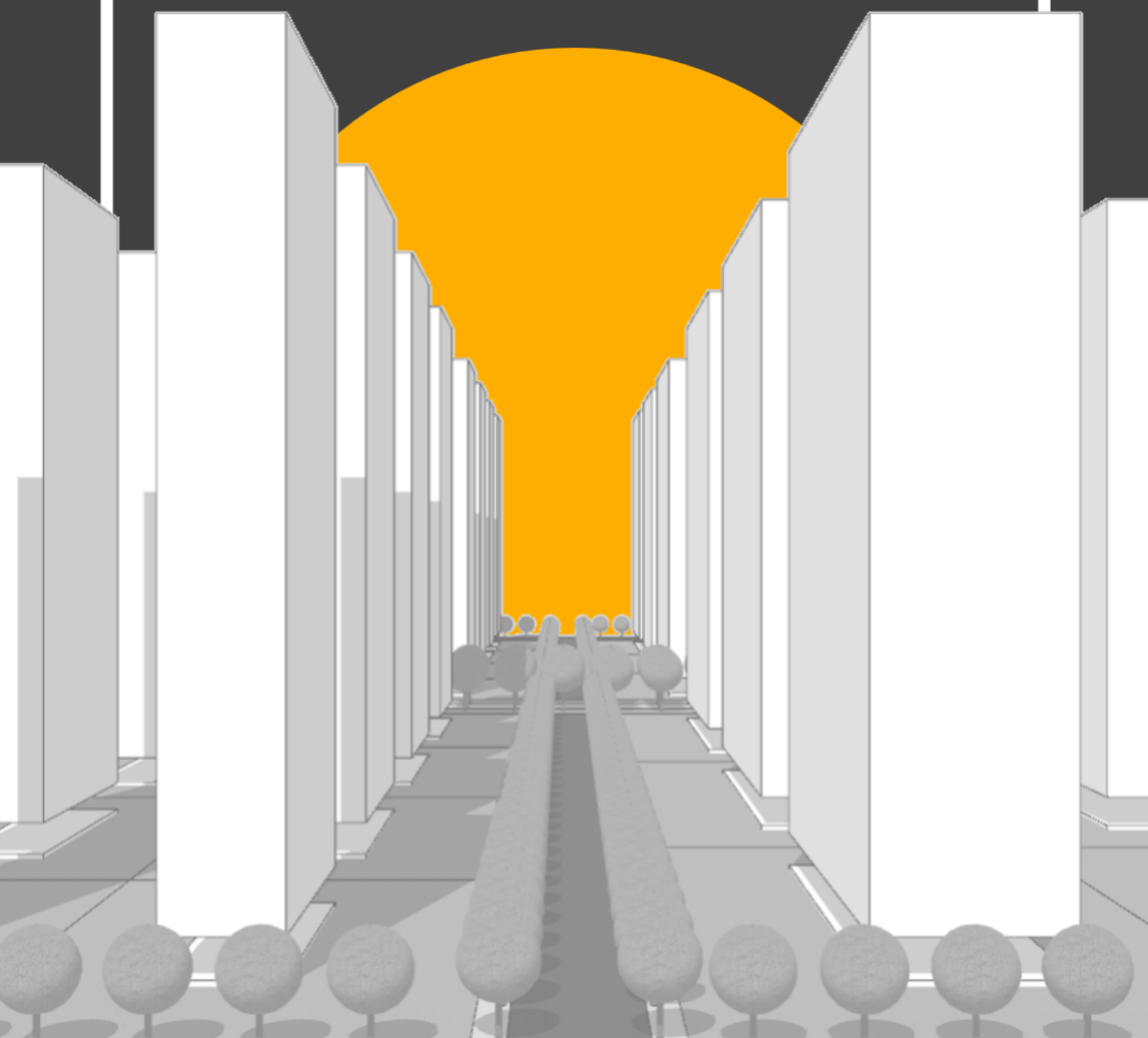


VERTICALIZAÇÃO E AMBIENTE TÉRMICO URBANO

estudo de cânions urbanos integrados à abordagem
bioclimática em cidade de clima semiárido

Luana Karla de Vasconcelos Brandão





UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO
DOUTORADO EM CIDADES

LUANA KARLA DE VASCONCELOS BRANDÃO

**VERTICALIZAÇÃO E AMBIENTE TÉRMICO URBANO:
estudo de cânions urbanos integrados à abordagem bioclimática em cidade de clima
semiárido.**

Maceió

2025

LUANA KARLA DE VASCONCELOS BRANDÃO

**VERTICALIZAÇÃO E AMBIENTE TÉRMICO URBANO:
estudo de cânions urbanos integrados à abordagem bioclimática em cidade de clima
semiárido.**

Tese de doutorado apresentada a Faculdade de
Arquitetura e Urbanismo da Universidade
Federal de Alagoas, como requisito final para
obtenção do grau de Doutora em Arquitetura e
Urbanismo.

Orientadora: Prof.^a. Dr.^a. Juliana Oliveira
Batista.

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Simone Carnaúba
Torres Rios

Maceió

2025

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Girlaine da Silva Santos – CRB-4 – 1127

B817v Brandão, Luana Karla de Vasconcelos.

Verticalização e ambiente térmico urbano: estudo de cânions urbanos integrados à abordagem bioclimática em cidade de clima semiárido / Luana Karla de Vasconcelos Brandão. – 2025.
298 f. : il.

Orientadora: Juliana Oliveira Batista.

Coorientadora: Simone Carnaúba Torres Rios.

Tese (Doutorado em Arquitetura) – Universidade Federal de Alagoas, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Maceió, 2025.

Bibliografia: f. 205- 229.

Apêndices: f. 230- 297.

Anexos: f. 298.

1. Microclima urbano - Arapiraca (AL). 2. Planejamento urbano- Fatores climáticos. 3. Clima semiárido- Arapiraca (AL). 4. Verticalização. 5. adensamento urbano. I. Título.

CDU: 72: 551.584.5(813.5)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

Luana Karla de Vasconcelos Brandão

VERTICALIZAÇÃO E AMBIENTE TÉRMICO URBANO:

estudo de cânions urbanos integrados à abordagem bioclimática em cidade de clima semiárido.

Tese de doutorado apresentada a Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Alagoas, como requisito final para obtenção do grau de Doutora em Cidades.

APROVADA em: 24/ Fevereiro / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



JULIANA OLIVEIRA BATISTA
Data: 25/02/2025 15:27:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a. Dr.^a. JULIANA OLIVEIRA BATISTA (Orientadora)
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – UFAL

Documento assinado digitalmente



SIMONE CARNAUBA TORRES RIOS
Data: 27/02/2025 20:29:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a SIMONE CARNAUBA TORRES RIOS (Coorientadora)
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – UFAL

Documento assinado digitalmente



JOSE FRANCISCO DE OLIVEIRA JÚNIOR
Data: 25/02/2025 15:46:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. JOSÉ FRANCISCO DE OLIVEIRA JÚNIOR (Examinador Interno)
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – UFAL

Documento assinado digitalmente



RICARDO VICTOR RODRIGUES BARBOSA
Data: 27/02/2025 18:45:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. RICARDO VICTOR RODRIGUES BARBOSA (Examinador Interno)
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – UFAL

Documento assinado digitalmente



CAIO FREDERICO E SILVA
Data: 27/02/2025 13:47:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. CAIO FREDERICO E SILVA (Examinador Externo)
Universidade de Brasília – UnB

Documento assinado digitalmente



VIRGINIA MARIA DANTAS DE ARAÚJO
Data: 25/02/2025 20:29:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a. Dr.^a. VIRGÍNIA MARIA DANTAS DE ARAÚJO (Examinadora Externa)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN

A Deus.

Ao meu amado marido, Rodrigo Barbosa Ferro.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço e louvo a Deus. Ao concluir essa importante jornada de minha vida, sou grata por Ele renovar a minha fé e força a cada dia. Gostaria de deixar aqui eternizado os versículos que ecoavam diariamente em minha mente e coração... Josué 1:9, Isaías 40:31 e Salmos 23:1-4.

Agradeço ao meu marido, Rodrigo, por tamanho amor e companheirismo. Este foi um sonho que dividimos juntos, e, ao longo desta pesquisa, você foi meu grande incentivador, refúgio e alegria para seguir perseverante!

Aos meus pais, Wilson e Cícera, pelo exemplo de determinação e coragem, que me motivaram a chegar a este momento! Aos meus irmãos, Leonardo e Pedro, pelo apoio emocional, especialmente nos momentos de jantar em família. À minha querida Avó, Ivantedi, e sogra, Joelma, pelo carinho e as orações.

À minha família, de modo geral, pela compreensão nos períodos que estive ausente e pela alegria dos momentos em que estávamos reunidos.

À minha orientadora, Professora Dr.^a. Juliana Oliveira Batista, pelos ensinamentos e por me conduzir com tamanho carinho e paciência, durante toda a pesquisa. Durante essa jornada, sua confiança e apoio emocional foram muito importantes para mim!

À minha coorientadora, Professora Dr.^a. Simone Carnaúba Torres Rios, por ser um grande exemplo em minha graduação, e pelas contribuições e incentivo durante o Doutorado.

Aos professores avaliadores, Dr. José Francisco de Oliveira Júnior, Dr. Ricardo Victor Rodrigues Barbosa, Dr. Caio Frederico e Silva, e Dr.^a. Virgínia Maria Dantas de Araújo pelas valiosíssimas contribuições dadas à esta tese. Em especial, deixo aqui o meu carinho e admiração pelo professor Ricardo, por me acompanhar desde as pesquisas de iniciação científica, na graduação, até este momento tão importante de minha vida. Assim como ao Professor Júnior e ao Kelvy Cardoso, pela importantíssima contribuição no tratamento estatístico dos dados.

Aos professores do PPGAU da UFAL, pelo conhecimento passado. À Luciane Prado, pela amabilidade em atender a cada aluno e, especialmente, pela compreensão conosco, do interior.

À minha turma, composta por pessoas maravilhosas que, diante do período inicial da pandemia, não pude conhecer pessoalmente, mas sempre dividimos palavras de incentivo e apoio emocional.

Às minhas amigas, Ana, Jéssica e Lara, por compartilharmos as alegrias e os desafios desde o mestrado ao doutorado. Dividir essa jornada com vocês é uma alegria!

Ao Prof. Dr. Michael Bruse e Sandra Donisch, da equipe ENVI-met, pela concessão gratuita da licença do *software* ENVI-met 5.5.1, pelo período de sete meses (novembro de 2023 a maio de 2024), primordial para a finalização da pesquisa preditiva.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro à pesquisa, através da bolsa de doutorado, em meu último ano.

A todos, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

O aumento populacional nos centros urbanos brasileiros tem impulsionado um gradativo processo de modificação do ambiente natural para o construído, que se intensifica nas cidades médias (população entre 100 e 500 mil habitantes). Essas transformações condicionam um clima típico urbano, muitas vezes caracterizado pelo aumento da temperatura do ar, fenômeno denominado ilhas de calor urbano (ICU). A verticalização apresenta-se como uma alternativa para viabilizar o aumento de densidade populacional, porém demanda a conformação de condições microclimáticas favoráveis ao conforto térmico no nível do pedestre, nos cânions urbanos. No planejamento urbano tradicional, o lote é a principal referência para o parcelamento do solo, enquanto a literatura aponta o modelo de cidade compacta como o mais sustentável e resiliente. Assim, a presente pesquisa teve como objetivo analisar a influência da verticalização nas condições de conforto térmico ao ar livre na escala do pedestre, considerando aspectos da forma urbana (geometria urbana e uso de vegetação), no contexto climático semiárido de Arapiraca/AL. Utilizou-se uma abordagem metodológica preditiva, fundamentada na simulação computacional de 16 cenários urbanos hipotéticos, elaborados a partir de uma fração urbana real com tendência à verticalização, tendo sido utilizado o *software* ENVI-met como ferramenta. Adotou-se o lote como unidade mínima de planejamento para a elaboração dos cenários, considerando-se a influência da geometria urbana e do uso de vegetação no microclima de cânions urbanos, utilizando parâmetros urbanísticos tradicionais e avançados e duas formas distintas de remembramento dos lotes. As variáveis climáticas analisadas foram: temperatura e umidade relativa do ar; temperatura radiante média e velocidade e direção dos ventos. Além disso, também foi calculado o índice de conforto PET. Foi desenvolvida a análise quantitativa e qualitativa comparativa do comportamento climático das variáveis consideradas nos diferentes cenários simulados (às 9h, 15h e 21h) e a análise de correlação entre os parâmetros climáticos e urbanísticos. Os resultados indicaram que dentre os parâmetros de modelagem dos cenários urbanos hipotéticos, o tipo de remembramento dos lotes e o formato dos edifícios podem potencializar os benefícios advindos da estratégia de maior influência na conformação do microclima do cânion urbano: a inserção de vegetação. Entretanto, foram identificadas limitações quanto a amenização climática proporcionada pela inserção da vegetação, relacionadas à configuração da calçada e áreas permeáveis disponíveis no solo urbano existente. A composição de uma Infraestrutura Verde influencia na amenização térmica das variáveis climáticas analisadas, ao passo que permite a redução do Fator de Céu Visível (FCV), mantendo uma massa edificada que potencialize a permeabilidade dos ventos na malha urbana. Além disso, o FCV e o Índice de Densidade Arbórea (IDA) foram os parâmetros mais influentes no comportamento das variáveis climáticas. A comparação de diferentes padrões de adensamento e vegetação permitiu identificar a ocorrência de desconforto térmico no intervalo entre as 9h e 18h, demonstrando o impacto negativo da verticalização no limite da saturação da ocupação dos lotes. Esse dado aponta a imprescindibilidade dos gestores e legisladores urbanos adotarem uma abordagem holística no processo de planejamento urbano. Nesse contexto, estudos preditivos se conformam como uma importante ferramenta para o estabelecimento dos parâmetros urbanísticos adequados para a regulação do crescimento e desenvolvimento urbano, a fim de gerar cidades sustentáveis e resilientes.

Palavras-chave: Microclima; Cânion Urbano; Conforto Térmico ao Ar Livre; Clima Semiárido; ENVI-met; Arapiraca/AL.

ABSTRACT

The growing population in Brazilian urban centers has triggered a gradual transformation from natural to built environments, a process particularly intensified in medium-sized cities (with populations between 100,000 and 500,000 inhabitants). These transformations contribute to the development of a typical urban climate, often characterized by increased air temperatures—known as the Urban Heat Island (UHI) phenomenon. Verticalization has emerged as an alternative to enable higher population density; however, it requires the establishment of favorable microclimatic conditions for outdoor thermal comfort at pedestrian level, especially in urban canyons. In traditional urban planning, the land lot is the main unit of land subdivision, whereas the literature emphasizes the compact city model as more sustainable and resilient. Accordingly, this study aimed to analyze the influence of verticalization on outdoor thermal comfort at pedestrian scale, considering urban form aspects (urban geometry and vegetation use) in the semi-arid climatic context of Arapiraca, Alagoas, Brazil. A predictive methodological approach was employed, based on computational simulations of 16 hypothetical urban scenarios, elaborated from a real urban area with a tendency toward verticalization. The ENVI-met software was used as the primary simulation tool. The land lot was adopted as the minimum planning unit for scenario development, considering the influence of urban geometry and vegetation on the microclimate of urban canyons. Both traditional and advanced urban planning parameters were applied, including two different types of lot merging. The climatic variables analyzed were: air temperature, relative humidity, mean radiant temperature, and wind speed and direction. In addition, the Physiological Equivalent Temperature (PET) thermal comfort index was calculated. A quantitative and qualitative comparative analysis of the climatic behavior of the variables across the different simulated scenarios (at 9 a.m., 3 p.m., and 9 p.m.) was conducted, along with correlation analysis between climatic and urban parameters. The results indicated that among the modeling parameters of the hypothetical urban scenarios, the type of lot merging and the building shape can enhance the benefits of the most influential strategy for shaping the microclimate in urban canyons: the insertion of vegetation. However, limitations were identified in the climatic mitigation provided by vegetation, mainly due to sidewalk configuration and the limited availability of permeable areas in the existing urban fabric. The composition of a Green Infrastructure was found to significantly influence the thermal mitigation of the climatic variables analyzed, while also enabling a reduction in the Sky View Factor (SVF), and maintaining a built mass that favors wind permeability across the urban grid. Additionally, SVF and the Tree Density Index (TDI) were the most influential parameters in the behavior of climatic variables. The comparison of different densification and vegetation patterns revealed the occurrence of thermal discomfort between 9 a.m. and 6 p.m., demonstrating the negative impact of verticalization at the saturation limit of lot occupation. These findings highlight the imperative for urban managers and policymakers to adopt a holistic approach to the urban planning process. In this context, predictive studies prove to be essential tools for establishing appropriate urban planning parameters to regulate urban growth and development toward sustainable and resilient cities.

Keywords: Microclimate; Urban Canyon; Outdoor Thermal Comfort; Semiarid Climate; ENVI-met; Arapiraca/AL.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Escalas climáticas urbanas.	38
Figura 2 - Esquema dos principais fluxos de troca de energia que compõem o SEB do cânion urbano (a) durante o dia e (b) durante a noite.....	42
Figura 3 - Impacto de um cânion urbano nas trocas de radiação. O caso é simplificado limitando a consideração a um único raio de entrada, com: (a) o recebimento de irradiação direta do feixe através do topo do desfiladeiro, (b) a primeira reflexão das faces do cânion, (c) segunda reflexão. A entrada e a reflexão da radiação difusa do céu não são representadas.	45
Figura 4 - Perfil vertical do vento a partir do tipo de rugosidade da superfície.	48
Figura 5 - Regimes de fluxo dos ventos em cânion urbano na RSL.	50
Figura 6 - Padrões de orientação dos ventos predominantes com relação ao eixo do cânion urbano: (a) vórtice transversal, (b) vórtices empilhados, (c) vórtice helicoidal e (d) canalização.....	51
Figura 7 - Efeito da radiação solar com base na relação H/W igual a 1 (a) e 4 (b).....	55
Figura 8 - Fator de Céu Visível (FCV).	56
Figura 9 - Fotografias obtidas com lente olho de peixe em diferentes locais urbanos.	56
Figura 10 - Orientação do cânion urbano quanto à incidência da radiação solar: (a) Perpendicular ao cânion; (b) Oblíqua ao cânion, (c) Paralela ao cânion.	57
Figura 11 - Orientação do cânion urbano quanto à direção predominante dos ventos: (a) Perpendicular ao cânion; (b) Oblíqua ao cânion, (c) Paralela ao cânion.....	58
Figura 12 - Curvas da trajetória do sol ao longo do ano. (a) Variação da posição do plano da trajetória do Sol no céu para um observador no hemisfério sul, em que a curva vermelha corresponde aos equinócios; a curva verde, ao solstício de inverno e a curvas azul, ao solstício de verão. (b) Projeção das órbitas no plano vertical e paralelo, ao horizonte do observador e à direção N-S, respectivamente. ...	59
Figura 13 - Representação simplificada de abordagens do estudo da superfície urbana (em azul).	63
Figura 14 - Localização de Arapiraca/ AL.....	71
Figura 15 - Composição da geomorfologia de Arapiraca.	71
Figura 16 - Área territorial urbana de Arapiraca/ AL em 2019.....	72
Figura 17 - Regiões de Influência: Alagoas, com destaque para Arapiraca.....	73
Figura 18 - Desempenho por ODS para a cidade de Arapiraca/ AL.	75

Figura 19 - Localização dos Residenciais Horizontais Fechados na malha urbana de Arapiraca em 2019.	79
Figura 20 – Cidades de médio porte, enfatizando-se seu crescimento urbano vertical.	81
Figura 21 - Localização (a) e Hospital Afra Barbosa em Arapiraca (b).	83
Figura 22 - Localização (a) e Hotel Plaza (b).	83
Figura 23 - Localização (a) e Hotel San Sebastian (b).	84
Figura 24 - Localização (a) e Complexo Hospitalar Manoel André (Hospital CHAMA) (b).	84
Figura 25 - Localização (a) e Residencial Ares do Alto (b).	85
Figura 26 - Localização (a) e Condomínio Residencial Flor de Lótus (b).	85
Figura 27 - Localização (a) e Centro Médico Santa Fé (b).	85
Figura 28 - Localização (a) e Residencial Espace Arapiraca (b).	86
Figura 29 - Localização (a) e Empresarial <i>Metropolitan</i> (b).	86
Figura 30 - Localização (a) e <i>Felicitá Residenziale</i> (b).	87
Figura 31 - Localização (a) e Ibis Hotel (b).	87
Figura 32 - Localização (a) e Faculdades Integradas Norte do Paraná (UNOPAR) (b).	88
Figura 33 - Localização (a) e Edifício Carlos Silva II (b).	88
Figura 34 - Localização (a) e Residencial Clube Jardim Europa (b).	88
Figura 35 – Edifícios em processo de construção (a) e em processo de lançamento (b).	89
Figura 36 – Delimitação do semiárido no Brasil (destaque em vermelho).	91
Figura 37 – Semiárido Alagoano, com destaque para a cidade de Arapiraca.	92
Figura 38 – Gráfico da temperatura média mensal do ar de Arapiraca.	93
Figura 39 – Gráfico da Umidade relativa do ar média mensal do ar de Arapiraca.	94
Figura 40 – Gráfico da Precipitação média mensal de Arapiraca.	95
Figura 41 – Quadro das rosas dos ventos com médias mensais de frequência e direção dos ventos em Arapiraca.	96
Figura 42 - Diagrama de regime de ventos com velocidade média horária (m.s-1) e direção predominante em Arapiraca/AL.	98
Figura 43 - Carta bioclimática para Arapiraca/AL, com dados do TRY (2010).	99

Figura 44 - Carta bioclimática para Arapiraca/AL no verão, com dados do TRY (2010).	100
Figura 45 - Etapas metodológicas da pesquisa.....	103
Figura 46 - Localização da Av. Dep. Ceci Cunha na cidade (a), recorte da Av. Dep. Ceci Cunha com a fração urbana selecionada (b) e vista na perspectiva do pedestre (c).	104
Figura 47 – Mapa da área selecionada em vista satélite (a), cartográfico (b) e para modelagem dos cenários (c).	105
Figura 48 – Mapas das áreas base para modelagem dos cenários com remembramento dos lotes LL (a) e FF (b).	107
Figura 49 – Ilustração das faixas de uso da calçada da via principal.	116
Figura 50 – Ilustração das faixas de uso da calçada da via secundária.	116
Figura 51 – Ilustração das faixas de uso da calçada, conforme a NBR 9050:2020.	117
Figura 52 – Tela do Software ENVI-met, versão 4.0.....	123
Figura 53 – Tela do SPACES no Software ENVI-met, versão 4.0.	123
Figura 54 – Localização dos receptores nos cenários.	128
Figura 55 – Localização e Perspectivas geradas pela ferramenta SPACES para os Pontos 01, 02 e 03 na altura do pedestre (1,5m), no cânion urbano do cenário LL-B.	136
Figura 56 – Fluxograma da análise dos resultados.....	142
Figura 57 – Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Via Secundária - TRM.....	144
Figura 58 – Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Calçada - TRM.	144
Figura 59 – Gráfico Boxplot da Via Secundária - TRM.	146
Figura 60 – Gráfico Boxplot da Calçada - TRM.....	146
Figura 61 – Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Via Secundária – Umidade Relativa do Ar.	153
Figura 62 – Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Calçada – Umidade Relativa do Ar.	153
Figura 63 – Gráfico Boxplot da Via Secundária – Umidade Relativa do Ar.	155
Figura 64 – Gráfico Boxplot da Calçada - Umidade Relativa do Ar.	155
Figura 65 – Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Via Secundária – Velocidade dos Ventos.	161
Figura 66 – Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da calçada – Velocidade dos Ventos. ..	161

Figura 67 – Gráfico Boxplot da Via Secundária - Velocidade dos Ventos.....	163
Figura 68 – Gráfico Boxplot da Calçada - Velocidade dos Ventos.	163
Figura 69 – Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Via Secundária – PET.....	168
Figura 70 – Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Calçada – PET.	169
Figura 71 – Gráfico Boxplot da Via Secundária - PET.....	170
Figura 72 – Gráfico Boxplot da Calçada - PET.	171
Figura 73 – Diagrama de dispersão – representação da regressão linear com base na correlação entre a TRM máxima (variável dependente) e o FCV (variável independente): coeficiente de determinação (R^2) = 0,997 (S)/ 0,981 (C).	186
Figura 74 – Diagrama de dispersão – representação da regressão linear com base na correlação entre a Umidade relativa do ar mínima (variável dependente) e o FCV (variável independente): coeficiente de determinação (R^2) = 0,958 (S)/ 0,903 (C).	186
Figura 75 – Diagrama de dispersão – representação da regressão linear com base na correlação entre a Velocidade média dos ventos (variável dependente) e o FCV (variável independente): coeficiente de determinação (R^2) = 0,765 (S)/ 0,761 (C).	187
Figura 76 – Diagrama de dispersão – representação da regressão linear com base na correlação entre o PET máximo (variável dependente) e o FCV (variável independente): coeficiente de determinação (R^2) = 0,994 (S)/ 0,974 (C).	187
Figura 77 – Diagrama de dispersão – representação da regressão linear com base na correlação entre a TRM máxima (variável dependente) e o IDA (variável independente): coeficiente de determinação (R^2) = 0,997 (S)/ 0,997 (C).	188
Figura 78 – Diagrama de dispersão – representação da regressão linear com base na correlação entre a Umidade relativa do ar mínima (variável dependente) e o IDA (variável independente): coeficiente de determinação (R^2) = 0,961 (S)/ 0,945 (C).	188
Figura 79 – Diagrama de dispersão – representação da regressão linear com base na correlação entre a Velocidade média dos ventos (variável dependente) e o IDA (variável independente): coeficiente de determinação (R^2) = 0,760 (S)/ 0,648 (C).	189
Figura 80 – Diagrama de dispersão – representação da regressão linear com base na correlação entre o PET máximo (variável dependente) e o IDA (variável independente): coeficiente de determinação (R^2) = 0,994 (S)/ 0,996 (C).	189

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Velocidade média mensal dos ventos (m/s^{-1}) em Arapiraca/AL.	97
Tabela 2. Matriz de correlação para os parâmetros urbanísticos aplicados aos cenários	180
Tabela 3. Coeficientes de correlação obtidos a partir das variáveis dependentes (variáveis ambientais da via secundária) e a as variáveis independentes (parâmetros urbanísticos).	181
Tabela 4. Coeficientes de correlação obtidos a partir das variáveis dependentes (variáveis ambientais da calçada) e a as variáveis independentes (parâmetros urbanísticos).	181

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Parâmetros construtivos do Código de Obras e Edificações de Arapiraca/ AL.	30
Quadro 2. Classificação das camadas atmosféricas que compõem o sistema climático urbano com base em escalas de comprimento verticais típicas.....	39
Quadro 3. Classificação das unidades urbanas.....	40
Quadro 4. Geometria da rua do cânion.....	54
Quadro 5. Classificação de cânions urbanos conforme a sua profundidade.	55
Quadro 6. Faixa de aceitabilidade térmica para diferentes tipos de clima.	66
Quadro 7. – Categorias de stress térmico de acordo com os índices UTCI e PET.....	67
Quadro 8. Tipos de tecidos urbanos de Arapiraca identificados por Torres (2017).....	76
Quadro 9. Tecidos urbanos identificados por Costa et al. (2019) e Costa et al. (2021).	77
Quadro 10. Extrato da escala Beaufort.....	97
Quadro 11. Estratégias bioclimáticas propostas pela Carta Bioclimática de Givoni (1992) para a cidade de Arapiraca/ AL.....	99
Quadro 12. Parâmetros urbanísticos adotados nos cenários.....	111
Quadro 13. Tipologias simuladas dos edifícios e respectivas hipóteses de efeitos no contexto bioclimático e urbano.....	113
Quadro 14. Cenários urbanos hipotéticos a partir da geometria urbana – Base LL.....	114
Quadro 15. Cenários urbanos hipotéticos a partir da geometria urbana – Base FF.	115
Quadro 16. Características da espécie <i>Sophora Japonica</i> , da família <i>Oleaceae</i>	118
Quadro 17. Características da espécie <i>Fagus Sylvatica</i> , da família <i>Fagaceae</i>	119
Quadro 18. Características da espécie <i>Palm Washingtonia</i> , da família <i>Aracaceae</i>	119
Quadro 19. Cenários urbanos hipotéticos a partir do uso da vegetação – Base LL.	120
Quadro 20. Cenários urbanos hipotéticos a partir do uso da vegetação – Base FF.....	121
Quadro 21. Dados inseridos para a cidade de Arapiraca/ AL.	124
Quadro 22. Propriedades dos materiais utilizados nas superfícies do solo nos cenários.	125
Quadro 23. Propriedades dos materiais utilizados nas superfícies das paredes e cobertas nos cenários.	126

Quadro 24. Propriedades das espécies arbóreas inseridas nos cenários.....	126
Quadro 25. Coordenadas dos receptores nos cenários urbanos hipotéticos.	127
Quadro 26. Imagens em 2D dos cenários urbanos hipotéticos modelados no ENVI-Met.	129
Quadro 27. Imagens em 3D dos cenários urbanos modelados no ENVI-Met.....	130
Quadro 28 – Dados de entrada para simulação no ENVI-met.	132
Quadro 29. Parâmetros humanos, de acordo com a ISSO 7733 (2005).	134
Quadro 30. Sensações térmicas e a classificação do PET para Sun Moon Lake, Taiwan.	135
Quadro 31. Classificação do grau de correlação a partir do valor do coeficiente de correlação (r). ..	137
Quadro 32. Variáveis da forma urbana.	138
Quadro 33. Parâmetros urbanísticos a partir da área total do cenário urbano hipotético.	138
Quadro 34. Parâmetros urbanísticos a partir dos pontos selecionados.....	139
Quadro 35. Variáveis dependentes e independentes analisadas.....	140
Quadro 36. Valores médios, mínimos e máximos diários da TRM.	148
Quadro 37. Valores de diferenciação térmica, identificados a partir da TRM máxima diurna (°C) entre o cenário FF-T (66,9°C) e os demais cenários urbanos simulados.	148
Quadro 38. Perfis e Mapas 2D dos dados de TRM dos cenários FF-T e LL-BPV, na altura do pedestre (1,5m), para o período quente e seco.....	150
Quadro 39. Valores médios, mínimos e máximos diários da Umidade Relativa do Ar.	156
Quadro 40. Valores de diferenciação térmica, identificados a partir da umidade relativa do ar mínima diurna (%) entre o cenário FF-B e os demais cenários urbanos simulados.....	157
Quadro 41. Perfis e Mapas 2D dos dados de umidade relativa do ar dos cenários FF-B e FF-BPV, na altura do pedestre (1,5m), para o período quente e seco.	159
Quadro 42. Valores médios, mínimos e máximos diários da Velocidade dos Ventos.	164
Quadro 43. Valores de diferenciação climática, identificados a partir da velocidade dos ventos mínima diurna (m/s) entre o cenário FF-BV (via secundária) e LL-TPV (calçada) e os demais cenários urbanos simulados, respectivamente.....	165
Quadro 44. Perfis e Mapas 2D dos dados de umidade relativa do ar dos cenários FF-BV, LL-TPV e FF-T na altura do pedestre (1,5m), para o período quente e seco.	165
Quadro 45. Valores médios, mínimos e máximos diários do índice PET.....	172

Quadro 46. Valores de diferenciação térmica, identificados a partir do índice PET máximo diurno (°C) entre o cenário FF-T e os demais cenários urbanos simulados.	173
Quadro 47. Perfis e Mapas 2D dos dados do índice PET dos cenários FF-T e FF-BPV, na altura do pedestre (1,5m), para o período quente e seco.	173
Quadro 48. Síntese dos resultados dos parâmetros climáticos e do PET obtidos para os cenários de maior destaque nas simulações.	176
Quadro 49. Valores das variáveis climáticas analisadas nos cenários FF-BPV e FF-T às 99h, 15h e 21h..	177
Quadro 50. Classificação do grau de correlação a partir do valor do coeficiente de correlação (r). ..	179

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABL - *Atmospheric Boundary Layer*
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
A_{CS} - Área Construída no Solo
A_{FVC} - Área Frontal do Volume Construído
A_P - Área Permeável
A_T - Área Total
A_{TC} - Área Total Construída
A_{TL} - Área Total do Lote
C - Capacidade de Calor
CA - Coeficiente de Aproveitamento
DEM - *Digital Elevation Model*
EAS - Sistema Terra-Atmosfera
ETE - Estação de Tratamento de Esgoto
H_{MED} - Altura Média
FAD - Densidade de Área Frontal
FCV - Fator de Céu Visível
FNE - Fundo Constitucional de Financiamento do Nordeste
IA - Infraestrutura Azul
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICU - Ilhas de Calor Urbana
ICU_{Sub} - Ilha de calor urbano subterrâneo
ICU_{Surf} - Ilha de calor urbano superficial
ICU_{UBL} - Ilha de calor urbano da camada limite urbano
ICU_{UCL} - Ilha de calor urbana da camada do dossel urbano
IDA - Índice de Densidade Arbórea
IDH - Índice de Desenvolvimento Humano
IDSC - Índice de Desenvolvimento Sustentável das Cidades
INSA - Instituto Nacional do Semiárido
IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*
ISB - *International Society of Biometeorology*
ISL - *Inertial Sublayer*
IV - Infraestrutura Verde

K - Condutividade Térmica

k - Difusividade Térmica

l - Largura da Rua

LEED - *Leadership in Energy and Environmental Design*

MBE - *Mean Bias Error*

MKE - *Mean Kinetic Energy*

ML - *Mixed Layer*

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

OMM - Organização Mundial de Meteorologia

ONU - Organização das Nações Unidas

PBMC - Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas

PET - *Physiological Equivalent Temperature*

PIB - Produto Interno Bruto

Po - Porosidade da Malha

Po Vedif - Porosidade do Volume Edificado

PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

Pm - Prospecto Médio

PMV - Voto Médio Estimado

PRISMA - *Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses*

Q_E - Fluxo de Calor Latente

Q_G - Fluxo de Calor Sensível para Níveis Subterrâneos do Solo

Q_H - Fluxo de Calor Sensível

Ri - Recuo Inicial

RMSE - *Root Mean Squared Error*

RSL - Revisão Sistemática de Literatura

RSL - Subcamada de Rugosidade

SEB - *Surface Energy Balance*

SL - *Surface Layer*

Sudene - Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste

SVF - *Sky View Factor*

TKE - *Turbulent Kinetic Energy*

T - Temperatura

T_{ar} - Temperatura do ar

TCC - Trabalho de Conclusão de Curso

TO - Taxa de Ocupação

To - Temperatura de Superfície
TP - Taxa de Permeabilidade
TRM - Temperatura Radiante Média
TRY - *Test Reference Year*
UBL - *Urban Boundary Layer*
UCL - *Urban Canopy Layer*
UFAL - Universidade Federal de Alagoas
UG - Gradiente de Velocidade
UNOPAR - Faculdades Integradas Norte do Paraná
UTCI - *Universal Thermal Climate Index*
V_{TE} – Volume Total Edificado
V_{TL} – Volume Total Livre
VGS - *Vertical Greening Systems*
z_G - Altura de Nível
z_o - Rugosidade Aerodinâmica da Superfície
 α - Albedo
 ε - Emissividade
 μ - Admitância Térmica
u - Componente longitudinal do vento (eixo x)
 $\vec{u}$ - Vetor de Vento Tridimensional
v - Componente do Vento Lateral (eixo y)
w - Componente Vertical do Vento (eixo z)

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	25
Objetivos	33
Estrutura da Tese.....	34
1. DENSIDADE CONSTRUÍDA E MICROCLIMA URBANO.....	36
1.1 Escalas do Clima Urbano	37
1.2 Balanço de Energia em Áreas urbanas	40
1.2.1 Trocas de Radiação.....	44
1.2.2 Fluxo de Ar.....	46
1.3 Ilhas de Calor Urbana, forma urbana e microclima	51
1.3.1 Efeito da Geometria Urbana no microclima.....	54
1.3.2 Efeito do Tecido Urbano no microclima	61
1.3.3 Efeito da Cobertura da Superfície no microclima	62
1.4 Estudo do Conforto Térmico no Ambiente Urbano	64
1.5 Conclusões do Capítulo	69
2. PROCESSO DE URBANIZAÇÃO E CLIMA DE ARAPIRACA.....	71
2.1 Processo de Verticalização em Arapiraca.....	82
2.2 O Clima Semiárido de Arapiraca.....	90
2.3 Conclusões do Capítulo	101
3. MATERIAIS E MÉTODOS	103
3.1 Definição da Área de Estudo.....	103
3.2 Parâmetros para Modelagem dos Cenários	108
3.2.1 Geometria Urbana.....	110
3.2.2 Vegetação	116
3.3 Simulação Computacional dos Cenários	122

3.3.1 Modelagem dos Cenários Urbanos Hipotéticos	123
3.3.2 Configuração do Arquivo Climático	131
3.3.3 Simulação dos Cenários.....	133
3.4 Análise de Desempenho Climático	133
3.5 Conclusões do Capítulo	140
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	142
4.1 Análise de Desempenho Climático	143
4.1.1 Temperatura Radiante Média (TRM)	143
4.1.2 Umidade Relativa do Ar	152
4.1.3 Velocidade e Direção dos Ventos.....	160
4.1.4 Índice de conforto PET	168
4.1.5 Síntese da Análise de Desempenho Climático	175
4.2 Análise de Correlação entre os Parâmetros Climáticos e Urbanísticos.....	178
4.3 Considerações a respeito do processo de verticalização para a cidade de Arapiraca/AL	191
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	194
REFERÊNCIAS	206
APÊNDICE A - Definição e formulação matemática dos parâmetros urbanísticos tradicionais e avançados	231
APÊNDICE B - Síntese das pesquisas anteriores no TCC (Brandão, 2017) e Dissertação (Brandão, 2020).....	232
APÊNDICE C - Revisão sistemática de literatura: efeitos climáticos de cânions urbanos em cidades de clima semiárido	237
A.1 Metodologia Aplicada na RSL	237
A.1.1 Estratégias a Respeito da Geometria Urbana.....	241
A.1.2 Estratégias a Respeito do Albedo nos Materiais de Superfície	244
A.1.3 Estratégias a Respeito do Uso de Vegetação	244

A.2 Conclusões	247
APÊNDICE D - Quadros com levantamento das calibrações do índice PET	248
APÊNDICE E - Resultados das simulações computacionais dos cenários urbanos hipotéticos.....	250
APÊNDICE F - Imagens dos pontos de extração dos dados das variáveis climáticas, tomando como exemplo o cenário FF-T, às 11:30h	292
ANEXO A - Dados climáticos coletados por Torres (2017), na estação INMET para o dia 03/01/2016 em Arapiraca/AL.....	293



INTRODUÇÃO

A urbanização é um processo socioeconômico complexo que representa a gradativa modificação do ambiente natural para o construído, nos quais as atividades estão predominantemente relacionadas à produção e circulação de mercadorias, à prestação de serviços e ao aumento da densidade de ocupação. A conformação da urbanização se dá com o aumento da expansão urbana e do tamanho da população (Freitas, 2005).

A população mundial atingiu, em 2007, o patamar de 50% de habitantes residindo em áreas urbanas, com previsão de aumento para 68%, em 2050 (ONU, 2019). Cabe destacar que o aumento do processo de urbanização nos países menos desenvolvidos ocorreu dentro de um contexto de rápido crescimento da população. No Brasil, a população residente em área urbana era inferior a 30%, na década de 1940. Esse percentual saltou para 84,36%, em 2010 (IBGE, 2010). Os dados demonstram que a cidade se configura como principal palco das atividades humanas (Freitas, 2005).

A atmosfera sobre a cidade é um dos estratos naturais que mais sofre mudança ocasionada pelo processo de alteração do ambiente natural pelas atividades humanas, cujas consequências afetam diretamente as condições ambientais, a saúde humana e, também, o consumo de energia em espaços edificados urbanos. O aumento populacional nos centros urbanos tem impulsionado um gradativo processo de modificação do ambiente natural para o construído, e essas transformações condicionam um clima tipicamente urbano (Higueras, 1998).

A Organização Mundial de Meteorologia (OMM) conceitua o clima como a totalidade de elementos meteorológicos que, em sua sucessão habitual e em um dado período, caracteriza o estado da atmosfera (Allard; Santamouris, 1998). Portanto, o clima urbano é resultado das condições particulares do meio ambiente citadino, decorrentes das modificações causadas pelo processo de urbanização da superfície terrestre e da interferência dessa urbanização nas características da atmosfera urbana (Monteiro, 1976; Oke, 1987; Oke, 1996).

Os impactos negativos relacionados com o processo de ocupação urbana são diversos, atrelados a diferentes abordagens, sendo a ambiental a mais comumente destacada. A partir dessa preocupação surge o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC), criado em 1988 pela OMM e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), com o objetivo de fornecer aos governos, em todos os níveis, informações científicas que possam ser usadas para desenvolver políticas climáticas (IPCC, 2022a).

O Sexto Relatório de Avaliação do IPCC deixa claro que a ação humana exerce influência no clima urbano, e da mesma forma tem o potencial de desenvolver cidades resilientes, por meio da governança, finanças, conhecimento e capacitação, tecnologia e condições catalisadoras. Reconhece-se por resiliência a capacidade de manter a função, identidade e estrutura essenciais, mas também a capacidade de transformação (IPCC, 2022b). Nesse contexto, as Conferências das Partes (COPs) desempenham um papel fundamental na definição de compromissos globais voltados à mitigação dos impactos climáticos nas cidades, incentivando a implementação de soluções inovadoras que tornem os centros urbanos mais sustentáveis, equitativos e preparados para os desafios ambientais do século XXI.

A respeito da realidade brasileira, o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) elaborou o relatório intitulado: Mudanças Climáticas e Cidades, Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (Ribeiro, Santos, 2016). O relatório indica que os principais problemas envolvendo mudanças climáticas e as cidades são: aumento de temperatura, aumento no nível do mar, Ilhas de Calor Urbana (ICU), inundações, escassez de água e alimentos, acidificação dos oceanos e eventos extremos. Os impactos climáticos citados poderão incidir em diferentes sistemas urbanos de infraestrutura, como os setores de água, saneamento, energia e transporte, que são interdependentes entre si.

A relação entre urbanização e degradação ambiental não pode ser entendida como processos diretamente associados. O relatório elaborado pelo PBMC apontou medidas que permitem o alcance de cidades resilientes na escala urbana e do edifício. No primeiro caso, tem-se: planejamento urbano integrado, que considere a interação entre uso do solo, transporte e infraestrutura com o fim de contribuir para a regulação do clima urbano e a redução de fenômenos climáticos (como as ICU); Infraestrutura Verde¹ (IV) e soluções baseadas na natureza, pois ajudam na gestão das águas pluviais, melhoria da qualidade do ar e regulação da temperatura, ao mesmo tempo que promovem a biodiversidade nas áreas urbanas; gestão de riscos e desastres naturais, com base em planos de evacuação e monitoramento de zonas vulneráveis; mobilidade sustentável, a partir da promoção de sistemas de transporte público eficientes, ciclovias e calçadas acessíveis. Na escala do edifício, as indicações abrangem a

¹ Infraestrutura Verde, no contexto do planejamento urbano e regional, trata-se de um conjunto de áreas naturais e outros espaços abertos conectados que preservam os valores e as funções dos ecossistemas, como a proteção de mananciais, o controle ambiental, a regulação do clima, além de oferecer oportunidades de recreação e lazer, proporcionando uma ampla variedade de benefícios para a sociedade (Santos; Enokibara, 2021).

eficiência energética, uso de materiais sustentáveis, adoção de tecnologias para conforto térmico e captação e reuso de água (Ribeiro; Santos, 2016).

As estratégias acima coincidem com os princípios da bioclimatologia urbana, de planejar as cidades sob critérios ambientais com o fim de estabelecer uma gestão eficiente de recursos materiais e energéticos e melhorar a qualidade de vida de seus habitantes (Higueras, 2009; Givoni, 1994). Higueras (2006) reforçou o papel da bioclimatologia no planejamento das cidades ao difundir o conceito de urbanismo bioclimático. Pesquisas acerca do urbanismo bioclimático apontam o seguinte modelo de planejamento e organização espacial das cidades: a forma urbana compacta (Rogers, 2001; Stone Jr., B.; Rodgers, 2001; Farr, 2013; Yin; Mizokami; Maruyama, 2013; Oke *et al.*, 2017; Nasrollahi *et al.*, 2020; Freitas; Azerêdo, 2021).

O modelo de forma urbana compacta, no contexto do urbanismo bioclimático, visa promover o desenvolvimento eficiente e integrado das cidades, adaptando-se às condições climáticas locais para otimizar a qualidade de vida, reduzir o consumo energético e mitigar os impactos ambientais. Em contraste com o espraiamento urbano, que caracteriza a expansão desordenada e horizontal das cidades, a forma urbana compacta busca densificar áreas urbanas de forma controlada e sustentável, em consonância com as premissas do urbanismo bioclimático (Duarte, 2017; Oliveira; Ferreira, 2021). Diversos autores² destacam como princípios da forma urbana compacta a densidade e uso misto; redução do espraiamento urbano; aproveitamento das condições bioclimáticas e a incorporação de infraestrutura verde e azul³, ou seja, como parques, jardins de chuva, telhados verdes e a gestão sustentável das águas pluviais (Jabareen, 2020).

O adensamento urbano a partir da verticalização é comumente julgado como algo negativo pela influência que exerce no microclima. O aumento da altura das edificações pode alterar a forma de recebimento de radiação por ondas curtas e na liberação de calor através de ondas longas, a velocidade dos ventos nas ruas paralelas e perpendiculares à direção predominante dos ventos, o que pode intensificar os efeitos das ICU noturna (Nakata-Osaki; Souza; Rodrigues, 2016). Contudo, diversos estudos comprovam que o adensamento construtivo e a qualidade ambiental são compatíveis desde que as questões ambientais sejam

² Para a definição dos princípios da forma urbana compacta, recomenda-se as seguintes referências: Duarte (2012); Silva Júnior (2016); Freitas; Azerêdo (2021); Boland; Hunter (2022); Silva; Romero (2013); Seto et al. (2018); Barbirato; Torres; Barbosa (2015); Duarte (2017); Salat (2017); Jabareen (2020).

³ A Infraestrutura Azul (IA) é nome dado ao conjunto de sistemas naturais da cidade, relacionados às águas urbanas, integrando funções ambientais, hidráulicas, paisagísticas e sociais contribuindo para benefícios ambientais (aqui se inclui a preservação e recuperação) e paisagísticos. A Infraestrutura Azul compreende cursos d'água, lagos e lagoas, entre outros.

consideradas no processo de planejamento urbano (Barbirato; Torres; Barbosa, 2015; Silva, Alvarez, 2015; Hirashima; Assis; Nikolopoulou, 2016; Yang, Lin, 2016; Taleghani, 2018; Wai *et al.*, 2020). A unidade urbana para estudo do adensamento construtivo, por meio da verticalização, é o cânion urbano. O cânion urbano corresponde a forma geométrica de uma via margeada por edificações verticalizadas em ambos os lados, assemelhando-se ao cânion natural (Nicholson, 1975; Oke, 1981; Ali-Toudert; Mayer, 2006; Erell; Pearlmutter; Williamson, 2011).

A forma urbana como variável controlável impacta os microclimas urbanos (Givoni, 1998). Assim, pesquisas acerca da adequação da forma urbana ao clima local têm ganhado destaque (Krüger; Minella, 2011; Andreou, 2013; Nakata-Osaki, Souza, Rodrigues, 2016; Mauá, Jamei; Rajagopalan, 2018; Ma *et al.*, 2019; Guadanhim, Kanashiro, 2017; Muniz-Gäal *et al.*, 2020; Xue *et al.*, 2020; Kouklis; Yiannakou, 2021; Quadros *et al.*, 2024). Assim, para promover o crescimento e desenvolvimento de cidades sustentáveis e resilientes é importante compor diretrizes urbanísticas sob o viés do urbanismo bioclimático para se conformar um desenho urbano contemporâneo responsivo ao conforto térmico humano e à eficiência energética (Barakat *et al.*, 2017). Givoni (1998) afirmou que através de políticas urbanas e do desenho urbano, pode-se interferir no clima de determinada localidade, promovendo o conforto térmico dentro e fora das edificações. A respeito da realidade das cidades brasileiras, o Plano Diretor, como legislação que trata do uso e ocupação do solo, é um exemplo de política urbana que regula, por meio de parâmetros urbanísticos, a ocupação do meio ambiente urbano.

A aplicação dos princípios do urbanismo bioclimático está essencialmente ligada aos parâmetros urbanísticos. A exemplo Freitas e Azerêdo (2021) afirmaram que, a taxa de permeabilidade está intrinsicamente ligada à permeabilidade do solo, importante para a infiltração das águas pluviais e alimentação dos lençóis freáticos, o que diminui os riscos de enchentes e alagamentos; o recuo entre as edificações contribuem na porosidade do tecido urbano, importante para amenizar os efeitos das altas temperaturas do ar e umidade relativa do ar, assim como na permeabilidade dos ventos a nível urbano e da edificação; o coeficiente de aproveitamento e da taxa de ocupação influencia a alta densidade construtiva, indicada especialmente em cidades de clima quente e seco (Romero, 2000), por gerar maior preservação do meio ambiente natural (dado o menor consumo do espaço urbano), otimiza o aproveitamento da infraestrutura urbana e promove vitalidade nos centros urbanos.

Os parâmetros urbanísticos podem ser tradicionais e avançados. Segundo Brandão (2009), o primeiro deriva diretamente do parcelamento do solo e da legislação de uso e

ocupação; enquanto os parâmetros avançados descrevem de forma mais precisa as trocas de calor observadas no meio urbano. Uma das principais diferenças entre ambos é a unidade de aplicação, pois enquanto os parâmetros tradicionais partem do lote como unidade mínima de planejamento, os avançados consideram a quadra (Torres, 2017). O Apêndice A apresenta conceitos e fórmulas para calcular alguns exemplos de parâmetros urbanísticos tradicionais e avançados.

Diversos estudos abordam a relação entre parâmetros urbanísticos e o desempenho térmico urbano, especialmente no cenário brasileiro, como é o caso de Barbosa (2018), em Maringá/PR; Gusson (2020) em São Paulo/SP; Silva (2013) em Brasília, e Costa (2001) em Natal/RN, demonstrando os benefícios da verticalização quando conduzida de acordo com princípios bioclimáticos. Em Maceió/AL de clima tropical de monção (quente e úmido), a pesquisa de Nogueira *et al.* (2018) tomou como estudo de caso uma fração do bairro Guaxuma, na orla marítima da cidade: o loteamento Gurgury. Os resultados demonstraram que a verticalização na área estudada exerceu influência no microclima local, principalmente no desempenho da ventilação natural. Os resultados sugerem que os efeitos da verticalização, tal como promovida pelo atual código de edificações, provoca mudanças positivas na dinâmica do vento, pois o uso do recuo progressivo gerou maior permeabilidade da malha urbana analisada.

Tais estudos também demonstram a possibilidade de tratar aspectos condicionantes da forma urbana a partir de parâmetros urbanísticos tradicionais, visto que os parâmetros avançados ainda não se encontram difundidos nos planos diretores vigentes⁴. Nesse contexto, destaca-se a relevância das cidades médias, com população entre 100 e 500 mil habitantes, que nos últimos anos apresentaram um crescimento relativo que superou o das grandes cidades (capitais e cidades com população acima de 500 mil habitantes)⁵. Nesse contexto, tem-se o objeto de estudo da presente pesquisa: a cidade de Arapiraca/AL, segunda maior cidade do estado, com população de 234.696 habitantes, ocupando a 2ª posição também no total de receitas e despesas dentre os municípios alagoanos (IBGE, 2021).

Arapiraca está localizada na mesorregião do Agreste, que corresponde à região de transição entre a costa úmida e o interior semiárido do Nordeste brasileiro. O clima predominante da cidade é o semiárido (INSA, 2023), com duas estações bem definidas: um

⁴ MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (MDR). Guia para elaboração e revisão de planos diretores. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2022.

⁵ Disponível em: < <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37237-de-2010-a-2022-populacao-brasileira-cresce-6-5-e-chega-a-203-1-milhoes>>. Acesso em: 27/01/2025.

verão quente e seco e o inverno quente e úmido (Silva, 2019; Silva; Barbosa, 2022). De acordo com Ferreira (1965), o clima quente e seco é caracterizado por pequenas variações de temperatura durante o dia, amplitude das variações diurnas fracas, dias quentes e úmidos, e, à noite, a temperatura é mais amena e com umidade elevada. Já no período quente e úmido, tem-se grandes amplitudes de temperatura durante o dia, durante o dia as máximas alcançam valores extremos, enquanto à noite decrescem as temperaturas, alcançando valores mínimos pela madrugada. Em função das características climáticas locais é requerido uma atenção maior em seu processo de planejamento urbano.

O Plano Diretor de Arapiraca, Lei nº 2424/2006, não foi revisado desde sua publicação, assim como o Código de Obras e Edificações, Lei nº 2220/2001, e neles há especificado somente o recuo mínimo como parâmetro construtivo para regular seu crescimento horizontal e vertical (ver Quadro 01). Tem-se, dessa forma, uma legislação desprovida de adequados parâmetros urbanísticos para guiar o desenvolvimento sustentável da cidade, sob o viés do urbanismo bioclimático. Ao longo dos últimos 19 anos, foi possível observar a construção de diversas edificações verticalizadas, conforme será tratado no Capítulo 2. Tal contexto torna imprescindível a realização de estudos a respeito da adequação da forma urbana ao clima local para contribuir com a revisão do novo Plano Diretor. Visto que o planejamento urbano deve conter medidas para regulação do uso e ocupação do solo urbano a **curto e longo prazo**, torna-se inquestionável a necessidade de elaborar parâmetros que regulem o crescimento vertical da cidade sob o viés do urbanismo bioclimático. Assim, as diretrizes urbanísticas podem viabilizar a conformação de cânions urbanos adequados ao clima ao invés de se limitar a medidas mitigadoras dos problemas gerados pelo crescimento desordenado.

Quadro 1. Parâmetros construtivos do Código de Obras e Edificações de Arapiraca/ AL⁶.

Especificação	Metragem Determinada (m)
Recuo Mínimo Inicial	3,0
Recuo Mínimo Lateral (com janela)	1,5
Recuo Mínimo Posterior	1,5

Fonte: Elaborado pela Autora.

⁶ (Arapiraca, 2001).

Diante desse cenário, a presente pesquisa parte de alguns estudos anteriores, como o de Torres (2017), que ao investigar sobre a interferência da forma urbana e do adensamento construtivo no desempenho climático dos espaços urbanos e nos padrões de aproveitamento das estratégias bioclimáticas, trabalhou com parâmetros urbanísticos tradicionais e avançados, a partir da quadra como unidade mínima de planejamento. Nesse contexto, destacou-se a influência da Taxa de Ocupação (TO) e da Porosidade da Malha (Po) no comportamento da temperatura do ar, e do Índice de Densidade Arbórea (IDA), no comportamento da umidade relativa do ar. Em suas conclusões, a autora sugeriu o aprofundamento em investigações futuras para alcance do melhor entendimento quanto aos aspectos da interferência da forma urbana, especialmente no que tange o comportamento das massas de ar incidentes em conjuntos edificados.

Outro importante estudo foi o de Silva (2019), que identificou as estratégias bioclimáticas recomendáveis ao projeto e planejamento arquitetônico para seis cidades alagoanas com o objetivo de obter conforto térmico e eficiência energética no espaço habitado. Dentre as cidades analisadas, tem-se Arapiraca/AL. Para o período quente e seco, destacam-se as seguintes estratégias: sombreamento, ventilação natural, alta inércia para resfriamento e resfriamento evaporativo. Para o período quente e úmido, tem-se a seguinte estratégia bioclimática: alta inércia térmica para aquecimento solar, especialmente para a estação do inverno, com o fim de minimizar o desconforto pelo frio durante 20% da duração desta estação.

Torna-se importante ressaltar que a presente pesquisa se apresenta como a continuação de trabalhos anteriores, desde a graduação ao mestrado⁷. Os resultados observados apontaram para a necessidade de um aprofundamento da pesquisa. Considerar somente a composição da geometria do cânion demonstrou ser insuficiente, visando especialmente o conforto térmico ao ar livre no nível do pedestre. Nesse contexto, formulou-se o seguinte **problema**: como promover o adensamento urbano em cidade de clima semiárido, de forma a conciliar o aproveitamento das principais estratégias bioclimáticas locais? Estudos anteriores evidenciaram a importância do sombreamento como estratégia bioclimática para planejamento urbano no contexto climático local, tendo sido verificado seu potencial para redução da temperatura radiante média e obtenção de melhores condições de conforto térmico (Brandão, 2017; Brandão, 2020; Brandão; Barbosa, 2023). Contudo, é imprescindível conciliar o aproveitamento das demais estratégias.

