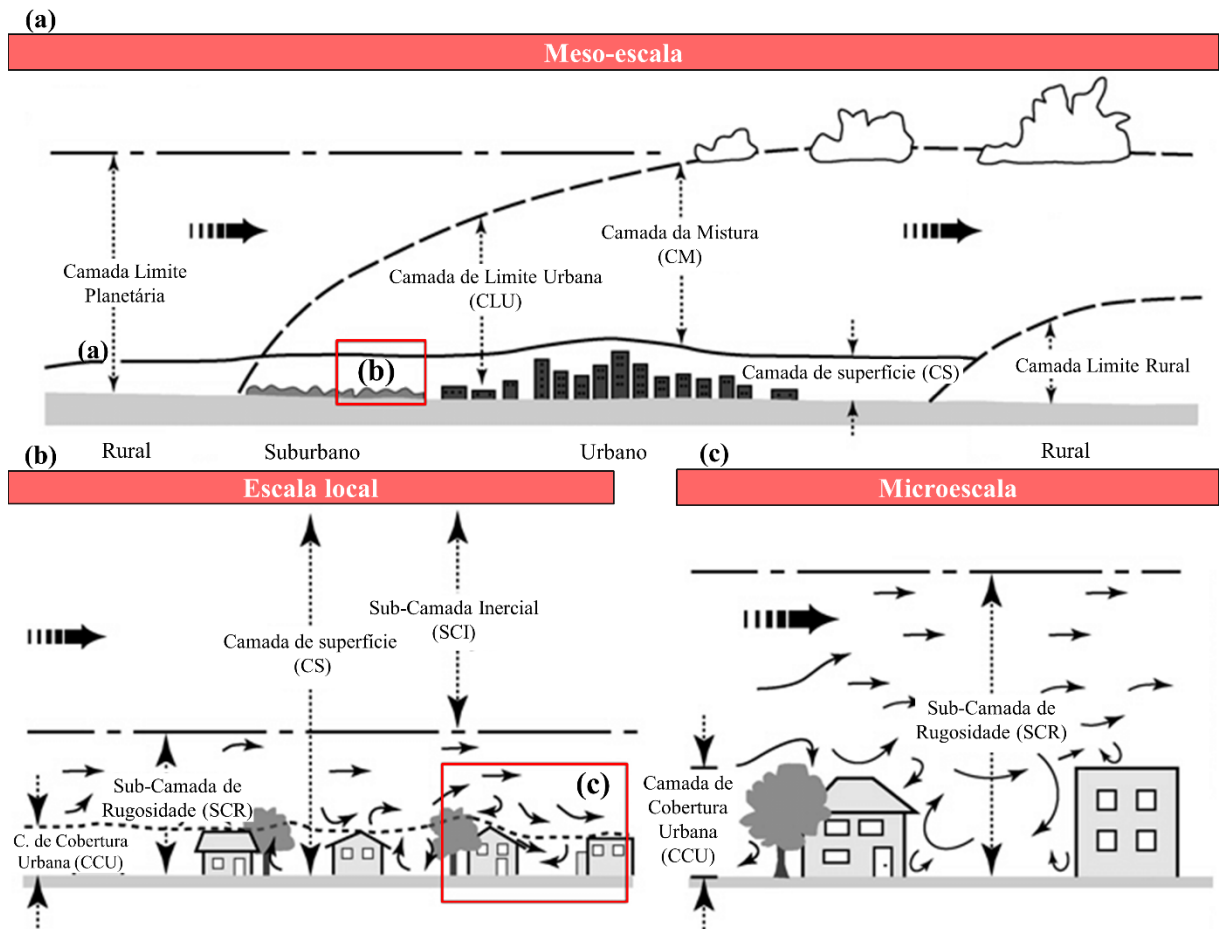


Figura 2. Estrutura vertical da atmosfera urbana junto com as escalas horizontais em que são enquadradas (a-microescala, b-escala local, c-meso-escala), Fonte: Adaptado de Oke (2004).

Finalmente, a área que vai do chão ao nível do telhado dos edifícios (ou outros elementos urbanos) é a Camada de Cobertura Urbana (CCU) (Figura 2-c). Assim como SCR, a CCU pode ser enquadrada dentro da microescala, por essa razão, processos como o fluxo de ar e a troca de energia dependem dos prédios e das características do cânion urbano que compõem junto com outros elementos urbanos, como ruas, praças ou jardins (Arnfield, 2003). Por isso, a altura

da UCC é equivalente à média da altura dos principais elementos urbanos rugosos (Oke, 2004a; Oke, Mills, G., Christen e Voogt, J. A., 2017).

2.3 Ilha do Calor Urbano na Camada da Cobertura Urbana

Com base nos conceitos das escalas horizontais e da estrutura vertical da atmosfera urbana, é fundamental para as investigações enquadradas no clima urbano distinguir entre a Camada de Limite Urbano (CLU) e a Camada de Cobertura Urbana (CCU). Ao considerar que o principal fenômeno que estuda o clima urbano é a Ilha do Calor Urbano (ICU), é importante entender que é um fenômeno apresentado tanto na CLU quanto na CCU. Embora a compreensão da ICU descreva as diferenças na temperatura da cidade com o seu entorno, as diferenças na configuração dos processos de trocas de energia que causam a ICU são diferentes para as duas Camadas (Arnfield, 2003).

Segundo Oke *et al* (2017), a Ilha de Calor Urbana (ICU) na CLU é mantida principalmente pelo aumento do fluxo de calor urbano sensível, pelos fluxos gerados pelo aumento da absorção de ondas curtas e pela produção de calor antrópico por parte de toda a área urbana. Durante o dia, uma mistura desses fluxos ocorre na CM, que tende a se manter durante a noite, se o fluxo de calor sensível for suficientemente forte para conseguir reter a CM (Oke, 1982).

A presença de ICU na CCU é causada principalmente pelo aumento da absorção de radiação de ondas curtas e pela redução da perda de radiação de ondas longas emitida pelas superfícies dos elementos urbanos da CCU em direção ao céu (Oke, 1982). Isto provoca diferenças na temperatura do ar, sendo sua magnitude maior após o pôr-do-sol, porque a temperatura esfria mais lentamente do que o ar no ambiente rural (Memon, Leung e Chunho, 2008; Oke, 1982; Stewart e Oke, 2012), fazendo com que as maiores diferenças térmicas aconteçam na noite. Portanto, Oke *et al* (2017) afirmam que ICU na CCU é um fenômeno que ocorre devido à falha da área urbana em alcançar um processo de resfriamento rápido.

Com tudo isso, a presença de ICU na CCU parece depender do processo de resfriamento e das sequências diurnas e noturnas da temperatura do ar em áreas urbanas e rurais. Oke *et al* (2017) descrevem uma sequência no aquecimento e resfriamento da temperatura do ar durante o dia e noite. De madrugada as áreas rurais são particularmente frias, no entanto, a temperatura começa a subir devido à importante exposição ao sol que tem a área rural. Este processo de aquecimento é muito mais lento na CCU, porque a estrutura dos seus elementos urbanos não

permite acesso adequado da radiação solar no começo da manhã, criando sombras. Além disso, a alta absorção das superfícies urbanas artificiais faz que respondam lentamente ao sol do amanhecer. Ao meio-dia, a área rural aqueceu o suficiente, fazendo com que a temperatura urbana alcance a rural, embora em alguns setores da cidade possa ser mais frio que a área rural. No período da tarde, a temperatura das áreas urbanas e rurais começa a esfriar, no entanto, o raio de resfriamento na área rural é muito maior. Isso faz com que no final da tarde e início da noite, a ICU comece a se desenvolver. Como a noite avança, o processo de resfriamento na área rural vai se reduzindo, porque a temperatura da superfície cai e tem emitido toda a energia armazenada durante o dia. Como resultado desse processo, a temperatura do ar na área rural exibe uma queda exponencial até o amanhecer. Isso não acontece na área urbana, o que faz com que a ICU atinja sua maior magnitude no meio da noite (3 a 5 horas após o pôr do sol). Depois, o resfriamento na área urbana reduz sua intensidade até as primeiras horas da manhã, quando o rápido aquecimento rural provoca o desaparecimento da ICU (Oke, 1982). Com tudo isso, a ICU na CCU é um fenômeno majoritariamente noturno, atribuído mais às diferenças nos processos de resfriamento do que ao processo de aquecimento urbano e rural.

A maneira mais simples e útil de medir a ICU na CCU é por meio da intensidade ou magnitude da Ilha de Calor Urbana, que é definida como a diferença da temperatura urbana (T_u) e a temperatura rural representativa (T_r) num período específico (Equação 1) (Oke, Mills, G., Christen e Voogt, J.A., 2017). Essa medida é especialmente útil para fins de comparação e para identificar a presença de ICU, quando a intensidade é considerável ($>1^\circ\text{C}$) (Oke, 1973; Oke, Mills, G., Christen e Voogt, J.A., 2017).

$$ICU_{tipo} = \Delta T_{u-r} = T_u - T_r \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (\text{Eq.1})$$

Para terminar esta seção, a partir de agora, está dissertação enfoca no clima, nas diferenças de temperatura do ar e a presença de ICU na Camada de Cobertura Urbana (CCU).

2.4 Espacialização e visualização da Ilha do Calor Urbano

Monteiro e Fernandes (1996) afirma que é importante encontrar o tipo de procedimento geo-estatístico que melhor represente a realidade, ou seja, ofereça uma aproximação visual da forma da ICU de acordo com os valores da temperatura na área que circunda os pontos de registro onde as medições não são feitas. Para isso, é importante entender como é o funcionamento e como é o desempenho de diferentes métodos de interpolação espacial, para escolher o mais adequado de acordo com as necessidades da pesquisa (Mueller *et al.*, 2004).

Szymanowski e Kryza (2009) explica que o conceito de interpolação espacial se refere à transformação de dados referenciados espacialmente (pontos) para estender ou derivar novas informações com base na existente, ou seja, a interpolação busca estimar os valores das variáveis, nos espaços intermediários, onde não foram feitas medições (Monteiro e Fernandes, 1996). A interpolação espacial, sendo um método de análise espacial, também pode ser chamada de espacialização.

Geralmente, no momento da espacialização da ICU, três zonas são diferenciadas (Figura 3); o primeiro é o “penhasco” que é caracterizado pelo constante aumento da temperatura a partir da borda urbana. Em seguida está a área de “planalto”, que tem uma temperatura constante dentro da cidade, mas maior que a área rural. Isso pode variar um pouco, dependendo do uso do solo. Enfim, a área onde acontece a temperatura máxima urbana é conhecida como “pico” e geralmente coincide com o centro da cidade. Assim, um padrão isotérmico de ICU é identificado (Figura 3-a), que geralmente é concêntrico, mas que sofre algumas variações locais de acordo com a configuração espacial do tipo de solo (Oke, 1987; Szymanowski e Kryza, 2009). Geralmente esta configuração da ICU, pode ser observada graficamente mostrando as mudanças de temperatura da área rural, para a área urbana e depois para a área rural, o que faz com que o perfil gráfico (Figura 3-b) da ICU tenda a ser combinado com o perfil da cidade (Mohajerani, Bakaric e Jeffrey-bailey, 2017).

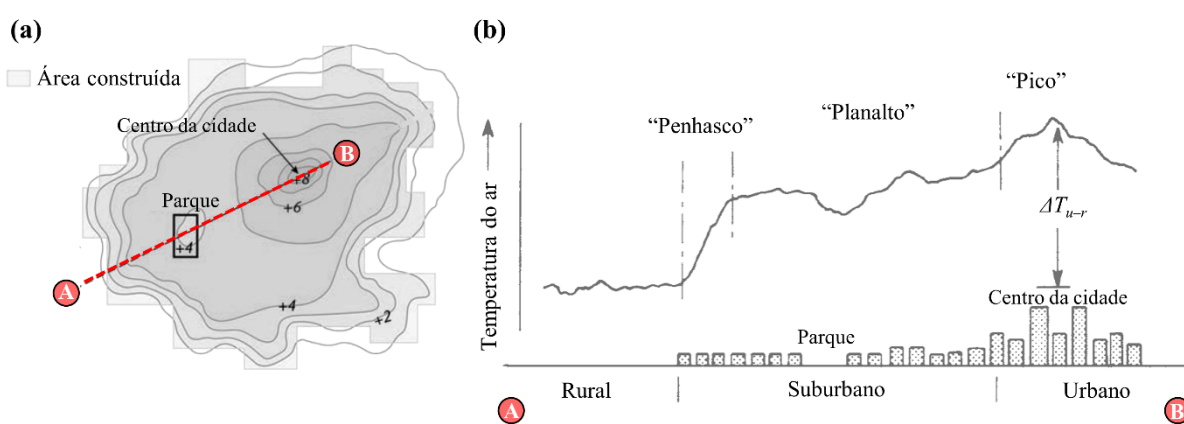


Figura 3. Representação esquemática gráfica da Ilha de Calor Urbana na Camada de Cobertura Urbana. (a) mapa isotérmico e (b) seção transversal da espacialização típica da ICU. Fonte: Adaptado de Oke (1987, 2017).

Atualmente, os padrões espaciais de diferentes fenômenos, como a ICU, são analisados e visualizados aplicando-se ferramentas baseadas em sistemas de informação geográfica (SIG), utilizando algoritmos de interpolação. Entretanto, a escolha de um método de espacialização

para ICU é difícil, devido à natureza heterogênea da superfície urbana (Szymanowski e Kryza, 2009). Segundo Monteiro e Fernandes (1996) os métodos mais populares de interpolação utilizados na espacialização da ICU são a Triangulação com Interpolação Linear, o Inverso da Distância e a krigagem (Tabela 3). Da mesma forma, Szymanowski e Kryza (2009) destaca que os algoritmos e métodos de interpolação podem ser classificados de acordo com a geoestatística em: “estocásticos” (Tabela 3), que são baseados em teoria estatística e probabilística por meio de dados geográficos espacialmente correlacionados; e, como “deterministas”, que são baseados em métodos matemáticos e podem incluir outras variáveis físicas, dando a oportunidade de explicar e prever uma variável para cada ponto de acordo com o processo físico conhecido que causa a variação espacial do fenômeno a interpolar (ICU).

A triangulação com interpolação linear, é classificada como um método estocástico. Monteiro e Fernandes (1996) explicam que este método é apropriado para pequenas séries de dados e, portanto, até a década de 80, a espacialização da ICU foi feita quase exclusivamente com este método. A interpolação linear gera uma superfície que tende a ser triangular para cada ponto de registro, este método tende a preservar as discontinuidades geradas pelas lacunas na série de dados, portanto, o número de pontos deve ser suficiente para cobrir a área total que se quer cobrir.

O Inverso da Distância pode ser classificado como um método matemático determinístico, que tem um caráter exato e local (Szymanowski e Kryza, 2009). Além disso, outra característica importante deste método é que ele oferece uma interpretação da informação extremamente rápida, independentemente se a série de dados é muito extensa, razão pela qual é útil para a fase exploratória de análise e para a compreensão inicial do fenômeno (Monteiro e Fernandes, 1996; Mueller *et al.*, 2004). Szymanowski e Kryza (2009) explicam que o valor de determinados pontos é calculado como a soma ponderada dos valores das medidas próximas, onde os “pesos” são proporcionais à distância inversa entre o ponto interpolado e o ponto medido. Portanto, este método tende a mostrar a especialização de ICU com isolinhas concêntricas fechadas (Monteiro e Fernandes, 1996).

A Krigagem é o método sugerido mais adequado para a maioria das séries estatísticas, pois é baseado numa interpolação global da totalidade da informação antes de estimar os valores da variável nos pontos intermediários onde não há registros. Com o objetivo de tentar expressar a tendência sugerida pela série, diferentemente da distância inversa, a krigagem tende a ter procedimentos lentos com séries de dados muito extensas (Monteiro e Fernandes, 1996). A

krigagem pode ser caracterizada como estocástico ou determinístico, portanto, também existem vários tipos (Szymanowski e Kryza, 2009).

Tabela 3. Caracterização dos métodos de interpolação. Fonte: Adaptado de Monteiro e Fernandes (1996), Szymanowski e Kryza (2009).

Método Interpolação	Potencialidade	Caracterização	Caráter
Triangulação com interpolação linear	<ul style="list-style-type: none"> • Exequível para series pequenas. • Gera triangulações distintas para cada ponto de registro. • O método preserva as descontinuidades devidas as lacunas na série. 	Estocástico	Exata e local
Inverso da Distância	<ul style="list-style-type: none"> • Processamento e interpretação da informação extremamente rápido. • Tendência insistente para a criação de isolinhas concêntricas fechadas. 	Determinística	Exata e Local
Krigagem Ordinária	<ul style="list-style-type: none"> • Sugerido como um dos procedimentos mais adequados para a maioria das séries estatísticas. • Evidencia uma leitura e interpretação global da totalidade da informação. 	Estocástica	Exata e local
krigagem Residual	<ul style="list-style-type: none"> • Tenta expressar a tendência sugerida pela série. • Quando as séries são muito extensas, o processamento da informação pode ser bastante lento. • Permite outras leituras da informação disponível. 	Determinística	Exata e global

Szymanowski e Kryza (2009) afirmam que a Krigagem pode ser dividida principalmente em ordinário ou residual. A Krigagem Ordinária pode ser classificada como estocástica, exata e local, pois pressupõe que os valores medidos nos locais vizinhos tendem a ser mais similares que os valores medidos em locais remotos. Em termos de krigagem residual, é caracterizada como determinística, exata e global, principalmente porque depende de outras variáveis que seguem uma hipótese (explicação física do fenômeno). Essas variáveis são chamadas componentes residuais e atuam como preditores. A Krigagem residual cria uma função que modela a série de dados de acordo com sua tendência ou padrão, tendo em conta o outro componente residual. É por isso que este método também é considerado

multidimensional. Esses dois métodos de Krigagem permitem estimativas mais objetivas, no entanto, são métodos complexos que consomem muito tempo (Mueller *et al.*, 2004).

A escolha do melhor método de interpolação dependerá das necessidades de pesquisa e dos dados de temperatura do ar coletados. Vários estudos compararam os resultados dos métodos de interpolação. Monteiro e Fernandes (1996) descobriram que a triangulação com interpolação linear oferece uma melhor estimativa de resultados para preencher as lacunas de informação do que a distância inversa ou a krigagem. Por outro lado, Szymanowski e Kryza (2009) destaca que a krigagem residual é muito mais aconselhável, pois, sendo um algoritmo multivariável, incorpora variáveis de significado físico. Isso torna o padrão da ICU o mais confiável à mostra a morfologia da ICU de penhascos, planaltos e picos (Figura 3) (Oke, 1987). O método do inverso da distância tende a estimar demais a temperatura do ar fora da cidade e subestima a temperatura no centro da cidade. Isso pode ser um pouco reduzido com a krigagem ordinária, no entanto, a interpolação não é muito precisa e, como a distância inversa, tem um efeito de “olho de boi”, que não é muito consistente com a realidade (Szymanowski e Kryza, 2009).

Mueller *et al.* (2004), considera que ao momento de escolher um método de interpolação, é importante considerar a quantidade de dados, pois é um fator chave no desempenho do método de interpolação. Portanto, a krigagem ordinária só obtém melhores resultados que o inverso da distância, quando a quantidade de dados é aumentada. Da mesma forma, o desempenho da Krigagem ordinária aumenta, se a variável sugerir que existe uma estrutura espacial, como no caso da temperatura da superfície e do fenômeno da ICU - algo que não acontece com a distância inversa.

Finalmente, é importante entender que os métodos de interpolação espacial devem ser usados apenas para especializar os dados medidos, não deve ser usado para prever o fenômeno da ICU, uma vez que cada método de interpolação irá gerar um resultado cartográfico diferente e raramente os resultados são parecidos, portanto, oferecem uma explicação diversificada da ICU (Monteiro e Fernandes, 1996; Szymanowski e Kryza, 2009). Além disso, a espacialização da ICU por isotermais só tem validade local, no entanto, a informação é útil para estabelecer áreas de ar frio ou quente (Oke, Mills, G., Christen e Voogt, J.A., 2017).

2.5 Causas, consequências e mitigação da Ilha de Calor Urbana

A ICU apresentada na Camada de Cobertura Urbana (CCU) é o tipo mais estudado dentro do clima urbano (Oke, Mills, G., Christen e Voogt, J.A., 2017). Diversos estudos buscaram compreender as causas, a relação com outros fatores e consequências desse fenômeno. A ICU é causada pelas características dos elementos urbanos que modificam o balanço de energia e radiação (Oke, 1982; Stewart e Oke, 2012)(Tabela 4). Além das causas presentes na Tabela 4, Arnfield (2003) descreve outras causas generalizadas através de observações empíricas da ICU, por exemplo, a ICU geralmente se desenvolve quando a velocidade do vento é suave e a nebulosidade é baixa. A sazonalidade também é importante, pois muitos estudos destacam o surgimento da ICU durante o verão ou nos meses mais quentes do ano (Ellis *et al.*, 2017; Fenner *et al.*, 2017; Kolokotroni, Giannitsaris e Watkins, 2006; Oke, 1982; Skarbit *et al.*, 2017). Outros estudos também descobriram que a intensidade da ICU pode estar ligada ao tamanho da cidade e sua população (Oke, 1973; Santamouris, 2015; Torok *et al.*, 2001; Yasushi e Emi, 2005).

Tabela 4. Causas sugeridas da Ilha do Calor Urbano. Cada modificação urbana tem como consequência uma alteração no fluxo e no balanço de energia que causa as anomalias térmicas. Fonte: Adaptado de Oke (1982) e Stewart e Oke (2012).

1. Aumento de ganho de radiação de ondas curtas

Maior absorção da radiação solar pela geometria dos cânions devido à múltipla reflexão das superfícies verticais y horizontais.

2. Aumento de ganho de radiação de onda longa do céu

A poluição do ar gera maior absorção de ondas curtas e re-emissão de ondas longas pelos poluentes

3. Diminuição da perda de radiação de onda longa

Maior retenção de ondas longas nos cânions urbanos pela redução do Fator de Visão do Céu

4. Aumento das fontes de calor antropogênicas dentro das áreas urbanas

Maior emissão de calor sensível pelas atividades de transporte urbano, processos industriais e aquecimento e resfriamento no interior dos edifícios

5. Aumento no armazenamento de calor

Aumento da admitância termal pelas propriedades térmicas dos materiais de construção

6. Menor evapotranspiração

A substituição de solos permeáveis e com cobertura vegetal pelas superfícies pavimentadas, reduzem a evapotranspiração da superfície

7. Diminuição do transporte de calor turbulento

A geometria dos cânions urbanos diminui a velocidade do vento

Memon, Leung e Chunho (2008) mostram que os diferentes fatores que causam ou ajudam no desenvolvimento da ICU podem ser categorizados como fatores “incontroláveis”, que são condições climáticas, estações do ano, as condições diurnas, velocidade do vento e nebulosidade - estas variáveis têm efeitos temporários. Por outro lado, os fatores “controláveis” estão relacionados à população e ao calor antrópico e aos poluentes que produz, também o desenho urbano e a estrutura da cidade existente (geometria e morfologia) podem ser considerados como fatores controláveis, mas com efeitos permanentes. Com tudo isso, pode-se dizer que as causas da ICU podem ser resumidas no processo de urbanização e no aumento das necessidades energéticas da população urbana (refrigeração e aquecimento), no aumento do uso de materiais com alto estoque de calor que criam superfícies que causam grandes alterações no balanço energético, e nas características da geometria e morfologia urbanas presentes no ICU (Mohajerani, Bakaric e Jeffrey-bailey, 2017).

Como qualquer alteração ao meio ambiente, a ICU pode causar diferentes impactos e consequências, segundo Yang, Wang e Kaloush (2015), as consequências associadas à ICU são:

- Aumento e custo gerado no uso de energia para as necessidades de resfriamento da cidade.
- Aumentos significativos no pico da demanda de energia da cidade.
- A geração de grandes poluentes atmosféricos.
- O aumento do estresse térmico dos moradores da cidade.
- O alto impacto no ecossistema urbano e regional.
- O ambiente habitável é significativamente degradado.
- Um aumento no nível e risco de mortalidade e doença devido ao calor.

Segundo Kolokotroni *et al.* (2010), a ICU causa principalmente impactos no conforto; porque isso é afetado durante o verão e com o desenvolvimento da ICU pode diminuir. No entanto, as necessidades de aquecimento do inverno podem fazer com que a ICU aumente o conforto. O impacto energético da ICU também é importante e está ligado às condições de conforto e às necessidades de aquecimento ou resfriamento dos edifícios. A ICU também pode causar grandes impactos na saúde da população da cidade devido às altas temperaturas que têm sido relacionadas à mortalidade nas cidades (Sailor *et al.*, 2016).

No entanto, para todos os itens anteriormente mencionados, os impactos dependem das características das cidades, sua população e seu clima regional (Kolokotroni *et al.*, 2010) e podem ser prejudiciais ou benéficos. Um exemplo disso pode ser citado para a cidade de Glasgow, para a qual Emmanuel e Krüger (2012) sugere que as baixas temperaturas noturnas que ocorrem nesta cidade podem ser reduzidas com o aquecimento urbano criado por um planejamento correto no uso e cobertura do solo e na forma de seus elementos urbanos.

De acordo com Memon, Leung e Chunho (2008), as possíveis estratégias de mitigação têm-se centrado na redução do calor antrópico (consumo de energia) e na melhoria das cobertas dos edifícios, para as quais o uso de telhados verdes ou superfícies mais reflexivas são estratégias que tem sido estudado extensivamente (Mohajerani, Bakaric e Jeffrey-bailey, 2017; Santamouris, 2014). As estratégias de desenho urbano estão mais relacionadas ao processo de planejamento urbano que tem consideração climática, pois pode gerar indicadores a partir da forma urbana e favorecer a mudança de superfícies pelas mais permeáveis, o que inclui o aumento da cobertura de árvores e vegetação (Cavalcante, Ávila e Barbirato, 2005) ou o uso de superfícies mais reflexivas. Por exemplo, para um clima quente e seco, Johansson (2006) destaca a necessidade que o desenho urbano considere formas urbanas mais compactas, cânions urbanos profundos, não esquecendo que para cidades que tenham um inverno que tende a ser frio, é necessário incluir alguns espaços abertos e ruas largas, que permitam um melhor acesso solar nessa época do ano.

Mohajerani, Bakaric e Jeffrey-bailey (2017), destaca que nos últimos anos as pesquisas que propõe medidas de mitigação para a ICU tem se concentrado nos seguintes tópicos:

- Melhoria dos pavimentos reflexivos e permeáveis.
- Desenvolvimento de materiais termodinâmicos que podem mudar seu albedo em resposta à temperatura das superfícies.
- Promoção de uma circulação correta da água dentro da área urbana.
- Aprofundamento do conceito de telhados e edifícios verdes.
- Desenvolvimento de materiais que mudam de cor e aumentam a reflexão solar.
- Determinação de espécies de plantas mais eficazes na mitigação da ICU.

Esta última estratégia pode ser complementada com a ideia de promover o retorno da vegetação local da região nas áreas verdes da cidade. Esta pode ser a estratégia de mitigação que mais facilmente pode ser aplicada, considerando o efeito de resfriamento das áreas verdes,

mostradas por vários estudos (Cavalcante, Ávila e Barbirato, 2005; Cheng *et al.*, 2014; Moon *et al.*, 2018; Whitford, Ennos e Handley, 2001; Wong e Yu, 2005). Juntamente com essa, o conceito de “Ilha de Água de Resfriamento”, que aproveita os efeitos dos corpos d’água na cidade (Du *et al.*, 2016; Masiero e Souza, 2013; Masiero e Souza, de, 2016), podem reduzir significativamente as altas temperaturas na cidade. No entanto, as estratégias de mitigação não devem ser usadas isoladamente e não deve ser esquecido que a geometria e morfologia urbana existentes e as condições climáticas locais devem ditar qual estratégia de mitigação pode ser usada. Uma combinação ruim de estratégias pode aumentar a temperatura e, portanto, o efeito da ICU (Mohajerani, Bakaric e Jeffrey-bailey, 2017).

3

Temperatura do ar no ambiente urbano.

Uma das variáveis mais significativas na compreensão dos efeitos do ambiente urbano na atmosfera é a temperatura do ar. Este capítulo explora várias referências bibliográficas que mostram como esta variável tem sido usada na hora de entender o impacto da área urbana na atmosfera. A primeira seção mostra o contraste entre a temperatura do ar e a superfície, a segunda parte explora como os valores mínimo e máximo estão relacionados com a noite e o dia, respectivamente, e também mostra quais valores melhor expressam o impacto da urbanização na temperatura do ar. A última seção concentra-se em explicar quais são os índices baseados na temperatura e sua utilidade na análise energética e no estudo da ICU na cidade.

3.1 Temperatura do ar e temperatura da superfície

A temperatura do ar e a temperatura da superfície são os principais parâmetros climáticos, de magnitudes diferentes, empregados nos estudos do clima urbano, especialmente, para estudos da Ilha de Calor Urbana (ICU). As investigações que estudam a ICU a partir da temperatura da superfície propõem o conceito de “Ilha de Calor Urbana de superfície”, para realçar as diferenças que podem surgir entre os dois tipos de temperatura (do ar e de superfície)(Oke, Mills, G., Christen e Voogt, J.A., 2017).

De acordo com Oke (1987), a temperatura do ar é o resultado de diferentes balanços de energia, que são determinados segundo a radiação, condução, convecção e outros processos atmosféricos. Quando se realiza uma medição no ar, o que se está medindo é a temperatura do ar que está passando naquele momento sobre o sensor. Por este motivo, a temperatura do ar pode variar dependendo das condições atmosféricas e, por isso, gerando certa instabilidade. No entanto, as técnicas de medição para a temperatura do ar são simples e estão bem definidas para obtenção de dados de qualidade.

Por outro lado, Oke (1987) também explica que a temperatura da superfície é o resultado da radiação emitida por uma superfície. Diferentemente da medição da temperatura do ar, que pode ser realizada próximo ao nível do solo por meio de sensores ou instrumentos especializados, a medida da temperatura da superfície é mais difícil de ser medida ao nível de solo. Por isso, a temperatura da superfície, geralmente, é medida remotamente por meio de fotografias e câmeras que medem a radiação de onda longa ou por meio de dados de satélites.

Igualmente, Grimmond *et al.*(2010) mencionam a importância da temperatura do ar para estudar ICU. Para isto, é importante entender e reconhecer os diferentes fatores que afetam os dados de uma medida da temperatura do ar, sendo eles: a velocidade do vento, que é afetada pela estrutura urbana; a cobertura de vegetação; a umidade; e, o calor gerado por atividades antropogênicas.

Quanto à temperatura da superfície, Grimmond *et al.*(2010) destacam a variabilidade espacial que se encontra ao realizar uma medida deste tipo de temperatura e a estreita relação que esta mantém com o uso e a cobertura do solo. Além disso, a temperatura da superfície oferece um melhor entendimento para o planejamento e mitigação do calor urbano.

Muitas investigações têm relacionado à temperatura do ar com a temperatura da superfície e muitas realçam as dificuldades. Isto se deve às grandes diferenças entre a temperatura do ar e a temperatura da superfície. Por um lado, a temperatura do ar mostra dados relacionados com as condições térmicas que podem ser instáveis. Por outro, a temperatura da superfície mostra dados relacionados com as propriedades térmicas de uma superfície.

Com referência ao anterior, Coutts *et al.* (2016) procuraram identificar se por meio de medidas da temperatura de superfície é possível identificar pontos quentes (hotspots) na cidade de Port Philips na Austrália. Levando em conta que os pontos quentes são áreas específicas que tem uma temperatura do ar muito alta, a pesquisa procurou saber se as áreas com alta temperatura do ar coincidem com áreas com alta temperatura da superfície. O estudo revelou que para muitas áreas relacionadas com temperaturas altas do ar, não há coincidência com as temperaturas altas da superfície. Portanto, a temperatura da superfície não serviu para encontrar pontos quentes, principalmente pela diferença e pouca relação entre os indicadores das duas medidas e dados.

Schwarz *et al.* (2012) realizaram um estudo da ICU em Leipzig na Alemanha, a fim de combinar dados obtidos de medida da temperatura do ar e da temperatura da superfície. Para isso aplicaram indicadores e concluíram que a relação entre os dois tipos de temperatura é alta. No entanto, foram encontradas diferenças importantes da magnitude da ICU dependendo do indicador, da data e do tempo da medida. Isto quer dizer que, para relacionar corretamente medidas e estudos de ICU segundo a temperatura do ar e a temperatura da superfície, os indicadores devem ser muito parecidos e as variáveis como data e condições do tempo devem ser as mesmas.

3.2 Temperatura do ar e temperatura da superfície

Ao considerar que a presença da ICU é baseada em diferenças na temperatura do ar (Oke, Mills, G., Christen e Voogt, J.A., 2017), os efeitos da urbanização da cidade serão diferentes durante o dia e a noite. Com base nisso, vários estudos têm estudado a variação da Temperatura Máxima diária (T_{max}) e a Temperatura Mínima diária (T_{min}) do ar, para entender os efeitos da cidade durante o dia e período da noite respectivamente. Isso é destacado por Fenner *et al.* (2017), ao dizer que durante o dia, T_{max} geralmente é registrado entre 13:00 e 16:00 horas, no entanto, T_{min} está relacionado com o período da noite, porque esses valores geralmente aparecem entre 4 a 7 horas após o pôr do sol.

Ellis *et al.* (2017), utilizou valores de temperatura diária de T_{max} e T_{min} para estudar a variabilidade da temperatura do ar produzida pela cobertura vegetal em diferentes bairros de Knoxville. O estudo revelou que as áreas com alta vegetação têm uma grande influência sobre os valores de T_{max} , tornando os bairros mais frios durante o dia. Entretanto, essa influência não é perceptível com os valores de T_{min} , concluindo que o efeito de resfriamento da cobertura vegetal ocorre principalmente durante o dia. Estudar as variações dentro de T_{max} ou T_{min} pode dar clareza ao tentar medir o impacto do processo de urbanização na temperatura. Isto é mostrado por Sung-Nam, Yeon-Hee e Myung-Suk (2004), que estudaram a variabilidade de temperatura durante o período de 1973 a 2002. Esse último autor, descobriu que os efeitos antrópicos relacionados à urbanização são consistentes com o aumento geral da T_{min} , embora na T_{max} esse efeito não seja muito claro ao observar pequenas mudanças em seus valores. No entanto, a redução da faixa de temperatura diária é considerada uma consequência da urbanização. Esta falta de variação com os valores de T_{max} é algo comum quando se estuda ICU. Oke, Mills, Christen e J.A. Voogt (2017) destaca que, durante o dia, os valores de T_{max} são muito semelhantes entre ambientes rurais e urbanos, enquanto que à noite, T_{min} na área urbana é muito menor do que a rural.

Por outro lado, Yoo *et al.* (2018) usa valores diários de T_{max} e T_{min} para relacioná-los com valores da temperatura da superfície presentes no dia e noite, respectivamente, na cidade de Los Angeles. O experimento encontrou uma correlação aceitável entre as variáveis de temperatura, identificando que suas variações são similares entre a temperatura da superfície do dia e T_{max} e a temperatura da superfície à noite e T_{min} . Além disso, destaca-se que as diferenças de temperatura entre a área urbana de Los Angeles com suas áreas rurais são muito claras na noite de acordo com os valores de T_{min} . Isso mostra, mais uma vez, que o efeito da urbanização é mais claro com a T_{min} , além de que o fenômeno da ICU, principalmente noturna, é mais facilmente identificável com T_{min} (Emmanuel e Krüger, 2012).

3.3 Índices baseados na temperatura do ar

Os índices baseados em temperatura são usados porque permitem estimar e refletir as necessidades energéticas ou frequências de alguns fenômenos, por meio de observações diárias de temperatura durante longos períodos de tempo. De acordo com Matzarakis e Thomsen (2009), os índices mais comuns expressam os dias em que a temperatura do ar sugere necessidades de aquecimento ou resfriamento. Esses índices podem ser chamados

simplesmente como “dias de aquecimento ou resfriamento” se apenas a frequência em que ocorrem durante um período de tempo for considerada; eles também podem ser chamados “dias de grau de aquecimento e “dias grau de resfriamento”, se o interesse for analisar e estimar a demanda de calor ou frio requeridos pelos edifícios de um setor urbano. De acordo com Assawamartbunlue (2013), um “dia grau” é usado para estimar e calcular o consumo de energia dos edifícios, ou seja, eles assumem o ganho ou perda de calor dos edifícios na área urbana. Assim, os dias são definidos como a soma da diferença entre a média diária da temperatura e a “temperatura base ou limite”. Com isso, os graus dias dão um valor que expressa a quantidade e duração, quando a temperatura do ar se torna maior ou menor que um determinado valor limite (Matzarakis e Thomsen, 2009).

A “temperatura limite” pode ser definida como o valor no qual um dia, dependendo de sua temperatura ser maior ou menor que do que um valor limite, pode ser categorizado em um ou outro índice. A temperatura limite nem sempre é a mesma para todos os estudos, pois seu valor depende das características térmicas da cidade e das necessidades do estudo. Matzarakis e Thomsen (2009) mostram que, para o índice de dias de aquecimento, e seu cálculo em dias grau, uma temperatura limite $< 15^{\circ}\text{C}$ tem melhores resultados que outros valores ($14,13$ ou 12°C), para cidades alemãs. Com base nisso, constatou que na Alemanha houve uma redução nos dias de aquecimento (20 dias) de 1961 a 2007. Seguindo essa tendência, o autor determina que até o ano 2100 essa redução continuará resultando em uma redução no consumo de energia de mais do 18%. Por outro lado, para os dias de resfriamento, uma temperatura limite $>18^{\circ}\text{C}$ apresenta resultados mais claros do que outros valores ($18,3$, 20 ou 22°C). Assim, para o mesmo período (1961 a 2007), há um aumento desses dias e se a tendência continua, até o ano 2100, os dias com necessidades de resfriamento aumentarão consideravelmente (>100 dias).

Outros estudos utilizaram o conceito de dias de aquecimento e refrigeração, mas com base em horas, especialmente para identificar diferenças nas necessidades de energia entre o centro da cidade com a sua periferia ou outros setores durante o dia, como é mostrado por Kolokotroni *et al.* (2010). Aquele autor, observa encontra que, na cidade de Londres, as horas de esfriamento são reduzidas entre 1,5 até 3 horas/quilômetro do centro aos limites da cidade. Isto faz com que o consumo de energia destinado ao resfriamento dos edifícios seja 32% maior do que em outros setores da cidade. Esse valor aumenta para as horas de aquecimento, que registram um aumento de mais de 65% para o centro da cidade. Da mesma forma, Assawamartbunlue (2013) também usa tempos de resfriamento para estudar o consumo de

energia dos edifícios na Tailândia, encontrando que em edifícios comerciais e residenciais, a energia consumida em sistemas de resfriamento é de 70% do consumo total.

Os índices baseados na temperatura são bastante utilizados para estudar o consumo de energia da cidade. No entanto, no estudo do clima urbano e da ICU, fenômeno que tem um impacto significativo nas necessidades energéticas de resfriamento (Kolokotroni, Giannitsaris e Watkins, 2006; Matzarakis e Thomsen, 2009), também podem ser úteis, quando se estuda a variação entre setores com diferentes níveis de urbanização, utilizando as frequências e número de dias de acordo com os valores limites, a fim de estudar o aumento da temperatura ao longo de um período de tempo. Isso é mostrado por Emmanuel e Krüger (2012), que encontra um aumento na demanda de aquecimento nos setores mais urbanizados da cidade de Glasgow, embora tenha diminuído 11% entre os anos de 1961 a 2004.

Embora os índices baseados em temperatura mais comumente utilizados sejam dias de aquecimento e resfriamento, que são baseados nos valores da Temperatura média do ar (T_{med}), outros índices, com base na frequência dos dias de acordo com um limite de temperatura, foram propostos. Founda *et al.* (2004) usam valores de T_{max} ($>35-40^{\circ}\text{C}$) para encontrar a ocorrência de eventos de calor, similarmente, usa T_{min} para encontrar eventos frios ($<1^{\circ}\text{C}$) na cidade de Atenas durante os anos de 1987 até a 2001. Outro caso interessante é apresentado por Skarbit *et al.* (2017), que usam T_{min} para encontrar as frequências de dias frios ($<0^{\circ}\text{C}$) e noites tropicais ($> 20^{\circ}\text{C}$) e T_{max} para encontrar dias quentes ($> 30^{\circ}\text{C}$) na cidade de Szeged, na Hungria.

4

População, Densidade da População e Forma Urbana

A primeira seção deste capítulo apresenta diversas referências bibliográficas que relacionaram a intensidade da ICU ao tamanho da cidade segundo sua população, outros exemplos que consideraram o impacto gerado pela densidade populacional também são mostrados. A segunda seção cobre o impacto da cobertura da superfície urbana, de acordo com a fração da área construída e as frações superficiais permeáveis e impermeáveis. Da mesma forma, a última seção mostra o impacto da geometria urbana e morfologia expressa na Altura dos Edifícios, no Fator de Visão do Céu e na relação H/W.

4.1 Intensidade da Ilha do Calor Urbana e População da Cidade

A relação entre a Intensidade da Ilha de Calor Urbana, entendida como a diferença entre a temperatura presente em áreas urbanas e aquela temperatura presente na área rural da mesma região (ΔT_{u-r}) e sua População (p) foi estudada por Oke (1973). Naquela pesquisa, foram colhidos dados de ΔT_{u-r} através de medições móveis que incluíram 10 cidades com populações diferentes próximas a St. Lawrence Lowland em Quebec, Canadá. O autor concluiu que o ΔT_{u-r} tem uma relação alta com o tamanho da cidade e mostrou que cidades maiores do que 1,000 habitantes podem desenvolver ICU ($\Delta T_{u-r} > 1^\circ\text{C}$).

Por outro lado, a bacia de Nagano no Japão foi estudada por Yasushi e Emi (2005) e nesse caso os autores concluíram que ΔT_{u-r} está relacionada ao logaritmo (Log) de p . Aquela pesquisa incluiu 6 cidades diferentes, sob condições de tempo diferentes – noites claras e noites com muita nebulosidade, vento tranquilo e velocidade do vento alta – e foi verificado que o gradiente da regressão para noites tranquilas foi maior do que aqueles para as outras condições de noite.

De modo parecido, Torok *et al.* (2001) estudaram o efeito da Intensidade de ICU em quatro cidades, com uma população abaixo de 10,000 habitantes, e na cidade de Melbourne, que na época possuía uma população de 3.02 milhões de habitantes. Os autores verificaram que o efeito de ICU naquelas cidades é mais baixo do que em cidades europeias e cidades norte-americanas. No entanto, foi constatado que a intensidade de ICU era também significativa nas cidades com populações menores do que 10,000 habitantes, e essa intensidade era ainda mais alta em Melbourne. Os resultados sugerem ainda que na Europa, América do Norte e inclusive na Austrália, o ΔT_{u-r} aumente proporcionalmente com o $\text{Log } p$. Ainda assim, em cidades ao redor da cidade de Seul na Coreia do Sul, Park (1986) encontrou que o ΔT_{u-r} aumentou gradualmente até os 300,000 habitantes, e após este ponto, ΔT_{u-r} incrementou rapidamente.

Nestes casos, o tamanho da estrutura da cidade foi medido por sua População (p), significando que a população pode ser uma substituta ou indicador de suplemento da estrutura física da cidade Oke (1973, 1976). Isto porque está relacionado a um aumento no número de construções, sistemas de transportes e mobilidade e outras estruturas urbanas, os quais geram mais energia (Santamouris, 2015). Poucos estudos têm comparado ΔT_{u-r} com a Densidade da População (DP), provavelmente porque não é um indicador que relacione o tamanho da cidade em si, como faz p . Ainda assim, a consideração da DP pode mostrar a concentração, distribuição

de população e urbanização ou intensidade construtiva na mesma cidade e pode sugerir que as diferenças morfológicas dentro da estrutura urbana estão presentes.

No mesmo estudo mencionado anteriormente sobre a bacia de Nagano, Yasushi e Emi (2005) exploraram a relação entre a Intensidade de ICU e DP e observaram que o coeficiente de determinação (R^2) para o \log de DP não foi alto, quando comparado com o \log de p , o qual atingiu $R^2 = 0.85$. Além disso, DP variou muito de uma cidade para outra, sugerindo diferenças na concentração e distribuição da população e dificultando a comparação entre elas.

De modo parecido, Yamashita *et al.* (1986) relacionaram ΔT_{u-r} com p e DP para várias cidades na bacia do rio Tama, no Japão. Os autores mencionaram que estes indicadores não representam o tamanho da cidade estudada, uma vez que houve um rápido crescimento das cidades grandes, por se combinarem com as cidades japonesas pequenas ao seu redor (conurbação). Os autores indicaram que a área urbana destas cidades não é proporcional a sua p ou DP , portanto, sugerem utilizar outros indicadores ou parâmetros mais apropriados para relacionar a intensidade de ICU neste tipo de cidades.

Kotharkar e Surawar (2016) mostram que em Nagpur, Índia, áreas com alto DP (> 50.000 habitantes/km²) têm uma boa relação com o ΔT_{u-r} , pois pode fortalecer a temperatura, estas áreas estão relacionadas a uma maior área construída, menor área verde e ter usos residenciais ou comerciais. Coutts, Beringer e Tappe (2007) observaram que, ao aumentar a DP , a temperatura do ar noturno aumentou notavelmente em Melbourne, este aumento se deve ao fato de que o aumento na DP causa variações na morfologia urbana, gerando uma cidade mais compacta e mudanças na cobertura do solo, gerando um maior armazenamento de calor na área urbana. Por fim, a importância da DP como variável para entender o impacto da cidade no ambiente é explicada por Sailor (2011), considerando-se DP um determinante que permite estimar os valores de calor de veículos, edifícios e metabolismo humano. A DP pode afetar e determinar as variações da forma urbana da cidade, especialmente considerando a cobertura da terra e a morfologia urbana.

4.2 Cobertura de Solo Urbano

Os sistemas da cidade são caracterizados pela sua forma urbana, que é expressada pela sua cobertura de solo. Cada cobertura de solo está associada a um uso do solo, que descreve as funções urbanas (Oke, Mills, Gerald, *et al.*, 2017). A cobertura que está diretamente relacionada com a geometria dos edifícios é a Fração de Superfície Edificada ($\%Edif$), que descreve a área

ocupada pelos edifícios. Em alguns estudos $\%Edif$ é conhecido como área construída (Bhatti e Tripathi, 2014; Bottyán *et al.*, 2005; Eliasson, 1996; Whitford, Ennos e Handley, 2001). Este parâmetro, ao mostrar a concentração e densidade dos edifícios, é uma influência importante na variação da temperatura do ar. Como é mostrado por Unger *et al.* (2000) e Bottyán *et al.* (2005), que encontraram uma forte correlação linear entre o fração de área construída e a intensidade da ICU nas cidades húngaras de Szeged e Debrecen. Nessas cidades, com formas concêntricas, a temperatura diminui rapidamente de áreas centrais ($\%Edif = 86\%$) para áreas de habitação mais espalhadas ($\%Edif = 20\% - 50\%$). Isso indica que $\%Edif$ mais alto causa aumentos rápidos de temperaturas. Num estudo em Milão, Génova e Roma, Perini e Magliocco (2014) descobriram que as áreas da cidade com $\%Edif = 30\%$ têm temperaturas mais baixas do que áreas com $\%Edif = 50\%$, gerando diferenças mais 2°C entre as duas zonas. Confirmou assim que valores elevados de $\%Edif$ são áreas com alto grau de urbanização (efeito antrópico), que podem ser consistentes com o aumento geral da temperatura (T_{min} e T_{max}) e contribuem para a redução na faixa de temperatura diária.

Os materiais impermeáveis com os quais os edifícios são compostos é uma variável muito importante para o aumento da temperatura na superfície urbana. No entanto, além da área de cobertura ocupada pelos edifícios, a superfície urbana é composta de outros materiais, que cobrem o solo e geram um solo impermeável. Este tipo de cobertura pode ser expresso na Fração de Superfície Impermeável ($\%Imp$), que é um parâmetro muito importante na cobertura de solo urbano, porque altera o calor sensível e latente que existe entre a superfície urbana e a camada limite superior, além de gerar problemas ambientais, como inundações (Xiao *et al.*, 2007). Coseo e Larsen (2014) nota que $\%Imp$ é um dos parâmetros que podem explicar as variações de temperatura do ar em 68% para a cidade de Chicago, nos EUA. Os autores concluíram que o aumento da $\%Imp$ pode aumentar a temperatura entre 0.93°C - 0.62°C . $\%Imp$ parece ter um grande impacto sobre o aumento da temperatura, um exemplo disto pode ser encontrado em cidades desérticas como Phoenix. Naquela cidade, Myint *et al.* (2010) constatou que uma percentagem mais elevada de $\%Imp$ aumenta significativamente a temperatura, especialmente à noite, quando foi manifestada uma forte correlação linear. O autor concluiu que as áreas com apenas $\%Imp = 1.96\%$ conseguem aumentar a temperatura do ar em 0.5°C . Estes aumentos de temperatura ocorrem porque as superfícies expressas em $\%Imp$ geralmente usam materiais como asfalto e concreto. Esse são materiais que, quando recebem radiação de ondas curtas, têm uma grande capacidade de armazenamento e a absorção de energia durante o dia, fazendo com que durante a noite as superfícies aumentem a emissão de radiação de ondas longas (Myint *et*

al., 2010; Oke, 1982; Wong e Yu, 2005). Esta radiação geralmente é bloqueada e absorvida pelas superfícies dos edifícios (Sreedhar e Biligiri, 2016). Isto é realçado por Stone e Rodgers (2001), observando que o incremento de *%Imp* tem um efeito significativamente positivo associado a maiores emissões térmicas.

%Edif e *%Imp* são superfícies que contribuem para o aquecimento urbano, ao contrário, superfícies como áreas verdes, parques e cobertura vegetal ajudam no resfriamento da superfície urbana, essas superfícies podem ser expressas pela Fração de Superfície Permeável (*%Perm*). Wong e Yu (2005) compararam as diferenças de temperatura entre as áreas verdes e os diferentes tipos de uso de solo em Cingapura, desta forma, observou-se que a temperatura é relativamente baixa perto de grandes áreas verdes. O autor encontrou uma diferença de temperatura de mais de 4°C, ao comparar essas áreas com o centro financeiro. Da mesma forma, Whitford, Ennos e Handley (2001) encontraram diferenças de mais de 7°C entre áreas altamente urbanizadas e áreas com um valor de *%Perm* > 15%. Desta forma, o efeito de resfriamento das áreas verdes da cidade é reconhecido, no entanto, sua configuração é muito importante. Moon *et al.* (2018) compara em Seul, Coreia, a temperatura do ar produzida por diferentes complexos habitacionais com diferentes distribuições de áreas verdes. Os autores observaram que, quando as áreas verdes estão no centro dos edifícios (centro de vários blocos de edifícios), têm melhor potencial de esfriamento pois apresentaram temperaturas mais baixas, sem a necessidade de ter grandes extensões de áreas verdes. Uma conclusão semelhante foi dada por Cheng *et al.* (2014), que em Shangai compara a influência de 39 parques em ICU, encontrado uma relação positiva entre o tamanho do parque e a Intensidade da ICU. No entanto, o efeito de resfriamento não aumenta consideravelmente com o tamanho do parque, ou seja, os parques maiores não apresentam melhor desempenho térmico do que os parques menores. Em geral, a literatura tem se concentrado em demonstrar como a composição e a configuração das *%Perm* podem ser usadas como medidas de mitigação da ICU.

4.3 Geometria e Morfologia Urbana

A morfologia urbana expressa a dimensão espacial dos elementos urbanos e ajuda a entender a influência da geometria urbana na troca de radiação e fluxo de ar na cidade (Oke, Mills, Gerald, *et al.*, 2017). O parâmetro mais simples que nos ajuda a dimensionar a geometria urbana é a Altura dos Edifícios (*Alt.Edif*), que afeta a densidade urbana e, portanto, o clima térmico da cidade (Kakon 2016). *%Edif* depende da área dos edifícios, tem uma relação direta com *Alt.Edif*. Isto é demonstrado também por Perini e Magliocco (2014) ,que estudam a

influência da $%Edif$ e da $Alt.Edif$ na ICU, naquelas mesmas cidades italianas de Milão, Gênova e Roma, identificou que temperaturas mais baixas são obtidas com $Alt.Edif > 24m$, quando os valores de $%Edif$ estão entre 30-50%. Nesta ordem de ideias, parece que aumentar os valores de $Alt.Edif$ pode reduzir as temperaturas num setor da cidade. Baseado neste fato, Kakon *et al.* (2010) compara as temperaturas reais do ar de um setor em Dhaka, Bangladesh, com alturas entre 4-5 andares, com a temperatura simulada em caso de aumento da altura para 8-10 andares no mesmo setor. Assim, o autor verificou que ao aumentar $Alt.Edif$, a temperatura tem uma redução entre 0,56-0,66°C. Isso mostra que edifícios com grandes alturas têm um efeito positivo na redução de temperatura do ar no ambiente urbano (Feng e Myint, 2016).

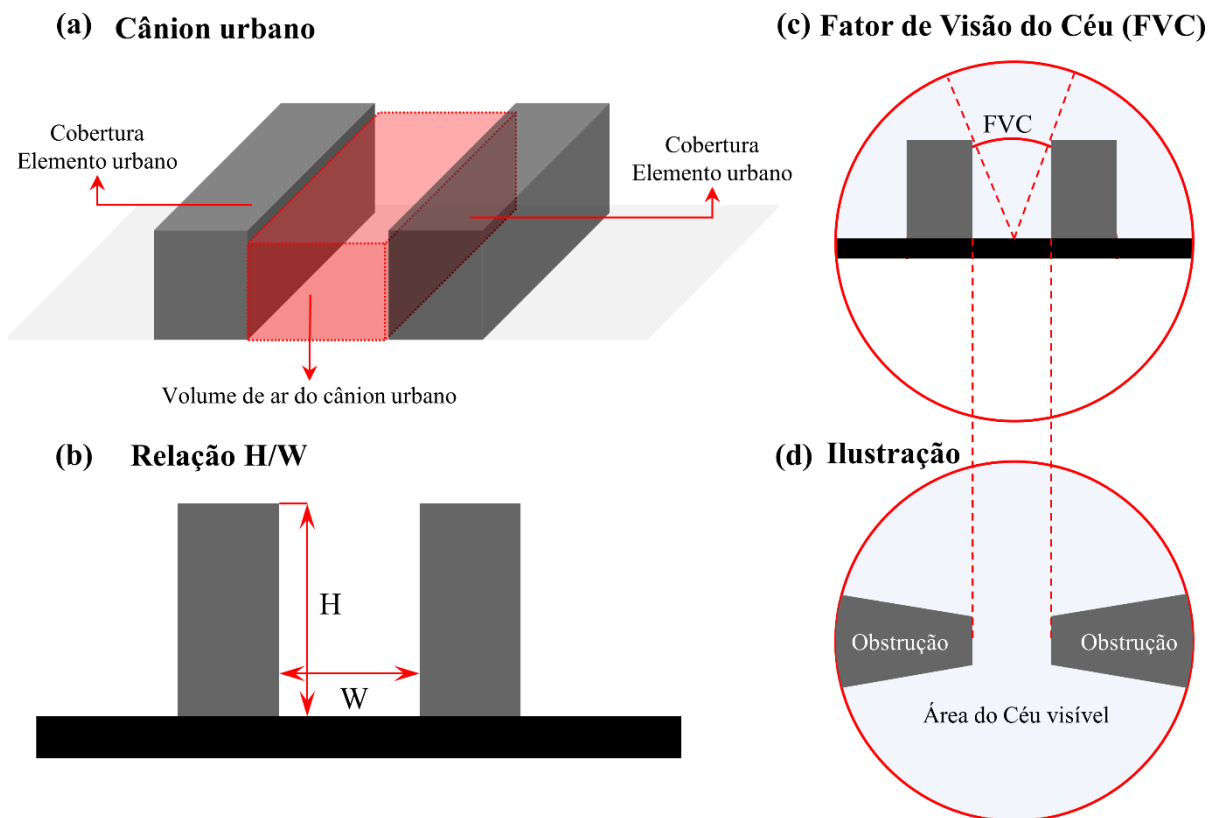


Figura 4. Representação esquemática dos parâmetros da morfologia urbana obtidos de acordo com a geometria do cânion urbano (a), onde a relação entre a altura dos edifícios ($Alt.Edif = H$)/largura da rua (W) expressa H/W (b). A fração do céu visível para um ponto no meio do cânion urbano expressa o Fator de Visão do Céu (FVC) (c), que pode ser ilustrado projetando os ângulos dos elementos urbanos em um plano horizontal (d). Fonte: Adaptado de Nunez e Oke (1977), Emmanuel (2005) e Souza, Rodrigues e Mendes (2003).

O cânion urbano pode ser definido como a combinação geométrica intra-urbana de superfícies (ou facetas) verticais e horizontais (Nakata-Osaki, Souza e Rodrigues, 2018) (Figura 4-a). Um dos parâmetros mais utilizados e amplamente estudados ao explorar a relação da geometria do cânion urbano com o clima urbano é a relação H/W , que considera a altura dos edifícios ($Alt.Edif = H$) em relação à distância entre eles, distância que geralmente é representada como a largura da rua (W). Em suma, H/W descreve o espaço perdido ou o quão ajustados os edifícios são em relação às suas alturas (Figura 4-b) (Coseo e Larsen, 2014; Goh e Chang, 1999). Além de todo isto, H/W também ajuda a entender a profundidade do cânion urbano. Bakarman e Chang (2015) estudou o comportamento térmico na cidade de Riyadh, Emirados Árabes com base na profundidade do cânion, descobrindo que a maior intensidade de ICU ($\Delta T_{u-r} = 6.6^{\circ}\text{C}$) acontece em cânions profundos com valores de $H/W = 2.2$. No entanto, em cânions poucos profundos ou superficiais, com valores de $H/W = 0,42$ também são verificadas intensidades consideráveis ($\Delta T_{u-r} = 2.3^{\circ}\text{C}$). Foram encontrados resultados semelhantes a Johansson (2006), onde os cânions profundos ($H/W = 9.7$) também tem temperaturas mais elevadas do que cânions poucos profundos ($H/W = 0.6$). Parece que com valores maiores de H/W , a temperatura do ar é mais elevada, no entanto, estes resultados foram baseados em medições noturnas. Com o passar do tempo, durante o dia, a relação é invertida, como é mostrado por Emmanuel e Johansson (2006) que verificaram na cidade de Colombo que o bairro mais quente tem o valor de H/W menor, enquanto o bairro mais frio tem um maior valor de H/W , implicando que os cânions profundos recebem menos radiação durante o dia.

Finalmente, o último parâmetro amplamente usado para descrever a morfologia urbana é o Fator de Visão do Céu (FVC). Este parâmetro descreve quantitativamente um valor estimado da área visível do céu a partir de um ponto de observação dentro do cânion urbano, ou seja, representa a fração do hemisfério ocupado pelo céu disponível para troca de calor (Figura 4-c, d) (Oke, 1981). É um valor que vai de 0 a 1, onde 0 representa a obstrução total do céu e 1 o céu totalmente visível. O FVC afeta grandemente a troca radiativa, sendo um fator importante no balanço energético (Souza *et al.*, 2010), considerando-se que as superfícies do cânion urbano emitem grandes quantidades de radiação de ondas longas durante a noite, pequenos valores de FVC irão reter esta radiação e reduzir o processo de resfriamento (Hien e Jusuf, 2010). É por esta razão que este parâmetro é constantemente associado com a presença de ICU à noite. No entanto, muitos estudos têm mostrado que a relação entre FVC e ICU não é clara e até mesmo confusa (Souza *et al.*, 2010; Unger, 2009). Especificamente, é observado uma relação inversa entre FVC e ICU durante a noite. Unger (2009) encontrou uma relação mais forte no inverno,

com um coeficiente de determinação (R^2) de -0.66 para a cidade de Szeged. Do mesmo modo, Wang e Akbari (2014) identificaram que esta relação tende a ser mais clara no inverno ($R^2=-0.53$), mas consideravelmente menor no verão ($R^2=-0.25$) para o centro de Montreal. O autor relata que esta diferença no coeficiente de determinação é devido à variabilidade da vegetação entre as estações. Isto também é mencionado por Hien e Jusuf (2010), que sugeriu que, em alguns casos, a temperatura do ar não é tão depende da geometria urbana, mas sim de outros elementos urbanos como árvores, que também provocam baixos valores de *FVC* mas não reduzem a perda de calor durante a noite. Por outro lado, o autor relata um relacionamento proporcional durante o dia ($R^2= 0.70$) entre *FVC* e temperatura do ar.

5

Zonas Climáticas Locais

Os estudos que têm medido a intensidade de ICU têm falhado em oferecer dados quantitativos, qualitativos e descritivos que evidenciem melhor a diversidade da superfície urbana e inclusive a superfície rural (Stewart e Oke, 2012). Considerando que os solos urbanos e rurais são difíceis de serem classificados devido a sua diversidade, Stewart e Oke (2012) propuseram e desenvolveram uma classificação universal e de fácil aplicação, que permite caracterizar a diversidade urbana e rural apresentada na cidade e seus arredores. Essa tem o objetivo de facilitar o inventário de dados em um lugar ou área urbana, facilitar sua comparação e principalmente suplantando os termos tradicionais e pouco objetivos que classificam as paisagens da cidade em “urbano” e “rural”, já que estes não descrevem os diferentes meios e paisagens que estão dentro da cidade e seus arredores.

As Zonas Climáticas Locais (ZCL) é a denominação da classificação proposta por Stewart e Oke (2012). Este sistema foi desenvolvido com o objetivo de criar uma classificação padronizada. Esta padronização facilita os estudos da Ilha de Calor Urbana facilitando observações de temperatura e melhoria da comunicação e manejo de informação entre diferentes atores que estejam interessados em estudar o clima de uma cidade (podendo ser desde climatologistas até planejadores urbanos). Da mesma maneira, facilita a comparação entre diferentes estudos climáticos, especificamente da ilha de calor de diferentes cidades.

As diferentes ZCL são determinadas por meio de diferentes superfícies, que geralmente se estudam dentro da área do clima urbano agrupadas em estruturas. Essas estruturas referem-se à morfologia da cidade, cobertura, permeabilidade e impermeabilidade do solo e metabolismo. Assim, a classificação considera os fluxos energéticos e as diferentes

propriedades térmicas da superfície, de forma que o sistema aborda a complexidade do espaço urbano não apenas pela divisão tradicional entre espaço rural e espaço urbano.

As ZCL procuram estabelecer um padrão internacional, que descreva de uma forma clara e simples as paisagens urbanas e rurais, caracterizando uma faixa completa de sua diversidade e para que possa ser aplicada em qualquer região do mundo. Cada uma das ZCL oferece uma descrição qualitativa e quantitativa destas paisagens. Desta maneira, cada ZCL pode ser descrita como uma região homogênea em diferentes parâmetros e uniforme na sua temperatura (Stewart e Oke, 2010).

De acordo com Geletič e Lehnert (2016), até o momento o uso do esquema das ZCL pode ser resumido em 3 usos padrão. O primeiro é para estudos de variação de temperatura e observações de ICU, o segundo é para modelagem de elementos climáticos e o terceiro é para o mapeamento intra-urbano da superfície urbana. De acordo com o exposto, este capítulo mostra, na primeira seção, os processos de classificação e as inconveniências ao comparar os valores reais dos parâmetros com os valores sugeridos por Stewart e Oke (2012). A segunda seção enfoca, principalmente, os estudos da temperatura do ar e a intensidade da ICU baseadas nos ZCL. As duas últimas seções mostram brevemente exemplos de como os ZCL ajudam nos modelos e no mapeamento do clima urbano.

5.1 Classificação

O sistema das ZCL é um sistema simples, genérico e lógico. É baseado na nomenclatura de diferentes áreas de conhecimento, para facilitar a transferência de informação por associação e comparação. Assim, pode ser adaptado e utilizado em diferentes cidades ao redor do mundo. Cada zona é uma representação de uma área homogênea com parâmetros climáticos característicos. Para isso, Stewart e Oke (2012) criaram 17 classes de ZCL (Tabela 5), divididas em dois grandes grupos. A ZCL classificadas de 1 até 10 são representadas segundo o tipo da construção (Built Types), que estão definidas principalmente pela Altura dos edifícios (*Alt.Edif*) - baixo, médios ou altos - e a densidade construtiva (Compactos ou abertos), sendo a classe 10 para áreas industriais. As ZCL classificadas de A até G representam áreas ou superfícies onde não se encontram edifícios, ruas, etc, ou seja, estão determinadas pelo tipo de superfície (pavimentação, água, solo exposto ou pedra exposta) e a densidade das árvores (densas ou dispersas). Desta maneira, as ZCL podem ser definidas como regiões ou zonas com uma cobertura da superfície uniforme e com estrutura, materiais e atividades humanas (metabolismo) uniformes. Essas podem ter uma área distribuída por centenas de metros a vários quilômetros, com raio mínimo recomendado de 200 a 500 metros. Isso permite que o sistema assumira uma escala local, uma natureza climática e uma apresentação zonal (Stewart e Oke, 2012). De acordo com esta definição, cada tipo de ZCL corresponde a um valor específico para os diferentes parâmetros da geometria urbana, propriedades da superfície, estrutura da superfície (Tabela 6). Do mesmo modo, cada ZCL estará relacionada a valores de várias propriedades termais, de radiação e metabólicas (Tabela 7).

A tabela 5 mostra os diferentes tipos de Zonas Climáticas Locais. Pode ser observado que cada ZCL representa uma composição simples de edifícios ruas, plantas e solos. As ZCL não foram definidas para capturar as exclusividades da cada região ou setor da cidade, diferentemente dos Climastopes, onde a classificação deriva de um conhecimento local do vento, temperatura, uso do solo, estrutura e densidade da população (Stewart e Oke, 2012).

Para complementar o anterior, as ZCL têm um conjunto de propriedades climáticas para suas classes (Tabela 6-7). Estes parâmetros são propriedades que distinguem a geometria urbana, propriedades térmicas e metabolismo da cidade, o que faz que as LCZ sejam quantificáveis e objetivas (Stewart e Oke, 2012). As ZCL agrupam 7 parâmetros que definem a geometria urbana e a cobertura da superfície (Tabela 5) e 3 parâmetros (Tabela 7) que agrupam propriedades termais, de radiação e metabólicas da cidade (Lehnert *et al.*, 2015). As

características das zonas climáticas podem ser refletidas em seus nomes e suas propriedades podem ser divididas em geométricas, cobertura de superfície, termais e metabólicas (Unger, Lelovics e Gál, 2014).

Stewart e Oke (2012) propõem uma série de passos para classificar uma zona ou setor homogêneo dentro das LCZ que se pretenda estudar. O primeiro passo consiste em coletar dados do lugar, a partir de uma visita pessoal e contar com fotos aéreas e de satélites. O segundo passo consiste em definir as áreas fonte de temperatura, isto é, que cada sensor ou sensores de temperatura tem que estar em um setor homogêneo caracterizado pelas ZCL. O último passo consiste em selecionar o tipo de ZCL, isto também se faz analisando os dados coletados. Em alguns casos, podem ser criadas sub-classes (figura 5), combinando-se os tipos de edificação e os tipos de cobertura. No entanto, deve ser evitado ser tão complexo, já que um dos objetivos do sistema é padronizar e facilitar a comparação com outras cidades e outras regiões do mundo inteiro.

Lehnert *et al.* (2015) aplicaram a classificação das ZCL na cidade de Olomouc, na República Checa, e propuseram a classificação dos setores a partir de um conjunto de 14 estações climáticas. Lehnert *et al.* (2015) utilizaram os parâmetros geométricos e da cobertura de solo urbano para fazer o processo de classificação. Os autores seguiram uma série de passos para fazer a classificação. O primeiro consiste em conhecer a qual ZCL cada estação pertence. Isso foi feito por meio da Fração de Superfície Edificada (*%Edif*), da Fração da Superfície Permeável (*%Perm*) e Impermeável (*%Imp*) e da altura dos edifícios (Rugosidade) (*Alt.Edif*). Assim, dependendo dos valores das propriedades, é atribuída uma ZCL ao setor da estação. O passo seguinte consistiu na verificação visual e empírica do setor de cada estação. Para completar esta verificação e confirmar a representatividade do lugar, os parâmetros do Fator de Visão do céu (*FVC*) e a relação *H/W* foram calculados.

Lehnert *et al.* (2015) destacam o fato de que, no momento da instalação das estações, não se considerou a homogeneidade do setor, e, por isto, não foi possível classificar as estações nas ZCL regulares. No entanto, foi possível fazer a classificação utilizando-se o sistema de subclassificação. Mesmo assim, o processo de subclassificação fez com que não existisse uma correlação entre os dados das estações e as classes de ZCL, levando à inexistência de uma hierarquização e à conclusão de que as comparações entre as ZCL ($\Delta T_{ZCLX-ZCLZ}$) demonstrasse incoerência da ICU medida naquela cidade.

Tabela 5. Definições e classes das ZCL. Adaptado de Stewart e Oke, (2012).

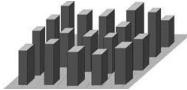
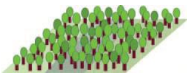

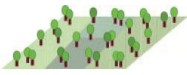
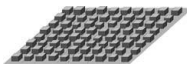
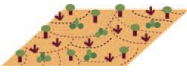



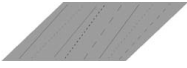

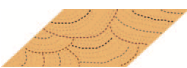
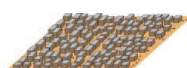
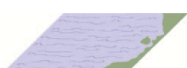



Tipologia da Construção	Descrição	Tipologias de Cobertura de Solo	Descrição
1 Edifícios Altos Compactos		A Arvoreem Adensadas	
	Densa mistura de edifícios altos. Poucas ou nenhuma árvores. Cobertura do solo é principalmente pavimentada. Materiais de construção de concreto, aço, pedra e vidro.		Paisagem fortemente arborizada de árvores decíduas e/ou de folhas perenes. A cobertura do solo é principalmente permeável (plantas baixas). A função da zona é floresta natural, cultivo de árvores ou parque urbano.
2 Edifícios Médios Compactos		B Árvores Dispersas	
	Mistura densa de edifícios médios (3-9 pavimentos). Poucas ou nenhuma árvores. Cobertura do solo é principalmente pavimentada. Matérias de construção de pedras, tijolos, ladrilhos.		Paisagem levemente arborizada de árvores de folha caduca e/ou de folhas perenes. A cobertura do solo é principalmente permeável (plantas baixas). A função da zona é floresta natural, cultivo de árvores ou parque urbano.
3 Edifícios Baixos Compactos		C Arbustos	
	Densa mistura de prédios baixos (1-3 pavimentos). Poucas ou nenhuma árvores. Cobertura do solo é principalmente pavimentada. Materiais de construção de pedras, tijolos, ladrilhos e concreto.		Arranjo aberto de arbustos e arvoreem curtas e lenhosas. A cobertura do solo é principalmente permeável (solo exposto ou areia). A função da zona é arvoredo natural ou agricultura.
4 Espaço aberto com Edifícios Altos		D Gramíneas / Forrações / Plantas Baixas	
	Arranjo aberto de edifícios altos. Abundância de cobertura de solo permeável (plantas baixas, árvores dispersas). Materiais de construção de concreto, aço, pedra e vidro.		Paisagem com gramíneas, forrações ou culturas herbáceas. Poucas ou nenhuma arvore. Função de zona e pastagem natural, agricultura ou parque urbano.
5 Espaço aberto com Edifícios Médios		E Pavimentação / Pedra exposta	
	Arranjo aberto de edifícios médios (3-9 pavimentos). Abundância de cobertura de solo permeável (plantas baixas, árvores dispersas). Materiais de construção de concreto, aço, pedra e vidro.		Paisagem com pedra exposta ou cobertura pavimentada. Poucas ou nenhuma arvore ou planta. A função da zona é a rocha ou o transporte urbano.
6 Espaço aberto com Edifícios Baixos		F Solo exposto / Areia	
	Arranjo aberto de edifícios médios (1-3 pavimentos). Abundância de cobertura de solo permeável (plantas baixas, árvores dispersas). Metarriais de construção de madeira, tijolos, pedra, telhas e concreto.		Paisagem com solo exposto ou areia. Poucas ou nenhuma arvoreem ou planta. A função da zona é o deserto ou agricultura natural.
7 Adensamento de Edifícios Baixos leves		G Água	
	Densa mistura de edifícios baixos (1-3 pavimentos). Poucas o nenhuma árvores. A cobertura de solo expostos. Materiais de construção leves (madeira, palha, metal ondulado)		Corpos de água grandes e abertos, como mares e lagos, ou pequenos corpos, como rios, reservatórios e lagoas.
8 Grandes Edifícios Baixos, Galpões			
	Arranjo aberto de grandes edifícios baixos (1-3 pavimentos). Poucas ou nenhuma árvores. Cobertura do solo principalmente pavimentada.		
9 Escassamente Construído			
	Arranjo com pequenos ou médios edifícios em um ambiente natural. Abundância de cobertura de solo permeável (planta baixa, árvore dispersas)		
10 Indústria pesada			
	Estruturas industriais de baixo gabarito e de médio alcance (torres, tanques, pilhas). Poucas ou nenhuma árvores. A cobertura de solo é principalmente pavimentada.		

Tabela 6. Valores dos parâmetros geométricos e da cobertura do solo para as ZCL. Adaptado de Stewart e Oke, (2012).

ZCL	Fator de Visão do Céu	Relação H/W	Fração de Superfície Edificada	Fração de Superfície Impermeável	Fração de Superfície Permeável	Altura dos elementos de Rugosidade	Classe de Rugosidade
	FVC	H/W	% Edif.	% Imp.	% Perm.	Alt. Rug.	Cls. Rug.
1	0.2–0.4	> 2	40–60	40–60	< 10	> 25	8
2	0.3–0.6	0.75–2	40–70	30–50	< 20	10–25	6–7
3	0.2–0.6	0.75–1.5	40–70	20–50	< 30	3–10	6
4	0.5–0.7	0.75–1.25	20–40	30–40	30–40	>25	7–8
5	0.5–0.8	0.3–0.75	20–40	30–50	20–40	10–25	5–6
6	0.6–0.9	0.3–0.75	20–40	20–50	30–60	3–10	5–6
7	0.2–0.5	1–2	60–90	< 20	<30	2–4	4–5
8	>0.7	0.1–0.3	30–50	40–50	<20	3–10	5
9	> 0.8	0.1–0.25	10–20	< 20	60–80	3–10	5–6
10	0.6–0.9	0.2–0.5	20–30	20–40	40–50	5–15	5–6
A	<0.4	>1	<10	<10	>90	3–30	8
B	0.5–0.8	0.25–0.75	<10	<10	>90	3–15	5–6
C	0.7–0.9	0.25–1.0	<10	<10	>90	<2	4–5
D	>0.9	<0.1	<10	<10	>90	<1	3–4
E	>0.9	<0.1	<10	>90	<10	<0.25	1–2
F	>0.9	<0.1	<10	<10	>90	< 0.25	1–2
G	>0.9	<0.1	<10	<10	>90	–	1

Tabela 7. Valores dos parâmetros termais, radiativos e metabólicos para as ZCL. Adaptado de Stewart e Oke, (2012).

ZCL	Admitancia da Superfície	Albedo Superficial	Calor Antropogenico
	Adm. Sup.	Alb. Sup.	Clr. Ant.
1	1,500–1,800	0.10–0.20	50–300
2	1,500–2,200	0.10–0.20	<75
3	1,200–1,800	0.10–0.20	<75
4	1,400–1,800	0.12–0.25	<50
5	1,400–2,000	0.12–0.25	<25
6	1,200–1,800	0.12–0.25	<25
7	800–1,500	0.15–0.35	<35
8	1,200–1,800	0.15–0.25	<50
9	1,000–1,800	0.12–0.25	<10
10	1,000–2,500	0.12–0.20	>300
A	Desconhecido	0.10–0.20	0
B	1,000–1,800	0.15–0.25	0
C	700–1,500	0.15–0.30	0
D	1,200–1,600	0.15–0.25	0
E	1,200–2,500	0.15–0.30	0
F	600–1,400	0.20–0.35	0
G	1,500	0.02–0.10	0

Durante o processo de classificação, vários estudos relataram que, devido às características morfológicas especiais em cada cidade, os parâmetros da forma urbana que caracterizam as ZCL não coincidem com os intervalos ou faixas propostos por Stewart e Oke (2012) para cada ZCL. Leconte *et al.* (2015) percebe essa dificuldade ao classificar as ZCL na cidade de Nancy, na França, especialmente nas áreas residenciais classificadas como ZCL

abertas. No entanto, os valores dos parâmetros morfológicos sugerem que podem ser classificadas dentro da ZCL6 (*SVF*) e ZCL9 (*H/W*). Da mesma forma, para as áreas classificadas dentro da ZCL 8, seus valores nos parâmetros da cobertura do solo estão um pouco afastados das faixas sugeridas. Neste caso, recorreu-se a definição textual, as ilustrações e o senso comum para identificar esses setores nesta ZCL. Para as outras ZCL, especialmente as compactas, os intervalos coincidiram com os valores reais dos setores da cidade.

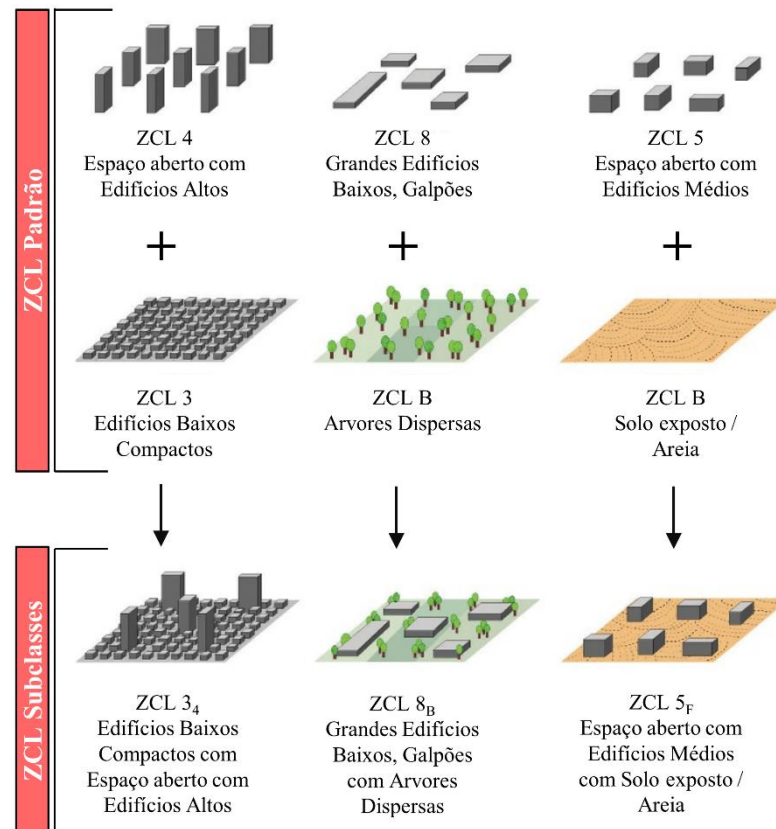


Figura 5. Esquema da formação das subclasses das ZCL. Fonte: Stewart e Oke (2012).

Outro exemplo é apresentado por Geletič e Lehnert (2016), que na hora de classificar as ZCL para várias cidades da Europa central, teve que modificar os intervalos propostos por Stewart e Oke (2012) para ajustá-los às características específicas dessas cidades, especialmente para as ZCL 4 e 5, para as quais os valores do tipo de cobertura de solo se afastam das bordas dos intervalos. Da mesma forma, Wang *et al.* (2018) dedica atenção considerável a essa dificuldade na classificação das ZCL na cidade de Phoenix. Aqueles autores também têm dificuldade em classificar alguns setores dentro das ZCL abertas, devido aos valores dos tipos de cobertura de solo. A primeira dificuldade reside no fato de que as ZCL 7 e 6 possuem faixas similares nos tipos de superfície, diferenciados apenas pelo tipo de atividade. Da mesma forma,

ZCL 9 é difícil de distinguir da ZCL F. Em resumo, os parâmetros do tipo de superfície que estão mais longe dos intervalos são *%Edif* e *%Perm* para as ZCL 9, 6, 7 e 10 (abertas). Outro parâmetro que está longe de as faixas propostas é o *FVC*, principalmente porque seus valores excedem os intervalos para as ZCL 4, 5, 6, 7, A e B. Embora isso possa ter acontecido em função do método de cálculo utilizado, uma possibilidade que também é considerada por Leconte *et al.* (2015). Tudo isso mostra que os intervalos propostos por Stewart e Oke (2012) devem ser tratados como guias, ajustando-os de acordo com as características da forma urbana de cada cidade.

5.2 variações da temperatura e intensidades da Ilha do Calor Urbano na ZCL

Esta seção é dividida em 4 partes, a primeira parte faz uma revisão de estudos que mostram quais valores de temperatura, a que horas do dia e em que momentos do ano há padrões mais claros de variação entre as ZCL. A segunda parte enfoca a revisão de trabalhos relacionados à intensidade da ICU, de acordo com as ZCL, para encontrar diferenças térmicas entre elas. A terceira parte mostra alguns casos em que setores ou pontos classificados dentro do mesmo tipo de ZCL mostraram diferenças importantes entre eles. Por fim, é mostrado alguns resultados de estudos que consideraram os índices baseados na temperatura, para encontrar variações e diferenças entre as ZCL na última parte.

5.2.1 Variações das ZCL de acordo com a temperatura do ar

Além das diferenças que já existem entre cada ZCL, também podem existir contrastes climáticos ou térmicos entre cada ZCL. Stewart, Oke e Krayenhoff (2014) realizaram uma avaliação das ZCL em diferentes cidades na Europa, Ásia Oriental e América do Norte, respectivamente nas cidades de Nagano no Japão, Upsala na Suécia e Vancouver no Canadá. Nestas cidades, procuraram-se lugares representativos para cada ZCL enquadrados em um círculo com um raio de 100 a 200 metros, onde foram feitas medições fixas e móveis. No experimento, observaram-se diferenças de temperatura entre os diferentes lugares da mostra, concluindo que estas cidades suportam a classificação e apresentam uma hierarquia entre as ZCL em função das diferenças de temperatura. Além disso, estas diferenças são susceptíveis à variabilidade sazonal, especialmente nas ZCL de tipo aberto. Stewart e Oke (2010) também confirmaram que, efetivamente, existem contrastes térmicos entre cada ZCL. Esses contrastes são determinados por aspectos como a altura dos edifícios, o nível de permeabilidade ou

impermeabilidade, a quantidade de árvores e a umidade do solo, que correspondem às características da superfície e cobertura da terra.

As Zonas Climáticas Locais podem expressar melhor o efeito urbano na temperatura do ar, porque oferecem um contexto físico básico e esquemático para explicar variações de superfície e diferenças na temperatura do ar perto da superfície (Alexander e Mills, 2014). Skarbit *et al.* (2017) avaliam as condições da temperatura do ar para o período de um ano, por meio de estações meteorológicas classificadas dentro das ZCL, na cidade de Szeged, na Hungria. Aqui há uma tendência clara na temperatura média do ar (T_{med}), para a qual os valores diminuem à medida que as ZCL são menos compactas e com menor altura. Da mesma forma, para a temperatura mínima (T_{min}) este padrão é muito evidente, mostrando que as ZCL compactas e localizadas no centro da cidade, aumentam notavelmente a temperatura do ar em relação às ZCL de outras classes. No entanto, para os valores da temperatura máxima (T_{max}), esse comportamento não é evidente.

Outro caso notável ocorre em Berlim, na Alemanha, para a qual, segundo Fenner *et al.* (2017) a temperatura do ar mensal mostra uma clara diferença entre a ZCLD (rural) e a ZCL2 (compacta). Essa diferença é mais observada durante o verão do que no inverno, sendo um resultado similar ao mostrado também por Skarbit *et al.* (2017). Para o estudo desses últimos, as ZCL densamente construídas têm valores de temperatura do ar muito mais altos do que as ZCL abertas sem vegetação, mostrando diferenças maiores do que 4°C, que podem aumentar durante o período noturno. Algo semelhante acontece em Berlim, onde a variabilidade da temperatura do ar entre as ZCL é mais pronunciada durante a noite (Fenner *et al.*, 2017).

Parece que as variações de temperatura entre as diferentes ZCL são mais notáveis com valores de T_{med} , e em maior medida com T_{min} durante a noite, isto é confirmado por Alexander e Mills (2014) no estudo da ICU em Dublin, na Irlanda. Aqui, as ZCL pode ser termicamente diferenciada com observações de T_{max} e T_{med} , no entanto, com T_{min} , as diferenças térmicas entre as ZCL compactas e abertas são muito evidentes. Os autores enfatizam que as observações foram feitas sob condições climáticas favoráveis. Ao tentar distinguir o ZCL com ventos relativamente fortes, estes causam uma mistura entre as massas de ar das diferentes ZCL, causando diferenças confusas e a mitigação, como é esperado, da ICU.

Um caso interessante ao analisar as variações na temperatura do ar entre as ZCL, é apresentado por Leconte *et al.* (2015), que procura identificar padrões térmicos através das ZCL

na cidade de Nancy, na França. Para fazer isso, compara a amplitude térmica de cada ZCL. O autor agrupa as ZCL em compactas (ZCL 2 e 5) e aberta (ZCL 8,6,9 e D). Uma maior amplitude térmica ($> 2^{\circ}\text{C}$) foi encontrada entre as ZCL compactas do que as abertas, que têm uma amplitude muito comprimida que não excede 1°C durante o dia. À noite a amplitude é comprimida para ZCL 2 e 5, entretanto, isto não varia para as ZCL abertas (dia = noite), mostrando que nos setores densamente urbanos, a distribuição da temperatura do ar tende a ser mais homogênea à noite.

5.2.2 Diferenças na intensidade da ICU de acordo com as ZCL

As ZCL procuram normalizar de uma forma simples, mas objetiva, os estudos do clima urbano. Stewart, Oke e Krayenhoff (2014) mencionam que uma maneira de entender as diferenças entre ZCL é por meio da magnitude ou Intensidade da Ilha de Calor Urbana. Uma das grandes vantagens oferecidas pelas ZCL é a possibilidade de redefinir essa medida, por meio das diferenças entre os diferentes pares do ZCL (Leconte *et al.*, 2015). Geralmente, o setor de referência rural é classificado como ZCLD. Assim as diferenças não são entre valores de temperatura urbana e rural (ΔT_{u-r}), mas que a intensidade seja definida pelas diferenças entre as ZCL (Equação 2).

$$ICU_{ZCL} = \Delta T_{u-r} = T_{ZCL(X)} - T_{ZCL(D)} = \Delta T_{ZCLX-ZCLD} (^{\circ}\text{C}) \quad (\text{Eq.2})$$

Stewart, Oke e Krayenhoff (2014) avaliaram a classificação das ZCL, fazendo uma comparação entre observações de temperatura e simulações por meio de diferentes modelos nas cidades de Nagano no Japão, Vancouver no Canadá e Uppsala na Suécia. As observações de temperatura foram tomadas de estudos prévios. Estas foram feitas com medições fixas e móveis, em dias cujas condições meteorológicas fossem representadas por: ventos fracos, noites claras e que não sem precipitação nas últimas 24 horas. Os lugares onde se realizaram estas observações de temperatura foram classificadas em ZCL por meio de mapas históricos, mapas tomados de Google Earth e fotografias. Os autores utilizaram uma série de modelos numéricos. O primeiro foi baseado na Camada de Limite Urbana para simular as temperaturas do ciclo diário e capturar as diferenças de temperatura durante o processo de resfriamento noturno. Para calcular os valores dos parâmetros da cobertura do solo foi utilizado um modelo baseado na cobertura vegetal. E para obtenção das características termais e das propriedades de radiação dos edifícios foi utilizado um modelo baseado no cânion urbano. Comparando as observações e os valores dos modelos, os autores concluíram que cada ZCL apresenta características termais

únicas. Diferenças de temperatura entre as ZCL ($\Delta T_{ZCLX-ZCLZ}$) foram observadas, especialmente, nas cidades de Vancouver e Upsala, onde os efeitos térmicos da estrutura da superfície, da cobertura do solo e da atividade humana (metabolismo) causam grandes diferenças ou intensidades entre as ZCL. Desta maneira, demonstraram que as ZCL são termicamente únicas e suas diferenças correspondem a sua estrutura e superfície urbana única. Adicionalmente, concluíram que as ZCL ajudam a antecipar as diferenças térmicas em uma escala local, se forem comparadas diferentes ZCL para estudar a intensidade de ICU. Finalmente, conclui-se que os parâmetros das ZCL ajudam a explicar as diferenças físicas.

Lembrando que a ICU é um fenômeno majoritariamente noturno, grandes diferenças nas ZCL densamente construídas (2 y 3) são obtidas quando são comparadas com as ZCL abertas (6 e 9) na cidade de Szeged, Hungria (Skarbit *et al.*, 2017). Essas diferenças aumentam consideravelmente, se a ZCL 3 é comparada com a estação de referência rural (ZCL D), chegando a mais de 6°C durante as noites de verão. Entretanto, Skarbit *et al.* (2017) mostram que, durante o dia, essas diferenças são muito pequenas (<1,5°C), e até mesmo as ZCL compactas (3) e abertas (6) têm valores negativos em relação a ZCLD (rural). Isso leva à conclusão de que o processo de resfriamento nas ZCL compactas é muito menor e lento do que as ZCL abertas com vegetação.

Resultados semelhantes descreve Alexander e Mills (2014), que relata que em Dublin também aparecem diferenças significativas (>4.8°C) entre as ZCL com percentagem elevada de superfície impermeável (2-compacto) com a referência rural (ZCLD) no período noturno. A mesma intensidade (>4°C) no período da noite é reportada por Leconte *et al.* (2015) entre as ZCL compactas e a ZCLD. No entanto, quando se comparam os pares entre as ZCL mais urbanizadas (ZCL 2 e 5) e as ZCL abertas (8, 6 e 9), verifica-se que a diferença entre as ZCL mais urbanizadas com as ZCL abertas não excede 1.8°C à noite. Resultados ligeiramente diferentes dos anteriores, tem lugar na cidade de Glasgow, aqui as diferenças entre ZCL são consideráveis com T_{min} (noite). No entanto, essas diferenças são mais acentuadas durante o período de inverno, em que é evidente que há um aquecimento urbano que segue o padrão das ZCL abertas até as compactas, gerando um claro contraste entre áreas urbanizadas e áreas menos urbanizadas (Emmanuel e Krüger, 2012).