⁷ No Apêndice B foi elaborado uma síntese geral dos estudos já realizados.

A ventilação natural, além de ser o segundo parâmetro mais importante para a sensação térmica após o sombreamento (Andreou, 2013), tem o potencial de remover o calor antropogênico e a poluição do ar, de forma a mitigar os efeitos da ICU, melhorar a qualidade do ar e oferecer conforto térmico aos habitantes (Shahmohamadi et al., 2010; Xue *et al.*, 2020). Da mesma forma, é importante estimular a adoção do resfriamento evaporativo como estratégia bioclimática a nível urbano, a partir da inserção de árvores em calçadas, interior dos lotes e vazios urbanos. A vegetação tem o potencial gerar sombreamento (pelas copas das árvores), reduzir a incidência direta de radiação solar e melhorar a qualidade do ar. Além disso, o efeito da absorção da radiação solar, utilizada pela evaporação que ocorre em suas folhas, pelo processo natural da fotossíntese, influencia na diminuição da temperatura do ar e no aumento da umidade relativa do ar, proporcionando condições mais favoráveis ao conforto térmico ao ar livre (Romero, 2000; Gartland, 2010; Oke et al., 2017; Freitas; Azerêdo, 2021).

Dada a possibilidade de tratar aspectos da forma urbana por meio de parâmetros urbanísticos, e ao considerar a ausência de parâmetros nos instrumentos de controle e ordenamento na ocupação do solo vigentes em Arapiraca, especialmente no que se refere à compactidade urbana, a presente pesquisa pretende conciliar o aproveitamento das estratégias bioclimáticas citadas a partir de parâmetros urbanísticos tradicionais e avançados. Vale ressaltar que a ausência de parâmetros urbanísticos configura sérios riscos ambientais à população. A justificativa pela escolha de parâmetros tradicionais e avançados se dá pela necessidade de integração dos mesmos, a fim de criar espaços urbanos resilientes e confortáveis. Embora os parâmetros tradicionais objetivem a organização eficiente do espaço urbano e o controle de sua densidade para a gestão do crescimento urbano, isto tem ocorrido sem priorizar o conforto climático ou a sustentabilidade urbana. Já os parâmetros avançados apresentam uma abordagem mais holística e integrada, considerando aspectos ambientais e climáticos no planejamento urbano. Assim, ao passo que os parâmetros urbanísticos tradicionais são essenciais para a organização básica do tecido urbano, os avançados são fundamentais para a adequação das cidades às mudanças climáticas, melhorando a qualidade de vida e tornando os espaços urbanos resilientes.

Acerca da unidade mínima de planejamento, tem-se a quadra e o lote. Segundo Oke et al. (2017) e Torres (2017), a abordagem centrada na quadra permite um planejamento mais abrangente da densidade das construções, o espaço entre elas e a presença de elementos verdes, no contexto de adaptação climática às estratégias bioclimáticas locais. No aspecto sociocultural, Jane Jacobs (2011) apontou o potencial de promover a interação social, a segurança e a

adaptabilidade dos espaços urbanos. Contudo, esse método de abordagem demanda uma complexidade jurídica e teórica superior ao planejamento urbano pautado a partir do lote. A escolha do lote como unidade mínima de planejamento urbano para o presente estudo se justifica pela ausência de parâmetros urbanísticos na cidade de Arapiraca/ AL (ver Quadro 01), optando-se por uma abordagem amplamente praticada nos planos diretores brasileiros.

Outrossim, o Plano Diretor municipal (Arapiraca, 2006) apresenta fragilidades significativas quanto ao respaldo jurídico necessário para a implementação do planejamento urbano a partir da quadra, o que impossibilitaria sua eficácia na regulamentação do desenvolvimento urbano. Dado que o plano está em um iminente processo de revisão⁸, identificou-se uma oportunidade para obter uma contribuição efetiva para a sua atualização. Assim, buscou-se gerar diretrizes que possam ser incorporadas ao novo Plano Diretor, auxiliando no aprimoramento das condições de conforto térmico e no desenvolvimento sustentável da cidade. Com esta abordagem, espera-se que os resultados obtidos não apenas somem ao corpo teórico sobre o urbanismo bioclimático, mas também tenham aplicabilidade prática no contexto específico de Arapiraca.

Diante do exposto, formulou-se a seguinte **hipótese**: utilizando o lote como unidade mínima de planejamento, a geometria urbana e o uso da vegetação podem ser combinados para alcançar cenários de verticalização favoráveis ao conforto térmico ao ar livre, na escala do pedestre, para o período quente e seco. Para verificar esta hipótese, foi selecionada, como objeto de estudo, a cidade de Arapiraca/AL.

Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho consiste em analisar a influência da verticalização nas condições de conforto térmico ao ar livre na escala do pedestre, considerando aspectos da geometria urbana e do uso de vegetação, no contexto climático semiárido de Arapiraca/AL.

Para tal forma, foram delimitados os seguintes objetivos específicos:

- Analisar os mecanismos físicos relacionados ao balanço de energia em áreas urbanas, bem como ferramentas e métodos aplicáveis para o seu estudo na escala do cânion urbano;

⁸ Disponível em: <https://web.arapiraca.al.gov.br/2023/08/plano-diretor-reve-inclusao-de-bairros-no-cinturao-verde-reuniao-preliminar-debateu-o-tema/>. Acesso em 15/01/2025.

- Analisar o processo de urbanização em Arapiraca, cidade de clima semiárido, com ênfase no crescimento vertical em diferentes tecidos urbanos;
- Investigar o padrão de comportamento das variáveis ambientais relacionadas ao conforto térmico, na escala microclimática, correlacionando com os aspectos da forma urbana, para o período quente e seco.

Estrutura da Tese

A Introdução apresenta o tema abordado na presente pesquisa, assim como o problema e hipótese. Também apresenta o objetivo geral da pesquisa e os objetivos específicos e, por fim, a estrutura da tese.

O Capítulo 1 apresenta a revisão de literatura nos seguintes temas: escalas do clima urbano, balanço de energia em áreas urbanas, trocas de radiação, fluxo de ar, ilhas de calor urbana, forma urbana e microclima, efeito do tecido urbano no microclima, efeito da cobertura da superfície da superfície e o estudo do conforto térmico no ambiente urbano, concluindo-se o capítulo com uma síntese da revisão realizada.

O Capítulo 2 descreve o processo de urbanização para a cidade de Arapiraca/ AL, especialmente as projeções para seu crescimento vertical, assim como seu perfil climático e as principais estratégias bioclimáticas para a cidade (sombreamento, ventilação natural e resfriamento evaporativo), e finaliza apontando reflexões sobre possíveis consequências desse processo diante da ausência de parâmetros urbanísticos destinados à sua regulação.

No Capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos da pesquisa, abrangendo: definição da área de estudo, parâmetros para modelagem dos cenários, simulação computacional dos cenários e análise de desempenho climático, indicando-se os procedimentos estatísticos adotados para descrição e aferição dos resultados alcançados.

O Capítulo 4 apresenta a análise e discussão dos resultados obtidos, a partir da análise do desempenho climático das variáveis climáticas adotadas (temperatura do ar, temperatura radiante média, umidade relativa do ar, velocidade e direção dos ventos e o índice PET). A partir destes resultados foi desenvolvida a análise de correlação com os parâmetros climáticos e urbanísticos, a fim de verificar a relação da forma urbana com a conformação do microclima de cânions urbanos, segundo o contexto climático da cidade de Arapiraca/AL.

O Capítulo 5 resume as considerações finais da pesquisa, como também apresenta possíveis caminhos para a continuidade das pesquisas no tema. Em seguida, tem-se o Apêndice A, com a definição e formulação matemática dos parâmetros urbanísticos tradicionais e avançados; o Apêndice B, apresentando a síntese das pesquisas anteriores no TCC (Brandão, 2017) e Dissertação (Brandão, 2020); o Apêndice C, que trata da Revisão Sistemática de Literatura feita para identificar os efeitos climáticos de cânions urbanos em cidades de clima semiárido; o Apêndice D, com os quadros com levantamento das calibrações do índice PET; o Apêndice E, onde foram dispostos os resultados das simulações computacionais dos cenários urbanos hipotéticos; e o Apêndice F, com as imagens dos pontos de extração dos dados das variáveis climáticas, tomando como exemplo o cenário FF-T, às 11:30h. Por fim, o Anexo A apresenta os dados climáticos coletados por Torres (2017), na estação INMET para o dia 03/01/2016 em Arapiraca/AL.



1. DENSIDADE CONSTRUÍDA E MICROCLIMA URBANO

A urbanização corresponde aos processos socioeconômicos que levam à concentração de pessoas em áreas urbanas, onde o trabalho é comumente associado às indústrias manufatureiras e de serviços, e não às atividades agrícolas (Oke *et al.*, 2017). Numa análise a respeito do processo de urbanização, devido à ausência de planejamento e a descontinuidade administrativa, observa-se sua associação a dois outros processos: o de adensamento construtivo e o de degradação do ambiente (Freitas, 2005; Scussel, Sattler, 2010; Ugeda Júnior, Amorim, 2016; Mauá; Guadanhim; Kanashiro, 2017).

A partir da necessidade de conciliar o crescimento e desenvolvimento urbano e econômico com o equilíbrio entre geração de riqueza e qualidade de vida e ambiental no meio ambiente urbano, diversas pesquisas e organizações sem fins lucrativos buscam promover um desenvolvimento sustentável. Para exemplo, tem-se os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), presentes na Agenda 2030 (Organização das Nações Unidas, 2015), propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015, na reunião em comemoração ao septuagésimo aniversário da organização, em Nova York. Os ODS, também conhecidos como Objetivos Globais, indicam que para alcançar o desenvolvimento sustentável é imprescindível mudar a forma que os espaços urbanos são construídos e gerenciados. Tornar as cidades sustentáveis significa construir sociedades e economias resilientes, esse processo envolve investimento em transporte público, criação de espaços públicos verdes e a melhoria do planejamento e gestão urbana de forma participativa e inclusiva (Organização das Nações Unidas, 2022).

Do ponto de vista climático, o planejamento urbano torna possível o adequado aproveitamento de recursos naturais (sustentabilidade), como também prepara a infraestrutura urbana para possíveis eventos climáticos extremos (resiliência). O planejamento urbano sustentável parte do princípio de que cidades compactas e de alta densidade compostas de usos mistos da terra e comunidades caminháveis são mais eficientes. Nesse sentido, promove-se a reutilização de terrenos urbanos subutilizados ou abandonados, a fim de evitar a expansão da malha urbana em ambientes verdes, o que exigiria novos serviços de estrada, esgoto e afins (Freitas, 2005; Duarte, 2012; Barbirato, Torres, Barbosa, 2015; Silva Júnior, 2016; Güneralp *et al.*, 2017; Oke *et al.*, 2017).

O adensamento construtivo por meio da verticalização surge como uma alternativa para viabilizar o aumento de densidade populacional em ambientes urbanos (Moraes, Silva,

Medeiros, 2007; Scussel, Sattler, 2010; Muniz-Gäal *et al.*, 2018). Para isso, é imprescindível o estudo do clima citadino como ferramenta para o planejamento urbano e desenho dos edifícios, uma vez que geram subsídios que orientam decisões que vão impactar a qualidade de vida da população (Nogueira *et al.*, 2018). O estudo bem-sucedido de climas urbanos depende de alguns conceitos, definições e abordagens essenciais. O papel da escala é um tema organizador para compreensão do **clima urbano** (Oke *et al.*, 2017).

1.1 Escalas do Clima Urbano

Nos estudos sobre clima urbano, o conceito de escalas espaciais auxilia no entendimento das formas pelas quais os elementos da superfície urbana interagem com as camadas atmosféricas adjacentes (Britter; Hanna, 2003). Oke (2004), entendendo o ambiente urbano em sua tridimensionalidade, definiu diferentes escalas climáticas urbanas em sua extensão horizontal e vertical.

As escalas climáticas urbanas horizontais são classificadas em: mesoescala, escala local e microescala. A mesoescala compreende a influência da cidade no clima urbano e abrange dezenas de quilômetros de extensão, dependendo da dimensão da cidade estudada. A escala local inclui os efeitos climáticos decorrentes da forma da paisagem, como as características topográficas do relevo, abrangendo de um a vários quilômetros. A microescala é a escala do microclima urbano e está relacionada com as dimensões e características individuais dos elementos que compõe a cidade no nível do pedestre, como edifícios, árvores, estradas, ruas, pátios, jardins dentre outras, podendo variar de um metro a centenas de metros (Oke, 2006).

Com relação às camadas verticais, inicialmente, tem-se a Camada Limite Atmosférica (*Atmospheric Boundary Layer* - ABL). A ABL, que possui entre 100 e 3.000 m de profundidade, é controlada pela rugosidade, mistura térmica e inserções de umidade relativa do ar e poluentes do ar da superfície da Terra. A ABL pode ser subdividida duas regiões: externa e interna. Na região externa, os efeitos térmicos da superfície da Terra dominam. A região interna apresenta a parte baixa, (cerca de 10% da ABL) chamada de Camada Superficial (*Surface Layer* - SL), onde o fluxo é dominado pelo atrito com a superfície da Terra; e a parte superior (próximo de 90% da ABL), conhecida como Camada de Mistura (*Mixed Layer* – ML), que homogeneiza as propriedades atmosféricas para que os perfis verticais de temperatura potencial, vapor d'água, velocidade e direção do vento sejam quase uniformes com a altura (Oke *et al.*, 2017).

A SL é subdividida em uma Subcamada de Rugosidade (RSL) e uma Subcamada Inercial (*Inertial Sublayer* - ISL). A RSL é rasa e altamente turbulenta, exibe os efeitos de microescala de faces e elementos individuais; estende-se de 1,5 a 3 vezes a altura dos edifícios e incorpora a Camada de Dossel Urbano (*Urban Canopy Layer* - UCL) que existe abaixo do nível médio do telhado. Na presente pesquisa, entende-se por face a definição de Oke *et al.* (2017), como a menor unidade urbana, geralmente considerada de tecido homogêneo e geometria plana (paredes, telhados, áreas verdes, segmentos de estrada) que juntos formam elementos urbanos tridimensionais (árvores, edifícios). A ISL separa a RSL da ML; aqui os efeitos da turbulência na RSL mesclam as contribuições das faces e elementos que compõem os bairros. Segundo Oke *et al.* (2017), a Camada Limite Urbana (*Urban Boundary Layer* - UBL) descreve o envelope de ar que é modificado pela presença de uma área urbana, pode ter 1 a 2 km de profundidade durante o dia, e 100m durante a noite (ver Figura 1 e Quadro 02).

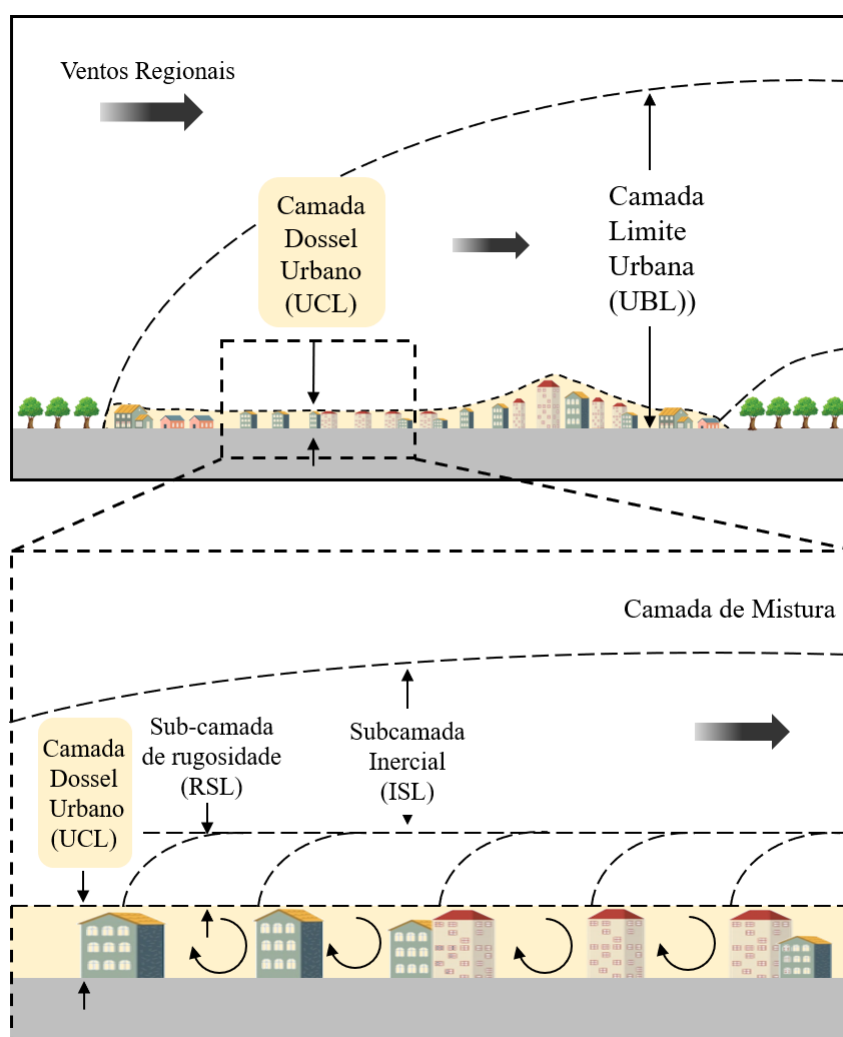


Figura 1 - Escalas climáticas urbanas.

Fonte: Adaptado de Erell, Pearlmutter e Williamson (2011) e Oke *et al.* (2017).

Quadro 2. Classificação das camadas atmosféricas que compõem o sistema climático urbano com base em escalas de comprimento verticais típicas.

Nome da camada	Definição	Dimensão vertical típica	Escala
Camada do Dossel Urbano (<i>Urban canopy layer</i> - UCL) (1,2)	Do solo à altura média dos edifícios/árvores. Consiste na atmosfera exterior (ao ar livre) e interior (dentro dos edifícios).	Dezenas de metros	Micro
Sub-camada rugosa (<i>Roughness sublayer</i> - RSL) (1,2)	Do solo até duas a cinco vezes a altura dos edifícios/árvores incluindo o UCL. O fluxo RSL é afetado por elementos individuais.	Dezenas de metros	Micro
Camada Superficial (<i>Inertial sublayer</i> - ISL) (1,2)	Acima do RSL, onde a turbulência dominada pelo cisalhamento cria um perfil logarítmico de velocidade e a variação dos fluxos turbulentos com a altura é pequena (< 5%).	~25–250 metros	Local
Camada de mistura (<i>Mixed layer</i> - ML) (2)	Acima do ISL, onde as propriedades atmosféricas são uniformemente misturadas por turbulência térmica e geralmente cobertas por uma inversão.	~250–2,500 metros	Meso

(1) Toda a camada do solo ao topo da ISL é denominada “Camada de Superfície” (SL), ou seja, a SL inclui UCL, RSL e ISL.

(2) Toda a camada do solo ao topo do ML que é influenciada por uma superfície urbana é denominada ‘Camada Limite Urbana’ (*Urban Boundary Layer*-UBL), ou seja, inclui UCL, RSL, ISL e ML.

Fonte: Oke (1984) adaptado por Oke (2017).

As escalas são conferidas pela soma de combinações repetidas de materiais e arranjo de superfícies que compõem uma unidade urbana, com o fim de descrever adequadamente as propriedades das áreas edificadas que afetam a atmosfera (Oke, 1984; Oke 2006; Oke *et al.*, 2017). As unidades urbanas estão dispostas no Quadro 03:

Quadro 3. Classificação das unidades urbanas.

Unidade urbana	Elementos construídos	Elementos verdes	Escala
Face	Telhado, parede, estrada	Área verde, gramado, lagoa	Micro
Elemento	Edifício residencial, arranha-céus, armazém	Árvore	Micro
Cânion	Rua, cânion	Linha de árvores ou jardins de rua, rio, canal	Micro
Quarteirão	Bloco da cidade, fábrica	Parque, lago de armazenamento	Local
Vizinhança	Centro da cidade, residencial, zona industrial	Cinturão Verde, floresta, lago, pântano	Local
Cidade	Área construída	Floresta urbana completa	Meso
Região urbana	Cidade mais campo ao redor		Meso

Fonte: Oke *et al.* (2017).

A influência da cidade na conformação do clima local pode ir desde dezenas de quilômetros de extensão (mesoescala) até a escala do microclima urbano na qual a influência do entorno construído sobre o conforto térmico do usuário se torna imediata. A presente pesquisa tratará do conforto térmico na escala do pedestre em cânions urbanos, com enfoque no efeito da forma urbana. Assim, as escalas abordadas são: o microclima, em escala horizontal, e a UCL, em escala vertical. A unidade urbana para estudo do adensamento construtivo, por meio da verticalização, é o cânion urbano. Nesse sentido, a presente pesquisa partirá da escala do **cânion urbano**. Torna-se importante, portanto, compreender os fenômenos climáticos que ocorrem nessa escala. Assim, o ponto de partida para compreender a conformação de microclimas urbanos será o metabolismo urbano a partir do Balanço de Energia de Superfície (*Surface Energy Balance* - SEB), com foco no balanço de energia no cânion urbano.

1.2 Balanço de Energia em Áreas urbanas

O balanço de energia urbano toma como base a primeira lei da termodinâmica, que afirma que energia nunca é perdida. Toda energia absorvida pelas superfícies proveniente da radiação pode aquecer o ar, pela troca de calor sensível (ocorre mudança de temperatura); pode evaporar, pela troca de calor latente (ocorre mudança de estado físico); e ainda pode ser armazenada nos materiais em forma de calor (Freitas, 2005). O SEB é fundamental para compreender o

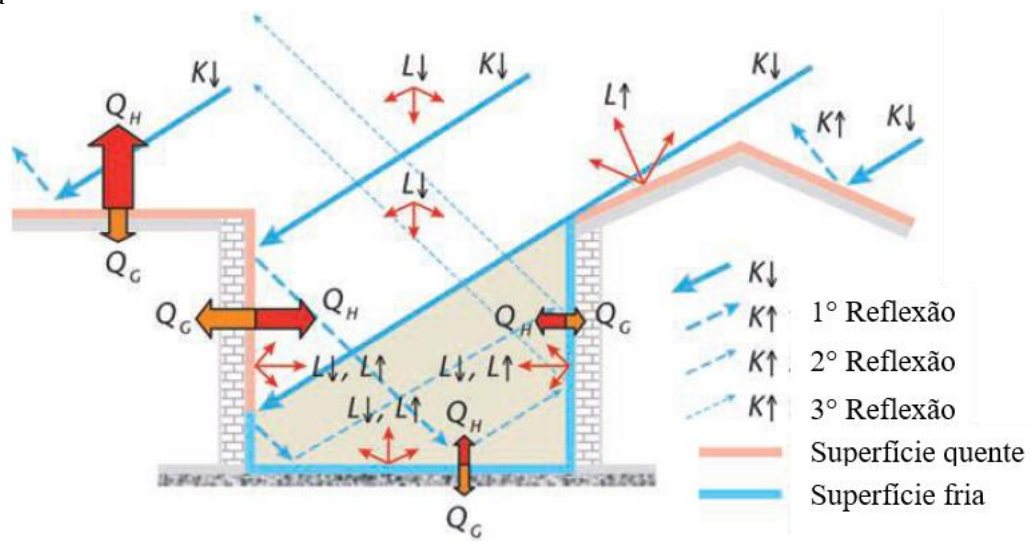
comportamento do microclima e do clima da ABL, por permitir analisar a transferência e armazenamento de energia dentro de um sistema urbano e entre esse sistema e a atmosfera. O SEB urbano é responsável por diversos fenômenos climáticos, como: a ilha de calor urbano, diferenças de umidade relativa do ar entre os ambientes urbano/rural e formação de nuvens e precipitação convectiva. Oke *et al.* (2017) destacou que uma compreensão física do SEB nas escalas do edifício, vizinhança e urbano é importante para a implementação de estratégias de projeto ao planejamento das cidades para mitigar ou melhorar o clima urbano.

O SEB influencia nas variações do clima de uma superfície e da ABL, que corresponde ao resultado líquido das trocas de energia por radiação, convecção e condução entre os elementos urbanos e a atmosfera (densidades de fluxo em $W\ m^{-2}$). O processo de desenvolvimento urbano impulsiona alterações no ambiente natural, que vão desde a geometria de sua superfície até as propriedades dos materiais que o reveste. O ambiente urbano apresenta uma rugosidade e porosidade de superfície diferente, como também seus materiais possuem propriedades radiativas, aerodinâmicas, térmicas e de umidade relativa do ar diferentes dos naturais, levando a uma superfície modificada e microclimas diferentes da superfície e da ABL. Dessa forma, o balanço de energia difere de um volume urbano de um natural⁹.

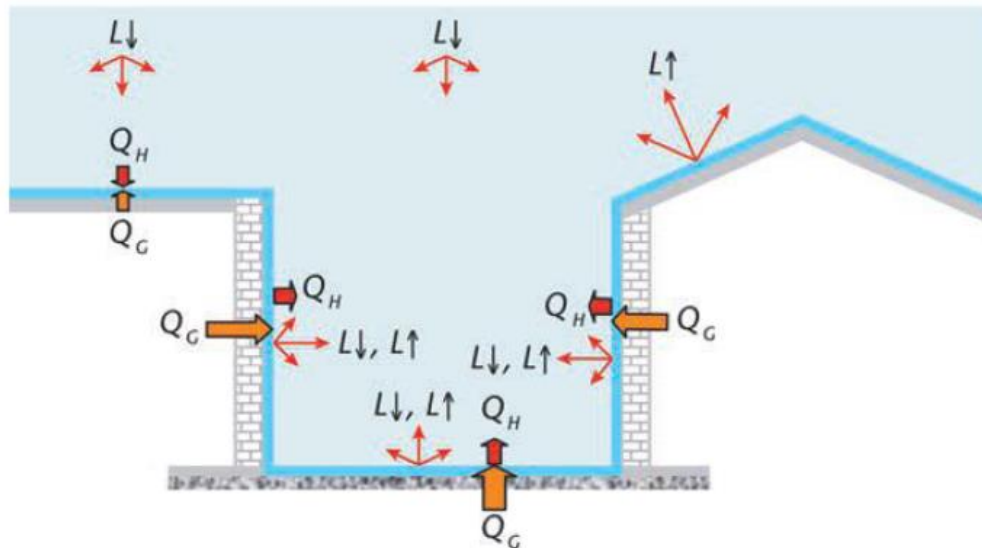
A forma geométrica de cânions urbanos se repete nas paisagens urbanas, variando com relação a sua orientação, proporção da relação H/W e propriedades termodinâmicas dos materiais que o constitui. O balanço de energia nos cânions urbanos apresenta comportamentos distintos entre o período diurno e noturno, como demonstra a Figura 2.

⁹ Para fundamentação sobre o balanço energético urbano, ver Oke et al (2017).

a) Dia



b) Noite



Legenda:

Q^* : Balanço de densidade de fluxo de radiação líquida de todas as ondas

K: Radiação de onda curta

L: Radiação de onda longa

Q_G : Densidade do fluxo de calor do solo, que transfere calor sensível por condução para o substrato

Q_H : Densidade de fluxo de calor sensível

Figura 2 - Esquema dos principais fluxos de troca de energia que compõem o SEB do cânion urbano (a) durante o dia e (b) durante a noite.

Fonte: Adaptado de Oke et al. (2017).

Durante o dia (Figura 2a), a irradiação solar impulsiona o SEB do cânion. No topo do cânion, os telhados recebem incidência direta de radiação, mas pouco do Q^* disponível é levado

para armazenamento (Q_G), em função de sua baixa admitância térmica¹⁰, o que leva grande parte do Q^* ser convertida da superfície quente do telhado para o ar mais frio como Q_H , e esse calor é diluído na atmosfera por turbulência. No interior do cânion, a incidência direta de irradiância solar depende dos padrões de sombra, determinados pela geometria Sol-Terra (latitude/longitude, época do ano e hora do dia), a orientação do cânion e sua relação H/W. De forma simplificada, quanto maior a relação H/W, menor é o acesso solar direto. No cânion urbano, ocorre o aumento da absorção geral de radiação de ondas curtas e longas devido a reflexão múltipla entre as faces. Os materiais que revestem as paredes e pisos apresentam uma admitância térmica (μ) relativamente elevada, e por isso aceitam e armazenam o calor durante o dia (Q_G grande), justificando as temperaturas de superfície mais frias do que as faces do telhado.

Segundo Campbell; Norman (1998), a admitância térmica μ está diretamente relacionada à capacidade do sistema de armazenar calor e à amplitude da onda diurna de mudança de temperatura da superfície em resposta ao forçamento de energia. Nesse sentido, quando a μ do material da superfície é elevada, a maior parte da entrada de calor da superfície é usada para aquecer o substrato (armazenado), sobrando pouco para aquecer a atmosfera ao longo do dia. Contudo, superfícies com baixa μ armazenam calor com menor facilidade. Isto leva à liberação de grandes quantidades de calor para a atmosfera (Q_H). O compartilhamento de calor sensível entre o substrato e a atmosfera é dado pela razão das admitâncias térmicas dos dois.

Durante a noite, no topo do cânion urbano, os telhados esfriam rapidamente, consumindo o calor diurno que fora armazenado (Figura 2b). Esse comportamento gera uma inversão de microescala no nível do telhado, e em condições de calmaria, em intervalos irregulares, essa camada de ar frio pode ser drenada, por gravidade, para as ruas no interior do cânion. No interior do cânion, o processo de resfriamento é mais fraco, devido ao reduzido FCV e pelo armazenamento de calor a ser dissipado ser maior. De maneira geral, o resfriamento no interior dos cânions é controlado por: temperaturas anteriores das faces do desfiladeiro; a relação H/W, que define o FCV e qualquer outra superfície do cânion; valor de emissividade da superfície; e, também, a temperatura de radiação efetiva do céu, controlada principalmente pela cobertura de nuvens (Oke *et al.*, 2017).

¹⁰ A admitância térmica “ μ ” (medida em $J\ m^{-2}\ K^{-1}\ s^{-1/2}$), corresponde a propriedade térmica de superfície que determina a facilidade com que um corpo absorve ou libera calor. É também chamada de inércia térmica. De acordo com Oke *et al.* (2017), μ é a propriedade térmica mais importante no clima urbano.

O SEB de um edifício, de acordo com Oke *et al.* (2017), depende de sua construção (projeto, materiais, isolamento), configuração (isolada ou embutida em um UCL), do tempo e clima, estação e número de ocupantes e seus usos do edifício. As trocas do SEB do edifício incluem ganhos de energia (aquecimento/refrigeração do ambiente 80%; entradas solares e metabolismo dos ocupantes 20%) e perdas de energia (vazamentos de janelas, portas e rachaduras 60%; condução através de paredes externas 25%; através do telhado 10%, até o solo 5%). Dessa forma, entende-se que no balanço de energia do cânion urbano, as dimensões de elementos urbanos, como edifícios e árvores; e a composição de seu arranjo espacial são significativos para as **trocas de radiação** e para o **fluxo de ar** na UCL. Assim, faz-se necessário compreender os processos térmicos e mecânicos mencionados.

1.2.1 Trocas de Radiação

Um dos componentes do SEB é o balanço de radiação da superfície, composta pelas trocas de radiação. A radiação pode ser descrita como uma série de ondas eletromagnéticas de diferentes comprimentos de onda (λ) que emanam do objeto radiante. A radiação é emitida por todos os objetos com temperatura (T) maior que zero absoluto. A radiação do sol, denomina-se como ondas curtas (K), também chamada de radiação solar. A radiação emitida dentro do Sistema Terra-Atmosfera (EAS) é a radiação de onda longa (L), também chamada de radiação terrestre (ou infravermelho térmico).

As ondas curtas ou radiação solar dependem das relações geométricas Sol-Terra, da capacidade da atmosfera de transmitir e absorver ondas curtas e da capacidade das nuvens, do céu e das superfícies circundantes de espalhar e refletir a radiação. A irradiância de ondas curtas consiste em dois fluxos: aquele que vem diretamente através da atmosfera como um feixe paralelo da direção do Sol, a irradiância de feixe direto (S), e aquele que chega de todas as partes do hemisfério do céu e objetos circundantes devido à dispersão e reflexão, a irradiância difusa (D). As trocas de radiação de ondas longas ocorrem de forma semelhante às de onda curta.

As trocas de radiação de onda curta e longa no meio urbano e rural ocorrem de forma diferente, pois o processo de urbanização gera mudanças na atmosfera e superfície, e com isso as propriedades radiativas da atmosfera são alteradas pelo aumento da concentração de poluentes atmosféricos e mudanças na temperatura do ar, umidade relativa do ar e nuvens; por conseguinte, a nuvem afeta a transmissão e emissão da radiação de entrada e aumenta a

interceptação da radiação de saída; consequentemente, a magnitude, direcionalidade e composição espectral da radiação que chega na parte inferior da UBL provavelmente será muito diferente daquela de uma ABL rural próxima. Além disso, a superfície urbana é composta por uma ampla mistura de faces, feitas de tecidos naturais (gramados, árvores, dentre outras) e manufaturados (edifícios, estradas, dentre outras), que resulta em uma superfície urbana multifacetada que emite e reflete a si mesma e gera diversos balanços de radiação distintos (Oke *et al.*, 2017).

Os efeitos da troca de radiação de onda curta em um cânion urbano, em formato bidimensional, podem ser observados na Figura 3. No momento em que uma face do cânion recebe irradiância de um feixe direto (Figura 3a), uma é refletida. Essa radiação se espalha de forma difusa: parte sai do cânion e parte é interceptada pela face oposta e pela superfície térrea do cânion (Figura 3b). Essas superfícies também absorvem e refletem radiação. Após a segunda reflexão (Figura 3c), cada unidade trocou radiação com todas as outras unidades dentro do cânion. Este processo de reflexão múltipla é repetido infinitamente, e, progressivamente, menos energia vai sendo trocada, pois cada unidade absorve uma parte da radiação que recebe. Vale destacar que as trocas de radiação de ondas longas ocorrem semelhantemente às de onda curta.

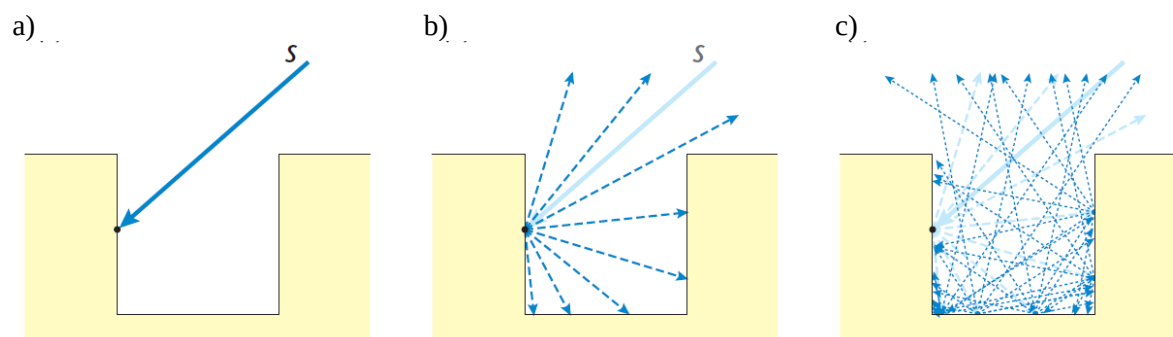


Figura 3 - Impacto de um cânion urbano nas trocas de radiação. O caso é simplificado limitando a consideração a um único raio de entrada, com: (a) o recebimento de irradiação direta do feixe através do topo do desfiladeiro, (b) a primeira reflexão das faces do cânion, (c) segunda reflexão. A entrada e a reflexão da radiação difusa do céu não são representadas.

Fonte: Oke et al. (2017).

O balanço de radiação, também chamado de radiação líquida, é o resultado líquido de todos os fluxos de radiação de entrada e saída em uma superfície. A radiação incidente consiste na radiação de ondas curtas do Sol e do céu e aquela refletida dos objetos ao redor, mais a radiação de ondas longas do céu e do meio ambiente. A saída consiste na onda curta refletida da superfície devido ao seu albedo, na onda longa emitida pela superfície, devido à sua

temperatura e emissividade, como também qualquer onda longa recebida refletida pela superfície (Oke *et al.*, 2017). O balanço de radiação pode ser indicado pela seguinte equação:

$$Q^* = K^* + L^* = K_{\downarrow} - K_{\uparrow} + L_{\downarrow} - L_{\uparrow} \quad (\text{W m}^{-2}) \quad \text{Equação 1}$$

onde Q^* , K^* e L^* são os balanços das densidades líquidas de onda total, líquida de onda curta e líquida de onda longa, respectivamente. As setas indicam os fluxos de entrada e saída na superfície.

A radiação do Sol é o fator mais importante dos climas próximos ao solo. Estudos acerca da radiação na UCL são baseados em cânions distinguidos por sua morfologia, compreendida pela geometria urbana (relação H/W e fator de céu visível, que sofrem influência da orientação), pois essas medidas regulam o acesso ao feixe solar e a extensão das reflexões múltiplas entre as faces; e as propriedades radiativas das superfícies, que controlam a capacidade de refletir radiação de ondas curtas (albedo; α) e ondas longas, e de emitir radiação de ondas longas (emissividade; ϵ) (Oke *et al.*, 2017). Além disso, é importante considerar a presença de vegetação como elemento que oferece sombra na escala do pedestre, beneficiando nas trocas de radiação.

1.2.2 Fluxo de Ar

O vento é o movimento horizontal do ar, descrito como um vetor tridimensional que tende a equilibrar áreas de diferentes pressões na atmosfera (Gandemer; Guyot, 1976). O vento flui paralelo ao solo, assim, em uma superfície plana os componentes horizontais desse vetor são maiores que sua componente vertical. Em função disso, as estações meteorológicas simplificam o vento para um vetor bidimensional, com velocidade e direção horizontal, esta última com origem ϕ , em graus do norte geográfico (sentido horário). No meio urbano, o vento é forçado a fluir ao redor e sobre as edificações e árvores, gerando alterações substanciais no componente vertical (Oke *et al.*, 2017).

O movimento dos ventos pode ser laminar, caracterizado por ser um fluxo uniforme e regular, encontrado em altitudes elevadas, acima de 500m; e turbilhonar, em que o fluxo varia em magnitude e direção, encontrado em altitudes abaixo de 500m. Quando o vento flui em diferentes direções e/ou velocidades, os gradientes de velocidade criam forças internas na atmosfera, que se forem suficientemente grandes, podem se tornar dinamicamente instáveis,

formando redemoinhos de transferências, que são parcelas de ar que se deslocam de sua posição atual para um fluxo mais lento/rápido, resultando em rajadas/calmarias. Esse processo converte a energia cinética média (*Mean Kinetic Energy* - MKE) em energia cinética turbulenta (*Turbulent Kinetic Energy* - TKE) (Oke *et al.*, 2017).

Próximo à superfície da Terra, os gradientes de velocidade são maiores, em função da força de atrito chamado de arrasto. Em uma superfície plana e lisa, o arrasto domina e o vento flui segundo a condição de “não escorregamento”, que afirma que o movimento do ar deve parar próximo de 1cm de determinada superfície. Em superfícies rugosas, é a forma do arrasto que domina à medida que o fluxo do ar interage com elementos de rugosidade (como, edifícios e árvores), que induzem perturbações de pressão, criando diferentes padrões de fluxo que origina os gradientes de velocidade. A variação da velocidade dos ventos em torno do seu valor médio, ao longo de um determinado período T, é entendida como turbulência.

A velocidade instantânea do vento em um ponto (altura z) pode ser expressa como a soma de dois termos:

$$U_z(t) = \bar{U}_z + U'_z(t) \quad \text{Equação 2}$$

onde U_z é a velocidade média durante um período (T) em determinada altura (z), acima do solo, e $U'_z(t)$ é a variável de flutuação correspondente com o tempo (t).

A velocidade média dos ventos varia em função de interações complexas, como: estratificação térmica nas camadas inferiores, turbulência térmica, e da natureza da rugosidade da superfície (campos, florestas, ambiente urbano, dentre outras.); e aumenta com a altura até o nível z_G , gradiente vertical de velocidade média, onde se torna constante e igual ao gradiente de velocidade (U_G), ver Figura 4. Assim, o vento pode ser caracterizado por sua velocidade média e intensidade de turbulência, que sofre alteração de acordo com a rugosidade da superfície e a altura (Gandemer; Guyot, 1976).

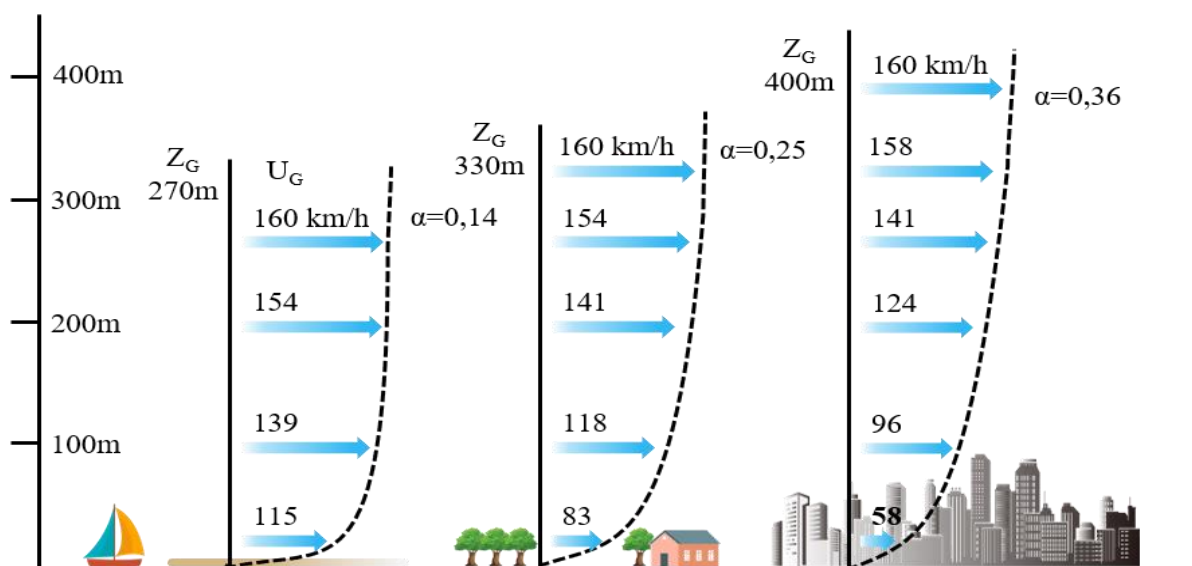


Figura 4 - Perfil vertical do vento a partir do tipo de rugosidade da superfície.

Fonte: Adaptado de Gandemer e Guyot (1976).

No meio ambiente urbano, a rugosidade e a porosidade da forma urbana influenciam na velocidade e permeabilidade dos ventos. Com relação à natureza da rugosidade da superfície, é possível observar o efeito do meio ambiente urbano no comportamento do vento, aumentando o nível do gradiente vertical de velocidade média e diminuindo a velocidade média do vento próximo ao solo. A porosidade se refere a maior ou menor permeabilidade aos ventos que uma estrutura urbana possa apresentar (Oliveira, 1985). Torres (2017) afirmou que a porosidade é determinada pela taxa de penetração de ventos na composição urbana e está relacionada diretamente com a capacidade das edificações e arranjos construtivos para permitir a ventilação cruzada dos ventos através do afastamento entre edifícios, a taxa de ocupação, a existência de espaços vazios e a largura das vias.

Acerca dos edifícios, é importante destacar que, ao contrário dos elementos vegetativos, eles são impermeáveis, inflexíveis, o que gera a alteração da forma de seu movimento original, e força perturbações à barlavento e sotavento, formando esteiras caracterizadas pela diminuição de MKE e aumento do TKE. Além disso, os edifícios apresentam propriedades radiativas, térmicas e de umidade relativa do ar que causam turbulência térmica. Diante disso, torna-se importante compreender o comportamento do vento em torno do edifício, visto que mecânica e termicamente esses elementos influenciam no comportamento dos ventos na UCL (Oke *et al.*, 2017).

A compreensão do comportamento dos ventos em torno de um edifício real é complexa, o que requereria a implantação de diversos sensores em um longo período de amostragem, por

conta da variabilidade temporal. De acordo com Oke *et al.* (2017), a maior parte do conhecimento adquirido provém de modelos físicos ou numéricos, tornando possível mensurar as propriedades do fluxo de aproximação, como velocidade, direção, turbulência e estabilidade estática¹¹.

A partir da regularidade do espaçamento entre os edifícios e/ou a largura e orientação das ruas é possível compreender o comportamento dos ventos em uma escala a nível do cânion urbano. Com relação ao espaçamento entre os edifícios, Oke *et al.* (2017) pontuam três regimes de fluxos no cânion urbano na RSL, com relação à altura das edificações (H) e o espaçamento entre elas (W), conhecido como relação H/W (ver Figura 5):

- Fluxo de rugosidade isolado, os edifícios têm um distanciamento maior ($H/W < 0,35$), formando esteiras individuais, semelhante com as de edifícios isolados. Em função do distanciamento entre as edificações, o conceito de cânion urbano é de uso limitado;
- Fluxo de interferência de esteira, quando as densidades são maiores ($0,35 < H/W < 0,65$) a distância que separa os elementos de rugosidade na direção ao longo do vento começa a corresponder à extensão horizontal da cavidade do edifício (por exemplo, $W <$ ou igual $2H$). O vórtice na cavidade atrás do prédio a favor do vento é reforçado pelo fluxo que desce pela face à barlavento do prédio seguinte. Esses vórtices geralmente não são estáveis, flutuam em velocidade, forma e reforma (turbulentos);
- Fluxo *skimming*, com espaçamento menor ($H/W > 0,65$), o fluxo acima do telhado “salta” pelos topos dos edifícios com menos tendência a entrar nos cânions das ruas. O fluxo médio acima fornece uma força tangencial fraca mantendo um fluxo de circulação de vórtice dentro do cânion da rua. Em condições de vento com menor velocidade pode prevalecer a quase estagnação.

¹¹ Para maior detalhamento sobre os mecanismos de escoamento do vento no tecido urbano, ver Oke *et al.* (2017); Romero (2000) e Bittencourt e Cândido (2008).

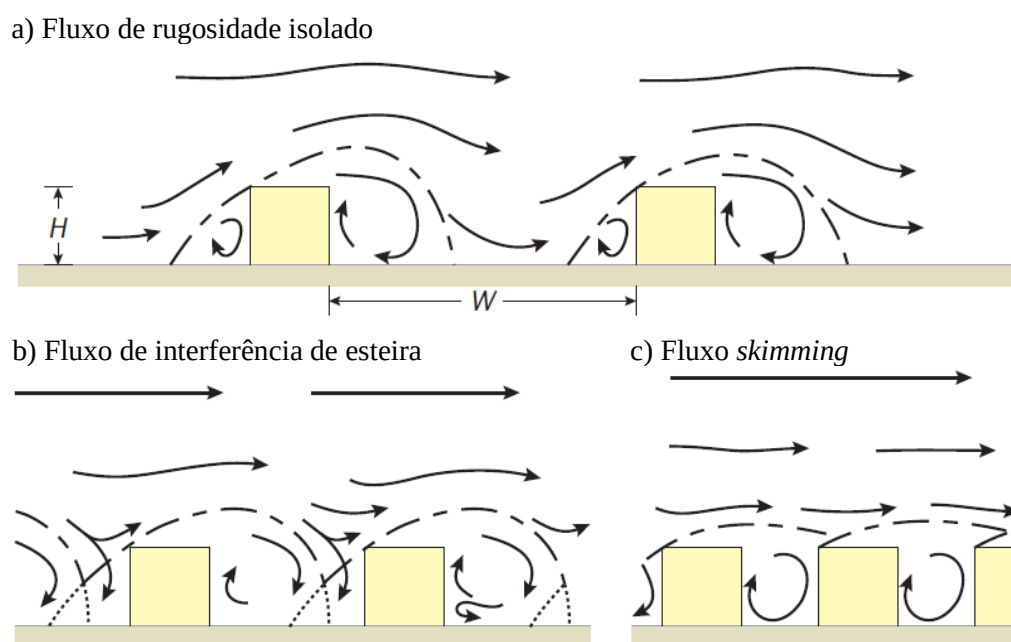


Figura 5 - Regimes de fluxo dos ventos em cânion urbano na RSL.

Fonte: Adaptado de Oke et al. (2017).

Quanto à orientação dos cânions urbanos, tem-se: Vórtice transversal do desfiladeiro, quando a direção predominante dos ventos é perpendicular ao eixo do cânion ($\varphi_c = 90^\circ$), nesse caso cria-se um vórtice de recirculação no interior do cânion a favor do vento, que aumenta a velocidade média dos ventos e contribui para as trocas entre a atmosfera acima do telhado e o UCL (ver Figura 6a); Vórtices empilhados, quando sob a mesma orientação com maior altura das edificações (cânion urbano profundo), criam-se um vórtice principal, com menor velocidade, e vórtices secundários que giram em direções opostas, em menor velocidade, até atingir o nível do solo, assim, os vórtices secundários tendem a recircular o ar poluído no interior do cânion, não sendo eficiente na dispersão dos poluentes (Figura 6b); Vórtice helicoidal, quando a direção predominante dos ventos é oblíqua ao eixo do cânion ($\varphi_c = 45^\circ$) tem-se vórtices que fluem em espiral no interior do cânion (ver Figura 10c); e a Canalização, quando a direção predominante dos ventos é menor que 30° ($\varphi_c < 30^\circ$) e o fluxo é canalizado no interior do cânion (ver Figura 6d), nesse caso a velocidade dos ventos vai depender da relação H/W (Oke et al., 2017).

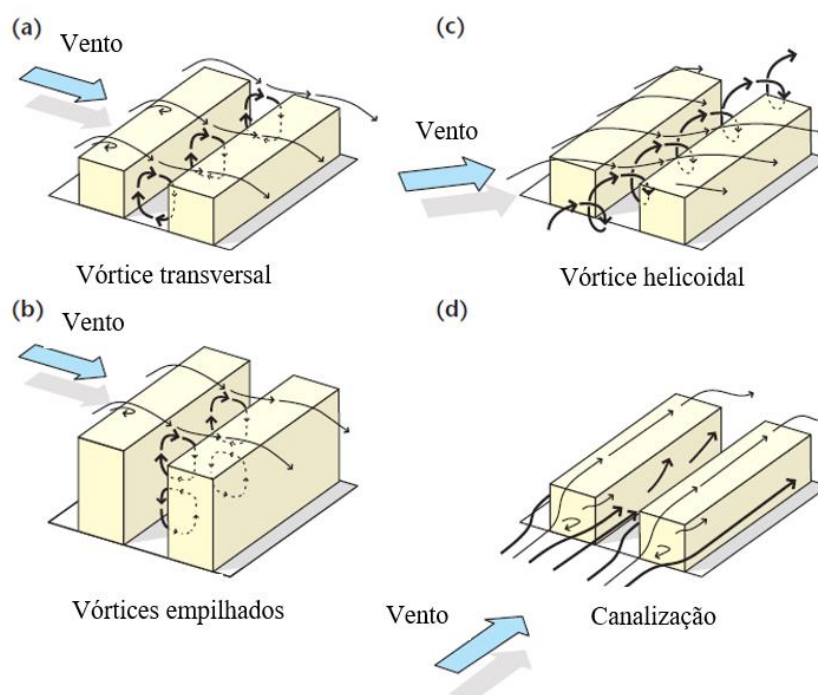


Figura 6 - Padrões de orientação dos ventos predominantes com relação ao eixo do cânion urbano: (a) vórtice transversal, (b) vórtices empilhados, (c) vórtice helicoidal e (d) canalização.

Fonte: Adaptado de Oke et al. (2017).

A compreensão da dinâmica dos ventos é importante para a dispersão da poluição do ar e do calor antropogênico, que é o calor liberado na atmosfera em função das atividades humanas (como transporte, edifícios de uso industrial/ residencial/ comercial e atividades humanas); para o conforto térmico do pedestre, e para o melhor aproveitamento da ventilação natural no interior das edificações, o que diminui o uso de condicionantes artificiais como é o caso dos condicionadores de ar (Xue *et al.*, 2020). Tais efeitos contribuem para minimizar os impactos de diversos fenômenos climáticos, especialmente das ilhas de calor urbanas (ICU), tópico que será tratado a seguir.

1.3 Ilhas de Calor Urbana, forma urbana e microclima

O estudo do fenômeno das ICU tem ganhado notável destaque, mundialmente, por estar ligado a duas importantes questões ambientais: o crescimento populacional e as mudanças climáticas (Stewart; Oke, 2012). A ICU se refere ao aumento da temperatura do ar (Tar) no meio urbano em comparação ao meio rural (Oke, 1973). A ocorrência das ICU está relacionada à diferença dos elementos estruturais e de cobertura do solo entre as áreas urbanas e rurais,

aliada à liberação de calor e vapor d'água do calor antropogênico¹² (das atividades humanas), mecanismos que alteram os balanços naturais de energia e radiação da superfície (Oke 1982). Desta forma, podem ocorrer em áreas urbanas de maior ou menor porte, em climas quentes ou frios. Em cidades de clima frio, a ICU pode trazer benefícios, como: auxiliar no aquecimento das edificações, proporcionar conforto térmico ao ar livre, dentre outras. Em contrapartida, em cidades de clima quente, a ICU aumenta o desconforto térmico no interior das edificações (o que gera maior consumo de condicionadores de ar, e por consequência, maior demanda por energia), como também, no ambiente externo (Stewart; Oke, 2012).

De acordo com a diferença nas taxas de resfriamento/aquecimento na superfície/substrato/ar e pela camada vertical urbana (solo, UCL e UBL) entre o meio urbano e rural, as ICU podem ser classificadas em quatro tipos: Ilha de calor urbano subterrâneo (ICU_{Sub}), que atinge a superfície do solo até a profundidade em que ocorra mudança de temperatura durante o período selecionado; Ilha de calor urbano superficial (ICU_{Surf}), que engloba toda a superfície, o que inclui o solo e todas as faces expostas dos elementos urbano; Ilha de calor urbana da camada do dossel urbano (ICU_{UCL}), na camada de ar do solo até o nível do telhado; e Ilha de calor urbano da camada limite urbano (ICU_{UBL}), que atinge a camada de ar do solo até a zona de arrastamento (Oke, 1995).

Oke *et al.* (2017) pontuou que as causas da ICU_{UCL} são de escala microclimática e local. Nesse sentido, esse tipo será abordado na presente pesquisa. Os autores indicaram que a mesma inclui:

- Geometria urbana, que a partir da relação H/W e do FCV podem influenciar na recepção/perda de radiação e nos ventos. Vale destacar que dentre os elementos climáticos que a ICU média diária está correlacionada, destaca-se a velocidade do vento, por seu papel no transporte e mistura dos fluxos de ar na atmosfera, e nos processos de advecção ou troca turbulenta; e a cobertura das nuvens, por ser um forte controle na troca de ondas curtas e longas, principais causadores de aquecimento e resfriamento, respectivamente (SUNDBORG, 1950). Nesse contexto, a umidade e a pressão possuem menos influência na ICU_{UCL};

¹² Calor antropogênico – calor liberado diretamente para a atmosfera como resultado de atividades humanas, como a combustão de combustíveis. Os fluxos de calor antropogênico urbano incluem aqueles associados ao metabolismo urbano, como aquecimento e resfriamento de espaços em edifícios, veículos, processos industriais, bem como o metabolismo de humanos e animais. Vapor d'água antropogênico – vapor d'água formado quimicamente durante a combustão de combustíveis no ar ou liberado de forma fugitiva durante o aquecimento de água e processos de desumidificação no interior de edifícios. Constitui um componente do balanço hídrico da superfície urbana (Oke et al, 2017, p. 469, tradução nossa).

- Propriedades térmicas dos materiais, com base na capacidade que cada material que constitui a superfície urbana possui de armazenar e, posteriormente, liberar calor sensível, como também pelo seu grau de permeabilidade, que reduz a umidade do solo e a umidade da superfície;
- Calor antropogênico, em função da queima de combustível de veículos automotores e do aquecimento/arrefecimento das edificações, que liberam Q_F .