5.2.3 Diferenças entre zonas classificadas dentro da mesma ZCL e influência da localização

É esperado que os setores classificados dentro das mesmas ZCL tenham comportamentos térmicos muito semelhantes, mas a localização dos setores na área urbana pode gerar diferenças de temperatura entre as mesmas ZCL, como é mencionado por Skarbit *et al.* (2017) e Fenner *et al.* (2017). Aqueles autores observam diferenças entre os setores localizados no interior da cidade, com aqueles localizados na periferia da cidade classificados na mesma ZCL. Os autores explicam que isso ocorre devido ao fato dos setores localizados na periferia da cidade estarem expostos à presença de ar frio dos setores rurais, efeito que é observado principalmente entre os setores abertos das ZCL (6). Porém, as zonas mais urbanizadas mostraram comportamentos térmicos muito semelhantes entre seus setores.

A possibilidade de haver diferenças entre os setores classificados dentro da mesma ZCL é considerada por Leconte *et al.* (2015), que estabelece dois locais de controle com distâncias consideráveis entre eles para cada ZCL. Entretanto, os resultados mostram que as diferenças entre os dois locais de controle para cada ZCL não apresentam diferenças significativas (entre -1 e 1°C) nem durante o dia nem à noite.

5.2.4 Índices baseados na temperatura do ar e as ZCL

Uma maneira simples de quantificar as implicações de energia necessárias para aquecimento ou resfriamento nas diferenças climáticas locais, é comparando os dias (graus) de aquecimento ou resfriamento e mostrando outros tipos de índice baseados na temperatura, que ajudam a mostrar os diferentes comportamentos térmicos entre as ZCL (Emmanuel e Krüger, 2012; Skarbit *et al.*, 2017).

De acordo com o acima exposto, Emmanuel e Krüger (2012) usam os Dias Grau de Aquecimento dos (DGC) baseado numa temperatura limite de $< 18.3^{\circ}\text{C}$ (T_{med}), comparando os valores de DGC entre as ZCL de Dublin. Naquela pesquisa foi evidenciado que a demanda de aquecimento aumenta com a intensidade da urbanização, isto é, das ZCL abertas até as ZCL compactas, com um aumento considerável no centro da cidade. Skarbit *et al.* (2017) também usam os dias de aquecimento para distinguir entre as ZCL, encontrando um aumento em DGC ($T_{med} < 15^{\circ}\text{C}$) de 10% do centro da cidade (ZCL2) para as zonas rurais (ZCLD). No entanto,

maiores diferenças foram encontradas com os dias de resfriamento ($T_{med} < 18,3^{\circ}\text{C}$), apresentando um aumento de 40% da ZCL8 (aberta) comparada com a ZCL 3 (compacta).

Skarbit *et al.* (2017) também utilizam outros índices de temperatura baseados T_{min} e T_{max} . Por exemplo, para os Dias Muito Frios ($T_{min} < 0^{\circ}\text{C}$) encontraram um padrão de aumento de dias das ZCL compactas até as abertas ZCL e rural (D). Eles também identificaram Noites Tropicais ($T_{min} > 20^{\circ}\text{C}$), mostrando que o número de dias aumenta com a densidade do ambiente urbano (ZCL 2 e 3) e diminui com a fracção de superfícies verdes ou permeáveis ($\%Perm$) (ZCL9). Com base em tudo isto, conclui-se que os índices baseados em temperatura ajudam a mostrar fortes diferenças e padrões entre as ZCL.

5.3 ZCL e modelos climáticos urbanos

Middel *et al.* (2014) estudaram o microclima em três tipos de bairros com paisagens diferentes (oásis, árido e desértico), na cidade Phoenix nos Estados Unidos. Estes bairros foram classificados dentro das ZCL, para avaliar seu potencial de resfriamento e aquecimento. As medidas de temperatura foram feitas por meio de estações climáticas e o ambiente térmico foi modelado no Software ENVI-met. Assim, ficou evidenciada uma hierarquia entre as diferentes ZCL segundo a temperatura, de forma que as zonas de classe de Espaço aberto com Edifícios Médios apresentam temperaturas maiores que as zonas de Edifícios Médios Compactos. Neste caso, a diferença entre as ZCL ajudou a entender melhor o processo de resfriamento dos diferentes bairros e também sua morfologia. Os autores concluíram que o resfriamento não é só função da vegetação e da superfície dos materiais, mas também depende da forma e configuração espacial. Além disso, destacaram que o sistema da ZCL combinado com programas de modelagem como ENVI-met pode ser uma ferramenta poderosa para identificar morfologias e formas que melhorem o conforto climático dentro da cidade.

Outro exemplo disso é apresentado por Núñez Peiró, Sánchez-Guevara Sánchez e Neila González, (2019), que explicam que as ZCL podem ajudar a estimar a “área fonte” de uma medição. As ZCL ajudam a garantir que o entorno de um ponto de medição tenha características semelhantes, garantindo um certo grau de homogeneidade e compreendendo um pouco melhor o tamanho da área fonte.

5.4 Mapeamento das ZCL

O mapeamento pode ser um instrumento auxiliar relevante para aplicar e melhor compreender as ZCL, sendo também uma importante ferramenta gráfica, que serve para realizar diferentes análises e comparações visuais. Segundo Stewart e Oke (2012), as ZCL podem cumprir um papel muito importante para o mapeamento do clima urbano e o planejamento urbano, permitindo verificar a relação entre as ZCL e os Climatopes (áreas com características microclimáticas similares).

As ZCL não foram desenhadas especialmente para o mapeamento, pois seu principal objetivo foi padronizar a classificação da ICU. No entanto, o mapeamento serve para entender as áreas relativamente homogêneas em propriedades, parâmetros e atividades humanas, dando a oportunidade de serem comparadas objetivamente reações térmicas de áreas diferentes dentro da mesma cidade e entre diferentes cidades (Unger, Lelovics e Gál, 2014). As ZCL foram propostas, inicialmente, para classificar medidas fixas ou estações meteorológicas dentro de uma área ou setor da cidade, no entanto, acabam por oferecer uma grande flexibilidade no desenho e monitoramento do desenvolvimento urbano. Por isso, sua representação em um mapa pode ser auxiliar no planejamento urbano, além de permitir a incorporação de parâmetros sociais e econômicos (Perera e Emmanuel, 2018).

De acordo com Zheng *et al.* (2018), as ZCL mostram algumas semelhanças com os MapaCU (Mapas Climáticos Urbanos). Os dois sistemas podem identificar zonas urbanas com condições climáticas diferentes. A principal diferença é que os MapaCU trabalham com climatopes, no entanto, os dois sistemas podem se beneficiar mutuamente.

Segundo Bechtel *et al.* (2015), a conveniência das ZCL como método de mapear as cidades está no fato de apresentarem certa heterogeneidade, porque estão compostas por uma variedade de paisagens urbanas claramente diferentes. Isto quer dizer que, as ZCL têm bordas que são cruciais, porque estas lhe dão uma forma que varia entre as diferentes classes. Além disso, as ZCL podem ser atribuídas a qualquer estrutura urbana, já que existe a possibilidade de serem criadas subclasses a partir de classes regulares. Com isto, as ZCL provêm uma desarticulação da paisagem urbana, melhorando o seu entendimento.

De acordo com Zheng *et al.* (2018), existem três métodos para classificar as ZCL. O primeiro é o método manual, que tem o inconveniente de consumir muito tempo. Este está mais relacionado à metodologia que oferece Stewart e Oke (2012) para classificar os setores urbanos,

não sendo conveniente aplicar ao nível de uma cidade completa. O segundo método está relacionado com as metodologias de Sensoriamento Remoto, o qual se baseia em processamento de imagens de satélites e utiliza técnicas de classificação de pixels para desenvolver as LCZ. Este último destaca-se por sua economia no momento da obtenção dos dados. O último método está relacionado aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), que requer um grande conjunto de dados. Neste caso, este método pode ser vetorial, o qual tem a vantagem de capturar a borda dos elementos, ou método Raster, que é mais compatível com uma escala geográfica maior e mais poderoso estatisticamente, mas que não permite destacar as bordas das ZCL.

O sensoriamento remoto tem um potencial muito grande. De acordo com Bechtel *et al.* (2015), recomenda-se usar Landsat 8 no momento de calcular os parâmetros das ZCL, porque este satélite reduz a influência atmosférica nas imagens. Além disso, as bandas que capturam as ondas curtas do infravermelho próximo reconhecem o solo duro urbano, favorecendo a estimativa da *%Perm*. Parâmetros como a fração de vegetação e *%Imp* podem ser obtidos, calculando-se os valores NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Desta maneira, obtêm-se os dados necessários para calcular as ZCL compactas e abertas (1-10). Adicionalmente, o Landsat 8 conta com uma banda termal infravermelha, que permite estimar a temperatura da superfície (figura 6).

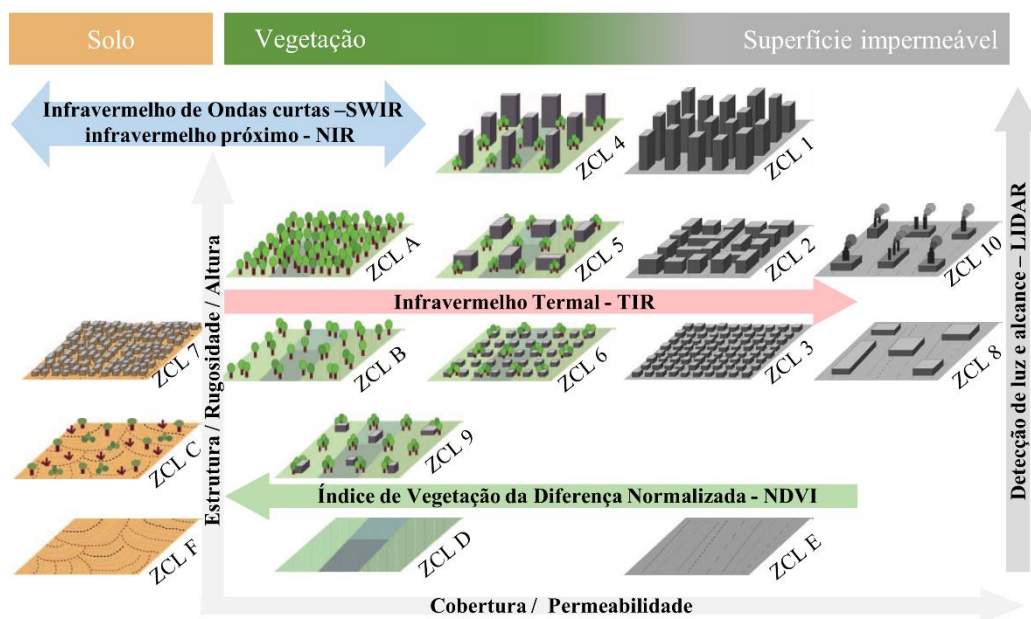


Figura 6. Características observáveis para identificar as ZCL desde o Sensoriamento Remoto. Fonte: Adaptado de Bechtel *et al.* (2015).

O WUDAPT (World Urban Database and Access Portal Tools) usa metodologias baseadas principalmente nos métodos do Sensoriamento Remoto, isto é um projeto de colaboração internacional, que procura descrever a forma da cidade por meio da cobertura da superfície, materiais de construção e a geometria, além de descrever a função da cidade por meio do metabolismo e do intercâmbio de energia. Estes se realizam por classificação das ZCL. O WUDAPT pode ter diferentes níveis de detalhes, o mais comum e básico é o nível zero, o qual descreve as cidades por tipos de bairros, utilizando as ZCL. Atualmente o WUDAPT descreve uma metodologia universal, objetiva, computacionalmente eficiente e semiautomática, que ofereça um fluxo de trabalho simples para chegar a um mapeamento do nível zero baseado em dados e softwares livres. O método permite que especialistas de diversas formações conduzam, validem e criem as ZCL em suas respectivas cidades (Bechtel *et al.*, 2015; Mills *et al.*, 2015). O WUDAPT procura adquirir e guardar dados urbanos usando um marco comum, que é um esforço global e organizado para enfrentar os desafios que requerem comunidades e cidades sustentáveis, por meio da análise do clima urbano e de futuras análises de desenvolvimento. O WUDAPT pode criar mapas de intervalo regular, permitindo entender o desenvolvimento da cidade em série de tempo e analisar o processo de urbanização (Ren *et al.*, 2017).

De acordo com Mills *et al.* (2015), o WUDAPT procura a aquisição, armazenamento e disseminação de dados climáticos relevantes na geografia física das cidades ao redor do mundo. O projeto procura o armazenamento de dados em um formato acessível, que possa ser utilizado para elaborar modelos ou definir parâmetros. Estes dados têm que representar a informação da forma e função das cidades, que, em outras palavras, são a superfície da cidade, os materiais de construção e geometria urbana. Também se procura que os dados possam descrever a demanda energética da cidade, que é representada pelo fluxo de calor antrópico. O nível 1 procura refinar os parâmetros de cada ZCL através da amostragem e conter informação da forma e função da cidade em uma maior resolução espacial e em maior detalhe. Especialmente a informação da cidade expressa-se em 3 dimensões. O nível 2 redefine os dados para que possam prover valores dos parâmetros adequadamente pelos modelos atmosféricos.

6

Metodologia

Este capítulo oferece em sua primeira seção uma descrição das fases e suas etapas em que os processos metodológicos desta dissertação foram divididos. As duas últimas seções mostram detalhadamente os materiais e métodos de cada fase, ou seja, explica a aquisição, fontes e tratamentos do inventário de dados que são analisados para as diferentes variáveis e parâmetros estudados nas diferentes etapas.

6.1 Introdução

Ao fim de alcançar o objetivo geral e os objetivos específicos desta pesquisa, é proposto um conjunto de métodos e processos que são apresentados na Figura 7. A metodologia é dividida em duas fases gerais, que dependem da caracterização dos setores de amostra: a primeira fase é caracterizada pela classificação dos setores em urbanos e suburbanos; a segunda tem uma caracterização mais profunda ao aplicar a classificação das Zonas Climáticas Locais em diferentes setores da cidade de Bogotá. Ao mesmo tempo, cada fase é dividida em duas etapas que mostram um conjunto de métodos e processos de análise urbana e climática, que têm diferentes níveis metodológicos (ver seção 1.2).

6.1.1 Fase 1

Esta fase busca uma aproximação local das diferenças de temperatura dentro da cidade de Bogotá e servirá como uma caracterização inicial da cidade baseada nos setores rural, suburbanos e urbanos. Para a etapa A, o inventário de dados é composto principalmente de dados demográficos urbanos e dados anuais da temperatura do ar. Para isso, é feita uma seleção e classificação (rural, suburbanas e urbanas) das estações meteorológicas da rede do IDEAM localizadas dentro da cidade e sua área rural próxima. Os dados da temperatura são tratados para obter as diferenças de temperatura e, posteriormente, a Intensidade da Ilha de Calor Urbana (ΔT_{u-r}). Ao mesmo tempo, os dados da População (P) e da Densidade da População (DP) de diferentes setores ou bairros da cidade, serão tratados para encontrar os valores estimados e correspondentes de P e DP que serão associados a cada estação meteorológica. Com esta associação de dados, é feita a primeira descrição da Ilha de Calor Urbana (ICU) em Bogotá e a relação dos parâmetros demográficos da cidade (P e DP) com a Intensidade da ICU (ΔT_{u-r}) é explorada para propor um modelo de predição baseado no parâmetro demográfico com a maior correlação. Posteriormente, é desenvolvido um mapa térmico baseado nos valores reais e previstos, a fim de obter uma primeira aproximação da distribuição da ICU em Bogotá. Por fim, a aplicação e comparação de outros modelos propostos na literatura com base em dados demográficos são aplicados e comparados com o modelo da cidade.

A etapa B da fase 1 concentra-se no inventário, reconhecimento e descrição dos parâmetros da forma urbana, divididos em parâmetros de Cobertura de Solo e parâmetros da Geometria e Morfologia urbana das áreas de influência (raio 300m) (setores) das estações meteorológicas caracterizadas em áreas suburbanas e urbanas. Nesta etapa, são calculados os

parâmetros da Fração de Superfície Edificada (*% Edif*), Fração de Superfície Permeável (*%Perm*) e a Fração de Superfície Impermeável (*%Imp*), que descrevem o tipo de cobertura apresentada na área urbana dos diferentes setores. Os parâmetros do Fator de Visão do Céu (*FVC*), relação H/W e Altura dos Edifícios (*Alt.Edif*), que descrevem a geometria e a morfologia urbana, também são calculados para os diferentes setores (área de influência) das estações meteorológicas. Em seguida, verifica-se a influência do parâmetro demográfico de maior correlação com o ΔT_{u-r} sobre alguns dos parâmetros da forma urbana dos setores suburbanos e urbanos, e isso, por sua vez, gera os valores e as diferenças em ΔT_{u-r} mostrados na etapa A. Isso é feito por meio da análise de comparação entre o parâmetro demográfico - parâmetro da forma urbana - ΔT_{u-r} , sendo feita a análise de correlação entre os parâmetros.

6.1.2 Fase 2

O objetivo desta fase é centrar-se na caracterização aprofundada dos diferentes setores das estações meteorológicas por meio das Zonas Climáticas Locais (ZCL), para posteriormente avaliar o comportamento, as condições e as diferenças térmicas entre os setores das estações e as ZCL em que eles são classificados. A primeira etapa desta fase (etapa C) consistirá exclusivamente na caracterização e classificação dos setores nas ZCL de acordo com os dados (inventário) dos parâmetros da forma urbana (etapa B). Para isso, utiliza-se principalmente a Fração de Superfície Edificada (*% Edif*) e a Altura dos Edifícios (*Alt.Edif*) como parâmetros que definirão a ZCL principal. Uma subclassificação com outra ZCL será considerada, se os setores tiverem características que não podem ser ignoradas e que são expressas em seus parâmetros da forma urbana. Para finalizar esta etapa, são comparadas as faixas dos valores dos parâmetros da forma urbana proposta por Stewart e Oke (2012) para as ZCL utilizadas na classificação, com os valores reais dos setores das estações, a fim de entender como se adapta a classificação das ZCL em Bogotá.

A última etapa (etapa D) é baseada num inventário de dados da temperatura diária, obtidos de estações meteorológicas agrupadas em Temperatura Média, Temperatura Máxima e Temperatura Mínima. Da mesma forma que os dados de temperatura horária são obtidos em três horas diferentes do dia (7:00, 13:00, 19:00). Com estes dados, será possível fazer uma descrição da distribuição e variação da temperatura do ar entre as estações e, portanto, entre as ZCL.

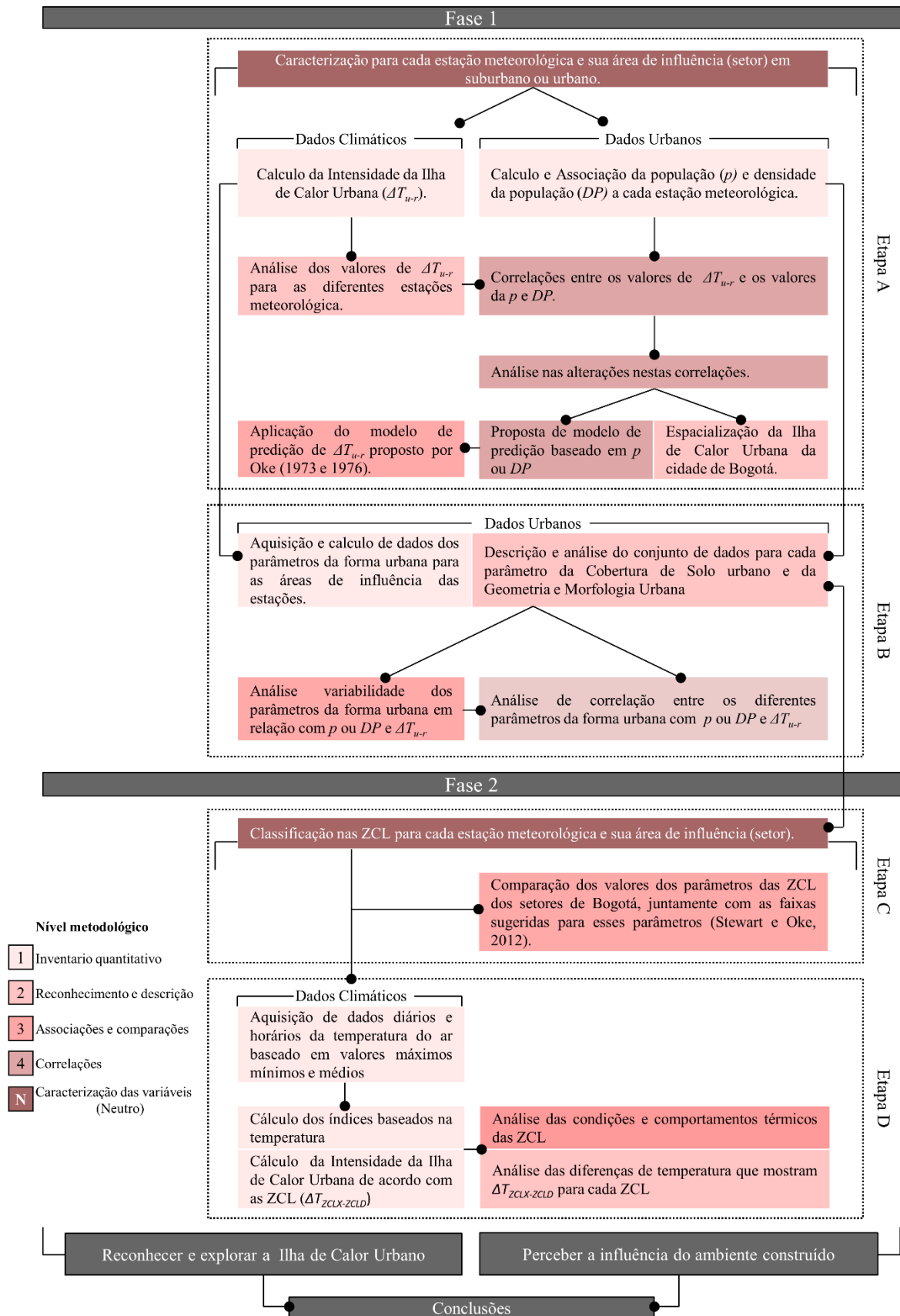


Figura 7. Representação de dois procedimentos metodológicos.

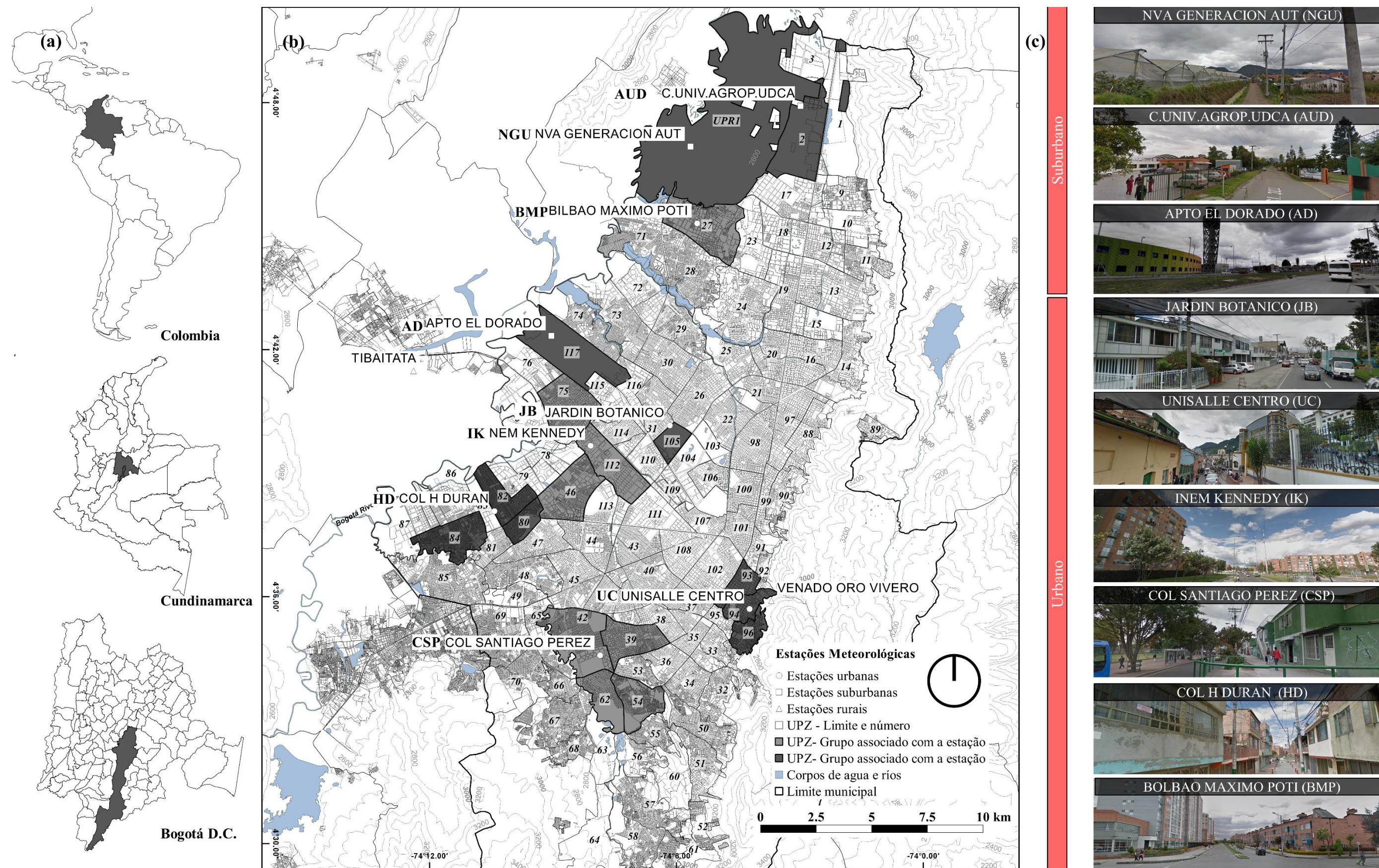


Figura 8. Localização da área de estudo (a), localização das estações meteorológicas com suas Unidades de Planejamento Zonal (UPZ) associadas (b) e imagens dos setores das estações pegadas do Google Steet View (c).

Com as mesmas observações diárias e horárias da temperatura, será possível calcular diferentes índices baseados na temperatura e categorias com base na sensação térmica, com isto será possível observar as mudanças nas condições térmicas da cidade de Bogotá. Finalmente, a Intensidade da Ilha de Calor Urbana (ΔT_{u-r}) baseada nas ZCL ($\Delta T_{ZCLX-ZCLD}$) foi obtida de acordo com os valores diários e horários da temperatura do ar, para identificar se a intensidade da ICU é semelhante entre os setores das estações (classificadas na mesma ZCL), e diferente entre as ZCL.

6.2 Materiais e Métodos da Fase 1

Esta seção concentra-se em suas duas primeiras partes mostrando a área de estudo e a localização das estações meteorológicas que são fonte dos dados de temperatura do ar. Além disso, é descrito como os dados demográficos (População e Densidade Populacional) foram obtidos e associados a cada estação meteorológica. Da mesma forma que a aquisição de dados dos parâmetros da forma urbana, que depende da área de influência das estações, também é descrita. Com este último, as seguintes partes desta seção oferecem uma análise do conjunto de dados para cada parâmetro da Cobertura de Solo urbano e da Geometria e Morfologia Urbana.

6.2.1 A área de estudo e coleta de dados climáticos e demográficos

A área de estudo é a cidade de Bogotá, na Colômbia (Figura 8), localizada na cordilheira oriental da Cordilheira dos Andes, dentro do bioma da savana de altura. A cidade é caracterizada por uma topografia plana, na maior parte de sua área e é cercada a leste por colinas e montanhas e a oeste pelo rio Bogotá e seus pântanos. Além disso, tem uma altitude média de 2625 metros acima do nível do mar, onde existe uma população de 7900000 habitantes (Secretaría Distrital de Planeación e DANE, 2009).

Bogotá é uma cidade sob um clima tropical de alta-altitude (Roth, 2007), com duas estações chuvosas no ano, que vão desde março até abril e de outubro até novembro, precipitação anual de 900 mm e uma temperatura média de 14°C, com valores mínimos de até 4°C na noite e máximas de até 25°C no dia (Gaitan, Cancino e Behrentz, 2007). Devido à sua proximidade com o Equador (4°35 N;74°04 W) e sua altitude (2.640 m), tem temperaturas uniformes distribuídas ao longo do ano e baixas amplitudes anuais de temperatura (<2°C), causadas pela menor diferença entre as estações seca e chuvosa e a estabilidade de sua massa de ar (Eidt,1969; Jauregui, 1986 e Roth 2007). Isto faz que seja possível prever valores de

temperatura com considerável exatidão, como é mostrado por Eidt (1969), que considerando um aumento de 6°C com cada quilômetro de altitude e uma temperatura base no nível do mar de 30°C, consegue prever a temperatura média anual de Bogotá em 14.2°C.

A fonte de informação para coleta dos dados de temperatura do ar foi a rede de estações meteorológicas gerenciadas pelo IDEAM (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, 2017), localizada dentro da cidade e na área rural do entorno de Bogotá. Nove estações (Tabela 8 - Figura 8) desta rede foram agrupadas em duas classes: o primeiro grupo corresponde às estações suburbanas e o segundo às estações urbanas. Além disso, também foram obtidos dados de duas estações na área rural. Este estudo pressupõe que as áreas rurais são aquelas onde o assentamento ou intervenção humana (edifícios) é mínimo, por exemplo, uma área agrícola (Yasushi e Emi, 2005). As áreas urbanas são aquelas em que há um alto desenvolvimento e onde uma população significativa está morando. Além disso, as áreas suburbanas são aquelas em que a população é muito menor e se caracteriza por ser áreas de serviços, como aeroportos, indústrias e instituições educacionais.

Deve-se mencionar que os dados demográficos para a População urbana e Densidade da População urbana foram fornecidos pelo Ministério do Planejamento de Bogotá (Secretaría Distrital de Planeación e DANE, 2009), que é baseado no censo realizado em 2009. Por esta razão, os dados da temperatura do ar das estações meteorológicas também foram obtidos para o mesmo ano.

Dado que a cidade pode ter diferentes morfologias em sua estrutura urbana e diferentes concentrações da População (descritas pela Densidade da População), as nove estações meteorológicas tomadas como amostras estão espalhadas em diferentes contextos da cidade e cada estação está relacionada ao tamanho da População (p) e a Densidade da População (DP), dependendo da sua área (Figura 8).

O Ministério do Planejamento de Bogotá fornece os dados demográficos em Unidades de Planejamento Zonal (UPZ), que são as divisões administrativas municipais. Portanto, para associar p e DP a cada estação meteorológica, esses valores foram calculados com base na média extraída entre as diferentes UPZ que estão ao redor da estação (Figura 8-b). Assim, cada valor de p e DP pode representar adequadamente as condições urbanas e demográficas em que cada estação está localizada.

Tabela 8. Intensidade da Ilha de Calor Urbana (ΔT_{u-r}) durante um período de 12 meses para três estações meteorológicas suburbanas e seis estações urbanas. Cada estação está associada a uma ou várias UPZ (Figura 8) que determinam a População (P) e os dados da Densidade da População (DP) de densidade populacional para cada estação. Os valores de ΔT_{u-r} para cada mês são obtidos a partir da média da temperatura diária. Fontes: Secretaría Distrital de Planeación e DANE (2009) e Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM (2017).

Estações	NVA GENERACION AUT			C.UNIV.AGROP.UDCA			APTO EL DORADO			JARDIN BOTANICO		UNISALLE CENTRO		INEM KENNEDY		COL SANTIAGO PEREZ		COL H DURAN		BOLBAO MAXIMO POTI	
	NGU	AUD	AD	JB	UC	IK	CSP	HD	BMP												
UPZs relacionadas (Número)	UPR1	UPR1	117	105	93	46	39	82	UPR1												
	2			94	75	75	42	80	27												
				96	112	112	54	84	28												
						62															
UPZ Área	km ²	52.15	29.44	7.44	1.62	1.93	4.92	4.33	3.11	21.92											
População	hab	179	550	835	2464	28056	95254	96426	140794	145631											
Densidade da população	hab/km ²	3.43	18.67	112.23	1520.99	14536.96	19348.70	22256.49	45329.68	6643.77											
MES	Tr (°C)	ū (m/s)		Suburbano ΔT_{u-r} (°C)			Urbano ΔT_{u-r} (°C)														
JAN	12.90	N	2.40	1.40	1.30	0.25	0.85	1.90	2.30	-	-	-	-	-	-	-0.60					
FEV	13.45	NE	2.70	0.85	0.75	0.10	0.75	1.80	2.15	1.85	-	-	-	-	-	1.50					
MAR	13.95	N	2.40	0.50	0.75	-0.15	0.65	1.55	1.80	1.70	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	1.05					
ABR	14.05	NE	2.60	0.50	0.75	0.15	1.05	1.45	-0.90	2.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	1.30					
MAI	13.63	NE	2.50	0.52	0.53	0.68	1.03	1.83	1.23	1.48	4.48	4.48	4.48	4.48	4.48	1.58					
JUN	13.83	E	3.00	0.03	0.53	0.83	1.33	1.13	3.23	1.78	2.83	2.83	2.83	2.83	2.83	1.58					
JUL	13.84	E	3.40	0.43	0.37	0.67	0.93	0.77	2.38	-	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	1.53					
AGO	13.98	E	3.40	0.77	0.58	0.87	1.18	1.13	2.63	-	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	1.63					
SET	13.80	E	3.90	0.35	0.00	0.40	0.35	1.15	1.85	-	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	1.55					
OUT	13.90	NE	3.20	0.55	0.20	0.50	0.35	1.00	1.40	-	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	1.35					
NOV	14.08	N	2.80	0.93	0.53	0.78	0.98	1.38	-	-	2.83	2.83	2.83	2.83	2.83	1.23					
DEZ	14.55	NE	2.50	1.45	-0.30	0.25	0.80	2.00	1.70	-	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40	1.80					
Média	13.72		2.90	0.69	0.50	0.44	0.85	1.42	1.71	1.84	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10	1.29					

Tr (°C) Temperature Rural do Ar. A temperatura rural é a temperatura média obtida pelos dados das estações TIBAITATA e VENADO ORO VIVERO (Figure 5)

ū (m / s) Velocidade do vento. Os dados foram obtidos na estação APTO EL DORADO, localizada no aeroporto internacional El Dorado.

hab. Habitantes

UPR Unidades de Planejamento Zonal rural

A Tabela 8 mostra um resumo dos diferentes dados coletados para este estudo em um período de um ano a partir de 9 estações meteorológicas localizadas em diferentes partes da cidade de Bogotá. As três primeiras estações (NGU, AUD e AD) têm menos pessoas, uma área maior e, portanto, uma densidade populacional menor quando comparadas às outras estações que estão associadas a setores puramente urbanos e apresentam alta densidade da população.

6.2.2 Coleta de dados e cálculo de parâmetros da Forma Urbana

Alguns parâmetros da Forma Urbana foram calculados para a área de influência de cada estação (Raio = 0,3 Km) (Oke, 2004b; World Meteorological Organization, 2008). Estes podem ser divididos em parâmetros da Cobertura de Solo Urbano e nos parâmetros da Geometria e Morfologia urbana. A principal fonte de informação para o cálculo desses parâmetros foi o Mapa de Referência da cidade (Figura 9)(Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital *et al.*, 2018), que consiste em um conjunto de informações de planejamento urbano que inclui dados sobre prédios, ruas, topografia, uso do solo, corpos d'água e parques urbanos em formato SIG.

As diferentes camadas do Mapa de Referência da cidade foram tratadas usando as diferentes ferramentas do programa Qgis para calcular os parâmetros da forma urbana, como é mostrado na figura 10.

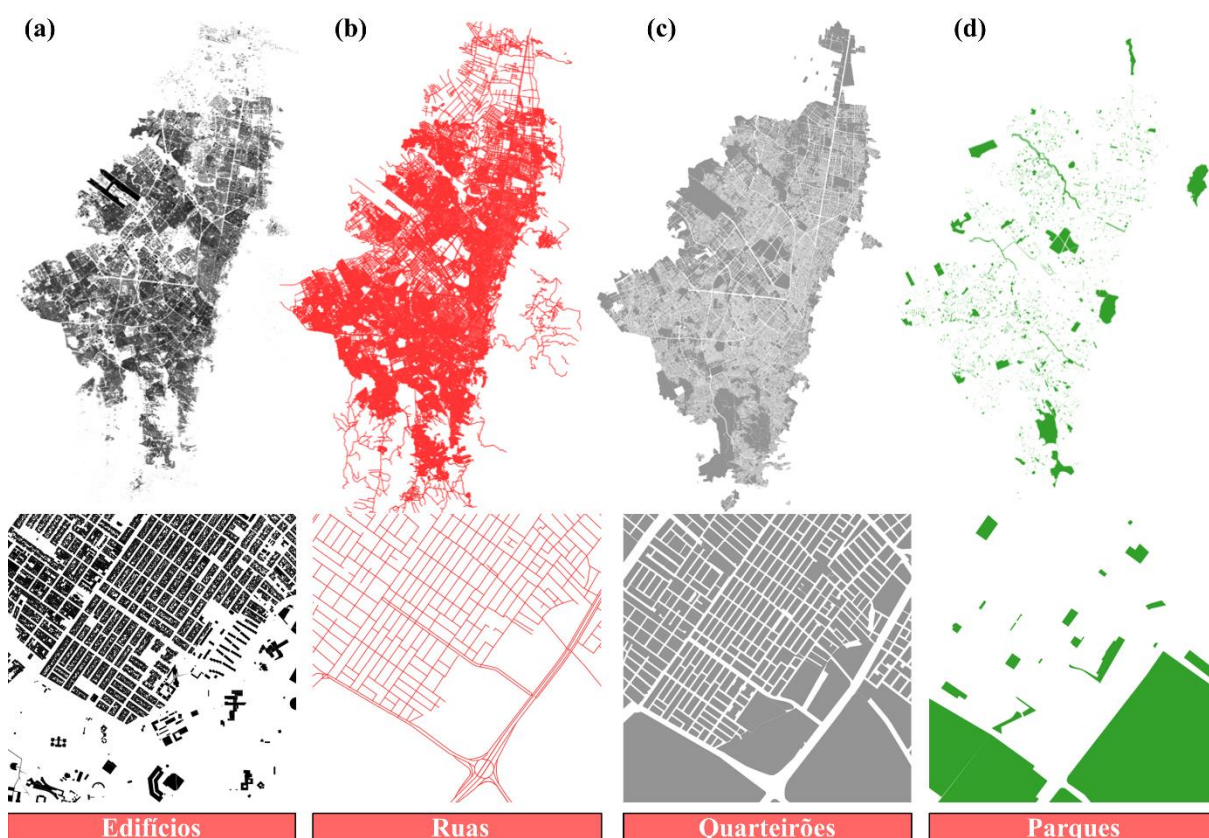


Figura 9. Mapa de referência da cidade proporcionado pela “Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital” (2018), em diferentes camadas (“layers”) em formato SIG (“Shape”) que agrupa os polígonos dos edifícios (a), ruas (b), quarteirões (c) y parques (d).

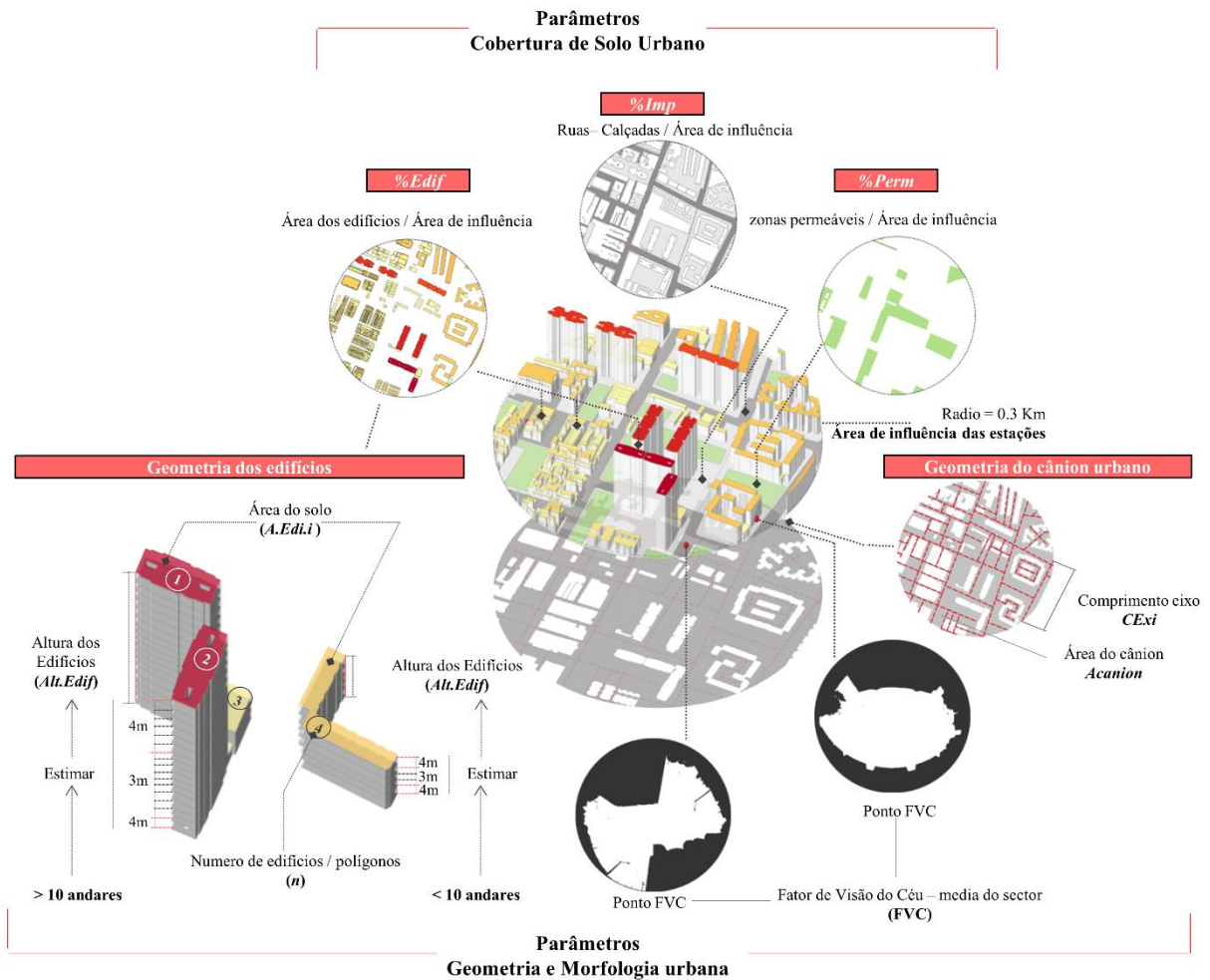


Figura 10. Cálculo dos dados da Cobertura de Solo, Geometria e Morfologia Urbana.

Os parâmetros da Cobertura de Solo Urbano são a Fração de Superfície Edificada ($\%Edif$) extraídos dos dados dos edifícios, onde cada edifício é representado por um vetor poligonal. Além disso, a Fração de Superfície Permeável ($\%Perm$) e a Fração de Superfície Impermeável ($\%Imp$) foram calculadas em parte pelos vetores dos polígonos. No primeiro caso ($\%Perm$), os vetores poligonais dos parques foram utilizados, e isso foi complementado pela adição de outros vetores de polígonos correspondentes a outras zonas permeáveis (jardins e áreas abertas) com a ajuda de fotografias de satélites disponíveis no Google Earth. No segundo caso ($\%Imp$), os dados vetoriais das ruas, avenidas e blocos urbanos foram utilizados para obter a área das calçadas e outros espaços públicos como praças. Para isso, a área $\%Edif$ e $\%Perm$ foi subtraída da área dos blocos urbanos (quarteirões).

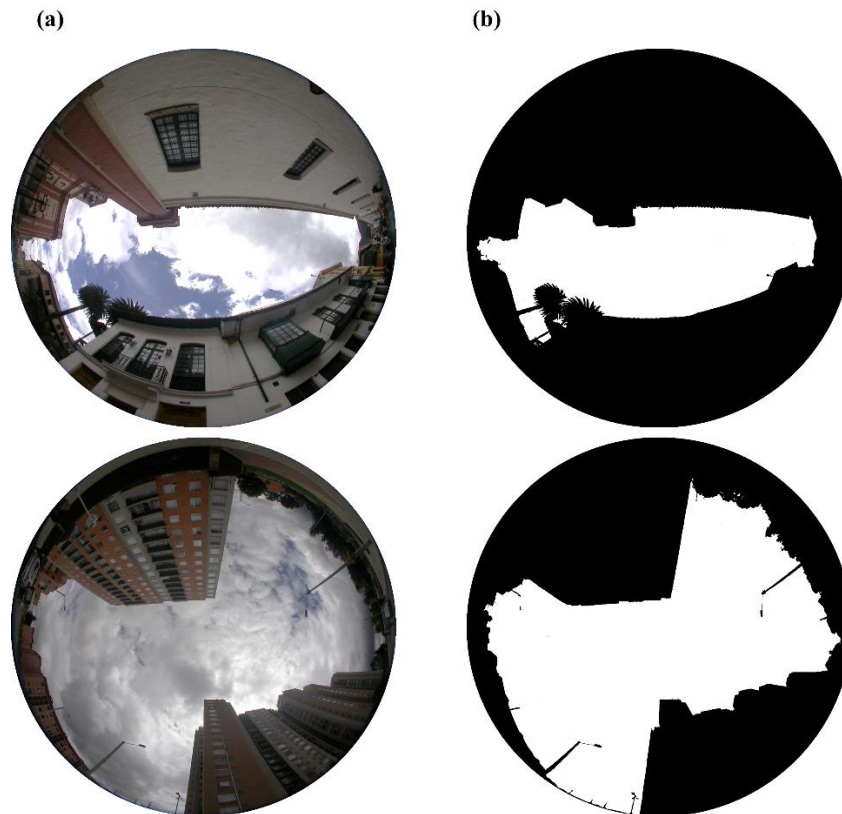


Figura 11. Exemplo de representação do Fator de Visão do Céu (*FVC*) usando fotografias de “olho de peixe” (a), que foram posteriormente editadas para destacar a área visível do céu (b).