O fenômeno climático das ICU é amplamente estudado em todo o mundo (Erell; Pearlmutter; Williamson, 2011; Oke *et al.*, 2017; Yola; Siong, 2018; Darbani *et al.*, 20211; Shareef, 2022; Habibi *et al.*, 2024; Kowalski, Masiero, Krüger, 2024; Martinelli *et al.*, 2024; Quadros *et al.*, 2024; Sayad *et al.*, 2024), e a compreensão de sua causa e comportamento é importante para compor diretrizes urbanísticas sustentáveis que possam oferecer condições mais favoráveis ao microclima urbano. Assim, vale destacar que as causas da ICU_{UCL} são os componentes da **forma urbana** e da função urbana.

O clima urbano se constitui a partir da **forma e função urbana**. A **forma urbana** está relacionada às mudanças nas propriedades físicas e estáticas da superfície, o que inclui a estrutura urbana, tecido urbano e cobertura de superfície. A função urbana corresponde às mudanças decorrentes de emissões antrópicas, como o uso do solo, processos industriais e afins, transporte, dentre outras. (Oke *et al.*, 2017). A compreensão da forma e função urbana, como características urbanas que conformam os climas urbanos, é fundamental na arquitetura e no planejamento urbano. O objetivo da presente pesquisa **trata somente da forma urbana**, nesse sentido, torna-se importante aprofundar a discussão sobre o tema.

A estrutura urbana está ligada a densidade urbana, pois se dá pela configuração em 3D dos elementos urbanos, com base na dimensão dos edifícios e espaços entre eles e a largura das ruas (geometria urbana). O tecido urbano está relacionado com os tipos de materiais que formam os elementos urbanos, como edifícios, estradas, vegetação, solo, dentre outras, o que determina as propriedades radiativas, térmicas, de umidade relativa do ar e aerodinâmica (rugosidade e porosidade) das superfícies, que indicará sua capacidade de absorver/ refletir/ emitir radiação e aceitar/ transferir/ reter calor e água. A cobertura de superfície corresponde à característica da fração urbana, se é composta por um tipo de tecido edificado, pavimentado, vegetado, solo exposto ou água. Os tópicos a seguir apresentarão os efeitos da forma urbana no microclima do cânion urbano, com base em sua geometria urbana, tecido e cobertura superficial urbana.

1.3.1 Efeito da Geometria Urbana no microclima

A geometria do cânion é usualmente expressa pela Relação H/W , dada pela razão de aspecto entre a altura média das edificações (H) e o distanciamento entre os edifícios (W), pelo Fator de Céu Visível (FCV) e pela orientação do eixo do cânion (Erell; Pearlmutter; Williamson, 2011). A respeito da relação H/W , os cânions urbanos podem ser classificados em: rasos, regulares e profundos. Os cânions são rasos quando a razão entre o valor de H e o valor do W é menor que 1. No valor do distanciamento, considera-se a soma da largura da via, dos passeios e dos recuos frontais das edificações. Quando o valor da razão é igual a 1, o cânion é regular. Nesse sentido, se a altura das edificações é maior que o distanciamento entre os edifícios, esta relação é superior a 1 e os cânions podem ser classificados como profundos (Quadro 04).

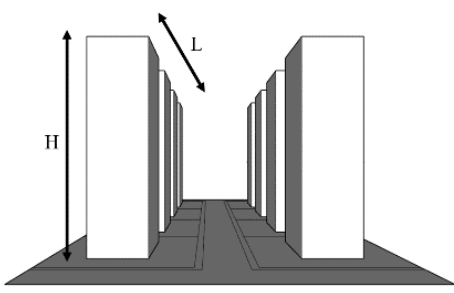
Quadro 4. Geometria da rua do cânion.

Cânions Rasos	Cânions Regulares	Cânions Profundos
Relação $H/W < 1$	Relação $H/W = 1$	Relação $H/W > 1$

Fonte: Elaborado pela Autora.

Os cânions também podem ser classificados quanto a sua profundidade, dada pela razão entre a maior dimensão da quadra com sequência contínua de edifícios (L) e a altura média das edificações (H), denominada relação L/H . O cânion é considerado curto se a razão entre a altura média das edificações e a medida da quadra for inferior a três. No caso de a razão ser igual a cinco, o cânion urbano é médio, e se for maior que sete, o cânion é longo (ver Quadro 05). Por último, os cânions podem ser simétricos ou assimétricos. No primeiro caso, os cânions possuem edifícios alinhados de ambos os lados com altura semelhante. Enquanto que, os cânions podem ser assimétricos se as edificações possuem alturas diferentes (Afiq; Azwadi; Saqr, 2012).

Quadro 5. Classificação de cânions urbanos conforme a sua profundidade.

	Proporção	Classificação do cânion
	$L/H < 3$	Curto
	$L/H = 5$	Médio
	$L/H > 7$	Longo

Fonte: Adaptado de AFIQ; AZWADI; SAQR (2012).

A relação H/W exerce notável influência quanto à incidência de radiação solar direta no interior do cânion urbano, especialmente no nível próximo à superfície do solo. Em cânions urbanos rasos e regulares, a radiação solar direta incide mais facilmente no interior do cânion, atingindo diretamente as fachadas das edificações e a superfície do solo, já em cânions profundos a incidência da radiação solar direta se dá, predominantemente, nas fachadas das edificações, mantendo a maior parte da absorção de radiação solar direta em um nível muito acima do solo (Figura 7).

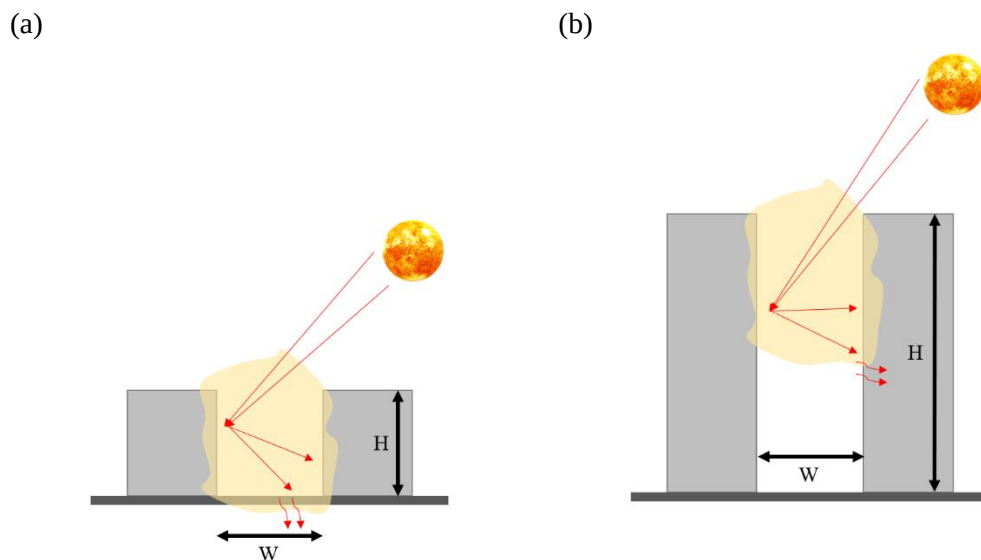


Figura 7 - Efeito da radiação solar com base na relação H/W igual a 1 (a) e 4 (b).

Fonte: Adaptado de Romero (2001).

O FCV é expresso pelo grau de obstrução da abóbada celeste, observado a partir de um ponto no solo do interior do cânion urbano, tomando, usualmente, no nível da superfície do solo ou na altura média do pedestre, ver Figura 8 (Johnson; Watson, 1984). O valor do FCV é adimensional e varia de 0 (zero) a 1 (um), sendo 0 o valor correspondente a um ponto com área

visível do céu totalmente obstruída e 1 correspondente a uma área sem qualquer obstáculo entre o ponto de observação e a abóbada celeste (Steyn, 1980). A lente olho de peixe ilustra a sensação do efeito do FCV em diferentes locais urbanos, ver Figura 9.

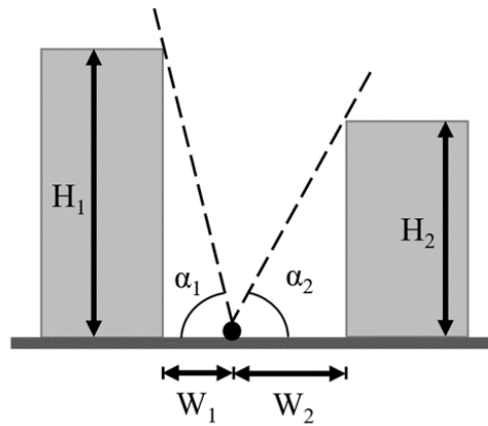


Figura 8 - Fator de Céu Visível (FCV).
Fonte: Adaptado de Oke (1988).

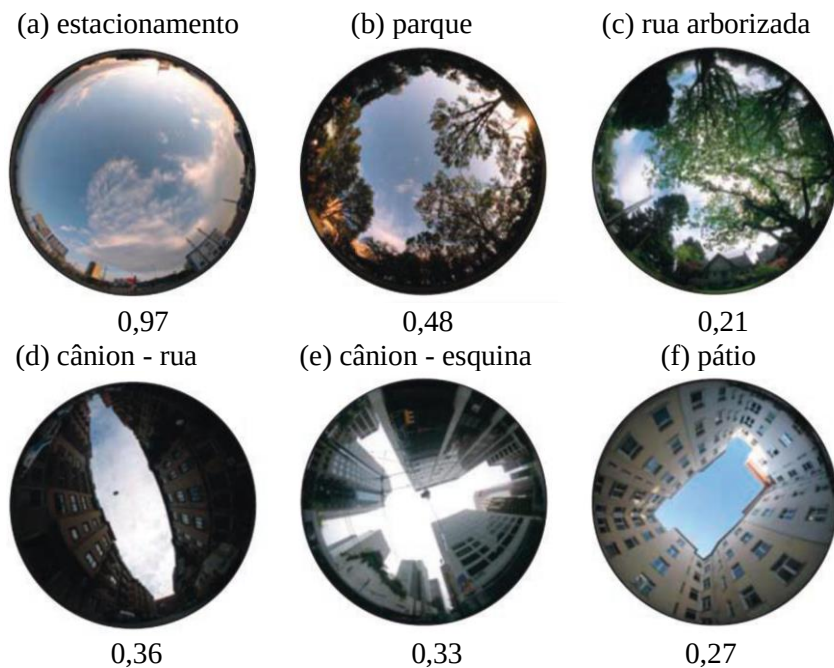


Figura 9 - Fotografias obtidas com lente olho de peixe em diferentes locais urbanos.
Fonte: Adaptado de Oke et al. (2017).

O FCV é um parâmetro importante na análise das trocas de calor e radiação no interior do cânion urbano (Oke, 1981), pois influencia na radiação recebida (ou emitida) pelas superfícies no interior do cânion e a radiação emitida (ou recebida) pela abóbada celeste (Erell; Pearlmutter; Williamson, 2011). Quanto maior a obstrução, menor é a capacidade de troca

térmica radiativa com a abóbada celeste, e maior é a irradiação térmica do calor entre as superfícies no interior do cânion, o que contribui para o aquecimento noturno daquele microclima (Oke, 1981; Oke et al., 2017). Assim, o FCV apresenta relação direta com o acesso solar e o resfriamento noturno de cânions urbanos.

A orientação do cânion urbano determina o período de exposição da incidência direta dos raios solares ao longo do dia, assim como o aproveitamento da ventilação natural (Erell; Pearlmutter; Williamson, 2011). Sua orientação é, comumente, descrita pela direção cardinal mais próxima, como N-S (Norte-Sul), E-W (Leste-Oeste), NW- SE (Noroeste-Sudeste), NE-SW (Nordeste-Sudoeste). Na orientação N-S, por exemplo, o sombreamento produzido pelas próprias edificações no interior do cânion é favorecido, pois estão dispostas perpendicularmente ao caminho aparente do Sol na abóbada celeste. Assim, a verticalização exerce maior influência na redução do ganho térmico devido ao sombreamento gerado sobre os passeios e a via pública. Contudo, as áreas de sombra são intercaladas por áreas não sombreadas, no espaço vazio (recuo) entre as edificações (Ver Figura 10a).

Em cânions com orientação oblíqua, a exemplo da orientação NE-SW (ver Figura 10b), o sombreamento nos passeios e na via pública também é favorecido, e ocorre de forma linear, sem a interferência da intercalação das edificações. Vale destacar que em cânion de orientação perpendicular e oblíqua, a incidência de radiação solar direta ocorre em menor período, limitada aos horários de maior altura solar, a depender da latitude da cidade. Cânions com orientação E-W estão dispostos paralelamente ao caminho aparente do Sol. Nessa orientação, a radiação solar atinge mais facilmente o interior do cânion urbano até a superfície do solo e a verticalização exerce menor influência quanto ao sombreamento, mesmo em horários de menor altura solar, a depender da latitude da cidade (ver Figura 10c).

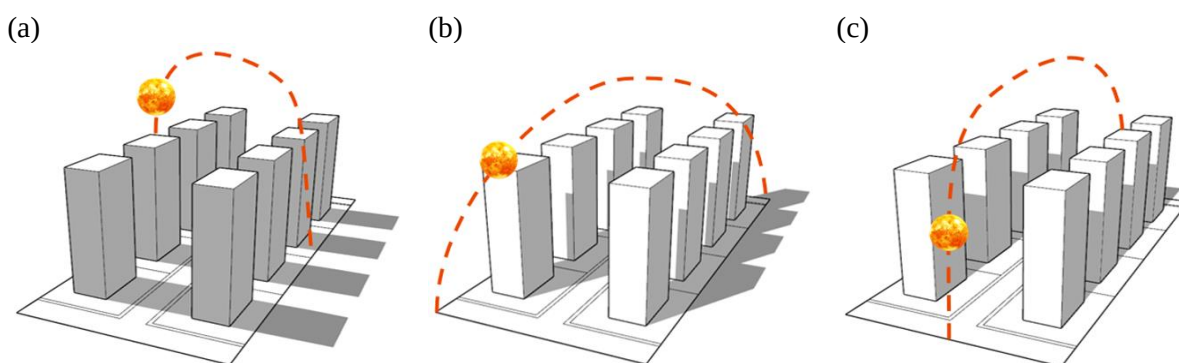


Figura 10 - Orientação do cânion urbano quanto à incidência da radiação solar: (a) Perpendicular ao cânion; (b) Oblíqua ao cânion, (c) Paralela ao cânion.

Fonte: Elaborado pela Autora.

A orientação do cânion urbano também exerce influência quanto ao aproveitamento da ventilação natural. Quando a orientação do cânion é perpendicular à direção predominante dos ventos (Figura 11a), as sequências contínuas de edificações formam barreiras à penetração da ventilação natural em seu interior, criando áreas de estagnação do fluxo de ar, o que reduz as trocas térmicas por convecção e, conseqüentemente, proporcionando maior acúmulo de calor. Esse efeito piora se os recuos entre as edificações forem reduzidos. Em orientações de cânions oblíquas à direção predominante dos ventos (ver Figura 11b), ocorre melhor permeabilidade dos ventos nas vias à barlavento e à sotavento. O distanciamento entre as edificações será determinante para maior ou menor penetração do fluxo de ar no interior do cânion urbano.

Se a orientação do cânion é paralela à direção predominante dos ventos (ver Figura 11c), as sequências contínuas de edificações formam um corredor que canaliza a ventilação natural, o que gera o aumento da velocidade dos ventos no interior do cânion. Com isso, ocorre maior troca de calor por convecção, retirando o excesso de umidade e/ou poluição do ar, que compromete o conforto térmico em climas quentes e a qualidade do ar, respectivamente. Em cânions urbanos profundos esses efeitos são mais proeminentes. Acerca do aproveitamento da ventilação natural, cânions assimétricos apresentam condições mais favoráveis à rugosidade, e com isso, à permeabilidade do fluxo de ar no interior do cânion urbano.

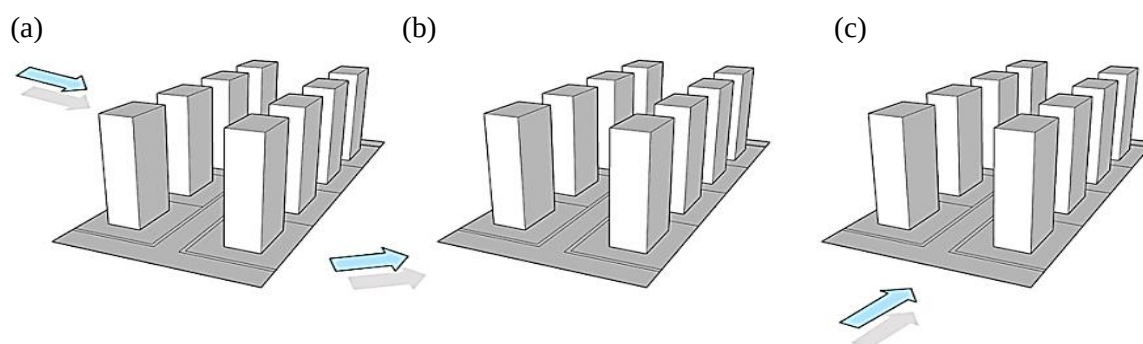


Figura 11 - Orientação do cânion urbano quanto à direção predominante dos ventos: (a) Perpendicular ao cânion; (b) Oblíqua ao cânion, (c) Paralela ao cânion.

Fonte: Elaborado pela Autora.

Os efeitos da geometria urbana são diferentes ao longo do dia: durante o dia, o sombreamento das edificações pode provocar uma diminuição na quantidade de radiação solar que atinge o solo e, conseqüentemente, o ar próximo ao nível da rua (Gomes; Lamberts, 2009); no período noturno, ocorre a perda de calor por radiação de onda longa, resultado da energia absorvida pelos elementos urbanos, provenientes da radiação solar incidente durante o período diurno (Nakata-Osaki; Souza; Rodrigues, 2016). Além disso, deve-se considerar o caminho do

sol, que varia de acordo com os períodos de solstício de verão/inverno e equinócio, e com a latitude da região a ser estudada, como indica a Figura 12 (Costa, Maroja, 2018).

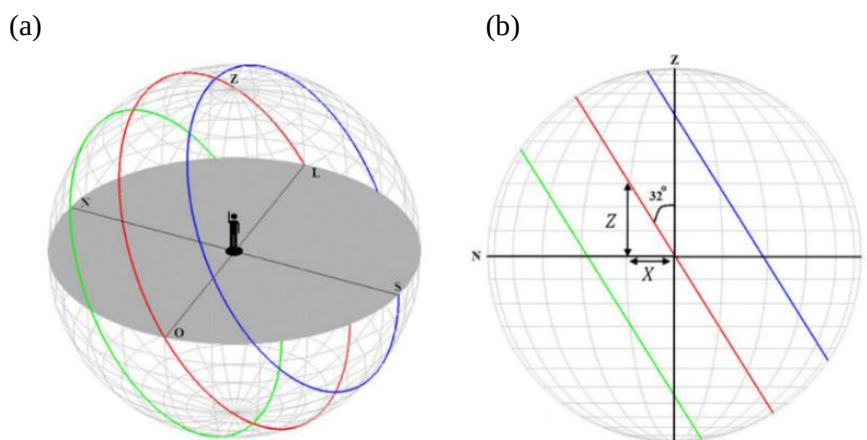


Figura 12 - Curvas da trajetória do sol ao longo do ano. (a) Variação da posição do plano da trajetória do Sol no céu para um observador no hemisfério sul, em que a curva vermelha corresponde aos equinócios; a curva verde, ao solstício de inverno e a curvas azul, ao solstício de verão. (b) Projeção das órbitas no plano vertical e paralelo, ao horizonte do observador e à direção N-S, respectivamente.

Fonte: Costa, Maroja (2018).

A geometria urbana tem impacto direto nas ICU (Erell; Pearlmutter; Williamson, 2011). No entanto, em cânions urbanos profundos, o comportamento diurno das ICU_{UCL} pode se apresentar de duas formas diferentes, como: Ilha de Resfriamento Urbana (*Urban Cool Island*) e Ilha de Umidade Urbana (*Urban Moisture Island*). A Ilha de Resfriamento Urbana é um fenômeno diurno, caracterizado pela diminuição da temperatura do ar no interior do cânion urbano (Yang *et al.*, 2017). Sua causa varia de cidade para cidade. No caso da forma urbana, estudos apontam que a redução da incidência da radiação solar direta, no nível próximo ao solo, em cânions urbanos profundos promove o surgimento desse fenômeno (Johansson, 2006; Erell; Williamson, 2007; Bohnenstengel *et al.*, 2011). Isso indica que, em cidades de clima quente, o sombreamento gerado pela altura e proximidade entre as edificações, influencia diretamente na redução da temperatura radiante média (TRM) e na temperatura do ar, variáveis importantes no que tange o conforto térmico no nível do pedestre (Andreou, 2013; Muniz-Gäal *et al.*, 2018).

A proximidade entre as edificações prejudica a permeabilidade dos ventos (Romero, 2011; Ramyar *et al.*, 2019). A ventilação desempenha um importante papel para dispersão do calor antropogênico e de poluentes, assim como para as trocas de calor entre o pedestre e o meio ambiente (De; Mukherjee, 2018; Xue *et al.*, 2020). Em climas quentes, condições favoráveis para o conforto térmico do pedestre devem equilibrar o uso de duas estratégias

bioclimáticas: sombreamento e ventilação natural (Andreou, 2013). Dessa forma, para possibilitar a adoção de recuos adequados à ventilação e obter sombreamento no nível do pedestre, diversos estudos indicam a utilização de árvores com copas densas (Yang; Lin, 2016; Wai *et al.*, 2020; Bochenek; Klemm, 2021; Lee; Mayer, 2021).

A composição e forma dos edifícios influencia na permeabilidade dos ventos. O recuo progressivo impacta positivamente na porosidade da malha urbana, promovendo a ventilação cruzada, o que gera o aumento da velocidade dos ventos à barlavento e à sotavento. Villas Boas (1983) apontou que a ventilação cruzada pode ser potencializada quando a relação H/W for igual a 6 nas vias à barlavento, contudo essa medida pode ser reduzida com o uso de *pilotis*. O Autor destacou a importância do uso de *pilotis* para favorecer a ventilação cruzada nas ruas à sotavento, reduzindo as zonas de estagnação de ar com o aumento da velocidade dos ventos. O baixo grau de rugosidade e porosidade resultam no acúmulo de radiação de onda longa e no acúmulo da poluição do ar, também conhecida como efeito *smog* fotoquímico¹³, no interior do cânion, pois quanto menor a velocidade dos ventos, maior será o tempo necessário para deslocar os poluentes da atmosfera urbana através das trocas térmicas (Oliveira, 1985; Romero, 2011; Torres, 2017). Vale destacar, de acordo com Romero (2011), que o aproveitamento da ventilação natural auxilia no conforto térmico do pedestre em regiões de clima tropical, como é o caso do presente objeto de estudo.

O padrão de umidade relativa do ar diurna entre as áreas rurais e urbanas são distintos. Segundo Oke (1987), nas áreas rurais, a umidade apresenta dois máximos de concentração: o primeiro é gerado pela evaporação do orvalho, solo e vegetação após o nascer do sol; e o segundo, pela noite quando a evapotranspiração diminui. Nas áreas urbanas, as duas máximas são raramente observadas. A falta de orvalho reduz a evaporação das águas superficiais após o nascer do sol, enquanto à noite ainda há concentração de umidade no interior do cânion, especialmente se a permeabilidade e velocidade da ventilação natural na malha urbana for fraca. Assim, o fenômeno da Ilha de Umidade Urbana pode ser observado durante todo o dia, com maior impacto durante o dia. De acordo com Wang *et al.* (2020), no fenômeno da Ilha de Umidade Urbana ocorre o aumento da umidade do ar, em função do aumento das fontes de umidade urbana, devido às fontes antropogênicas (oriundas do extensivo uso de condicionadores de ar), e do aumento da evapotranspiração; da redução de sumidouros de

¹³ O efeito *smog* fotoquímico é a poluição atmosférica urbana por ozônio e outros componentes oriundos de reações fotoquímicas/químicas, causadas pela luz solar, cuja aparência se assemelha a uma neblina de fumaça próxima à superfície (LEMOS, 2010).

umidade, em decorrência da falta do orvalho; e do fluxo de vento reduzido na UCL, que reduz a capacidade de remoção da umidade. O aumento da umidade do ar urbano contribui para o aumento do uso de condicionadores de ar, gerando uma maior demanda por energia.

1.3.2 Efeito do Tecido Urbano no microclima

O tecido urbano corresponde aos materiais que compõem os elementos urbanos, o que determina as propriedades radiativas, térmicas, de umidade e aerodinâmica das superfícies. As propriedades radiativas definem a capacidade de refletir radiação de ondas curtas (albedo: α) e ondas longas, e de emitir radiação de ondas longas (emissividade: ε). O albedo está relacionado a capacidade que cada material tem de refletir energia para as superfícies adjacentes, o que influencia nas condições climáticas e no conforto térmico no nível do pedestre (Campbell, Norman, 1998; Krüger; Gonzalez, 2016). A emissividade é a capacidade de uma superfície emitir calor e seu valor varia de 0 a 1.

Os materiais presentes no meio urbano apresentam valores de albedo maiores, em comparação com os materiais presentes no meio natural¹⁴. Faces com baixo albedo possuem um grau de refletância menor, e por isso apresentam um padrão de absorção de ondas curtas maior, o que aumenta a temperatura de superfície (T_0). Já as faces com alto albedo, a absorção de onda curtas diminui, e por consequência, a T_0 também. No caso da emissividade, valores elevados gera o aumento da absorção de onda curta e emissão de radiação de onda longa. Caso a emissividade de uma superfície fosse igual a 1, ela seria um emissor perfeito, conhecido como corpo negro (Oke *et al.*, 2017). Assim, selecionar materiais ou revestimentos das faces urbanas com base no albedo e emissividade pode ser uma importante estratégia para beneficiar as condições climáticas locais.

Em cânions urbanos, a adoção de materiais de alto albedo nas fachadas pode reduzir a T_0 , assim como a transferência de calor sensível para o interior da edificação, o que gera a diminuição da demanda de energia para climatização. Contudo, a radiação solar que é refletida de volta para o cânion, gera o desconforto térmico no ambiente externo. Assim, recomenda-se o uso de materiais com alto albedo na cobertura, e materiais com médio ou baixo albedo nas fachadas e solo (Oke *et al.*, 2017).

¹⁴ (Oke *et al.*, 2017, p. 129).

As propriedades de umidade estão relacionadas a disponibilidade de umidade superficial e próxima da superfície da face, que permite um mecanismo de perda de calor por fluxo de calor latente (Q_E), que seria o resfriamento evaporativo. Superfícies secas podem ser materiais, como o concreto, telhado, asfalto, dentre outras; enquanto superfícies com acesso a água podem ser solo úmido, grama, folhas, dentre outras.

Por fim, as propriedades aerodinâmicas correspondem ao comprimento de rugosidade aerodinâmica da superfície (z_0), assim como a medida de atrito com o vento. De acordo com Grimmond e Oke (1999), essa propriedade apresenta implicações no arrasto de superfície, nas escalas e intensidade de turbulência, nas profundidades da RSL, na velocidade do vento e a forma do perfil do vento, e no tipo de fluxo gerado na UCL. Torna-se, importante, portanto, prever as características das propriedades aerodinâmicas presentes nas cidades para planejar o comportamento dos ventos e da turbulência em todas as escalas. Para isso, há dois métodos possíveis: o método morfométrico, também conhecido como geométrico, que se utiliza de algoritmos que relaciona parâmetros aerodinâmicos a medidas de geometria de superfície; e o método micrometeorológico, ou anemométrico, que parte da utilização de observações de campo de vento ou turbulência para possibilitar a resolução de parâmetros aerodinâmicos, além das relações teóricas advindas do perfil logarítmico do vento (Grimmond; Oke, 1999).

1.3.3 Efeito da Cobertura da Superfície no microclima

A cobertura de superfície é essencial no estudo do clima e microclima urbano, pois descreve as características de determinada fração, se é composta por um tipo de tecido edificado, pavimentado, vegetado, com solo exposto ou água. Isso irá determinar seu papel da absorção, reflexão e emissão de radiação de onda curta/longa, na transformação de energia radiante em energia térmica; na transformação de massa de determinados elementos, a exemplo da água líquida em vapor; na interceptação de precipitação e poluentes atmosféricos; e na deflexão/ desaceleração dos ventos. Assim, a cobertura da superfície urbana é determinante no SEB.

No estudo do (micro)clima urbano, a primeira etapa se configura na definição da superfície urbana, Oke *et al.* (2017) destacou seis abordagens possíveis (ver Figura 13):

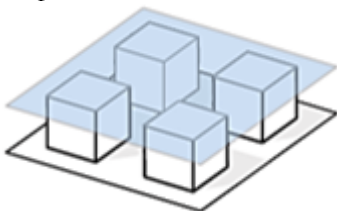
- A superfície tridimensional (3D) ou completa, que abarca todos os detalhes da interface. Esse modelo se apresenta inviável pela complexidade de medir ou modelar as propriedades da superfície.

- A superfície no nível do solo, que desconsidera a influência de elementos acima do solo, tornando-a inviável para estudo no meio urbano, visto que as propriedades dos elementos sobre o solo são diversas e distintas.
- A superfície a nível do telhado, trata da perspectiva de um observador acima do telhado, que semelhante à anterior, considera somente os processos acima da mesma.
- A superfície a nível plano ou de visão aérea, corresponde a superfície vista verticalmente sobre a fração urbana. Nesse modelo, superfícies verticais não são vistas, como paredes e elementos sob marquises, não poderiam ser consideradas.
- A superfície a nível de medição da tela, corresponde a altura de uma tela meteorológica, próximo de 1,5 m a 2 m acima do solo, onde medições meteorológicas e climáticas são geralmente realizadas.
- A superfície a nível de deslocamento do plano zero, é uma abordagem, comumente, utilizada na micro meteorologia, e se baseia no perfil vertical de entidades atmosféricas.

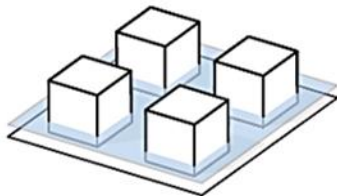
Superfície tridimensional (3D) ou completa



Superfície a nível do telhado



Superfície a nível de medição da tela



Superfície no nível do solo



Superfície a nível plano ou de visão aérea



Superfície a nível de deslocamento do plano zero

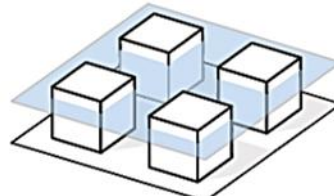


Figura 13 - Representação simplificada de abordagens do estudo da superfície urbana (em azul).
Fonte: Oke et al. (2017).

Com base nas abordagens de estudo da superfície urbana, a presente pesquisa se baseia na **superfície a nível de medição da tela**, que também coincide com a altura do pedestre, tomando o cânion como escala de unidade urbana. A compreensão da conformação do

microclima é possível a partir do mapeamento das superfícies ativas cujas características físicas e térmicas são significativas, como o valor do albedo, rugosidade, disponibilidade de água superficial, dentre outras. Oke *et al.* (2017) destacaram o papel da cobertura vegetada no conforto térmico em cânions urbanos, tema abordado no próximo tópico, por: gerar sombra no nível do pedestre, diminuindo os valores de temperatura radiante média; aumentar o arrasto e, assim, reduzir a velocidade dos ventos (interessante nos casos onde há canalização do fluxo de ar somente nas vias à barlavento); e por ser fonte de umidade, através da evapotranspiração de suas folhagens.

Selecionar o tipo de cobertura da superfície urbana adequado às condições climáticas locais se configura como peça chave para se garantir um urbanismo sustentável, que por sua vez, pode trazer diversos benefícios ao conforto térmico ao ar livre, tema que será abordado no próximo tópico.

1.4 Estudo do Conforto Térmico no Ambiente Urbano

O estudo do conforto térmico é definido em três abordagens distintas: a psicológica, a termofisiológica e a baseada no balanço térmico do corpo humano (Höppe, 2002). A definição psicológica expressa a satisfação do ser humano com o ambiente térmico (ASHRAE, 2010), sua avaliação subjetiva reflete em uma extensa variação interindividual. Isso quer dizer que, em um mesmo espaço urbano, a sensação de conforto térmico que uma pessoa acostumada a permanecer em ambientes climatizados será diferente daquele que passa a maior parte do seu dia ao ar livre.

A definição termofisiológica de conforto se baseia nas taxas dos receptores térmicos na pele e no hipotálamo. O homem é um ser homeotérmico, o que significa que a temperatura interna do seu organismo tende a permanecer constante (próximo de 37°C), independente das condições climáticas locais. Quando ocorre trocas térmicas entre o ambiente externo e seu corpo, mecanismo termorreguladores são ativados, como a vasoconstrição periférica e o arrepiamento, para o frio; ou a vasodilatação periférica e o suor, para o calor (Lamberts, Dutra, Pereira, 1997). Assim, o conforto térmico é definido como a taxa mínima do uso de mecanismo termorreguladores.

O balanço térmico do corpo humano é definido pela resposta corporal à medida que o ambiente muda, em razão de seis variáveis, que são: a velocidade do vento, a temperatura do ar, a umidade relativa do ar e a temperatura radiante média (TRM - expressa a radiação de ondas

curtas e longas absorvidas na superfície externa do corpo, a pele), que representam os parâmetros ambientais em que o indivíduo está exposto; enquanto o metabolismo e o vestuário representam a resposta do indivíduo àquele ambiente (Gál; Kántor, 2020). O comportamento das variáveis climáticas citadas resulta em estresse térmico, assim, a zona de estresse mínimo é chamada de confortável. Em zona de estresse térmico pelo frio, o corpo responde gerando calor interno, ao mesmo tempo que limita as perdas de calor, por meio dos mecanismos termorreguladores. Já em zona de estresse térmico pelo calor, o corpo maximiza a perda de calor (Oke *et al.*, 2017).

O conforto térmico no interior da edificação difere do conforto térmico ao ar livre. No ambiente interno, as condições térmicas apresentam maior tendência de serem estáticas, com pouca variação das variáveis climáticas. Enquanto no ambiente externo, a forma urbana conforma uma grande quantidade de microclimas na UCL, tornando as condições climáticas raramente estáticas, com grande variabilidade no espaço e tempo (Oke *et al.*, 2017). Além disso, aspectos biofísicos e psicológicos do pedestre devem ser considerados, como o tipo de atividade, as roupas, a idade, dentre outras. Medir o grau de conforto térmico ao ar livre se tornou uma atividade complexa, contudo, dada a importância na permanência e uso dos espaços livres (Nikolopoulou; Baker; Steemers, 2001), diversos índices começaram a ser desenvolvidos, de forma a ligar as variáveis climáticas medidas e as respostas de estresse térmico do corpo humano (Epstein; Moran, 2006).

Dentre os índices para o ambiente externo, tem-se o índice de Temperatura Equivalente Fisiológica (*Physiological Equivalent Temperature* - PET) e o Índice Universal Térmico Climático (*Universal Thermal Climate Index* – UTCI). O PET é amplamente adotado em pesquisas que tratam do conforto térmico ao ar livre (Minella; Honjo; Krüger, 2012; Taleghani *et al.*, 2014; Yang; Lin, 2016; Muniz-Gaal *et al.*, 2018; Bochenek; Klemm, 2020; Bochenek; Klemm, 2021). O PET, expresso em graus Celsius (°C), é um índice para cálculo do conforto térmico em condições externas, que considera a temperatura do ar, a temperatura radiante média, a umidade relativa do ar e a velocidade dos ventos, e foi baseado na equação de equilíbrio térmico humano em estado de uniformidade (Höppe; Mayer, 1987; Krüger *et al.*, 2018). Assim, o PET indica os efeitos do ambiente térmico no que tange o estresse térmico por calor, frio e conforto.

O PET requer calibração para definição da faixa de aceitabilidade térmica dentre as categorias de estresse térmico (Hope, 1999). Diferentes zonas culturais e climáticas determinam na avaliação do conforto térmico, em função do conceito de adaptação térmica que integra

fatores fisiológicos, psicológicos e comportamentais (Hirashima; Assis; Nikolopoulou, 2016). Nasrollahi *et al.* (2020) apontaram que o PET é o índice de conforto térmico mais estudado em pesquisas que tratam do (micro)clima urbano. O Quadro 06 apresenta as faixas de aceitabilidade para diferentes tipos de clima, ficando, assim, evidente a necessidade de estudos com foco no clima semiárido, objeto de estudo da presente pesquisa.

Quadro 6. Faixa de aceitabilidade térmica para diferentes tipos de clima.

Região Geográfica	Clima	Faixa de Temperatura (°C)
Malásia	Temperado	18-23
Malásia	Subtropical	26-30
Esfahan, Irã	Quente e seco	26,06-29,73
Centro e Oeste Europeu	Temperado	18-23
Taiwan	Tropical	26-30
Atenas, Grécia	Mediterrâneo	18-23
Hong Kong	Quente e úmido	28
Nis, Sérvia	Temperado	18-23
São Paulo, Brasil	Quente e úmido	27,2
Hong Kong	Tropical	25-29
Sidney, Austrália	Subtropical	26,2
Belo Horizonte, Brasil	Tropical	16-30
Friburgo, Alemanha	Continental	18-28
Dhaka, Bangladesh	Tropical	28,5-32,8
Cingapura	Tropical	26-31,7
Guangzhou, China	Subtropical	28,54-31

Fonte: Adaptado de Nasrollahi *et al.* (2020).

O UTCI foi, inicialmente, desenvolvido pela *International Society of Biometeorology* (ISB), e foi desenvolvido segundo o conceito de temperatura equivalente em um ambiente de referência, semelhante ao PET (Bröde *et al.*, 2011). As variáveis climáticas consideradas no UTCI são: temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento (Blazejczyk *et al.*, 2013). O UTCI se apresenta como um índice que pode ser aplicado em todos

os tipos de clima (Błażejczyk; Nilsson, Holmér, 1993). As categorias de estresse térmico, do frio ao calor, do UTCI são de acordo com uma temperatura equivalente de um ambiente de referência, ver Quadro 08 (Bröde et al., 2011). A principal diferença entre o PET e o UTCI é que o PET sempre usa roupas padrão ($\text{clo} = 0,9$) e o UTCI ajusta as roupas com base nas condições específicas existentes ao ar livre (Jendritky et al., 2012; Matzarakis; Muthers; Rutz, 2014). A respeito das categorias de estresse (ver Quadro 07), Cheung e Jim (2018) pontuaram que a escala PET está baseada no conforto humano, enquanto a escala UTCI está baseada na tensão fisiológica humana.

Quadro 7. – Categorias de stress térmico de acordo com os índices UTCI e PET.

UTCI (°C)	PET (°C)	Categoria de Estresse
Acima de +46	Acima de +41	Estresse de calor extremo
+38 a +46	+35 a +41	Estresse de calor muito alto
+32 a +38	+29 a +35	Alto estresse térmico
+26 a +32	+23 a +29	Moderado estresse térmico
+9 a +26	+18 a +23	Sem estresse térmico
0 a +9	+13 a +18	Leve estresse frio
-13 a 0	+8 a +13	Moderado estresse frio
-27 a -13	+4 a +8	Alto estresse frio
-40 a -27	Abaixo de +4	Estresse de frio muito alto
Abaixo de -40		Estresse de frio extremo

Fonte: Adaptado de Matzarakis e Mayer (1996).

A comparação direta entre PET e o UTCI não é possível devido à diferença da definição das escalas. A escala PET é baseada no conforto humano, enquanto a escala UTCI é baseada na tensão fisiológica humana (Cheung; Jim, 2018). Para climas quentes, o uso do PET ou UTCI são indiferentes, salvo em climas quentes e úmidos, com altas taxas de umidade relativa do ar, em que o UTCI apresente uma resposta mais precisa (Matzarakis; Muthers; Rutz, 2014). Em seu artigo de revisão, Nasrollahi et al. (2020) apontaram que o PET foi amplamente utilizado na análise do conforto térmico de ambientes ao ar livre em diversos estudos, nos últimos anos. Os autores ainda indicaram que 52% das pesquisas utilizaram o PET como índice de conforto térmico, enquanto somente 7% utilizaram o UTCI. Desta forma, a presente pesquisa partiu do uso da **PET como índice de conforto térmico**, para analisar os cenários urbanos hipotéticos que serão submetidos a simulação computacional.

A busca por soluções de *design* da forma urbana (como o *layout* das ruas, densidade construtiva, materiais nas coberturas de superfícies, presença de vegetação) para criar condições favoráveis ao conforto térmico no ambiente externo tem estimulado o uso de ferramentas de simulação computacional. Os métodos de estudo da climatologia urbana são: observação de

campo, pela análise através da medição de propriedades da superfície e atmosfera por meio de sensores; modelagem física, pela análise da representação em escala da forma urbana; modelos numéricos, pelo uso de equações matemáticas para simular processos atmosféricos; e a generalização e síntese empírica, que parte de uma combinação de abordagens anteriores para estabelecer relações estatísticas entre os parâmetros climáticos urbanos selecionados (Oke *et al.*, 2017). O avanço da tecnologia permitiu o desenvolvimento de ferramentas computacionais para facilitar o uso de fórmulas físicas e matemáticas, na análise do SEB urbano (Torres, 2017).

A vantagem do uso de ferramentas computacionais está na possibilidade de compor cenários urbanos hipotéticos, de forma a testar uma infinidade de alternativas de organização dos espaços urbanos, sob critérios ambientais que visem a sustentabilidade urbana (Barbirato; Torres; Barbosa, 2015; Favretto; Souza, 2019). Dentre os *softwares* disponíveis, destaca-se o ENVI-met, desenvolvido para estudo e previsão do microclima urbano a partir de simulações que integram atmosfera/ superfície urbana/ vegetação (Bruse; Fleer, 1998). O ENVI-met é baseado em um modelo holístico de microclima tridimensional, sob as leis da dinâmica dos fluidos e nas leis da termodinâmica, cujos cálculos incluem (ENVI-met, 2023):

- Fluxos de radiação de ondas curtas e longas, possibilitando considerar o efeito do sombreamento, reflexões múltiplas e radiação de retorno (de superfícies, edifícios e vegetação);
- Cálculo dinâmico das superfícies e temperaturas da parede, em até três camadas de material e sete pontos de cálculo;
- Determinação da evapotranspiração e fluxos de calor sensível, considerando todos os parâmetros físicos da vegetação, como a taxa fotossintética;
- Consideração de fachada e cobertura verde;
- Simulação de troca de água e calor;
- Representação tridimensional de árvores, de forma a considerar as cargas e deformações biomecânicas em função dos ventos;
- Dispersão de gases (inertes e reativos do ciclo de reação do ozônio NO-NO₂;) e partículas (como a sedimentação e deposição em folhas e superfícies);
- Determinação de importantes métricas biometeorológicas pelo BIO-at, como a TRM, a PET e o UTCI.

A versão mais recente do ENVI-met ainda considera a fisiologia vegetal e ciência do solo. Dessa forma, seu princípio orientador é “integrar todas essas diferentes abordagens em um único modelo, para que todos os elementos possam interagir entre si e reproduzir as sinergias

observadas” (ENVI-met, 2023). O modelo possui um programa integrado denominado Leonardo, que oferece diversas opções de visualização dos resultados das simulações, desde mapas 2D até animações bi e tridimensionais. Além disso, o Leonardo possibilita a coleta dos dados das variáveis climáticas em cada célula de grade¹⁵ do cenário modelado e simulado, podendo ser extraídos em forma de planilha no formato EXCEL, da *Microsoft*.

Essas qualidades tornaram o ENVI-met como a ferramenta computacional mais utilizada em pesquisas para análise da forma e microclima urbano no processo de planejamento das cidades (Antonini *et al.*, 2020; Nasrollahi *et al.*, 2020), amplamente utilizado em todo o mundo (Minella; Honjo; Krüger, 2012; Yang *et al.*, 2013; Barbirato; Torres; Barbosa, 2015; Achour-Younsi; Kharrat, 2016; Li; Wang; Wong, 2016; Barakat; Ayad; El-Sayed, 2017; Minella; Krüger, 2017; Muniz-Gäal *et al.*, 2017; Alchapar; Pezzuto; Correa, 2018; Jamei; Rajagopalan, 2018; Nogueira *et al.*, 2018; Shinzato; Duarte, 2018; Favretto; Souza, 2019; Limona; Al-Hagla; El-Sayad, 2019; Tsoka *et al.*, 2020; Bochenek; Klemm, 2021; Deng; Wong, Zheng, 2021). Assim, a presente pesquisa partiu da adoção do **ENVI-met** como ferramenta para simulação computacional dos cenários urbanos hipotéticos.

1.5 Conclusões do Capítulo

A urbanização resulta na substituição da paisagem natural por equipamentos urbanos, que conforma um clima tipicamente urbano. A fragilidade dos instrumentos regulatórios presentes na legislação de uso e ocupação do solo quanto aos aspectos bioclimáticos tem resultado em diversos impactos ambientais, especialmente as ICU, quando a temperatura no meio urbano é mais elevada em comparação com o meio rural. O crescimento da população urbana acelera o processo de densificação das cidades, formando os cânions urbanos, unidade urbana composta pela rua margeada por edifícios altos. Nas cidades médias brasileiras, a ausência de parâmetros regulatórios referentes à verticalização crescente representa um risco de deterioração da qualidade ambiental urbana, prejudicando o desenvolvimento de cidades mais sustentáveis e resilientes às mudanças climáticas.

Em cidades de clima quente, como Arapiraca, o balanço de energia em cânions urbanos apresenta duas características proeminentes, 1) o sombreamento gerado pelas edificações

¹⁵ Célula de grade é a unidade em 3D, com dimensões horizontais (x e y) e dimensão vertical (z), para elaboração do modelo principal. O modelo terá uma maior resolução conforme diminuir a célula de grade. Contudo, o tamanho da célula de grade determinará na sua quantidade para cobrir uma determinada área. (ENVI-met, 2024).

verticalizadas, que influencia diretamente a TRM, que por sua vez tem estreita relação com o PET, proporcionando condições de conforto térmico ao ar livre mais favoráveis na escala do pedestre; 2) a conformação de cânions urbanos estreitos promovem a diminuição da velocidade e permeabilidade do fluxo de ar, principalmente em ruas perpendiculares à direção predominante dos ventos, gerando áreas com estagnação de ar. Isto o que desfavorece as trocas térmicas radiativas entre o interior do cânion e a abóbada celeste, contribuindo para o seu aquecimento no período noturno. Desse modo, torna-se imprescindível investigar como a forma urbana (a partir da sua geometria, materiais de superfície e uso de vegetação) pode condicionar o microclima urbano com condições térmicas mais favoráveis, sob os princípios do urbanismo bioclimático.

Nesse processo, o ponto de partida é reunir dados atualizados que indiquem as características da forma e do clima urbano. A partir disso, torna-se possível analisar as estratégias bioclimáticas para a adequação da forma urbana ao microclima local. Dentre os métodos de abordagens para obter as medidas que a população e o poder público podem adotar para um desenvolvimento ambientalmente sustentável, o preditivo se destaca pelo potencial de estimar o desempenho climático de diferentes tipos de tecidos urbanos, com base em simulação computacional de cenários urbanos hipotéticos. O estudo multidisciplinar e integrado dos principais fatores que conformam o clima e conforto térmico no meio ambiente urbano, pode auxiliar na composição de subsídios que nortearão os gestores públicos para um planejamento mais eficiente e resiliente, e ambientalmente sustentável.



2. PROCESSO DE URBANIZAÇÃO E CLIMA DE ARAPIRACA

Arapiraca está localizada no Agreste Alagoano (ver Figura 14), que corresponde à região de transição entre a costa úmida e o interior semiárido do Nordeste brasileiro, entre a latitude 9°75'25'' Sul e longitude 36°60'11'' Oeste (IBGE, 2010). A composição da geomorfologia¹⁶ de Arapiraca é caracterizada por tabuleiros costeiros e pediplano do Baixo São Francisco, características de um relevo plano, na maior parte do território (Figura 15). A cidade possui uma área de 356,179km², densidade demográfica de 600,83 hab/km² e 214.006 habitantes, dos quais 181.481 são da zona urbana e 32.525 da zona rural (IBGE, 2010). A área territorial urbana da cidade é de 34,63 Km² (ver Figura 16), enquanto a área territorial rural é de 375,37 Km², totalizando 410Km² de área territorial do município (Arapiraca, 2006). Logo, a densidade populacional urbana de Arapiraca corresponde a 5.240 hab/ Km².



Figura 14 - Localização de Arapiraca/ AL.

Fonte: Elaborado pela Autora.



Figura 15 - Composição da geomorfologia de Arapiraca.

Fonte: Adaptado de Alagoas em Dados e Informações – Geomorfologia (2ª Edição)¹⁷.

¹⁶ A geomorfologia é a ciência que estuda as formas de relevo terrestre sob os seguintes fatores: endógenos (internos), a partir da geomorfologia estrutural, que considera os processos tectônicos (responsáveis pelas deformações na crosta terrestre) e as propriedades geomorfológicas das rochas; e exógenos (externos), com base na geomorfologia climática, que considera processos ligados ao clima (fluviais, eólicos, coluviais, glaciais e térmicos) que causam o desgaste e erosão dos solos e rochas (Bastos; Maia; Cordeiro, 2019).

¹⁷ Imagem original disponível no seguinte endereço eletrônico: < https://dados.al.gov.br/catalogo/dataset/mapas-de-caracterizacao-territorial/resource/bd8bd45a-67f1-4922-8b9f-52bce9233795?inner_span=True >.

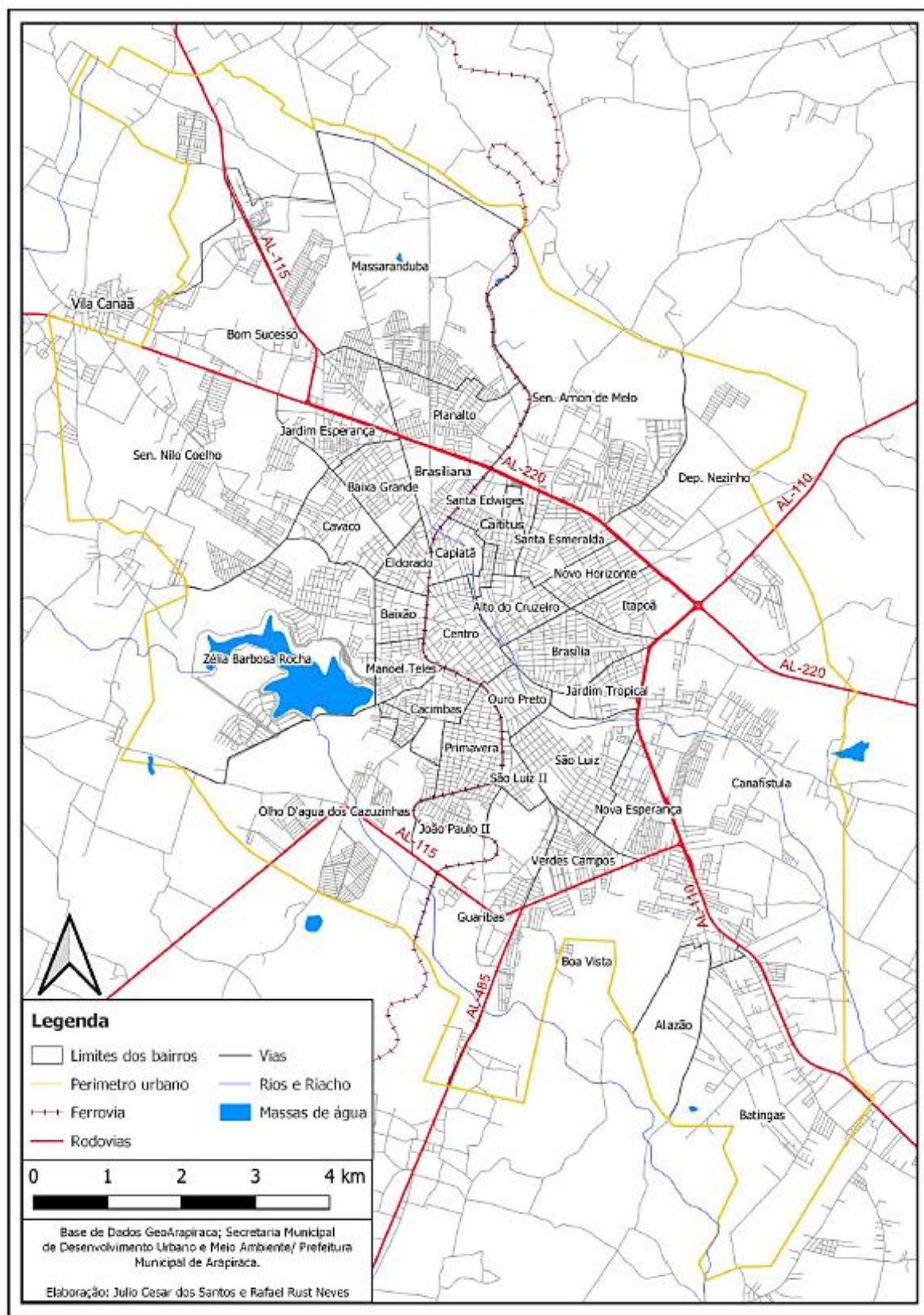


Figura 16 - Área territorial urbana de Arapiraca/ AL em 2019.

Fonte: Neves (2022).

A cidade de Arapiraca limita ao Norte com o município de Igaci, ao Sul com o município de São Sebastião, a Leste com os municípios de Coité do Noia e Limoeiro de Anadia, a Oeste com os municípios de Lagoa da Canoa, Girau do Ponciano e Feira Grande, a Noroeste com o município de Craíbas e a Sudeste com o município de Junqueiro. Situada no centro geográfico de Alagoas, a cidade de Arapiraca se constitui em um entreposto de comércio e serviços entre o Sertão e o Litoral, polarizando toda a região do Agreste. Características que lhe conferem a qualidade de segunda maior cidade do estado, conforme dados de Regiões de Influência, ver Figura 17 (IBGE, 2018).

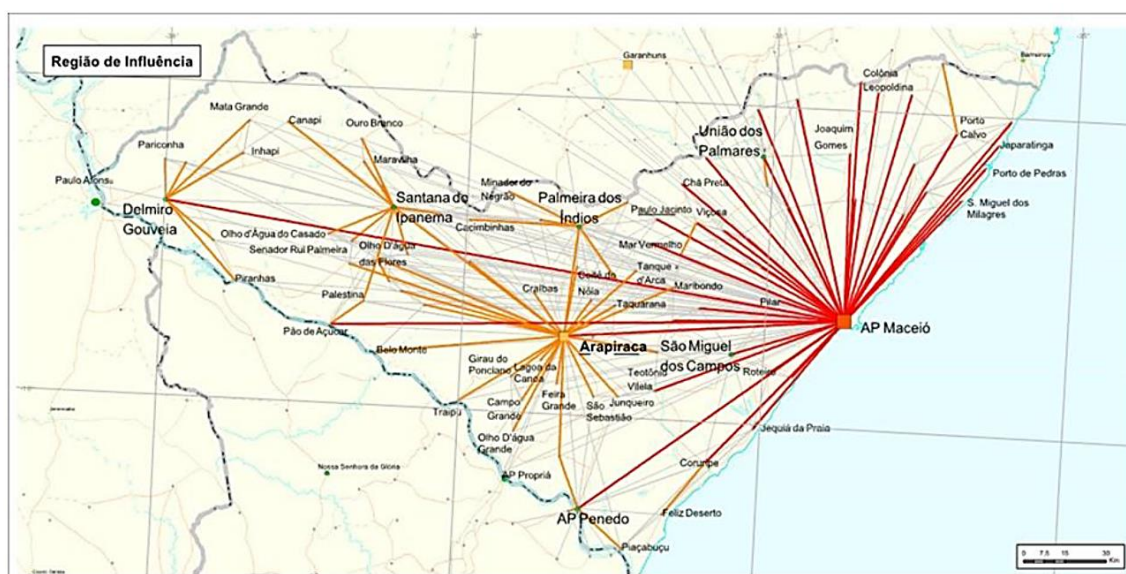


Figura 17 - Regiões de Influência: Alagoas, com destaque para Arapiraca.

Fonte: IBGE (2018).

De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população de Arapiraca cresceu continuamente nas últimas três décadas, com uma taxa de crescimento de: 12,3 %, entre 1991 e 2000; 14,6 %, entre 2000 e 2010; e 8,2 %, entre 2010 e 2020 (população estimada). Com relação à taxa de urbanização, em 1991 era de 78,2 %, em 2000 foi de 81,6 %, e no ano de 2010 chegou a 84,8 %, superior às taxas observadas em todo o estado de Alagoas e no Brasil (Neves, 2022). O Produto Interno Bruto (PIB) da cidade é o segundo maior do estado, com R\$: 4.975.188,04; enquanto o seu Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) é 0,649, ocupando o 3º lugar no *ranking* do estado (IBGE, 2019). Ao considerar os atributos elencados por Amorim Filho (1976), Neves (2022) classificou Arapiraca como uma cidade de médio porte.

As cidades de médio porte, segundo a classificação do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), são aquelas com população entre 100 mil e 500 mil habitantes, caracterizadas por desempenharem um papel intermediário entre os grandes centros urbanos e as cidades de pequeno porte. Na realidade brasileira, essas cidades têm ganhado relevância nas últimas décadas, destacando-se como polos regionais de comércio, serviços e infraestrutura, além de absorverem uma parcela significativa do crescimento populacional do país. Estudos recentes indicam que as cidades médias têm apresentado taxas de crescimento demográfico superiores às de grandes capitais, contribuindo significativamente para o aumento da população urbana no Brasil¹⁸. No entanto, esse crescimento acelerado impõe desafios no planejamento urbano, especialmente no contexto da sustentabilidade e qualidade de vida,

O Índice de Desenvolvimento Sustentável das Cidades (IDSC) para Arapiraca foi de 40,7 (em um total de 100), classificando-a como a 4648ª (de 5570) no *ranking* nacional, segundo o Instituto Cidades Sustentáveis¹⁹ (2022). O IDSC permite uma visão geral e integrada das cidades com relação aos ODS da ONU. A Figura 18 apresenta um quadro geral da cidade com relação aos 17 ODS. No tocante ao 11º ODS, Cidades e Comunidades Sustentáveis, Arapiraca apresenta uma pontuação de 48,42, o que indica a necessidade de se desenvolver medidas que visem o crescimento e desenvolvimento urbano sustentável. Outro dado importante está relacionado ao saneamento básico do município, de acordo com o Painel Saneamento Brasil²⁰, do Instituto Trata Brasil, em 2020: 98,8 % da população urbana tem acesso a água, e somente 2,2 % da população urbana tem acesso a coleta de esgoto.

¹⁸ Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37237-de-2010-a-2022-populacao-brasileira-cresce-6-5-e-chega-a-203-1-milhoes>>. Acesso em: 28/01/2024.

¹⁹ Disponível em: <<https://idsc.cidadessustentaveis.org.br/profiles/arapiraca-AL>>. Acesso em: 29/03/2022.

²⁰ Disponível em: <<https://www.painelsaneamento.org.br/explore/localidade?SE%5Bl%5D=270030>>. Acesso em: 29/03/2022.

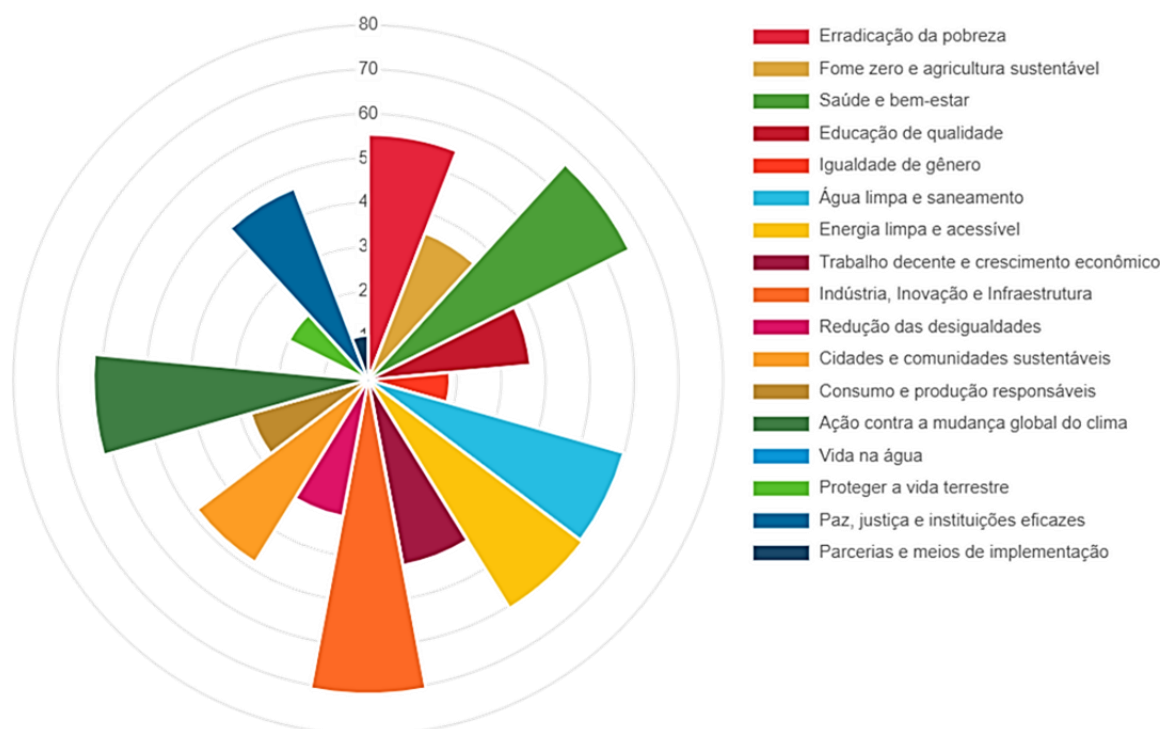
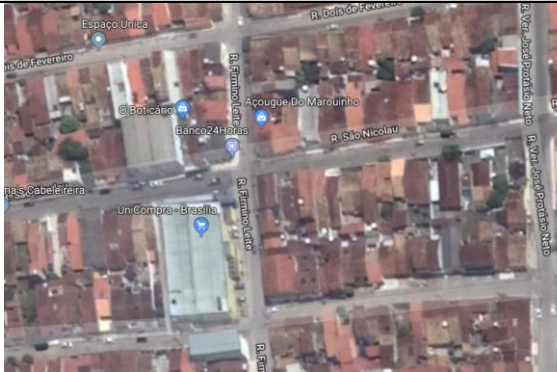
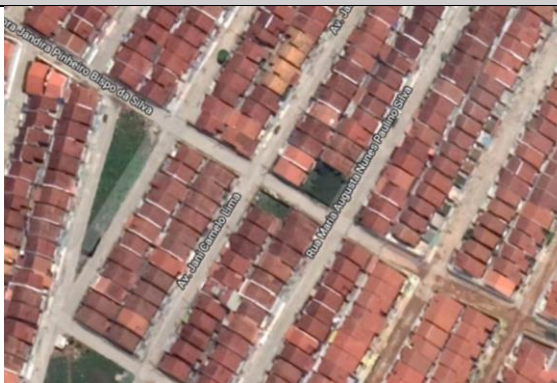
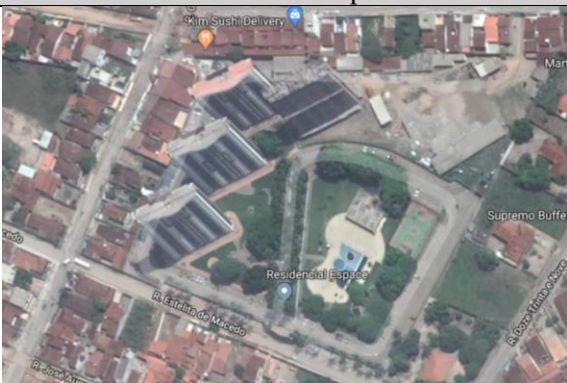


Figura 18 - Desempenho por ODS para a cidade de Arapiraca/ AL.

Fonte: <https://www.painelsaneamento.org.br>.

Com base no crescimento e desenvolvimento sustentável, torna-se importante identificar os tipos de tecido urbano na cidade, agrupados a partir do sistema viário, dos diferentes padrões de parcelamento do solo, dos níveis de altitude e pela uniformidade dos padrões construtivos (Moudon, 1997). Em Arapiraca, Torres (2017) identificou, inicialmente, quatro tipos morfológicos de tecidos urbanos: Horizontal Denso, Horizontal Disperso, Horizontal Contínuo e Vertical Alto Disperso, dispostos no Quadro 08:

Quadro 8. Tipos de tecidos urbanos de Arapiraca identificados por Torres (2017).

		Horizontal Denso	Horizontal Disperso
Imagem			
		Foto: Bairro Brasília (Google Earth Pro)	Foto: Bairro Novo Horizonte (Google Earth Pro)
Características		- Quadras com ocupação perimetral e taxa de ocupação do solo elevada. - Edificações térreas/ dois pavimentos, de uso residencial ou comercial, em lotes estreitos. - Baixa porosidade devido à existência predominante de edificações geminadas e lotes com taxa de ocupação elevada. Presente no Centro da cidade e bairros circunvizinhos como, bairro Brasília, Ouro Preto, Cacimbas, Primavera, Capiatã, Eldorado.	- Quadras com ocupação perimetral e taxa de ocupação média ou baixa. - Edificações térreas/ dois pavimentos, de uso residencial ou comercial, em lotes maiores, a partir de 430m². - Tendência de verticalização, para uso residencial e comercial. Presente nos bairros Nova Esperança, Alto do Cruzeiro, Novo Horizonte, Santa Esmeralda e Senador Arnon de Melo.
		Horizontal Contínuo	Vertical Alto Disperso
Imagem			
		Foto: Bairro Planalto (Google Earth Pro)	Foto: Bairro Caititus (Google Earth Pro)
Características		- Quadras de ocupação perimetral e taxa de ocupação do solo elevada e homogênea. - Edificações térreas, de acordo com os padrões do Programa Minha Casa, Minha Vida, em lotes de pequena dimensão (150m²). - Tendência ao processo de ocupação total do lote. Presente nos bairros da periferia da cidade, como Planalto, Canafístula, Verdes Campos, Olho D'água dos Cajuzinho.	- Quadra de grande dimensão (30.000m²), com presença de arborização nos espaços imediatos exteriores. - Edificações habitacionais verticais altas (acima de 10 pavimentos). Presente no bairro Caititus, representada pelo Condomínio Residencial Espace.

Fonte: Adaptado de Torres (2017).

Posteriormente, Costa et al. (2019) e Costa et al. (2021) identificaram os seguintes tipos morfológicos: Horizontal Geminado Arborizado, Vertical Baixo Disperso, Espaço Livre

Público com Arborização Dispersa e Espaço Livre Público Arborizado. Os tipos de tecidos urbanos e suas respectivas características estão descritas no Quadro 09:

Quadro 9. Tecidos urbanos identificados por Costa et al. (2019) e Costa et al. (2021).

Horizontal Geminado Arborizado		Vertical Baixo Disperso	
Imagem			
	Foto: Bairro Baixa Grande (Google Earth Pro)	Foto: Bairro Senador Arnon de Melo (Google Earth Pro)	
Características	- Quadra aberta com arborização de médio porte. - Edificações geminadas. - Vias com pavimentação poliédrica, caracterizada pela presença de solo natural na área central das quadras. Presente no bairro Baixa Grande.	- Quadra composta por torres residenciais e taxa de ocupação do solo é média (aproximadamente 60%). - Edificações verticalizadas, com quatro pavimentos. - Presença de arborização, e entorno caracterizado por área descampada, com baixa rugosidade e alta porosidade, o que permite a livre passagem dos ventos. Presente na Avenida Coronel Wilson Santa Cruz, no bairro Senador Arnon de Melo.	
	Espaço Livre Público com Arborização Dispersa	Espaço Livre Público Arborizado	
Imagem			
	Foto: Bairro Capiatã (Google Earth Pro)	Foto: Novo Horizonte (Google Earth Pro)	
Características	- Espaço Livre Público (Praça) com massa de vegetação dispersa. - Solo com cobertura natural e pavimentação cimentícia às margens. - Presença de equipamentos de jardinagem, academias de ginástica ao ar livre, ciclovias e pistas para caminhadas. Presente no Bosque das Arapiracas, no bairro Capiatã.	- Espaço Livre Público (Praça) com presença de arborização e, com isso, de sombreamento. - Solo com cobertura natural e de piso intertravado. Presente nas proximidades da Avenida Deputada Ceci Cunha, nos Bairros Novo Horizonte e Itapoã.	

Fonte: Adaptado de Costa et al. (2019) e Costa et al. (2021).

Nas últimas décadas, o processo de urbanização de Arapiraca foi marcado por dois processos espaciais: descentralização urbana e uma progressiva mudança no uso do solo. A descentralização urbana, que ainda está em curso, ocorre em função de dois fatores: 1) político, com o deslocamento de instituições administrativas, a exemplo do Centro Administrativo, em 2005, antes localizado na área central da cidade e foi transferido para o bairro Santa Edwiges; 2) comercial, com a implantação de diversos estabelecimentos de comércio e serviços, como o Shopping Center, o *Arapiraca Garden Shopping*, (2013) e supermercados atacado-varejistas, como o Atacadão (2012) e Açaí (2018). Os equipamentos mencionados estão localizados às margens da AL-220, ao norte da cidade. A implantação do Campus da Universidade Federal de Alagoas - UFAL (2006), a nova Adutora do Agreste (2014) e a expansão da Mineração Vale Verde (2018), também estimularam o crescimento da cidade ao norte (Neves, 2022).

A progressiva mudança no uso do solo se deu a partir da substituição de atividades rurais por atividades urbanas. O perímetro urbano de Arapiraca cresceu exponencialmente nos últimos anos, especialmente devido a criação de conjuntos habitacionais de interesse social e Residenciais Horizontais Fechados. O que gerou a necessidade de expandir o perímetro urbano por meio de lei municipal, a exemplo: Lei 2.470/2006, aprovada logo após a aprovação do Plano Diretor Participativo do Município (Arapiraca, 2006), que delimitou uma área urbana de 6.517,57 hectares, com contorno de 35.041,51m lineares; Lei 2.770/2011, expandiu o perímetro urbano em 44,35 %, com área urbana demarcada em 9.408,29 hectares, delimitada por um contorno de 54.114,02m lineares; Lei 3.238/2016, ampliou o perímetro urbano para 9.899,50 hectares, com contorno de 57.878,57m lineares. Entre os anos de 2007 a 2019, ocorreu a aprovação de 129 loteamentos horizontais em Arapiraca, ver Figura 19.

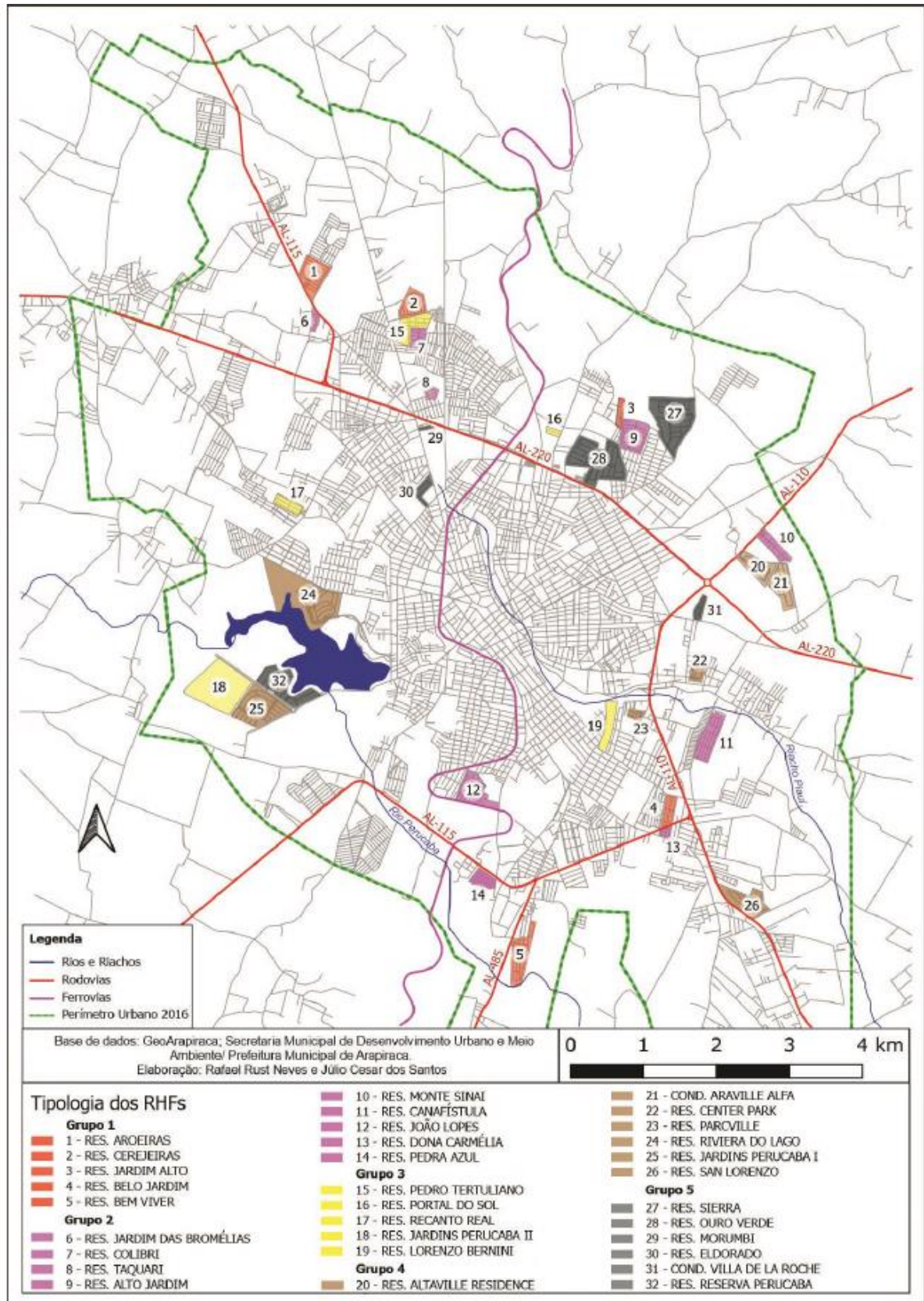


Figura 19 - Localização dos Residenciais Horizontais Fechados na malha urbana de Arapiraca em 2019.

Fonte: Neves (2022).

Por conta da descentralização urbana, a especulação imobiliária avançou para os bairros mais afastados do Centro, especialmente na zona norte da cidade. Concomitantemente, começaram a surgir grandes vazios urbanos às margens do perímetro urbano da cidade, sem que os vazios localizados em áreas centrais, com infraestrutura já consolidadas, fossem devidamente ocupadas. Segundo Neves (2022), isso se deve a um conjunto de fatores, como:

- Legislação de parcelamento do solo obsoleta;
- Plano Diretor desatualizado;
- Ausência de controle social do espaço urbano por órgão colegiado; e
- Falta de um setor de fiscalização mais habilitado.

O processo de implantação de Residenciais Horizontais Fechados teve início em 2006 e ainda está em desenvolvimento (Neves, 2022). Em Arapiraca (ver Figura 20a), a disponibilidade de terras planas e a deficiência na infraestrutura urbana da cidade, especialmente a ausência de um sistema de esgotamento sanitário, inviabilizam o impulsionamento do adensamento construtivo por meio de edificações verticalizadas. Ao longo dos últimos anos, uma parte da cidade foi implantada a rede de esgotamento sanitário, contudo, as obras da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) seguem inacabadas, desde o seu início em 2015, inviabilizando o seu devido funcionamento. Em 2020, o terreno da ETE de Arapiraca foi ocupado pelo Movimento Sem-Terra²¹. Cenário diferente pode ser observado em diversas cidades médias nordestinas, onde já ocorre o desenvolvimento de residenciais verticais fechados e edifícios para fins residenciais e comerciais, como em Caruaru/ PE (Bezerra, 2018), ver Figura 20b; Imperatriz/ MA (Oliveira, 2017), ver Figura 20c; Mossoró/ RN (Morais; Silva; Medeiros, 2007), ver Figura 20d; Campina Grande/ PB (Souza, Aguiar, 2022), ver Figura 20e; Vitória da Conquista/ BA (Rocha, 2011), ver Figura 20f; dentre outras.

²¹ Disponível em: <<https://www.7segundos.com.br/arapiraca/blogs/2020/05/13/5112-terreno-com-obra-inacabada-de-estacao-de-tratamento-de-esgoto-vira-acampamento-de-sem-terra>>.

a²² Arapiraca/ALb²³ Caruaru/ PEc²⁴ Imperatriz/ MAd²⁵ Mossoró/ RNe²⁶ Campina Grande/ PBf²⁷ Vitória da Conquista/ BA

Figura 20 – Cidades de médio porte, enfatizando-se seu crescimento urbano vertical.

Fonte: Elaborado pela Autora.

²² Disponível em: < <https://www.jaenoticia.com.br/blogs/2022/08/08/2693-arapiraca-ira-ganhar-mais-tres-grandes-hospitais-a-partir-de-2023>>. Acesso em 28/01/2025.

²³ Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=3lcLDvMoJSE>>. Acesso em 28/01/2025.

²⁴ Disponível em: < <https://imperatriz.ma.gov.br/noticias/imperatriz-170-anos/imperatriz-comemora-170-anos-com-programacao-especial-que-inicia-na-proxima-segunda-feira.html>>. Acesso em 28/01/2025.

²⁵ Disponível em: < <https://prefeiturademossoro.com.br/pagina/turismo>>. Acesso em 28/01/2025.

²⁶ Disponível em: < <https://www.brasildefatopb.com.br/2022/08/24/campina-grande-cidade-da-inovacao-e-da-fome>>. Acesso em 28/01/2025.

²⁷ Disponível em: < <https://www.pmvc.ba.gov.br/182-anos-de-vitoria-da-conquista-programacao-de-aniversario-traz-eventos-tradicionais-e-apresentacoes-culturais>>. Acesso em 28/01/2025.

O processo de verticalização de Arapiraca se encontra em fase inicial. A cidade tem diversificado sua economia e se consolidado como um polo regional, o que impulsiona a demanda por novos padrões habitacionais e comerciais. A existência dos diversos edifícios já implantados e em construção, no perímetro urbano da cidade, foi possível através da prática do esgotamento das fossas sépticas, de forma frequente (Neves, 2022). Diferente do processo de espraiamento da malha urbana, os riscos do crescimento vertical da cidade sem o devido planejamento vão além dos problemas de infraestrutura urbana, provocando também diversos impactos climáticos. A exemplo, tem-se: a redução do aproveitamento da ventilação natural e a intensificação das ICU noturna. O que implica no aumento do uso de equipamentos de condicionamento do ar, que acarreta o aumento do consumo de energia, conformando um cenário urbano pouco sustentável.

O crescimento vertical de Arapiraca é uma realidade (e deve ser uma estratégia de ocupação territorial para promover benefícios ambientais ligados a sustentabilidade). Nesse sentido, a ausência de parâmetros urbanísticos configura sérios riscos ambientais à população. Estudos a respeito do impacto da verticalização no microclima urbano devem ser estimulados, e seus resultados, devem servir de subsídio para o Plano Diretor Participativo da cidade, cujo processo de revisão é iminente. Em função da complexidade e multidisciplinaridade do processo de se planejar uma cidade, questões do âmbito social não serão tratadas na presente pesquisa, o recorte adotado é o de aspecto **ambiental**, especificamente, o microclima urbano. Para isso, torna-se importante tratar do **processo de verticalização** da cidade de Arapiraca, e das **características climáticas locais**.

2.1 Processo de Verticalização em Arapiraca

Em virtude de sua privilegiada localização geográfica, Arapiraca se desenvolve como um polo de comércio e prestação de serviços entre o Sertão e o Litoral. Isto gera o aumento do fluxo de pessoas em busca de equipamentos urbanos de: comércio, hospitais e/ou clínicas especializadas, escolas e instituições de ensino superior (Torres, 2017). Essa dinâmica urbana influenciou na tipologia das primeiras edificações verticalizadas da cidade, que tiveram fim comercial, para serviços de saúde e hospedagem. Em 1970 foi inaugurado a primeira edificação vertical de Arapiraca, o Hospital Afra Barbosa, com 07 pavimentos e localizado na área central da cidade, ver Figura 21.



Figura 21 - Localização (a) e Hospital Afra Barbosa em Arapiraca (b).

Fonte: Adaptado de Google Earth Pro (2022) e Arquivo pessoal.

Em 1976, ocorreu a inauguração do Hotel Plaza, prédio de 6 pavimentos, localizado na Avenida Rio Branco, no Centro da cidade, ver Figura 22. No ano de 1986 foi inaugurado um outro hotel na cidade, o Hotel San Sebastian, ver Figura 23. Localizado na Praça Deputado Marques da Silva, também ao Centro da cidade, o prédio conta com 07 pavimentos. Poucos anos depois, em 1989, foi inaugurado o Complexo Hospitalar Manoel André, popularmente conhecido como Hospital CHAMA, localizado às margens da rodovia AL-220, ver Figura 24.



Figura 22 - Localização (a) e Hotel Plaza (b).

Fonte: Adaptado de Google Earth Pro (2022) e Arquivo pessoal.



Figura 23 - Localização (a) e Hotel San Sebastian (b).

Fonte: Adaptado de Google Earth Pro (2022).



Figura 24 - Localização (a) e Complexo Hospitalar Manoel André (Hospital CHAMA) (b).

Fonte: Adaptado de Google Earth Pro (2022).

A partir dos anos 2000, houve a construção de edificações verticais para atividade residencial e empresarial em Arapiraca. O Residencial Ares do Alto (ver Figura 25) foi inaugurado em 2007, composto por 3 blocos com 4 pavimentos, está localizado na rua São José, bairro Alto do Cruzeiro. Em 2009, foi lançado o Condomínio Residencial Flor de Lótus (ver Figura 26), que conta com 06 pavimentos, na rua José Marques Freire, bairro Novo Horizonte, na zona norte da cidade. O Centro Médico Santa Fé (ver Figura 27), localizado no Centro da cidade, foi inaugurado em 2010 e conta com 06 pavimentos.



Figura 25 - Localização (a) e Residencial Ares do Alto (b).
 Fonte: Adaptado de Google Earth Pro (2022) e Arquivo pessoal.



Figura 26 - Localização (a) e Condomínio Residencial Flor de Lótus (b).
 Fonte: Adaptado de Google Earth Pro (2022) e Arquivo pessoal.

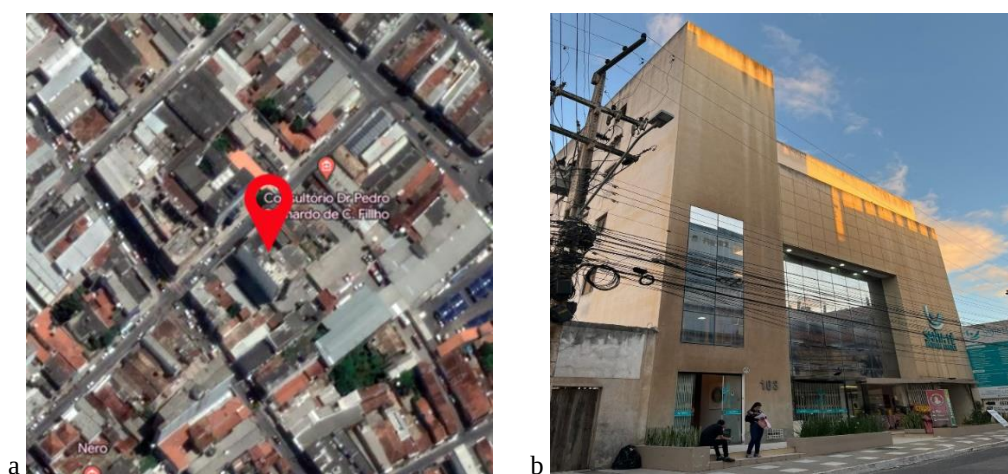


Figura 27 - Localização (a) e Centro Médico Santa Fé (b).
 Fonte: Adaptado de Google Earth Pro (2022) e Arquivo pessoal.

Em 2011, na rua Estelita de Macedo, bairro Santa Esmeralda, foi lançado ao mercado o Residencial Espace Arapiraca (ver Figura 28). Inicialmente, o empreendimento contou com 03 edifícios, de um total de 06, com 17 pavimentos, com *pilotis*. No ano seguinte, em 2012, iniciou-se as construções do Empresarial *Metropolitan* (ver Figura 29), localizado na Avenida Deputada Ceci Cunha, que divide os bairros Itapuã e Novo Horizonte. O edifício com 10 pavimentos só pode ser inaugurado em 2016, com atraso de obra de um ano pela falta de infraestrutura urbana, no que tange o saneamento urbano.

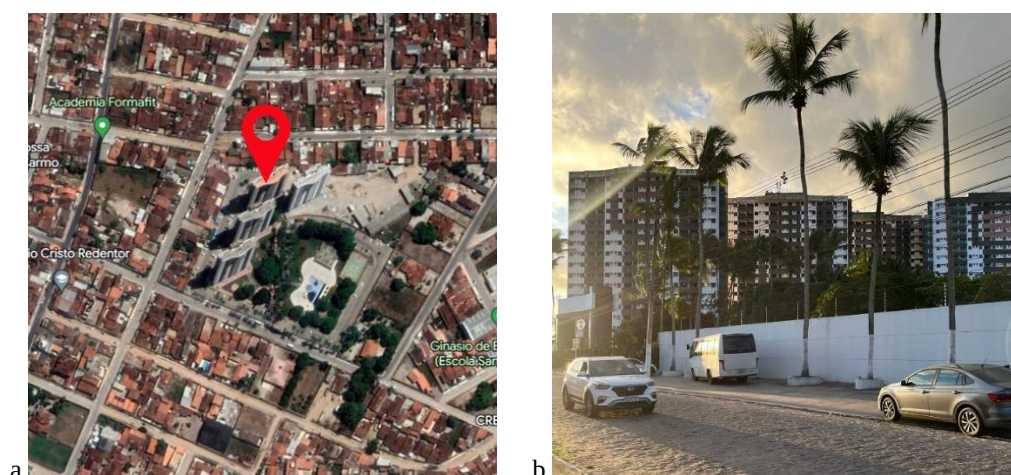


Figura 28 - Localização (a) e Residencial Espace Arapiraca (b).

Fonte: Adaptado de Google Earth Pro (2022) e Arquivo pessoal.

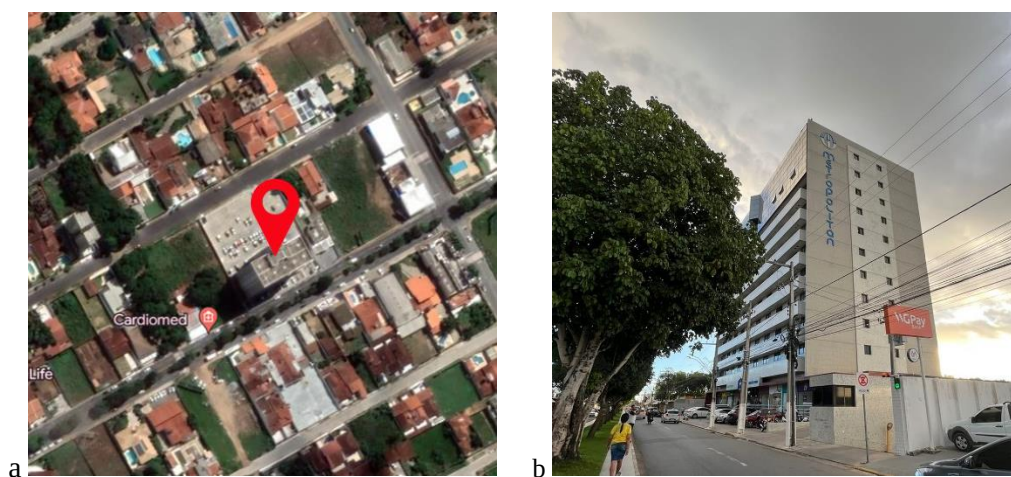


Figura 29 - Localização (a) e Empresarial Metropolitan (b).

Fonte: Adaptado de Google Earth Pro (2022) e Arquivo pessoal.

Na rua Manoel Pereira dos Santos, bairro Senador Arnon de melo, está localizado o *Felicitá Residencial* (ver Figura 30), empreendimento inaugurado em 2014 para fim residencial que conta com 05 torres, cada uma com 06 pavimentos. No Centro da cidade,

especificamente na rua Expedicionária Brasileiro, foi inaugurado no mesmo ano o Ibis Hotel (ver Figura 31). O edifício com 06 pavimentos foi o primeiro hotel da cidade credenciado com bandeira internacional de 03 estrelas.

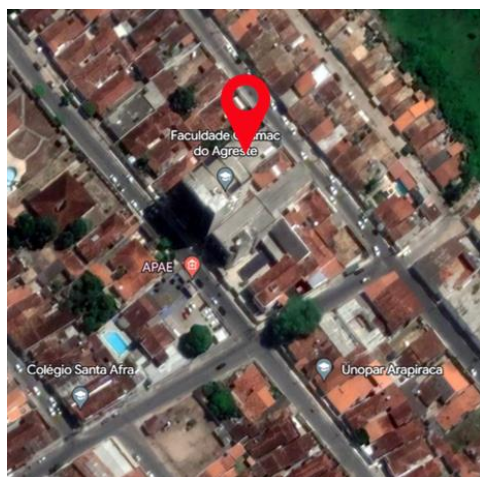


Figura 30 - Localização (a) e Felicitá Residencial (b).
Fonte: Adaptado de Google Earth Pro (2022).



Figura 31 - Localização (a) e Ibis Hotel (b).
Fonte: Adaptado de Google Earth Pro (2022) e Arquivo pessoal.

O prédio do Colégio Santa Afra e das Faculdades Integradas Norte do Paraná (UNOPAR), ver Figura 32, conta com 07 pavimentos e foi inaugurado em 2016, estando localizado na rua Professor Domingos Correia, bairro Ouro Preto. Em 2017, foi construído o Edifício Carlos Silva II (ver Figura 33), com 07 pavimentos para atividade residencial, localizado na Avenida Governador Luiz Cavalcante, bairro Alto do Cruzeiro. No ano seguinte, em 2018, foi inaugurado o Residencial Clube Jardim Europa (ver Figura 34), localizado na Avenida Rotary, zona norte da cidade, composto por 10 prédios com o pavimento térreo e 3 andares.

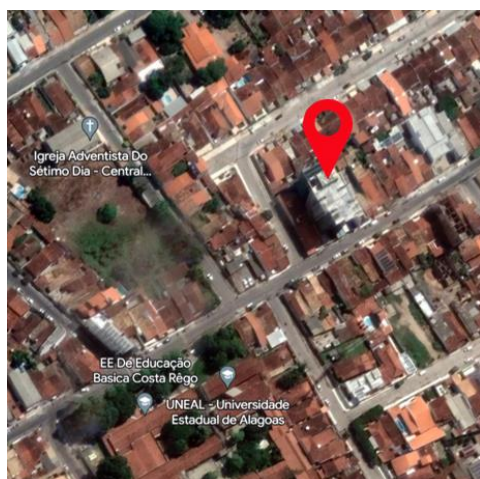


a



b

Figura 32 - Localização (a) e Faculdades Integradas Norte do Paraná (UNOPAR) (b).
Fonte: Adaptado de Google Earth Pro (2022) e Arquivo pessoal.

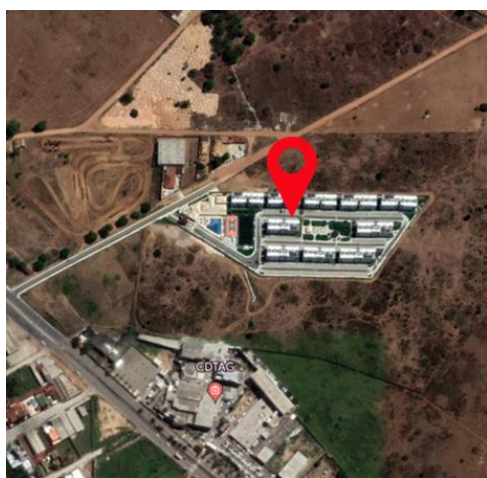


a

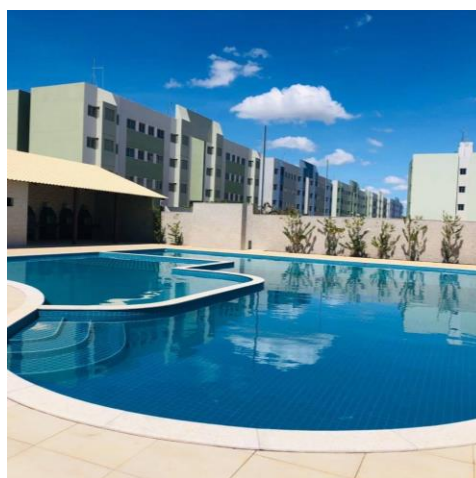


b

Figura 33 - Localização (a) e Edifício Carlos Silva II (b).
Fonte: Adaptado de Google Earth Pro (2022) e Arquivo pessoal.



a



b

Figura 34 - Localização (a) e Residencial Clube Jardim Europa (b).
Fonte: Adaptado de Google Earth Pro (2022).

Durante o curso da presente pesquisa, outros edifícios estão sendo construídos no perímetro urbano, conforme apresenta a Figura 35. É possível observar que, nos últimos anos, o crescimento vertical de Arapiraca se concentrou, especialmente, na zona norte da cidade. O que coincide com o tipo de tecido urbano com tendência a se verticalizar, como apresenta a pesquisa de Torres (2017). Assim, a presente pesquisa parte do tipo de **tecido Horizontal Disperso** para escolha da fração urbana. É importante destacar que o recuo utilizado nas edificações apresentadas foi o mínimo inicial, diante da omissão do atual Código de Obras e Edificações de Arapiraca/ AL (Arapiraca, 2001), com relação à verticalização.



Figura 35 – Edifícios em processo de construção (a) e em processo de lançamento (b).

Fonte: Arquivo pessoal.

Diante desse contexto, tem-se o risco da cidade se desenvolver sob o limite da saturação da ocupação urbana, prática comum segundo os interesses do mercado imobiliário. A ausência de planejamento adequado pode comprometer a sustentabilidade urbana e a qualidade de vida. A verticalização em Arapiraca deve ser analisada sob a ótica da bioclimatologia urbana para minimizar impactos negativos e maximizar benefícios. Algumas recomendações incluem:

- A incorporação de princípios bioclimáticos nos edifícios, como *design* que favoreça a ventilação natural, reduzindo o consumo de energia para climatização; e o uso de materiais que minimizem o ganho térmico e favoreçam o conforto térmico.
- Preservação e inserção de áreas verdes, por meio da implementação de corredores ecológicos e arborização urbana para mitigar o efeito de ilhas de calor; e o incentivo ao uso de telhados verdes e fachadas vegetadas.
- Adoção do planejamento urbano integrado, de forma a garantir infraestrutura adequada para suportar o crescimento vertical e para regular o uso e ocupação do solo.

O próximo passo foi compreender as características climáticas locais, que apontarão as estratégias bioclimáticas adequadas ao clima urbano do município.

2.2 O Clima Semiárido de Arapiraca

A identificação do tipo de clima se configura como o primeiro passo para compreender o comportamento das variáveis climáticas locais, e como empregar estratégias de projeto urbanístico para minimizar os efeitos das Ilhas de Calor Urbano (ICU) e criar condições favoráveis ao conforto térmico para o pedestre. As estratégias construtivas para adequação da forma urbana ao clima são denominadas estratégias bioclimáticas (Givoni, 1992). Dentre os tipos de clima presentes no Brasil, tem-se o clima semiárido.

De acordo com o Instituto Nacional do Semiárido (INSA) (2023), o clima semiárido²⁸ cobre 12% do território brasileiro, cerca de 1.128.697km², e ocorre principalmente na região Nordeste, na faixa que corresponde à região agreste, do Rio Grande do Norte ao norte do estado de Minas gerais, como apresenta a Figura 36.

²⁸ O clima semiárido é caracterizado pela precipitação pluviométrica média anual inferior a 800mm, índice de aridez de até 0,5, calculado pelo balanço hídrico que relaciona as precipitações e a evapotranspiração potencial no período entre 1961 e 1990, e risco de seca maior que 60%, tomando-se por base o período entre 1970 e 1990. O Conselho Deliberativo da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste - SUDENE possui a competência para determinar os critérios técnicos e científicos para a delimitação do Semiárido, de acordo com a Lei Complementar n. 125, de 03.01.2007.

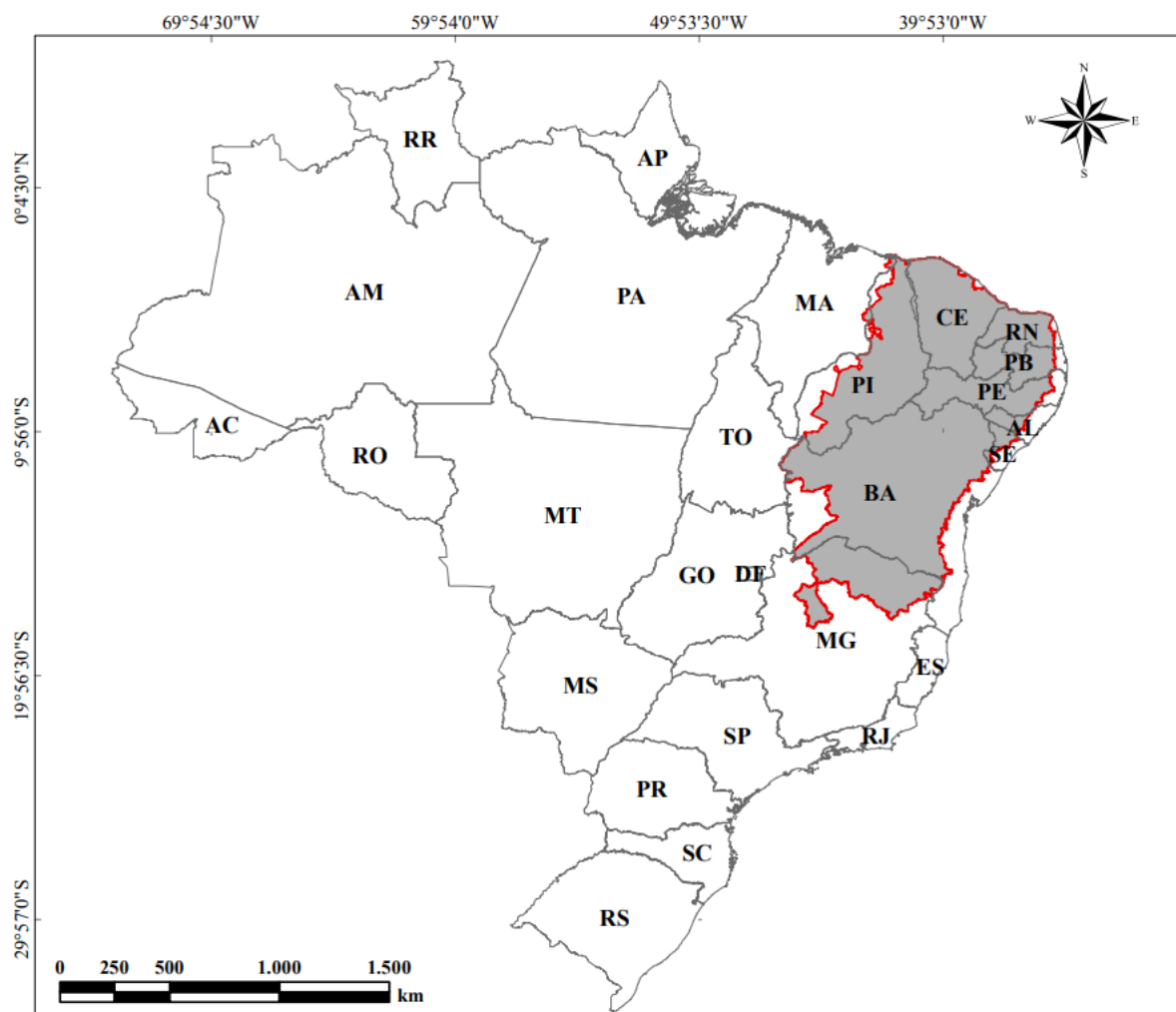


Figura 36 – Delimitação do semiárido no Brasil (destaque em vermelho).

Fonte: INSA (2023).

Em Alagoas, estado em que o objeto de estudo da presente pesquisa está inserido, o clima semiárido ocorre em 71, 2% de seu território (ver Figura 37). Dessa forma, destaca-se a importância do estudo dessa tipologia de clima. O clima de Arapiraca é o semiárido, de acordo com o INSA, e segundo a classificação climática de Köppen²⁹, a cidade se enquadra no clima tropical de savana (Alvares et al., 2013). A presente pesquisa seguirá em consonância com a especificação do INSA (2023).

²⁹ A classificação climática de Köppen é o sistema de classificação climático mais utilizado em todo o mundo, é calculado a partir de conjuntos de dados atualizados de temperatura global e precipitação (KOTTEK et al., 2006).



Figura 37 – Semiárido Alagoano, com destaque para a cidade de Arapiraca.

Fonte: Adaptado de: <https://dados.al.gov.br/catalogo/dataset/> (2022)

Em 2022, Arapiraca foi excluída da lista de municípios que integram o semiárido brasileiro, de acordo com a Resolução nº 158/2022 do Conselho Deliberativo da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (Sudene). A exclusão provocou preocupações, uma vez que a inserção na delimitação do semiárido garante acesso a políticas públicas voltadas ao desenvolvimento regional e à adaptação às condições climáticas adversas dessa região, caracterizada por longos períodos de seca (Sudene, 2022).

A delimitação do semiárido brasileiro segue critérios técnicos estabelecidos pela Sudene, baseados em três fatores principais: precipitação média anual inferior a 800 mm, índice de aridez (IA) de até 0,5, e risco de seca maior que 60%, conforme estabelecido em estudos climáticos e hidrológicos (Silva et al., 2014). Esses critérios visam identificar os municípios com maior vulnerabilidade às secas prolongadas e, consequentemente, mais necessitados de políticas de mitigação e desenvolvimento adaptado às condições locais. Arapiraca, apesar de apresentar um nível de desenvolvimento econômico mais avançado em relação a outros municípios do semiárido, ainda enfrenta desafios climáticos que afetam sua agricultura e economia local (Mendonça, 2019).

Com a exclusão de Arapiraca, havia o risco de perda de acesso a subsídios fiscais, linhas de crédito especiais e programas como o Programa de Garantia-Safra e o Fundo Constitucional de Financiamento do Nordeste (FNE), que são vitais para a convivência com a seca e o fomento à economia agrícola regional (Santos et al., 2020). A reincorporação do município à delimitação

do semiárido, ocorrida após articulações políticas e sociais, foi uma correção importante para assegurar a continuidade dessas políticas, reconhecendo-se a vulnerabilidade climática do município, independentemente de seu desenvolvimento econômico relativo (Sudene, 2023).

A decisão de reincorporar Arapiraca reforça a importância de uma abordagem técnica e contextualizada na delimitação do semiárido, que considere tanto fatores climáticos quanto socioeconômicos. A inclusão na lista de municípios do semiárido brasileiro permite que essas localidades recebam apoio necessário para enfrentar os desafios impostos pelas condições de aridez e contribuir para o desenvolvimento sustentável da região (Albuquerque et al., 2017).

O clima de Arapiraca foi compreendido com base nos dados, registrados entre 2009 a 2018, de: temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação e velocidade média/ direção predominante dos ventos (Silva, 2019; Silva; Barbosa, 2022). A Figura 38 apresenta o gráfico da temperatura média mensal de Arapiraca:

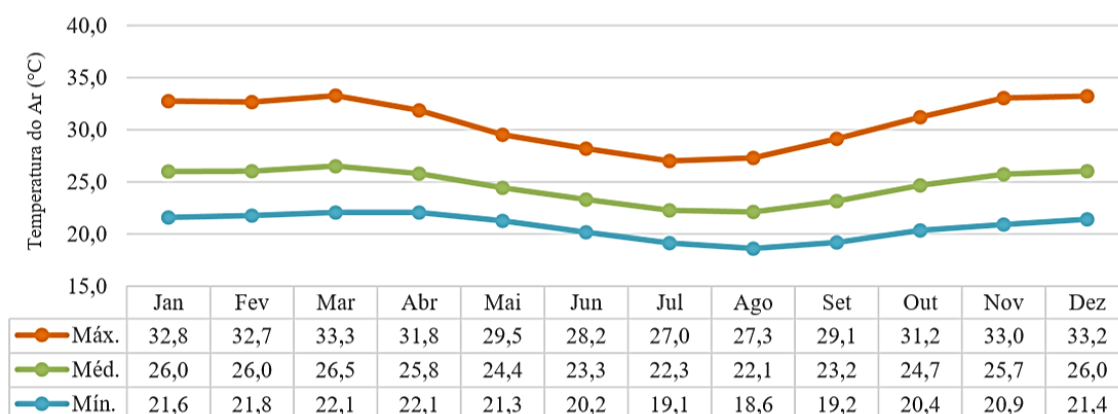


Figura 38 – Gráfico da temperatura média mensal do ar de Arapiraca.

Fonte: Silva (2019).

De acordo com Silva (2019), nos meses correspondentes ao período quente e seco (primavera e verão), de outubro a março, as temperaturas médias do ar são mais elevadas, com máxima de 33,3 °C e mínima de 20,4 °C. No período quente e úmido (outono e inverno), de abril a setembro, as temperaturas médias do ar podem variar entre a máxima de 31,8 °C e a mínima de 18,6 °C. Assim, devido a sua localização geográfica, seu clima se constitui misto, com duas estações bem definidas: um verão quente e seco, e um inverno quente e úmido.

A Figura 39 apresenta o gráfico da umidade relativa do ar média mensal do ar de Arapiraca, elaborado por Silva (2019). No período quente e seco, a umidade relativa do ar máxima é de 90,0%, e mínima de 32,9%. O período quente e úmido apresenta valores mais

elevados, com máxima de 93,8% e mínima de 45,6%. Vale destacar, que as maiores amplitudes térmicas são observadas no período quente e seco, em função da baixa umidade relativa do ar, com valores de até 12,1 °C e 11,8 °C em novembro e dezembro, respectivamente. No período quente e úmido são observadas as menores amplitudes térmicas, com máxima de 9,9 °C e mínima de 7,9 °C.

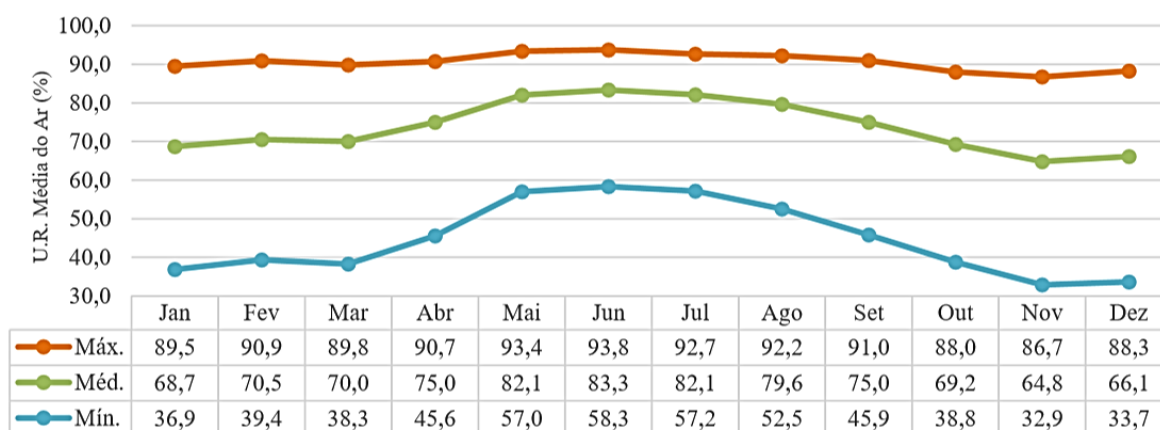


Figura 39 – Gráfico da Umidade relativa do ar média mensal do ar de Arapiraca.

Fonte: Silva (2019).

A respeito dos dados de precipitação, Silva (2019) analisou os anos de 2009 a 2016, ver Figura 40. A precipitação média anual corresponde ao total pluviométrico de 890,0 mm. O ano com maiores índices pluviométricos foi o de 2009, com 1189,2 mm, enquanto o ano de menores índices pluviométricos foi registrado em 2015, com 703,6 mm³⁰. De acordo com a média dos anos analisados, os meses mais chuvosos coincidem com o período quente e úmido, que também apresentam os maiores valores das médias mensais de umidade relativa do ar e menores valores das médias mensais de temperatura do ar. Os meses menos chuvosos acontecem no período quente e seco, em que ocorre os menores e maiores valores das médias mensais de umidade relativa do ar e temperatura do ar, respectivamente.

³⁰ Os anos sem todos os valores totais mensais foram desconsiderados.

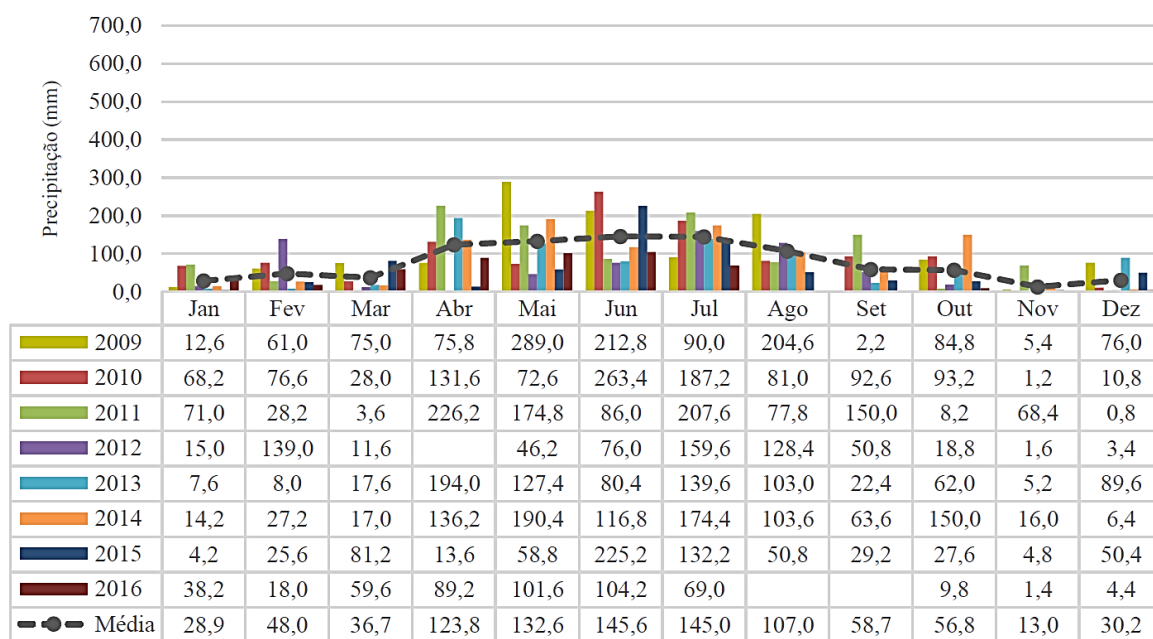


Figura 40 – Gráfico da Precipitação média mensal de Arapiraca.

Fonte: Silva (2019).

A Figura 41 apresenta o quadro das rosas dos ventos com médias mensais de frequência e direção dos ventos em Arapiraca. Pode-se observar que a direção predominante dos ventos é a Leste, e a secundária é a Sudeste. Os ventos que advém da direção leste são mais frequentes no período quente e seco, enquanto da direção sudeste, no período quente e úmido (Silva; Barbosa, 2022).