Em relação aos parâmetros da Morfologia Urbana, foram obtidos dados para a Altura dos Edifícios (*Alt.Edif*). Para este caso, os dados também foram obtidos a partir das informações vetoriais dos edifícios, que não só contém informação da forma e área de cada edifício, mas também do número de andares de cada edifício, podendo se estimar assim a altura do polígono vectorial. A relação H/W pode ser estimada a partir da *Alt.Edif* e pela diferença entre $\%Edif$ e a área de influência das estações (Figura 10). Todas as modificações e adaptações das informações vetoriais e o cálculo dos parâmetros mencionados foram realizados utilizando-se um Sistema de Informação Geográfica de uso livre (QGIS), aplicando suas ferramentas de “operação espacial” e sua “calculadora de campo”. Finalmente, o Fator de Visão do Céu (*FVC*) foi calculado usando fotografias de “olho de peixe”, que foram processadas pelo software “RayMan” (Matzarakis, Rutz e Mayer, 2010) (Figura 11). Dezesete fotografias foram obtidas em diferentes pontos distribuídos na área de influência das estações (setores) e foram processadas, assim, o valor médio entre os valores dos diferentes pontos das fotografias foi utilizado para representar o setor da estação. A explicação dos procedimentos para estimar os

valores de cada parâmetro da Morfologia Urbana, é apresentada nas próximas partes desta secção, junto com a análise dos dados.

6.2.3 Análises dos dados da Cobertura de Solo Urbano

Os parâmetros que descrevem a cobertura do solo urbano são a Fração de Superfície Permeável (*%Perm*) que representam parques, áreas verdes, jardins e terras descobertas. A Fração de Superfície Edificada (*%Edif*) descreve exclusivamente a área ocupada por edifícios e a Fração de Superfície Impermeável (*%Imp*) descreve a estrutura da mobilidade veicular e pedestre, como ruas e blocos, ignorando a área da *%Edif* (Stewart e Oke, 2012) (Figura 10).

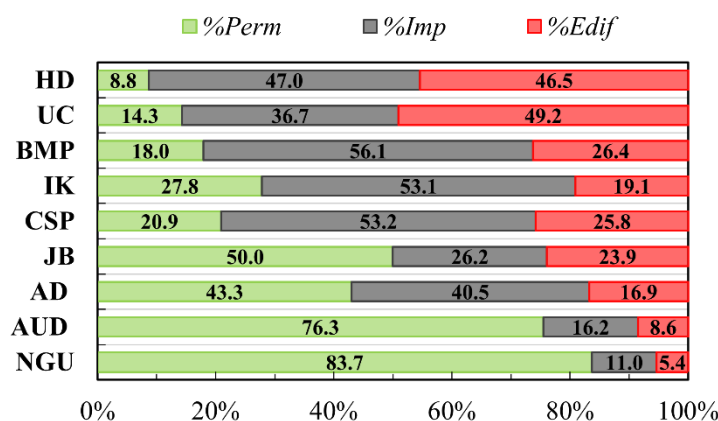


Figura 12. Distribuição e proporções dos parâmetros da Cobertura de Solo Urbano

As proporções para cada tipo de superfície nos diferentes setores das estações podem ser observadas na Figura 12. Observa-se que nas estações NGU, AUD e AD há uma alta proporção de *%Perm* (> 40%) e uma baixa proporção para *%Edif* (<20%), sugerindo não apenas um baixo número de edifícios, mas também uma baixa *DP*. No caso de AD, a área de *%Imp* é consideravelmente alta (>40%), causada principalmente por seus serviços (aeroporto), que são usos do solo que requerem uma grande quantidade de área pavimentada (Xiao *et al.*, 2007). No entanto, neste caso, não parece ter um grande impacto térmico, como mostrado em outros estudos (Stone e Rodgers, 2001). No caso de JB, seu alto percentagem em *%Perm* cobre a metade da área, devido a um grande parque urbano, que ocupa uma proporção significativa da

área de influência da estação ($157657.53 \text{ m}^2 = 45.18\%$). Portanto, pode ter um efeito de resfriamento significativo, como observado por Wong e Yu (2005), que encontra temperaturas relativamente baixas perto das grandes áreas verdes, onde também existem parques e jardins dentro dos blocos urbanos do mesmo setor (JB). Para *%Edif* começa a aumentar para as estações CSP, IK e BMP (19% -20%), porém não aumenta muito em relação às estações anteriores. Isso acontece porque o *%Imp* ($> 50\%$) tem uma porcentagem alta. Isso sugere que nos setores dessas estações existem grandes áreas de espaço público e mobilidade urbana. Por fim, a área da *%Edif* aumenta consideravelmente para UC e HD ($> 40\%$), onde o valor do *%Perm* é mínimo ($< 15\%$), sugerindo que são setores com intensa urbanização.

6.2.4 Estimação da Altura dos Edifícios e análises dos dados

A Altura dos Edifícios (*Alt.Edif*) foi estimada com base no número de andares que mostram os dados vetoriais dos edifícios para cada construção (polígono), onde o primeiro e último andares representam valores de 4m cada um, e os pisos intermediários representam valores de 3m para edifícios com menos de 10 andares. Para edifícios com mais de 10 andares, o primeiro andar representa valores de 4m, entre o segundo e o décimo piso representam valores de 3m e os andares posteriores ao décimo, representam valores de 4m (Figura 10). Por essa razão, os valores de *Alt.Edif* são apresentados como uma variável discreta. A Figura 13 mostra a distribuição das *Alt.Edif* para cada sector da estação expressa em sua proporção. Pode-se observar que cada estação mostra duas proporções diferentes para cada valor de *Alt.Edif*. Isso ocorre porque a proporção pode ser calculada de acordo com o número (n) de edifícios (Pro. A) ou de acordo com a área do solo ocupada pelos edifícios (polígono) (*A.Edi.i*) com um determinado valor de *Alt.Edif* (Pro. B). Por outro lado, na Pro. A, edifícios com altos valores de *Alt.Edif* ($> 21\text{m}$) mostram poucas unidades (n), o que implica que o possível impacto causado pelos edifícios altos no ambiente e na temperatura poderia ser ignorado, já que os edifícios altos fornecem sombra. Além disso, ao calcular um valor representativo de *Alt.Edif* (média ou mediana) para cada estação, a maneira pela qual a proporção é apresentada pode ser refletida nesse valor representativo. Esse problema pode ser resolvido com a Pro. B.

A Figura 13 mostra que os valores muito altos de *Alt.Edif* têm uma proporção maior em Pro. B que melhor descreve a realidade de cada setor (ver Pro. B para IK e BMP na Figura 13). Também conhecendo a área ocupada pelos edifícios catalogados em cada valor de *Alt.Edif*, pode-se calcular a “média ponderada por área” para cada setor, oferecendo um melhor valor de

tendência central para *Alt.Edif* (Zheng *et al.*, 2018). De acordo com Zheng *et al.* (2018), a média ponderada por área para *Alt.Edif* de um setor é descrita pela seguinte equação (equação 3):

$$Alt.Edif = \frac{\sum_{i=1}^n A.Edi.i * Alt.Edif.i}{\sum_{i=1}^n A.Edi.i} \quad (Eq.3)$$

Onde n é o número de edifícios (polígonos) na área de influência para cada estação, $A.Edi.i$ é a área do solo ocupada para cada edifício (polígono)(Figura 10), $Alt.Edif.i$ é a altura de cada edifício (polígono), $\sum_{i=1}^n A.Edi.i * Alt.Edif.i$ é o volume total de edifícios na área de influência de cada estação e $\sum_{i=1}^n A.Edi.i$ é a área do solo total ocupada pelos edifícios.

Em relação à proporção observada para cada setor, a Figura 13 mostra que, para as estações NGU AUD e AD, o valor da maior proporção é de 4m (60% - 80%), os edifícios não excedem 10m e os valores da média e média ponderada por área são bastante semelhantes (< 0.2 m de diferença). Isso mostra que são setores com pouco desenvolvimento urbano, por apresentar baixos valores de *Alt.Edif* e *%Edif*. No caso de JB, a proporção de edifícios com 4m (55%) é reduzida pelo aumento de edifícios com 7m (34%), especialmente na Pro. B, onde os edifícios com 7m têm a maior proporção (57%). Aqui, edifícios de até 21m em poucas unidades (4) e pouca área (<800m²) são apresentados, portanto a diferença entre a média e a média ponderada por área começa a aumentar (diferença de 1m) desta estação. Para a estação CSP, proporções para Pro. B são melhor distribuídas, onde os valores de 4m, 7m e 18m têm percentagens similares (32,23 e 29%). Isso não é evidente na Pro. A (49, 24 e 11%), onde a média e a média ponderada por área têm uma diferença de 2m. A distribuição da Pro. B sugere que o desenvolvimento urbano deste setor tem algum controle de alturas e tipologias de edificações definidas, características de um grande desenvolvimento urbano previamente planejado.

Para as estações IK e BMP, as proporções mudam novamente devido à presença de muitos diferentes valores na *Alt.Edif* (Variedade de alturas). Destaca-se aqui que esses setores apresentam os edifícios com os maiores valores para *Alt.Edif* (48-68 m). As diferenças entre a média e a média ponderadas por área não são semelhantes para as duas estações. No caso de IK, a média ponderada por área é inferior e tem uma diferença é de 1m com respeito à média, algo que não aconteceu anteriormente. Isso acontece porque a área dos prédios (Pro. B) com 4m é bastante extensa (> 35000m² = 57%), porém possuem menor número de polígonos (Prop. A) ($n = 37 = 15\%$). Isso sugere que a IK pode ter edifícios destinados a serviços ou usos comerciais que exijam grandes áreas na mesma estrutura. No caso de BMP, a diferença entre a

Para a estação UC, a distribuição nas proporções é similar (Pro. A \approx Pro. B). Isso se reflete na pequena diferença entre a média e a média ponderada por área (0.2 m). Isso sugere um setor muito mais homogêneo, para o qual a maior proporção está em edifícios de 4m (52-54%) com altura máxima de 21m (1-2%). Edifícios de maior altura ($> 40m$) também são apresentados, mas seu número e área são muito pequenos. Finalmente, para HD, a distribuição parece estar distribuída entre 7 e 10m de forma semelhante entre Pro. A (31 e 30%) e Pro. B (33 e 34%). Isso mostra que, em grande parte do setor, a tipologia dos prédios é semelhante. Muitos edifícios têm que se destacar em HD ($n=3303$), coincidindo com os altos valores de p e DP (Tabela 8).

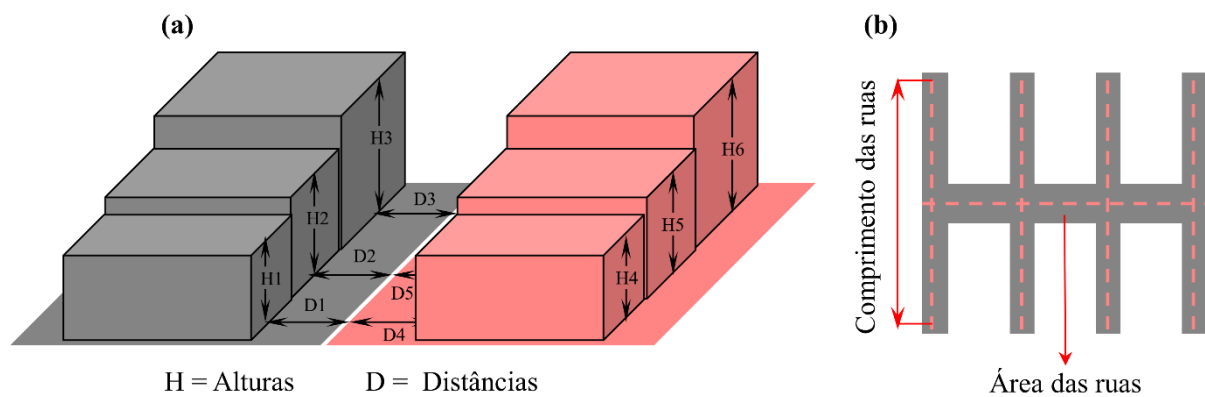


Figura 14. Esquemas das metodologias adotadas por Nakata-Osaki, Souza e Rodrigues (a) e Zheng et al (b) para o cálculo da relação H/W . Fonte: Adaptado de Osaki, Souza e Rodrigues (2018) e Zheng et al (2018).

6.2.5 Cálculo da relação H/W e análises de dados

A relação entre *Alt.Edif* e a largura do cânion urbano é muito importante. Esta relação pode ser explorada usando a relação H/W que simplifica a geometria do cânion urbano, ao relacionar o valor da altura pela largura do cânion urbano (Coseo e Larsen, 2014; Goh e Chang, 1999). Ao fazer o cálculo para obter H/W , a altura deve ser deixada como constante (Johansson, 2006) ou a média de altura dos prédios envolvidos se for considerado um cânion urbano mais tradicional ou homogêneo, porém a paisagem urbana é mais heterogênea e complexa. Nakata-Osaki, Souza e Rodrigues (2018) propõem uma metodologia baseada nos cálculos das médias da *Alt.Edif* (H) e a Largura (W). Para fazer isso, o cânion urbano é dividido por um eixo, então

a distância entre as fachadas de cada edifício e o eixo é medida. Portanto, a média da distância dos lados direito e esquerdo do edifício ao eixo é adicionada para obter o valor da largura (W), então a média da altura dos edifícios que estão presentes na frente do eixo (esquerda e direita) é calculada (Figura 14-a). Com esses valores, a média de H/W é obtida para cada cânion urbano que faz fronteira com um bloco urbano (ruas para uma morfologia tradicional). Por outro lado, para uma escala local, Zheng *et al.* (2018) propõe o cálculo da largura (W) do cânion urbano por meio da área e do comprimento das ruas (Figura 14-b), enquanto a altura (H) é calculada a partir da média ponderada por área de $Alt.Edif$ (Equação 3) da área local (Bairro).

Para este estudo, o método proposto por Zheng *et al.* (2018) é adotado por oferecer um valor representativo para uma área local. No entanto, deve-se lembrar que os setores em estudo não têm a configuração tradicional de blocos (quarteirões) e ruas, mas em alguns casos a tipologia é mais complexa, apresentando super-quarteirões com espaços para pedestres e públicos entre prédios que também compõem um cânion urbano (IK e BMP). Para resolver este problema, é utilizado o sistema de eixos proposto por Nakata-Osaki, Souza e Rodrigues (2018), no qual é desenhado um eixo no meio do espaço entre os diferentes blocos de edifícios (ignorando pequenos pátios ou jardins interiores dentro do mesmo edifício). O sistema de eixos ignora o fato de que as ruas são os elementos que definem o cânion urbano. Em vez disso, o cânion urbano é entendido como o espaço vazio entre as áreas construídas pelos edifícios (Figura 10). Nesta ordem de ideias, a diferença entre %Edif e a área do círculo de influência da estação, é a área considerada como o cânion urbano. Zheng *et al.* (2018) propõe a Equação 4 para calcular a largura (W) do cânion urbano:

$$W = \frac{A_{canion}}{\sum_{i=1}^n CExi} \quad (Eq.4)$$

Onde n é o número de eixos traçados na área do cânion urbano, A_{canion} é a área do cânion urbano e $\sum_{i=1}^n CExi$ é o comprimento total dos eixos traçados. Obtendo a largura (W) da área do cânion urbano pela Equação 4, a relação H/W da área de influência da estação pode ser calculado usando a seguinte equação (Equação 5):

$$H/W = \frac{Alt.Edif}{W} \quad (Eq. 5)$$

Onde $Alt.Edif$ é a altura média ponderada por área dos edifícios no setor (Equação 3) e W a largura do cânion urbano (Equação 4).

A Figura 15 mostra os dados obtidos para o cálculo da relação H/W , juntamente com a área considerada como cânion urbano e os eixos traçados (CE_{xi}) para cada setor das estações (dados associados). Os valores de H/W (Figura 15) aumentam lentamente para as estações NGU, AUD, AD e JB (0.09 a 0.19). Este último não tem um valor maior devido aos parques do setor que aumentam a área do cânion urbano ($A_{canion} = 250872.8m^2$). IK e UC, apesar de terem diferenças expressas nos valores de $Alt.Edif$ que sugerem valores diferentes para H/W . Estas estações têm valores similares (0.36, 0.35), assim IK tem um alto valor de $Alt.Edif$ (13,50m), mas seu alto valor em W (37.7m) sugere um cânion urbano não tão estreito, fazendo com que o valor de H/W não seja tão alto (ou profundo) como seria de se esperar. Para a UC, ocorre o inverso, o seu valor de W (19m) sugere um cânion urbano mais estreito (profundo) do que o IK, mas seu baixo $Alt.Edif$ (6,64m) ajuda a atenuar o valor final de H/W .

Os maiores valores para H/W são apresentados para as estações BMP e HD (0.83, 0.70). BMP é o setor onde o eixo marcado é mais longo ($CE_{x} > 12000$). Sem dúvida, a complexidade morfológica (grande diversidade de tipologias construtivas) influenciou a extensão do eixo, pois são necessários mais traços (linhas). Essa heterogeneidade indica que os valores morfológicos desse setor são mais diversificados e apresentam maior variabilidade, o que afeta o valor médio final representativo para o setor. Da mesma forma, os edifícios altos deste setor ($Alt.Edif > 16m$) contribuem para ter o maior valor de H/W . Finalmente, HD apresenta um alto valor para H/W , causado principalmente pela estreiteza do cânion urbano ($W < 15$) e dos prédios baixos ($Alt.Edif < 9m$). Esta observação mostra que valores similares de H/W nem sempre mostram setores parecidos. Isto também é destacado por Emmanuel e Johansson (2006), que diz que tradicionalmente se espera que ruas largas resultem em baixos valores de H/W , porém aumentando a altura, H/W pode aumentar consideravelmente, sem importar o alto valor de W .

6.2.6 Cálculo do Factor de Visão do Céu e análise de dados

Para o Factor de Visão do Céu (FVC), 23 fotografias foram tiradas para os 9 setores das estações (Figura 15). Procurou-se obter pelo menos duas fotografias para cada área de influência localizadas em locais que representassem diferenças em sua morfologia e superfície

(diferentes alturas, ruas, parques, praças) (Figura 10). A média entre os diferentes pontos para cada estação foi obtida como uma medida representativa.

Na Figura 15, as estações NGU, AUD e AD têm valores semelhantes para o *FVC* ($> 0,60$), mostrando que a obstrução do céu é causada principalmente por edifícios separados e espalhados. Para as seguintes estações, a obstrução do céu aumenta e, portanto, os valores de *FVC* diminuem. Valores semelhantes são apresentados entre JB, CSP BMP e UC (0.40-0.50), porque são áreas residenciais com espaços abertos relacionados a parques (JB) ou áreas com espaço público (CSP e BMP), onde pequenas variações de *FVC* são causadas pela vegetação. Essa vegetação pode causar grandes obstruções ao céu, mas não tende a aquecer o ar como outros elementos rugosos urbanos fazem (Wang e Akbari, 2014).

Outra observação importante é que, embora esteja claro que pode haver diferenças entre a forma urbana desses setores, há características que explicam a similaridade entre os valores de *FVC*. Por exemplo, UC ($FVC = 0.41$) tem um cânion urbano mais estreito, no entanto, não tem grandes alturas ($Alt.Edif = 6.64$) que podem aumentar a obstrução do céu. No caso de BMP e CSP ($FVC = 0.45-0.46$), alturas consideráveis são apresentadas ($Alt.Edif > 9.50$), mas a tipologia de seus prédios favorece as áreas abertas (parques e praças). Os valores mais baixos de *FVC* estão em IK e HD (0.32-0.36). No primeiro caso, a maior obstrução é causada principalmente por edifícios altos ($Alt.Edif = 13m$). No segundo caso, semelhante a UC, existem cânions urbanos estreitos, mas com menor altura ($Alt.Edif = 9m$).

A Figura 16 mostra os mapas setoriais e os valores representativos para os diferentes parâmetros da forma urbana. Pode-se observar que as estações CSP e HD são áreas sombreadas que foram ignoradas no cálculo dos diferentes parâmetros da forma urbana. Esta decisão foi tomada, porque são pequenas áreas que claramente têm características diferentes e podem distorcer os dados dos parâmetros. JB também mostra esse contraste de características, pois grande parte de sua área de influência é ocupada por um parque. Essa característica, no entanto, não pode ser ignorada se ocupar quase 50% do círculo da área de influência.

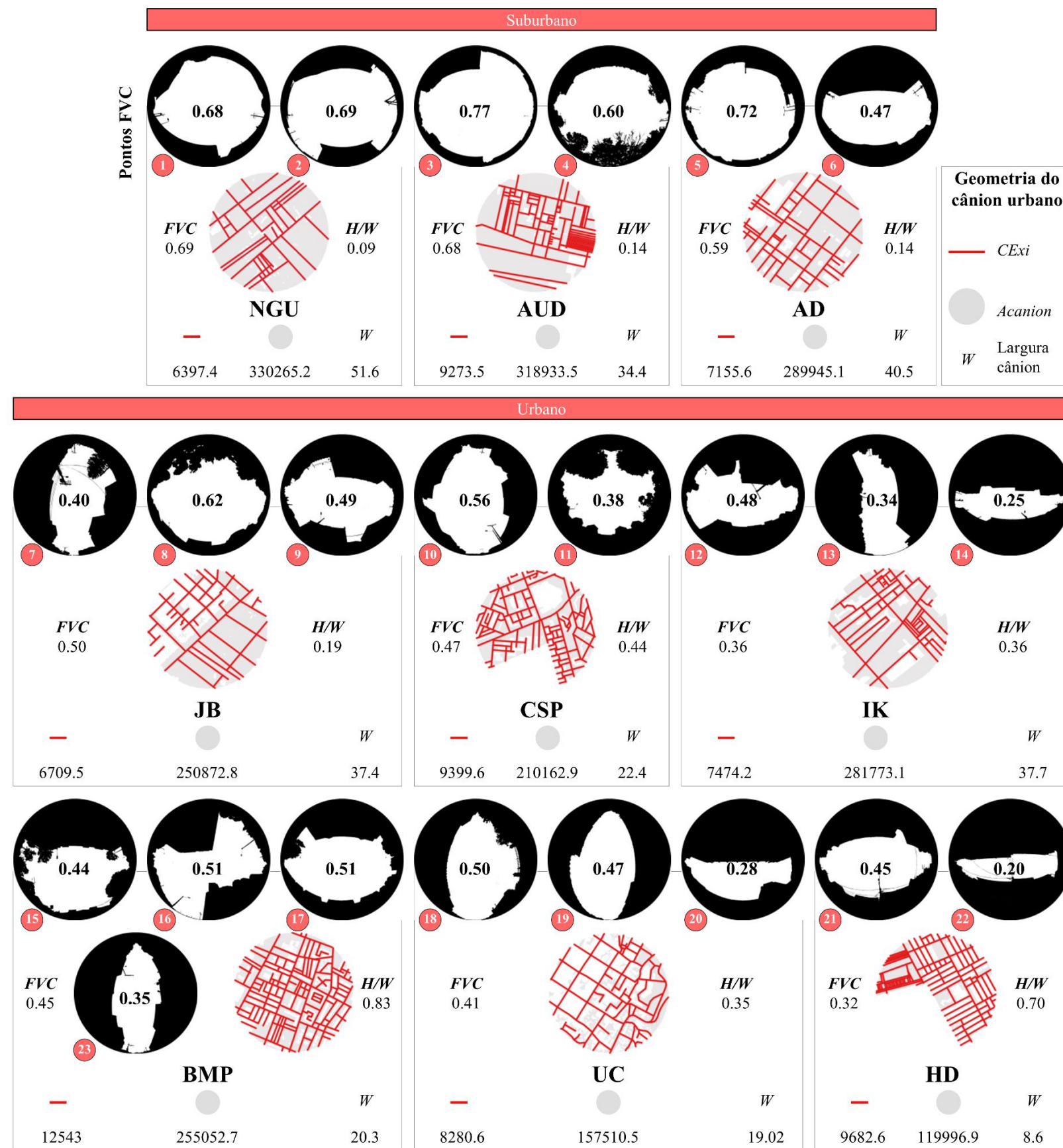


Figura 15. Valores medidos do Fator de Visão do Céu (FVC) e valor estimado de H/W e dados associados para o cálculo.

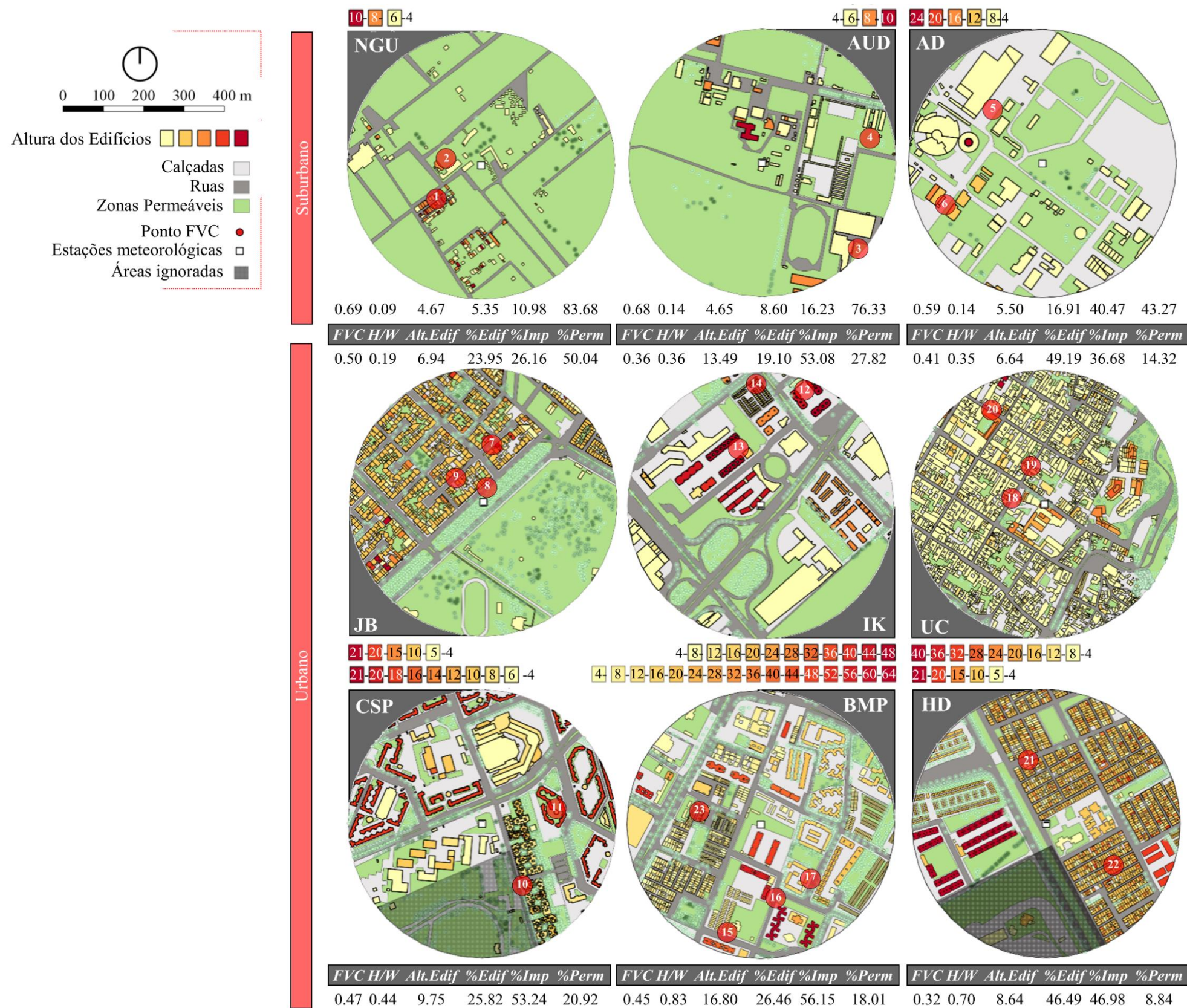


Figura 16. Mapas das áreas de influência das estações meteorológicas e seus valores representativos dos parâmetros da Forma Urbana

6.2.7 Correlações entre parâmetros demográficos e da Forma Urbana e sua relação com a Intensidade da Ilha de Calor Urbana.

Para finalizar a fase 1, as diferenças de temperatura entre a temperatura do ar das estações suburbanas e urbanas e a temperatura do ar rural, que pode ser definida como Intensidade da Ilha de Calor Urbana (ΔT_{u-r}) (Oke, 1973), foram obtidas por um período de 12 meses para cada estação (ver parte 6.2.1) e cruzados com os dados de p e DP , como mostrado na Tabela 8 (parte 6.2.1). Considerando esses dados, foram identificadas relações entre $\Delta T_{u-r} - \log p$ e $\Delta T_{u-r} - DP$. Com os dados obtidos a partir dos parâmetros de forma urbana que foram explorados (partes 6.2.3 até 6.2.6), a variabilidade entre estações desses parâmetros foi comparada com ΔT_{u-r} e DP . Com base nesses resultados, as relações entre $\Delta T_{u-r} - \log FVC$, $\Delta T_{u-r} - \log \%Perm$ e $DP - \log FVC$, $DP - \log \%Perm$ foram destacadas e exploradas, resultados que são mostrados no capítulo 7.

6.3 Materiais e Métodos da Fase 2

Esta seção foca principalmente as variações e diferenças apresentadas pelas Zonas Climáticas Locais (ZCL). A primeira parte mostra o processo de classificação nas ZCL para cada estação meteorológica e sua área de influência (setor). A segunda parte é focada em descrever a aquisição de dados diários e horários da temperatura do ar. Com esses dados, é possível calcular os índices baseados na temperatura, um processo que é descrito na quarta parte desta seção. A última parte descreve o cálculo e mostra os valores da Intensidade da ICU de acordo com as ZCL.

6.3.1 Classificação das Zonas Climáticas Locais

Os parâmetros da forma urbana mostrados anteriormente expressam a estrutura urbana da cidade. Estes parâmetros podem ser agrupados para descrever superfícies urbanas homogêneas que apresentam características semelhantes, baseadas na descrição qualitativa e quantitativa dos setores urbanos na escala local. As Zonas Climáticas Locais (LCZ) cumprem esse objetivo e segundo Stewart e Oke (2012) as LCZ buscam ser um sistema simples, genérico e lógico, a classificação busca ser um processo simples. Como já abordado na revisão bibliográfica, as ZCL são 17 classes que são divididas em dois grupos, o primeiro grupo representa as Tipologias de Cobertura de solo que leva em conta a densidade da vegetação (agrupamento de árvores) e tipos de superfícies como pavimentação, água, solo exposto, áreas

verdes ou pedras expostas (Tabla 5). O segundo grupo consiste na Tipologia de construção, que são definidos principalmente pela altura dos elementos de rugosidade (edifícios) (Edifícios Altos, Médios e Baixos) e a densidade do conjunto de edifício (Abertos e Compacto). Nessa ordem de ideias, os parâmetros-chave que definirão a classificação das diferentes estações nas ZCL para este estudo serão: a Fração de Superfície Edificada (*%Edif*) e a Altura dos Edifícios (*Alt. Edif*). São parâmetros que também foram usados para definir a classificação para as Tipologia de construção em outros estudos (Gál, Bechtel e Unger, 2015; Wang, R. *et al.*, 2018; Zheng *et al.*, 2018). Assim, *Alt. Edif* ajudará a identificar o tipo de altura deste estudo da seguinte maneira: para Edifícios Altos *Alt. Edif* > 21m, para Edifícios Médios *Alt. Edif* = 10-21m e para Edifícios Baixos, *Alt. Edif* < 10m. *%Edif* ajudará a determinar a densidade do conjunto de edifício dos setores também: *%Edif* > 40% indicará setores compactos e *%Edif* < 40% indicará setores abertos, onde *%Edif* < 18% serão setores abertos-escassos. Mills *et al.* (2015), em sua proposta de um mapeamento baseado nas ZCL, destaca a importância de um especialista local no processo de classificação. Levando em conta esta ideia, a classificação do Tipo de Cobertura de Solo para as estações dependeu, principalmente, das características visuais observadas em fotografias de satélite e na experiência local do autor.

A Figura 17 mostra os mapas dos setores, o valor representativo e classificatório para os diferentes parâmetros da forma urbana e a classificação das ZCL dos setores das estações climáticas em Bogotá. Em alguns casos, um sistema de subclassificação foi usado para descrever melhor as características que ocorrem em alguns setores, especialmente relacionadas a edifícios com diferentes tipos de altura.

Pode-se observar que as estações NGU, AUD e AD foram classificadas na ZCL9 (Escassamente Construído), para a qual a principal característica é de serem áreas com grandes superfícies *%Perm* (> 40%). A estação JB foi classificada como ZCL6 (Espaço aberto com Edifícios Baixos), porque tem muitos edifícios baixos (*Alt. Edif* < 10m = 94% de *%Edif* total) e espaços abertos como parques (*%Perm* = 50%). Em adição a isto, também é encontrado um parque urbano que ocupa grande parte da área (45,18%), para representar essa característica do setor, JB foi sub-classificado como LCZB. CSP, IK e BMP têm edifícios com variedade de alturas, criando dificuldades no momento da classificação. No entanto, foram classificados como LCZ5 (Espaço aberto com Edifícios Médios), porque as suas alturas médias ponderadas estão dentro da faixa *Alt. Edif* = 10-21m (10, 14, 17m) e porque a proporção de edifícios com altura média é significativa (*%Edif* = 44, 13 e 62%) (Figura 12-13). Porém, estas estações

também foram sub-classificadas; CSP foi sub-classificada como LCZ8 (Grandes Edifícios Baixos, Galpões) devido à presença de edifícios baixos de grandes áreas ($Alt. Edif < 10m = 69\%$ do total de $\%Edif$) (Figura 12-13), edifícios relacionados a áreas de serviço e esportes. IK e BMP foram sub-classificados como LCZ4 (Espaço aberto com Edifícios Altos) pela quantidade considerável de edifícios altos que estão nestes sectores ($Alt. Edif > 21m = 27, 19\%$ do total de $\%Edif$) (Figura 12-13).

Todas as estações mencionadas até agora foram classificadas nas ZCL abertas, porque o seu $\%Edif$ não excede 26%. Finalmente as estações UC e HD foram classificadas na LCZ3 (Edifícios Baixos Compactos), devido à sua superfície densamente construída ($\%Edif > 45\%$) com edifícios baixos ($Alt. Edif < 10m = 92$ e 87% do $\%Edif$ total), sendo UC sub-classificada como LCZ5, para destacar a presença de edifícios de altura média ($Alt. Edif = 10-21 m = 7\%$ do $\%Edif$ Total). Muito embora os edifícios aí localizados não ocupem uma grande superfície, são edifícios institucionais (Universidades) que não podem ser ignorados. Em alguns casos, mais subclassificações poderiam ser adicionadas, como no caso de IK, onde os edifícios baixos também têm presença significativa ($Alt. Edif < 10m$) (64% do total de $\%Edif$) (Figura 12-13). No entanto, a prioridade foi dada para os outros tipos de alturas, considerando que podem gerar mais impacto em ΔT_{u-r} . Além disso, o excesso de complexidade na classificação deve ser evitado, uma vez que dificulta a comparação entre ZCL e entre cidades (Stewart e Oke, 2012).

6.3.2 Coletas de dados diários y horários da temperatura do ar

Para entender o comportamento térmico das diferentes estações e determinar se as estações classificadas entre a mesma ZCL possuem comportamentos térmicos semelhantes e para identificar se as ZCL são diferentes termicamente umas das outras, dados diários da Temperatura Máxima (T_{max}) e Mínima (T_{min}) são coletados das estações (Rede meteorológica do IDEAM ver parte 6.2.1) por um período de 365 dias (ano de 2009). A Temperatura Média diária (T_{med}) também foi obtida por meio das médias diárias de T_{max} e T_{min} (equação 6). Da mesma forma, também foram obtidos dados horários diários das estações, embora estes só ofereçam dados para as horas das 7:00, 13:00 e 19:00 ($T_{7:00}$, $T_{13:00}$ e $T_{19:00}$). Com esses dados, pode se explorar o comportamento térmico de diferentes momentos do dia (nascer do sol, meio dia e pôr do sol) (Tabela 9).

$$T_{med} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (Eq.6)$$

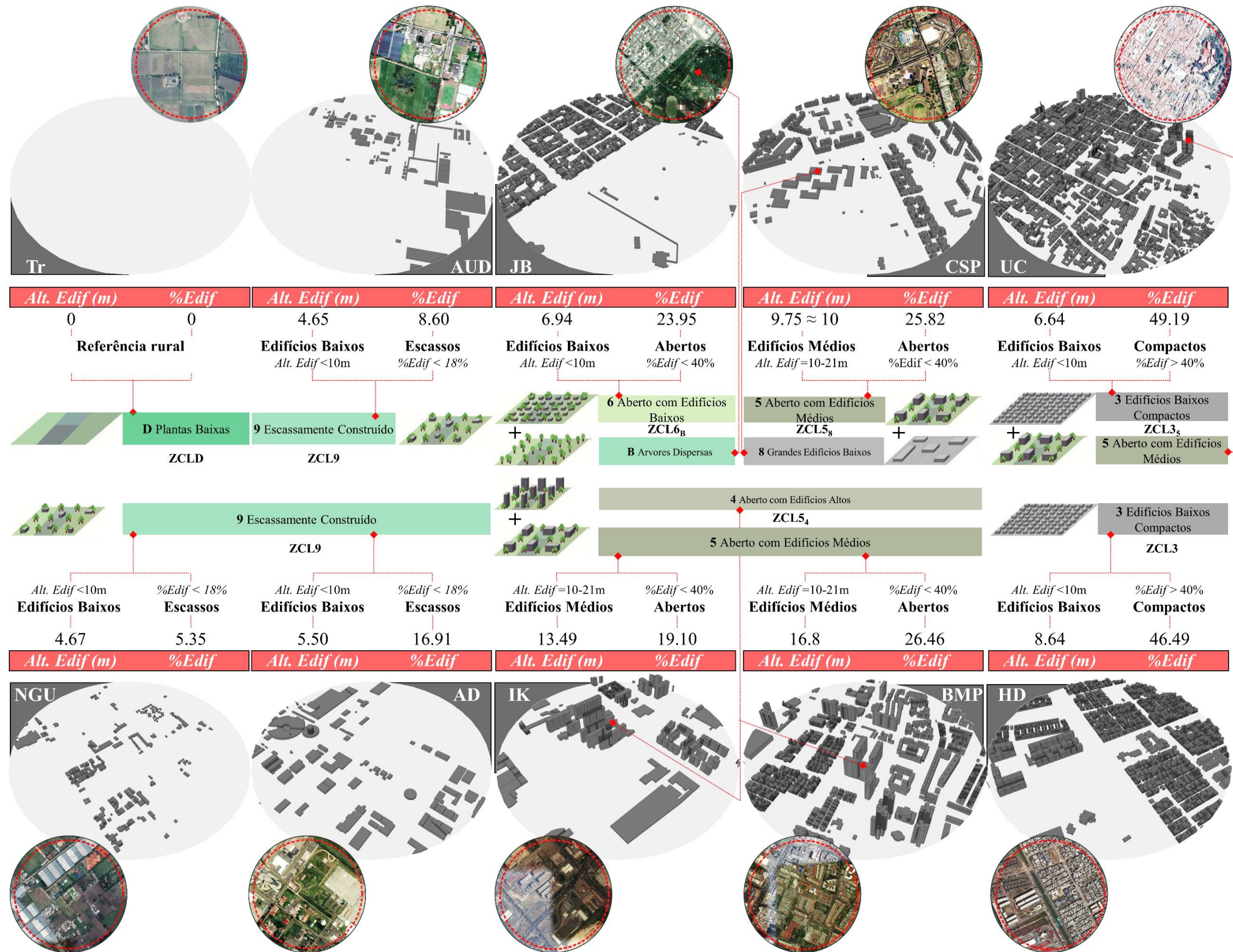


Figura 17. Classificação das estações meteorológicas e suas áreas de influência dentro das Zonas Climáticas Locais

Tabela 9. Valores médios da temperatura diária do ar para as Temperaturas máxima (T_{max}), mínima (T_{min}) e média (T_{med}) e para a Temperatura horária do ar para as 7:00, 13:00 e 19:00 ($T_{7:00}$, $T_{13:00}$ e $T_{19:00}$), obtidas das 9 estações meteorológicas por um período de 365 dias.

Temperatura do ar (valores médios 1 ano)		Estacoes meteorológicas e sua classificação nas ZCL									
		Tr ⁺	NGU	AUD	AD	JB	CSP	IK	BMP	UC	HD
		ZCLD	ZCL9	ZCL6 _B	ZCL5 ₈	ZCL5 ₄	ZCL3 ₅	ZCL3			
T_{max}	Media	20.30	21.04	20.18	19.72	20.11	21.59	20.59	20.15	20.09	21.63
	Amplitude	7.80	9.60	8.40	7.00	6.80	6.20	9.00	6.80	9.10	7.80
	Max	24.20	25.80	24.00	23.10	23.40	24.20	25.20	24.00	24.30	25.20
	Min	16.40	16.20	15.60	16.10	16.60	18.00	16.20	17.20	15.20	17.40
T_{min}	Media	6.87	7.71	8.23	8.65	9.04	9.70	10.80	10.26	10.20	11.93
	Amplitude	12.80	9.60	10.20	10.40	7.80	4.80	7.80	6.80	6.70	7.00
	Max	11.60	11.40	12.00	12.60	12.60	11.60	14.20	12.80	12.90	15.20
	Min	-1.20	1.80	1.80	2.20	4.80	6.80	6.40	6.00	6.20	8.20
T_{med}	Media	13.57	14.38	14.19	14.18	14.58	15.72	15.75	15.32	15.15	16.69
	Amplitude	5.90	5.80	6.10	5.85	5.40	3.80	5.60	4.00	5.70	5.70
	Max	16.00	17.40	16.80	17.15	17.20	17.50	18.70	17.10	17.80	19.10
	Min	10.10	11.60	10.70	11.30	11.80	13.70	13.10	13.10	12.10	13.40
$T_{7:00}$	Media	9.73	10.76	10.23	10.69	12.94	12.91	13.09	11.64	11.96	13.16
	Amplitude	10.10	8.20	9.60	8.0	6.20	4.0	7.40	7.20	6.50	8.30
	Max	13.10	13.60	13.80	13.80	16.00	15.00	16.80	15.00	14.90	17.30
	Min	3.00	5.40	4.20	5.80	9.80	11.00	9.40	7.80	8.40	9.00
$T_{13:00}$	Media	18.79	19.02	18.38	18.04	18.47	20.39	18.07	18.42	18.03	19.24
	Amplitude	11.1	10.4	10.8	9.9	8.8	6.4	9.4	11.8	11.4	10.9
	Max	24.10	24.60	22.40	22.20	21.80	23.40	22.40	22.80	23.40	25.00
	Min	13.00	14.20	11.60	12.30	13.00	17.00	13.00	11.00	12.00	14.10
$T_{19:00}$	Media	12.85	13.15	13.48	13.70	15.26	-	15.34	14.32	14.45	14.76
	Amplitude	5.40	4.60	6.40	5.60	7.80	-	9.40	6.40	5.50	6.30
	Max	15.00	14.80	16.60	16.20	18.20	-	19.80	18.40	16.90	18.40
	Min	9.60	10.20	10.20	10.60	10.40	-	10.40	12.00	11.40	12.10

* Tr é a estação TIBAITATA (ver figura 8) e é a estação de referência rural

6.3.3 Cálculo dos Índices Baseados na Temperatura

Outra maneira de entender a influência dos diferentes setores e suas ZCL sobre a temperatura do ar é por meio dos Índices Baseados na Temperatura. Estes índices mostram o número de dias (frequência) num período estabelecido (proporção) em que ocorrem temperaturas mais altas ou mais baixas do que um valor limite (Skarbit *et al.*, 2017). Estes indicadores são determinados por meio de dados diários da temperatura do ar (Matzarakis e Thomsen, 2009), expressos em Temperatura Máxima (T_{max}), Mínima (T_{min}) e Média (T_{med}). Para este estudo, são utilizados os índices utilizados por Skarbit *et al.* (2017). Os dois primeiros índices são “Dias de Aquecimento” (*DDA*) e “Dias de Resfriamento” (*DDR*), estes índices são baseados em T_{med} e ajudam a compreender a duração (proporção) da temperatura do ar, quando os seus dados sugerem se um setor necessita de aquecimento ($T_{med} < 14^{\circ}\text{C}$) ou resfriamento ($T_{med} > 18^{\circ}\text{C}$). Através de dados T_{max} e T_{min} também pode-se definir alguns índices. No caso do T_{max} podem-se encontrar dias que parecem quentes durante o dia (Fenner *et al.*, 2017; Yoo *et al.*, 2018); a frequência e a proporção destes dias podem ser obtidas com o índice “Dias Quentes” (*Dq*) ($T_{max} > 24^{\circ}\text{C}$). Igualmente, valores baixos de T_{max} ($< 20^{\circ}\text{C}$) podem expressar dias que tendem a ser frescos, ou em alguns casos, dias frios. Estes últimos podem ser expressos com o índice de “Dias Frescos” (*Df*). Com valores baixos de T_{min} ($< 10^{\circ}\text{C}$), podem ser identificados noites que mostraram temperaturas baixas (Fenner *et al.*, 2017; Yoo *et al.*, 2018). Portanto, o índice que mostra a proporção e frequência destes dias é “Noites Frias” (*NFr*). Considerando que os valores de T_{min} são observados durante a noite, altos valores de T_{min} ($> 12^{\circ}\text{C}$) podem sugerir noites temperadas (amenas) ou quentes, sendo descrito pelo índice “Noites Temperadas” (*Nt*).