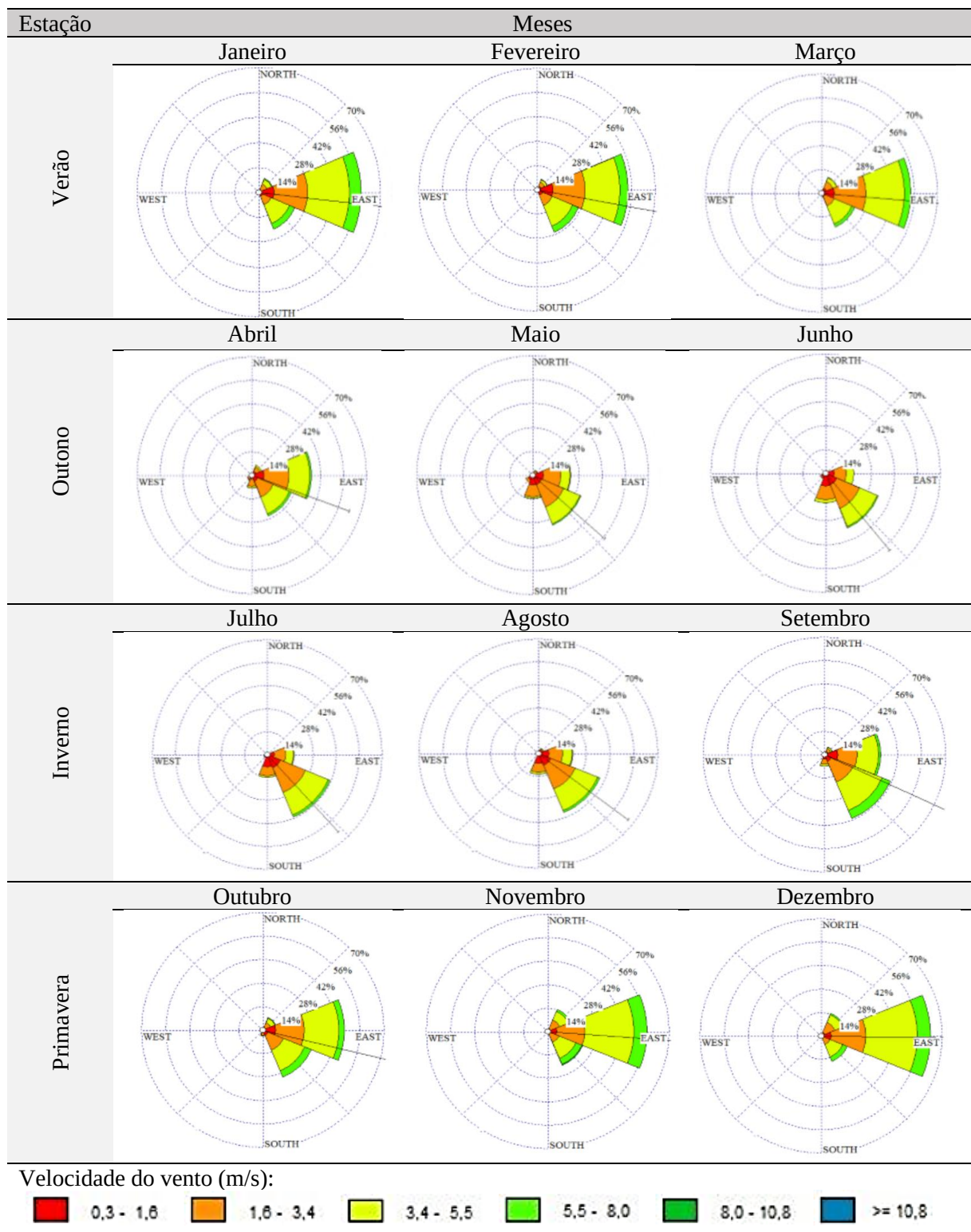


Figura 41 – Quadro das rosas dos ventos com médias mensais de frequência e direção dos ventos em Arapiraca.

Fonte: Adaptado de Silva (2019).

O comportamento da direção dos ventos ao longo do dia se apresenta da seguinte forma: predominância dos ventos no sentido Leste no horário da manhã e noturno, e predominância

dos ventos no sentido Sudeste no horário da tarde, especialmente no período quente e seco, ver Figura 44). Com relação à velocidade dos ventos, Silva e Barbosa (2022) realizaram uma análise ao longo do ano e do dia. Durante o ano há uma variação sazonal na velocidade dos ventos: o período quente e seco apresenta tendência de maiores velocidades médias, com máxima de 4 m/s^{-1} ; o período quente e úmido apresenta as menores velocidades médias, especialmente nos meses de maio a agosto, em que as médias observadas foram inferiores a 2 m/s^{-1} (ver Tabela 01).

Tabela 1. Velocidade média mensal dos ventos (m/s^{-1}) em Arapiraca/AL.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	σ
2009	3,48	2,93	2,96	2,35	1,81	1,95	1,99	2,24	4,27	3,55	4,33	3,38	0,88
2010	2,76	2,64	2,57	1,83	1,55	1,90	1,98	2,03	2,53	2,77	3,58	3,34	0,62
2012	2,67	2,70	2,71	1,95	1,79	1,46	1,72	1,91	2,23	2,84	3,09	3,52	0,63
2015	3,17	2,88	2,76	2,27	2,25	2,02	1,91	2,08	2,47	3,09	3,93	3,62	0,65
2016	3,83	3,39	3,25	2,56	1,73	1,64	1,71	1,40	2,09	2,83	3,25	3,59	0,86
2017	2,88	2,75	2,84	2,16	1,60	1,84	1,90	1,99	2,53	2,94	3,07	3,24	0,55
2018	3,27	3,03	2,79	2,59	2,20	1,78	1,92	2,09	2,76	3,25	3,90	3,23	0,64
Média	3,15	2,90	2,84	2,25	1,85	1,80	1,87	1,96	2,70	3,04	3,59	3,42	0,64
σ	0,42	0,25	0,22	0,29	0,28	0,19	0,12	0,27	0,73	0,28	0,48	0,16	

σ : desvio padrão do vento

Fonte: Adaptado de Silva; Barbosa (2022).

A classificação das faixas de velocidade foi analisada por Silva e Barbosa (2022) de acordo com a escala Beaufort (Quadro 10). A velocidade média e direção predominante dos ventos ao longo do dia a cada mês do ano está apresentada na Figura 42. No período quente e seco, durante a madrugada há predominância de aragens, com ventos advindos do Leste; pela manhã e pela tarde há predominância de ventos bonançosos, também advindos do Leste, salvo as tardes do primeiro trimestre do ano, em que há ocorrência de ventos do sentido Sudeste; no início da noite o vento é bonançoso, e fraco durante a madrugada, em ambos o sentido é Leste. Durante o período quente e úmido, o vento é classificado como aragem desde a madrugada até o começo da tarde, quando sua velocidade média aumenta, classificando-o como bonançoso.

Quadro 10. Extrato da escala Beaufort.

Grau	0	1	2	3	4	5	6
Classificação	calmaria	aragens	fraco	bonançoso	moderado	fresco	Muito fresco
Velocidades (m.s^{-1})	< 0,2	0,3 – 1,5	1,6 - 3,3	3,4 - 5,4	5,5 - 7,9	8,0 - 10,7	10,8 - 13,8

Fonte: Adaptado de Silva e Barbosa (2022).

h	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Méd.
00h-02h	1,59 →	1,59 →	1,38 →	1,01 →	0,64 →	0,61 →	0,58 ↘	0,74 ↘	1,37 →	1,84 →	2,51 →	2,24 →	1,34 →
03h-05h	0,97 →	0,87 →	0,72 →	0,54 →	0,55 →	0,49 →	0,51 ↘	0,56 →	1,10 ↘	1,35 →	1,78 →	1,55 →	0,92 →
06h-08h	2,50 →	1,67 →	1,91 →	1,27 →	1,03 →	0,98 ↘	0,98 ↘	1,14 →	1,91 →	2,47 →	3,14 →	2,75 →	1,82 →
09h-11h	4,06 →	3,30 →	3,73 →	2,82 →	2,66 ↘	2,85 ↘	3,10 ↘	3,06 ↘	3,76 →	3,95 →	4,22 →	3,93 →	3,45 →
12h-14h	4,44 →	4,23 →	4,04 →	3,41 ↘	3,33 ↘	3,51 ↘	3,76 ↘	3,76 ↘	4,33 ↘	4,20 →	4,31 →	4,30 →	3,96 ↘
15h-17h	5,20 ↘	4,87 ↘	4,88 ↘	4,08 ↘	3,42 ↘	3,27 ↘	3,46 ↘	3,49 ↘	4,30 ↘	4,52 ↘	4,99 →	5,09 →	4,29 ↘
18h-20h	3,88 →	4,05 →	3,65 →	3,08 →	2,12 ↘	1,79 ↘	1,71 ↘	1,91 ↘	2,87 ↘	3,38 →	4,37 →	4,28 →	3,08 →
21h-23h	2,57 →	2,64 →	2,37 →	1,78 →	1,06 →	0,89 ↘	0,90 ↘	1,04 ↘	1,93 ↘	2,56 →	3,42 →	3,19 →	2,02 →
Méd.	3,15 →	2,90 →	2,84 →	2,25 →	1,85 ↘	1,80 ↘	1,87 ↘	1,96 ↘	2,70 ↘	3,04 →	3,59 →	3,42 →	2,61 →
σ	1,47	1,44	1,45	1,27	1,19	1,24	1,36	1,30	1,30	1,15	1,08	1,19	1,25

Legenda:	Velocidade	Aragens	Fraco	Bonafoso	Moderado	Fresco		
		0,3 - 1,5 m.s ⁻¹	1,6 - 3,3 m.s ⁻¹	3,4 - 5,4 m.s ⁻¹	5,5 - 7,9 m.s ⁻¹	8,0 - 10,7 m.s ⁻¹		
	Direção	↑N	↗NE	→E	↘SE	↓S	↙SW	←W

Figura 42 - Diagrama de regime de ventos com velocidade média horária (m.s-1) e direção predominante em Arapiraca/AL.

Fonte: Silva; Barbosa (2022).

Com base no tratamento dos dados climáticos registrados, Silva (2019) identificou o Ano Climático de Referência³¹ (*Test Reference Year – TRY*) para a cidade de Arapiraca (2010). A partir da inserção dos dados horários do TRY de Arapiraca no programa Analysis BIO³², a Autora obteve as estratégias bioclimáticas recomendáveis ao planejamento urbano e de projeto arquitetônicos para a cidade de Arapiraca, indicadas pela Carta de Givoni³³. A Carta gerada pelo programa pode ser vista na Figura 43.

³¹ Um TRY foi elaborado pelo *National Climatic Center*, e corresponde a uma série de dados climáticos que compõem 8.760 horas referente ao período de um ano que poderá representar o comportamento climático de uma localidade (Goulart; Lamberts; Firmino, 1998). Tornando-o “a base de dados mais precisa para uma análise completa da adequação da edificação ao clima local (Lamberts; Dutra; Pereira, 2013, p. 72).

³² <<https://labeee.ufsc.br/downloads/softwares/analysis-bio>>

³³ A Carta Bioclimática de Givoni “é um diagrama bioclimático que propõe estratégias de adaptação da arquitetura ao clima” (Lamberts; Dutra; Pereira, 2013, p. 84). Esse diagrama psicrométrico é dividido em zonas, onde os dados climáticos serão plotados, que representam diferentes estratégias bioclimáticas. A distribuição dos dados plotados sobre a carta determina as recomendações de planejamento urbano e projeto arquitetônico adequadas para a cidade (Givoni, 1992).

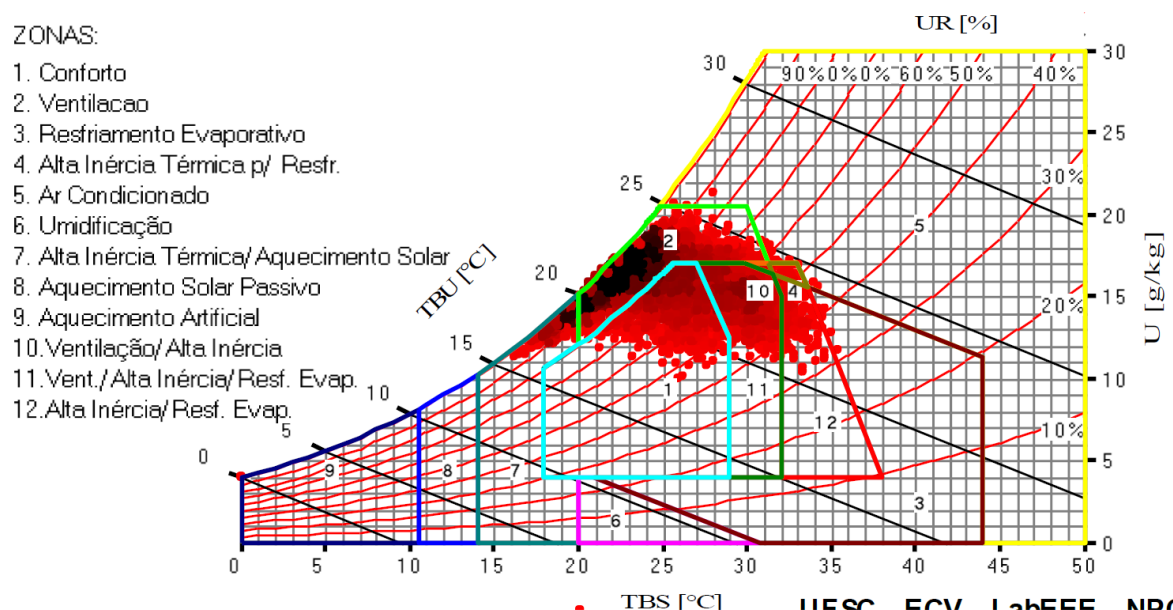


Figura 43 - Carta bioclimática para Arapiraca/AL, com dados do TRY (2010).

Fonte: Silva (2019).

De acordo com Silva (2019), o relatório gerado pelo programa Analysis BIO indicou que em apenas 17,7 % do ano a cidade de Arapiraca se encontra em situação de conforto térmico, enquanto que em 76,1 % do ano há desconforto térmico gerado por calor, e em 6,22 %, por frio. As estratégias bioclimáticas recomendadas para a eficiente adequação de assentamentos construtivos no espaço urbano de Arapiraca estão listadas no Quadro 11:

Quadro 11. Estratégias bioclimáticas propostas pela Carta Bioclimática de Givoni (1992) para a cidade de Arapiraca/ AL.

Estratégias		Período				
		Primavera	Verão	Outono	Inverno	Ano
Conforto		21,6 %	12,2 %	7,02 %	30,2 %	17,7 %
Desconforto	Sombreamento	96,3 %	100,0 %	99,6 %	79,3 %	93,8 %
	Ventilação	71,5 %	81,1 %	91,1 %	49,1 %	73,2 %
	Alta inércia para resfriamento	24,5 %	29,4 %	14,8 %	0,2 %	17,1 %
	Resfriamento Evaporativo	24,4 %	28,6 %	13,9 %	0,2 %	16,7 %
	Ar condicionado	0,0 %	0,3 %	0,4 %	0,0 %	0,2 %
	Frio	3,6 %	0,0 %	0,3 %	20,7 %	6,2 %
	Alta inércia térmica para aquecimento solar					

Fonte: Adaptado de Silva (2019).

O desconforto térmico por calor está presente em todos os períodos do ano, especialmente durante o verão. A estratégia bioclimática de sombreamento é indicada para o ano inteiro, seguida pelo aproveitamento da ventilação natural. As estratégias de alta inércia para resfriamento e resfriamento evaporativo são mais indicadas para o período quente e seco.

O desconforto térmico por frio está presente em apenas 6,2 % do ano, podendo ser utilizada a estratégia de alta inércia térmica para aquecimento. O adensamento construtivo por meio da verticalização das edificações diminui o FCV, gerando sombreamento nos passeios e nas vias públicas. Enquanto o espaçamento entre as edificações e o uso de *pilotis* tem o potencial de permitir melhor permeabilidade dos ventos na malha urbana, o que maximiza os fluxos de vento e a renovação do ar fora e dentro das edificações (Silva, 2019).

A respeito do clima de Arapiraca, torna-se necessário apresentar a validade do uso da ventilação natural como estratégia bioclimática, visto que sua aplicabilidade se dá até o limite de temperatura do ar externa de 27°C ou entre 27°C e 32°C, se a umidade relativa do ar tiver valores entre 15% e 75%, pois a partir daí os ganhos térmicos por convecção a tornam indesejável (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014). De acordo com a TRY de Arapiraca, para o verão (período com as temperaturas do ar mais elevadas), o relatório gerado pelo programa Analysis BIO apontou que a ventilação é bem-vinda durante 81,1% do período, o que dá margem para seu uso, ver Figura 44. Nos 18,9 % do ano, estratégias que resultam na diminuição da temperatura do ar podem ser somadas, a fim de possibilitar o uso da ventilação natural, como é o caso do sombreamento, por exemplo.

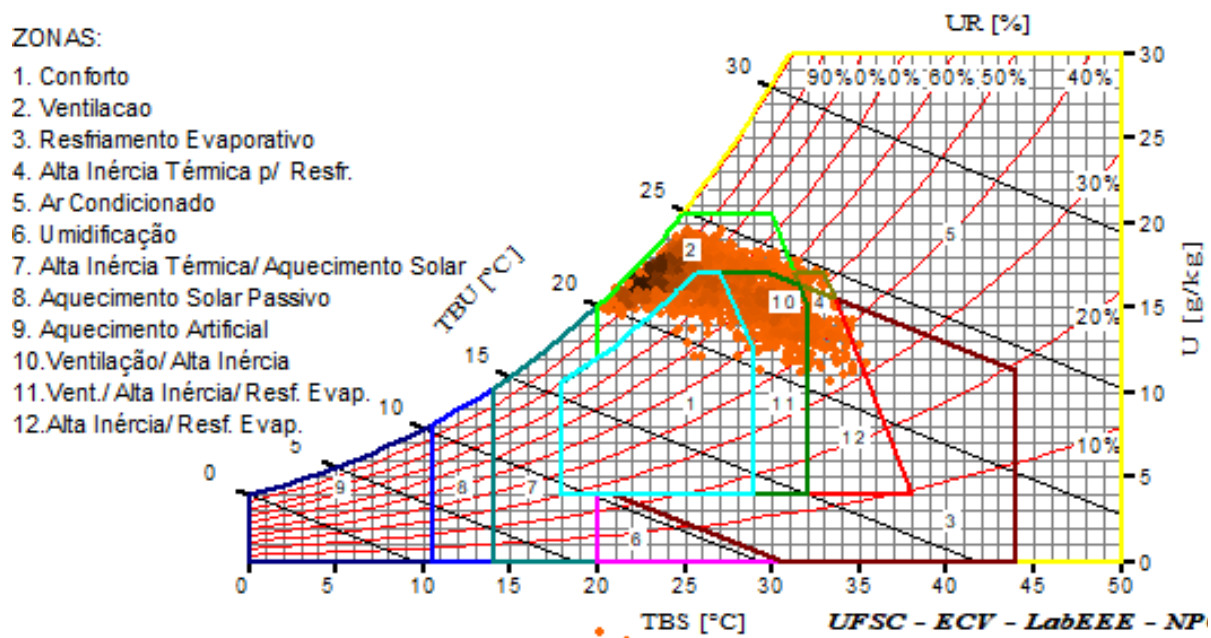


Figura 44 - Carta bioclimática para Arapiraca/AL no verão, com dados do TRY (2010).

Fonte: Silva (2019).

2.3 Conclusões do Capítulo

Arapiraca é uma cidade de médio porte, que ao longo dos últimos anos, apresenta elevadas taxas de urbanização e crescimento contínuo de sua população. Ao contrário do que acontece nas cidades dessa categoria na região nordeste, o seu processo de verticalização ainda se encontra em fase inicial. A disponibilidade de terras planas e a falta de infraestrutura urbana, especialmente no que tange o saneamento básico, inviabilizam o crescimento vertical do município ao mesmo tempo que promove o espraiamento da malha urbana. Apesar disso, é possível observar um número crescente de edificações verticalizadas, para uso residencial e comercial, principalmente na zona norte da cidade.

A implantação desses edifícios ocorreu e está ocorrendo na ausência de parâmetros urbanísticos que regulem essa tipologia construtiva. No Plano Diretor (Arapiraca, 2006) e no Código de Obras e Edificações (Arapiraca, 2001) da cidade não há diretrizes urbanísticas que regulem o seu crescimento vertical, com base no desenvolvimento sustentável da cidade, com medidas a curto, médio e longo prazo. Vale destacar que os mesmos não passaram por revisão desde as suas respectivas publicações. Nesse sentido, a omissão do poder público pode resultar em diversos riscos às condições climáticas locais, tendo em vista a complexidade perfil climático da cidade.

O clima de Arapiraca é semiárido e, em virtude de sua localização geográfica entre a costa úmida e o interior semiárido, caracteriza-se por apresentar duas estações bem definidas: um verão quente e seco e um inverno quente e úmido, com altas temperaturas ao longo de todo o ano. Diante das condições climáticas locais, o maior desafio para os planejadores urbanos é de promover medidas que estimulem o aproveitamento de estratégias bioclimáticas nas duas estações do ano, concomitantemente. Parâmetros de uso e ocupação do solo urbano que pouco se baseiam em estudos climáticos e nas projeções de seus impactos no microclima local correspondem a frágeis instrumentos regulatórios, que resultam no surgimento das ICU e tantos outros impactos ambientais. Isso implica na perda da qualidade de vida urbana, no desconforto térmico humano ao ar livre, e por consequência, no interior das edificações, que gera o aumento do consumo de energia.

Nesse sentido, na busca da sustentabilidade urbana é imprescindível conciliar o crescimento e desenvolvimento urbano e econômico com o equilíbrio entre a geração de riqueza e qualidade de vida e ambiental. O Plano Diretor Participativo da cidade vai completar 23 anos sem passar por revisão, ao mesmo tempo em que o processo de urbanização de Arapiraca sinaliza o início de seu crescimento vertical. Assim, torna-se urgente o estudo prévio dos impactos

da verticalização no microclima e no conforto térmico ao ar livre, a fim de compor diretrizes urbanísticas que poderão auxiliar os gestores públicos. Desta forma, justifica-se a adoção de Arapiraca/AL como objeto de estudo da presente pesquisa.



3. MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa foi baseada no método hipotético dedutivo (Lakatos; Marconi, 2003), pois na prática, a partir da teoria existente na área da climatologia urbana e do urbanismo bioclimático aplicados ao planejamento urbano, buscou-se, por experimentação, avaliar a influência da verticalização nas condições de conforto térmico na escala do pedestre, no contexto climático do clima semiárido.

A pesquisa partiu de uma abordagem preditiva, com aplicação de modelos³⁴ de cenários urbanos hipotéticos (Echenique, 1975), que permitiram testar a hipótese levantada a partir de uma fração urbana com tendência à verticalização. A pesquisa foi fundamentada em uma análise quantitativa e qualitativa, tomando uma fração da cidade de Arapiraca/AL como estudo de caso. Duas versões do *software* ENVI-met foram utilizadas como ferramenta para simulação computacional dos cenários desenvolvidos, o ENVI-met 4.0 para realizar as simulações computacionais, e o ENVI-met 5.5.1 para extrair e tratar os dados, com base em suas interfaces (BIO-met e Leonardo)³⁵. Assim, foram adotados os seguintes procedimentos metodológicos:

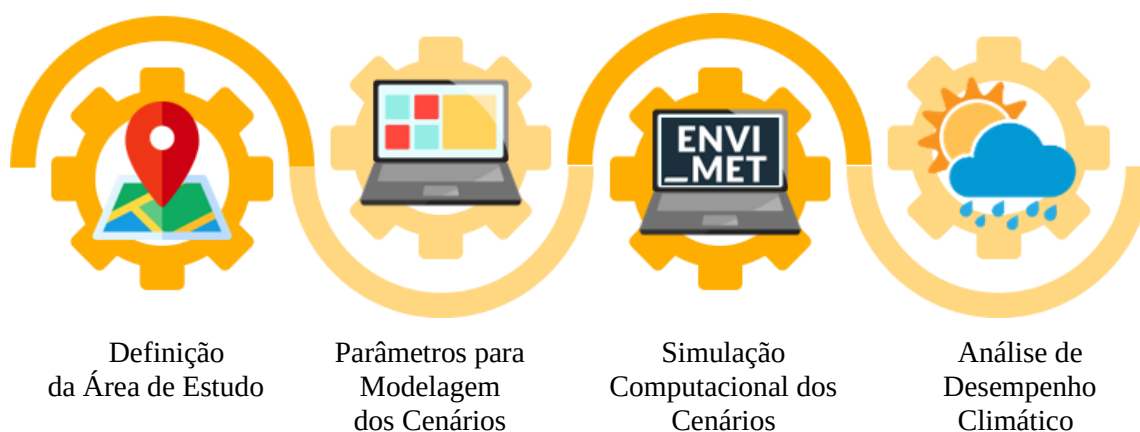


Figura 45 - Etapas metodológicas da pesquisa.

Fonte: Elaborado pela Autora.

3.1 Definição da Área de Estudo

A definição da área de estudo parte da análise do processo de urbanização de Arapiraca, que possibilitou identificar os tipos de tecidos urbanos que apresentam tendência à verticalização. Dentre eles, o tecido Horizontal Disperso foi selecionado por apresentar quadras com ocupação perimetral e taxa de ocupação média ou baixa; área dos lotes a partir de 430m²;

³⁴ Modelos numéricos possibilitam simular processos atmosféricos, a partir do SEB urbano, com base em fórmulas físicas e matemáticas (Oke et al., 2017).

³⁵ O subtítulo 3.3, que trata da Simulação Computacional dos Cenários, abordará a razão do uso das duas versões.

favorecendo a verticalização, conforme observado pela existência de edifícios verticais já construídos. Os bairros inseridos nessa tipologia são: Nova Esperança, Alto do Cruzeiro, Novo Horizonte, Santa Esmeralda e Senador Arnon de Melo. Buscou-se selecionar uma área de estudo onde é possível observar edifícios implantados e a construção de novos, especialmente na zona norte da cidade. Dessa forma, foi selecionado o perímetro que corresponde a Avenida Deputada Ceci Cunha, ver Figura 46b.



Figura 46 - Localização da Av. Dep. Ceci Cunha na cidade (a), recorte da Av. Dep. Ceci Cunha com a fração urbana selecionada (b) e vista na perspectiva do pedestre (c).

Fonte: Adaptado de Google Earth Pro (2022) e Arquivo Pessoal.

A Av. Dep. Ceci Cunha é composta pelos seguintes bairros: Alto do Cruzeiro, Brasília, Novo Horizonte e Itapuã. Trata-se de uma área valorizada da cidade, de uso comercial e residencial, onde estão situados alguns dos edifícios apresentados no subtítulo 2.1, que trata do processo de verticalização em Arapiraca. A exemplo, tem-se o Edifício Empresarial *Metropolitan*, Edifício Flor do Lótus, Residencial Gran Lira e o Edifício *Tower*. No perímetro que divide os bairros Novo Horizonte e Itapuã é possível observar diversos vazios urbanos e

lotes com maior dimensão. Desta forma, a Figura 47 apresenta a fração urbana selecionada como área de estudo da presente pesquisa.

Para a elaboração dos cenários urbanos hipotéticos, foi necessário quantificar o padrão recorrente de ocupação nessa área, a partir do desenho das quadras e lotes, das larguras das vias e passeios, com base em mapa cartográfico atualizado, disponibilizado pela Prefeitura Municipal (ver Figura 47b), e por visitas *in loco*. Desta forma, a área de estudo selecionada apresenta, no presente momento (novembro/2024), as seguintes características:

- Área de 132.300 m² (420 m x 315 m);
- Quadras às margens da Avenida com Lotes de 25 m de frente (em sua maioria) e 30 m de profundidade, vias com 6 m de largura, canteiro central de 4m e passeios de 2,7 m de largura;
- Quadras secundárias com Lotes de 12 m de frente (em sua maioria) e 30 m de profundidade, vias com 6m de largura e passeios de 2 m de largura;
- Revestimentos do solo: concreto (passeios de pedestres, vias e no corredor de vegetação), solo natural (nos lotes ocupados e não ocupados);
- Vegetação existente na Área Verde Dom Constantino Lüers, corredor de arborização, e no interior de alguns lotes;
- Altura máxima das edificações existentes: 10 pavimentos (30m).

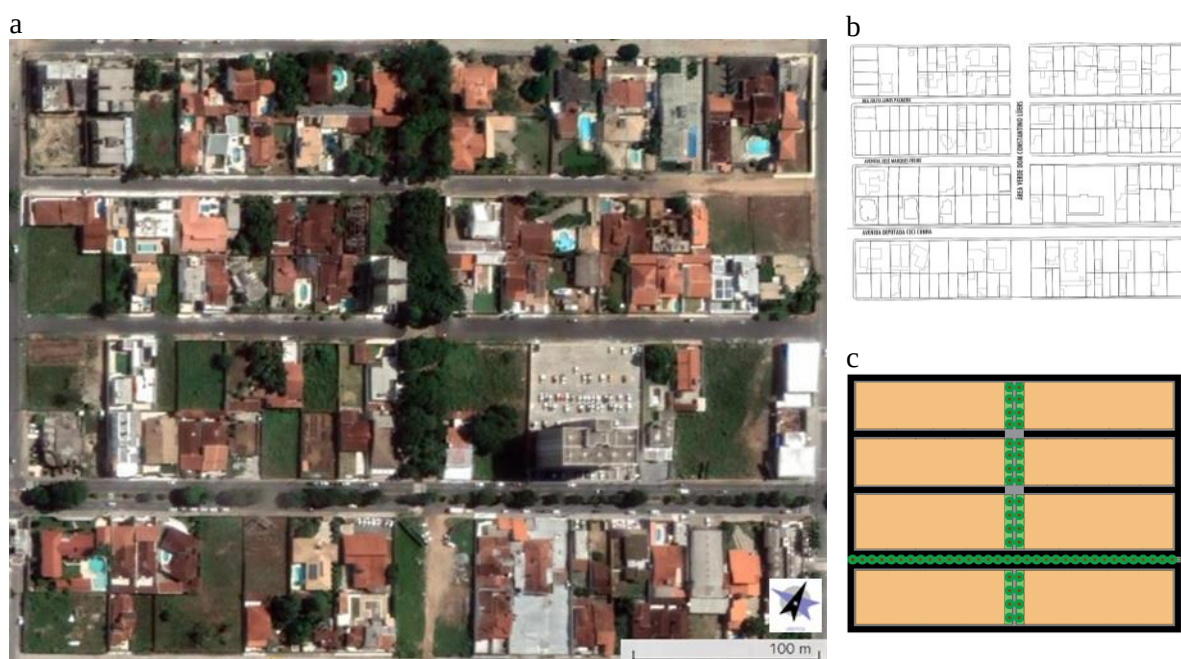


Figura 47 – Mapa da área selecionada em vista satélite (a), cartográfico (b) e para modelagem dos cenários (c).

Fonte: Adaptado de Google Earth Pro (2022) e Arquivo Pessoal.

A partir das características área de estudo selecionada, foi necessário ajustar algumas medidas da fração urbana selecionada de acordo com as especificidades técnicas do programa de simulação computacional adotado. Assim, a área para o cenário-base foi ajustada para 131.762,5 m² (515,0 m x 317,5 m). De forma a gerar dados responsivos à fração urbana selecionada, foram mantidas as disposições dos lotes existentes, assim como as edificações verticalizadas já presentes no local: o Condomínio Residencial Flor de Lótus e o Empresarial *Metropolitan*. Outro ponto importante foi a escolha do número de pavimentos, que partiu dos seguintes pressupostos:

- A modelagem de cenários urbanos com edificações térreas já foi amplamente abordada em pesquisas anteriores (Brandão, 2017; Brandão, 2020);
- Ao tomar o cânion como unidade urbana para estudo do adensamento construtivo, é de maior relevância aprofundar os estudos nos cenários com edificações de 15 pavimentos, e Brandão (2020) observou resultados semelhantes, quantitativa e qualitativamente, entre edificações de 5 e 10 pavimentos;
- A análise da rugosidade da malha urbana, a partir da adoção de edificações de diferentes números de pavimentos, já foi abordada anteriormente (Brandão, 2020), em que os resultados demonstraram condições mais favoráveis ao aproveitamento da ventilação natural ao evitar o regime de Fluxo *skimming*, o que beneficiou o conforto térmico ao ar livre.

Nesse sentido, a presente pesquisa adotou **edificações de 15 pavimentos**. Para a implantação dos edifícios verticais na fração urbana, fez-se necessário o remembramento dos lotes, diante do uso do recuo progressivo. A forma como os lotes são unificados, como Lado a Lado (LL) ou Frente e Fundo (FF), pode influenciar na exposição à radiação solar direta e na permeabilidade da ventilação natural (rugosidade e porosidade); e por conseguinte, no conforto térmico ao ar livre. A escolha do tipo de remembramento deve considerar a orientação solar e a direção predominante dos ventos, de forma a reduzir o período de exposição à radiação solar direta, e potencializar o aproveitamento da ventilação natural, reduzindo o acúmulo de calor em áreas densamente edificadas. Isso pode diminuir a TRM e aumentar a velocidade do fluxo de ar no interior do cânion, respectivamente. Nesse contexto, como o presente estudo não analisará diferentes orientações, por partir de uma fração urbana real de Arapiraca/AL, pretendeu-se analisar os efeitos climáticos de ambas as possibilidades de remembramento: LL e FF. Assim, criou-se duas categorias de modelagem dos cenários: remembramento dos lotes LL (Ver Figura 48a) e remembramento dos lotes FF (Ver Figura 48b).

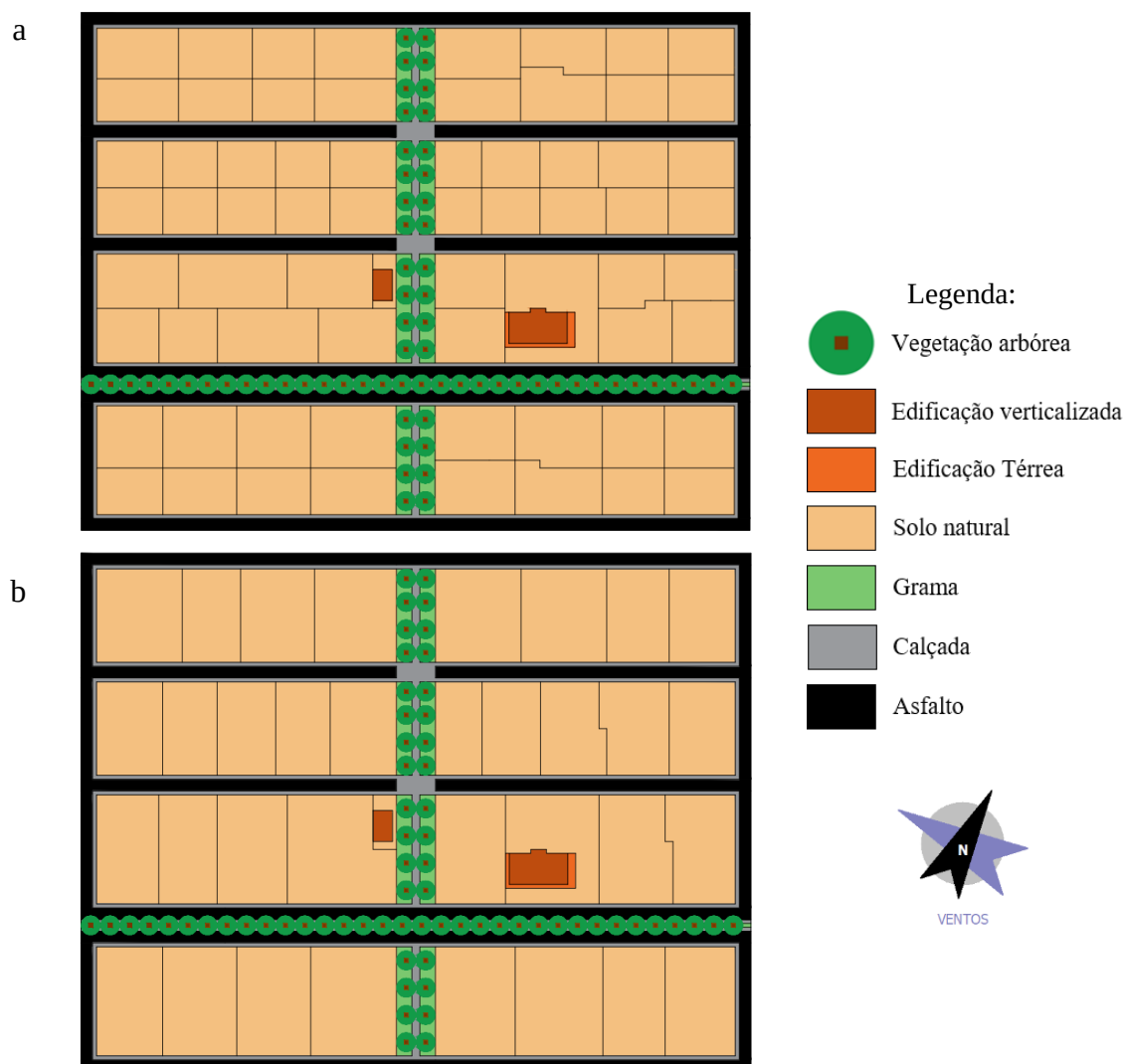


Figura 48 – Mapas das áreas base para modelagem dos cenários com rememoração dos lotes LL (a) e FF (b).

Fonte: Elaborado pela Autora.

O uso de simulação computacional oferece a possibilidade de compor uma grande quantidade de cenários a partir de parâmetros urbanísticos tradicionais ou avançados, que resultam em diferentes respostas quanto às variáveis climáticas que influenciam no desempenho climático urbano. Quantificar os parâmetros urbanísticos para o crescimento sustentável de cada cidade, em resposta ao clima urbano, é o maior desafio por parte dos planejadores e gestores públicos. A presente pesquisa visou compor cenários com base em **parâmetros urbanísticos tradicionais e avançados**, tomando o **lote como unidade mínima de planejamento**.

Como foi apresentado na Introdução, o objetivo dos parâmetros tradicionais é a organização eficiente do espaço urbano, controle de densidade, e gestão do crescimento urbano,

sem, necessariamente, priorizar o conforto climático ou a sustentabilidade urbana. Enquanto os parâmetros avançados apresentam uma abordagem mais holística e integrada, considerando aspectos ambientais e climáticos no planejamento urbano. Nesse sentido, os parâmetros urbanísticos tradicionais se tornam essenciais para a organização básica do tecido urbano, e os avançados se constituem como fundamentais para a adequação das cidades às mudanças climáticas, melhorando a qualidade de vida e tornando os espaços urbanos resilientes. Em função disso, ambos os parâmetros foram incluídos na análise.

No que tange a unidade mínima de planejamento, a escolha do lote se justifica pela junção de alguns fatores. Em primeiro lugar, uma análise do Plano Diretor municipal (Arapiraca, 2006) demonstrou haver fragilidades/deficiências no que tange a sua eficácia na regulamentação do desenvolvimento urbano, especialmente em aspectos jurídicos, sócio-políticos e econômicos. Em segundo lugar, a ausência de parâmetros urbanísticos básicos no Código de Obras e Edificações (Arapiraca, 2001), conforme apresenta o Quadro 01, indicam a inexistência de estudos bioclimáticos que viabilizem o debate dos parâmetros que podem ser somados ao código vigente. Por fim, diante da realidade apresentada, viu-se a oportunidade de gerar diretrizes que possam ser incorporadas ao iminente processo de revisão do Plano Diretor Participativo, auxiliando no aprimoramento das condições de conforto térmico e no desenvolvimento sustentável da cidade. Desta forma, buscou-se que os resultados obtidos ofereçam contribuição teórica, acerca do urbanismo bioclimático no contexto climático, e tenham, em especial, aplicabilidade prática em Arapiraca.

3.2 Parâmetros para Modelagem dos Cenários

A definição dos parâmetros para modelagem dos cenários foi realizada a partir de uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL) abordando o estudo do microclima de cânions urbanos em cidade de clima semiárido, com foco no conforto térmico no nível do pedestre. A realização da RSL foi necessária para a definição dos procedimentos metodológicos da presente pesquisa, como os métodos e técnicas de análise empregados contemporaneamente, em artigos obtidos em plataformas de revistas internacionais e nacionais, principalmente quanto aos parâmetros de modelagem dos cenários urbanos investigados e critérios de avaliação dos resultados. A descrição detalhada sobre o procedimento adotado para a RSL e os seus resultados encontram-se no APÊNCIDE C. Em síntese, os resultados indicaram que:

- Os trabalhos visaram estudar o impacto da forma urbana no conforto térmico ao ar livre, a nível do pedestre (1,5m do solo), a partir de estratégias bioclimáticas para minimizar efeitos climáticos adversos, como a ICU, em cidades de clima semiárido;
- O índice de conforto térmico ao ar livre mais utilizado foi o PET;
- As variáveis climáticas adotadas para análise dos resultados foram: a temperatura do ar, a TRM, a umidade relativa do ar e a velocidade e direção do vento;
- Em sua totalidade, os cenários foram simulados com base no dia mais quente do verão, com maior temperatura e umidade relativa do ar, a partir do ano de referência.
- As estratégias bioclimáticas adotadas puderam ser agrupadas com base na: geometria urbana, albedo dos materiais de superfície e no uso de vegetação.

A partir da revisão de literatura, as estratégias a respeito da **geometria urbana** foram tratadas por meio da relação H/W, FCV e a orientação das vias, por influenciar nas trocas de radiação (um dos componentes do SEB) e no comportamento dos ventos (velocidade/direção), fatores determinantes no conforto térmico ao ar livre em cânions urbanos (Yahia et al., 2017; De; Mukherjee, 2018; Yin et al., 2019; Huang; Chen, 2020). A respeito do **albedo dos materiais de superfície**, as estratégias se concentraram na aplicação de diferentes materiais nas seguintes faces: no solo, fachadas e telhado, pelo potencial de amenizar as ICU, assim como diminuir a temperatura no interior das edificações, o que reduz o consumo de energia em recursos artificiais de climatização. Assim, é importante ponderar o valor do albedo dos materiais para beneficiar o conforto térmico externo e interno às edificações (Farhadi et al, 2019; Huang; Chen, 2020; Darbani et al., 2021).

O **uso de vegetação** foi trabalhado por meio da adoção de parques, o uso de coberturas e/ou fachadas verdes e a inserção de árvores nos passeios ou canteiros centrais. Para a promoção do conforto térmico na escala do pedestre em cânions urbanos, destacou-se a estratégia de inserção de árvores nos passeios ou canteiros centrais. Foi observado que a copa das árvores influenciou no FCV, na altura do pedestre (Ramyar et al., 2019; Huang; Chen, 2020; Kotharkar; Bagade; Singh, 2020; Srivanit; Jareemit, 2020). A adoção de árvores tem o potencial de diminuir os valores de TRM; contribuir na redução da velocidade e/ou direcionamento dos ventos (indicado para as vias onde há a canalização do fluxo de ar com o fim de diminuir as zonas de sombra de vento nas vias perpendiculares); diminuir a temperatura do ar e aumentar a umidade relativa do ar local, por meio da evapotranspiração de suas folhagens; e reduzir a poluição do ar, com base na redução do CO₂, através do processo natural da fotossíntese (Oke et al., 2017).

Diante da condição climática de Arapiraca/AL, do potencial de compor diretrizes urbanísticas sustentáveis que irão nortear o seu crescimento vertical, da lacuna de conhecimento existente sobre o impacto da verticalização no microclima e no conforto térmico da cidade, a abordagem adotada para a elaboração dos cenários considerou, como recorte, a influência da **geometria urbana** e do **uso de vegetação** no microclima de cânions urbanos, na escala do pedestre, utilizando como indicadores: **temperatura do ar, TRM, umidade relativa do ar, e velocidade e direção dos ventos**. Além disso, também foi considerado o índice **PET**. A seguir, descreve-se como esses parâmetros foram considerados para a modelagem dos cenários urbanos hipotéticos.

3.2.1 Geometria Urbana

Na definição dos parâmetros de modelagem dos cenários urbanos hipotéticos a partir da geometria urbana, foi levado em consideração a ausência de parâmetros urbanísticos que poderiam regular o recente processo de verticalização da cidade de Arapiraca/AL. Estudos anteriores já abordaram os efeitos da malha urbana com edificações térreas, assim como a malha urbana com edifícios de diferentes alturas na conformação do microclima, para a mesma fração urbana selecionada na presente pesquisa, no período quente e seco (Brandão, 2017; Brandão, 2020; Brandão, Barbosa, 2023). Como recorte, tomou-se o contexto relacionado com o possível limite da saturação da verticalização e ocupação urbana, ou seja, com uma padronização da forma dos edifícios. Nesse aspecto, há uma tendência que os edifícios apresentem a mesma altura, o que corresponde a uma baixa rugosidade superficial³⁶. Assim, buscou-se analisar os efeitos desse tipo de configuração no microclima urbano.

A relação H/W foi tratada por meio do **gabarito** e do **recuo progressivo**, por determinar a altura dos edifícios (H) e a largura da via (W - distância entre as fachadas dos edifícios de um lado ao outro da rua), respectivamente; e o FCV, resultado da massa edificada, também foi composto pelo uso da vegetação. Por se tratar de um estudo em uma fração urbana real do município de Arapiraca, tornou-se inviável abordar diferentes orientações dos cenários investigados. Ainda a respeito dos fatores que compõem a geometria urbana, foram considerados: a **adoção de pilotis** e a **forma das edificações**. Segundo Shahmohamadi et al.

³⁶ Segundo Oliveira (1985), em clima quente-úmido é indicado uma rugosidade alta ou muito alta, tendo em vista o conforto térmico ao ar livre, a qualidade do ar e para uma maior captação e difusão turbilhonar dos ventos e brisas no interior da forma urbana. Já em clima quente-seco (e clima frio), indica-se uma rugosidade baixa ou muito baixa, para proteção contra os ventos quentes ou frios. No tópico que trata do clima semiárido de Arapiraca (2.2) fora observado que a estratégia de ventilação natural é indicada durante 81,1% do período quente e seco.

(2010), a ventilação natural é a técnica de resfriamento passivo mais eficaz para promover o resfriamento ao longo do dia e noite, especialmente em climas quentes. Os autores ainda citam que, no edifício, as estratégias que potencializam o aproveitamento da ventilação natural é aumentar a permeabilidade do edifício, por sua forma ou o uso de *pilotis* no nível do solo ou no meio do vão.

Acerca da fórmula do recuo progressivo, a ausência de parâmetros urbanísticos no Código de Obras e Edificações de Arapiraca, com exceção apenas para os recuos mínimos iniciais, tornou necessário utilizar como fonte o Código de Urbanismo e Edificações de Maceió³⁷ (Maceió, 2007), capital do estado. Nesse contexto, os dados foram extraídos da zona compatível com a fração urbana selecionada, a Zona de Uso Residencial 5 (UR-5): “quando na gleba ou lote for implantada 1 (uma) edificação multifamiliar com 3 (três) ou mais pavimentos (Maceió, 2007, p. 86)”, como demonstra o Quadro 12. Os valores obtidos a partir da fórmula do Recuo Progressivo foram ajustados para a modelagem dos cenários no *software* ENVI-met, com base na medida de grade adotada: 2,5 m x 2,5 m x 3,0 m (x,y,z). Com base no tamanho vertical do *grid*, determinou-se, assim, a altura de cada pavimento e do pavimento de *pilotis*.

Quadro 12. Parâmetros urbanísticos adotados nos cenários.

Parâmetro	Fórmula/ Medida
Recuo Progressivo	$R_i + (n-2)/2$
Gabarito	45,0 m

Legenda: R_i : recuo inicial/ n : nº de pavimentos

Fonte: Elaborado pela Autora.

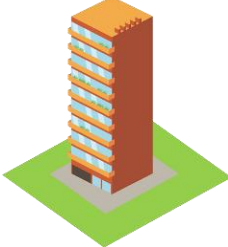
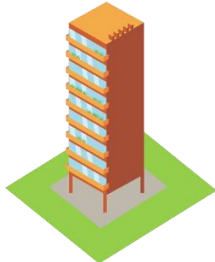
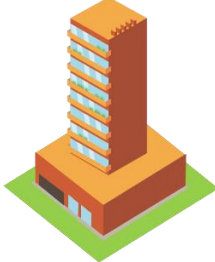
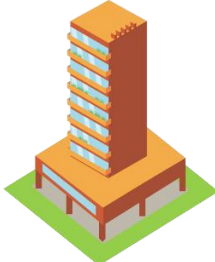
O Gabarito máximo adotado foi de 45 m, dado que a altura máxima adotada foi de 15 pavimentos (valor próximo do observado quanto ao número de pavimentos do edifício mais alto da cidade), considerando a altura de 3 m para cada pavimento. Sobre a forma das edificações, foram considerados os seguintes formatos de edifícios: Torre (T), Torre com *Pilotis* (TP), Base com Torre (B), Base com Torre e *Pilotis* (BP). Com a adoção de *pilotis* no primeiro pavimento dos edifícios no formato B, tomou-se 2 (dois) pavimentos como base nessa tipologia. O edifício no formato T é uma edificação vertical, isolada, com volume compacto e altura elevada, geralmente com menos impacto na área do terreno. Como benefícios, tem-se: favorecer

³⁷ É importante destacar que uma das principais críticas da literatura especializada é a prática de compor o Plano Diretor municipal a partir da cópia de parâmetros urbanísticos de outras cidades, sem contextualizar o tipo de clima, o relevo local, a cultura da região e tantos outros aspectos ambientais e socioeconômicos que abrangem o planejamento urbano (Barbirato; Torres; Barbosa, 2015). Utilizar a fórmula do recuo progressivo de Maceió foi uma alternativa adotada com o fim de analisar esse parâmetro urbanístico tradicional. Obter a fórmula ideal para o clima de Arapiraca exigiria um trabalho exclusivo com esse objetivo, dada a responsabilidade e a necessidade de testar a fórmula nas diversas zonas do perímetro urbano.

a ventilação cruzada; menor ocupação do solo e deixando mais áreas livres para uso de vegetação (o que reduziria a retenção de calor e permitiria maior resfriamento evaporativo).

O edifício no formato B é descrito como uma estrutura vertical sobre uma base horizontal mais larga, geralmente destinada a comércio, serviços ou estacionamento. Seus benefícios são: integração de usos mistos, pois a base pode abrigar comércio e serviços, promovendo a interação social e reduzindo a necessidade de deslocamentos urbanos (Jacobs, 2011); sombreamento, por meio da base da torre, o que contribui para o conforto térmico no nível do pedestre. O *pilotis* é elevar sobre colunas uma estrutura, deixando o pavimento térreo livre para circulação ou atividades. Os benefícios da adoção de *pilotis* são: ventilação e resfriamento natural, ao permitir a circulação livre do ar na base do edifício, auxiliando no resfriamento da edificação e do entorno; redução de impacto ambiental, pois a área livre pode ser permeável ou usada para drenagem, mitigando problemas de enchentes em áreas urbanas; e sombreamento nas áreas sob os *pilotis*, contribuindo para o conforto térmico e incentivando a interação social. O Quadro 13 reúne os principais aspectos hipotéticos de cada tipologia projetual dos edifícios:

Quadro 13. Tipologias simuladas dos edifícios e respectivas hipóteses de efeitos no contexto bioclimático e urbano.

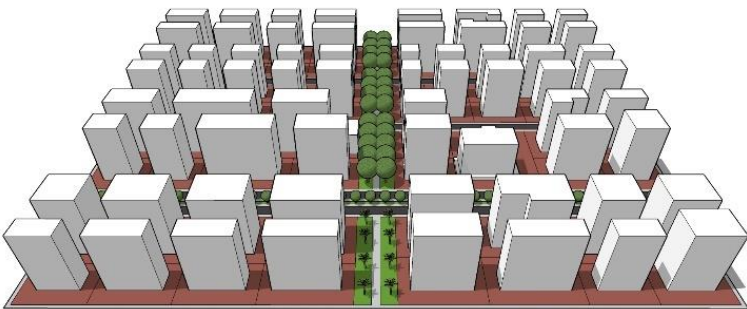
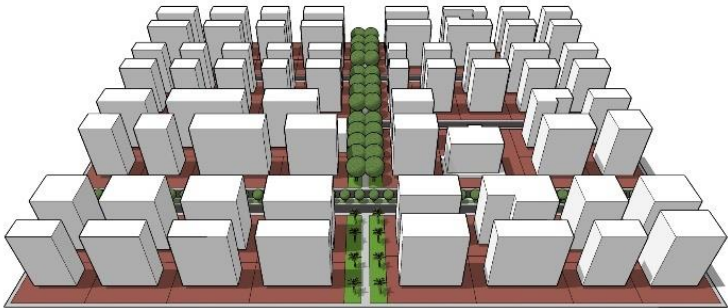
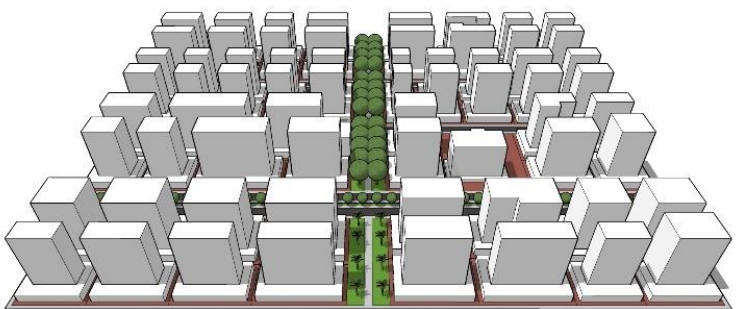
Formato	Ventilação	Conforto térmico	Uso do solo	Impacto urbano
 Torre	Alta, velocidades mais elevadas devido a maior permeabilidade entre a massa edificada	Pouco favorável, pela menor projeção da sombra dos edifícios na escala do pedestre, mas permite uma maior permeabilidade dos ventos	Baixo, liberando espaço para uso de elementos verdes	Minimiza densidade horizontal
 Torre e pilotis	Elevada, velocidades mais elevadas devido a maior permeabilidade entre a massa edificada	Pouco favorável, pela menor projeção da sombra dos edifícios na escala do pedestre, mas permite uma maior permeabilidade dos ventos	Alto, com permeabilidade e possibilidade de uso para elementos verdes	Minimiza densidade horizontal
 Base com Torre	Moderada, velocidades mais baixas no nível do pedestre, devido à obstrução gerada pela base	Favorável, pela projeção da sombra da base (na escala do pedestre) dos edifícios, no entanto, diminui-se a permeabilidade dos ventos no interior do cânion	Alto, com uso misto otimizado	Favorece o uso misto do solo e interação social
 Base com Torre e Pilotis	Alta, velocidades mais elevadas devido à permeabilidade da base	Muito favorável, pelo potencial de sombreamento e permeabilidade dos ventos na escala do pedestre	Alto, com permeabilidade e possibilidade de uso para elementos verdes	Espaços públicos no térreo

Fonte: Elaborado pela Autora.

Conforme apresentado no subtítulo 3.1 (Definição da Área de Estudo), a forma como os lotes são lembrados, pode influenciar na exposição à radiação solar direta e na permeabilidade da ventilação natural (rugosidade e porosidade); e por conseguinte, no conforto térmico ao ar livre. Desta forma, foram elaboradas duas bases de abordagem dos cenários. As bases divergem no: remembramento dos lotes Lado-a-Lado (LL) e Frente-Fundo (FF). Os Quadros 14 e 15 apresentam os valores adotados no recuo progressivo (calculado pela fórmula

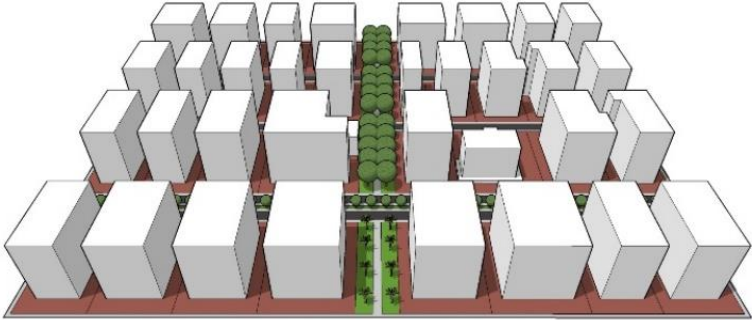
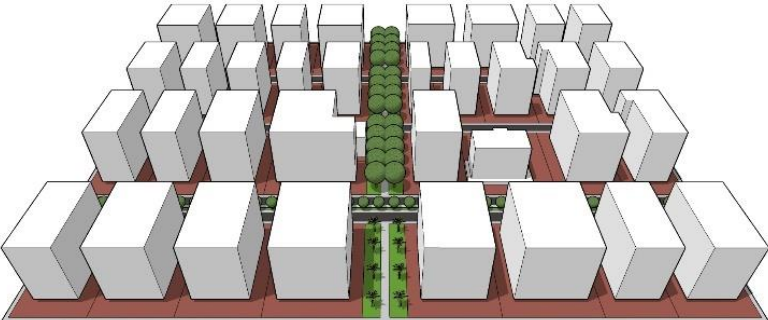
e o ajustado para a dimensão do *grid*) e as maquetes, para os cenários com rememoração tipo LL e FF, respectivamente:

Quadro 14. Cenários urbanos hipotéticos a partir da geometria urbana – Base LL.

Cenário	Recuo: Calculado pela fórmula	Recuo: Ajustado	Maquete 3D
LL-T	Frontal: 9,5 m/	Frontal: 10,0 m	
	Posterior/ Lateral: 8,0 m	Posterior/ Lateral: 7,5 m	
LL-TP	Frontal: 9,5 m/	Frontal: 10,0 m	
	Posterior/ Lateral: 8,0 m	Posterior/ Lateral: 7,5 m	
LL-B	Frontal Torre: 9,5m/	Frontal Torre: 10,0m	
	Base: 3,0m	Base: 2,5m	
	Posterior/ Lateral Torre: 8,0 m	Posterior/ Lateral Torre: 7,5 m	
	Base: 1,5m	Base: 2,5m	
LL-BP	Frontal Torre: 9,5 m	Frontal Torre: 10,0m	
	Base: 3,0m	Base: 2,5m	
	Posterior/ Lateral Torre: 8,0 m	Posterior/ Lateral Torre: 7,5 m	
	Base: 1,5m	Base: 2,5m	

Fonte: Elaborado pela Autora.

Quadro 15. Cenários urbanos hipotéticos a partir da geometria urbana – Base FF.

Cenário	Recuo: Calculado pela fórmula	Recuo: Ajustado	Maquete 3D
FF-T	Frontal: 9,5 m/	Frontal: 10,0 m	
	Posterior/ Lateral: 8,0 m	Posterior/ Lateral: 7,5 m	
FF-TP	Frontal: 9,5 m/	Frontal: 10,0 m	
	Posterior/ Lateral: 8,0 m	Posterior/ Lateral: 7,5 m	
FF-B	Frontal Torre: 9,5m/	Frontal Torre: 10,0m	
	Base: 3,0m	Base: 2,5m	
	Posterior/ Lateral Torre: 8,0 m	Posterior/ Lateral Torre: 7,5 m	
FF-BP	Base: 1,5m	Base: 2,5m	
	Frontal Torre: 9,5 m	Frontal Torre: 10,0m	
	Base: 3,0m	Base: 2,5m	
FF-BP	Posterior/ Lateral Torre: 8,0 m	Posterior/ Lateral Torre: 7,5 m	
	Base: 1,5m	Base: 2,5m	
	Frontal Torre: 9,5 m	Frontal Torre: 10,0m	

Fonte: Elaborado pela Autora.

3.2.2 Vegetação

A modelagem dos cenários com base no uso da vegetação contou com a **inserção de árvores nas calçadas**. As Figuras 49 e 50 representam a disposição atual das calçadas na via principal e na via secundária da fração urbana selecionada para modelagem dos cenários:

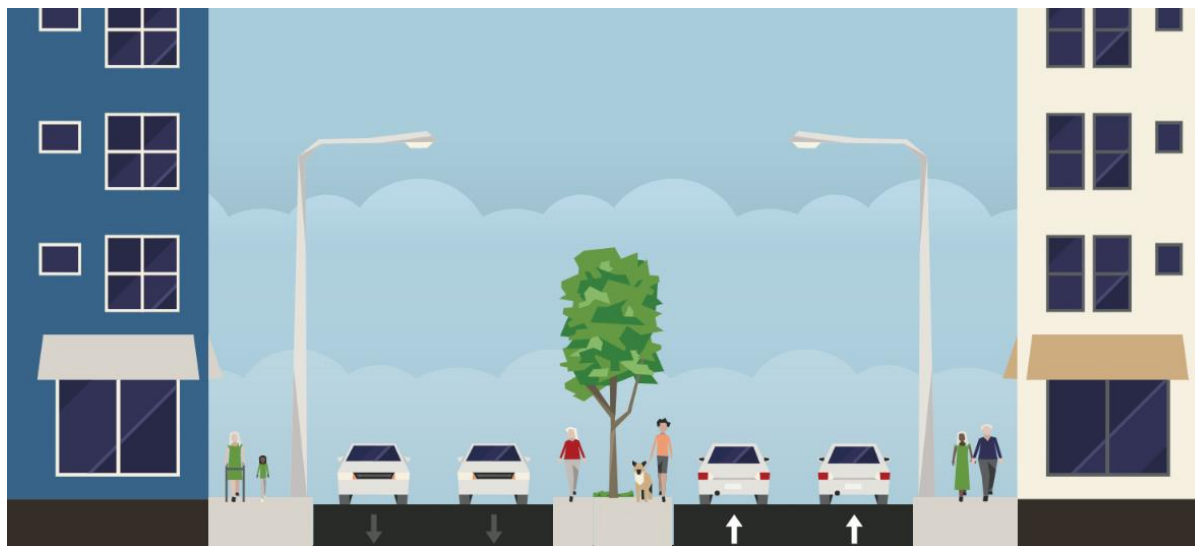


Figura 49 – Ilustração das faixas de uso da calçada da via principal.

Fonte: Elaborado pela Autora, na plataforma *Streetmix*³⁸.



Figura 50 – Ilustração das faixas de uso da calçada da via secundária.

Fonte: Elaborado pela Autora, na plataforma *Streetmix*.

³⁸ Disponível no site: < <https://streetmix.net>>. Acesso em: 29/08/2022.

Para a inserção das árvores nas calçadas foi necessário atender às indicações da norma a NBR 9050:2020, que trata da acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. A largura da calçada é dividida em três faixas de uso: a Faixa de Serviço, que serve para alocar canteiros, árvores e postes de iluminação/ sinalização, com uma largura mínima de 0,70m; a Faixa Livre ou Passeio, que é para uso exclusivo à circulação de pedestres, devendo ter inclinação transversal até 3 % e largura mínima de 1,20m; e a Faixa de Acesso com largura mínima de 0,30m, que corresponde ao espaço de passagem da área pública para o lote, estando presente somente em calçadas com mais de 2,0m (Ver Figura 51).



Figura 51 – Ilustração das faixas de uso da calçada, conforme a NBR 9050:2020.

Fonte: Elaborado pela Autora.

Nesse sentido, ao considerar que a calçada dos cenários contaram com a medida de uma célula de grade, que corresponde a 2,5 m x 2,5 m x 3,0 m (x,y,z), a divisão hipotética da mesma seria composta da seguinte forma: 1,00 m para a faixa de serviço (visando a inserção das árvores), 1,20m para o passeio e 0,30m para faixa de acesso. O espaçamento entre as árvores deve ser quantificado. Srivani e Jaremit (2020), analisaram a influência do plantio de árvores, com a distância de 4/6/14 m entre si, nos passeios de cânions urbanos para o conforto térmico dos pedestres. Como conclusão, os autores indicaram que a distância entre as árvores deve ser medida de acordo com o diâmetro de suas copas, de modo a não haver áreas sem sombreamento no caminho do pedestre. A presente pesquisa adotou o distanciamento de 10 m entre as árvores.

O próximo passo correspondeu a escolha da espécie arbórea para os modelos, determinada pelos seguintes fatores:

- Ser uma espécie presente no banco de dados do *software* ENVI-met,
- Ser uma espécie nativa ou adaptada à região (para adequação ao clima local),
- Ter a dimensão da copa respeitando o distanciamento pré-determinado, e
- Não ser uma espécie frutífera.

Nesse processo, tornou-se necessário submeter a lista das espécies arbóreas presentes no ENVI-met ao banco de dados do Herbário Virtual Re flora (2023), plataforma governamental que apresenta as espécies da flora do Brasil, ao mesmo tempo que as distribui por região. Isso tornou possível identificar as espécies arbóreas que estão presentes na região Nordeste, onde o estado de Alagoas está situado. Com base nos fatores elencados, chegou-se às espécies:

- *Sophora Japonica*, espécie decídua da família *Fabaceae*, comumente conhecido pelos seguintes nomes: árvore de pagodes ou acácia japonesa. Usada na calçada;
- *Fagus Sylvatica*, espécie decídua da família *Fagaceae*; também conhecida como faia de folha verde. Usada no canteiro central e o corredor verde ao norte;
- *Palm Washingtonia*, espécie decídua da família *Aracaceae*, e recebe os nomes populares de palmeira-washingtonia, palmeira-de-leque-do-méxico, palmeira-de-saia. Usada no corredor verde ao sul.

As características do tipo arbóreo selecionado são apresentadas no Quadro 16, 17 e 18.

Quadro 16. Características da espécie *Sophora Japonica*, da família *Oleaceae*.

Nome	Imagem	Descrição
<i>Sophora Japonica</i>		Espécie arbórea que se desenvolve bem no frio, calor e seca. suporta a poluição das cidades e também serve como uma árvore de boa sombra. Tem porte médio, podendo atingir até 15 metros de altura.

Fonte: Disponível em <<https://www.flickr.com/photos/nicobeeswasps/52209753489>>.

Quadro 17. Características da espécie *Fagus Sylvatica*, da família *Fagaceae*.

Nome	Imagem	Descrição
Fagus Sylvatica		Tolera sombra parcial e prospera em solo bem drenado, fresco e fértil. Pode atingir 30 metros de altura. É um crescimento lento, mas de longa duração.

Fonte: Disponível em <<https://www.plantamus.pt>>.

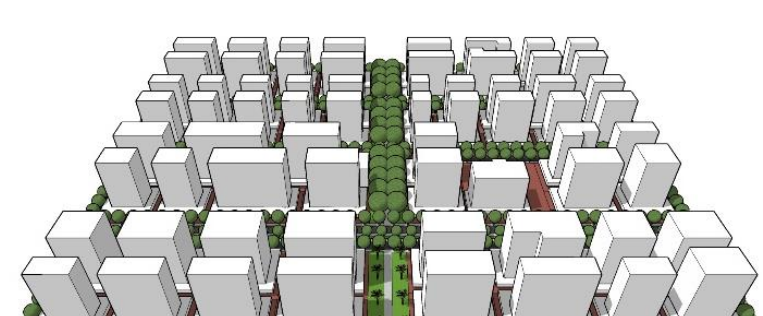
Quadro 18. Características da espécie *Palm Washingtonia*, da família *Aracaceae*.

Nome	Imagem	Descrição
Palm Washingtonia		Espécie que se adapta bem em climas quentes. Em paisagismo é usada em jardins, praças e avenidas, isolada ou em grupos. Pode crescer em média de 20 até 25 metros de altura.

Fonte: Disponível em <<https://www.arvoresadultas.com.br/sobre-a-palmeira-washingtonia/>>.

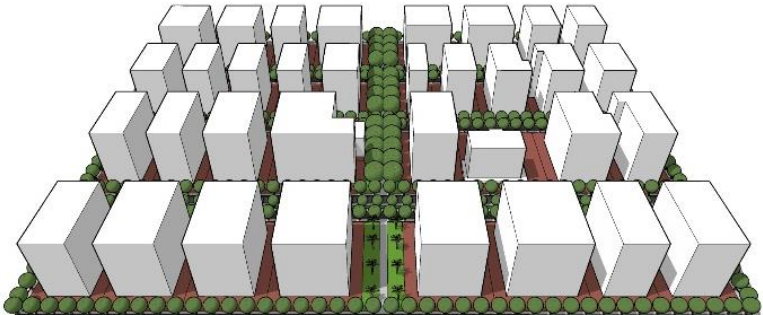
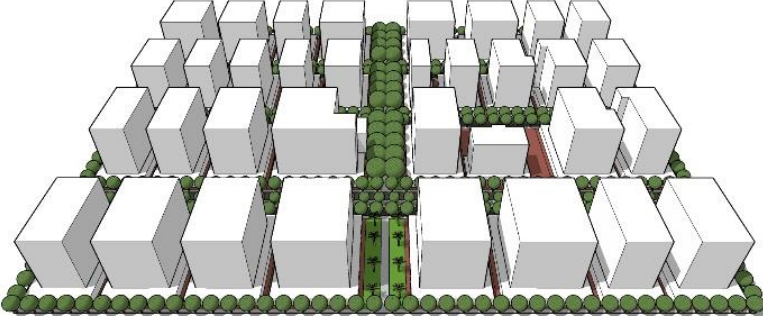
Para analisar os efeitos do uso da vegetação no conforto térmico, tomou-se a mesma massa edificada para análise da geometria urbana aliada à inserção de árvores de copas densas nas calçadas. Nesse contexto, os cenários se dividem em (ver Quadros 19 e 20):

Quadro 19. Cenários urbanos hipotéticos a partir do uso da vegetação – Base LL.

Cenário	Recuo: Calculado pela fórmula	Recuo: Ajustado para a dimensão do <i>grid</i>	Maquete 3D
LL-TV	Frontal: 9,5 m/	Frontal: 10,0 m	
	Posterior/ Lateral: 8,0 m	Posterior/ Lateral: 7,5 m	
LL-TPV	Frontal: 9,5 m/	Frontal: 10,0 m	
	Posterior/ Lateral: 8,0 m	Posterior/ Lateral: 7,5 m	
LL-BV	Frontal Torre: 9,5m/	Frontal Torre: 10,0m	
	Base: 3,0m	Base: 2,5m	
	Posterior/ Lateral Torre: 8,0 m	Posterior/ Lateral Torre: 7,5 m	
	Base: 1,5m	Base: 2,5m	
LL-BPV	Frontal Torre: 9,5 m	Frontal Torre: 10,0m	
	Base: 3,0m	Base: 2,5m	
	Posterior/ Lateral Torre: 8,0 m	Posterior/ Lateral Torre: 7,5 m	
	Base: 1,5m	Base: 2,5m	

Fonte: Elaborado pela Autora.

Quadro 20. Cenários urbanos hipotéticos a partir do uso da vegetação – Base FF.

Cenário	Recuo: Calculado pela fórmula	Recuo: Ajustado para a dimensão do <i>grid</i>	Maquete 3D
FF-TV	Frontal: 9,5 m/	Frontal: 10,0 m	
	Posterior/ Lateral: 8,0 m	Posterior/ Lateral: 7,5 m	
FF-TPV	Frontal: 9,5 m/	Frontal: 10,0 m	
	Posterior/ Lateral: 8,0 m	Posterior/ Lateral: 7,5 m	
FF-BV	Frontal Torre: 9,5m/	Frontal Torre: 10,0m	
	Base: 3,0m	Base: 2,5m	
	Posterior/ Lateral Torre: 8,0 m	Posterior/ Lateral Torre: 7,5 m	
	Base: 1,5m	Base: 2,5m	
FF-BPV	Frontal Torre: 9,5 m	Frontal Torre: 10,0m	
	Base: 3,0m	Base: 2,5m	
	Posterior/ Lateral Torre: 8,0 m	Posterior/ Lateral Torre: 7,5 m	
	Base: 1,5m	Base: 2,5m	

Fonte: Elaborado pela Autora.

3.3 Simulação Computacional dos Cenários

As simulações dos cenários urbanos hipotéticos foram realizadas, inicialmente, por meio do *software* ENVI-met 5.5.1, versão mais recente disponível. Uma chave de licença foi cedida gratuitamente pela equipe ENVI-met à presente pesquisa. Contudo, não foi possível finalizar as simulações em função de duas limitações técnicas: 1. A chave de licença requer acesso à internet de forma ininterrupta e, 2. A indisponibilidade de um *workstation*³⁹ ou computador com o sistema adequado para suportar esta versão do *software*.

Por residir no interior do estado de Alagoas, situado na região Nordeste do país, é comum instabilidades no provedor de internet, que geraram a perda de diversos cenários por ocasionar erros nos cálculos matemáticos dos cenários. Outrossim, a falta de computadores com sistemas de processador e memória compatíveis com a nova versão do programa, tornou o processo de simulação extremamente lento, o que gerou a perda de diversos cenários, por eventuais quedas de energias. Por isso, prosseguir com a versão mais recente, tornou-se inviável ao cronograma para a defesa da presente pesquisa.

Assim, optou-se por realizar as simulações na versão ENVI-met 4.0, pela prescindibilidade de internet no processo de simulação dos cenários, e pelo programa ter uma configuração compatível com os equipamentos disponíveis no Laboratório do Grupo de Estudos da Atmosfera Climática Urbana (GATU), da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU), na UFAL, e computador portátil de uso pessoal. É importante destacar que, mediante a metodologia adotada na presente pesquisa, ambas as versões apresentam os mesmos recursos necessários para alcançar o objetivo proposto. Diversos pesquisadores também utilizaram a versão mencionada para a simulação dos cenários urbanos hipotéticos (Sharmin; Steemers; Matzarakis, 2017; Chatterjee et al., 2019; Manteghi; Shukri; Lamit, 2019; Muniz-Gaal et al., 2019; Kotharkar; Bagade; Singh, 2020; Darbani et al., 2021; Sadeghi; Bahadori, 2021).

As etapas para dar início à simulação consistem em: modelagem dos cenários, por meio do módulo *SPACES* (Figura 52a); configuração do arquivo climático, por meio do módulo *ConfigWizard* (Figura 52b); e a simulação dos cenários, pelo módulo ENVI-met (Figura 52c).

³⁹ *Workstation*, ou estação de trabalho, é o computador de alta performance que, ao contrário de notebooks ou computadores comuns, possuem uma capacidade de processamento superior. Disponível em: <<https://www.techtudo.com.br/noticias/2015/01/o-que-sao-workstations-saiba-como-funcionam-esses-super-computadores.ghml>>.

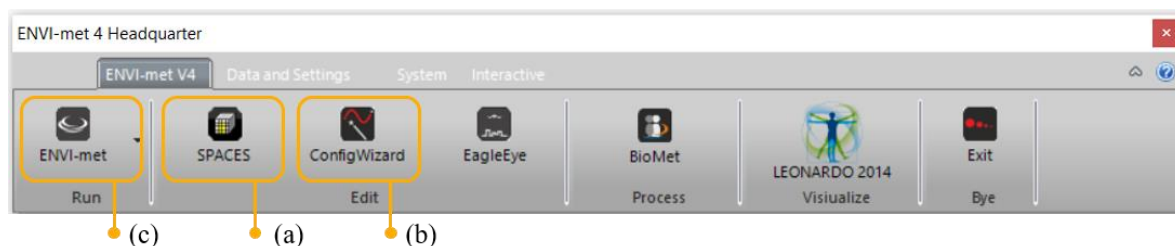


Figura 52 – Tela do Software ENVI-met, versão 4.0.

Fonte: Elaborado pela Autora.

3.3.1 Modelagem dos Cenários Urbanos Hipotéticos

A modelagem dos cenários urbanos hipotéticos é feita pela ferramenta *SPACES*, no software ENVI-met 4.0, que gera um arquivo com formato .INX. Inicialmente, é imprescindível a inserção de dados básicos no modelo, que pode ser feita ao clicar o botão *Edit Settings/ Create New Area* (Figura 53a). Nesse momento, alguns dados específicos do objeto de estudo devem ser inseridos, como dados de Localização do Modelo, Geometria do Modelo, Georreferencia e Nível do Modelo Digital de Elevação (*Digital Elevation Model - DEM*), Configuração Padrão, *Nesting Grids* e a Descrição do Modelo (ver Figura 53b). O Quadro 21 apresenta os dados inseridos no modelo para a cidade de Arapiraca/ AL.

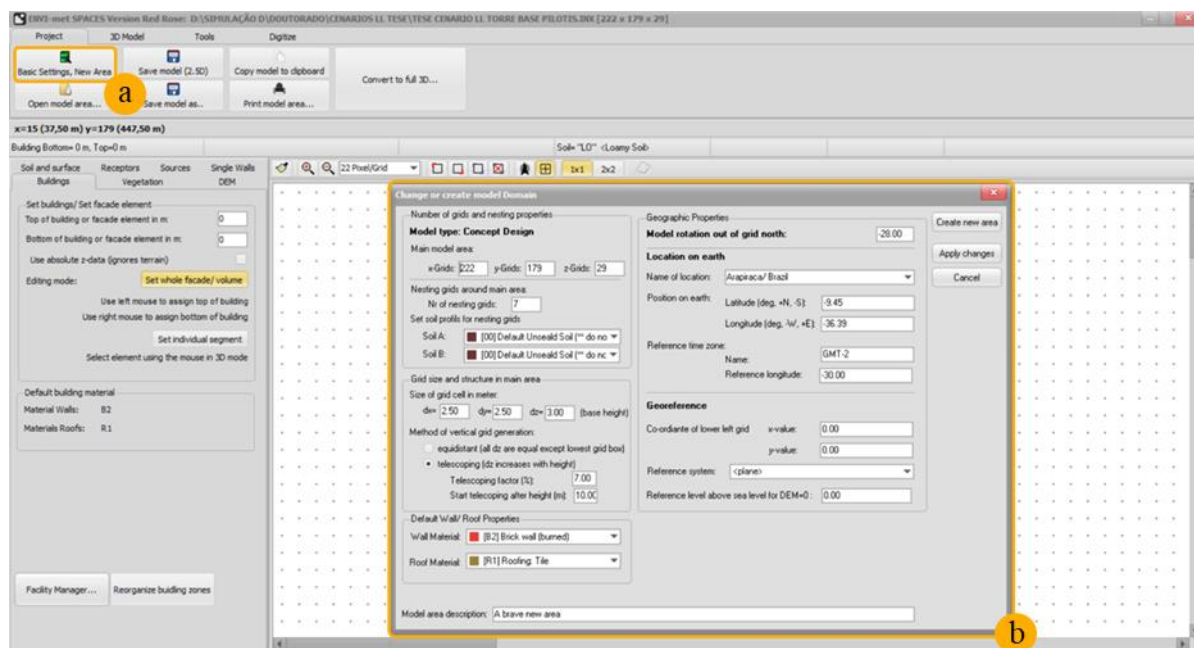


Figura 53 – Tela do SPACES no Software ENVI-met, versão 4.0.

Fonte: Elaborado pela Autora.

Quadro 21. Dados inseridos para a cidade de Arapiraca/ AL.

Informações	Item	Dado
Localização do Modelo	Nome da Localização	Arapiraca-AL
	Latitude/Longitude	-9.45/ -36.39
	Fuso horário de referência	GMT -2
	Longitude de referência	-30.00
Geometria do Modelo	Dimensões do modelo (x,y,z)	x-Grid = 170
		y-Grid = 165
		z-Grid = 29
	Tamanho do Grid (x,y,z)	dx = 2,5
		dy = 2,5
		dz = 3
	Método de geração de grade vertical	<i>Telescoping</i> Fator 7% Começar a partir de 10m
	Rotação do modelo fora do norte da grade	-28°
Georreferencia e Nível do DEM	Coordenador da grade inferior esquerda	x-valor = 0.00
		y-valor = 0.00
	Nível de Referência DEM	0.00
Configuração Padrão	Material das paredes	B2 - <i>Brick Wall (burned)</i>
	Material das cobertas	R1 – Roofing: Tile
<i>Nesting Grids</i> ⁴⁰	Nº de Nesting Grids	4
	Definir perfis de solo para	Solo A: 00 (Loamy soil)
		Solo B: 00 (Loamy soil)
Descrição do Modelo	Descrição do Modelo	*
	Demais Informações	*

* A depender do tipo de modelo em questão.

Fonte: Elaborado pela Autora.

Com relação ao método de geração de grade vertical, o ENVI-met permite a escolha entre duas opções: células de grades equidistantes, em que todas as células tem extensão vertical idêntica, com exceção apenas das cinco primeiras; e a célula de grade telescópica, em que a extensão vertical das células podem se expandir, a depender do valor em percentagem definido, o que possibilita a adoção de edificações verticalizadas, como é o caso da presente pesquisa. De acordo com as especificações do programa, é indicado que a altura do modelo seja duas vezes a altura da edificação mais alta, assim, tornou-se necessário adotar o fator de 7% no método *telescoping*, iniciando-se na altura de 10,0 m, valores que foram verificados no *Model Inspector*, um recurso do programa que apresenta uma análise geral do modelo.

⁴⁰ O *Nesting Grids* é uma banda de células da grade em torno do núcleo do modelo 3D. O ENVI-met tem uma questão com os valores reais para pontos de grade ao longo das bordas. Dessa forma, o uso do *Nesting Grids* permite ajudar a melhorar os resultados do modelo, ou torná-lo estável (ENVI-met, 2024).

Outro ponto importante é a definição dos materiais que compõem os elementos urbanos, pois conforme apresentado no Capítulo 1 e na RSL presente no Apêndice C, irão determinar as propriedades radiativas, térmicas, de umidade e aerodinâmica das superfícies. Foram realizadas visitas *in loco* que permitiram observar os tipos de materiais comumente utilizados na construção civil local, determinada pelas matérias-primas disponíveis e cultura na região em questão. Nesse sentido, nas superfícies do solo foram adotados: *Asphalt Road* (Rua de Asfalto – código: ST) para as vias, *Paviment (Concrete), used/dirty* (Pavimento em concreto usado/sujo – código: PP) para as calçadas, e *Loamy Soil* (Solo Argiloso – código: LO) para o interior dos lotes (ver Quadro 22).

Quadro 22. Propriedades dos materiais utilizados nas superfícies do solo nos cenários.

Propriedades	Materiais		
	Rua de Asfalto (ST)	Pavimento (concreto) usado/sujo (PP)	Solo argiloso (LO)
Albedo (%)	0.20	0.40	0.00
Emissividade (%)	0.90	0.90	0.98
Rugosidade	0,01	0,01	0,015

Fonte: Banco de dados do *software* ENVI-Met 4.0.

A respeito do material das paredes e telhado, o acabamento é um ponto importante. A norma NBR 15220-3 (2005) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) indica para a Zona Climática 8, a qual a cidade de Arapiraca está inserida, os seguintes tipos de vedações externas: Cobertura - Leve refletora, Parede - Leve refletora. A norma em questão visa, especificamente, o conforto térmico no interior da edificação. Diversas pesquisas apontam que em cânions urbanos, a adoção de materiais de alto albedo nas fachadas pode reduzir a temperatura do ar no interior das edificações, contudo, a radiação solar refletida de volta para o cânion gera desconforto térmico no ambiente externo, sem contar com o desconforto visual causado por ofuscamento, percebido pelos pedestres (Oke et al., 2017; Farhadi; Faizi; Sanaieian, 2019; Huang; Chen, 2020; Kotharkar; Bagade; Singh, 2020; Darbani et al., 2021).

Gusson (2020) analisou diferentes cenários hipotéticos, a partir de uma fração urbana em São Paulo/SP, onde edifícios com fachadas de tijolo cerâmico receberam tons com cores opostas: tinta branco neve e preto. A Autora concluiu que materiais que apresentam baixa capacidade de refletir a energia incidente proporcionaram condições de conforto térmico ao ar livre mais favoráveis ao pedestre. Nesse contexto, a presente pesquisa se baseou em uma tonalidade intermediária: a terracota, isso porque a cor branca já se mostrou inadequada ao conforto térmico no nível do pedestre, enquanto a cor preta não é interessante para revestir

edificações. Assim, foi definido o material *Brick Wall (burned)* (Parede de tijolo queimado – código B2). Nas coberturas, o material utilizado foi o *Tile* (Telha – código R1).

Quadro 23. Propriedades dos materiais utilizados nas superfícies das paredes e cobertas nos cenários.

Propriedades	Materiais	
	Parede de tijolo queimado (B2)	Telha (R1)
Espessura padrão (m)	0.30000	0.05000
Absorção	0.60000	0.50000
Transmissão	0.00000	0.00000
Reflexão	0.40000	0.50000
Emissividade (%)	0.90000	0.90000
Calor específico	650.00000	800.00000
Condutividade térmica	0.44000	0.84000
Densidade	1500.00000	1900.00000

Fonte: Banco de dados do *software* ENVI-Met 4.0.

A respeito da vegetação, como descrito no subtítulo 3.2.2, foram adotadas as seguintes espécies: *Sophora Japonica* (S2), *Fagus Sylvatica* (B2), *Palm Washingtonia* (PW), apresentadas no Quadro 24.

Quadro 24. Propriedades das espécies arbóreas inseridas nos cenários.

Propriedades	Materiais		
	S2	B2	PW
Altura (m)	10,0	20,0	20,0
Diâmetro da copa (m)	15,0	13,0	3,0
Densidade de Área Foliar (LAD)	1	2	2
Albedo da folhagem	0.60	0.18	0.60
Tipo de folha	Decídua	Decídua	Decídua
Profundidade das raízes (m)	4,0	1,12	2,0
Diâmetro das raízes (m)	10,0	8,0	10,0

Fonte: Banco de dados do *software* ENVI-Met 4.0.

A dimensão de cada grid ou célula de grade foi de 2,5m x 2,5m x 3m (x, y, z), para adequado ajuste das dimensões das vias, calçadas e lotes observadas *in loco*, e para se obter uma melhor precisão dos dados simulados. O valor de z de 3m foi adotado pois é equivalente à altura de um pavimento. Segundo as diretrizes para uso do programa, é indicado que a medida da altura do edifício mais alto também seja a distância do mesmo à borda do modelo. Nesse contexto, com base nos parâmetros de modelagem dos cenários e depois de acrescentados os grids como borda dos modelos (28 *grids* na borda do eixo x e 26 *grids* na borda do eixo y), o modelo base ficou com a seguinte dimensão: 222 x 179 x 29. A respeito do *Nesting Grids*,

utilizou-se o número de 7 células, em acordo com o que é indicado na plataforma virtual de documentação técnica do *software* ENVI-met (ENVI-met, 2024). Dentre as extensões de modelo disponíveis no programa ENVI-met 4.0, foi adotado a de 250 x 250 x 30.

Na modelagem dos cenários, optou-se por considerar o terreno plano, dada a topografia da fração urbana selecionada em Arapiraca e pelo intuito de reduzir o tempo de simulação dos modelos. Também foram inseridos receptores no modelo, que são pontos selecionados nos *grids* que são indicados para geração de arquivo climático específico de uma coordenada (x, y, z). Desta forma, será possível a extração de dados climáticos em pontos específicos, na altura de corte desejada, a 1,5 m que corresponde à altura do pedestre. Esses serão os dados tratados para análise. A escolha das coordenadas dos pontos se justifica pelas características das condições de contorno lateral do modelo, segundo a plataforma de documentação técnica do ENVI-met (ENVI-met, 2024); e pelo recorte de análise da presente pesquisa.

Como os valores aplicados à borda do modelo são obtidos do perfil fornecido, os pontos de grade no limite do modelo, ou próximos, não podem reagir às influências da mesma forma que os pontos de grade na parte interna do modelo, o núcleo. Nesse sentido, não seria interessante que os pontos de extração dos dados das variáveis climáticas estivessem localizados na quadra à esquerda do cenário urbano hipotético. O centro do cenário também não foi selecionado, por ter uma forte interferência da área verde Dom Constantino Lüers (perpendicular à via principal modelada). Como o recorte da presente pesquisa visou a análise de cânions urbanos, o perímetro que configura o cânion urbano da quadra à esquerda se tornou mais adequado. Assim, foram inseridos três pontos de receptores: ao centro da via principal, ao centro da via secundária e na calçada da via principal (para avaliar as condições microclimáticas no local específico da circulação dos pedestres).

O Quadro 25 e a Figura 54 apresentam os receptores e suas respectivas coordenadas.

Quadro 25. Coordenadas dos receptores nos cenários urbanos hipotéticos.

Receptor	Coordenada	
	Eixo X	Eixo Y
01	79	61
02	79	126
03	79	66

Fonte: Elaborado pela Autora.

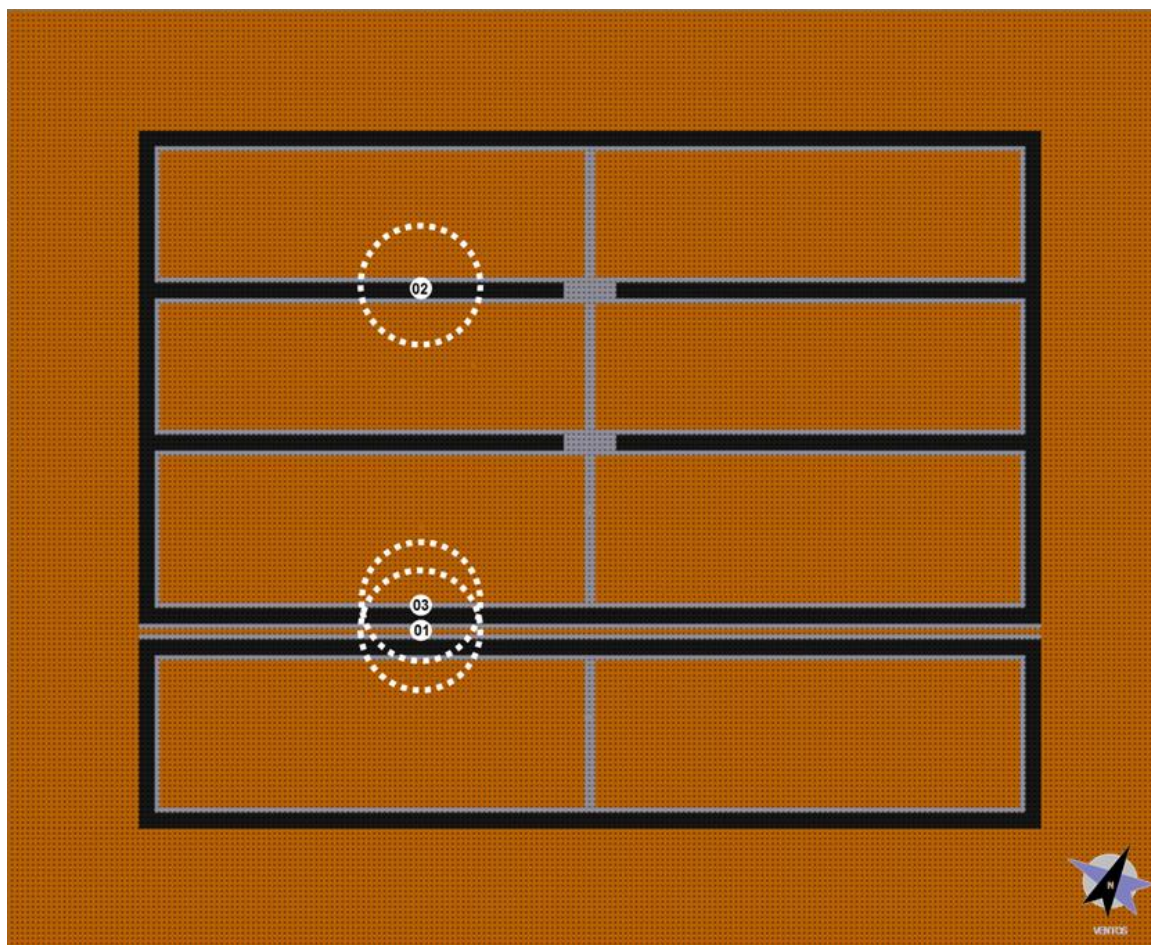
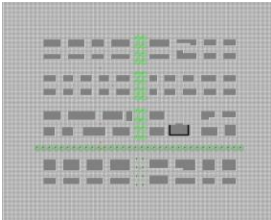
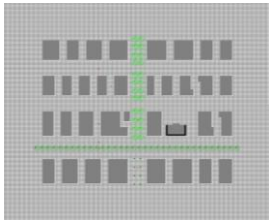
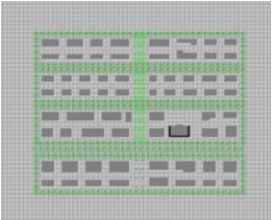
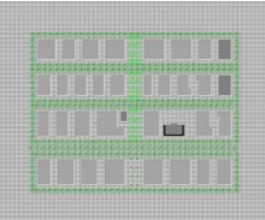
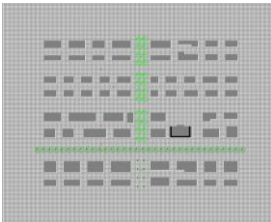
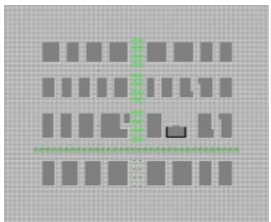
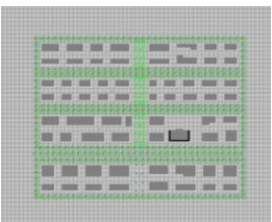
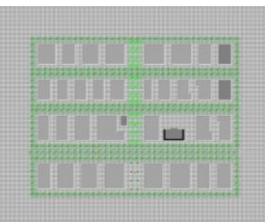
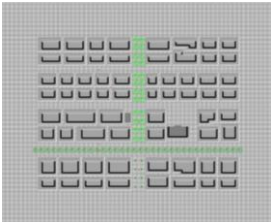
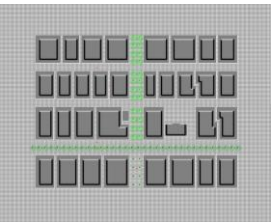
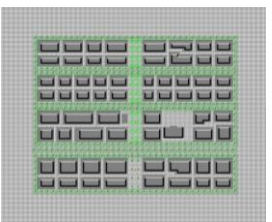
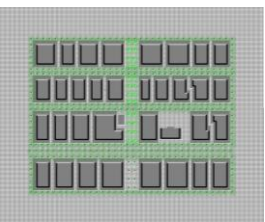
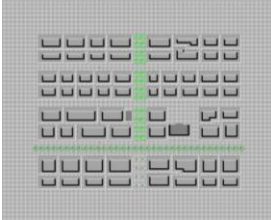
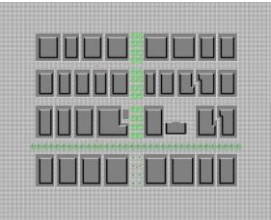
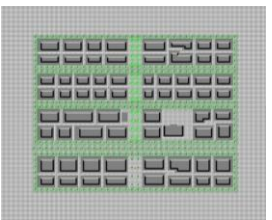
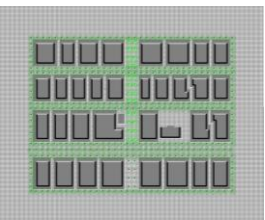


Figura 54 – Localização dos receptores nos cenários.

Fonte: Elaborado pela Autora.

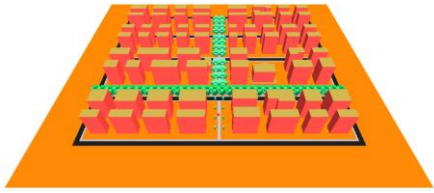
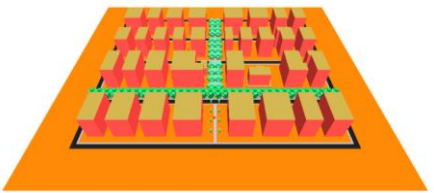
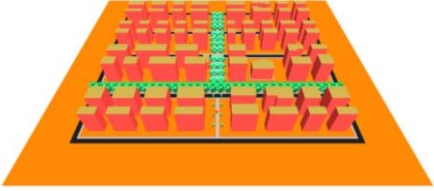
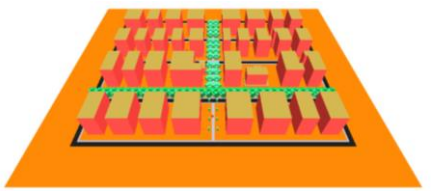
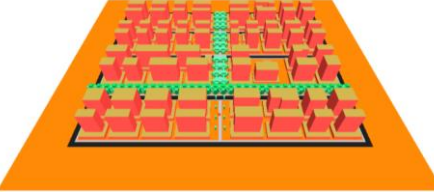
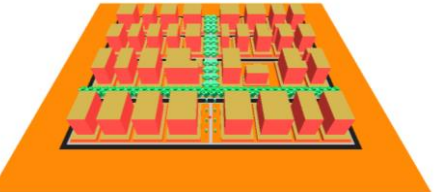
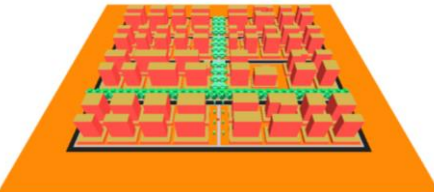
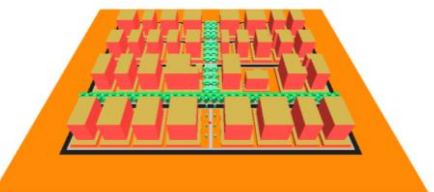
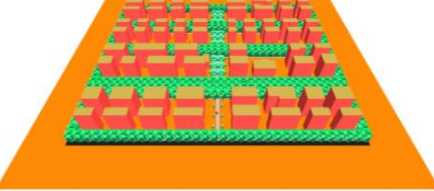
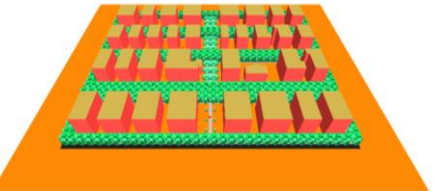
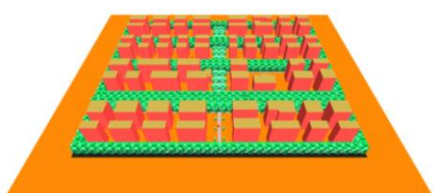
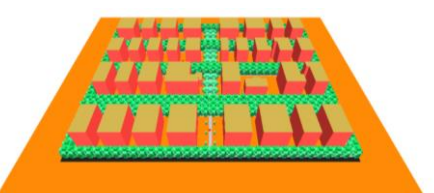
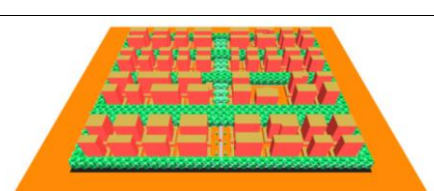
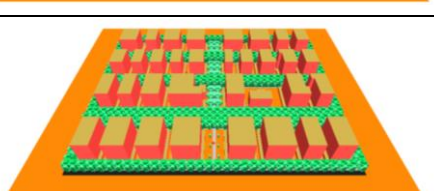
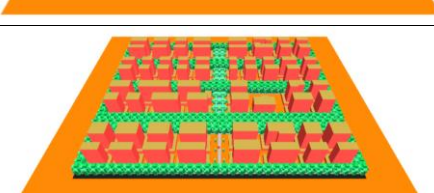
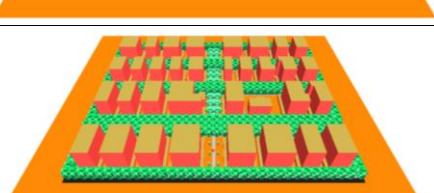
Os cenários urbanos hipotéticos modelado no ENVI-met em 2D e 3D estão dispostos nos Quadros 26 e 27, respectivamente:

Quadro 26. Imagens em 2D dos cenários urbanos hipotéticos modelados no ENVI-Met.

SEM INSERÇÃO DE VEGETAÇÃO		COM INSERÇÃO DE VEGETAÇÃO		
	Base LL	Base FF	Base LL	Base FF
T				
TP				
B				
BP				

Fonte: Elaborado pela Autora.

Quadro 27. Imagens em 3D dos cenários urbanos modelados no ENVI-Met.

		Base LL	Base FF
SEM INSERÇÃO DE VEGETAÇÃO	T		
	TP		
	B		
	BP		
COM INSERÇÃO DE VEGETAÇÃO			
	TV		
	TPV		
	BV		
	BPV		

Fonte: Elaborado pela Autora.

3.3.2 Configuração do Arquivo Climático

A configuração do arquivo climático é elaborada no módulo *ConfigWizard* (Figura 52b), e se divide em duas etapas: a seleção do dia para a simulação computacional e a inserção dos dados climáticos referentes a esse dia, esse processo resulta em um arquivo .SIM. A escolha do dia para a simulação computacional partiu da validação dos dados climáticos pela calibração de Torres (2017), para o período quente e seco, que corresponde às estações de primavera e verão, entre os meses de outubro a março. A calibração do modelo ENVI-met foi realizada a partir da comparação entre os valores horários estimados de temperatura e umidade relativa do ar de simulações computacionais de determinada fração urbana e os valores coletados *in loco* por meio de monitoramento microclimático.

Nesse processo, a Autora utilizou os seguintes indicativos estatísticos para tratamento dos dados: o MBE – *Mean Bias Error* (Desvio Médio de Valores) e o RMSE (*Root Mean Squared Error*), medida de dispersão dos valores estimados em relação aos valores medidos, indicando o erro quadrático médio relativo (Torres, 2017). Os valores de MBE e o RMSE dos casos reais simulados possibilitaram a “avaliação da confiabilidade dos dados simulados para efetivar a validação do modelo para a realização das simulações de cenários hipotéticos” (Torres, 2017, p. 94). Portanto, o dia 03/01/2016 foi selecionado para análise das simulações computacionais.

A partir da escolha do dia representativo, tem-se a inserção do horário para início da simulação computacional e o total de horas a serem simuladas. De acordo com o manual do *software* ENVI-met, indica-se iniciar a simulação computacional em um horário sem radiação solar e de atmosfera estável, nesse contexto, recomenda-se o horário das 21h. Com o intuito de obter dados climáticos de 2 dias completos, optou-se por inserir um total de 52 horas de simulação dos cenários urbanos hipotéticos, com o dia de início em 01/01/2016. Os dados climáticos obtidos estão apresentados no Anexo A.

No módulo *ConfigWizard*, há uma condição meteorológica para gerar o arquivo climático denominada *Simple Forcing*. No *Simple Forcing*, é necessário inserir dados horários de temperatura e umidade relativa do ar. Na versão mais recente do ENVI-met há disponível uma outra condição, o *Full Forcing*, em que é necessário inserir dados com intervalos de 30min. de temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade/direção dos ventos, precipitação, radiação e nebulosidade. Apesar do segundo modelo representar maior precisão às simulações, Novaes e Monteiro (2022) observaram que não houve diferença significativa ao comparar dados de

simulação computacional para calibração entre modelos simulados pelo *Full Forcing*, e os dados de Gusson e Duarte (2016), que utilizaram o *Simple Forcing*.

Desta forma, reforça-se a validação da calibração de Torres (2017) para a cidade de Arapiraca, assim como a adoção da primeira condição meteorológica mencionada, o *Simple Forcing*, para gerar o arquivo climático dos modelos da presente pesquisa. O quadro 28 apresenta os dados utilizados para a simulação:

Quadro 28 – Dados de entrada para simulação no ENVI-met.

Informações	Dados
Temperatura atmosférica inicial	302.64K - Obtida através do registro da estação automática INMET (A353), para o dia escolhido como representativo, no horário de início da simulação.
Umidade relativa do ar média (2m)	62.9% - Obtida através de monitoramento microclimático.
Velocidade do vento a 10m	2,5m/s* Obtida através do registro da estação automática INMET (A353), para o dia escolhido como representativo, no horário de início da simulação.
Direção do vento	90° – Corresponde à direção Leste - predominante local
Rugosidade	0.1 (Rugosidade da superfície (sob o anemômetro)
Hora início da simulação	21h00
Umidade específica do ar a 2500m ⁴¹	2.31g/Kg - Umidade no topo do modelo
Horas simuladas	52h
Radiação solar	0.919

*O valor da velocidade do vento a 10m foi resultado da média observada no dia 03/01/2016, conforme é possível observar no Anexo A.

Fonte: Elaborado pela Autora.

⁴¹ Dado obtido pelo site do dep. Ciências Atmosféricas da Universidade de Wyoming. Por não haver dados de Arapiraca, optou-se por coletar os dados da região mais próxima, Recife-PE (82900). Disponível em: <<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>>.

3.3.3 Simulação dos Cenários

A simulação dos cenários urbanos hipotéticos foi feita no *software* ENVI-met, versão 4.0. módulo ENVI-met (Figura 52c). Antes de iniciar a simulação, é importante abrir o arquivo e realizar a etapa de checar a simulação, para observar se há algum problema no arquivo gerado. Nessa etapa, tanto o arquivo de modelagem quanto o de configuração climática são analisados. Após a checagem dos arquivos, torna-se possível iniciar as simulações computacionais.

3.4 Análise de Desempenho Climático

A análise ambiental parte dos dados extraídos de receptores instalados na etapa de modelagem dos cenários urbanos hipotéticos. Para a extração dos dados climáticos de cada cenário foi utilizada a versão ENVI-met 5.5.1⁴². Essa versão conta com o BIO-met, interface do *software* que gera, automaticamente, os dados do índice PET.

No que tange a influência da verticalização nas condições de conforto térmico ao ar livre na escala do pedestre, os resultados foram analisados em duas etapas: a análise comparativa de desempenho climático e a análise de correlação entre os parâmetros climáticos e urbanísticos. Na primeira etapa, os dados horários do dia 03/01/2016 foram submetidos a uma análise qualiquantitativa comparativa, para caracterizar o desempenho climático dos cenários. As variáveis analisadas foram: temperatura do ar, TRM, umidade relativa do ar e a velocidade dos ventos. Além das variáveis climáticas apresentadas, foram analisados também os valores referentes ao índice de conforto térmico PET. Nesse momento, também foram gerados perfis e mapas em 2D, com o intuito de se observar o comportamento das variáveis citadas. Os horários selecionados para análise são às 9h, 15h e 21h, conforme horários indicados pela OMM (WMO, 1983).

De acordo com a RSL (Ver Apêndice C), ficou evidente a importância do PET como índice representativo para diagnósticos sobre as condições de conforto térmico ao ar livre na escala do pedestre, sendo amplamente utilizado em diversas pesquisas acerca do microclima urbano (Krüger, Minella, 2011; Gomez et al., 2013; Taleghani et al., 2014; Lai et al., 2014; Yang, Lin, 2016; Antonini et al., 2020; Nasrollahi et al., 2020). Além disso, Fischereit e Schlünzen (2018) submeteram 165 índices térmicos a 11 critérios para avaliação de quais

⁴² Para a simulação computacional dos cenários urbanos hipotéticos foi utilizada o *software* ENVI-met 4.0, de acordo com a justificativa apresentada no início do subtítulo 3.3 (Simulação Computacional dos Cenários).

seriam os mais indicados para estudo do conforto térmico ao ar livre, de forma global. Como resultado, somente quatro índices foram bem sucedidos, dentre eles estava o PET.

Nesse sentido, foi preciso selecionar a configuração do pedestre, que reúne: parâmetros corporais (idade, gênero, peso, altura, posição corporal), parâmetros de vestimenta (clo) e metabolismo. De acordo com a ISO 7730 (2005)⁴³, os parâmetros humanos são:

Quadro 29. Parâmetros humanos, de acordo com a ISO 7733 (2005).

Parâmetro		Dado
Idade		35
Sexo		Masculino
Peso		75Kg
Altura		1,75m
Postura corporal		Em pé
Velocidade ao caminhar		1,21m/s
Isolamento térmico das roupas	Externo	0.90clo
	Interno	0.90clo
Metabolismo Corporal	Taxa basal	84.49W
	Metabolismo de trabalho	80.00W

Fonte: Banco de dados do software ENVI-Met 5.5.1.

A respeito da vestimenta, Havenith et al. (2012) afirmaram que a roupa se constitui como a interface entre o ser humano e o ambiente em que está inserido. Nesse contexto, ao analisar o conforto térmico na escala do pedestre, diversas pesquisas ajustaram o valor de Clo externo de acordo com o clima do objeto de estudo, como foi o caso de Nascimento e Silva (2019) no clima tropical da cidade de São Sebastião (DF), no Brasil; de Srivanit e Jareemit (2020) no clima tropical seco do subúrbio de Bangkok, capital da Tailândia; de Darbani et al. (2021) no clima árido com verões quentes e invernos frios da cidade de Mashhad, no Irã; de Rajan e Amirtham (2021) no clima de monção com estação seca no verão (As) em Chennai, na Índia; de Ngo et al. (2022) no clima tropical de monção (Am) da cidade Ha Tinh, no Vietnã; e de Huang e Chen (2023) no clima tropical de monção, na cidade de Chiayi, localizada no sudoeste de Taiwan. Assim, a presente pesquisa utilizou o Clo de 0,5, disponível na configuração do *software* para climas quentes.

⁴³ ISO 7730 (2005): Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria (Ergonomia do ambiente térmico — Determinação analítica e interpretação do conforto térmico através do cálculo dos índices PMV e PPD e critérios locais de conforto térmico). Disponível em: <https://www.iso.org/standard/39155.html>. Acesso em: 15 out. 2024.

Ainda a respeito do PET, tornou-se necessário selecionar a calibração do índice PET indicada para a cidade de Arapiraca. Os critérios de inclusão para definir a calibração do PET a ser utilizada foram: a semelhança do tipo de clima da cidade com o de Arapiraca/AL e apresentar as escalas completas para frio e calor. Como exemplos de calibração do índice PET nacionais se destacam os trabalhos de: Monteiro e Alucci (2006) para a cidade de São Paulo/SP (clima subtropical úmido – Cwa); Hirashima et al. (2018) para a cidade de Belo Horizonte/MG (clima tropical chuvoso - Aw); Krüger et al. (2018) para a cidade de Curitiba/PR (clima temperado de altitude - Cfb); Rossi, Krüger e Drach (2017) para a cidade de Rio de Janeiro/RJ (clima tropical - Aw/Am); Silva e Alvarez (2015) para a cidade de Vitória/ES (clima tropical úmido); Lucchese et al. (2016) para a cidade de Campo Grande/MS (clima em uma zona de transição entre subtropical úmido - Cfa - e tropical úmido e seco - Aw); e de Andrade et al. (2016) para a cidade de Salvador/BA (clima tropical quente e úmido - Af).

Após submeter as calibrações das cidades brasileiras aos critérios de inclusão, tornou-se necessário buscar uma referência internacional, que fosse mais próxima das características climáticas de Arapiraca. Isso porque as calibrações mencionadas no parágrafo anterior não apresentam todos os intervalos de conforto para uma análise, apresentando somente a calibração de alguns parâmetros de sensação de conforto, como apresenta o Apêndice D. Nesse contexto, a presente pesquisa adotou a calibração para o clima tropical úmido de Sun Moon Lake, Taiwan, do trabalho de Lin e Matzarakis (2008), conforme apresenta o Quadro 30. Essa calibração foi escolhida por apresentar todos os intervalos para análise do conforto térmico, e pela semelhança com os dados climáticos de Arapiraca. A calibração padrão, presente no Quadro 7, apresenta um distanciamento maior da realidade climática observada.

Quadro 30. Sensações térmicas e a classificação do PET para Sun Moon Lake, Taiwan.

Sensação Térmica	Intervalo PET (°C)
Muito Frio	< 14
Frio	14 - 18
Fresco	18 - 22
Ligeiramente Fresco	22 - 26
Confortável	26 - 30
Ligeiramente Calor	30 - 34
Calor	34 - 38
Quente	38 - 42
Muito Quente	> 42

Fonte: Adaptado de Lin e Matzarakis (2008).

A extração dos dados referente às variáveis ambientais foi obtida por meio dos receptores inseridos nos cenários, antes das simulações computacionais, como apresenta o Quadro 26 e a Figura 57. Na Figura 55 está ilustrado a perspectiva do pedestre (geradas pela ferramenta *SPACES* no *software* ENVI-met) para os pontos seleccionados:

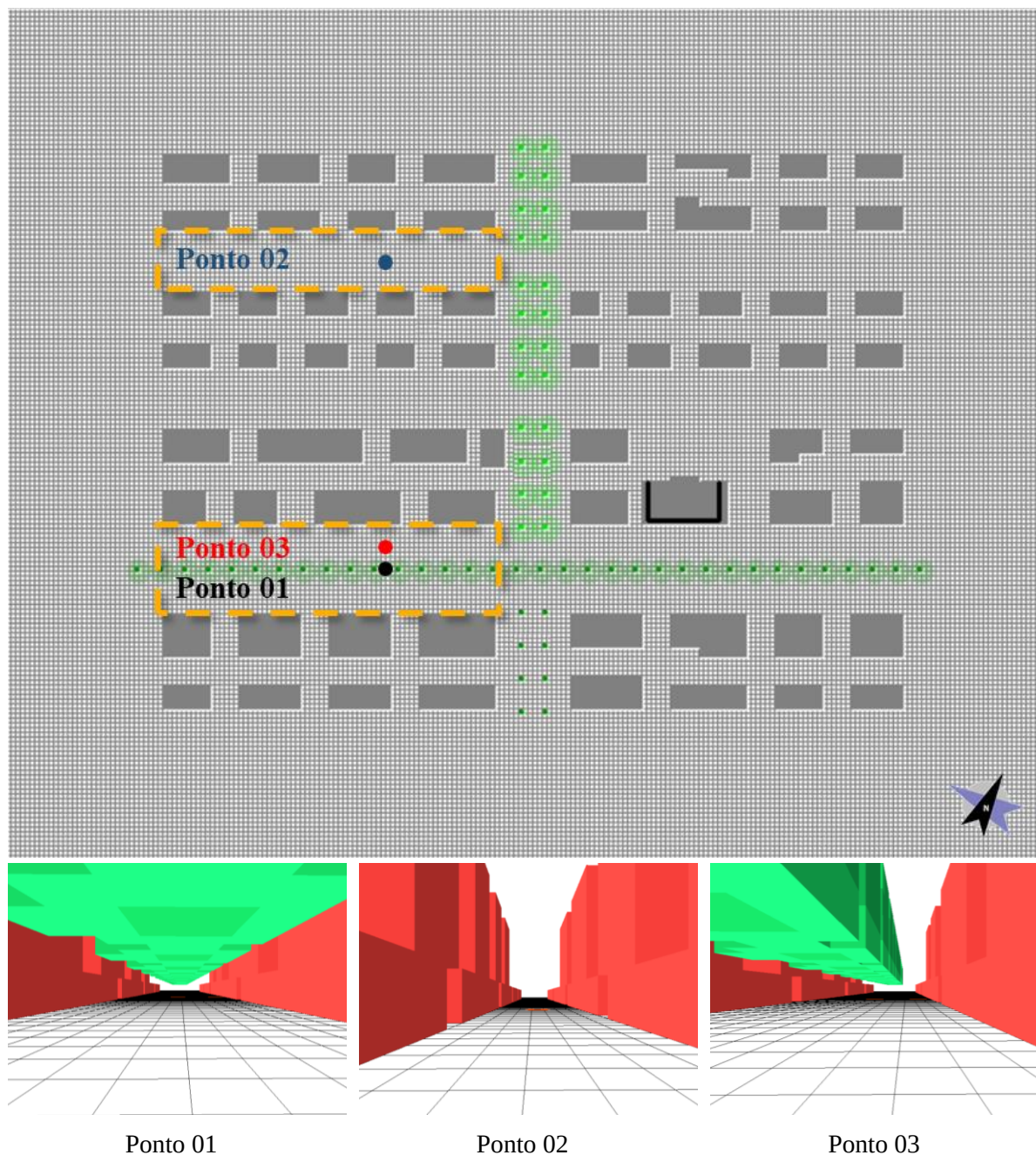


Figura 55 – Localização e Perspectivas geradas pela ferramenta *SPACES* para os Pontos 01, 02 e 03 na altura do pedestre (1,5m), no cânion urbano do cenário LL-B.