Os índices acima mencionados mostram as ocorrências de momentos quentes ou frios num setor urbano (*Dq*, *Df*, *NFr*, *Nt*). Eles também indicam a necessidade de adição ou redução de temperatura no ambiente (*DDA* e *DDR*) e até mesmo eles podem ser usados para calcular a demanda de energia de edifícios num setor urbano (Matzarakis e Thomsen, 2009; Skarbit *et al.*, 2017).

Com base nos índices baseados na temperatura, a ideia de usar a frequência dos dias com um determinado valor de temperatura pode ser aplicada a faixas de temperatura do ar baseadas na sensação térmica. Para este estudo, as Categorias de Sensação Térmica propostas pelo IDEAM para (González, 1998) para a cidade de Bogotá são usadas (Muito Frio $< 20^{\circ}\text{C}$, Frio = $10-14^{\circ}\text{C}$, Agradável = $14-18^{\circ}\text{C}$, Cálido = $18-24^{\circ}\text{C}$ e Quente $> 24^{\circ}\text{C}$). As frequências das

faixas de temperatura para essas categorias são baseadas nos dados de T_{med} . A Tabela 10 mostra as frequências e proporções para cada um dos índices baseados na temperatura e as categorias de sensação térmica. É importante esclarecer que os dados foram obtidos por 1 ano (365 dias), no entanto, muitas estações apresentaram dias que não registraram medições da temperatura do ar. Portanto, nem todas as estações têm um total de 365 observações. A fim de fazer uma comparação entre as diferentes proporções, estas foram calculadas de acordo com o número total de dias observados e não o número total de dias do ano, como foi feito também em vários estudos que dependem de dados das estações meteorológicas (Emmanuel e Krüger, 2012). As diferenças desses índices e categorias entre estações e suas ZCL ajudarão a entender melhor a influência da forma urbana na temperatura do ar.

Tabela 10. Frequência, número de dias e percentagens dos índices baseados na temperatura do ar (T_{ma} , T_{min} e T_{med}) e as categorias de sensação térmica (T_{med}) para as estações meteorológicas e suas ZCL nas quais estão classificadas.

Temperatura base Índice/Categoria	Estacoes meteorológicas e sua classificação nas ZCL										
	Tr ⁺	NGU	AUD	AD	JB	CSP	IK	BMP	UC	HD	
	ZCLD	ZCL9	ZCL6B	ZCL58	ZCL54	ZCL35	ZCL3				
T_{med}	**	335	345	308	353	323	45	178	171	359	117
Dias de Aquecimento ($DDA < 14^{\circ}C$)	#	208	120	129	151	105	2	6	12	38	0
	%	62.09	34.78	41.88	42.78	32.51	4.44	3.37	7.02	10.58	0.00
Dias de Resfriamento ($DDR > 18^{\circ}C$)	#	0	0	0	0	0	0	4	0	0	12
	%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.25	0.00	0.00	10.26
T_{max}	**	338	347	338	364	336	55	195	265	360	152
Dias Quentes ($Dq > 24^{\circ}C$)	#	3	24	5	2	1	9	16	5	16	25
	%	0.89	6.92	1.48	0.55	0.30	16.36	8.21	1.89	4.44	16.45
Dias Frescos ($Df < 20^{\circ}C$)	#	150	102	161	215	154	7	61	139	180	23
	%	44.38	29.39	47.63	59.07	45.83	12.73	31.28	52.45	50.00	15.13
T_{min}	**	362	347	327	354	334	53	261	217	361	155
Noites Frias ($NFr < 10^{\circ}C$)	#	329	330	248	260	238	33	83	90	152	15
	%	90.88	95.10	75.84	73.45	71.26	62.26	31.80	41.47	42.11	9.68
Noites Temperadas ($Nt > 12^{\circ}C$)	#	0	0	0	4	7	0	52	11	19	83
	%	0.00	0.00	0.00	1.13	2.10	0.00	19.92	5.07	5.26	53.55
T_{med}	**	335	345	308	353	323	45	178	171	359	117
Muito Frio $< 20^{\circ}C$	#	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Frio = $10-14^{\circ}C$	#	208	120	129	151	105	2	6	12	38	0
	%	62.09	34.78	41.88	42.78	32.51	4.44	3.37	7.02	10.58	0.00
Agradável = $14-18^{\circ}C$	#	127	225	179	202	218	43	168	159	321	105
	%	37.91	65.22	58.12	57.22	67.49	95.56	94.38	92.98	89.49	89.74
Cálido = $18-24^{\circ}C$	#	0	0	0	0	0	0	4	0	0	12
	%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.25	0.00	0.00	10.26
Quente $> 24^{\circ}C$	#	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

+ Tr é a estação TIBAITATA (ver figura 8) e é a estação de referência rural

** Número total de dias que registraram valores nas suas medições

Número de dias caracterizados no índice/categoria

% Porcentagem do índice/categoria

Tabela 11. Frequência, número de dias e percentagens dos índices baseados na temperatura do ar e as categorias de sensação térmica ($T_{7:00}$, $T_{13:00}$ e $T_{19:00}$) para as estações meteorológicas e suas ZCL nos quais eles estão classificados.

Temperatura base Índice/Categoria	Estacoes meteorológicas e sua classificação nas ZCL										
	Tr ⁺	NGU	AUD	AD	JB	CSP	IK	BMP	UC	HD	
	ZCLD	ZCL9	ZCL6B	ZCL58	ZCL54	ZCL35	ZCL3				
$T_{7:00}$	##	365	348	343	361	306	43	291	354	359	163
Dias de Aquecimento (DDA <14°C)	#	365	348	343	361	256	37	229	347	353	107
	%	100.00	100.00	100.00	100.00	83.66	86.05	78.69	98.02	98.33	65.64
Dias de Resfriamento (DDR > 18°C)	#	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$T_{13:00}$	##	365	347	347	364	331	35	300	360	362	145
Dias de Aquecimento (DDA <14°C)	#	8	0	4	11	4	0	9	4	8	0
	%	2.19	0.00	1.15	3.02	1.21	0.00	3.00	1.11	2.21	0.00
Dias de Resfriamento (DDR > 18°C)	#	227	237	198	196	209	30	157	209	175	110
	%	62.19	68.30	57.06	53.85	63.14	85.71	52.33	58.06	48.34	75.86
$T_{19:00}$	##	365	296	342	362	266	-	283	354	361	150
Dias de Aquecimento (DDA <14°C)	#	341	246	254	226	61	-	52	149	114	39
	%	93.42	83.11	74.27	62.43	22.93	-	18.37	42.09	31.58	26.00
Dias de Resfriamento (DDR > 18°C)	#	0	0	0	0	1	-	11	2	0	1
	%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38	-	3.89	0.56	0.00	0.67
$T_{7:00}$	##	365	348	343	361	306	43	291	354	359	163
Muito Frio <20°C	#	166	98	134	115	3	0	4	45	27	7
	%	45.48	28.16	39.07	31.86	0.98	0.00	1.37	12.71	7.52	4.29
Frio = 10-14°C	#	199	250	209	246	253	37	225	302	326	100
	%	54.52	71.84	60.93	68.14	82.68	86.05	77.32	85.31	90.81	61.35
Agradável = 14-18°C	#	0	0	0	0	50	6	62	7	6	56
	%	0.00	0.00	0.00	0.00	16.34	13.95	21.31	1.98	1.67	34.36
Cálido = 18-24°C	#	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Quente > 24°C	#	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$T_{13:00}$	##	365	347	347	364	331	35	300	360	362	145
Muito Frio <20°C	#	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Frio = 10-14°C	#	8	0	4	11	4	0	9	4	8	0
	%	2.19	0.00	1.15	3.02	1.21	0.00	3.00	1.11	2.21	0.00
Agradável = 14-18°C	#	130	110	145	157	118	5	134	147	179	35
	%	35.62	31.70	41.79	43.13	35.65	14.29	44.67	40.83	49.45	24.14
Cálido = 18-24°C	#	226	233	198	196	209	30	157	209	175	109
	%	61.92	67.15	57.06	53.85	63.14	85.71	52.33	58.06	48.34	75.17
Quente > 24°C	#	1	4	0	0	0	0	0	0	0	1
	%	0.27	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.69
$T_{19:00}$	##	365	296	342	362	266	-	283	354	361	150
Muito Frio <20°C	#	1	0	0	0	0	-	0	0	0	0
	%	0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	-	0.00	0.00	0.00	0.00
Frio = 10-14°C	#	340	246	254	226	61	-	52	149	114	39
	%	93.15	83.11	74.27	62.43	22.93	-	18.37	42.09	31.58	26.00
Agradável = 14-18°C	#	24	50	88	136	204	-	220	203	247	110
	%	6.58	16.89	25.73	37.57	76.69	-	77.74	57.34	68.42	73.33
Cálido = 18-24°C	#	0	0	0	0	1	-	11	2	0	1
	%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38	-	3.89	0.56	0.00	0.57
Quente > 24°C	#	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0
	%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	0.00	0.00	0.00	0.00

+Tr é a estação TIBAITATA (ver figura 8) e é a estação de referência rural
Número total de dias que registraram valores nas suas medições # Número de dias caracterizados no índice/categoria
% Porcentagem do índice/categoria

Tabela 12. Intensidade da Ilha de Calor Urbana de acordo com as ZCL durante um período de 1 ano de acordo com os valores médios (tabela 9) das observações diárias da temperatura do ar (T_{ma} , T_{min} e T_{med}) e as observações horárias ($T_{7:00}$, $T_{13:00}$ e $T_{19:00}$) para as estações meteorológicas e suas ZCL nos quais são classificadas.

Estacoes meteorológicas e sua classificação nas ZCL										
	Tr ⁺	NGU	AUD	AD	JB	CSP	IK	BMP	UC	HD
	ZCLD		ZCL9		ZCL6 _B	ZCL5 ₈		ZCL5 ₄	ZCL3 ₅	ZCL3
	$\Delta T_{ZCLX-ZCLD}$									
T (°C)										
T_{max}	20.30	0.71	-0.12	-0.58	-0.18	1.29	0.30	-0.15	-0.21	1.33
T_{min}	6.87	0.85	1.36	1.78	2.17	2.83	3.93	3.39	3.33	5.06
T_{med}	13.57	0.81	0.63	0.62	1.02	2.15	2.18	1.76	1.58	3.12
$T_{7:00}$	9.73	1.03	0.50	0.96	3.22	3.18	3.36	1.91	2.23	3.43
$T_{13:00}$	18.79	0.23	-0.41	-0.74	-0.31	1.61	-0.72	-0.37	-0.75	0.45
$T_{19:00}$	12.85	0.30	0.63	0.85	2.41	-	2.49	1.47	1.60	1.91

⁺ Tr é a estação TIBAITATA (ver figura 8) e é a estação de referência rural

Para dados de temperatura horária ($T_{7:00}$, $T_{13:00}$ e $T_{19:00}$), não foram calculados todos os índices baseados na temperatura, uma vez que são calculados a partir de observações diárias de temperatura (Matzarakis e Thomsen, 2009). Os dados de temperatura de horários específicos, como são apresentados neste estudo, não apresentam valores máximos ou mínimos que representam um dia. Entretanto, DDA e DDR são calculados para esses dados, pois podem mostrar em que momento um setor necessita de refrigeração ou aquecimento. Da mesma forma, as categorias de sensação térmica também foram calculadas para os dados horários. As frequências e proporções dos índices baseados na temperatura e categorias de sensação térmica para os dados da temperatura do ar horária são mostradas na Tabela 11.

6.3.4 Diferenças da Temperatura do ar Urbana – Rural de acordo com as ZCL

Em muitos estudos, a estação classificada como ZCLD é usada como a estação de referência rural para calcular a Intensidade da Ilha de Calor Urbana (ΔT_{u-r}) (Leconte *et al.*, 2015; Skarbit *et al.*, 2017; Stewart, Oke e Krayenhoff, 2014). Neste estudo, o mesmo é feito para

calcular ΔT_{u-r} das estações de acordo com as ZCL ($\Delta T_{ZCLX-ZCLD}$) (equação 2), de acordo com os valores diários de temperatura expressos em T_{ma} , T_{min} e T_{med} (Tabela 9). Da mesma forma, $\Delta T_{ZCLX-ZCLD}$ também é calculada para os valores de temperatura horária expressos em $T_{7:00}$, $T_{13:00}$ e $T_{19:00}$ (Tabela 9), com o objetivo de identificar se os valores $\Delta T_{ZCLX-ZCLD}$ são similares entre as estações da mesma ZCL e se há diferenças entre as ZCL. A intensidade de ICU de acordo com as ZCL ($\Delta T_{ZCLX-ZCLD}$) para os diferentes setores, é mostrada na tabela 12.

7

Resultados e Discussões

Este capítulo descreve, demonstra e discute, principalmente, os resultados obtidos ao relacionar, comparar e analisar os dados das diferentes variáveis e parâmetros descritos no capítulo anterior. A primeira seção mostra a relação entre a População e Densidade da População com a Intensidade da Ilha de Calor Urbana. Com base nesses resultados, um modelo de predição é proposto. A segunda seção aplica e compara dois modelos baseados na População propostos por Oke (1973, 1976) para fins de discussão. A terceira seção explora o nível de influência da Densidade da População sobre os diferentes parâmetros da Forma Urbana simultaneamente com a influência desses parâmetros na Intensidade da Ilha de Calor Urbana. A quarta e última seção concentra-se em analisar as variações e diferenças de temperatura do ar entre as estações e as ZCL em que foram classificadas.

7.1 Prevendo a Intensidade da Ilha de Calor Urbana baseada na Densidade da População

Os resultados mostrados e analisados nesta seção são apresentados em cinco partes, a primeira analisa os valores da Intensidade da Ilha de Calor Urbana para as diferentes estações. Depois as correlações entre esses valores e os valores da População e Densidade da População são analisados na segunda parte. As alterações nestas correlações são mostradas e analisadas na quarta parte. Até aqui, os resultados são derivados dos dados mostrados na seção 6.2.1. Com base nos resultados das três primeiras partes, um modelo de predição baseado na Densidade da População é proposto e aplicado na espacialização da Ilha de Calor Urbana da cidade de Bogotá. Isto é mostrado nas partes quarta e quinta, desta seção, respectivamente.

7.1.1 Intensidade da Ilha de Calor Urbana

Com base nos dados meteorológicos da Tabela 8 e observando a Intensidade da Ilha de Calor Urbana (ΔT_{u-r}) de cada estação num período de 12 meses, há apenas uma pequena variabilidade de valores de ΔT_{u-r} (menos de 2°C) entre os diferentes meses para cada estação, com exceção da estação IK, que apresenta uma diferença de mais de 2°C entre abril e junho (Figura 18). Isso pode ser explicado pela estação chuvosa que ocorre em abril, aumentando o nível da água nas áreas úmidas (pântanos) que podem ser encontradas no setor onde as estações estão localizadas, reduzindo a temperatura naquele mês. A estabilidade entre esses valores pode ser explicada pela localização de Bogotá, que é uma cidade sob um clima tropical de alta-altitude (Roth, 2007), devido à sua proximidade com o Equador e sua altitude (2.650 m). Ambas características causam temperaturas uniformes distribuídas ao longo do ano, como mostra a Figura 18, em vez das altas temperaturas encontradas em outras cidades tropicais. A insignificante variabilidade sazonal de ΔT_{u-r} também foi observada por Roth (2007), que sugeriu que ela é causada pela menor diferença entre as estações seca e chuvosa em Bogotá. Da mesma forma, Jauregui (1986) também identifica a variação sazonal insignificante no clima de algumas cidades próximas ao Equador devido à estabilidade de sua massa de ar. Da mesma maneira, é importante mencionar que existe uma diferença significativa de temperatura entre as estações, mostrando a peculiaridade morfológica e a influência na temperatura do ar de cada setor onde as estações estão localizadas (Figura 18).

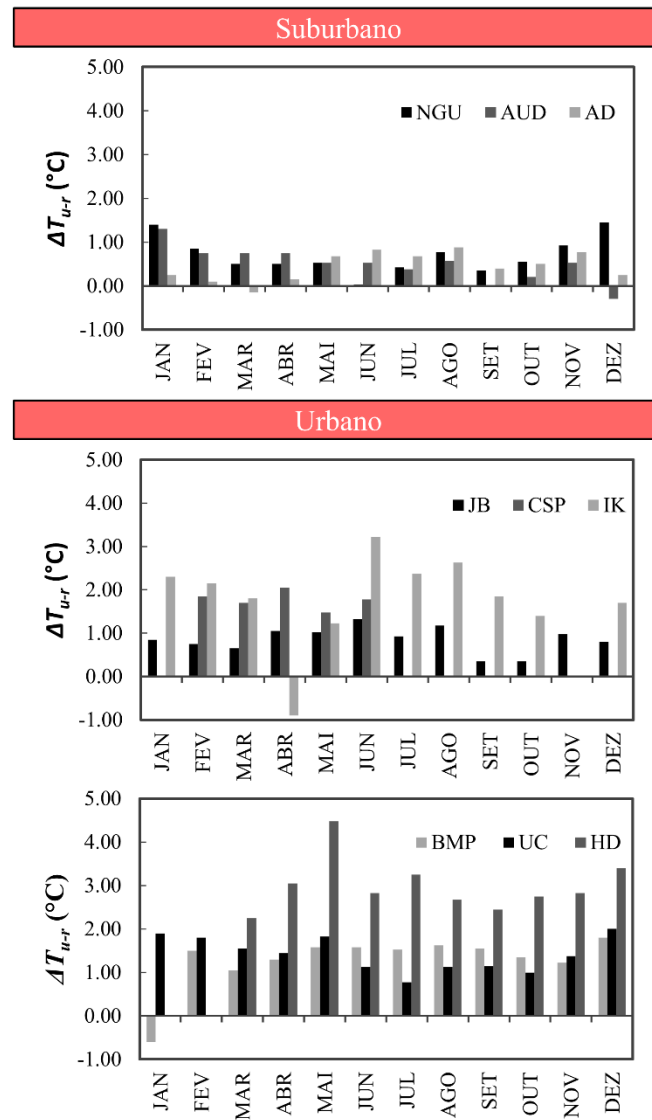


Figura 18. Variação sazonal da intensidade da Ilha de Calor Urbana (ΔT_{u-r}) durante um período de 12 meses para cada estação meteorológica e diferenças de ΔT_{u-r} entre estações suburbanas e urbanas.

Em relação à variabilidade térmica sazonal encontrada em muitas cidades, Santamouris (2015) sugeriu que a média de ΔT_{u-r} não deveria ser usada para demonstrar o impacto da população na intensidade da ICU, devido ao risco de esconder e enfraquecer as diferenças da temperatura ocorridas nos períodos específicos da estação seca e a influência de diferentes condições climáticas nos dados. No entanto, para este estudo, devido à alta estabilidade das condições climáticas e baixa variabilidade sazonal, como discutido acima, há uma grande redução no risco de atenuar a ΔT_{u-r} sazonal. Portanto, no caso específico deste estudo, usar os dados anuais médios de ΔT_{u-r} parece ser um procedimento válido.

Além disso, pode-se observar na Tabela 8 que, quando a população é superior a 2500 habitantes, a Ilha de Calor Urbana (ICU) já pode estar desenvolvida, considerando que há formação de ICU quando $\Delta T_{u-r} > 1^\circ\text{C}$ (Oke, 1973). Uma conclusão similar pode ser tirada da densidade populacional, para a qual uma quantidade de 14.500 habitantes/km² já desenvolve um $\Delta T_{u-r} > 1^\circ\text{C}$. É importante destacar que o ICU ocorre em estações urbanas, mas não em estações suburbanas.

7.1.2 Correlações entre ΔT_{u-r} – População e ΔT_{u-r} – Densidade da População

A Figura 19-a mostra a relação entre ΔT_{u-r} e a População ($\log p$), para a qual existe um coeficiente de determinação aceitável, porém não tão alto quanto em outros estudos (Oke, 1973; Park, 1986; Torok *et al.*, 2001; Yasushi e Emi, 2005). O coeficiente de determinação (R^2) é 0.64, mostrando que há uma tendência para a maioria das estações, no entanto, quando os dados da estação HD são eliminados da correlação, o coeficiente R^2 aumenta para 0.82. Portanto, a alta População e o alto ΔT_{u-r} apresentados neste setor específico não seguem a tendência das demais estações. Da mesma forma, a estação BMP tem uma População alta, no entanto, ΔT_{u-r} não é tão alto quanto sugerido pelas tendências das outras estações.

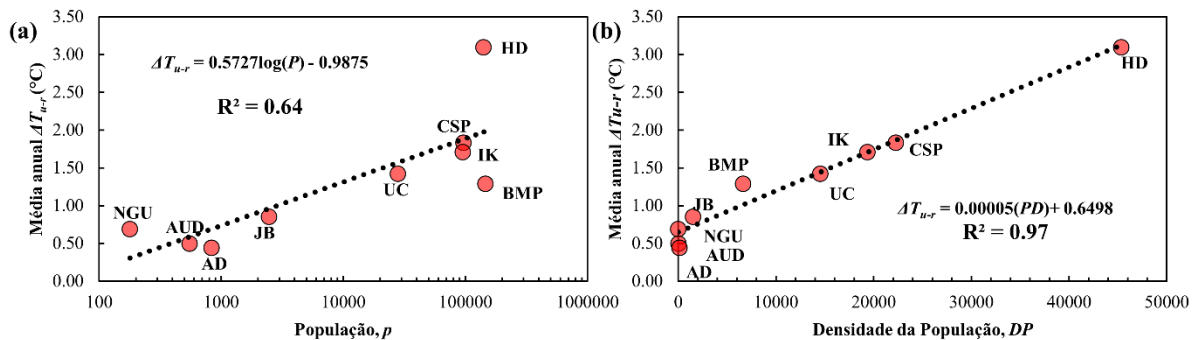


Figura 19. Relação entre a média anual de ΔT_{u-r} e $\log p$ (a) e relação entre a média de ΔT_{u-r} e DP (b) para estações meteorológicas na cidade de Bogotá.

No caso de serem eliminados os dados desses dois outliers, o R^2 aumentaria para um valor de 0.90. Estas duas estações mostram diferenças morfológicas que surgem dentro da mesma cidade. A primeira, a estação HD, situa-se em um setor de desenvolvimento informal, o que significa que está em uma área que não tinha planejamento prévio e foi ocupada espontaneamente por pessoas com baixo poder aquisitivo. A segunda, a estação BMP, representa um setor totalmente oposto ao anterior, apresentando também uma população alta, mas em uma área de desenvolvimento planejada e caracterizada, principalmente, pela

disponibilidade de um grande número de parques e espaços verdes. Estes dados não devem ser negligenciados, pois representam realidades morfológicas da cidade e, apesar de não seguirem a tendência dos outros setores, afetam seu ΔT_{u-r} .

Ao contrário da relação entre ΔT_{u-r} e $\log p$, a relação entre ΔT_{u-r} e a Densidade da População (DP) se encaixa melhor numa relação linear simples (Figura 19-b). Neste caso, o valor de R^2 é muito alto (0.97) devido ao alto PD e ΔT_{u-r} de HD. No entanto, se os dados desta estação fossem omitidos, o R^2 seria ligeiramente inferior, diminuindo para 0.92. Embora exista uma grande diferença entre os dados da estação CSP ($\Delta T_{u-r} = 1.84^\circ\text{C}$, $DP = 22256.49$) e a estação HD ($\Delta T_{u-r} = 3.10^\circ\text{C}$, $DP = 45329.68$), é interessante ver como a estação anterior faz parte da tendência, diferente do que aconteceu com a correlação anterior (ΔT_{u-r} e $\log P$), onde a estação HD não segue essa tendência.

Essa observação sugere que a alta DP pode estar relacionada a áreas de alto uso do solo, que estão relacionadas à forma urbana dos cânions urbanos, reduzindo a perda de radiação de ondas curtas. Da mesma forma, aumentar as áreas impermeáveis cobertas por materiais de construção aumentará a admitância térmica, gerando um aumento no armazenamento de calor sensível (Oke, 1982). Todos esses fatores contribuem para o aumento da intensidade de ΔT_{u-r} , implicando que a DP pode ser um melhor indicador de diferentes morfologias apresentadas dentro da mesma cidade do que $\log p$, pois esta última apresentou dois pontos de afastamento da curva de tendência.

7.1.3 Diferenças nas relações entre as estações sub-urbanas e urbanas

A Figura 20 mostra as várias relações entre $\Delta T_{u-r} - \log p$ e $\Delta T_{u-r} - DP$, respectivamente, separando os dados das estações suburbanas e urbanas para encontrar algumas diferenças. É notável que a relação entre ΔT_{u-r} e $\log p$ nas estações suburbanas seja negativa (Figura 20-a), ou seja, enquanto a População aumenta, a temperatura ΔT_{u-r} diminui, com um R^2 alto (0.99). O mesmo se aplica à relação $\Delta T_{u-r} - \log DP$ (Figura 20-c), que é melhor descrita como uma relação logarítmica com um R^2 de 0.89. Uma possível explicação para essas relações negativas pode ser a rugosidade e o fluxo do vento. No caso da estação AD, esta localiza-se na área onde o aeroporto EL DORADO está implantado na cidade, existindo algumas áreas residenciais (possui o mais alto p e DP entre as estações suburbanas). O aeroporto é um grande espaço aberto, que permite a penetração do vento devido à sua localização dentro dos limites da cidade, desenvolvendo um ΔT_{u-r} inferior às outras duas estações localizadas em áreas usadas

principalmente para instalações de faculdades e universidades. Vários estudos mostraram o papel da velocidade e do fluxo do vento na redução da intensidade da ICU (Park, 1986; Santamouris, 2015). No entanto, é importante notar que as diferenças de ΔT_{u-r} são pequenas entre as estações suburbanas e é necessário ter estações de amostragem maiores para confirmar efetivamente essa relação negativa.

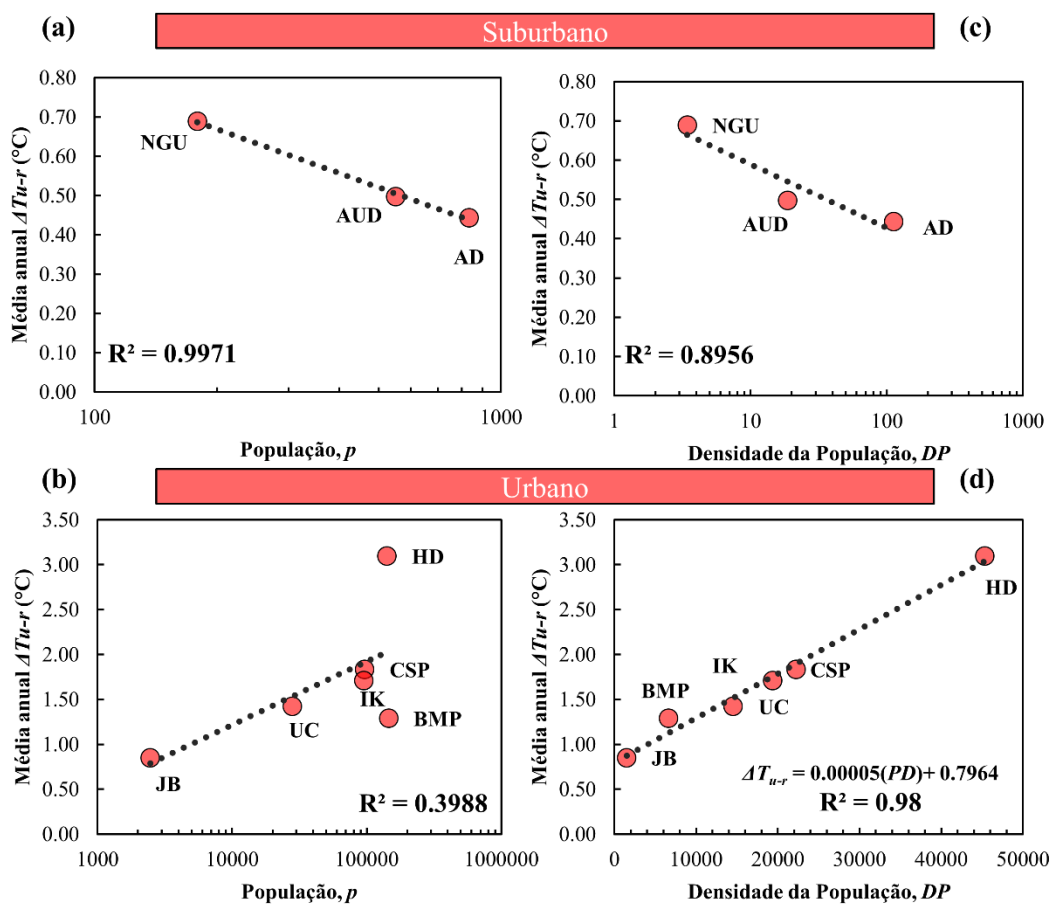


Figura 20. Distinção das relações entre a média anual de ΔT_{u-r} e $\log p$ e ΔT_{u-r} e DP em as estações suburbanas (a, c) e estações urbanas (b, d).

Quanto à relação $\Delta T_{u-r} - \log p$ para estações urbanas (Figura 20-b), permanece positiva, mas R^2 é muito menor (0.40), possivelmente devido aos dados das estações HD e BMP estarem longe da tendência, assim como explicado acima. Entretanto, a correlação $\Delta T_{u-r} - DP$ nas estações urbanas (Figura 20-d) (novamente uma correlação linear simples) é muito alta ($R^2 = 0.98$), sugerindo que os dados da estação suburbana provavelmente causam alguma distorção. Isto pode ser devido ao fato de que a temperatura do ar tende a diminuir rapidamente do centro da cidade para os limites (Bottyán *et al.*, 2005), que é onde essas estações estão localizadas.

7.1.4 Modelo de Predição da Intensidade da Ilha de Calor Urbana

Diversos estudos têm explorado a relação entre $\Delta T_{u-r} - \log P$, propondo vários modelos de regressão para a previsão da ICU em cidades da mesma região. Estes estudos foram, no entanto, utilizados para a população total de várias cidades numa região. No estudo ora em andamento, o modelo de previsão é aplicado a diferentes setores na mesma cidade, sendo que os valores de DP apresentam maior correlação entre os diferentes setores de Bogotá. A Tabela 13 lista os valores reais de ΔT_{u-r} (Tabela 8) e os valores previstos de ΔT_{u-r} obtidos por três diferentes equações. A Figura 21 mostra os dados medidos de $\Delta T_{u-r} - \log p$, juntamente com os dados do modelo de regressão de $\Delta T_{u-r} - \log P$ obtidos pela Equação 7.

$$\Delta T_{u-r} = 0.5727 \text{Log } p - 0.9875 \quad (\text{Eq. 7})$$

Os dados obtidos pela equação correspondem às tendências esperadas dos dados observados para $\Delta T_{u-r} - \log P$. Os dados das duas estações estão, no entanto, longe da curva das equações, que são: a estação HD com uma diferença de 1.14°C; e a estação BMP, embora numa menor escala, com uma diferença de -0.68°C. A equação geral tende a superestimar levemente os valores de ΔT_{u-r} para a maioria das estações, mostrando que p não reconhece setores com morfologias diferentes. Esse comportamento pode ocorrer com frequência em cidades como Bogotá, o que significa que p não representa corretamente o tamanho e a morfologia causados pelo desenvolvimento irregular apresentado em alguns setores da cidade. Portanto, nesse caso, p não é um bom indicador para entender o impacto da urbanização na intensidade da ilha de calor urbana (Yamashita *et al.*, 1986).

Tabela 13. Valores previstos de ΔT_{u-r} por três diferentes modelos de regressão (equações).

Estações	População (P)	Densidade da População (PD)	ΔT_{u-r} (°C)			
			Real	Previsto		
				Equação (7)	Equação (8)	Equação (9)
Suburbanas						
NGU	179	3.43	0.69	0.30	0.65	-
AUD	550	18.67	0.50	0.58	0.65	-
AD	835	112.23	0.44	0.69	0.66	-
Urbanas						
JB	2464	1520.99	0.85	0.95	0.73	0.87
BMP	145631	6643.77	1.29	1.97	0.98	1.13
UC	28056	14536.96	1.42	1.56	1.38	1.52
IK	95254	19348.70	1.71	1.86	1.62	1.76
CSP	96426	22256.49	1.84	1.87	1.76	1.91
HD	140794	45329.68	3.10	1.96	2.92	3.06

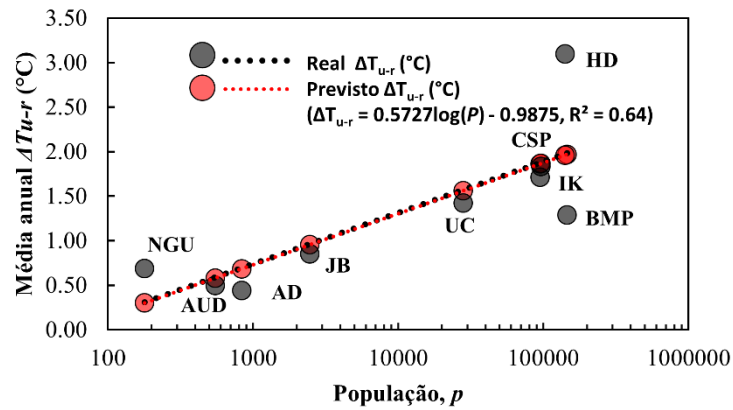


Figura 21. Comparação entre os valores preditos de ΔT_{u-r} dados pelos valores reais da Equação (7) e ΔT_{u-r} relacionados ao $\log P$.

No caso da Densidade da População, o modelo para $\Delta T_{u-r} - DP$ pode ser expresso pela Equação Linear 8.

$$\Delta T_{u-r} = 0.00005PD + 0.6498 \quad (Eq. 8)$$

Como pode ser visto na Figura 22-a, a comparação dos dados medidos $\Delta T_{u-r} - DP$ com os dados obtidos da Equação 8 (Tabela 13), mostra que os dados previstos de ΔT_{u-r} tendem a ser ligeiramente subestimados. No entanto, diferentemente do que acontecem com a Equação 7, as diferenças são inferiores a 0.20°C e a tendência são próximas aos dados de todas as estações. Os valores de ΔT_{u-r} variam do mínimo de 0°C a um máximo de 3.10°C , ao contrário de outros estudos em algumas cidades da América do Norte (Oke, 1973, 1976), para as quais ΔT_{u-r} pode atingir 8°C . Os valores de ΔT_{u-r} são explicados pelo clima da cidade e sua região, e pela metodologia usada para se obter os dados de temperatura. A ΔT_{u-r} costuma ser maior, quando a temperatura é medida por transectos que captam melhor a influência do cânion urbano do que as estações meteorológicas, como mostra Santamouris (2015). Embora exista uma pequena subestimação de ΔT_{u-r} no caso da Equação 8, isso pode ser muito menor, se apenas estações urbanas (Figura 22-b) forem usadas para relacionar os dados de $\Delta T_{u-r} - DP$.

A Figura 22-b compara os dados $\Delta T_{u-r} - DP$ medidos das estações urbanas com os dados obtidos pela Equação 9 (Tabela 13).

$$\Delta T_{u-r} = 0.00005DP + 0.7964 \quad (Eq. 9)$$

Nesse caso, as linhas de dados e tendências são muito semelhantes entre si. Ao usar apenas um parâmetro, este modelo de regressão simples poderia ser o mais apropriado para a previsão de temperatura de diferentes setores urbanos dentro da área urbana de Bogotá. Por outro lado, outro modelo para os setores suburbanos deve ser desenvolvido, embora não seja possível fazê-lo nesse caso, devido ao pequeno conjunto de amostragem disponível para esses setores (Figura 20-c). Assim, DP é um indicador que melhor reconhece as diferenças morfológicas e o desenvolvimento informal apresentado pela cidade em estudo e é também o melhor para demonstrar seu impacto na intensidade da ICU.

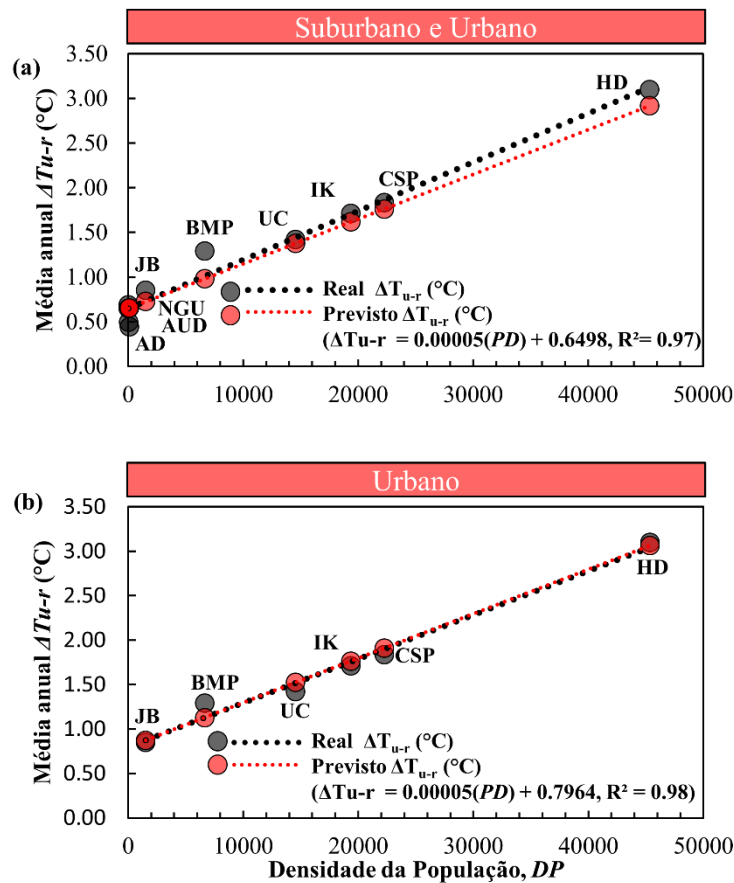


Figura 22. Comparação e distinção entre os valores preditos de ΔT_{u-r} dados pelos valores reais da Equação (8) e ΔT_{u-r} relacionados a DP em estações suburbanas e urbanas (a) e comparação entre os valores preditos de ΔT_{u-r} dados pela Equação (9) e ΔT_{u-r} relacionados a DP em só estações urbanas (b).

7.1.5 Visualização e distribuição da Intensidade da Ilha de Calor Urbana em Bogotá.

A equação 9 foi utilizada em outros pontos da cidade para prever ΔT_{u-r} em função de DP . A Tabela 14 apresenta o ΔT_{u-r} de todos os pontos, mostrando que os valores de ΔT_{u-r} urbano acima de 1°C já ocorrem quando a densidade populacional é maior que 5000 habitantes/ km^2 .

A distribuição dos novos pontos, juntamente com os pontos de modelagem originais, permite todo o mapeamento da área urbana, criando um mapa isotérmico de ΔT_{u-r} . Este mapa foi desenvolvido utilizando-se um sistema de informação geográfica (Qgis), no qual foi aplicado o método da distância inversa ponderada (IDW) (Figura 23). O IDW é um método básico de interpolação que estima os valores de um ponto, dependendo dos valores conhecidos de outros pontos, no qual os pontos mais próximos definem o valor final interpolado daquele ponto (Bartier e Keller, 1996).

A Figura 23 mostra dois mapas: o mapa (a) é baseado apenas na interpolação dos dados de ΔT_{u-r} obtidos pelas estações meteorológicas; e o mapa (b) mostra os dados das estações meteorológicas juntamente com os dados previstos pelo modelo de regressão (9). Pode-se observar que o modelo de regressão (9) ajuda a fornecer uma melhor compreensão das tendências das intensidades da ICU na cidade.

O mapa mostra áreas para as quais ΔT_{u-r} é especialmente alto. Essa análise mostra, portanto, que a Ilha do Calor Urbano de Bogotá ($\Delta T_{u-r} > 1^\circ\text{C}$) não está presente em toda a cidade. A ICU é formada por zonas concêntricas e a parte sul da cidade se destaca como o setor com os maiores valores de ΔT_{u-r} (Figura 23- a, b) e de DP (Figura 23-c). Este setor é o que apresenta maior concentração de habitantes, gerando um alto índice de urbanização. Da mesma forma, o mapa mostra outros setores da cidade onde ΔT_{u-r} é particularmente alto. Essa distribuição irregular da ICU também é destacada por Coseo e Larsen (2014), que indica que pode ser causada por áreas de vegetação no interior da cidade e até mesmo pelos diferentes padrões socioeconômicos da cidade, que têm diferentes impactos no meio ambiente que são refletidos na ICU, isto também pode explicar porque áreas no norte da cidade com altos valores de DP (Figura 23-c) não mostram grandes valores de ΔT_{u-r} em comparação com as áreas no sul da cidade.

Tabela 14. Listas dos valores preditos de ΔT_{u-r} pela Equação (9) em diferentes pontos de previsão dentro da cidade e suas UPZ relacionadas que determinaram os valores da Densidade da População (DP) para cada ponto de previsão

Ponto de Predição	UPZ relacionadas*			Densidade da População (DP)	Previsto ΔT_{u-r} ($^{\circ}C$)
1			102	11575.10	1.38
2	20	24	25	9300.67	1.26
3			64	744.46	0.83
4			2	136.89	0.80
5			76	8926.91	1.24
6			93	7980.93	1.20
7			104	853.81	0.84
8	107	109	111	9876.66	1.29
9			107	15578.08	1.58
10		97	98	13024.87	1.45
11		91	92	10363.75	1.31
12		14	16	9836.03	1.29
13		98	100	17141.36	1.65
14			108	1224.08	0.86
15		41	45	22265.54	1.91
16	38	40	41	22664.41	1.93
17		115	116	6466.81	1.12
18	104	106	109	9436.38	1.27
19			16	11221.75	1.36
20			85	30956.97	2.34
21			98	19826.24	1.79
22			78	8546.98	1.22
23		17	18	14232.99	1.51
24		16	97	8722.63	1.23
25			96	23134.64	1.95
26			58	17604.20	1.68
27		12	13	16561.55	1.62
28			1	562.01	0.82
29		115	117	3116.87	0.95
30			69	29303.66	2.26
31		51	52	14989.96	1.55
32		55	56	24994.58	2.05
33			67	27740.92	2.18
34		44	113	14887.39	1.54
35		44	47	25377.28	2.07
36			72	18182.98	1.71
37		73	74	24570.94	2.02
38			84	41581.87	2.88

*Número da UPZ (Figura 8)

Vale ressaltar que, embora a intensidade de ICU em Bogotá tenha sido estudada como um fenômeno da Camada de Cobertura Urbana, o mapa não ajuda a identificar pontos quentes, porque são áreas com temperatura do ar relativamente alta no cânion urbano (Coutts *et al.*, 2016). Para identificá-los, é necessário medir a temperatura do ar na escala do bloco urbano, e não na escala local (Bairro) como neste estudo. No entanto, o mapa é uma boa ferramenta para identificar a ICU e ajuda a priorizar áreas e setores, nos quais a cidade pode desenvolver esses pontos de acesso para analisá-los mais tarde.

7.2 Aplicação de outros modelos baseados na População na cidade de Bogotá

Esta seção discute em sua primeira parte a aplicação do modelo de predição de intensidade de ICU proposto por Oke (1973) baseado na população e em sua segunda parte, a aplicação de um modelo de predição baseado na população e na velocidade do vento regional, proposto por Oke (1976), de acordo com os dados da Tabela 8 da seção 6.2.1, para a cidade de Bogotá.