Fonte: Elaborado pela Autora.

A segunda etapa consistiu na análise estatística através da abordagem de regressão linear para estudo de correlação entre os aspectos da forma urbana (variável independente) com o

comportamento das variáveis ambientais (variáveis dependentes ou variáveis resposta), relacionadas ao conforto térmico, na escala microclimática. O estudo de correlação é uma técnica estatística utilizada para analisar a relação entre duas ou mais variáveis, com o objetivo de identificar se existe uma associação entre elas e, em caso afirmativo, a intensidade e a direção dessa associação. A correlação é mensurada por meio de coeficientes, sendo o mais comum o coeficiente de correlação de Pearson (r), que varia entre -1 e +1. Um valor de $r = +1$ indica uma correlação perfeita positiva, isso significa que à medida que uma variável aumenta, a outra também aumenta proporcionalmente. O valor de $r = -1$ indica uma correlação perfeita negativa, em que o aumento de uma variável está associado à diminuição da outra. Quando $r = 0$, não há correlação linear entre as variáveis (Triola, 2017).

O coeficiente de correlação (r), é essencial na análise de regressão, para entender o grau de dependência entre as variáveis, permitindo a investigação de relações causais ou preditivas entre elas. No contexto da análise de regressão, as variáveis são classificadas como independentes ou dependentes, com papéis distintos na modelagem da relação entre elas. A variável independente, também chamada de preditora ou explicativa, é aquela que se presume influenciar ou determinar o comportamento de outra variável. Em contrapartida, a variável dependente, ou variável resposta, é aquela cujo valor se busca prever ou explicar com base nas alterações da variável independente (Montgomery; Peck; Vining, 2012).

Com relação ao coeficiente de correlação (r), o Quadro 31 apresenta a classificação dos graus de correlação:

Quadro 31. Classificação do grau de correlação a partir do valor do coeficiente de correlação (r).

-1,0	-0,95	-0,50	-0,10	0	+0,10	+0,50	+0,95	+1,0
negativa perfeita	negativa forte	negativa moderada	negativa fraca	ausência	positiva fraca	positiva moderada	positiva forte	positiva perfeita

Fonte: Beiguelman (1996).

Nesse contexto, a significância do coeficiente de correlação depende, entre outros fatores, do tamanho da amostra (n). Em amostras pequenas, como é o caso de uma amostra com 16 pares de dados ($n=16$), o valor de r precisa ser relativamente mais elevado para ser considerado significativo em comparação com amostras maiores, devido à maior variabilidade amostral. Assim, o valor crítico para um coeficiente de correlação significativo é 0,497 ($\alpha = 0,05$), que

corresponde a um nível de significância⁴⁴ de 95%; e 0,623 ($\alpha = 0,01$), que corresponde a um nível de significância de 99% (Larson; Faber, 2010). Os aspectos da forma urbana foram vinculados à parâmetros urbanísticos, quantificados em relação aos parâmetros de modelagem dos cenários urbanos hipotéticos (ver Subtítulo 3.2.1 e 3.2.2), conforme apresenta o Quadro 32:

Quadro 32. Variáveis da forma urbana.

Parâmetro para a Modelagem	Parâmetro Urbanístico
Recuos e Gabarito	Recuo Progressivo*
	Relação H/W
Formato dos edifícios Remembramento dos lotes	TO**
Adoção de <i>Pilotis</i>	Po Vedif**
Uso de Vegetação	IDA**
Junção de todos os parâmetros (geometria e uso da vegetação)	FCV

* Pelo estudo abordar o cânion urbano, adotou-se os dados do recuo frontal.

* Conceito e fórmula presentes no Apêndice A.

Fonte: Elaborado pela Autora.

Os valores dos parâmetros urbanísticos dos Pontos 01, 02 e 03 estão dispostos nos Quadros 33 e 34. Nesse contexto, é importante ressaltar que T.O, IDA, Po Vedif e recuo progressivo foram quantificados considerando a área total do tecido urbano correspondente ao cenário hipotético. A relação H/W e o FCV foram quantificados para cada ponto, em específico.

Quadro 33. Parâmetros urbanísticos a partir da área total do cenário urbano hipotético.

	Cenários	TO	Po Vedif	IDA	Recuo Progressivo
Ponto 01: 79, 61, 0 (Via Principal) Ponto 02: 79, 126, 0 (Via Secundária) Ponto 03: 79, 66, 0 (Calçada)	LL - T	0,40	0,00	0,02	10,0
	LL - TP	0,40	0,06	0,02	10,0
	LL - B	0,80	0,00	0,02	2,5
	LL - BP	0,80	0,12	0,02	2,5
	FF - T	0,50	0,00	0,02	10,0
	FF - TP	0,50	0,06	0,02	10,0
	FF - B	0,85	0,00	0,02	2,5
	FF - BP	0,85	0,10	0,02	2,5
	LL - TV	0,40	0,00	0,15	10,0
	LL - TPV	0,40	0,06	0,15	10,0
	LL - BV	0,80	0,00	0,15	2,5
	LL - BPV	0,80	0,12	0,15	2,5
	FF - TV	0,50	0,00	0,15	10,0
	FF - TPV	0,50	0,06	0,15	10,0
	FF - BV	0,85	0,00	0,15	2,5

⁴⁴ O nível de significância indica a probabilidade que o pesquisador está disposto a aceitar de considerar um coeficiente como estatisticamente diferente de zero, quando na verdade não é. O valor de 0,05 é o nível de significância mais comumente utilizado, embora alguns pesquisadores adotem níveis entre 0,01 (mais rigoroso) e 0,10 (menos conservador e mais propenso a identificar significância) (HAIR et al., 2009).

	FF - BPV	0,85	0,10	0,15	2,5
--	----------	------	------	------	-----

Fonte: Elaborado pela Autora.

Quadro 34. Parâmetros urbanísticos a partir dos pontos selecionados.

Cenários	Relação H/W			FCV		
	Ponto 01: 79, 61, 0 (Via Princ.)	Ponto 02: 79, 126, 0 (Via Sec.)	Ponto 03: 79, 66, 0 (Calçada)	Ponto 01: 79, 61, 0 (Via Princ.)	Ponto 02: 79, 126, 0 (Via Sec.)	Ponto 03: 79, 66, 0 (Calçada)
LL - T	0,9	0,9	1,5	0,22	0,38	0,45
LL - TP	0,9	0,9	1,5	0,22	0,38	0,45
LL - B	1,4	1,4	2,6	0,22	0,38	0,45
LL - BP	1,4	1,4	2,6	0,22	0,38	0,45
FF - T	0,9	0,9	1,5	0,24	0,38	0,50
FF - TP	0,9	0,9	1,5	0,24	0,38	0,50
FF - B	1,4	1,4	2,6	0,24	0,39	0,51
FF - BP	1,4	1,4	2,6	0,24	0,38	0,49
LL - TV	0,9	0,9	1,5	0,20	0,16	0,14
LL - TPV	0,9	0,9	1,5	0,20	0,16	0,14
LL - BV	1,4	1,4	2,6	0,20	0,16	0,14
LL - BPV	1,4	1,4	2,6	0,20	0,16	0,14
FF - TV	0,9	0,9	1,5	0,22	0,16	0,19
FF - TPV	0,9	0,9	1,5	0,22	0,16	0,19
FF - BV	1,4	1,4	2,6	0,22	0,16	0,18
FF - BPV	1,4	1,4	2,6	0,22	0,16	0,18

Fonte: Elaborado pela Autora.

A respeito dos parâmetros das variáveis ambientais, sob o fim de identificar condições de maior adversidade relacionadas com o conforto térmico humano, para dados da temperatura do ar, TRM e PET, foram analisados os valores máximos identificados nos pontos já citados; para a correlação com a umidade relativa do ar, com comportamento inversamente proporcional à temperatura do ar, foram analisados os valores mínimos; enquanto para a velocidade dos ventos, foi considerado na análise o valor médio diário, pois a velocidade dos ventos se apresenta de forma constante ao longo do dia no *software* ENVI-met. Assim, a previsão dos dados indicados permite identificar os impactos dos padrões de ocupação e da forma urbana em contextos climáticos similares ao de Arapiraca-AL. O que subsidiará intervenções urbanísticas voltadas à adaptação climática de cânions urbanos.

O tratamento dos dados foi realizado no programa EXCEL, utilizando o suplemento Análise de Dados. O Quadro 35 apresenta as variáveis dependentes e independentes adotadas na presente pesquisa:

Quadro 35. Variáveis dependentes e independentes analisadas.

Variáveis Dependente	Variável Independente
Temperatura do Ar Máxima	Relação H/W Recuo Progressivo
TRM Máxima	TO
Umidade Relativa do Ar Mínima	Po Vedif
Velocidade dos Ventos Mínima	IDA
PET Máximo	FCV

Fonte: Elaborado pela Autora.

A apresentação dos resultados será dada por meio de gráficos de dispersão, ferramenta visual fundamental na análise estatística, que permite observar a relação entre duas variáveis quantitativas, plotando seus valores em um sistema de coordenadas cartesianas. Esse tipo de gráfico também permite identificar o coeficiente de determinação (R^2) entre os parâmetros urbanísticos e as variáveis ambientais. O coeficiente de determinação (R^2) é uma medida estatística que quantifica o quanto da variação da variável dependente pode ser explicada pela variável independente em um modelo de regressão. Segundo Montgomery, Peck e Vining (2012), o R^2 varia de 0 a 1, onde valores próximos de 1 indicam que a maior parte da variação na variável dependente é explicada pelo modelo, sugerindo uma boa adequação. De acordo com Hair et al. (2009), quanto maior o valor do coeficiente de determinação (R^2), maior é o poder de explicação da equação de regressão, o que significa que o modelo é mais eficaz em prever a variável dependente. Nesse sentido, a presente pesquisa selecionou os pares de dados que apresentaram coeficientes de determinação acima de 0,5.

A partir dos resultados obtidos, espera-se obter informações úteis ao processo de planejamento urbano, especialmente no que tange aos efeitos do adensamento construtivo em cidade de clima semiárido, de forma a promover o aproveitamento das estratégias bioclimáticas de sombreamento, ventilação natural e resfriamento evaporativo através da conformação da geometria urbana e do uso da vegetação (componentes da forma urbana).

3.5 Conclusões do Capítulo

Considerando os objetivos propostos pela presente pesquisa foram determinados os procedimentos específicos a fim de chegar à refutação ou afirmação das hipóteses levantadas. Para cobrir o escopo da investigação, foram modelados 16 cenários urbanos hipotéticos,

simulados no programa ENVI-met 4.0, a fim analisar a influência da verticalização nas condições de conforto térmico ao ar livre na escala do pedestre, considerando aspectos da geometria urbana e do uso de vegetação, no contexto climático semiárido. Diversos pesquisadores também utilizaram a versão mencionada para a simulação dos cenários urbanos hipotéticos (Sharmin; Steemers; Matzarakis, 2017; Chatterjee et al., 2019; Manteghi; Shukri; Lamit, 2019; Muniz-Gäal et al., 2019; Kotharkar; Bagade; Singh, 2020; Darbani et al., 2021; Sadeghi; Bahadori, 2021).

Para a configuração do arquivo climático, partiu-se da calibração de Torres (2017) para a fração urbana selecionada em Arapiraca. A calibração consiste na validação dos dados climáticos inseridos no modelo, a partir dos dados coletados no local, com base em tratamento estatístico. Nesse contexto, por abordar a mesma fração selecionada no presente estudo, tornou-se possível utilizar os dados da autora. A seleção do dia para simulação dos cenários elaborados corresponde ao período quente/ seco (primavera e verão), por apresentar os valores de temperatura do ar mais elevados. Partiu-se da análise dos dias de céu claro, sem interferências de dias chuvosos ou nublados, e dos valores de umidade relativa do ar e temperatura do ar. Assim, chegou-se ao dia 03 de janeiro de 2016. Os resultados das simulações geraram arquivos em formato .EDX que podem ser tratados no *software* Leonardo e Biomet, ambos integrados ao ENVI-met. No Leonardo, é possível extrair diversos dados climáticos em formato .xlsx, em planilha do *Microsoft Excel*, assim como gráficos e mapas em 2D. No Biomet, pode-se extrair os dados de diferentes índices de conforto térmico, como o PET.

O próximo capítulo apresenta a análise e discussão dos resultados, subdivididos em duas etapas: a análise de desempenho climático e a análise de correlação entre os parâmetros climáticos e urbanísticos. Enquanto a análise de desempenho climático possibilita a compreensão de como a forma urbana influencia no comportamento de cada variável climática e índice de conforto térmico adotados; a análise de correlação entre os parâmetros climáticos e urbanísticos permite subsidiar a estimativa das alterações nas variáveis climáticas em cenários futuros, para o período quente e seco.



4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para análise e discussão dos resultados foram consideradas as seguintes variáveis: temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), TRM ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (%), velocidade e direção dos ventos (m/s) e o índice PET ($^{\circ}\text{C}$), obtidas por meio dos *softwares* Leonardo e Biomet, interfaces do ENVI-met. As quatro variáveis climáticas mencionadas regem o balanço energético humano e, assim, desempenham um importante papel no conforto térmico humano. (Gál; Kántor, 2020). Os pontos selecionados para análise estão em espaços abertos no cânion urbano (ver Figura 56) na altura do pedestre, que corresponde a 1,5m do solo, como descreve o fluxograma abaixo:

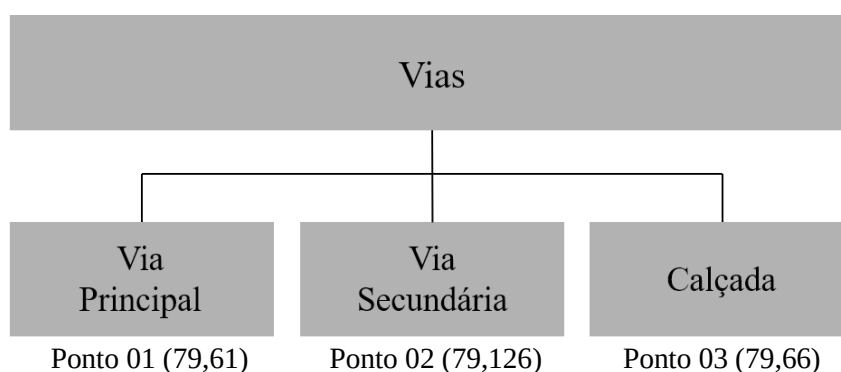


Figura 56 – Fluxograma da análise dos resultados.

Fonte: Elaborado pela Autora.

A análise dos resultados se deu em duas etapas: a análise qualiquantitativa comparativa de desempenho climático, referente ao comportamento das variáveis ambientais nos diferentes cenários simulados, e a análise de correlação entre os parâmetros climáticos e urbanísticos. Com relação a análise qualiquantitativa, visto que a máxima diferença entre as temperaturas do ar máximas foi inferior a 1°C , será apresentada a análise dos demais parâmetros climáticos nos 16 cenários urbanos. No entanto, torna-se necessário pontuar o desempenho climático no período noturno, em que a diferença máxima da temperatura do ar mínima foi de $2,19^{\circ}\text{C}$, encontrada no ponto 02 (via secundária), que variou entre $24,82^{\circ}\text{C}$ e $22,63^{\circ}\text{C}$, entre os cenários urbanos hipotéticos sem e com vegetação arbórea nas calçadas, respectivamente.

Esse resultado pode ser compreendido pelos fatores que regulam a temperatura do ar, apontados por Oke et al. (2017), como: a ventilação e a circulação do ar, um dos principais mecanismos de troca de calor por convecção, e a presença de vegetação. A inserção de árvores proporciona sombreamento, o que diminui a quantidade de radiação solar que atinge o solo e superfícies construídas ao longo do dia, reduzindo a energia em forma de calor a ser emitida à noite; e promovem o resfriamento evaporativo através do processo de evapotranspiração. As

imagens dos gráficos e os quadros dos dados quantitativos, e os quadros com os perfis e mapas 2D da temperatura do ar estão presentes no Apêndice E.

O Ponto 01 de extração dos dados climáticos está situado no centro da via principal que, de acordo com a fração urbana selecionada na definição dos parâmetros de modelagem dos cenários urbanos hipotéticos, está sob árvores de grande porte e copas densas, presentes no canteiro central (ver Figura 53). A presença desse elemento urbano influenciou nos resultados das variáveis climáticas de tal forma que foi observada uma baixa variabilidade entre os cenários. Desta forma, a presente pesquisa seguiu com a análise dos resultados nos Pontos 02 e 03, na via secundária e na calçada, respectivamente. Os dados extraídos do Ponto 01 estão no Apêndice E.

4.1 Análise de Desempenho Climático

4.1.1 Temperatura Radiante Média (TRM)

A TRM é de relevante importância na determinação do índice de conforto térmico urbano, na escala do pedestre. A variação horária da TRM em um ciclo de 24h nos Pontos 02 (ao centro da via secundária) e 03 (na calçada da via principal) podem ser vistos nas Figuras 57 e 58, respectivamente.

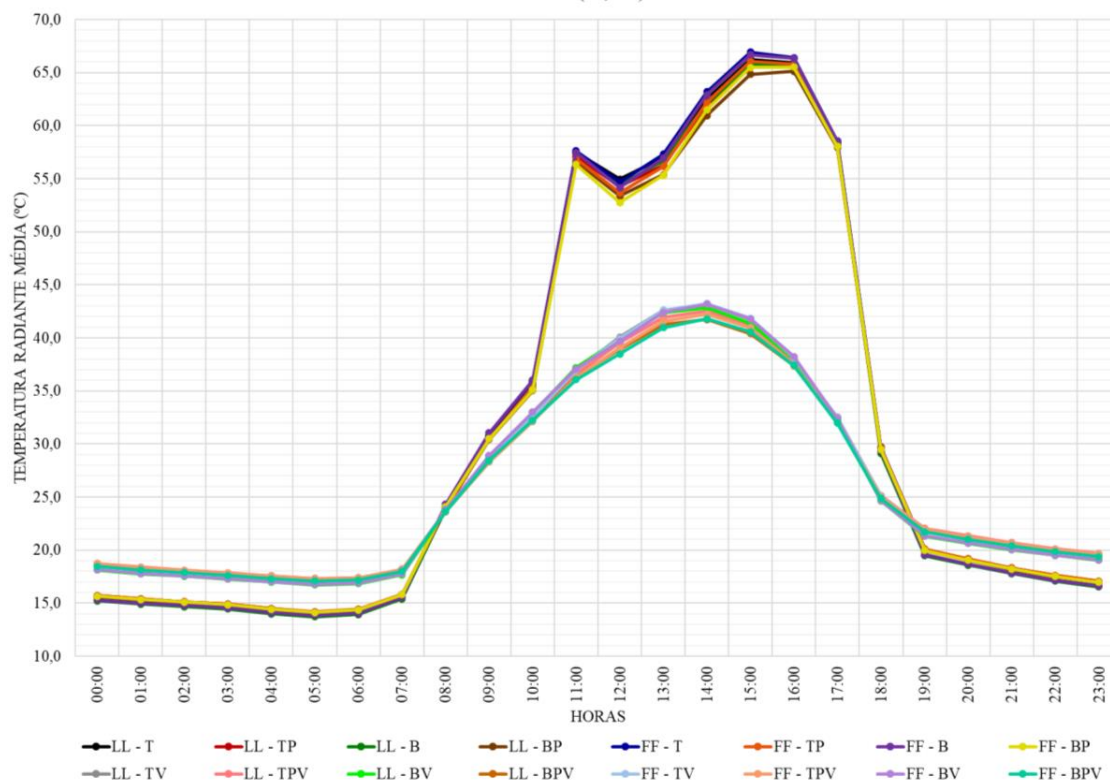


Figura 57 – Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Via Secundária - TRM.
Fonte: Elaborado pela Autora.

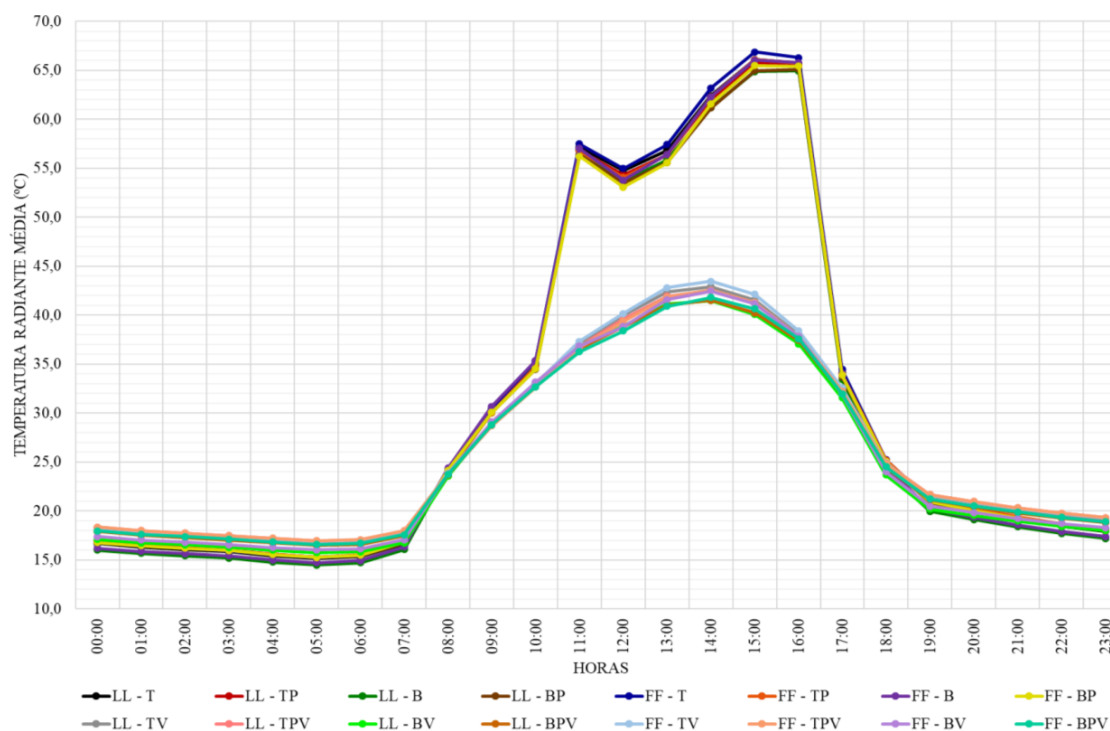


Figura 58 – Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Calçada - TRM.
Fonte: Elaborado pela Autora.

No período diurno, a partir das 10h da manhã, os cenários sem o uso de vegetação arbórea nas calçadas apresentaram um acréscimo substancial nos valores da TRM, em ambos os pontos. Dada a estreita relação entre a TRM e o FCV, a presença das árvores reduzem o valor da TRM, por gerar uma maior obstrução da abóbada celeste, aumentando a projeção da área de sombra ao nível do pedestre (1,5m). Isto permite condições mais favoráveis ao conforto térmico no interior dos cânions, no período diurno. Durante o dia, as superfícies urbanas absorvem calor da radiação solar, liberando essa energia em forma de radiação de onda longa à noite. Em áreas com baixo FCV, há limitação na capacidade de dissipação desse calor, gerando o acúmulo do mesmo, o que contribui para o aumento da TRM noturna (OKE et al., 1991).

Assim, explica-se a razão dos cenários urbanos hipotéticos sem o uso da vegetação apresentarem menores valores de TRM durante o período noturno, especialmente no ponto da via secundária. Nesse sentido, a mudança no padrão de exposição da radiação solar direta (onda curta), interfere na variação do padrão de acúmulo de calor sensível e latente no período diurno e noturno. Ainda a respeito dos cenários sem o uso das árvores nas calçadas, observou-se uma redução dos valores da TRM a partir das 11h, em ambos os pontos de análise. Esse fenômeno pode ser compreendido pela projeção da sombra dos edifícios às margens da via do Ponto 02 (via secundária); e das árvores de grande porte, localizadas no canteiro central do Ponto 03 (calçada), conforme demonstra as imagens presentes no Apêndice F.

O comportamento noturno da TRM na calçada foi distinto da via secundária, pois nos cenários com o uso de vegetação arbórea os resultados se aproximaram dos cenários sem o uso de vegetação. A razão dessa redução da TRM noturna pode ser compreendida pela composição das características da forma urbana no ponto em questão. Embora os valores do FCV em ambos os pontos sejam próximos entre si (Ver Quadros 34), sua composição é distinta, visto que na calçada há a diferença nos valores da relação H/W, dada a presença de duas vias duplas separadas por um canteiro central arborizado; e dos materiais de cobertura da superfície, pois na via secundária o ponto está localizado no centro da pista revestida por asfalto (albedo: 0,12%) e na calçada a cobertura foi o concreto usado/sujo (albedo: 0,30%), assim, menos energia em forma de calor foi absorvida durante o dia e emitida durante a noite. Essas qualidades conferem um maior potencial de resfriamento térmico para o período noturno na calçada, devido às trocas térmicas entre o interior do cânion e a abóbada celeste.

A análise comparativa entre os cenários urbanos hipotéticos foi realizada a partir de gráficos *Boxplot*⁴⁵ (Ver Figuras 59 e 60) e de dados da média, mínimos e máximos (ver Quadro 36), para a via secundária e calçada:

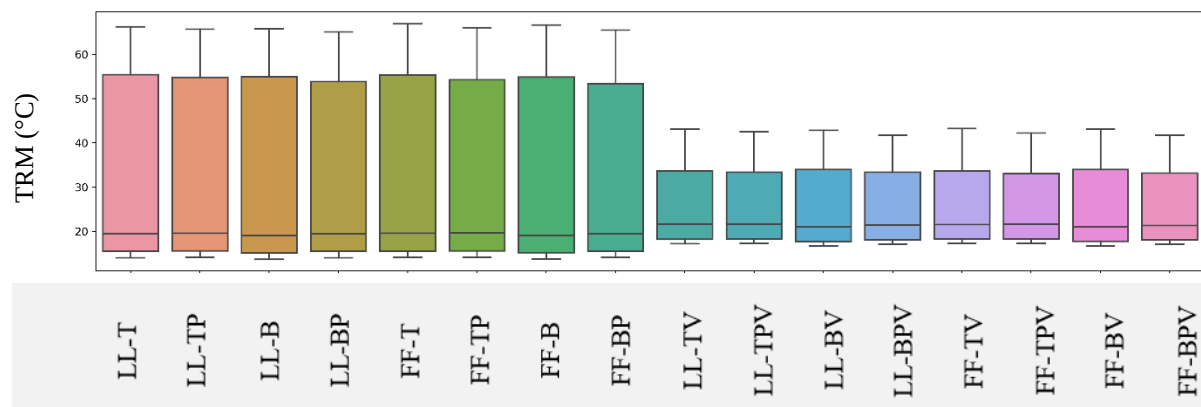


Figura 59 – Gráfico *Boxplot* da Via Secundária - TRM.

Fonte: Elaborado pela Autora.

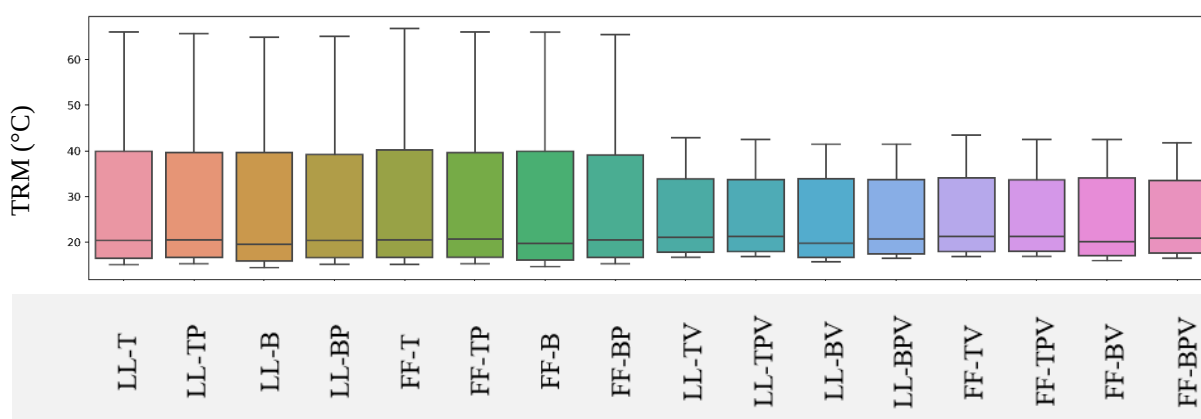


Figura 60 – Gráfico *Boxplot* da Calçada - TRM.

Fonte: Elaborado pela Autora.

Na via secundária, o gráfico indicou que os cenários têm uma distribuição assimétrica positiva, pois a mediana está mais próxima do limite inferior, com pouca diferença entre os cenários. Acerca da variabilidade (dispersão) dos dados em torno da mediana, dada pela diferença entre o 3º e o 1º quartil, os cenários com uso da vegetação obtiveram um tamanho de caixa menor, indicando que o uso de vegetação arbórea como estratégia bioclimática exerceu maior influência na TRM, em comparação com os demais parâmetros de modelagem, relacionados ao tipo de remembramento e formato dos edifícios. Em seu estudo, Shinzato e Duarte (2018) também observaram o potencial das árvores em reduzir a TRM no meio urbano,

⁴⁵ Ferramenta de estatística descritiva.

especialmente em climas tropicais e subtropicais. Ao observar os valores do 1º e 3º Quartil (Ver Figura 59) e a TRM máxima e mínima (Ver Quadro 36), no período diurno a presença de vegetação gerou a redução nos valores da TRM, enquanto no período noturno esse cenário se inverteu.

Na calçada, observou-se alguns padrões de comportamento da TRM que coincidem ao da via secundária: a proximidade dos valores da TRM mediana, o padrão de comportamento da média, os valores da TRM máxima e mínima. A diferença observada entre os cenários sem e com o uso de vegetação diminuiu no ponto localizado na calçada, bem como a variabilidade dos dados (tamanho da caixa), o que indica uma menor dispersão dos dados em torno da média. Isso se deve a composição da forma urbana, especialmente pelos valores do FCV, resultado da composição: geometria urbana + árvores de grande porte (Ver Quadro 34). O céu mais obstruído projeta uma maior área de sombra no interior do cânion, especialmente no nível do pedestre, reduzindo a TRM ao longo do dia. De maneira geral, a análise dos dados indicou que em cânions urbanos, reduzir o valor do FCV, por meio do uso da vegetação, gerou um impacto positivo na TRM, variável climática com estreita ligação com índices de conforto térmico, como o PET. À noite, a vegetação retarda o resfriamento das superfícies porque a copa densa pode atuar como um isolante térmico, diminuindo a velocidade das trocas térmicas entre o interior do cânion e a abóbada celeste, aprisionando a radiação de onda longa (OKE et al., 1991). Souza et al. (2024) também identificaram a relação entre o uso de vegetação arbórea e a TRM, especialmente no que tange o seu efeito noturno.

O Quadro 36 apresenta os valores médios, mínimos e máximos da TRM dos cenários urbanos simulados, destacando-se os menores valores máximos (em azul) e os maiores valores mínimos (em vermelho) obtidos nos diferentes cenários, sem e com inserção da vegetação (em verde). Nos cenários sem o uso da vegetação a TRM média variou entre 31,0°C (LL-BP) e 31,5°C (FF-T), enquanto nos cenários em que houve a inserção das árvores, variou entre 25,9°C (FF-BPV) e 26,3°C (FF-TV), o que equivale a uma diferença de até 5,7°C. Esse resultado também aponta que o formato dos edifícios em torre apresentou os valores mais elevados. Em uma realidade climática caracterizada por apresentar duas estações bem definidas: um verão quente e seco e um inverno quente e úmido, com altas temperaturas ao longo de todo o ano; a redução apresentada é de fundamental importância para gerar qualidade de vida no meio ambiente urbano.

Quadro 36. Valores médios, mínimos e máximos diários da TRM.

Cenários	Via Secundária (Ponto 02)			Calçada (Ponto 03)		
	TRM Média (°C)	Mínimo (°C)	Máximo (°C)	TRM Média (°C)	Mínimo (°C)	Máximo (°C)
LL-T	31,4	14,1	66,2	30,6	15,1	66,1
LL-TP	31,3	14,2	65,7	30,6	15,3	65,8
LL-B	31,1	13,7	65,8	30,0	14,5	64,9
LL-BP	31,0	14,1	65,1	30,4	15,2	65,1
FF-T	31,5	14,2	66,9	30,9	15,2	66,9
FF-TP	31,3	14,2	66,1	30,7	15,3	66,1
FF-B	31,3	13,8	66,7	30,3	14,7	66,0
FF-BP	31,1	14,1	65,5	30,4	15,3	65,5
LL-TV	26,3	17,3	43,2	26,0	16,8	42,9
LL-TPV	26,2	17,3	42,5	26,0	17,0	42,5
LL-BV	26,0	16,7	42,8	25,1	15,7	41,5
LL-BPV	25,9	17,1	41,8	25,6	16,5	41,5
FF-TV	26,3	17,3	43,2	26,2	16,9	43,5
FF-TPV	26,1	17,3	42,3	26,0	17,0	42,6
FF-BV	26,1	16,8	43,2	25,4	16,0	42,5
FF-BPV	25,9	17,1	41,8	25,6	16,6	41,8

Fonte: Elaborado pela Autora.

O Quadro 37 apresenta os valores referentes à diferenciação térmica entre o cenário com o valor mais elevados da TRM⁴⁶ (FF-T) e os demais analisados:

Quadro 37. Valores de diferenciação térmica, identificados a partir da TRM máxima diurna (°C) entre o cenário FF-T (66,9°C) e os demais cenários urbanos simulados.

FF-T	Diferença: Cenário – (FF-T)															
TRM máxima (°C)	LL - T	LL - TP	LL - B	LL - BP	FF - T	FF - TP	FF - B	FF - BP	LL - TV	LL - TPV	LL - BV	LL - BPV	FF - TV	FF - TPV	FF - BV	FF - BPV
Via Secundária 66,9	-0,7	-1,2	-1,2	-1,8	66,9	-0,9	-0,3	-1,4	-23,8	-24,4	-24,1	-25,2	-23,7	-24,7	-23,8	-25,1
Calçada 66,9	-0,8	-1,1	-1,9	-1,8	66,9	-0,8	-0,8	-1,4	-24,0	-24,4	-25,4	-25,4	-23,4	-24,3	-24,4	-25,0

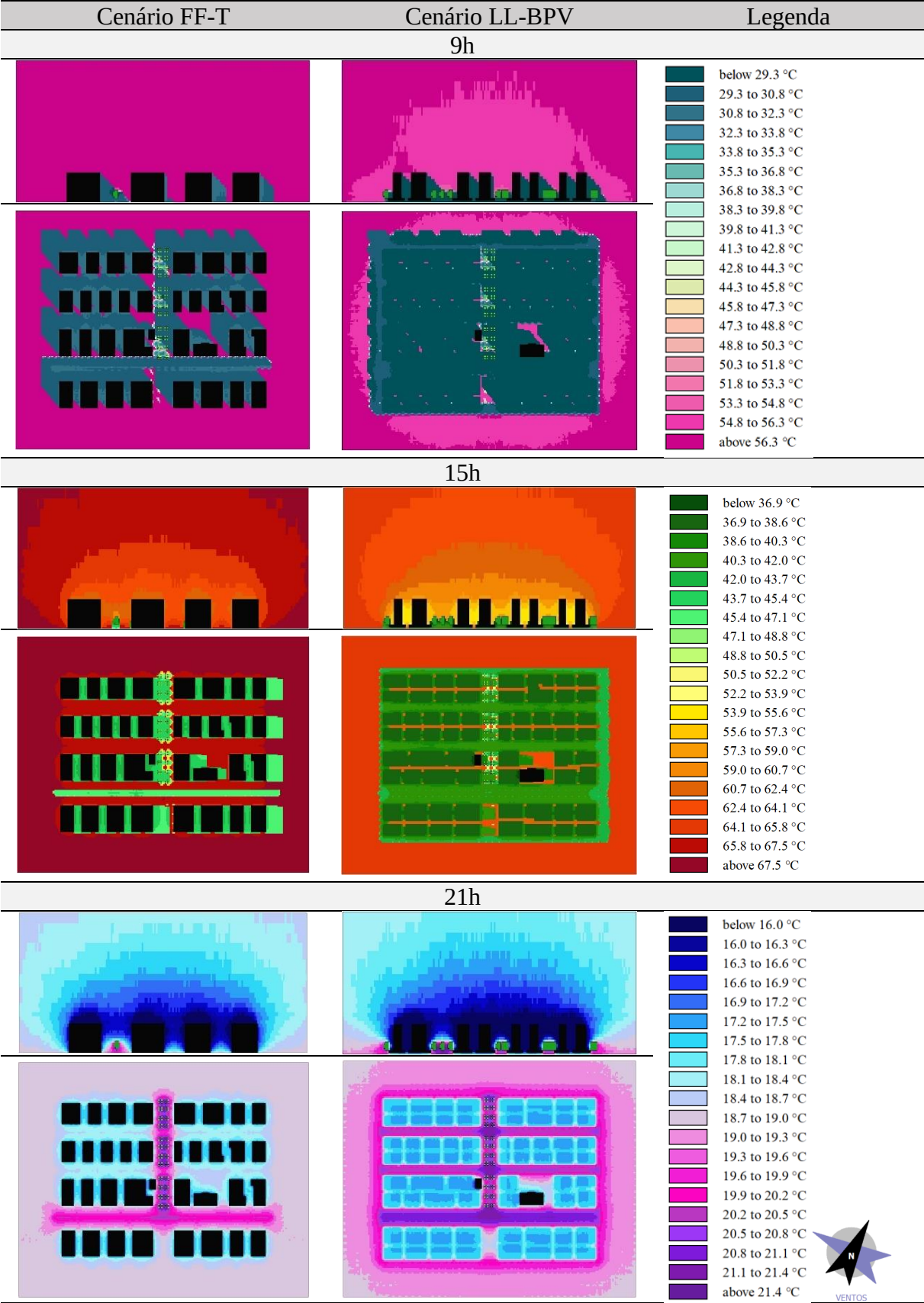
Fonte: Elaborado pela Autora.

⁴⁶ Nesse contexto foram considerados os valores máximos diurnos da TRM (°C) entre os cenários urbanos hipotéticos.

Para o dia simulado, o cenário FF-T apresentou os valores mais elevados da TRM, no período diurno: 66,9°C em ambos os pontos de análise. O Quadro 37 revelou diferenças de até 25,4°C, entre o cenário FF-T e o cenário LL-BPV. Os parâmetros de modelagem que os diferem consistem em: o tipo de remembramento LL, o formato dos edifícios em base com torre, a adoção de *pilotis* e a inserção de vegetação nas calçadas. O cenário FF-BPV alcançou um valor elevado de diferenciação, com 25,1°C na via secundária, e 25,0°C na calçada. Nesse sentido, o tipo de remembramento, que influencia diretamente na área de projeção da sombra gerada pelos edifícios, reduziu a TRM. Sob uma análise quantitativa dos dados, tem-se o cenário FF-T com a TRM máxima mais elevada entre os cenários simulados, e o cenário LL-BPV com a maior redução na TRM máxima diurna. Considerando-se apenas as variações nos formatos dos edifícios, a maior diferença entre os cenários foi inferior a 2,0°C, tanto na via secundária quanto na calçada (LL-T x LL-B/ FF-T x FF-B). Quanto às TRM mínimas alcançadas, as diferenças entre os cenários para um mesmo ponto foram inferiores a 0,5°C, indicando que as variações no formato dos edifícios não impactaram significativamente o microclima da fração urbana simulada.

A fim de analisar qualitativamente os resultados mais discrepantes, o Quadro 38 apresenta os perfis e mapas 2D dos dados da TRM dos cenários FF-T x LL-BPV, na altura do pedestre (1,5m), para os seguintes períodos: manhã (às 9h), tarde (às 15h), e noite (às 21h). Os perfis e mapas 2D dos demais cenários estão apresentados no Apêndice E.

Quadro 38. Perfis e Mapas 2D dos dados de TRM dos cenários FF-T e LL-BPV, na altura do pedestre (1,5m), para o período quente e seco.



Fonte: Elaborado pela Autora.

Às 9h, os perfis demonstram a redução da TRM no perímetro que corresponde às áreas sombreadas pelas edificações verticalizadas, que ocuparam maior extensão no cenário LL-BPV. No cenário FF-T, a influência da geometria urbana na TRM abrangeu somente a camada Camada do Dossel Urbano (*Urban Canopy Layer* – UCL). Acima dessa camada, a TRM permaneceu igual ou maior que 56,3°C. Já no cenário LL-BPV, o uso de vegetação nas calçadas reduziu os valores da TRM na Camada do Dossel Urbano, e também exerceu influência nas demais camadas que compõem a Camada Limite Urbana (*Urban Boundary Layer* – UBL), onde foi observada a formação de bolsões menos aquecidos na Camada de Mistura (*Mixed layer* – ML). Nos mapas 2D a nível do pedestre, as áreas com menor TRM são zonas sombreadas. No cenário com o melhor desempenho térmico, o LL-BPV, os valores da TRM foram iguais ou menores que 29,3°C em quase toda a malha urbana. Semelhante ao observado nos perfis, os efeitos de amenização térmica pelo uso das árvores nas calçadas ultrapassaram às margens urgentes aos edifícios, alcançando as bordas dos cenários simulados. O que reforça o papel da vegetação em conformar um microclima com condições favoráveis ao conforto térmico ao ar livre para além da escala do pedestre.

Pela tarde, às 15h, período com os valores mais elevados da TRM, na camada UCL do cenário LL-BPV, a dissipação do ar mais aquecido foi mais eficaz, e também alcançou valores mais baixos da TRM. O uso de vegetação arbórea nas calçadas potencializou esse resultado, visto que na escala do pedestre a TRM variou entre 40,3°C e 42,0°C, já no interior do cânion variou entre 53,9°C e 55,6°C. Na análise dos mapas 2D, evidenciou-se a importância de inserir elementos que projetem uma área de sombra que acompanhe o percurso do pedestre, ao longo do cânion urbano. No perímetro da calçada, com a inserção das árvores, a TRM variou entre 38,6°C e 42,0°C; enquanto sem o sombreamento gerado pela copa das árvores, a variação foi de 65,8°C a 67,5°C. O que corresponde a uma redução de até 28,9°C. Esse efeito também foi observado por Srivanit e Jareemit (2020), ao analisar padrões de plantio de árvores no conforto térmico, em cânions urbanos para a cidade de Bangkok (de clima tropical seco). Como resultado, os autores indicaram que a sombra de árvores e edifícios pode reduzir o valor do PET em 8,6 °C, melhorando as condições de conforto térmico ao ar livre em até 82%. A projeção da área sombreada e a porosidade da malha urbana no cenário LL-BPV foram maiores, o que favoreceu à redução da TRM e à maior velocidade das trocas térmicas do interior do cânion com a abóbada celeste. Assim, foi gerado um efeito de resfriamento na conformação do microclima na escala do pedestre, corroborando com a pesquisa de Yahia et al. (2017).

Às 21h, os perfis demonstraram na camada UCL, especificamente na altura do pedestre, a área mais aquecida, com TRM que varia entre 19,3°C e 21,4°C, foi menor no cenário FF-T. No cenário LL-BPV, é possível observar que, na altura do pedestre, a obstrução gerada pela copa das árvores, aprisionou a energia emitida pelas superfícies do interior do cânion urbano ao passo que reduziu a velocidade das trocas térmicas, o que também pode ser observado nos mapas 2D. Contudo, sob os edifícios e nos recuos laterais, os efeitos de amenização térmica foram superiores no cenário LL-BPV, alcançando valores de TRM entre 17,2°C e 17,5°C.

Com base nas análises estatísticas, a partir dos parâmetros de modelagem dos cenários urbanos hipotéticos simulados, o remembramento tipo LL e o edifícios em formato base com torre e adoção de *pilotis* reduziram a TRM, especialmente no horário mais crítico do dia (às 15h). O tipo de remembramento LL (Lado à Lado) favorece o aumento da área de fachada das edificações, ao passo que gera o efeito de fachada contínua, em comparação com o tipo de remembramento FF (Frente e Fundo). Com relação ao formato dos edifícios, o base com torre também aumenta a área de fachada e gera uma maior obstrução da abóbada celeste, na escala do pedestre. O fator que exerceu maior influência na amenização térmica foi o uso de vegetação arbórea nas calçadas, com o fim de compor uma forma urbana com menor grau de obstrução da abóbada celeste (FCV), de forma a possibilitar o uso de recuo progressivo, que permite uma melhor permeabilidade dos ventos na malha urbana (Brandão, 2020). O sombreamento gerado pelas copas das árvores favoreceu na diminuição da TRM durante o período diurno. Dada a estreita ligação entre a variável analisada e o índice PET, evidencia-se o seu potencial de contribuir para o conforto térmico ao ar livre na escala do pedestre.

4.1.2 Umidade Relativa do Ar

Os dados horários da umidade relativa do ar em um ciclo de 24h são ilustrados para a via secundária (Figura 61) e para a calçada (Figura 62). Para efetuar a análise comparativa entre os cenários urbanos hipotéticos, foram elaborados os gráficos *Boxplot* para a via secundária e a calçada, ilustrados nas Figuras 63 e 64, respectivamente.

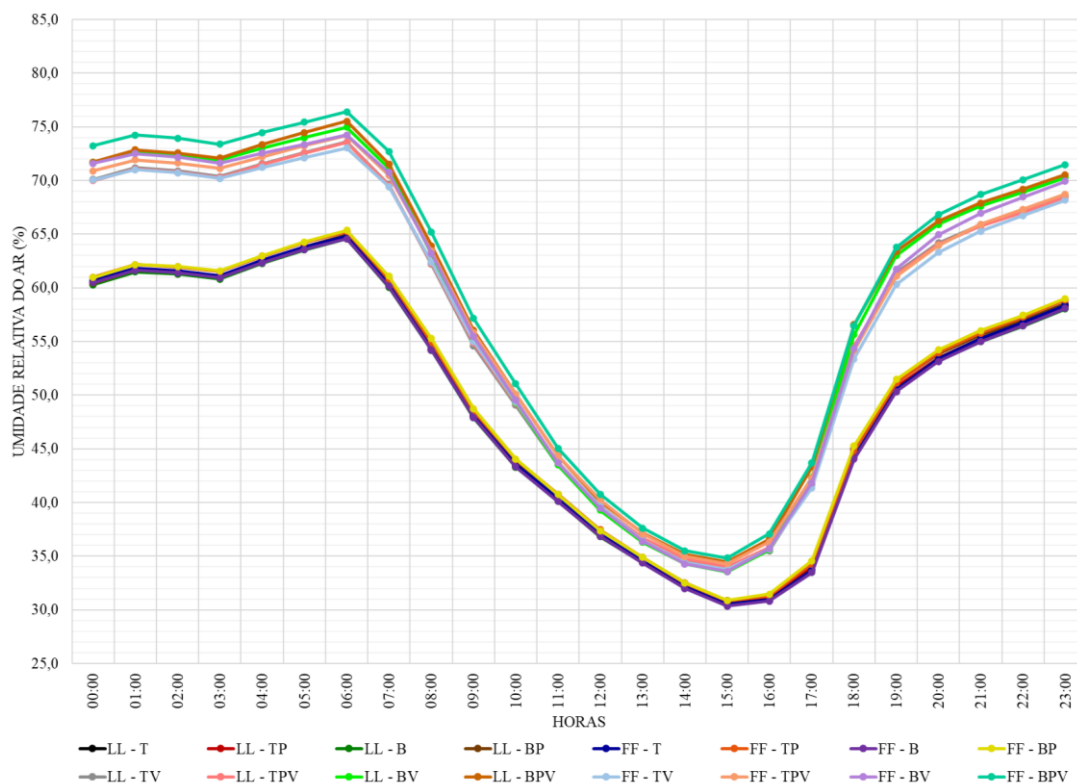


Figura 61 – Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Via Secundária – Umidade Relativa do Ar.

Fonte: Elaborado pela Autora.

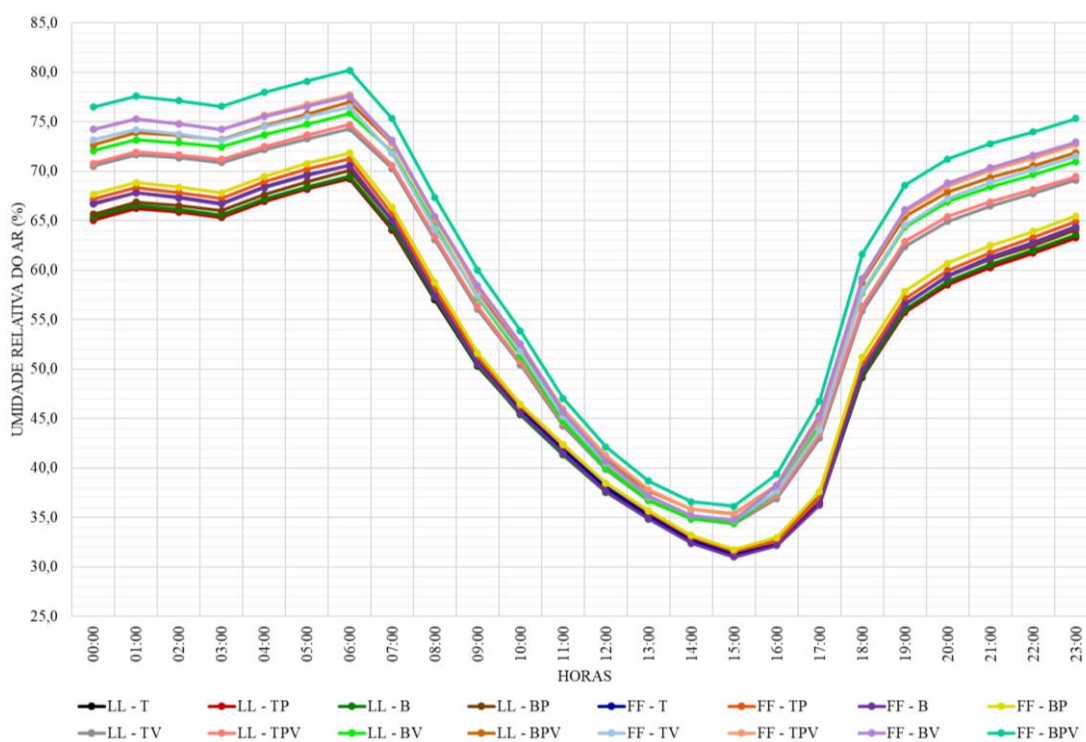


Figura 62 – Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Calçada – Umidade Relativa do Ar.

Fonte: Elaborado pela Autora.

Com relação à variação horária, observou-se que no período diurno, a partir das 6h da manhã, os valores diminuem, progressivamente, até o final da tarde, quando às 15h atingem o valor mínimo e começam a aumentar. Os cenários urbanos sem o uso de vegetação arbórea nas calçadas apresentaram umidades relativas inferiores a 50% entre as 9h e 18h, na via secundária, e entre 10h e 17h, na calçada. Na via secundária (ver Figura 61), a total ausência de vegetação próximo ao ponto em que os dados foram extraídos justificam as pequenas diferenças na umidade relativa do ar obtida entre os cenários urbanos hipotéticos, inferiores a 1%, variando entre 47,9% a 48,8% às 9h, entre 30,3% e 30,9% às 16h e entre 55% e 56% às 21h. Com a inserção da vegetação arbórea, ocorreu uma variação de até 3,4%, com uma variação entre 54,% a 57,1% às 9h, entre 33,6% a 34,8% às 15h e entre 65,3% e 68,7% às 21h.

Com relação à calçada da via principal, a presença de árvores de grande porte no canteiro central resultou em maiores diferenças nas umidades relativas obtidas em comparação à via secundária. Nos cenários sem a inserção de árvores nas calçadas, houve uma variação de até 1,6%: entre 50,3% a 51,6% às 9h, entre 31,1% a 31,8% às 15h e entre 60,2% a 61,8% às 21h. Com a inserção de árvores nas calçadas, a variação da umidade relativa do ar aumentou para até 4% (entre 56,0% a 60,0%) às 9h, 1,7% (entre 34,4% a 36,1%) às 15h, e 6,3% (entre 66,5% a 72,8%) às 21h. Esses dados sugerem que na presença de vegetação, o aproveitamento da umidade relativa do ar pode ser potencializado a depender da forma dos edifícios, na conformação do microclima em cânions urbanos. O que aponta a importância de abordar esse ponto no processo de planejamento urbano das cidades.

As Figuras 63 e 64 apresentam os gráficos *boxplot* da umidade relativa do ar na via secundária e na calçada. Na via secundária (Ver Figura 63), a partir da análise estatística comparativa, torna-se possível observar o tipo de distribuição como assimétrica negativa, indicando que a maioria dos dados está no lado superior, mas existem valores discrepantes ou uma faixa estendida de valores mais baixos. Pelo tamanho da caixa (medido pelo intervalo entre o 3º e 1º quartil), os cenários com o uso de vegetação nas calçadas têm uma variabilidade dos dados maior, em comparação com os cenários sem uso de vegetação. Resultado semelhante foi encontrado por Souza et al. (2024), que observaram uma variação de até 2,2% entre cenários urbanos hipotéticos sem e com o incremento de vegetação arbórea, no Centro Histórico de Cuiabá/MT, região de clima tropical continental. Ramyar et al. (2019) afirmaram que o plantio de árvore é a forma mais eficaz para o aumento da umidade relativa do ar no tipo de clima do presente objeto de estudo.

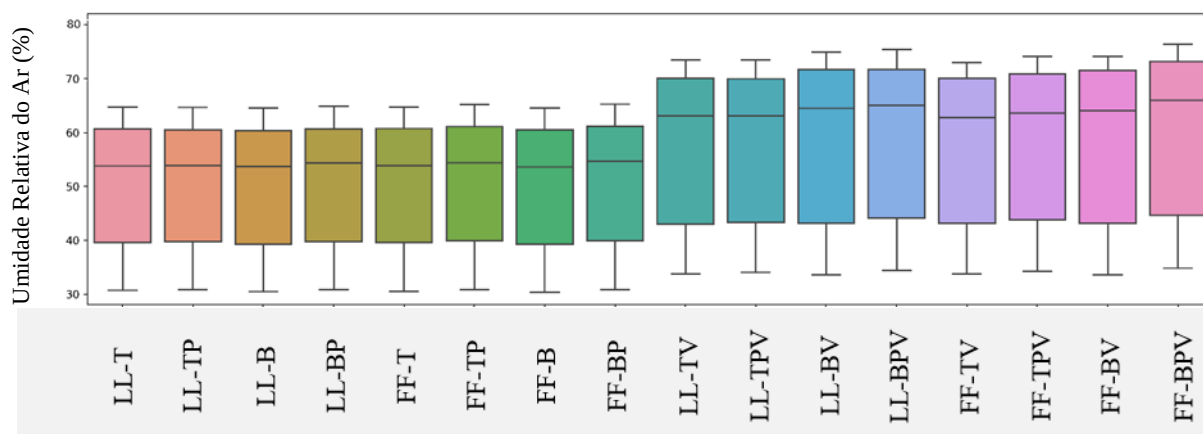


Figura 63 – Gráfico *Boxplot* da Via Secundária – Umidade Relativa do Ar.

Fonte: Elaborado pela Autora.