7.2.1 Modelo de previsão da América do Norte (Oke 1973) em Bogotá

Cidades diferentes podem ter algumas diferenças morfológicas e, da mesma forma, a morfologia dentro das próprias cidades, geralmente, pode variar. Este é o caso de Bogotá, onde a morfologia não é homogênea e pode ter múltiplos valores para ΔT_{u-r} . A Figura 24 exemplifica isso, fazendo uma comparação entre o modelo de Bogotá proposto aqui e o modelo que Oke (1973) desenvolveu com base em várias cidades canadenses (Equação 10). Os valores reais de ΔT_{u-r} previstos pelo modelo ΔT_{u-r} de Oke (1973) estão listados na Tabela 15. O modelo pode ser expresso da seguinte forma:

$$\Delta T_{u-r} = 1.93 \log P - 4.76 \quad (\text{Eq. 10})$$

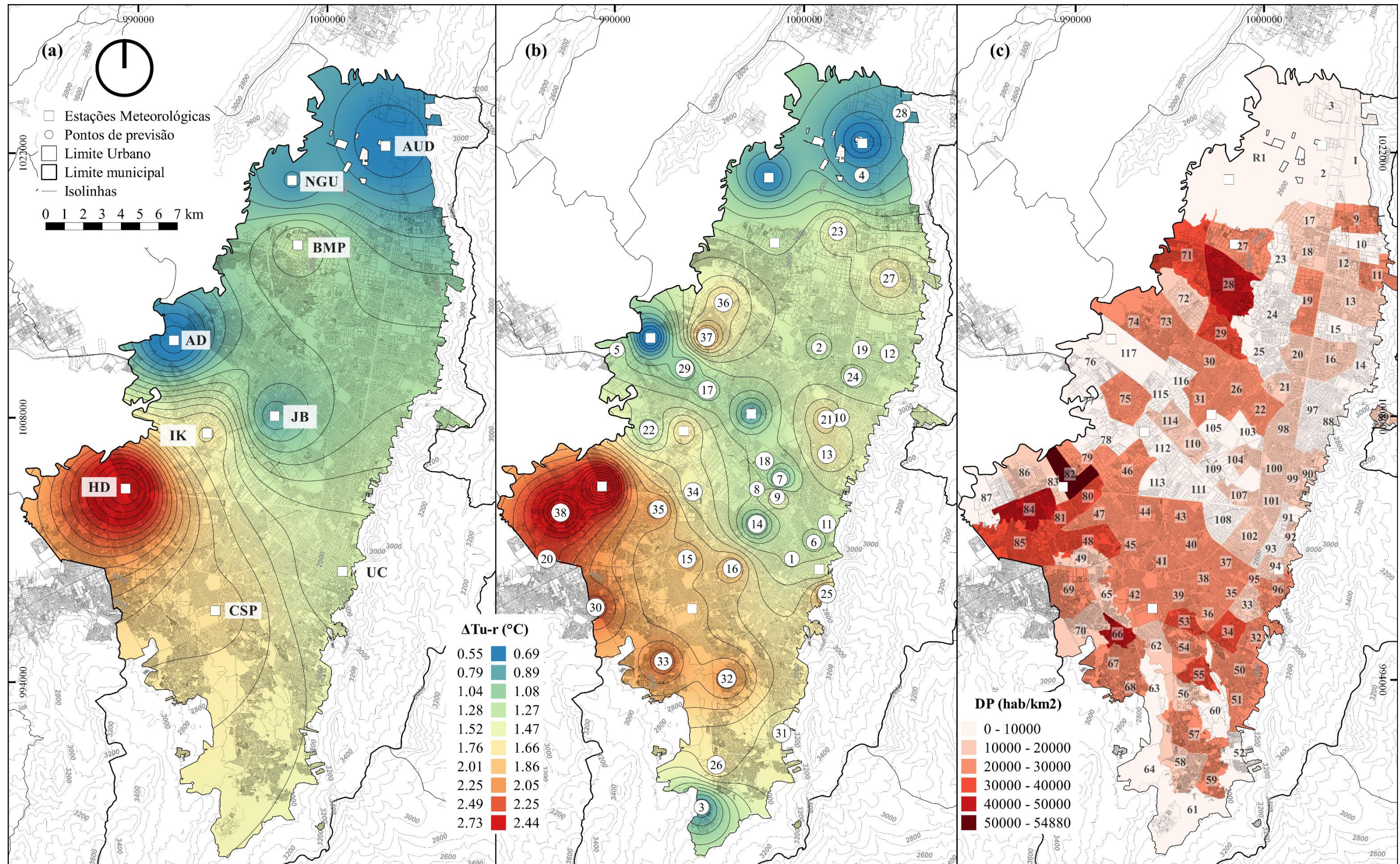


Figura 23. Mapas térmicos expressos por isotérmicas mostrando a distribuição espacial ΔT_{u-r} baseada em dados reais de ΔT_{u-r} obtidos pelas estações suburbanas e urbanas (a) (Tabela Fonte 8), dados ΔT_{u-r} preditos usando a Equação (9) localizados em pontos diferentes da cidade (pontos de previsão) juntamente com os dados reais ΔT_{u-r} (b) e a espacialização de Densidade da População (DP) de acordo com as Unidades de Planejamento Zonal (UPZ) (c).

Em primeiro lugar, é importante destacar que cada modelo de regressão possui alta validade local (Santamouris, 2015) e deve-se estar ciente de que há uma diferença na metodologia utilizada nesses dois estudos (diferentes períodos de tempo e condições climáticas, e também protocolos que foram determinados pelas condições de cada cidade). No entanto, o intervalo de p de diferentes setores de Bogotá está dentro dos intervalos estudados por Oke, exceto para a população de Montreal (que é de aproximadamente 2000000 habitantes). Portanto, para fins de discussão, o modelo de Oke foi usado para diferentes populações em Bogotá.

A Figura 24 mostra que o resultado dos valores de ΔT_{u-r} gerados com o modelo de Oke diferem dos valores reais de Bogotá (Tabela 8, figura 19-a). Da mesma forma, é interessante ver como os valores de ΔT_{u-r} são subestimados para áreas com a menor população (setores suburbanos), atingindo valores negativos. Por outro lado, há uma superestimação à medida que a população aumenta, e os valores se afastam do valor real alto de Bogotá ΔT_{u-r} , em uma magnitude de mais de 2°C.

Tabela 15. Valores de ΔT_{u-r} preditos pelo modelo de Oke (1973).

Estações	População (P)	ΔT_{u-r} (°C)	
		Real	Previsto
			Equação (10)
NGU	179	0.69	-0.41
AUD	550	0.50	0.53
AD	835	0.44	0.88
JB	2464	0.85	1.79
BMP	145631	1.29	3.82
UC	28056	1.42	4.85
IK	95254	1.71	4.86
CSP	96426	1.84	5.18
HD	140794	3.10	5.21

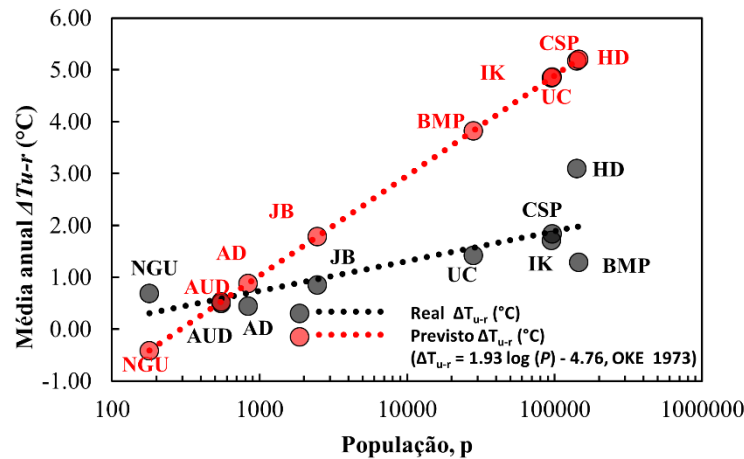


Figura 24. Comparação entre os valores preditos de ΔT_{u-r} dados pela Equação (10) formulada por Oke (1973) e os valores reais de ΔT_{u-r} relacionados a $\log P$.

Essas diferenças podem ser explicadas principalmente por diferenças morfológicas e diferenças climáticas. Bogotá é uma cidade de alta densidade, que pode apresentar maiores concentrações de temperatura, porém apresenta pequenos valores de ΔT_{u-r} . Este comportamento ocorre principalmente devido às suas condições atmosféricas, nas quais a umidade relativa é frequentemente alta e a variação de temperatura é baixa, portanto, com pequenas amplitudes. c também encontrou menor ΔT_{u-r} em relação a p , quando se refere a outros estudos em cidades da América do Norte e Europa, destacando a dificuldade de fazer comparações entre cidades.

7.2.2 Modelos com outros parâmetros da Camada de Cobertura urbana

Oke (1973) também propõe um modelo de regressão múltipla usando a velocidade do vento (\bar{u}) como variável e observou que enquanto p e ΔT_{u-r} são proporcionais, \bar{u} e ΔT_{u-r} são inversamente proporcionais. Este comportamento sugere que \bar{u} é um parâmetro importante para analisar a ΔT_{u-r} na cidade, especialmente para explicar os valores baixos, como os apresentados nas estações suburbanas de Bogotá, ou os altos dados ΔT_{u-r} , como no caso da estação HD. O modelo de regressão múltipla proposto por Oke (1973, 1976) está representado na Equação 11.

$$\Delta T_{u-r} = P0.27/4.04\bar{u}0.56 \tag{Eq. 11}$$

A Figura 25 mostra a comparação entre o último modelo apresentado na Equação (11), quando aplicado a dados de diferentes estações e ao utilizar o vento regional de Bogotá (\bar{u}) = 2.90, com os dados reais de $\Delta T_{u-r} - \log p$. Os valores da ΔT_{u-r} real e da ΔT_{u-r} prevista estão listados na Tabela 16.

Tabela 16. Valores de ΔT_{u-r} preditos pelo modelo de Oke (1973, 1976).

Estações	População (P)	Velocidade do vento (\bar{u})	ΔT_{u-r} (°C)	
			Real	Previsto
				Eq. (11) Oke (1973,197)
NGU	179	2.90	0.69	0.54
AUD	550		0.50	0.71
AD	835		0.44	0.79
JB	2464		0.85	1.03
BMP	145631		1.29	1.90
UC	28056		1.42	2.58
IL	95254		1.71	2.59
CSP	96426		1.84	2.84
HD	140794		3.10	2.87

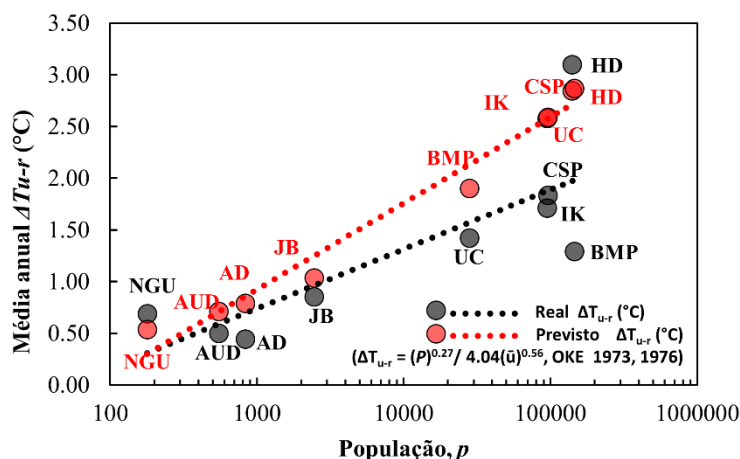


Figura 25. Comparação entre ΔT_{u-r} predito dado pela Equação (11) formulada por Oke (1973, 1976) e ΔT_{u-r} valores reais relacionados ao $\log P$. Velocidade média do vento regional 2.90 m/s.

Semelhante à Equação 10, esse modelo também superestima o ΔT_{u-r} , porém essa superestimação não é tão grande quanto no caso anterior e não subestima qualquer ponto. Também é interessante ver como este modelo (11) se aproxima dos valores de ΔT_{u-r} na estação HD. Neste caso, \bar{u} ajuda a regular a ΔT_{u-r} , o que favorece uma melhor descrição da ICU na Camada de Cobertura Urbana (CCU). O vento é um fator determinante na formação e distribuição da ICU em CCU, como mostrado por Oke (1976), Yasushi e Emi (2005) e Santamouris (2015), quando esses autores observaram a ΔT_{u-r} aumentando sob condições de vento fraco.

Isso sugere a importância de levar em conta o impacto de muitos outros parâmetros climáticos, como a velocidade do vento e as condições do céu (cobertura de nuvens). Da mesma

forma, a influência dos elementos morfológicos da CCU não deve ser negligenciada. Yamashita *et al.* (1986), por exemplo, consideram o Fator de Visão do Céu (*FVC*) um indicador confiável para o impacto da urbanização na intensidade da ICU no cânion urbano, ao contrário de *p* e *DP*.

Assim, embora essa pesquisa tenha algumas limitações, um modelo empírico baseado em uma análise de regressão múltipla envolvendo qualquer um dos indicadores e parâmetros acima permitirá uma boa observação da ICU em qualquer cidade (Oke, 1976).

7.3 Influências da forma urbana e sua relação com a Densidade da População na Intensidade da Ilha de Calor.

A primeira parte desta seção analisa a variabilidade dos parâmetros da forma urbana em relação à Densidade da População e a Intensidade da Ilha de Calor Urbana para procurar padrões semelhantes entre os setores das estações e seus dados. Isso é complementado na segunda parte com a análise de correlação entre os diferentes parâmetros para confirmar influências. Os resultados aqui apresentados são derivados do cálculo dos parâmetros da forma urbana estimada e calculada nas partes 6.2.2 até a seção 6.2.6, juntamente com os dados da intensidade da temperatura e demográficos apresentados na parte 6.2.1.

7.3.1 Comparação da variabilidade dos valores da Forma Urbana, Densidade da População e a Intensidade da Ilha de Calor Urbana.

Os resultados anteriores mostraram que a *DP* é o indicador demográfico estudado que melhor reconhece as diferenças morfológicas dentro da mesma cidade. De acordo com isso, a Figura 26 mostra o comportamento dos parâmetros da Cobertura do Solo urbano, comparando-os com dados de *DP* e ΔT_{u-r} .

Em relação aos parâmetros da Cobertura do Solo urbano, há uma dificuldade em identificar um padrão comum entre ΔT_{u-r} e *DP* com a Fração de Superfície Edificada (% *Edif*) (Figura 26-a). No entanto, pode-se mencionar que, após uma densidade de 5000 habitantes/km², a % *Edif* começa a aumentar significativamente (>20%), sugerindo que, após essas densidades, a demanda por área construída aumenta significativamente. Também é evidente que % *Edif* maior que 20% registram um aumento de ΔT_{u-r} , apresentando diferenças superiores a 0.80°C. Isso sugere que um grande desenvolvimento urbano não é necessário para ter mudanças de temperatura grandes. A mesma dificuldade é destacada com a Fração de Superfície

Impermeável ($\%Imp$) (Figura 26-c), para a qual os valores maiores que 40% correspondem aos maiores valores de ΔT_{u-r} e DP . Isso mostra que áreas impermeáveis, como áreas pavimentadas, exigem uma grande área para afetar as mudanças de temperatura. Para densidades superiores a 6000 habitantes/ km^2 , a $\%Imp$ não ultrapassa o 56% (BMP), mostrando que em grandes concentrações de população, um aumento proporcional de ruas, plataformas ou espaço público não ocorre necessariamente com grandes DP . No caso de Fração de Superfície Permeável ($\%Perm$) (Figura 26-b), é evidente que seus valores são inversamente proporcionais aos de ΔT_{u-r} e DP . Pode-se identificar que valores de $\%Perm$ inferiores a 40% possuem os maiores valores de ΔT_{u-r} e DP , mostrando a importância da vegetação presente nessas superfícies para controlar mudanças de temperatura, principalmente durante o dia, onde uma boa cobertura vegetal ajuda a diminuir a temperatura máxima do ar (Myint *et al.*, 2010). Este fato destaca que, em densidades superiores a 5000 habitantes / km^2 , o $\%Perm$ não ultrapassa o 30%. Isso indica que grandes densidades de população não geram necessariamente baixas proporções de $\%Perm$

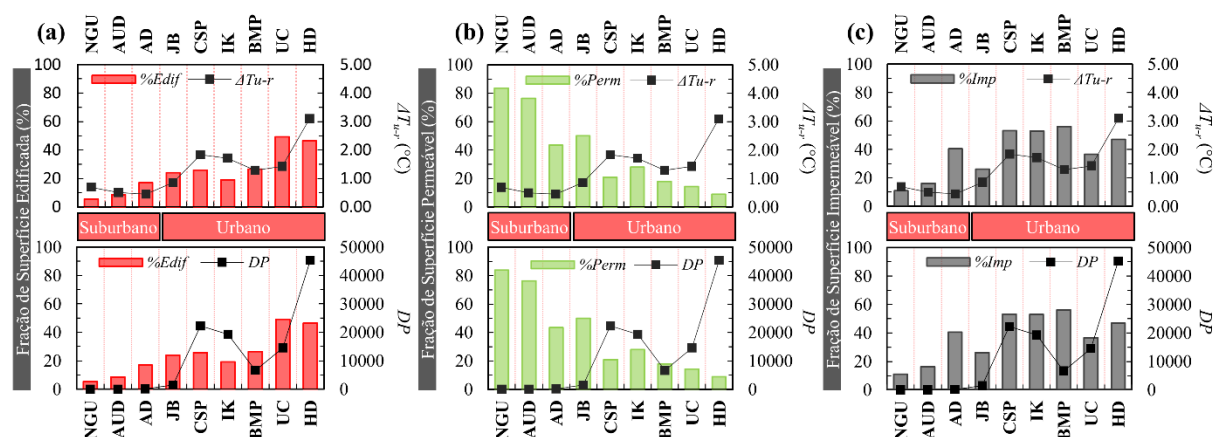


Figura 26. Comparação entre ΔT_{u-r} e DP com os parâmetros da Cobertura do Solo para Fração de Superfície Edificada ($\%Edif$) (a), para Fração de Superfície Permeável ($\%Perm$) (b) e para Fração de Superfície Impermeável ($\%Imp$) (c).

Dentro dos parâmetros da geometria e morfologia urbana (Figura 27), pode-se observar que os valores das Alturas dos Edifícios ($Alt.Edif$) (Figura 27-a) entre 4 e 10m (Edifícios Baixos) apresentam os maiores valores de ΔT_{u-r} e DP . No entanto, alturas mais elevadas não correspondem a valores mais altos de ΔT_{u-r} e DP , porque após 13m de $Alt.Edif$, ΔT_{u-r} e DP começam a diminuir. No caso da ΔT_{u-r} , a diminuição da temperatura pode ser explicada pelo sombreamento gerado pelos Edifícios Altos, efeito amplamente descrito na literatura (Feng e Myint, 2016; Kakon *et al.*, 2010; Moon *et al.*, 2018; Perini e Magliocco, 2014). Para explicar a diminuição da DP com o aumento $Alt.Edif$, que ocorre entre BMP e UC, é necessário entender

a razões de um menor número de pessoas viverem nesses setores. Uma dessas razões pode ser socioeconômica, uma vez que são setores com maior custo do solo. Em relação ao Fator de Visão do Céu (*FVC*) (Figura 27-b), observa-se que seus valores tendem a ser inversamente proporcionais aos de ΔT_{u-r} e *DP*. Observa-se que valores de *FVC* > 0.50 possuem baixos valores de ΔT_{u-r} e densidades inferiores a 2000 habitantes/km². Este fato ocorre nas estações suburbanas, nas quais pequenas mudanças na temperatura expressas em ΔT_{u-r} estão mais relacionadas às superfícies (cobertura de solo urbano) do que aos elementos urbanos que obstruem o céu. Isso ocorre especialmente com a %*Imp*, onde as temperaturas superficiais dos materiais modulam a temperatura do ar nas camadas inferiores da atmosfera (Xiao *et al.*, 2007). Por outro lado, os valores de *FVC* < 0,50 mostram um aumento em ΔT_{u-r} e *DP*, quando *DP* aumenta consideravelmente (*DP* > 19000) e quando o *FVC* tem um valor menor que 0.45 que pode produzir ΔT_{u-r} maior que 1.50°C. A obstrução do céu representada pelo *FVC* e as altas densidades indicam o intenso desenvolvimento urbano que esses setores tiveram. Para a relação *H/W* (Figura 27-c), os valores tendem a ser diretamente proporcionais a ΔT_{u-r} e *DP* para todas as estações. Esta relação positiva com o ΔT_{u-r} tem sido relatada em vários estudos realizados durante a noite (Goh e Chang, 1999; Johansson, 2006; Nakata-Osaki, Souza e Rodrigues, 2018). Destaca-se ainda BMP, que tem um valor muito alto para *H/W* (0.83). Esse comportamento é devido a seus edifícios altos e, especialmente, sua complexidade morfológica, como mencionado anteriormente. Além desta observação, pode-se notar que, para *DP* > 6.000 habitantes/km², os valores de *H/W* são maiores que 0.35, que coincidem com ΔT_{u-r} > 1°C.

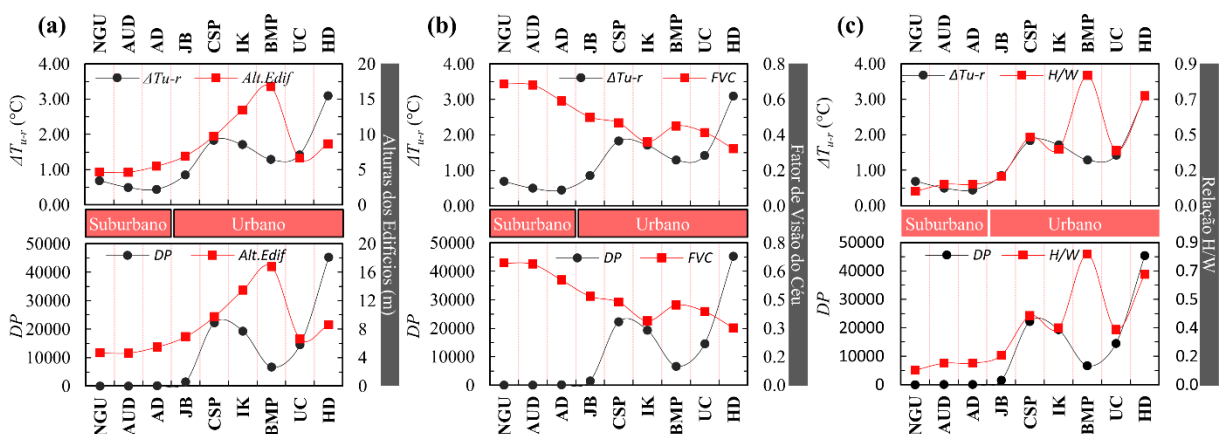


Figura 27. Comparação entre ΔT_{u-r} e *DP* com os parâmetros morfológicos urbanos. (a) para Alturas dos Edifícios (Alt.Edif), (b) para Fator de Visão do Céu (*FVC*) e (c) para a relação *H/W*.

7.3.2 Correlações entre os Parâmetros da Forma urbana com ΔT_{u-r} e DP

No momento de realizar uma análise de correlação entre os parâmetros da forma urbana com ΔT_{u-r} e DP , é evidente que a relação não é clara em todos eles. Os parâmetros com o menor coeficiente de determinação para a cobertura do solo são $\%Edif$ e $\%Imp$ (figura 28). No caso de $\%Edif$, as estações HD, UC, e IK tendem a estar longe da tendência, em especial para a correlação com ΔT_{u-r} ($R^2 = 0.46$) (Figura 28-c). No entanto, para correlação com o DP (Figura 28-a), o coeficiente de correlação começa a ser elevado ($R^2 = 0.63$), principalmente, porque o aumento da $\%Edif$ parece ser proporcional ao crescimento de DP para as primeiras estações (NGU, UC CSP e HD). Para as outras estações, esta relação torna-se clara (IK, UC, CSP e HD), assim, acontece algo semelhante com a $\%Imp$, para o qual a relação com ΔT_{u-r} (Figura 28-d) é baixa ($R^2 = 0.34$), porque HD e AD estão longe da tendência. No caso desta última estação, o uso do aeroporto requer uma elevada superfície pavimentada, no caso de HD sua alta densidade de construção expressa em $\%Edif$ significa que não há espaço para os tipos de cobertura que compreendem $\%Imp$. Por outro lado, a correlação entre $\%Imp$ com DP (Figura 28 -b) é novamente alta ($R^2 = 0.71$). O mesmo que para a relação de DP com $\%Edif$, para a qual DP (<2000 habitantes/km²) das estações sub-urbanas estão crescendo proporcionalmente com essas superfícies. Isso significa que estas superfícies ($\%Edif$ e $\%Imp$) deixam de ser importantes para explicar diferenças na ΔT_{u-r} para estações com características que mostram alta urbanização, sugerindo que, para esses setores, a geometria e a morfologia urbana podem ser um indicador melhor. No entanto, $\%Edif$ e $\%Imp$ sendo parâmetros relacionados ao processo de urbanização, podem ser melhor explicados por DP .

Os parâmetros geométricos e morfológicos com o menor coeficiente de correlação são $Alt.Edif$ e H/W (Figura 29). No primeiro caso, os coeficientes de determinação da relação com ΔT_{u-r} e DP são $R^2 = 0.27$ e 0.40 (Figura 29-c, a), respectivamente. A estação mais afastada da tendência é BMP, na qual edifícios altos presentes no sector não coincidem com os valores baixos de DP e ΔT_{u-r} . A baixa intensidade na temperatura pode ser explicada, porque é um setor que mostra pouca densidade construtiva na superfície ($\%Edif < 30\%$) e assim permite melhor ventilação e circulação de ar e sombreamento por parte dos edifícios. Considerando $Alt.Edif$ como uma variável para obter H/W , as relações deste parâmetro com ΔT_{u-r} e DP (Figura 29-d, b) não são significativamente mais elevadas. É observado um comportamento diretamente proporcional entre parâmetros, como foi explicado anteriormente. No entanto, um maior valor para H/W não irá necessariamente mostrar intensidades elevadas em ΔT_{u-r} . Assim, observa-se

que BMP também provoca baixos valores no coeficiente de determinação das relações com ΔT_{u-r} ($R^2 = 0.52$) e DP ($R^2 = 0.40$), porque o valor de H/W não coincide com os grandes valores de ΔT_{u-r} e DP . Tal como é sugerido pela tendência, no momento de ignorar BMP, o coeficiente de determinação aumenta significativamente para estas duas relações ($R^2 > 0.90$). No entanto, as características de BMP não podem ser ignoradas e isso mostra a importância da configuração espacial de um setor urbano, que pode ser expressa na tipologia de seus edifícios, ao momento de compreender seu impacto sobre o meio ambiente.

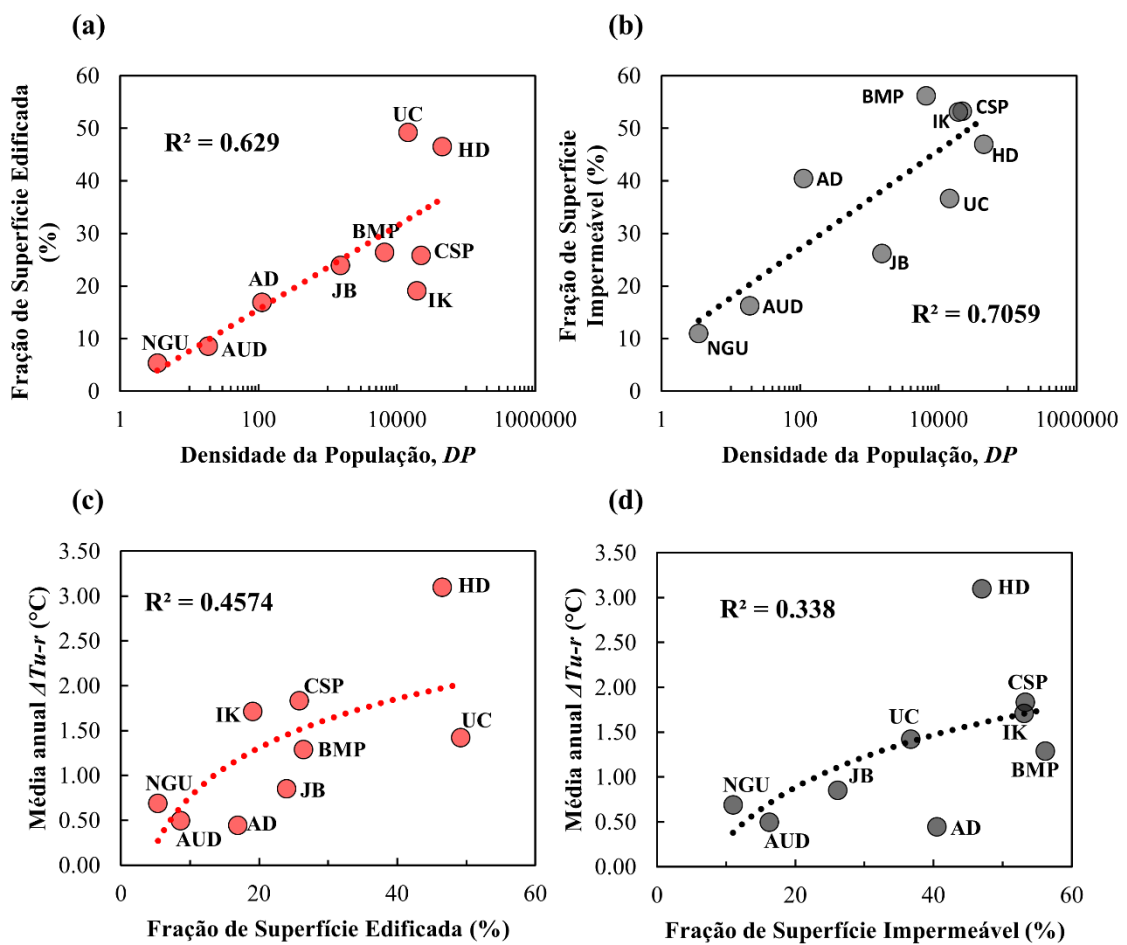


Figura 28. Relações entre $DP - \log \%Edif$ (a) e $\log \%Imp$ (b) e relações entre ΔT_{u-r} , - $\log \%Edif$ (c) e $\log \%Imp$ (d).

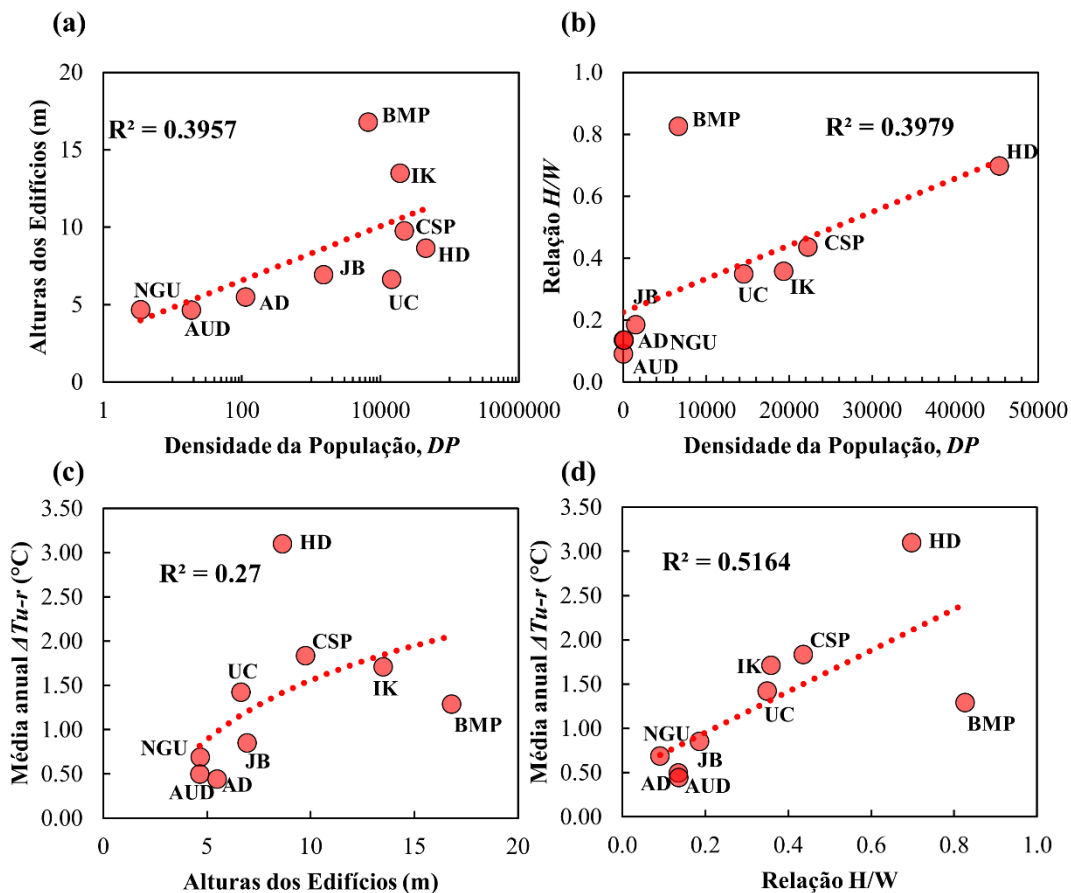


Figura 29. Relações entre DP - $\log Alt.Edif$ (a) e H/W (b) e relações entre ΔT_{u-r} - $\log Alt.Edif$ (c) e H/W (d).

Destaca-se a estação HD, porque seus valores são os que norteiam a tendência na relação de $Alt.Edif$ e H/W com ΔT_{u-r} (Figura 29-c, d) $Alt.Edif$ e H/W com DP (Figura 29-a, b), sugerindo que em um setor com baixas alturas e alta densidade construída expressas em seu alto % $Edif$ ($>45\%$) podem favorecer valores extremos em ΔT_{u-r} e apresentar altas densidades de população. O valor de H/W apresentado em HD, causado principalmente pela grande estreiteza do cânion urbano expresso na sua largura ($<15m$) e não na sua altura (como em BMP), causam valores extremos em H/W e ΔT_{u-r} , indicando que medidas reduzidas da largura do cânion urbano podem causar altas intensidades de temperatura, sem a necessidade de edifícios altos.

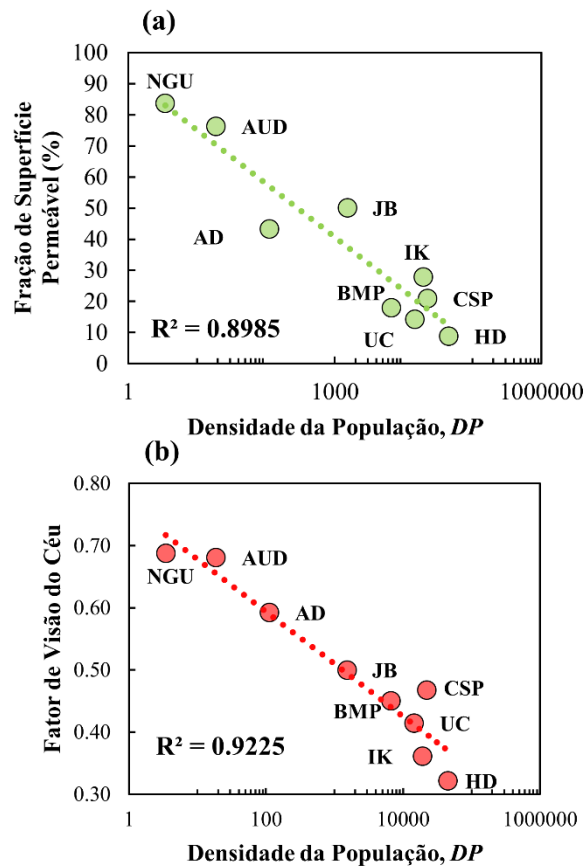


Figura 30. Relação entre DP e $\log \%Perm$ (a) - $\log FVC$ (b).

Os parâmetros $\%Perm$ e FVC mostram uma alta correlação com DP e ΔT_{u-r} . No primeiro caso (Figura 30), quando a DP aumenta, a $\%Perm$ ($R^2 = 0.90$) diminui (Figura 30-a). Essa relação negativa também foi observada por Kotharkar e Surawar (2016), com um coeficiente de determinação muito menor ($R^2 = 0,54$), causada principalmente pelos valores extremos de DP que podem ocorrer em países como a Índia. Da mesma forma, quando o DP aumenta, o FVC ($R^2 0.92$) diminui (Figura 30-b). Os dados sugerem que, em densidades acima de 15.000 habitantes/ km^2 , os valores dos parâmetros diminuem lentamente. Além disso, as estações IK e CSP afastam-se da tendência. As áreas dessas estações possuem edifícios altos, apresentando valores mais elevados para $\%Perm$ ($> 20\%$), FVC ($> 0,35$) e DP (> 19.000), causando uma relação um tanto distorcida. A relação entre FVC e DP não foi bem explorada. No entanto, pode-se observar que Oke (1981) encontra uma boa relação entre FVC e $\log p$, observando que as diferenças de valores em FVC são aquelas que causam diferenças na inclinação da tendência ao comparar cidades norte-americanas e europeias na relação ΔT_{u-r} com $\log p$ (Oke, 1973). Assim, pode-se sugerir que p é um indicador que pode sugerir diferenças na morfologia entre cidades de diferentes regiões.

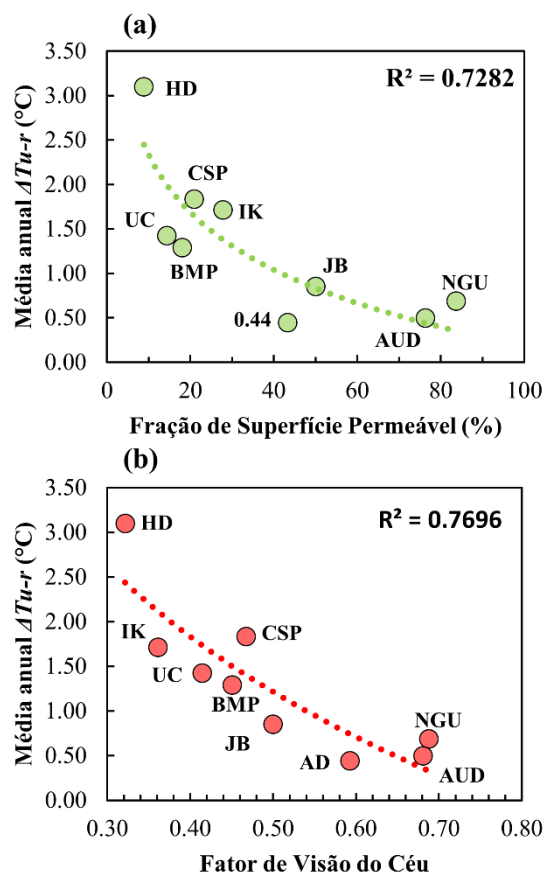


Figura 31. Relação entre a média anual de ΔT_{u-r} e $\log \%Perm$ (a) - $\log FVC$ (b).

No segundo caso (Figura 31), os valores de ΔT_{u-r} aumentam quando os valores de $\%Perm$ ($R^2 = 0.73$) e FVC ($R^2 = 0.78$) diminuem. Assim, confirma o comportamento inversamente proporcional entre os parâmetros. No caso do $\%Perm$ (Figura 31-a), a relação negativa também foi observada por Kotharkar e Surawar (2016) com $R^2 = 0.48$. Para FVC (Figura 31-b). Esta relação negativa pode ser observada em vários estudos, quando se comparam os valores de ΔT_{u-r} da noite (Hien e Jusuf, 2010; Unger, 2009; Wang e Akbari, 2014). Considerando que ΔT_{u-r} para este estudo é a média anual, é complexo explicar o comportamento inverso do FVC com respeito a ΔT_{u-r} . Souza *et al.* (2010) sugere que os perfis variados dentro dos mesmos setores apresentam características que alteram o comportamento térmico esperado durante o dia e durante a noite. A explicação do alto coeficiente de determinação para FVC é porque a correlação é feita com os valores médios do setor (média real), que oferece maior clareza nas relações, conforme destacam Unger (2004) e Chen *et al.* (2012). Esses autores obtiveram aumento no coeficiente de determinação, de 0.18 a 0.68, quando se utilizou a média de área de

FVC obtida pela média dos vários valores dos pontos onde foi medido o *FVC* num bairro de Hong Kong.

Finalmente, os dados sugerem que um $FVC < 0.50$ e $\%Perm < 50\%$ causam $\Delta T_{u-r} > 1^\circ\text{C}$. Estações como CSP e HD estão no limite da cidade e têm um alto valor de ΔT_{u-r} em comparação com outros setores com características semelhantes (valores *FVC* semelhantes), sugerindo que a localização das estações dentro da mesma cidade influencia o valor da temperatura do ar.

7.4 Diferenças térmicas baseadas em observações da temperatura do ar nas Zonas Climáticas Locais de Bogotá, Colômbia.

Esta seção fornece resultados caracterizados dentro das Zonas Climáticas Locais, para isto os dados da temperatura do ar (diárias, horarias, intensidades e índices) descritos nas seções 6.3.2 a 6.3.4 são a base principal dos resultados. A primeira parte desta seção compara os valores dos parâmetros das ZCL dos setores de Bogotá (parte 6.3.1), juntamente com as faixas sugeridas para esses parâmetros mostrados por Stewart e Oke (2012) para cada ZCL, a fim de discutir coincidências e divergências. As condições e comportamentos térmicos das ZCL são explorados na segunda e terceira partes. As diferenças de temperatura que mostram a intensidade da ICU para cada ZCL são analisadas na última parte.

7.4.1 Propriedades das Zonas Climáticas Locais em Bogotá

Vários estudos mostraram (Geletič e Lehnert, 2016; Leconte *et al.*, 2015; Lehnert *et al.*, 2015; Wang, C. *et al.*, 2018) que as propriedades geométricas e a cobertura da superfície não correspondem àquelas propostas por Stewart e Oke (2012) em alguns fatores. A Figura 32 mostra uma comparação entre os intervalos dos valores dos parâmetros propostos por Stewart e Oke (2012) para as ZCL utilizadas neste estudo, com os valores reais presentes nos setores das estações. A dificuldade em classificar estações dentro das ZCL é destacada quando se constata que alguns valores não coincidem com os intervalos propostos, e na necessidade de utilizar o método de subclassificação para expressar melhor as características dos setores (Figura 17).

Pode-se observar que, para as propriedades da Cobertura de Solo Urbano (Figura 32-a, b, c), as estações HD e UC (ZCL3) (Edifícios Baixos Compactos) estão dentro do intervalo proposto por Oke para esses parâmetros. Neste caso, foi utilizada uma sub-classificação na ZCL 5 (Espaço aberto com Edifícios Médios) para UC, para a qual o único intervalo que corresponde

é em *%Imp* (figura 32-b). Para as propriedades da Morfologia e Geometria urbana (Figura 32-d, e, f), na ZCL3, todas as estações coincidem na faixa de propriedades, exceto para a relação *H/W* (>0.75), onde os valores das estações são mais baixos (0.30-0.70). No entanto, ao observar a subclassificação para a estação UC (LCZ5), o valor de *H/W* está dentro da faixa, da mesma forma que *%Imp*, para o qual a faixa é muito semelhante à da LCZ3. Para os outros parâmetros de subclassificação (*Alt.Edif* e *FVC*) de UC, estes afastam-se do intervalo proposto.

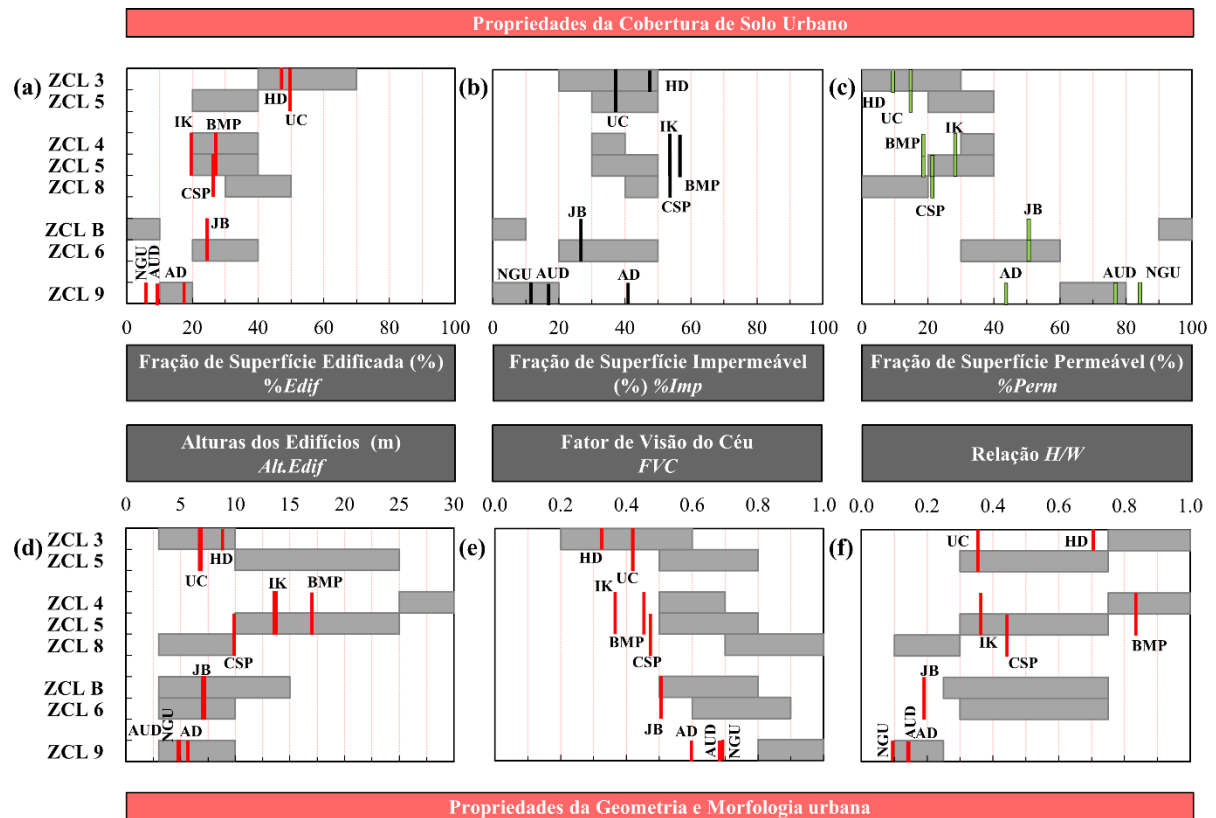


Figura 32. Propriedades da Cobertura de Solo Urbano (a, b, c) e da Geometria e Morfologia urbana (d, e, f) das ZCL de diferentes setores da cidade de Bogotá, comparadas com as faixas ou intervalos dos parâmetros sugeridos por Stewart e Oke (2012) para cada ZCL.

Para as estações CSP, IK e BMP classificados como LCZ5 (Espaço aberto com Edifícios Médios) começam a surgir diferenças nos seus valores com os intervalos propostos. Na *%Edif* (Figura 32-a) os valores não coincidem com os intervalos, em *%Imp* (Figura 32-B). Nenhuma estação coincide com os intervalos, onde todas as estações (CSP, IK e BMP) têm valores elevados causados pela maior número de praças e calçadas. Para *%Perm* (Figura 32-c), os valores dos parâmetros das estações coincidem com a exceção de BMP, que tem um valor menor, mas que é muito próximo do intervalo.

Para as propriedades da Morfologia urbana nas mesmas estações (Figura 32-d, e, f), os valores de *Alt.Edif* (Figura 32-d) coincidem com os intervalos em todas as estações. Para *FVC* (Figura 32-e) as estações apresentam valores mais baixos do que o intervalo proposto. Para a relação *H/W* (Figura 32 -f) o intervalo coincide para estações IK e CSP, exceto para BMP, cujo elevado valor de *H/W* coincide com o intervalo de ZCL4 (Espaço aberto com Edifícios Altos), que foi sub-classificada, demonstrando a influência de *Alt.Edif* no elevado valor de *H/W* para esta estação. Para as outras estações que também têm sub-classificações (IK = LCZ4 e CSP LCZ8), os valores não coincidem com a sub-classificação.

As estações que utilizam outras LCZ como sub-classificação não coincidem na maioria das faixas ou intervalos, pois sua sub-classificação é usada principalmente para descrever características especiais que se tornaram evidentes, como a existência de edifícios altos (IK e BMP) ou edifícios com grandes superfícies (IK). Em suma, a sub-classificação foi baseada na observação de fatores óbvios, mas que não têm peso suficiente em seus valores representativos.

Complementando o acima mencionado, a estação JB é classificada como ZCL6 (Espaço aberto com Edifícios Baixos). Os valores para os parâmetros de Cobertura de Solo urbano (figura 32-a, b, c,) coincidem com a faixa proposta para esta ZCL, porém eles não coincidem com a faixa da ZCLB (Arvores Dispersas). Esse resultado era esperado, já que esta subclassificação foi feita para destacar a presença de um grande parque urbano que ocupa grande parte do setor. Por essa mesma razão, os fatores da Geometria e Morfologia urbana (Figura 32-d, e, f) mostram que os valores só coincidem na faixa com *Alt.Edif* (figura 32-d). Para *FVC* (figura 32-e) os valores estão muito próximos da faixa e para *H/W* (figura 32-f) os valores não se enquadram no intervalo. Isso pode ser explicado, porque a área dos parques aumenta a área considerada para o cânion urbano, tornando o valor de *H/W* menor que o esperado.

Para as estações AD, AUD e NGU classificadas na ZCL9 (Escassamente Construído), nem todos os valores dos parâmetros da estação coincidem com os intervalos. Para os parâmetros Cobertura de Solo urbano (Figura 32-a, b, c), isso acontece para *%Edif* (a figura 32-a), AUD e AD se enquadram na faixa. Com exceção de NGU, embora seu valor seja um pouco próximo, para *%Imp* (figura 32-b), AUD e NGU inserem-se na faixa. No entanto, AD está longe, devido a seu uso (aeroporto), que exige maiores áreas pavimentadas. Pelo mesmo motivo, para *%Perm* (figura 32-c), AD se afasta do intervalo e o mesmo acontece com NGU, embora seu valor seja bastante próximo do intervalo. No caso de AUD, esta estação entra no

intervalo para $\%Perm$. Para os parâmetros de Geometria e Morfologia urbana (Figura 32-d, e, f), os valores das estações se enquadram nas faixas de $Alt.Edif$ e H/W (Figura 32-d, f), mas para o FVC (Figura 32-e), os valores são significativamente baixos, possivelmente devido à presença de mais edifícios do que o a ZCL9 sugere.

Finalmente, a atribuição de valores de DP num intervalo nas ZCL também é complexa, já que as estações classificadas dentro das mesmas ZCL tendem a ter grandes diferenças em seu DP . Essas mesmas diferenças somadas aos valores extremos de DP que estão presentes em algumas estações e a necessidade de ter mais setores da cidade classificados em outros tipos de ZCL, inviabiliza estabelecer intervalos de DP para cada tipo de ZCL. No entanto, por motivos de discussão, intervalos podem ser estabelecidos se as ZCL estiveram agrupadas como segue; $DP < 2000$ corresponde as ZCL abertas de baixo altura e escassamente construídas, $DP = 5000 - 20000$ correspondem as ZCL abertas com edifícios médios e altos aumento e $DP > 40000$ corresponde a ZCL compacta.

7.4.2 Diferenças no comportamento térmico das Zonas Climáticas Locais em Bogotá

Supõe-se que as estações com a mesma ZCL devem ter um comportamento térmico semelhante (Middel *et al.*, 2014; Stewart, Oke e Krayenhoff, 2014; Stewart e Oke, 2010). A Figura 33 mostra a distribuição das observações diárias da temperatura do ar entre as estações e suas ZCL. No caso da Temperatura Máxima (T_{max}) (Figura 33-a), não há evidência de um aumento ou diminuição nos valores se as ZCL foram de abertas para compactas. Valores elevados, com temperaturas superiores a $21^{\circ}C$ em seu valor médio, são apresentados em NGU (LCZ9), pois a absorção de energia durante o dia não é favorecida ($\%Perm = 83.75\%$). Em HD (LCZ3) e CSP (LCZ5₈) esses altos valores também são apresentados em T_{max} . Isso ocorre devido à diminuição do sombreamento durante o dia, o que se reflete no baixo valor de $Alt.Edif$ (6,64 m) para HD. Algo semelhante pode acontecer com CSP, que sendo uma ZCL aberta com um cânion urbano não tão profundo ($W = 22.4m$, $H/W = 0.44$), não faz com que a sombra dos edifícios se estenda por uma grande parte da superfície. Isto permite que mais radiação chegue durante o dia para a superfície. Por outro lado, a diferença entre os valores médios de T_{max} não é muito grande entre as estações ($ZCL3-ZCL5 = 0.08^{\circ}C$, $ZCL3-ZCL9 = 0.54^{\circ}C$), considerando que o valor mais baixo não cai abaixo de $19.70^{\circ}C$. Este é apresentado em AD, onde um alto $\%Imp$ (40.47%) favorece a absorção da radiação durante o dia.

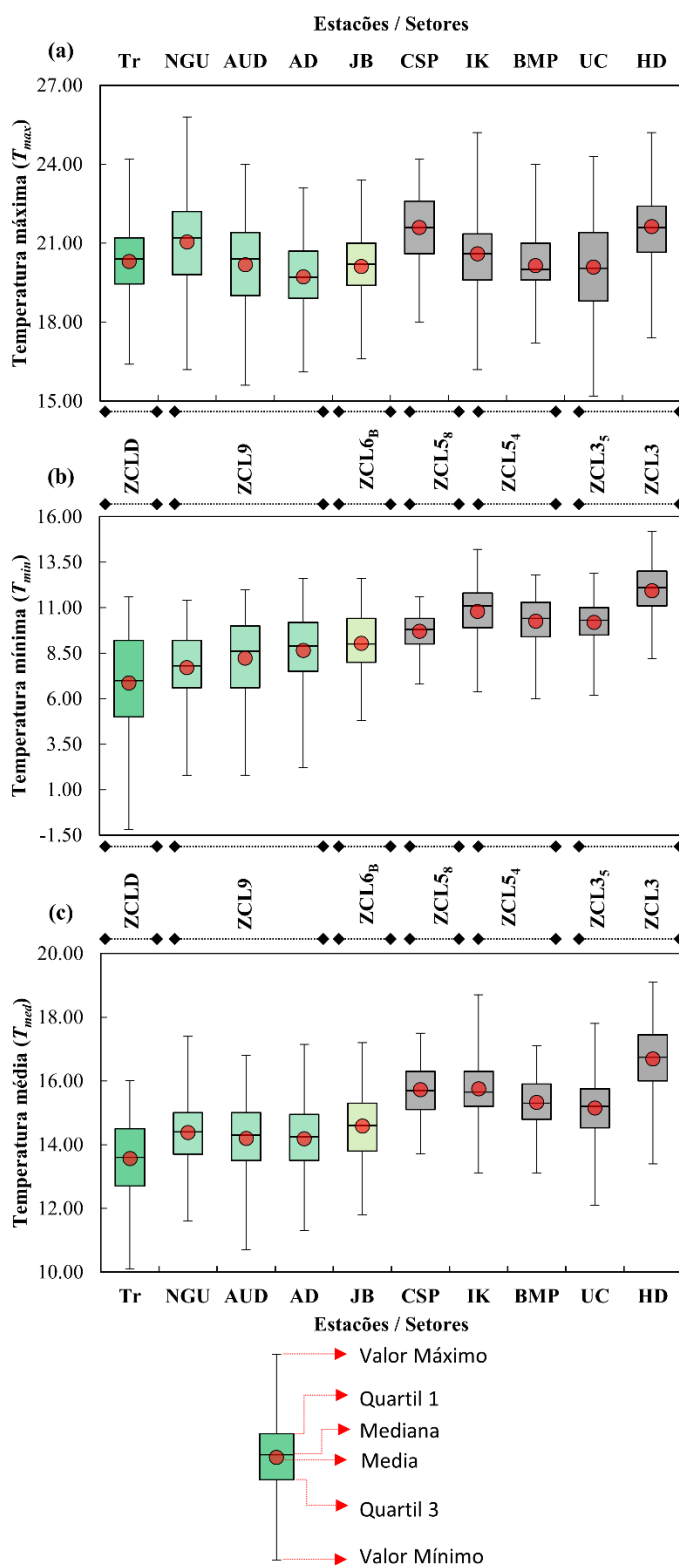


Figura 33. Distribuição das observações diárias da temperatura do ar para os valores da Temperatura máxima (T_{max}) (a), Temperatura mínima (T_{min}) (b) e Temperatura média (T_{med}) (c) para os diferentes setores e suas Zonas Climáticas Locais em que eles foram classificados. Tr corresponde à estação de referência rural (ZCLD) (Figura 8)

Em geral, pode-se dizer que para as ZCL abertas de edifícios baixos (9, 6, B), a temperatura diminui com o aumento da $\%Imp$, para as ZCL abertas de altura média e alta (5 e 4), T_{max} diminui com o aumento da altura ($Alt.Edif$), e para as ZCL fechadas (3), a temperatura aumenta com o aumento de H/W ou diminuição do FVC .

No caso da Temperatura Mínima (T_{min}) (Figura 33-b), é evidente que existe um padrão muito claro na variação de temperatura entre as estações e, conseqüentemente, entre as ZCL. Pode-se afirmar que a T_{min} aumenta das ZCL abertas para as ZCL compactas, então as diferenças entre as ZCL são mais perceptíveis (ZCL3-ZCL5 = 0.8°C, ZCL3 -ZCL9 = 2.9°C). Os maiores valores de T_{min} são apresentados nas estações IK (ZCL54) e HD (ZCL3). Nesses setores existem cânions urbanos mais profundos (IK) ou estreitos (HD), refletidos, no primeiro caso, com a presença de grandes alturas ($Alt.Edif = 13.49m$) e, no segundo, caso com baixos valores de FVC (0.32) e altos valores de H/W (0.70). Considerando que os valores de T_{min} geralmente ocorrem à noite (Fenner *et al.*, 2017), o aumento na temperatura ocorre devido à emissão de radiação de ondas longas dos materiais da superfície urbana, que não conseguem ser dispersadas devido à morfologia do cânion urbano (Oke, 1982). Assim, os cânions urbanos profundos e estreitos apresentem aumentos consideráveis da temperatura noturna (T_{min}). Isso também pode ser evidenciado na redução da amplitude térmica mostrada pelos dados de T_{min} (tabela 9) da estação rural (Tr -ZCLD = 12.8°C) até as ZCL abertas (10.07°C) e as ZCL compactas (6.85°C). Essa redução na amplitude, está relacionada à redução do processo de resfriamento durante a noite. Para ser mais específico, observa-se que nas ZCL baixo altura (9, 6, B) há aumento gradual da temperatura (T_{min}) com o aumento de parâmetros como $\%Edif$ ou a diminuição do FVC . Para as ZCL abertas com edifícios médios e altos (5 e 4), T_{min} diminui levemente com o aumento de $Alt.Edif$. E para as ZCL fechadas (3), a T_{min} aumenta com H/W e com baixos valores do FVC .

Para a Temperatura média (T_{med}) (Figura 33-c), observa-se que a temperatura tende a aumentar das ZCL abertas para as ZCL compactas. No entanto, essa tendência não é tão clara quanto no caso anterior (T_{min}). Os valores mais altos são apresentados em HD, para o qual T_{med} pode ser influenciado pela grande área construída expressa em $\%Edif$ (46.49%) e seu estreito cânion urbano expresso no alto valor de H/W (0.70) e baixo valor do FVC (0.32). Valores altos também são apresentados em CSP e IK, que podem ser influenciados pela presença de um cânion urbano mais profundo, expresso pelas grandes alturas encontradas nesses setores ($Alt.Edif > 13m$).

As diferenças entre as ZCL ainda são notórias, mas não tão fortes como no caso anterior (T_{min}) ($ZCL3-ZCL5 = 0.32^{\circ}C$, $ZCL3 -ZCL9 = 1.66^{\circ}C$). Para aprofundar pode-se dizer que, nas ZCL abertas de baixa altura (9, 6, B), T_{med} não sofre grandes variações entre suas estações, para as quais JB aumenta ligeiramente a temperatura possivelmente pela presença de mais edificações ($\%Edif$). Finaliza-se ressaltando que, para as ZCL abertas de altura média e alta (5 e 4), T_{med} parece diminuir com o aumento de $Alt.Edif$ e para as ZCL fechadas (3), T_{med} aumenta com H/W e com baixos valores de FVC , como nos dois casos anteriores (T_{max} e T_{min}).

A Figura 34 mostra a distribuição das observações horárias da temperatura do ar para três horas específicas ($T_{7:00}$, $T_{13:00}$ e $T_{19:00}$). Para $T_{7:00}$ (figura 34-a), pode se observar uma tendência no aumento da temperatura no início da manhã das ZCL abertas até as compactas. Embora pareça que esse padrão se estabilize entre as estações de cada ZCL. Comportamento semelhante é evidenciado em $T_{19:00}$, quando uma tendência mais clara é mostrada no aumento da temperatura no início da noite das ZCL abertas até as compactas.

De acordo com isto, pode-se observar que as ZCL aberta de baixa altura (9, 6, B) não sofre variações no início da manhã ($T_{7:00}$). Para o início da noite ($T_{19:00}$) (figura 34-c), há um ligeiro aumento na temperatura, identificado com a diminuição da $\%Perm$. Destaca-se a estação JB (ZCL6B), que tendo uma maior urbanização, observada pelo aumento de $\%Edif$ (23.95%), apresenta valores similares em $T_{7:00}$ e $T_{19:00}$ para as estações das ZCL abertas de edifícios médios e altos (5 e 4), que apresentam valores mais elevados e mais homogêneos entre as suas estações em $T_{7:00}$ e $T_{19:00}$ que as estações anteriores. Isto reflete-se no aumento de $\%Edif$ (19% -27%) e na diminuição da $\%Imp$ (27% -18%). Para as ZCL compactas (3), $T_{7:00}$ e $T_{19:00}$ aumenta possivelmente pelo estreitamento do cânion urbano, como foi mencionado nos casos anteriores (T_{max} , T_{min} e T_{med}).

É curioso ver como JB tem um dos maiores valores em $T_{7:00}$ e $T_{19:00}$ ($12.94^{\circ}C$ - $15.26^{\circ}C$) junto com IK ($13.09^{\circ}C$ - $15.34^{\circ}C$) e HD ($13.16^{\circ}C$ - $14.76^{\circ}C$). No caso destes últimos, seus valores são influenciados por seus cânions urbanos mais profundos (IK) ou estreitos (HD), como explicado acima (T_{min}). No entanto, explicar o alto valor de JB é complicado, considerando a presença de uma grande área urbana em sua estrutura urbana (figura 16), que deve ter efeitos de resfriamento (Wong e Yu, 2005).

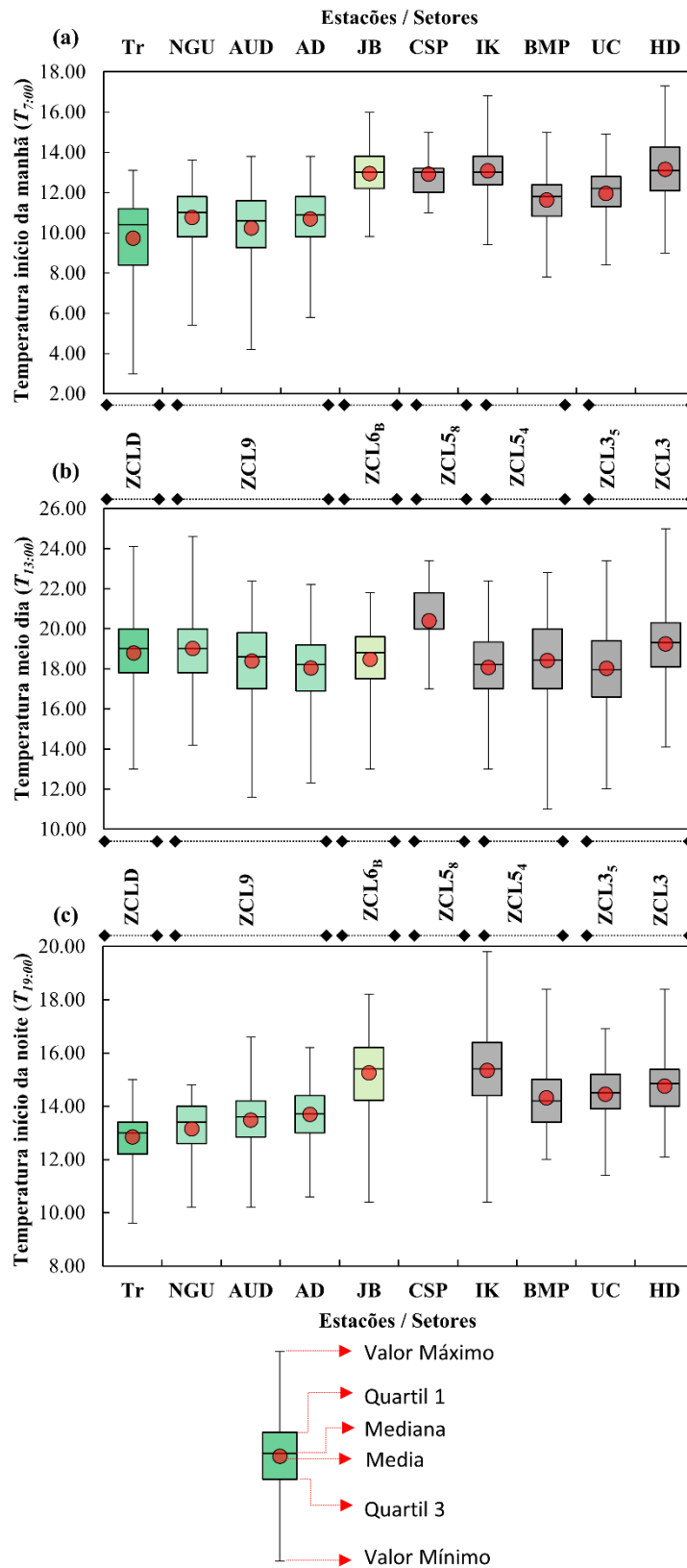


Figura 34. Distribuição das observações horárias da temperatura do ar para o início da manhã ($T_{7:00}$) (a), meio dia ($T_{13:00}$) (b) e início da noite ($T_{19:00}$) (c) para os diferentes setores e suas ZCL em que foram classificados. Tr corresponde à estação de referência rural (ZCLD) (Figura 8).

Continuando a análise anterior, as diferenças entre as ZCL são notórias se as ZCL compactas são comparadas com as ZCL9 (Escassamente Construído) ($T_{7:00}$ ZCL3 -ZCL9 = 2.0°C , $T_{19:00}$ ZCL3 -ZCL9 = 1.16°C). Porém, ao se comparar as ZCL abertas e compactas, essas diferenças tendem a ser muito pequenas ($T_{7:00}$ e $T_{19:00}$ ZCL3 -ZCL5 = 0.2°C). Ressalta-se que as estações BMP e UC tendem a ter valores baixos em $T_{7:00}$ e $T_{19:00}$ em relação às demais estações da mesma ZCL, algo que também acontece com T_{med} (Figura 33-c). Levando-se em conta que são setores muito diferentes, uma razão importante para esta diminuição da temperatura nessas estações é a sua localização dentro da área urbana (Skarbit *et al.*, 2017) (figura 8). Uma vez que as estações estão localizadas perto dos limites da cidade, por exemplo, a estação UC está ao lado da cadeia de montanhas do leste que margeiam a cidade em sua parte oriental, isso faz com que UC seja exposta aos ventos locais que descem da montanha na direção leste – oeste (Gaitan, Cancino e Behrentz, 2007).

Para a temperatura do meio-dia ($T_{13:00}$), os dados mostram (Figura 34-b) que não há padrão de aumento ou diminuição de $T_{13:00}$ baseado nas ZCL, ou seja, não há variabilidade de temperatura entre as estações ao meio-dia, porque os dados destes estão na maior parte dentro da mesma faixa ($18-19^{\circ}\text{C}$). As diferenças entre ZCL não são perceptíveis (ZCL3-ZCL5 = -0.33°C , ZCL3 -ZCL9 = 0.15°C). Note-se que a estação com o valor mais alto de $T_{13:00}$ é CSP (20.39°C) que, sendo um setor mais aberto com um cânion urbano menos profundo, favorece a chegada de radiação à superfície urbana, como foi explicado anteriormente (T_{max}).

7.4.3 Variação das Zonas Climáticas Locais de acordo com os Índices baseados na temperatura

Os índices baseados na temperatura podem sugerir que as ZCL tenham diferentes mudanças e condições térmicas (Skarbit *et al.*, 2017). A Figura 35 mostra a variação nas porcentagens dos índices baseados na temperatura. Pode-se observar que, para os “Dias de Aquecimento” (DDA) (Figura 35-a), a proporção de dias em que a temperatura ($T_{med} < 14^{\circ}\text{C}$) sugere a necessidade de aquecimento é reduzida a partir das ZCL abertas para as ZCL fechadas. É interessante observar como as estações ZCL abertas com edifícios médios e altos (5 e 4) e as ZCL compactas (3) reduzem suas porcentagens pela metade ($< 10\%$) em relação às estações classificadas com as ZCL abertas de baixa altura (9, 6, B) ($30-45\%$). Esta, por sua vez, reduz sua porcentagem pela metade em relação à estação Tr (ZCLD) ($62,09\%$). Isso sugere que as ZCL 5, 4 e 3 reduzem significativamente para os dias com $T_{med} < 14^{\circ}\text{C}$. No entanto, as

características dessas ZCL não parecem aumentar o número de dias quando $T_{med} (> 18)$ sugere a necessidade de resfriamento na temperatura, como pode ser visto em “Dias de Resfriamento” (DDR) (Figura 35-a), nos quais suas porcentagens estão ausentes para a maioria das estações. Somente as estações IK (LCZ5₄) e HD (LCZ3) apresentam uma pequena proporção de dias de DDR, causada principalmente pela sua alta urbanização expressa em seus valores da forma urbana e DP.

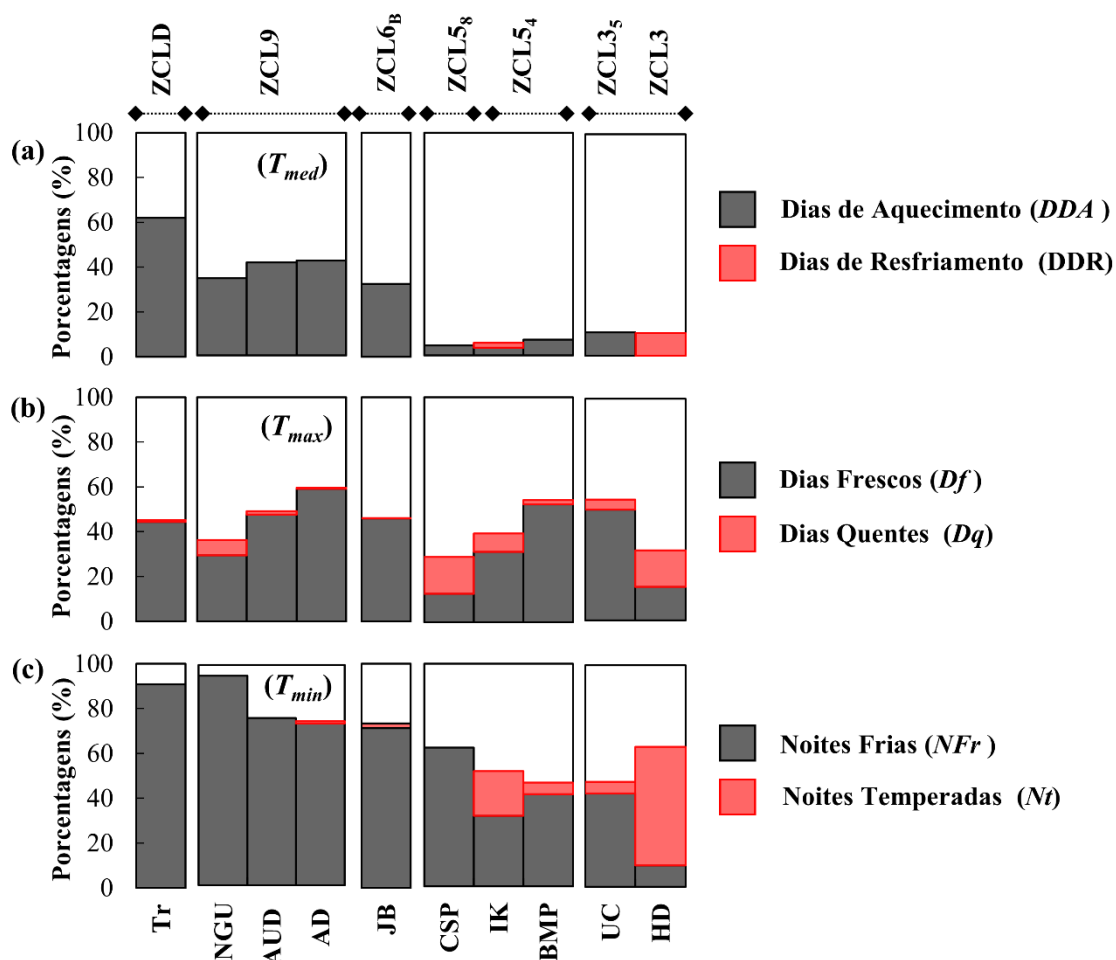


Figura 35. Porcentagens de ocorrências para os diferentes índices baseados na temperatura do ar de acordo com os dados de Temperatura média (T_{med}) (“Dias de Aquecimento” = DDA e “Dias de Resfriamento” = DDR) (a), Temperatura máxima (T_{max}) (“Dias Quentes” = Dq e “Dias Frescos” = Df) (b) e Temperatura mínima (T_{min}) (“Noites Frias” NFr e “Noites Temperadas” = Nt) (c) para os diferentes setores e suas ZCL em que foram classificados.

Para os índices “Dias Quentes” (Dq) e “Dias Frescos” (Df) (Figura 35-b), com base nos dados da T_{max} , pode-se observar que a pequena porcentagem em Dq sugere que os dias com $T_{max} > 24^{\circ}\text{C}$ não são muito frequentes na cidade de Bogotá. Pode-se dizer que nas ZCL abertas

de baixa altura (9, 6, B), a ocorrência de dias Dq é insignificante (<1%) e não mostra diferença com Tr (ZCLD) (0,89%). Exceto para NGU (6,92%), na qual a maior porcentagem em Dq é difícil de explicar. Uma causa poderia ser o uso da atividade da indústria agrícola, que poderia causar vários dias com $T_{max} > 24^{\circ}\text{C}$ durante o ano. As ZCL abertas com edifícios altos e médios (5 e 4) e compactas (3) aumentam ligeiramente a sua porcentagem de Dq (> 4%), e as estações CSP, IK e HD apresentam as maiores porcentagens. Estas últimas duas estações podem apresentar dias que precisam de resfriamento (DDR), como antes mencionado.

Para Df (Figura 35-b), porcentagens muito mais altas são apresentadas para todas as estações. As ZCL abertas, com edifícios baixos, médios e altos (9, 6, B, 5.4) e as ZCL compactas (3) tem porcentagens que variam muito entre suas estações, dificultando a identificação de um padrão dependendo das ZCL. Destaca-se que a maior ocorrência de dias com $T_{max} < 20^{\circ}\text{C}$ (> 29%) ocorre na maioria das estações, com exceção de CSP e HD, que devido às suas características, reduzem a ocorrência de “Dias Frescos” (Df).

Para os índices baseados em T_{min} , observa-se que as porcentagens de “Noites Frias” (NFr) (Figura 35-c) mostram alta frequência para a maioria das estações com $T_{min} < 10^{\circ}\text{C}$. É evidente que as porcentagens de NFr são reduzidas de ZCL abertas para ZCL compactas. Para NFr um comportamento semelhante com DDA é observado. Assim, as ZCL abertas de edifícios médios e altos (5 e 4) e as ZCL compactas (3) reduzem suas porcentagens pela metade (30 - 40%) em relação às estações classificadas como as ZCL abertas de baixas alturas (9, 6, B) (60 - 90%). Porém estas últimas não são significativamente reduzidas em relação a Tr (ZCLD) (90,88%), mostrando que à noite, a ZCL9 e em menor medida a ZCL6 parece ter um processo de resfriamento semelhante ao da estação rural (Tr = ZCLD). Além disso, destaca-se que as estações das ZCL 5,4,3, especialmente em setores como HD (ZCL3), ajudam a reduzir a ocorrência de NFr ($T_{min} < 10^{\circ}\text{C}$). Por outro lado, para o índice “Noites Temperadas” (Nt) (Figura 35-c), é evidente que a ocorrência de noites com $T_{min} > 12^{\circ}\text{C}$ não é comum em todos os setores. Porcentagens significativas de Nt (5 - 55%) aparecem nas ZCL abertas de edifícios médios e altos (5 e 4) e nas ZCL compactas (3), onde se destacam as estações IK (19,92%) e HD (53,55%). A alta ocorrência de noites com $T_{min} > 12^{\circ}\text{C}$ nestes setores, pode sugerir a presença da ICU por boa parte do ano.

A figura 36 mostra os percentuais das categorias baseadas na sensação térmica, considerando os dados de T_{med} . A primeira observação é que as estações não apresentam valores T_{med} considerados como “muito frios” e “quentes”, mas a observação mais importante é que as

porcentagens de valores “frios” são consideravelmente reduzidas das ZCL abertas para as compactas. Sendo assim, é evidente que as porcentagens catalogadas como “frios” são reduzidos pela metade a partir da estação Tr (ZCLD) (62,09%) até as ZCL abertas de baixa altura (9, 6, B) (32-42%). Da mesma forma, as ZCL abertas de edifícios médios e altos (5 e 4) e compactas (3) sofrem uma redução considerável dos valores de T_{med} considerados “frios” durante o ano (4-10%). Esta redução na porcentagem da categoria de “frios” é acompanhada por um aumento na categoria “agradável” das ZCL abertas para as ZCL compactas, sendo que as ZCL abertas de edifícios altos e médios (5 e 4) e compactos (3) tem uma grande porcentagem (>90%). Finalmente, as estações IK e HD registram algumas porcentagens na categoria “quente” que não excedem 10,5%.

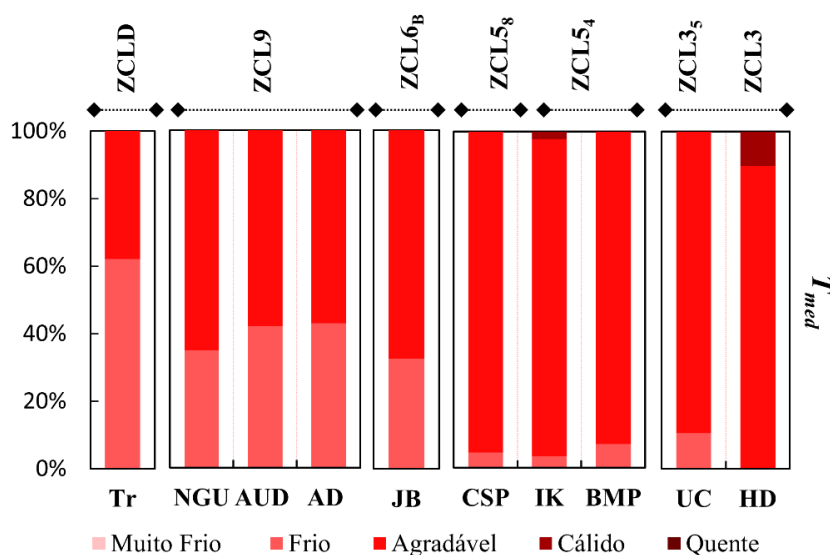


Figura 36. Porcentagens de ocorrências para as categorias baseadas na sensação térmica (Muito Frio <20°C, Frio = 10-14°C, Agradável = 14-18°C, Cálido = 18-24°C e Quente => 24°C) para a temperatura do ar de acordo com os dados da Temperatura Média (T_{med}) para os diferentes setores e suas ZCL nos quais foram classificados.

A Figura 37 mostra a variação nas porcentagens dos índices com base na temperatura para três horários diferentes ($T_{7:00}$, $T_{13:00}$ e $T_{19:00}$) e a figura 38 mostra a variação dos percentuais de acordo com as categorias de sensação térmica. Pode ser visto que os índices DDA e DDR não são apresentados com grandes porcentagens ao mesmo tempo para cada hora. Para $T_{7:00}$ (Figura 37-a), apenas porcentagens são apresentadas para DDA , sugerindo que há uma necessidade de aquecimento no início da manhã na maioria dos setores da cidade. Essa necessidade de aquecimento pode ser sustentada pela observação das categorias de sensação

térmica (Figura 38-a) com maiores porcentagens para esta hora nas categorias “muito frias” e “frias”.

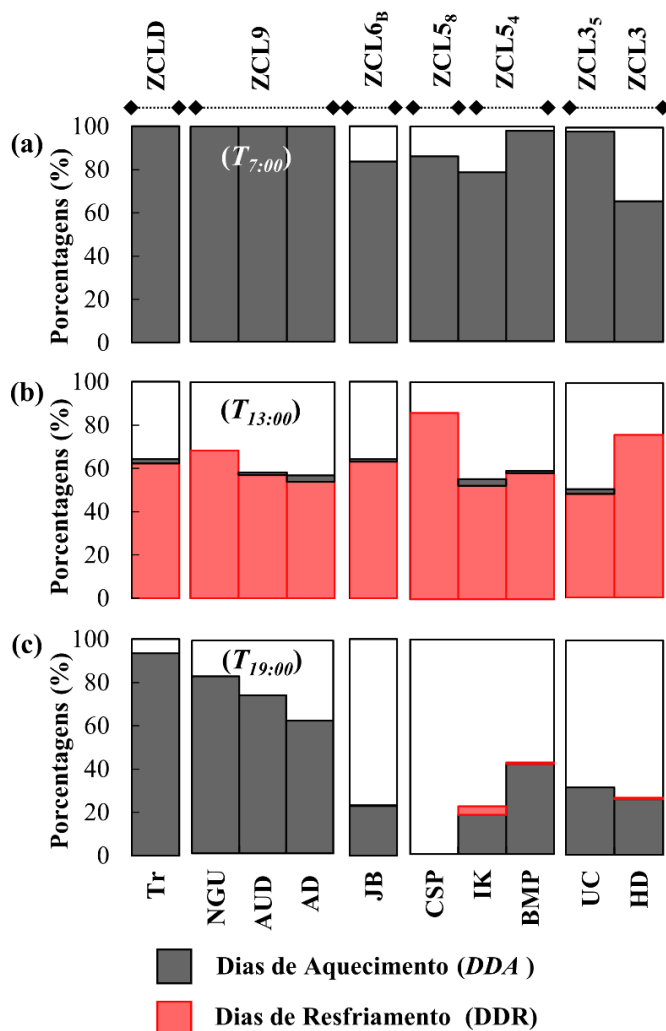


Figura 37. Percentual de ocorrências para os diferentes índices baseados na temperatura do ar horaria (“Dias de Aquecimento” =DDA e “Dias de Resfriamento” =DDR) para o início da manhã ($T_{7:00}$) (a), meio dia ($T_{13:00}$) (b) e início da noite ($T_{19:00}$) (c) para os diferentes setores e suas ZCL em que foram classificadas.

Quanto à variação dos índices e categorias de acordo com as ZCL, observa-se que para o DDA não é muito claro (Figura 37-a). As porcentagens são levemente reduzidas das ZCL abertas de edifícios baixos, médios e altos (6,4,5) e para as ZCL compactas (3), com exceção da BMP e UC, que, sendo setores localizados nos limites da cidade, aumentam o número de dias com necessidade de aquecimento ao amanhecer. A variação entre as ZCL é muito mais clara para a categoria de sensação térmica “muito frio” (Figura 38-a), com a redução da porcentagem ocorrendo das ZCL abertas para os compactas. Pode ser visto que as ZCL abertas

de edifícios baixos, médios e altos (6,4,5) e compactas (3) têm metade da percentagem (<12%) que as ZCL9 e ZCLD (Tr) (30-45%). No entanto, a categoria “fria” é predominante em todas as estações. Destaca-se a redução evidenciada nas estações classificadas nas ZCL 4,5,6 e 3 para as categorias “muito frio” e “frio”. A categoria “agradável” aparece com percentuais significativos (13-35%). Porém, a ausência de percentagens desta categoria para as estações BMP e UC sugerem que a localização é um fator importante se o interesse for reduzir inícios da manhã “muito frias” ou “frias”.

Para o meio dia ($T_{13:00}$), na figura 37-b observa-se que ao contrário da hora anterior ($T_{7:00}$), os DDA apresentam percentuais insignificantes (<3%). O índice com maior percentual em todas as estações é DDR (48 -26%), mostrando as necessidades de resfriamento ao meio-dia. Situação que é mostrada quando são observados os altos percentuais na categoria de sensação “quente” (> 50%) (Figura 38-b). No entanto, deve-se notar que a categoria “agradável” também tem uma proporção significativa ao meio-dia (15-50%). Em relação à variabilidade entre as ZCL nesta hora, esta não é evidente para DDR, nem em nenhuma das categorias de sensação térmica.

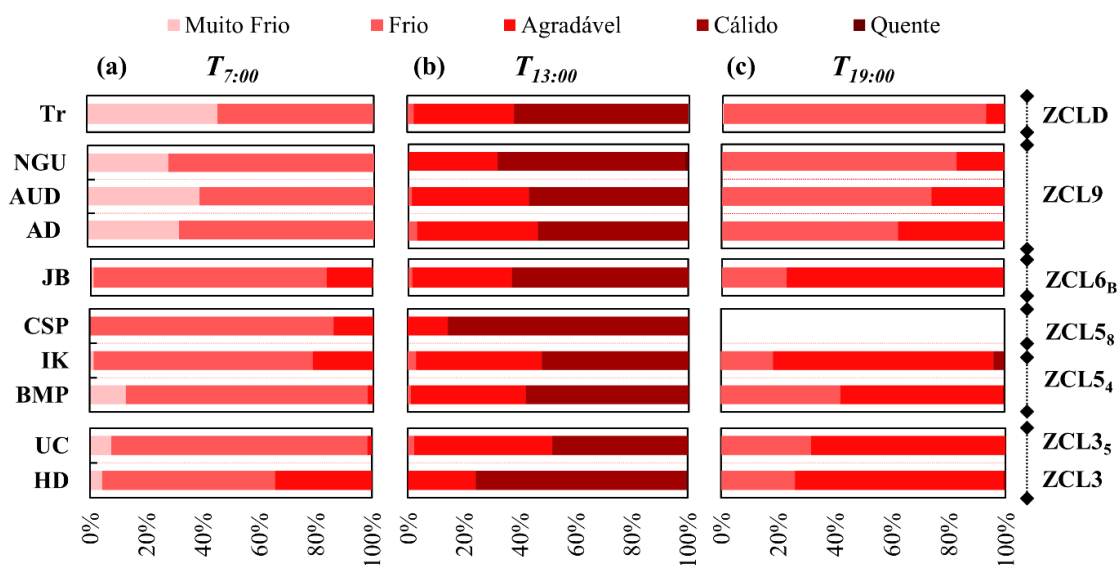


Figura 38. Percentagens de ocorrências para as categorias baseadas na sensação térmica (Muito Frio <20°C, Frio = 10-14°C, Agradável = 14-18°C, Cálido = 18-24°C e Quente = > 24°C) de acordo com as observações da temperatura do ar horárias para o início da manhã ($T_{7:00}$) (a), meio dia ($T_{13:00}$) (b) e início da noite ($T_{19:00}$) (c) para os diferentes setores e suas ZCL em que foram classificadas.

Finalmente, a figura 37-c mostra que o índice com a maior percentagem em todas as estações é *DDA* para $T_{19:00}$, com percentagens insignificantes para *DDR* (<3%), ou seja, no início da noite acontece o oposto do que o meio-dia ($T_{13:00}$). Neste caso, os setores também parecem mostrar a necessidade de aquecimento que acontece no início da manhã ($T_{7:00}$). No entanto, em $T_{19:00}$ essa necessidade de aquecimento expressa nas percentagens de *DDA* tem um decréscimo das ZCL abertas até as compactas. Este comportamento também é observado nas categorias de sensação térmica figura 38-c, sendo que a categoria “fria” diminui e a categoria “agradável” aumenta das ZCL abertas para as ZCL compactas. Nesta ordem de ideias, observa-se que no início da noite ($T_{19:00}$), a variação entre as ZCL é muito mais clara. Pode-se dizer também que as ZCL abertas com edifícios baixos, medianos altos (6, 5, e 4) e as ZCL compactas (3) podem reduzir para mais da metade a percentagem de *DDA*. E a categoria de sensação térmica de “fria” (18-50%) em relação as estações classificadas como ZCL9 e Tr (ZCLD) (62-94%), da mesma forma, as ZCLZ6, 5 e 4, podem aumentar a frequência de dias na categoria sensação térmica “agradável” em mais da metade (57-77%) em relação à ZCL9 (<37%) em $T_{19:00}$.

7.4.4 Diferenças entre as Zonas Climáticas Locais e suas Intensidade da Ilha de Calor Urbana

As Zonas Climáticas Locais podem expressar mais significativamente o efeito urbano na temperatura do ar (Fenner *et al.*, 2014). Esses efeitos podem ser mais facilmente encontrados com a diferença na temperatura do ar entre duas ZCL (Equação 2), expressando a intensidade da ICU ($\Delta T_{ZCLX-ZCLD}$) -. geralmente, a estação ou setor classificada na ZCLD (Gramíneas / Forrações / Plantas Baixas) e a referência rural (Leconte *et al.*, 2015; Skarbit *et al.*, 2017; Stewart, Oke e Krayenhoff, 2014).

A Figura 39 mostra as intensidades da ICU ($\Delta T_{ZCLX-ZCLD}$) para os valores diários (Figura 39-a) e horários (Figura 39-b) da temperatura. Observa-se que $\Delta T_{ZCLX-ZCLD}$ está aumentada para T_{min} e T_{med} da ZCL9 até a ZCL3 e de modo parecido acontece com $T_{7:00}$ e $T_{19:00}$. No entanto, para T_{max} e $T_{13:00}$, esse padrão é muito confuso. Para as estações classificadas como ZCL9 (NGU, AUD e AD) parece haver valores homogêneos em T_{med} e $T_{7:00}$. Porém, as intensidades em T_{min} e $T_{19:00}$ aumentam. E, ao contrário, as intensidades de T_{max} e $T_{13:00}$ tem uma diminuição para as estações da ZCL9, atingindo valores negativos em AUD e AD. Estas intensidades negativas durante o meio-dia são provavelmente causadas por valores de % Imp desses setores

que causam uma grande absorção de radiação solar durante o dia (Myint *et al.*, 2010; Sreedhar e Biligiri, 2016), especialmente em AD, que alcança uma porcentagem de 40,5%. A presença de ICU ($\Delta T_{ZCLX-ZCLD} > 1^{\circ}\text{C}$) para a ZCL9 ocorre apenas em T_{min} e $T_{7:00}$.

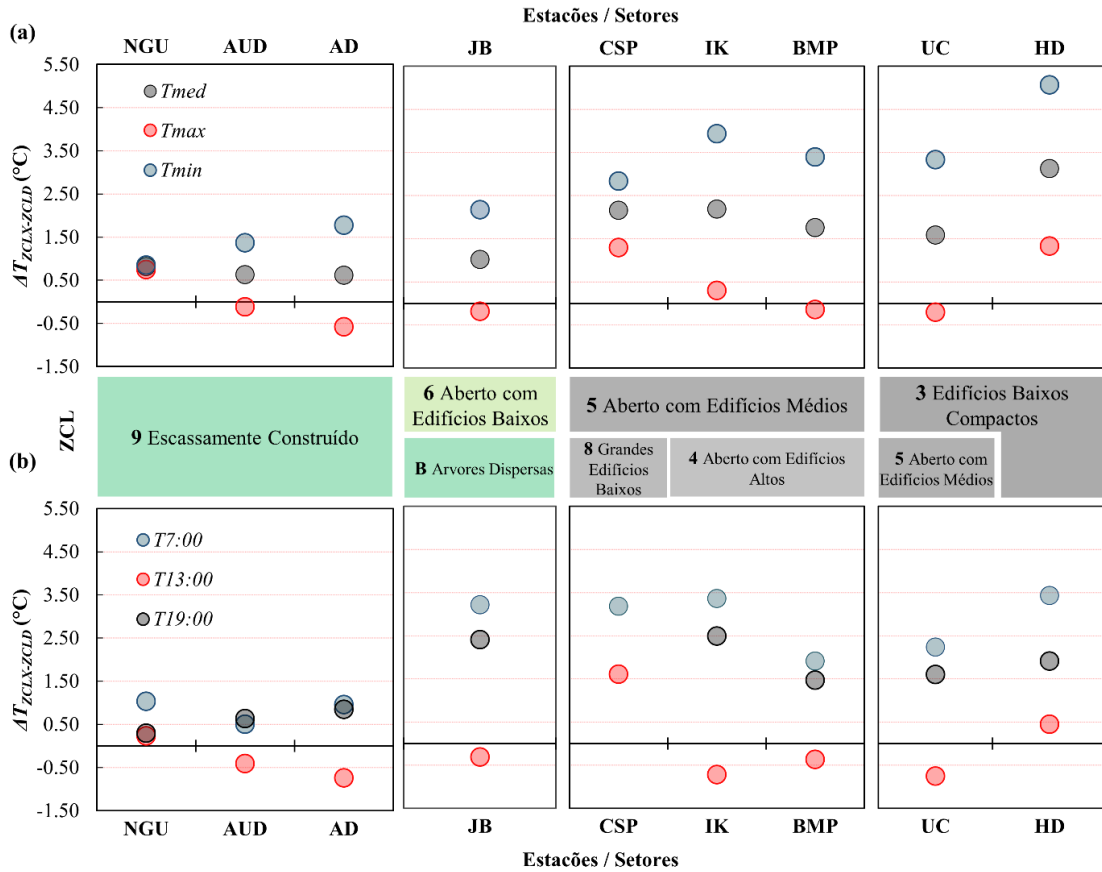


Figura 39. Variações da Intensidade da Ilha de Calor Urbana ($\Delta T_{ZCLX-ZCLD}$) para os diferentes setores classificadas dentro das ZCL de acordo com as observações da temperatura diária (T_{min} , T_{med} e T_{max}) (a) e temperatura horária ($T_{7:00}$, $T_{13:00}$ e $T_{19:00}$) (b).

O valor de $\Delta T_{ZCL6B-ZCLD}$ é ligeiramente aumentado em ZCL6_B (JB), que apresenta valores $>1^{\circ}\text{C}$ para T_{min} e T_{med} , $T_{7:00}$ e $T_{19:00}$. Os valores de $\Delta T_{ZCL6B-ZCL9}$ mostram que em T_{min} (0.84°C) T_{max} (-0.20°C), $T_{13:00}$ (-0.01°C) e T_{med} (0.33°C) não há muita diferença em relação a ZCL9. No entanto, estas diferenças começam a aumentar para as intensidades de $T_{7:00}$ (2.38°C) e $T_{19:00}$ (1.82°C). Isso sugere que em JB, seu grande parque urbano ($\%Perm = 50\%$) pode não ter um grande efeito de mitigação na intensidade de ICU durante o período noturno (das 19:00 às 7:00). Algo semelhante que já foi apontado em outros estudos (Ellis *et al.*, 2017; Moon *et al.*, 2018) e isso também explica os altos valores de temperatura horária presentes no início da manhã e noite (figura 34-a, c).

Na ZCL5 a diferença nas intensidades com ZCL6_B são evidentes na temperatura diária, conforme demonstrado pelos valores de $\Delta T_{ZCL5-ZCL6B}$ em T_{min} (1.22°C) e T_{med} (1.02°C). No entanto, não há grande diferença na temperatura horária, como mostrado por $T_{7:00}$ (-0.40) e $T_{19:00}$ (-0.43). Isso mostra que JB (ZCL6_B) tem um comportamento térmico semelhante a ZCL5. As estações classificadas na ZCL5 parecem não ser homogêneas nos valores de $\Delta T_{ZCL5-ZCLD}$ presentes para cada estação em T_{min} e T_{max} . Aqui CSP parece reduzir o valor de $\Delta T_{ZCL5-ZCLD}$ em T_{min} e $T_{7:00}$ e aumentá-lo em T_{max} e $T_{13:00}$, ou seja, uma baixa amplitude na temperatura é gerada. É um efeito causado por sua morfologia urbana, em que o valor de H/W é especialmente alto (0.44). Por outro lado, a presença de ICU ($\Delta T_{ZCL5-ZCLD} > 1^\circ\text{C}$) para a ZCL5 é dada principalmente em T_{min} , T_{med} , $T_{7:00}$ e $T_{19:00}$. No caso do T_{max} , isso tende a ter valores negativos, especialmente nas estações IK e BMP, podendo ser explicado pelo sombreamento gerado pelos edifícios altos ($Alt.Edif > 13\text{m}$) durante o dia.

Finalmente, para a ZCL3, os valores das intensidades ($\Delta T_{ZCL3-ZCLD}$) entre as duas estações (UC e HD) são bastante diferentes na temperatura diária (T_{min} , T_{med} e T_{max}) e na temperatura horária ($T_{7:00}$, $T_{13:00}$ e $T_{19:00}$). É esperado que os valores de UC em $\Delta T_{ZCL3-ZCLD}$ sejam tão altos quanto os de HD, mas devido à localização de UC nos limites da cidade, sua intensidade é reduzida. Esse efeito também acontece com BMP, como foi explicado anteriormente. Mesmo assim, a diferença entre ZCL9 ($\Delta T_{ZCL3-ZCL9}$) e ZCL6 ($\Delta T_{ZCL3-ZCL6B}$) é evidente em T_{min} (2.87 – 2.03°C), T_{med} (1.66-1.33°C) e somente com a ZCL9 em $T_{7:00}$ (2°C) e $T_{19:00}$ (-1.16°C). No entanto, a diferença com a ZCL5 ($\Delta T_{ZCL3-ZCL5}$) não é muito forte em T_{min} (0.81°C), T_{max} (0.08°C) e T_{med} (0.32°C), nem com a ZCL6 em $T_{7:00}$ (-0.38°C) e $T_{19:00}$ (-0.65°C).

Em resumo, os valores diários e horários da temperatura, sugerem um aumento de $\Delta T_{ZCLX-ZCLD}$ durante a noite, até o início da manhã, onde as diferenças entre as ZCL são mais evidentes com T_{min} , T_{med} , $T_{7:00}$ e $T_{19:00}$. Deve-se notar também que as intensidades obtidas para T_{max} e $T_{13:00}$ apresentaram valores negativos para a maioria das estações. Isso gerou uma falta de clareza em encontrar diferenças entre nas ZCL nos valores dessas temperaturas. Estes valores negativos na intensidade ($\Delta T_{ZCLX-ZCLD}$) sugerem a presença de “Ilha Fria Urbana” durante o dia, o que tem sido relatado por diversos estudos (Hinkel *et al.*, 2003; Kolokotroni, Giannitsaris e Watkins, 2006; Oke, 1982; Szymanowski e Kryza, 2009), mas é necessário fazer mais observações e análises para confirmar e entender um pouco melhor essa anomalia térmica ao meio dia.

8

Conclusões e Considerações finais

O capítulo final desta dissertação concentra-se nas deduções e implicações de acordo com os resultados dos capítulos anteriores. A primeira seção do capítulo trata dos parâmetros da forma urbana que mais afetam a Intensidade da Ilha de Calor Urbana, juntamente com a Densidade da População. A segunda seção resume a configuração espacial da Ilha de Calor Urbana e fornece algumas considerações a respeito dos modelos de predição. A terceira seção apresenta uma série de considerações sobre a utilidade das Zonas Climáticas Locais e destaca os diferentes padrões termais encontrados nas estações (setores) e suas Zonas Climáticas Locais. Finalmente, a última seção da dissertação contém sugestões para estudos futuros, baseados principalmente no potencial da cidade de Bogotá como um estudo de caso.

8.1 Efeito da Forma Urbana (criada pela Densidade da População) na intensidade da Ilha do Calor Urbano.

Esta dissertação mostrou a relação entre a Intensidade da Ilha de Calor Urbana (ΔT_{u-r}), a População (p) e a Densidade da População (DP) para a cidade de Bogotá, propondo um modelo de predição para responder aos diferentes setores da cidade. Foi demonstrado que a correlação entre ΔT_{u-r} e DP para diferentes setores dentro da mesma cidade resultou em um modelo confiável para prever o ICU (ΔT_{u-r}). A Densidade da População (DP) pode reconhecer setores com morfologias muito diferentes, ao contrário da relação $\Delta T_{u-r} - \log p$. A População (p), como visto em outros estudos, pode funcionar melhor em grandes escalas (para comparar cidades diferentes) ou se o grau de homogeneidade da cidade é alto ou simplesmente ignorar as características morfológicas dentro da mesma cidade.

Os resultados acima podem ser reforçados pela correlação mais alta para DP , que foram encontrados com a Fração de Superfície Permeável ($\%Perm$) e o Fator de Visão do Céu (FVC). É importante mencionar que, para densidades acima de 15.000 habitantes/km², os valores desses parâmetros têm pouca variação. Da mesma forma, estes parâmetros parecem ter uma grande influência na Intensidade da Ilha de Calor Urbana (ΔT_{u-r}), pois eles têm uma alta correlação. A influência da localização em ΔT_{u-r} é destacada, o que é observado pelo fato de algumas estações se afastarem da tendência das correlações, principalmente porque os valores de seus parâmetros são semelhantes, como no caso de HD e UC, que compartilham características similares (valores dos parâmetros parecidos), mas seus valores de ΔT_{u-r} são muito diferentes.

Levando em conta este estudo, pode-se dizer que parâmetros como a Fração de Superfície Permeável ($\%Perm$) e o Fator de Visão do Céu (FVC) têm alta correlação com a Intensidade da Ilha de Calor Urbana (ΔT_{u-r}) e a Densidade da População (DP), pois expressam diretamente o impacto que o desenvolvimento urbano tem sobre o meio ambiente. Ou seja, a $\%Perm$ está relacionado a superfícies verdes que contêm vegetação, áreas que são as mais afetadas na urbanização. Da mesma forma, o FVC expressa a abóbada celeste visível, que se torna obstruída com o desenvolvimento urbano. Considerando isso, o aumento da DP (que está associado à intensidade do desenvolvimento urbano e ao processo de urbanização) mostra uma redução no céu e nas áreas naturais, resultando num aumento na temperatura do ar, expresso em valores de $\Delta T_{u-r} > 1^\circ\text{C}$. Pode-se demonstrar, como ponto crítico, que as densidades acima

de 14.500 habitantes/km² possuem as maiores temperaturas, causando baixos valores em *FVC* e *%Perm*.

Da mesma forma, a Fração de Superfície Edificada (*%Edif*) e a Fração de Superfície Impermeável (*% Imp*), apesar de não possuírem correlações muito claras com a Intensidade da Ilha de Calor Urbana (ΔT_{u-r}), podem ser melhor explicados pela Densidade da População (*DP*), pois são parâmetros relacionados ao processo de urbanização. Ao realizar uma análise de correlação entre os parâmetros da forma urbana com ΔT_{u-r} e *DP*, é evidente que a relação não é clara em todos os casos. Os parâmetros com o menor coeficiente de determinação (R^2) para os parâmetros morfológicos urbanos são a Altura dos Edifícios (*Alt.Edif*) e a relação *H/W*. O baixo valor de R^2 para esses parâmetros é causado principalmente para o setor da estação BMP, pois seus altos valores nesses parâmetros não coincidem com seus baixos valores na *DP* e ΔT_{u-r} . Correlações altas são apresentadas entre *DP* e *%Edif* - *% Imp*, porém a correlação é muito baixa com ΔT_{u-r} .

Por fim nesta seção, ressalta-se que, embora os parâmetros demográficos, como a Densidade da População (*DP*), identifiquem possíveis diferenças na forma urbana dentro da cidade, eles não podem caracterizar as configurações dos setores. Destaca-se o caso do setor BMP, que não apresenta uma estrutura urbana tradicional de blocos e ruas. Isso demonstra a importância da configuração do setor urbano, que apresenta complexidade e diversidade na forma das edificações e na distribuição dos espaços públicos. É por isso que, é necessário considerar a influência do espaço público e a tipologia do edifício ao calcular e relacionar parâmetros que descrevam a geometria e a morfologia urbana, ou especificamente o cânion urbano.

8.2 Espacialização da Ilha de Calor Urbana e aplicação de outros modelos de predição em Bogotá

Foi observado que a distribuição da Intensidade da Ilha de Calor Urbana (ΔT_{u-r}) de Bogotá tem formas concêntricas, porém não diminui do centro da cidade para fora, como sugerido por outros estudos. Neste caso específico, existem vários centros e os valores mais altos podem estar concentrados principalmente no sul da cidade. Essa distribuição heterogênea reflete as diferenças morfológicas que afetam a Ilha de Calor Urbana.

Por fim, destaca-se a dificuldade de comparar o comportamento térmico urbano utilizando-se outros modelos de regressão desenvolvidos para outras cidades. Normalmente estes modelos são determinados por condições muito específicas de cada cidade ou região, bem como por outros métodos e protocolos. Assim, quando aplicado a outras partes do mundo, diferenças significativas podem ser observadas, restringindo a comparação. Da mesma forma, é importante considerar outros parâmetros e indicadores que possam melhorar os modelos de regressão, especialmente parâmetros relacionados à Camada de Cobertura Urbana, como o Fator de Visão do Céu e a velocidade do vento, pois a temperatura é determinada pelas diferentes características da superfície da Camada de Cobertura Urbana.

8.3 Aplicação e variação da temperatura do ar nas Zonas Climáticas Local de Bogotá

Observa-se que é muito complicado fazer com que os valores dos parâmetros da forma urbana coincidam na série de faixas ou intervalos propostos para classificações como as Zonas Climáticas Locais (ZCL), principalmente porque os setores da cidade costumam ter características únicas que se expressam na variedade de alturas de seus edifícios, maior vegetação ou maior espaço público, seja parques ou praças. Isso pode acontecer porque as ZCL ignoram esses fatos, pois integra a composição dos setores, mas não reconhece detalhadamente a configuração desses setores. A configuração espacial de um setor urbano, pode ser expressa na tipologia de seus edifícios ao entender a diversidade e a complexidade na forma de seus prédios e na distribuição de seu espaço público. A influência da tipologia dos edifícios é necessária no cálculo dos parâmetros que descrevem a geometria e a morfologia urbanas, ou especificamente o cânion urbano.

Ao explorar as diferenças no comportamento térmico entre as Zonas Climáticas Locais (ZCL), verifica-se que para as ZCL abertas e de baixa altura, as mudanças de temperatura do ar (T_{max} , T_{min} e T_{med}) são mais influenciadas pelas propriedades da Cobertura de Solo Urbano. Por outro lado, para as ZCL abertas de edifícios médios e altos e as ZCL compactas, as mudanças na temperatura do ar (T_{max} , T_{min} e T_{med}) são influenciadas pelas propriedades da Morfologia e Geometria urbana. A variação da temperatura do ar entre as ZCL e suas estações foi muito mais evidente na Temperatura Mínima (T_{min}), que é acompanhada por uma redução na amplitude térmica e que não ocorre nas demais observações diárias horárias da temperatura. Essa variação também ocorre em menor grau com os valores da Temperatura Média (T_{med}), e na temperatura

depois do pôr do sol 19:00 ($T_{19:00}$) e no começo da manhã ($T_{7:00}$), com os valores para $T_{7:00}$ sendo mais homogêneos entre as estações da mesma ZCL. Porém, para os valores diários da Temperatura Máxima (T_{max}) e no médio dia ($T_{13:00}$) é destacada a dificuldade de se encontrar um padrão mais claro na variação da temperatura do ar entre as ZCL.

Conclui-se que os índices baseados em temperatura mostram a utilidade das Zonas Climáticas Locais (ZCL) em entender as diferenças e variações de temperatura entre os diferentes setores urbanos. Intuitivamente, é esperado e entendido que a temperatura aumente da estação rural (Tr, ZCLD) para as ZCL compactas, mostrando a intensidade do processo de urbanização, e mostrando que a cidade e sua estrutura urbana geram um aquecimento na temperatura do ar. No entanto, este aquecimento não significa que os setores da cidade de Bogotá gerem altas temperaturas. Neste caso, o que a área urbana faz, é reduzir significativamente a presença de valores baixos na Temperatura do ar Mínima (T_{min}) e Média (T_{med}), e na temperatura do ar no começo da noite ($T_{19:00}$) e no começo da manhã ($T_{7:00}$) - como foi visto na redução progressiva dos índices “Dias de Aquecimento” (DDA) e “Noites Frias” (NFr), e nas categoria de sensação térmica “fria” e no aumento da categoria sensação térmica “agradável”.

Destaca-se a dificuldade de identificar diferenças térmicas entre cada Zonas Climática Local (ZCL) por meio dos dados da temperatura diária e horária. No entanto, as diferenças na Intensidade da Ilha de Calor Urbana ($\Delta T_{ZCLX-ZCLD}$) podem ser mais claras usando os dados da Temperatura do ar Mínima (T_{min}) e Média (T_{med}), e na temperatura do ar no começo da noite ($T_{19:00}$) e no começo da manhã ($T_{7:00}$). Mas para isso, as ZCL tem que estar agrupadas da seguinte forma: a ZCL9 (Escassamente Construído) tende a apresentar valores de $\Delta T_{ZCLX-ZCLD} < 1^{\circ}\text{C}$ em T_{med} , $T_{7:00}$ e $T_{19:00}$ e valores menores do que 2°C em T_{min} ; as ZCL abertas de edifícios baixos, médios e altos (B, 8,6,5,4) possuem valores de $\Delta T_{ZCLX-ZCLD}$ entre 1°C e 3°C para T_{med} , $T_{7:00}$ e $T_{19:00}$, e valores maiores do que 3°C em T_{min} ; para finalizar, as ZCL compactas (3) tem $\Delta T_{ZCLX-ZCLD} > 3^{\circ}\text{C}$ em T_{med} , $T_{7:00}$ e $T_{19:00}$, com valores superiores a 5°C em T_{min} . Isso sugere um aumento de $\Delta T_{ZCLX-ZCLD}$ durante a noite até as primeiras horas da manhã (presença da Ilha de Calor Urbana) e a possível presença da Ilha Fria Urbana durante as horas do meio dia.

Finalmente para esta seção, os setores altamente urbanizados que estão localizados nos limites da cidade, podem reduzir os efeitos na temperatura causados pelos parâmetros da forma urbana. Isso é demonstrado pelas estações UC e BMP, com seus valores de baixa temperatura no começo da manhã ($T_{7:00}$) e, no começo da noite ($T_{19:00}$), na redução da Intensidade da Ilha

de Calor Urbana ($\Delta T_{ZCLX-ZCLD}$) e o pequeno aumento nos percentagens da categoria de sensação térmica “agradável” para $T_{7:00}$ e $T_{19:00}$ em relação às estações classificadas nas demais ZCL. Esta influência da localização em UC e BMP também é evidenciada pelos índices baseados na temperatura “Dias de Aquecimento” (DDA), “Dias Frescos” (Df) e “Noites Frias” (NFr), se for observado que suas porcentagens são um pouco maiores do que as outras estações (setores) com características semelhantes.

8.4 Futuros Estudos

Nesta dissertação, variáveis demográficas da forma urbana foram associadas com dados de temperatura do ar para entender a influência destes sobre o desenvolvimento do fenômeno da Ilha de Calor Urbana por meio de sua intensidade. Isso ofereceu uma primeira impressão do efeito do ambiente urbano sobre o meio ambiente. Estudos futuros devem considerar outras variáveis, especialmente aquelas relacionadas aos elementos do clima, por exemplo, o vento (velocidade e fluxo), e como este é afetado pela estrutura urbana de Bogotá. Da mesma forma, deve-se aprofundar mais no fenômeno da Ilha de Calor Urbana e especialmente, na eventual existência da Ilha Fria Urbana durante o dia na cidade.

Outras variáveis climáticas, como a umidade relativa, radiação e insolação nos diferentes cânions urbanos da cidade de Bogotá, são fundamentais para entender melhor como as características da Camada de Cobertura Urbana afetam a atividade e o bem-estar dos habitantes da cidade. De acordo com isso, existe uma grande necessidade de realizar estudos de conforto térmico na cidade de Bogotá. Para isso é necessário, além de realizar medições de temperatura, realizar questionários aos habitantes da cidade e calcular os índices de conforto térmico baseados no balanço de calor.

Os resultados desses estudos podem permitir, por exemplo, conhecer realmente quais são as necessidades de aquecimento ou resfriamento da cidade, o que permitirá uma análise energética da cidade.

Bogotá, apesar de ser uma cidade localizada nos trópicos, não apresenta altas temperaturas devido a sua altitude, portanto não é possível aplicar integralmente soluções ou propostas feitas por outros estudos feitos no trópico. Conhecendo as condições atuais de conforto na cidade, será possível esclarecer o desenvolvimento de diretrizes para o desenho urbano com base nas características da forma urbana e determinar como esses parâmetros afetam positiva ou negativamente o ambiente urbano, com o objetivo de melhorar a

habitabilidade dos cidadãos, reduzir impactos negativos sobre o meio ambiente e começar a gerar interesse na importância do clima urbano por diferentes atores urbanos.

As diferentes etapas desta dissertação utilizaram parâmetros de forma urbana precisos e de alta qualidade. Isso foi possível graças ao Mapa de Referência da cidade fornecido pelo escritório de planejamento da cidade que o atualiza trimestralmente, o que permitiu, no momento de calcular os parâmetros, a representação em detalhe da realidade dos setores da cidade. Da mesma forma, a rede de estações meteorológicas da cidade oferece a oportunidade de consultar longas séries de dados climáticos urbanos. Essas ferramentas públicas têm que ser exploradas em estudos futuros, por exemplo, os dados em formato SIG de diferentes elementos urbanos oferecidos pelo Mapa de Referência da cidade podem permitir o desenvolvimento de mapas muito precisos da superfície urbana, especialmente mapas climáticos baseados nas Zonas Climáticas Locais ou em climatopes. Esses mapas podem ser muito úteis como ferramentas de planejamento urbano que consideram o clima como um determinante. Para resumir, a cidade de Bogotá oferece um contexto muito interessante, que permitirá avanços no campo do clima urbano, devido às suas características, que aguardam ser descobertas e estudadas.

Referências

ALEXANDER, P. J.; MILLS, G. Local climate classification and Dublin's urban heat island. **Atmosphere**, v. 5, n. 4, p. 755–774, 2014.

ARNFIELD, A. J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **International Journal of Climatology**, v. 23, n. 1, p. 1–26, 2003.

ARNFIELD, A. J. **How to do Urban Climatology: a Personal View of the Legacy of Professor Tim Oke**Sixth International Conference on Urban Climate. **Anais...**Goteborg, Sweden: 2006Disponível em: <<http://blogs.ubc.ca/toke/files/2015/12/Arnfield-2006.pdf>>

ASSAWAMARTBUNLUE, K. An Investigation of Cooling and Heating Degree-Hours in Thailand. **Journal of Clean Energy Technologies**, v. 1, n. 2, p. 87–90, 2013.

BAI, X. *et al.* Six research priorities for cities and climate change. **Nature**, v. 555, p. 23–25, 2018.

BAKARMAN, M. A.; CHANG, J. D. The Influence of Height/width Ratio on Urban Heat Island in Hot-arid Climates. **Procedia Engineering**, v. 118, p. 101–108, 2015.

BARTIER, M. P.; KELLER, C. P. Multivariate interpolation to incorporate thematic surface data using inverse distance weighting (IDW). **Computers & Geosciences**, v. 22, n. 7, p. 795–799, 1996.

BECHTEL, B. *et al.* Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 4, n. 1, p. 199–219, 2015.

BHATTI, S. S.; TRIPATHI, N. K. GIScience & Remote Sensing Built-up area extraction using Landsat 8 OLI imagery. **GIScience & Remote Sensing**, v. 51, n. 4, p. 445–467, 2014.

BOTTYÁN, Z. *et al.* The relationship between built-up areas and the spatial development of the mean maximum urban heat island in Debrecen, Hungary. **International Journal of Climatology**, v. 25, n. 3, p. 405–418, 200

CAVALCANTE, M. R. C.; ÁVILA, L.; BARBIRATO, G. M. **Efeito microclimático da presença de vegetação em recintos urbanos em maceió – a**ENCAC-ELACAC.

Anais...Maceió, Alagoas: 2005Disponível em: <http://www.infohab.org.br/encac/files/2005/ENCAC05_0423_432.pdf>

CHEN, L. *et al.* Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: A GIS-based simulation approach. **International Journal of Climatology**, v. 32, n. 1, p. 121–136, 2012.

CHENG, X. *et al.* Influence of Park Size and Its Surrounding Urban Landscape Patterns on the Park Cooling Effect. **Journal of Urban Planning and Development**, v. 141, n. 3, 2014.

COSEO, P.; LARSEN, L. How factors of land use/land cover, building configuration, and adjacent heat sources and sinks explain Urban Heat Islands in Chicago. **Landscape and Urban Planning**, v. 125, p. 117–129, 2014.

COUTTS, A. M. *et al.* Thermal infrared remote sensing of urban heat: Hotspots, vegetation, and an assessment of techniques for use in urban planning. **Remote Sensing of Environment**, v. 186, p. 637–651, 2016.

COUTTS, A. M.; BERINGER, J.; TAPPER, N. J. Impact of increasing urban density on local climate: Spatial and temporal variations in the surface energy balance in Melbourne, Australia. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 46, n. 4, p. 477–493, 2007.

DU, H. *et al.* Research on the cooling island effects of water body: A case study of Shanghai, China. **Ecological Indicators**, v. 67, p. 31–38, 2016.

EIDT, R. C. The climatology of South America. **Biogeography and Ecology in South America**, p. 54-81, 1969.

ELIASSON, I. Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use. **Atmospheric Environment**, v. 30, n. 3, p. 379–392, 1996.

ELLIS, K. N. *et al.* Summer temperature variability across four urban neighborhoods in Knoxville, Tennessee, USA. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 127, n. 3–4, p. 701–710, 2017.

EMMANUEL, M. R. Urbanization and climate. *In: An Urban Approach to Climate-Sensitive*

Design. London and New York: Spon Press, 2005. p. 21–51.

EMMANUEL, R.; JOHANSSON, E. Influence of urban morphology and sea breeze on hot humid microclimate: The case of Colombo, Sri Lanka. **Climate Research**, v. 30, n. 3, p. 189–200, 2006.

EMMANUEL, R.; KRÜGER, E. Urban heat island and its impact on climate change resilience in a shrinking city: The case of Glasgow, UK. **Building and Environment**, v. 53, p. 137–149, 2012.

FENG, X.; MYINT, S. W. Exploring the effect of neighboring land cover pattern on land surface temperature of central building objects. **Building and Environment**, v. 95, p. 346–354, 2016.

FENNER, D. *et al.* Spatial and temporal air temperature variability in Berlin, Germany, during the years 2001-2010. **Urban Climate**, v. 10, p. 308–331, 2014.

_____. Intra and inter “local climate zone” variability of air temperature as observed by crowdsourced citizen weather stations in Berlin, Germany. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 26, n. 5, p. 525–547, 2017.

FOUNDA, D. *et al.* Analysis of mean, maximum, and minimum temperature in Athens from 1897 to 2001 with emphasis on the last decade: Trends, warm events, and cold events. **Global and Planetary Change**, v. 44, n. 1–4, p. 27–38, 2004.

GAITAN, M.; CANCINO, J.; BEHRENTZ, E. Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá. **Revista de ingeniería. Universidad de los Andes.**, v. 26, p. 81–92, 2007.

GÁL, T.; BECHTEL, B.; UNGER, J. **Comparison of two different Local Climate Zone mapping methods** ICUC9, Toulouse, France (20-24 July). **Anais...Toulouse, France: 2015** Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/2f1f/da840c577a6d649dd77575b80d9b96b3e0d9.pdf>>

GELETIČ, J.; LEHNERT, M. GIS-based delineation of local climate zones: The case of medium-sized Central European cities. **Moravian Geographical Reports**, v. 24, n. 3, p. 2–12, 2016.

GOH, K. C.; CHANG, C. H. The relationship between height to width ratios and the heat island

intensity at 22:00 h for Singapore. **International Journal of Climatology**, v. 19, n. 9, p. 1011–1023, 1999.

GOLANY, G. S. Urban design morphology and thermal performance. **Atmospheric Environment**, v. 30, n. 3, p. 455–465, 1996.

GONZÁLEZ, O. C. **Metodología para el Calculo del Confort Climático en Colombia**. Bogotá, D.C.: [s.n.]. Disponível em: <<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/007574/Metodologiaconfort.pdf>>.

GRIMMOND, C. S. B. *et al.* Climate and more sustainable cities: Climate information for improved planning and management of cities (Producers/Capabilities Perspective). **Procedia Environmental Sciences**, v. 1, n. 1, p. 247–274, 2010.

HIEN, W. N.; JUSUF, S. K. Air Temperature Distribution and the Influence of Sky View Factor in a Green Singapore Estate. **Journal of Urban Planning and Development**, v. 136, n. 3, p. 261–272, 2010.

HINKEL, K. M. *et al.* The urban heat island in winter at Barrow, Alaska. **International Journal of Climatology**, v. 23, n. 15, p. 1889–1905, 2003.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES IDEAM. **Solicitud de informacion - IDEAM**. Disponível em: <<http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>>. Acesso em: 20 jun. 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGÍA. **Bogotá vivió el día más caluroso de su historia 25.1°C**. Disponível em: <<http://www.inm.gov.co/index.php/sala-prensa/noticias/328-bogota-vivio-el-dia-mas-caluroso-de-su-historia-25-1-c>>. Acesso em: 28 maio. 2018.

JAUREGUI, E. Tropical urban climates: review and assessment. *In*: OKE, T. R. (Ed.). **Urban Climatology and its Applications with Special Regard to Tropical Areas**. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 1986. p. 26–46.

JOHANSSON, E. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. **Building and Environment**, v. 41, n. 10, p. 1326–1338, 2006.

KAKON, A. N. *et al.* Assessment of Thermal Comfort in Respect to Building Height in a High-Density City in the Tropics Anisha Noori Kakon , Mishima Nobuo , Shoichi Kojima and Taguchi Yoko Department of Architecture and Civil Engineering , Saga University , Saga ,

Japan. **American J. of Engineering and Applied Sciences**, v. 3, n. 3, p. 545–551, 2010.

KOLOKOTRONI, M. *et al.* A validated methodology for the prediction of heating and cooling energy demand for buildings within the Urban Heat Island: Case-study of London. **Solar Energy**, v. 84, n. 12, p. 2246–2255, 2010.

KOLOKOTRONI, M.; GIANNITSARIS, I.; WATKINS, R. The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies. **Solar Energy**, v. 80, n. 4, p. 383–392, 2006.

KOTHARKAR, R.; SURAWAR, M. Land Use, Land Cover, and Population Density Impact on the Formation of Canopy Urban Heat Islands through Traverse Survey in the Nagpur Urban Area, India. **Journal of Urban Planning and Development**, v. 142, n. 1, 2016.

LECONTE, F. *et al.* Using Local Climate Zone scheme for UHI assessment: Evaluation of the method using mobile measurements. **Building and Environment**, v. 83, p. 39–49, 2015.

LEHNERT, M. *et al.* Urban field classification by “local climate zones” in a medium-sized Central European city: the case of Olomouc (Czech Republic). **Theoretical and Applied Climatology**, v. 122, n. 3–4, p. 531–541, 2015.

MASIERO, E.; SOUZA, L. C. L. DE. Variação de umidade absoluta e temperatura do ar intraurbano nos arredores de um corpo d’água. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 4, p. 25–39, 2013.

MASIERO, É.; SOUZA, L. C. L. DE. Improving urban thermal profile with trees and water features. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Urban Design and Planning**, v. 169, n. 2, p. 66–77, 2016.

MATZARAKIS, A.; RUTZ, F.; MAYER, H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: Basics of the RayMan model. **International Journal of Biometeorology**, v. 54, n. 2, p. 131–139, 2010.

MATZARAKIS, A.; THOMSEN, F. **Heating and Cooling Degree Days as an Indicator of Climate Change in Freiburg**In 89th AMS Annual Meeting, Fourth Symposium on Policy and Socio-Economic Research,. **Anais...Phoenix, AZ: 2009**Disponível em: <https://ams.confex.com/ams/89annual/techprogram/paper_142232.htm>

MEMON, R. A.; LEUNG, D. Y. C.; CHUNHO, L. I. U. A review on the generation , determination and mitigation of Urban Heat Island. **Journal of Environmental Sciences**, v. 20, n. 1, p. 120–128, 2008.

MIDDEL, A. *et al.* Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones. **Landscape and Urban Planning**, v. 122, p. 16–28, 2014.

MILLS, G. *et al.* **An Introduction to the WUDAPT project** Proceedings of the ICUC9. Meteo France. **Anais...**Toulouse, France: 2015Disponível em: <http://www.wudapt.org/wp-content/uploads/2015/05/Mills_etal_ICUC9.pdf>

MOHAJERANI, A.; BAKARIC, J.; JEFFREY-BAILEY, T. The urban heat island effect , its causes , and mitigation , with reference to the thermal properties of asphalt concrete. **Journal of Environmental Management**, v. 197, p. 522–538, 2017.

MONTEIRO, A.; FERNANDES, A. A geoestatística: uma incursão exploratória a considerar no domínio da climatologia urbana? **Caderno de Geografia**, v. 15, p. 61–73, 1996.

MOON, S.-Y. *et al.* Urban Green Space Layouts and Urban Heat Island: Case Study on Apartment Complexes in South Korea. **Journal of Urban Planning and Development**, v. 144, n. 2, 2018.

MUELLER, T. G. *et al.* Map Quality for Ordinary Kriging and Inverse Distance Weighted Interpolation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 6, p. 2042–2047, 2004.

MYINT, S. W. *et al.* Combined Effects of Impervious Surface and Vegetation Cover on Air Temperature Variations in a Rapidly Expanding Desert City. **GIScience & Remote Sensing**, v. 47, n. 3, p. 301–320, 2010.

NAKATA-OSAKI, C. M.; SOUZA, L. C. L.; RODRIGUES, D. S. THIS – Tool for Heat Island Simulation: A GIS extension model to calculate urban heat island intensity based on urban geometry. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 67, p. 157–168, 2018.

NUNEZ, M.; OKE, T. R. **The Energy Balance of an Urban Canyon****Journal of Applied Meteorology**, 1977. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0450%281977%29016%3C0011%3ATEBOAU%3E2.0.CO%3B2>>

NÚÑEZ PEIRÓ, M.; SÁNCHEZ-GUEVARA SÁNCHEZ, C.; NEILA GONZÁLEZ, F. J. Source area definition for local climate zones studies. A systematic review. **Building and**

Environment, v. 148, p. 258–285, 2019.

OKE, T. R. City size and the urban heat island. **Atmospheric Environment**, v. 7, n. 8, p. 769–779, 1973.

_____. The distinction between canopy and boundary - layer urban heat islands. **Atmosphere**, v. 14, n. 4, p. 268–277, 1976.

OKE, T. R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. **J. Climatology**, v. 1, n. 3, p. 237–254, 1981.

OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 108, n. 455, p. 1–24, 1982.

OKE, T. R. **Boundary Climate Layers**. Second ed. [s.l.] Taylor & Francis e-Library, 2002, 1987.

OKE, T. R. **Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo-td_1250.pdf>.

_____. **Siting and Exposure of Meteorological Instruments at Urban Sites** 27th NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application. **Anais...Banff**: To be published by Kluwer., 2004b

OKE, T. R.; MILLS, G.; CHRISTEN, A.; VOOGT, J. A. Urban Heat Island. *In: Urban Climates*. [s.l.] Cambridge University Press., 2017. p. 197–237.

OKE, T. R.; MILLS, G.; CHRISTEN, A.; VOOGT, J. A. 2 Concepts. *In: Urban Climates*. [s.l.] Cambridge University Press., 2017. p. 14–43.

OKE, T. R.; MILLS, G.; *et al.* Introduction. *In: Urban Climates*. [s.l.] Cambridge University Press., 2017. p. 1–13.

PARK, H. Features of the heat island in seoul and its surrounding cities. **Atmospheric Environment**, v. 20, n. 10, p. 1859–1866, 1986.

PERERA, N. G. R.; EMMANUEL, R. A “Local Climate Zone” based approach to urban planning in Colombo, Sri Lanka. **Urban Climate**, v. 23, p. 188–203, 2018.

PERINI, K.; MAGLIOCCO, A. Effects of vegetation, urban density, building height, and

atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 13, n. 3, p. 495–506, 2014.

REN, C. *et al.* **WUDAPT Global Initiative : Census of Global Cities I Background and Challenges II The Urban Data Gap.** [s.l.] World Urban Database, 2017.

ROTH, M. Review of atmospheric turbulence over cities. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 126, n. 564, p. 941–990, 2000.

ROTH, M. Review of urban climate research in (sub) tropical regions. **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 14, p. 1859–1873, 2007.

SAILOR, D. *et al.* Improving heat-related health outcomes in an Urban environment with science-based policy. **Sustainability**, v. 8, n. 10, p. 1–13, 2016.

SAILOR, D. J. A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 2, p. 189–199, 2011.

SANTAMOURIS, M. Cooling the cities - A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. **Solar Energy**, v. 103, p. 682–703, 2014.

SANTAMOURIS, M. Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions. **Science of the Total Environment**, v. 512–513, p. 582–598, 2015.

SCHWARZ, N. *et al.* Relationship of land surface and air temperatures and its implications for quantifying urban heat island indicators - An application for the city of Leipzig (Germany). **Ecological Indicators**, v. 18, p. 693–704, 2012.

SECRETARÍA DISTRITAL DE PLANEACIÓN; DANE. **Secretaría Distrital de Planeación SDP.** Disponível em: <http://www.sdp.gov.co/portal/page/portal/PortalSDP/POT_2016/que_es>. Acesso em: 13 jun. 2017.

SKARBIT, N. *et al.* Employing an urban meteorological network to monitor air temperature conditions in the ‘local climate zones’ of Szeged, Hungary. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. S1, p. 582–596, 2017.

- SOUZA, L. C. L. *et al.* Fator de visão do céu e intensidade de ilhas de calor na escala do pedestre. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 4, p. 155–167, 2010.
- SOUZA, L. C. L.; RODRIGUES, D. S.; MENDES, J. F. G. **Sky-view factors estimation using a 3D-gis extension** Eighth International IBPSA Conference. **Anais...** Eindhoven, Netherlands: 2003 Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/55603499.pdf>>
- SREEDHAR, S.; BILIGIRI, K. P. Comprehensive Laboratory Evaluation of Thermophysical Properties of Pavement Materials: Effects on Urban Heat Island. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 7, 2016.
- STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local climate zones for urban temperature studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 12, p. 1879–1900, 2012.
- STEWART, I. D.; OKE, T. R.; KRAYENHOFF, E. S. Evaluation of the “local climate zone” scheme using temperature observations and model simulations. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 4, p. 1062–1080, 2014.
- STEWART, I.; OKE, T. **Thermal Differentiation of Local Climate Zones Using Temperature Observations From Urban and Rural Field Sites** Ninth Symposium on the Urban Environment. **Anais...** Keystone, Colorado: 2010 Disponível em: <https://ams.confex.com/ams/19Ag19BLT9Urban/techprogram/paper_173127.htm>
- STONE, B.; RODGERS, M. O. Urban Form and Thermal Efficiency: How the Design of Cities Influences the Urban Heat Island Effect. **Journal of the American Planning Association**, v. 67, n. 2, p. 186–198, 2001.
- SUNG-NAM, O.; YEON-HEE, K.; MYUNG-SUK, H. Impact of urbanization on climate change in Korea, 1973-2002. **Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences**, v. 40, n. 6, p. 725–740, 2004.
- SZYMANOWSKI, M.; KRYZA, M. GIS-based techniques for urban heat island spatialization. **Climate Research**, v. 38, n. 2, p. 171–187, 2009.
- TERCERA COMUNICACIÓN NACIONAL DE CAMBIO CLIMÁTICO. **Cienciometría del cambio climático en colombia**. Bogotá D.C., Colombia: [s.n.]. Disponível em: <<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023632/Cienciometria.pdf>>.

TERJUNG, W. H. Climatology for geographers. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 66, n. 2, p. 199–220, 1976.

TOROK, S. J. *et al.* Urban heat island features of southeast Australian towns. **Australian meteorological magazine**, v. 50, n. 1, p. 1–13, 2001.

TOUCHAEI, A. G.; WANG, Y. Characterizing urban heat island in Montreal (Canada) - Effect of urban morphology. **Sustainable Cities and Society**, v. 19, p. 395–402, 2015.

TZAVALI, A. *et al.* Urban heat island intensity: A literature review. **Fresenius Environmental Bulletin**, v. 24, n. 12b, p. 4537–4554, 2015.

UNGER, J. *et al.* **Urban heat island development affected by urban surface factors** Idojaras (Quarterly Journal of Hungarian Meteorological Service), 2000. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11410/990>>

_____. Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: review and new approach. **Climate Research**, v. 27, p. 253–264, 2004.

UNGER, J. Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database. **International Journal of Environment and Pollution**, v. 36, n. 1–3, p. 59–80, 2009.

UNGER, J.; LELOVICS, E.; GÁL, T. Local climate zone mapping using GIS methods in Szeged. **Hungarian Geographical Bulletin**, v. 63, n. 1, p. 29–41, 2014.

UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL DE CATASTRO DISTRITAL *et al.* **Mapa de Referencia-IDECA**. Disponível em: <<https://www.ideca.gov.co/es/servicios/mapa-de-referencia>>. Acesso em: 3 set. 2018.

WANG, C. *et al.* Assessing local climate zones in arid cities: The case of Phoenix, Arizona and Las Vegas, Nevada. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 141, p. 59–71, 2018.

WANG, R. *et al.* Mapping the local climate zones of urban areas by GIS-based and WUDAPT methods: A case study of Hong Kong. **Urban Climate**, v. 24, n. June, p. 567–576, 2018.

WANG, Y.; AKBARI, H. Effect of Sky View Factor on Outdoor Temperature and Comfort in Montreal. **Environmental Engineering Science**, v. 31, n. 6, p. 272–287, 2014.

- WHITFORD, V.; ENNOS, A. R.; HANDLEY, J. F. “City form and natural process” - Indicators for the ecological performance of urban areas and their application to Merseyside, UK. **Landscape and Urban Planning**, v. 57, n. 2, p. 91–103, 2001.
- WONG, N. H.; YU, C. Study of green areas and urban heat island in a tropical city. **Habitat International**, v. 29, n. 3, p. 547–558, 2005.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation**. Seventh ed ed. Geneva 2, Switzerland: Publications Board World Meteorological Organization (WMO), 2008.
- XIAO, R. BO *et al.* Spatial pattern of impervious surfaces and their impacts on land surface temperature in Beijing, China. **Journal of Environmental Sciences**, v. 19, n. 2, p. 250–256, 2007.
- YAMASHITA, S. *et al.* On relationships between heat island and sky view factor in the cities of Tama River basin, Japan. **Atmospheric Environment**, v. 20, n. 4, p. 681–686, 1986.
- YANG, J.; WANG, Z. H.; KALOUSH, K. E. Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a “silver bullet” for mitigating urban heat island? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 830–843, 2015.
- YASUSHI, S.; EMI, M. Relation between Heat Island Intensity and City Size Indices/Urban Canopy Characteristics in Settlements of Nagano Basin, Japan. **Geographical Review of Japan**, v. 78, n. 12, p. 812–824, 2005.
- YOO, C. *et al.* ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Estimation of daily maximum and minimum air temperatures in urban landscapes using MODIS time series satellite data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 137, p. 149–162, 2018.
- ZHENG, Y. *et al.* GIS-based mapping of Local Climate Zone in the high-density city of Hong Kong. **Urban Climate**, v. 24, p. 419–448, 2018.