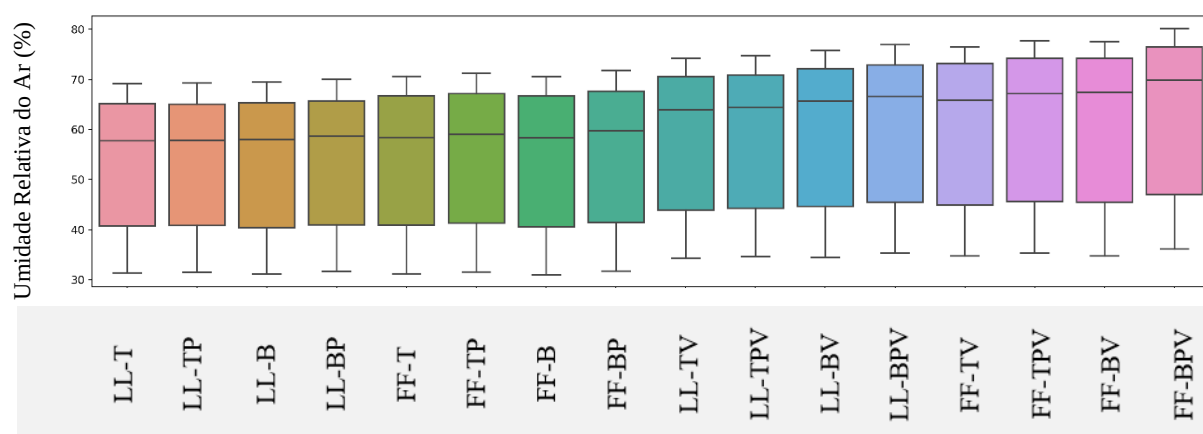


Figura 64 – Gráfico *Boxplot* da Calçada - Umidade Relativa do Ar.

Fonte: Elaborado pela Autora.

O Quadro 39 apresenta os valores médios, mínimos e máximos da UR dos cenários urbanos simulados, destacando-se os menores valores mínimos (em vermelho) e os maiores valores máximos (em azul) obtidos nos diferentes cenários, sem e com inserção da vegetação (em verde). Nota-se que em ambos os pontos de análise o uso da vegetação favoreceu o aumento da umidade relativa do ar. Os valores da umidade relativa do ar média foram mais elevados nos cenários urbanos hipotéticos com a inserção da vegetação arbórea nas calçadas, em comparação com os cenários sem o elemento verde. Na via secundária, a umidade relativa do ar média, entre os cenários simulados sem o uso de vegetação, variou entre 49,81% e 50,60%; enquanto na calçada variou entre 53,35% e 55,07%. Entre os cenários com o uso das árvores, a variação se elevou para: entre 57,37% e 59,96%, na via secundária; e entre 58,34% e 62,98% na calçada da via principal. O cenário FF-BPV apresentou os valores mais elevados da média, mínima e máxima, o que lhe confere uma amplitude de 41,59%.

Quadro 39. Valores médios, mínimos e máximos diários da Umidade Relativa do Ar.

Cenários	Via Secundária (Ponto 02)			Calçada (Ponto 03)		
	Umidade Relativa do Ar Média (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Umidade Relativa do Ar Média (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)
LL-T	50,0	30,7	64,8	53,4	31,4	69,2
LL-TP	50,1	30,9	64,7	53,4	31,5	69,3
LL-B	49,8	30,5	64,6	53,4	31,1	69,5
LL-BP	50,3	30,8	64,9	54,0	31,7	70,1
FF-T	50,0	30,6	64,8	54,1	31,2	70,6
FF-TP	50,5	30,8	65,3	54,6	31,6	71,2
FF-B	49,8	30,3	64,6	54,0	31,0	70,6
FF-BP	50,6	30,9	65,4	55,1	31,8	71,8
LL-TV	57,6	33,7	73,6	58,3	34,4	74,3
LL-TPV	57,6	34,0	73,6	58,7	34,6	74,7
LL-BV	58,6	33,6	75,0	59,6	34,5	75,8
LL-BPV	59,1	34,5	75,5	60,5	35,4	77,0
FF-TV	57,4	33,7	73,0	60,0	34,7	76,5
FF-TPV	58,2	34,3	74,2	61,0	35,3	77,7
FF-BV	58,3	33,6	74,2	61,0	34,8	77,5
FF-BPV	60,0	34,8	76,4	63,0	36,1	80,2

Fonte: Elaborado pela Autora.

No dia simulado, o cenário FF-B apresentou os menores valores da umidade relativa do ar mínima diurna entre os cenários urbanos simulados, com 30,3% no ponto situado na via secundária e 31% no ponto na calçada. A adoção de *pilotis* elevou os dados da umidade relativa do ar nos cenários urbanos. Sobre os edifícios, o formato base com torre obteve um desempenho mais satisfatório nos dois pontos de análise. Convém ressaltar que a umidade relativa do ar menor que 30% compromete a saúde humana, ao passo que impossibilita a redução da temperatura do ar no microclima, tornando necessário a adoção de estratégia bioclimática para o resfriamento evaporativo (Givoni, 1992).

O Quadro 40 apresenta os valores referentes à diferenciação térmica entre o cenário com o valor mais elevado da umidade relativa do ar mínima diurna (%), e os demais analisados. De maneira geral, o cenário com os valores mais elevados da umidade relativa do ar mínima diurna foi o FF-BPV, com + 4,48% na via secundária, e + 5,13% na calçada, em relação ao cenário FF-B. No entanto, para o clima (semiárido) e período do ano (verão - quente e seco) analisado, esse incremento não gerou a redução da temperatura do ar, assim, foi pouco significativo. Esse dado pode ser justificado pelo número insuficiente de árvores e a presença de áreas impermeabilizadas. Para estimular o aproveitamento do resfriamento evaporativo como

estratégia bioclimática, seria interessante compor, nos cânions urbanos, uma Infraestrutura Verde (IV).

Quadro 40. Valores de diferenciação térmica, identificados a partir da umidade relativa do ar mínima diurna (%) entre o cenário FF-B e os demais cenários urbanos simulados.

FF-B	Diferença: Cenário – (FF-B)															
Um. R. do Ar mínima (%)	LL - T	LL - TP	LL - B	LL - BP	FF - T	FF - TP	FF - B	FF - BP	LL - TV	LL - TPV	LL - BV	LL - BPV	FF - TV	FF - TPV	FF - BV	FF - BPV
Via Secundária 30,34	+0,40	+0,52	+0,11	+0,50	+0,21	+0,48	30,34	+0,52	+3,39	+3,67	+3,21	+4,11	+3,39	+3,95	+3,22	+4,48
Calçada 31,00	+0,40	+0,52	+0,14	+0,65	+0,23	+0,57	31,00	+0,76	+3,36	+3,64	+3,47	+4,35	+3,73	+4,33	+3,76	

Fonte: Elaborado pela Autora.

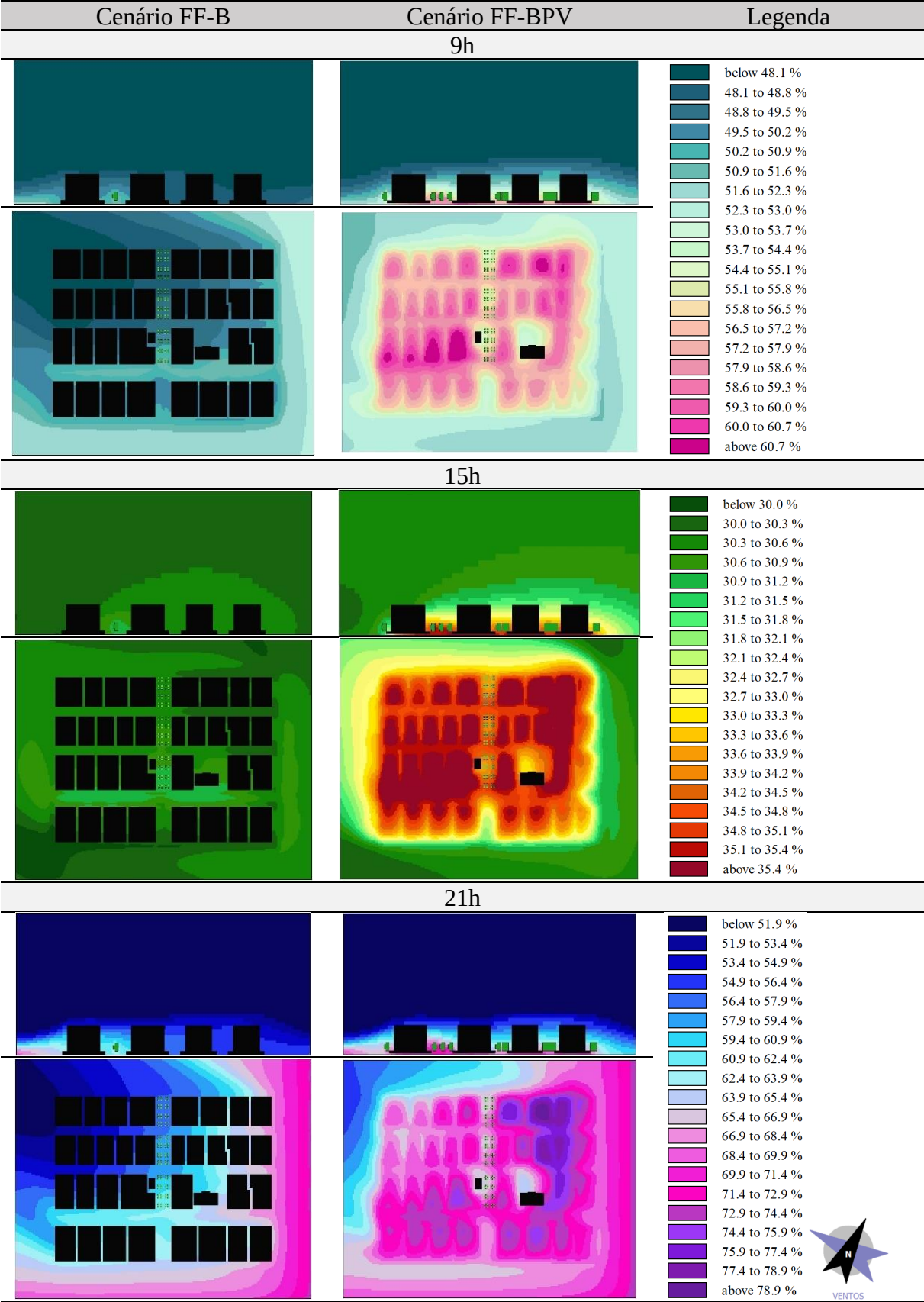
Para analisar qualitativamente os cenários com o desempenho menos e mais satisfatório, o Quadro 41 apresenta os perfis e mapas 2D dos dados da umidade relativa do ar dos cenários FF-B e FF-BPV, na altura do pedestre (1,5m), para o período da manhã (às 9h), tarde (às 15h), e noite (às 21h). No Apêndice E estão presentes os perfis e mapas 2D dos demais cenários. A variação dos dados da umidade relativa do ar nos períodos da manhã, tarde e noite foram: às 9h, entre 48,1% e 60,7%, às 15h, entre 30,0% e 35,4%, e, por fim, às 21h, entre 51,9% e 78,9%. Nos perfis, às 9h, tornou-se evidente a influência do canteiro central arborizado nos cenários sem o uso de vegetação nas calçadas. No cenário FF-B, no perímetro da calçada a nível do pedestre, foi observado os valores mais elevados da umidade relativa do ar, entre 50,2% e 51,6%; já na via secundária, os valores diminuem para entre 48,1% e 48,8%, o que corresponde a uma diferença de até 3,5% entre os pontos. No cenário FF-BPV, a umidade relativa do ar variou entre 57,9% e 58,6% na calçada, correspondendo a um aumento de até 8,4%. Na via secundária, a umidade relativa do ar variou entre 57,2% e 57,9%, gerando um aumento de até 9,8%, em comparação com o mesmo ponto no cenário FF-B. Esse efeito de amenização térmica pode ser percebido na camada UCL e SL. Nos mapas em 2D, os valores mais elevados da umidade relativa do ar (acima de 60,7%) foram observados abaixo dos *pilotis*.

Às 15h, período mais crítico do dia, tem-se os menores valores da umidade relativa do ar, variando entre 30,0% e 35,4%. Os perfis demonstraram que os valores mais elevados da variável estão localizados abaixo da copa das árvores. No cenário FF-B, a umidade relativa do ar varia entre 30,9% e 31,2% no meio do canteiro central a nível do pedestre, e varia entre 30,3% e 30,6% na última rua paralela à direita. No cenário FF-BPV, a umidade relativa do ar alcança valores acima de 35,4% no primeiro ponto; e varia entre 34,8% e 35,1% no segundo ponto. Enquanto no primeiro ponto a diferença entre os cenários com e sem vegetação pode chegar a mais de 4,5%; no segundo ponto pode ser de até 4,8%. A análise dos mapas 2D tornou evidente os padrões de desempenho da umidade relativa do ar observados no período da manhã. No cenário FF-BPV, grande parte da malha urbana apresentou valores acima de 35,4%. Em contrapartida, no cenário FF-B, o valor mais alto alcançado foi de 31,2%, no perímetro equivalente ao canteiro central arborizado. Esse resultado demonstrou que a inserção das árvores pode incrementar os dados da umidade relativa do ar. Contudo, para alcançar valores significativos para a amenização térmica e promover o uso do resfriamento evaporativo como estratégia bioclimática, sugere-se compor uma IV, por meio da:

- Inserção de um maior número de árvores, podendo ser estimulado o plantio no interior dos lotes, e o uso de vazios urbanos como áreas verdes;
- Junto às árvores, realizar o plantio de arbustos;
- Promoção da adoção de fachadas e coberturas verdes;
- Substituição das áreas impermeabilizadas pelo solo natural ou com grama.

Os valores mais elevados da umidade relativa do ar ocorreram às 21h, com valores que variam entre abaixo de 51,9% e acima de 78,9%. Nos perfis, é possível observar a influência da vegetação arbórea no aumento da umidade relativa do ar. Seus efeitos abrangem desde a escala no nível do pedestre, como também a UCL e a RSL. No nível do pedestre, especificamente no perímetro que corresponde a calçada da via principal, a umidade relativa do ar varia entre 60,9% e 62,4% no cenário FF-B; enquanto varia entre 71,4% e 72,9% no cenário FF-BPV, o que corresponde a uma diferença de até 12% em função dos parâmetros de modelagem dos cenários, especialmente o uso de vegetação. Já no centro da via secundária, a umidade relativa do ar variou entre 54,9% e 56,4% no cenário FF-B, e entre 66,9% e 68,4% no cenário FF-BPV. Isso indica uma diferença de até 13,5% entre os mesmos pontos, mas nos dois cenários apresentados.

Quadro 41. Perfis e Mapas 2D dos dados de umidade relativa do ar dos cenários FF-B e FF-BPV, na altura do pedestre (1,5m), para o período quente e seco.



O comportamento da umidade relativa do ar com relação aos parâmetros de modelagem citados demonstrou haver uma relação entre a mesma com a TRM e a direção e velocidade dos ventos. Sobre a TRM, nos cenários com menor proporção de área edificada (reminbramento tipo FF) e nas áreas sombreadas, o valor da umidade foi mais elevado, pois a carga de energia, em forma de calor, a ser emitida pelas superfícies do cânion urbano foi menor, enquanto a área de sombra foi maior. Na velocidade e direção dos ventos, a permeabilidade dos ventos foi um fator determinante na distribuição dos efeitos da vegetação arbórea nos locais mais afastados da mesma. Esse resultado apontou o potencial de conciliar aproveitamento das três principais estratégias bioclimáticas para o clima urbano do objeto de estudo da presente pesquisa: o sombreamento, ventilação natural e resfriamento evaporativo.

De maneira geral, os valores mais altos da umidade relativa do ar foram observados pela noite. No período diurno, observou-se que somente o plantio linear de árvores nas calçadas gerou um incremento da variável climática em questão pouco significativo para a amenização térmica por meio do resfriamento evaporativo. Esse resultado reforça a imprescindibilidade de aumentar os elementos verdes⁴⁷ no meio ambiente urbano. Diante da análise qualitativa dos perfis e mapas em 2D da umidade relativa do ar foi possível apontar a necessidade de compor uma Infraestrutura Verde no interior de cânions urbanos.

4.1.3 Velocidade e Direção dos Ventos

Acerca dos resultados obtidos, é importante destacar que a velocidade dos ventos se apresenta de forma constante ao longo do dia no *software* ENVI-met, por isso o comportamento dos dados se mostrou linear. Diferente do que acontece na realidade, em que a velocidade dos ventos varia entre os períodos da madrugada, manhã, tarde e início da noite, conforme apresentado no subtítulo 2.2 (O Clima Semiárido de Arapiraca) da presente pesquisa.

Os resultados dos dados da velocidade dos ventos foram analisados, inicialmente, a partir dos gráficos dos dados horários em um ciclo de 24h na via principal, secundária e na calçada, ilustrados nas Figuras 65 e 66, respectivamente. Em um segundo momento, foi feita a análise comparativa entre os cenários urbanos hipotéticos a partir dos gráficos *Boxplot* na via secundária (Figura 67) e na calçada (Figura 68). Por fim, foi elaborado um quadro com o intuito

⁴⁷ A exemplo de elementos verdes, tem-se: telhado e fachadas verdes, solo natural ou com grama, arbustos e árvores nas calçadas e interior dos lotes, e parques com vegetação de grande porte.

de identificar os cenários que alcançaram as maiores e menores velocidade dos ventos. Destes, dois cenários foram selecionados para análise dos perfis e mapas 2D.

Como a velocidade dos ventos se comporta de forma constante ao longo do dia, o horário selecionado para análise foi às 15h, por ser o período mais crítico do dia, no contexto climático local. A incidência do vento em relação à fração urbana simulada é oblíqua (-28°). As Figuras 65 e 66 apresentam os gráficos com os dados horários da velocidade dos ventos em um ciclo de 24h, ao centro da via secundária e na calçada da via principal:

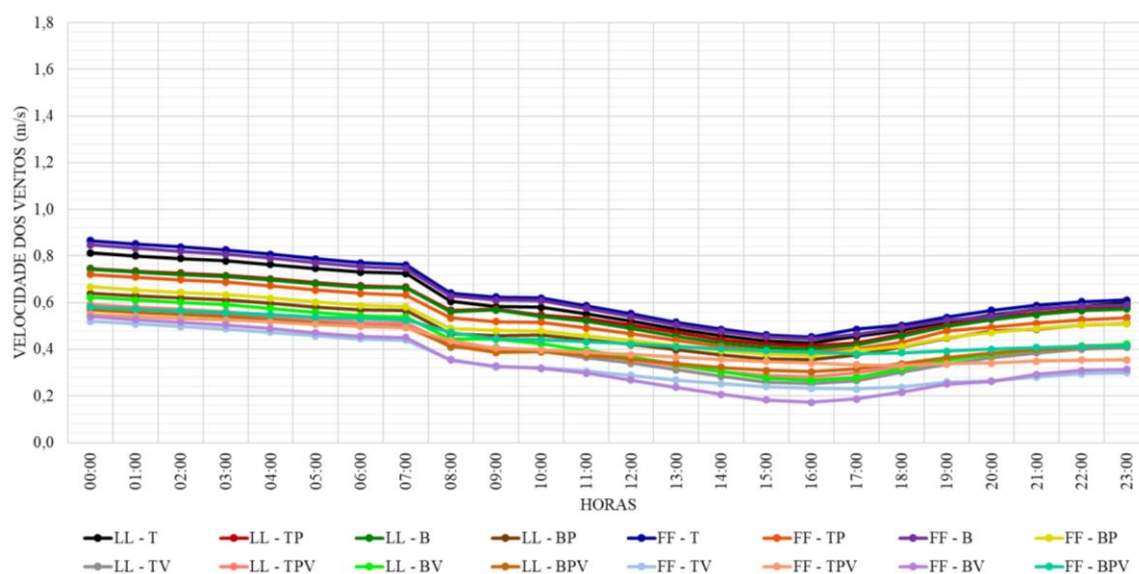


Figura 65 – Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Via Secundária – Velocidade dos Ventos.

Fonte: Elaborado pela Autora.

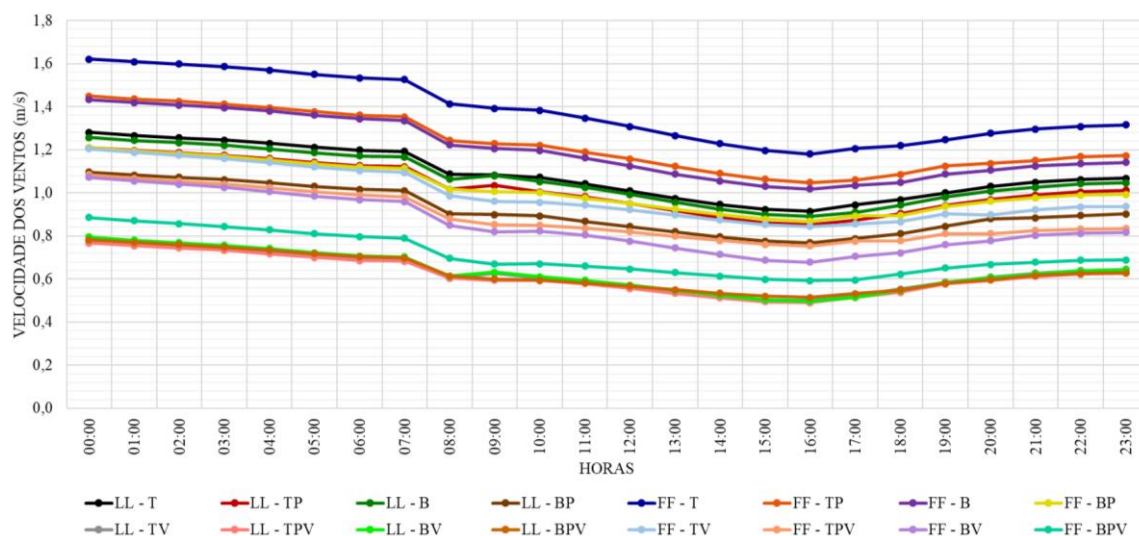


Figura 66 – Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da calçada – Velocidade dos Ventos.

Fonte: Elaborado pela Autora.

De maneira geral, a análise dos resultados indicou que os cenários sem o uso de vegetação nas calçadas apresentaram valores mais elevados da velocidade dos ventos, em comparação aos cenários em que a vegetação arbórea foi inserida. Ademais, houve uma redução da velocidade dos ventos na via secundária. Ambas as vias apresentam a mesma orientação e altura das edificações, no entanto, a relação H/W é diferente (ver Quadros 34). Enquanto a via secundária conta apenas com a via de sentido duplo e as calçadas às margens, o outro ponto conta com duas vias de sentidos duplos, separadas por um canteiro central arborizado e as calçadas (de maior largura) em suas margens (ver Figuras 49 e 50). Nesse sentido, os resultados demonstraram que há uma desaceleração dos ventos em cânions urbanos de vias mais estreitas, resultado também observado por diversos autores (Johansson, 2006; Farhadi et al., 2019; Ramyar et al., 2019; Feng et al., 2021). A exemplo, tem-se a pesquisa de Othman e Alshboul (2020), que ao estudar a influência da forma urbana para o clima (semiárido) da cidade de Al-Sharq/Jordânia, observaram que uma rede viária de maior largura e fachada contínua pode estimular o efeito de canalização dos ventos, enquanto uma malha urbana mais permeável provoca uma redução da velocidade dos ventos.

Os autores ainda afirmaram que edifícios com diferentes alturas estimulam o aumento da velocidade dos ventos. Isso porque a velocidade dos ventos no nível do pedestre está diretamente relacionada à rugosidade, fator que pode ser utilizado para mensurar a intensidade dos efeitos da morfologia urbana (Oke, 1978; Chen et al., 2017). Diversos estudos demonstram que quanto menor rugosidade, menor a quantidade do fluxo de ar que pode passar pela camada limite (Wen; Juan; Yang, 2016; Mohammed; Salman, 2018; Lobaccaro et al., 2019)⁴⁸. A presente pesquisa adotou como recorte os efeitos no microclima, a partir do conforto térmico ao ar livre, em um cenário onde a verticalização ocorra nos limites da saturação da ocupação urbana em todos os lotes. Por essa razão os edifícios apresentam a mesma altura, correspondendo a uma baixa rugosidade.

As Figuras 67 e 68 apresentam os gráficos *boxplot* da velocidade dos ventos na via secundária e na calçada. Os Gráficos apontam uma distribuição assimétrica positiva. Na via secundária, houve uma maior variabilidade dos dados (dispersão) em torno da mediana. Em acordo com a análise dos dados horários, a velocidade dos ventos alcançada no ponto situado ao centro da via secundária foi inferior, ao comparar com o ponto situado na calçada da via principal. Nesse contexto, Feng et al. (2021) apontaram que o FCV tem uma forte correlação

⁴⁸ Estudos anteriores que abordaram cenários urbanos hipotéticos com edifícios de diferentes alturas nesta mesma fração urbana corroboram com as pesquisas já mencionadas (Brandao, 2020; Brandão, Barbosa, 2024).

com a velocidade média dos ventos, indicando que cada aumento de 0,1 no FCV resulta em um aumento de 0,056 na razão média da velocidade do vento ao nível do pedestre. Convém pontuar que no primeiro ponto (via principal) o tipo de remembramento apresentou pouca influência no aumento da velocidade dos ventos, enquanto no segundo ponto (calçada), a influência foi maior.

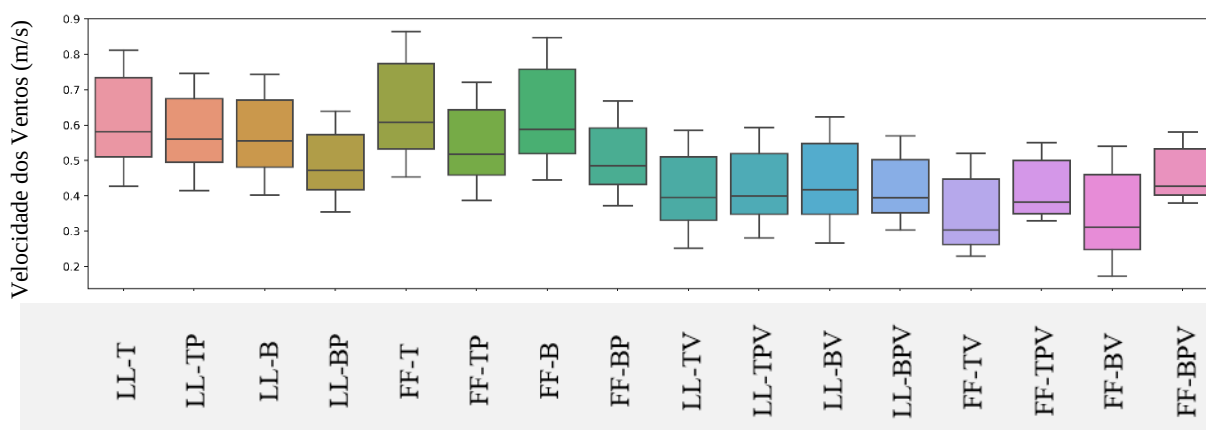


Figura 67 – Gráfico Boxplot da Via Secundária - Velocidade dos Ventos.

Fonte: Elaborado pela Autora.

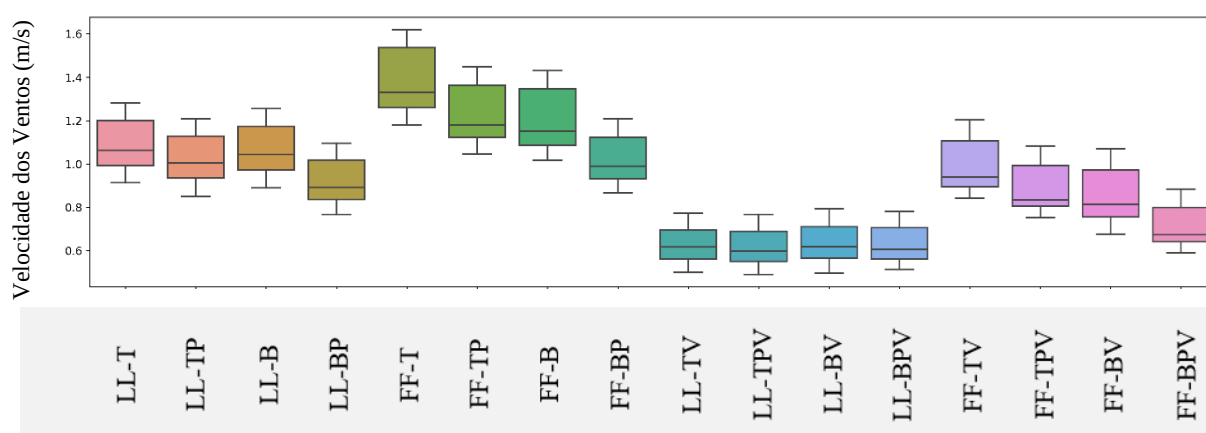


Figura 68 – Gráfico Boxplot da Calçada - Velocidade dos Ventos.

Fonte: Elaborado pela Autora.

O uso da vegetação reduziu a velocidade dos ventos, pois as árvores de copa densa têm um maior efeito de obstruir a ventilação natural (Kouklis e Yiannakou, 2021). O mesmo comportamento foi observado por Liu, Zheng e Yang (2023), ao estudar o impacto da arborização urbana no conforto térmico em cânions urbanos. Entre os cenários, a presença de vegetação, o formato dos edifícios em base com torre e a adoção de *pilotis* tenderam a aumentar a porosidade da malha urbana, o que favorece à ventilação cruzada. Nesse contexto, o efeito de canalização do fluxo de ar diminui, o que reduz a velocidade dos ventos, no entanto, a

permeabilidade do fluxo de ar à barlavento e à sotavento é beneficiada, como será abordado mais adiante, na análise qualitativa.

A respeito da mediana, medida de tendência central que representa o valor que divide um conjunto de dados em duas partes iguais, é possível observar uma variação dos valores entre os cenários, diferente do que ocorreu nas variáveis climáticas anteriores. Esse padrão de comportamento pode ser compreendido pela constância da velocidade dos ventos em cada simulação realizada, mediante o dado de entrada no cenário. Nesse sentido, pode-se observar uma forte proximidade entre os valores da mediana e da velocidade dos ventos média (ver Quadro 42). A respeito dos valores mínimos e máximos, os cenários sem o uso de vegetação e com menor grau de permeabilidade apresentaram os valores mais elevados da velocidade dos ventos. A exemplo, tem-se o cenário FF-T, que apresentou a velocidade mínima e máxima de 0,45m/s e 0,87m/s (na via secundária), respectivamente, enquanto o FF-TV, cenário urbano que apresenta o mesmo padrão de modelagem, diferindo apenas na presença de árvores nas calçadas, apresentou velocidades mínima e máxima 0,23 m/s e 0,52m/s.

Quadro 42. Valores médios, mínimos e máximos diários da Velocidade dos Ventos.

Cenários	Via Secundária (Ponto 02)			Calçada (Ponto 03)		
	Velocidade dos Ventos (m/s)	Mínimo (m/s)	Máximo (m/s)	Velocidade dos Ventos (m/s)	Mínimo (m/s)	Máximo (m/s)
LL-T	0,6	0,4	0,8	1,1	0,9	1,3
LL-TP	0,6	0,4	0,8	1,0	0,9	1,2
LL-B	0,6	0,4	0,7	1,1	0,9	1,3
LL-BP	0,5	0,4	0,6	0,9	0,8	1,1
FF-T	0,6	0,5	0,9	1,4	1,2	1,6
FF-TP	0,5	0,4	0,7	1,2	1,1	1,5
FF-B	0,6	0,5	0,9	1,2	1,0	1,4
FF-BP	0,5	0,4	0,7	1,0	0,9	1,2
LL-TV	0,4	0,3	0,6	0,6	0,5	0,8
LL-TPV	0,4	0,3	0,6	0,6	0,5	0,8
LL-BV	0,4	0,3	0,6	0,6	0,5	0,8
LL-BPV	0,4	0,3	0,6	0,6	0,5	0,8
FF-TV	0,4	0,2	0,5	1,0	0,8	1,2
FF-TPV	0,4	0,3	0,6	0,9	0,8	1,1
FF-BV	0,3	0,2	0,5	0,9	0,7	1,1
FF-BPV	0,5	0,4	0,6	0,7	0,6	0,9

Fonte: Elaborado pela Autora.

O Quadro 43 apresenta a comparação entre o cenário com o valor mais baixo da velocidade dos ventos mínima diurna (m/s), correspondentes aos cenários FF-BV (via secundária) e LL-TPV (calçada), e os demais analisados.

Quadro 43. Valores de diferenciação climática, identificados a partir da velocidade dos ventos mínima diurna (m/s) entre o cenário FF-BV (via secundária) e LL-TPV (calçada) e os demais cenários urbanos simulados, respectivamente.

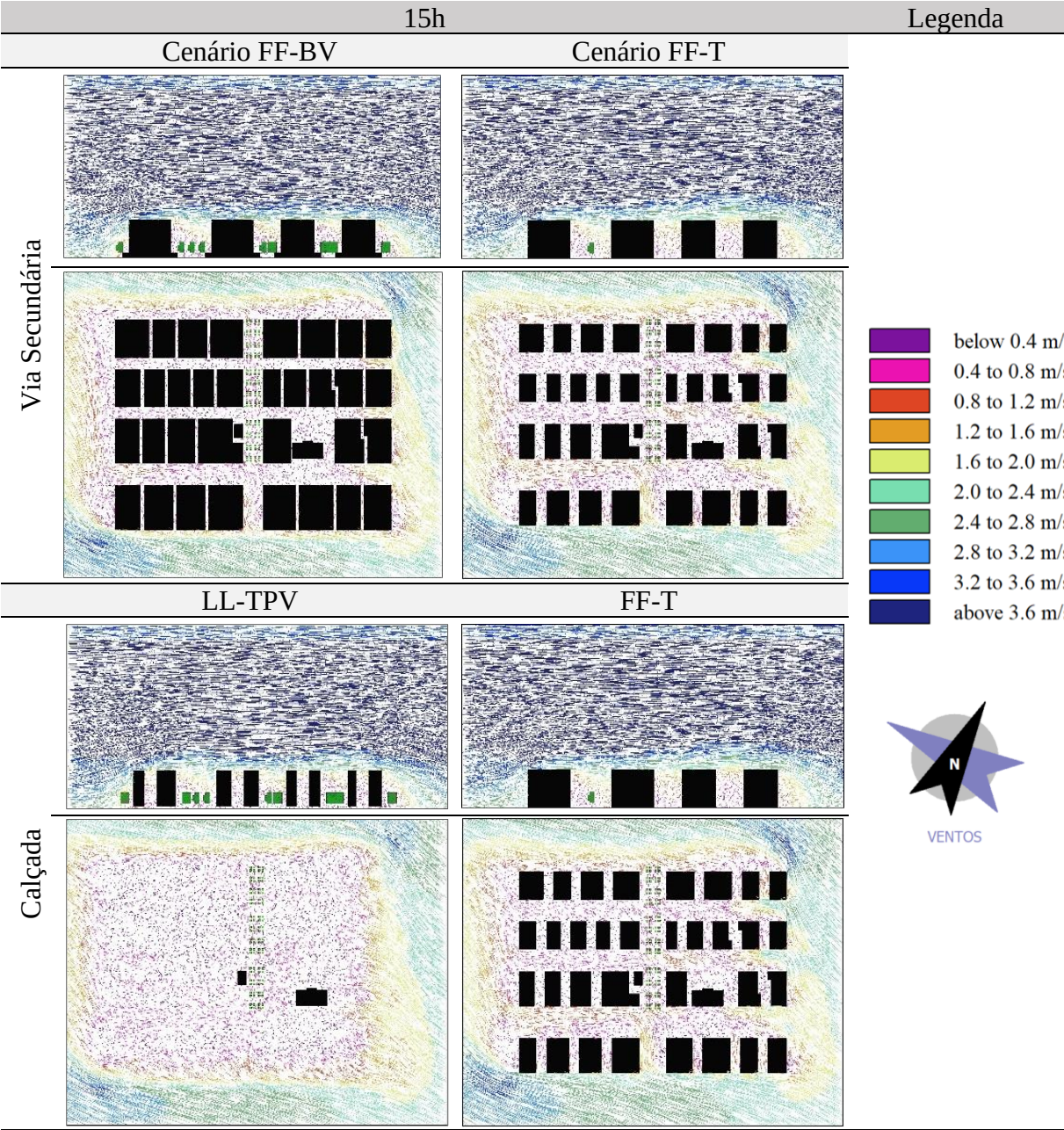
FF-T	Diferença: Cenário – (FF-TPV/ FF-BV)															
Velocidade dos ventos mínima (m/s)	LL - T	LL - TP	LL - B	LL - BP	FF - T	FF - TP	FF - B	FF - BP	LL - TV	LL - TPV	LL - BV	LL - BPV	FF - TV	FF - TPV	FF - BV	FF - BPV
Via Secundária	0,49	0,26	0,24	0,23	0,18	0,28	0,22	0,28	0,20	0,08	0,11	0,10	0,13	0,06	0,16	0,17
Calçada	0,49	+0,42	+0,36	+0,40	+0,28	+0,69	+0,56	+0,53	+0,38	+0,01	0,49	+0,01	+0,03	+0,35	+0,26	+0,19

Fonte: Elaborado pela Autora.

A partir dos valores de diferenciação climática da velocidade dos ventos, observou-se que o cenário com o desempenho menos satisfatório diferiu entre os pontos de análise, diferente do que ocorreu nas demais variáveis climáticas. Na via secundária, o cenário FF-BV apresentou a menor velocidade dos ventos mínima diurna, com 0,17m/s; enquanto no ponto situado na calçada da via principal, foi de 0,49m/s. O cenário que mais se distanciou desse resultado foi o FF-T, em ambos os pontos de análise, com 0,45m/s na via secundária e 1,18m/s na calçada. Com relação aos demais cenários, o uso de vegetação arbórea foi o fator de maior impacto na redução da velocidade do fluxo de ar, seguido pela junção: edifícios no formato base com torre + adoção de *pilotis*, e o tipo de remembramento dos lotes LL. Isto corrobora com as análises anteriores, em que uma malha urbana com menos elementos que obstruam o fluxo do ar, tende a gerar a canalização do mesmo, aumentando a velocidade dos ventos. No entanto, esse efeito pode gerar a redução da velocidade dos ventos nas vias perpendiculares e à sotavento das edificações, como observou Brandão (2020), em estudos anteriores para a cidade de Arapiraca/AL.

Por fim, o Quadro 44 apresenta os perfis e mapas 2D dos cenários urbanos simulados, gerados no *plugin* Leonardo, interface do *software* ENVI-met, às 15h, horário selecionado por ser o período mais crítico do dia, no contexto climático local.

Quadro 44. Perfis e Mapas 2D dos dados de umidade relativa do ar dos cenários FF-BV, LL-TPV e FF-T na altura do pedestre (1,5m), para o período quente e seco.



Fonte: Elaborado pela Autora.

Nos perfis, é possível observar a influência da rugosidade da superfície urbana no perfil vertical ou gradiente de vento. Segundo Oke et al. (2017), a rugosidade aerodinâmica da superfície está relacionada à altura dos elementos, à forma e à distribuição da densidade dos mesmos, o que afeta diretamente a velocidade das massas de ar que alcançam a estrutura urbana. Estudos em áreas com baixa rugosidade demonstram uma redução da velocidade média dos ventos na escala do pedestre (Chen et al., 2017; Kouklis; Yiannakou, 2021; Feng et al., 2021; Brandão; Barbosa, 2024). As imagens demonstraram que acima da camada RSL o movimento do fluxo de ar é laminar, com velocidade média superior a 3,6m/s; enquanto na camada RSL,

que compreende o topo dos edifícios até a camada ISL, o comportamento dos ventos pode ser caracterizado como fluxo de interferência de esteira, com variação da velocidade entre 2m/s e 3,2m/s. Na camada intraurbana (UCL), onde o movimento do fluxo de ar é turbilhonar, a velocidade média dos ventos chegou a apresentar valores inferiores a 0,4m/s, na escala do pedestre. A orientação da direção predominante dos ventos é oblíqua ao eixo do cânion, criando vórtices que fluem em espiral no interior do mesmo.

O formato dos edifícios foi um parâmetro de relevante influência entre os resultados, especialmente a adoção de *pilotis*. Na altura do pedestre, a adoção de *pilotis* gerou o aumento da permeabilidade dos ventos, anulando as áreas de estagnação de ar, e aumentou a velocidade dos ventos à barlavento e à sotavento. Com relação ao formato base com torre (B) ou somente torre (T), a segunda tipologia estimulou o aumento da velocidade dos ventos na escala do pedestre, devido a canalização do fluxo de ar nas vias, o que também foi observado na análise entre os cenários sem a inserção da vegetação. Nesse caso, é imprescindível ponderar sobre a conformação do microclima, a respeito das demais variáveis climáticas. Em cidades de clima quente e seco, o uso da ventilação natural como estratégia bioclimática se torna viável até o limite de temperatura do ar externa de 27°C ou entre 27°C e 32°C, quando a umidade relativa do ar apresentar valores entre 15% e 75%, pois a partir daí os ganhos térmicos por convecção a tornam indesejável para o conforto térmico ao ar livre (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014). Assim, ao considerar os resultados analisados quantitativamente, nos cenários FF-BV e LL-TPV a ventilação natural poderá proporcionar uma maior sensação de frescor ao pedestre.

Nos mapas 2D é possível observar que dois efeitos aerodinâmicos dos ventos se destacaram: canalização e *pilotis*. O efeito de canalização do fluxo ocorreu nas vias principais margeada pelos edifícios. O ponto negativo desse efeito é a pouca permeabilidade à sotavento das edificações e nas vias perpendiculares. A exemplo, no cenário FF-T a velocidade média dos ventos chegou a 2m/s, nas vias principais à barlavento; enquanto à sotavento dos edifícios e nas vias perpendiculares foi abaixo de 0,4m/s. Nesse último caso, ocorreram também áreas com estagnação de ar. Nos cenários com a adoção de *pilotis* esse efeito foi atenuado, pois se estimulou a permeabilidade dos ventos à sotavento, devido ao fluxo de ar que se movimenta sob o edifício. O cenário FF-BV, por exemplo, alcançou os mesmos 2m/s de velocidade média na via principal, mas a diferença consistiu na maior permeabilidade dos ventos, com velocidade média entre 0,4m/s e 0,8m/s, e a ausência de áreas com estagnação de ar à sotavento e nas vias perpendiculares. Com relação aos parâmetros de modelagem, o remembramento dos lotes tipo

FF gerou uma melhor permeabilidade do fluxo de ar, visto que o pouco espaçamento entre os recuos posteriores dos edifícios gerou áreas de estagnação do ar.

4.1.4 Índice de conforto PET

A análise do índice PET permitiu identificar os níveis de conforto térmico ao ar livre, na escala do pedestre, nos cânions urbanos simulados, a partir da fração urbana selecionada na cidade de Arapiraca/AL, objeto de estudo da presente pesquisa. A variação horária do PET em um ciclo de 24h nos Pontos 02 (ao centro da via secundária) e 03 (na calçada da via principal) podem ser vistos nas Figuras 69 e 70, respectivamente.

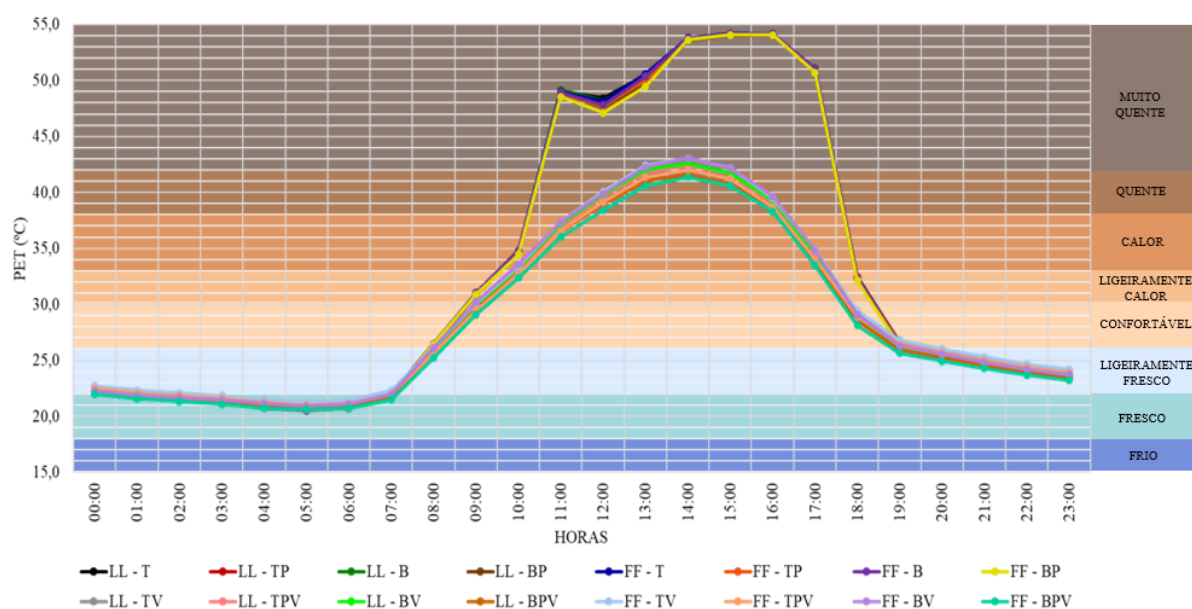


Figura 69 – Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Via Secundária – PET.

Fonte: Elaborado pela Autora.

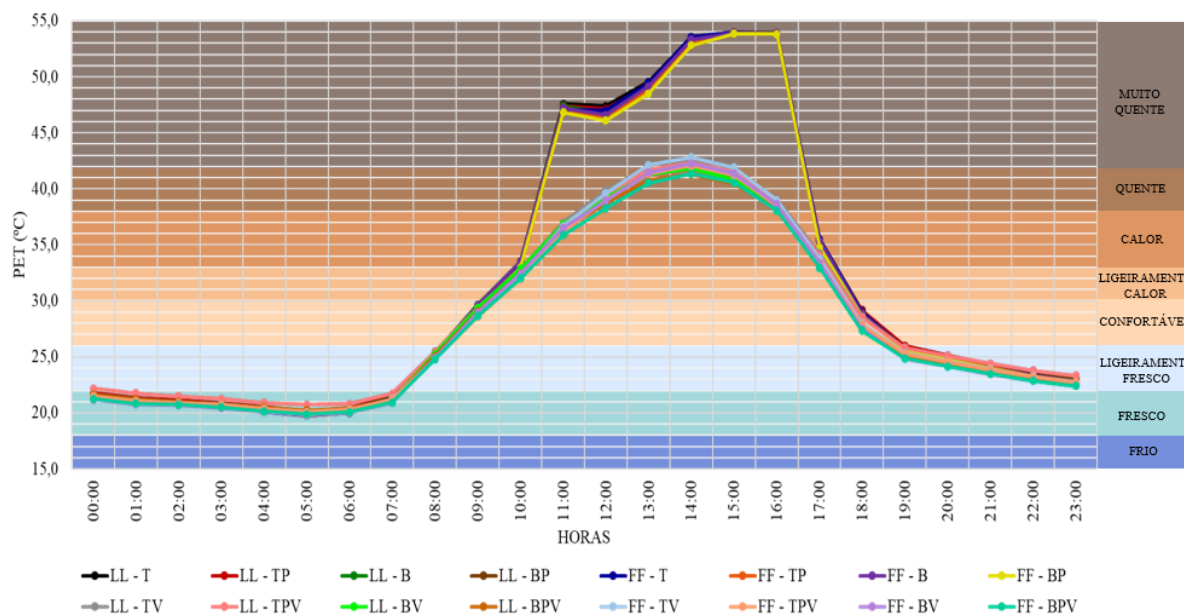


Figura 70 – Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Calçada – PET.

Fonte: Elaborado pela Autora.

A partir da análise da Figura 69, observou-se a semelhança entre o gráfico do PET e da TRM (ver Figuras 57 e 58)⁴⁹. Diversos estudos também observaram o mesmo padrão de comportamento, o que indica uma estreita relação entre o índice de conforto térmico e a variável climática em questão (Matzarakis et al., 2006; Kedissa et al., 2017; Farhadi et al., 2019; Huang e Chen, 2020). No período diurno, o intervalo de tempo entre às 9h e 18h foi caracterizado pela sensação de desconforto térmico. Esse dado aponta as sérias implicações oriundas do processo de urbanização sob o limite da saturação da ocupação de lotes urbanos, considerando o aumento da densidade construtiva por meio da verticalização. O que demonstra a imprescindibilidade da revisão do atual Plano Diretor (Arapiraca, 2006) e Código de Obras e Edificações (Arapiraca, 2001) para compor medidas que possam otimizar o aproveitamento das principais estratégias bioclimáticas locais (sombreamento, ventilação natural e resfriamento evaporativo).

A partir das 10h, os cenários com a inserção de vegetação arbórea nas calçadas apresentaram condições mais amenas, ao comparar com os cenários sem o uso de vegetação, o que demonstra a influência exercida pela presença de vegetação no microclima do cânion urbano, em cidade de clima quente e seco. Com base na análise da umidade relativa do ar, o efeito de maior influência pela inserção linear de árvores nas calçadas foi no aumento da área de sombra, gerada pelas copas densas, o que diminui o coeficiente do FCV, e reduz a incidência

⁴⁹ Nesse contexto, a redução da TRM a partir das 11h também pode ser percebida nos dados horários do índice PET.

de radiação direta. Esse resultado demonstra que para alcançar o aproveitamento da estratégia bioclimática de resfriamento evaporativo e incrementar, expressivamente, os dados da umidade relativa do ar é necessário compor uma IV, em que os elementos verdes possam estar conectados a fim de aumentar a sua influência no perímetro urbano em que estejam inseridas.

O horário em que os dados do PET nos cenários com e sem o uso das árvores nas calçadas voltam a se aproximar diferem entre os pontos de análise. Na via secundária, ocorreu às 19h, enquanto na calçada da via principal, às 17h. Esse padrão de comportamento também foi observado na análise dos dados horários da TRM, reforçando a influência da TRM no índice de conforto PET. Na calçada, observou-se um potencial de resfriamento térmico mais eficiente que na via secundária, devido a maior largura da via, que gerou o aumento da velocidade dos ventos (acelerando as trocas térmicas do interior do cânion urbano com a abóbada celeste), e a presença do canteiro central arborizado, que diminuiu o coeficiente do FCV. No período noturno, todos os cenários apresentaram um padrão de comportamento equivalente, entre a sensação térmica “fresco” e “ligeiramente fresco”.

Aliado à análise dos dados horários, a presente pesquisa realizou uma análise comparativa entre os cenários urbanos hipotéticos, a partir de gráficos *Boxplot* (Ver Figuras 71 e 72) e dos dados da média, mínimos e máximos (ver Quadro 45), para a via secundária e calçada:

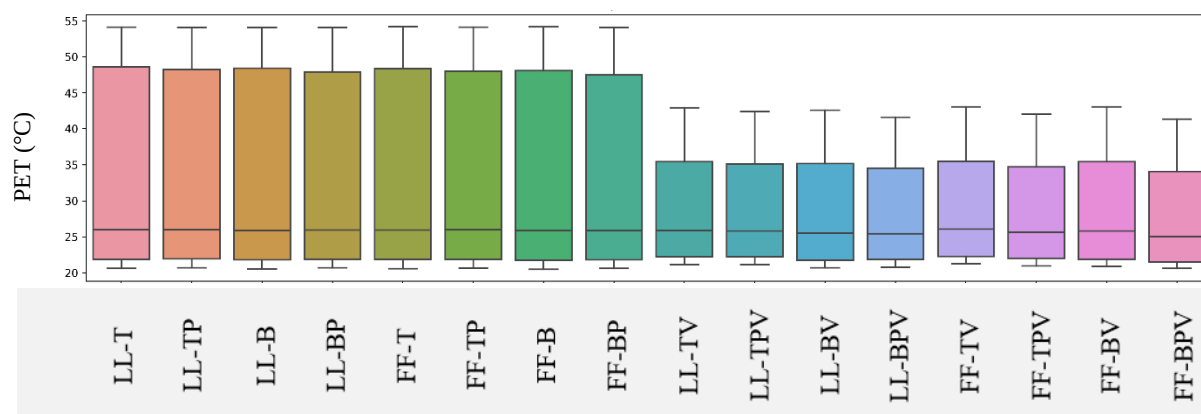


Figura 71 – Gráfico *Boxplot* da Via Secundária - PET.

Fonte: Elaborado pela Autora.

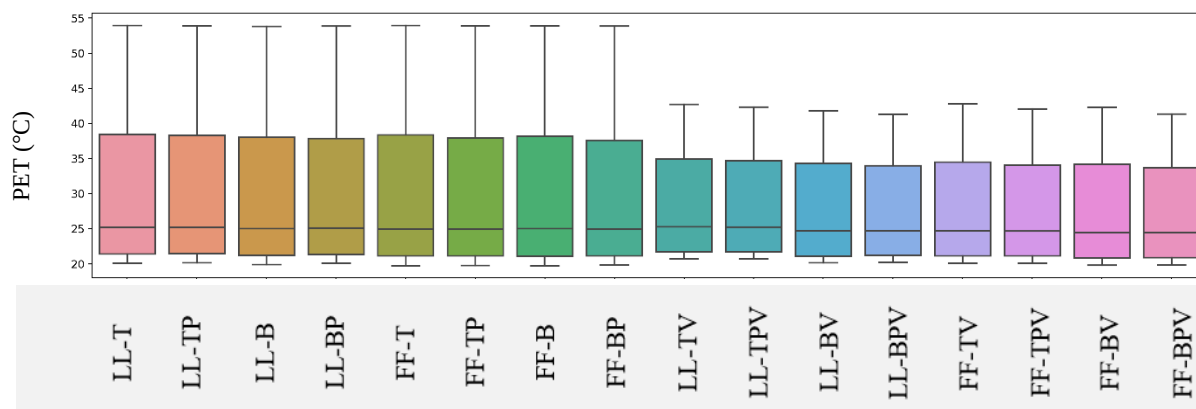


Figura 72 – Gráfico Boxplot da Calçada - PET.

Fonte: Elaborado pela Autora.

Conforme indicam as Figuras 71 e 72, a distribuição dos dados foi assimétrica positiva, indicando valores discrepantes mais elevados. Em ambos os pontos de análise, os valores mínimos do índice PET foram muito próximo entre si, assim como apresenta o Quadro 45, com uma variação de 0,78°C na via secundária e 0,95°C na calçada da via principal. Os dados do 1º Quartil também apresentaram um padrão de comportamento semelhante. Esse comportamento se distancia do padrão observado na análise da TRM. Apesar da influência dessa variável climática no índice de conforto térmico PET, o papel da umidade relativa do ar e da velocidade dos ventos não deve ser negligenciado em climas quentes e secos ou quentes e úmidos. De acordo com Liu et al. (2023), na conformação do cânion urbano para otimizar o conforto térmico na escala do pedestre, essas variáveis climáticas devem ser consideradas de forma simultânea.

A respeito da mediana, em ambos os pontos de análise, os cenários apresentaram valores próximos de 25°C. Sobre esse resultado, é importante destacar que a mediana, como medida de tendência central de um conjunto de dados, não é sensível a valores extremos. Diante das características climáticas do presente objeto de estudo, que apresenta altas amplitudes térmicas diárias, tornou-se necessário analisar, também, a média, a fim de observar possíveis efeitos dos parâmetros de modelagem dos cenários urbanos hipotéticos. Desta forma, foi possível identificar que os cenários com o uso de vegetação arbórea nas calçadas apresentaram valores do índice PET mais ameno, em comparação com os cenários sem a inserção desse elemento verde. No primeiro grupo, a variação do PET médio foi entre 28,12°C e 29,21°C (via secundária), e entre 27,61°C e 28,60°C (calçada); já no segundo grupo foi entre 32,32°C e 32,55°C (via secundária) e entre 30,76°C e 31,18°C. No índice PET máximo, o uso de vegetação continuou com seu efeito de amenização térmica, em ambos os pontos. As reduções

verificadas foram superiores a 11°C na via secundária (FF-BPV) e na calçada (LL-BPV) em relação aos cenários FF-BP e LL-BP, respectivamente, conforme destacado em azul no Quadro 45. O cenário que alcançou o maior valor do PET foi o FF-T, em ambos os pontos (destaques em vermelho).

Quadro 45. Valores médios, mínimos e máximos diários do índice PET.

Cenários	Via Secundária (Ponto 02)			Calçada (Ponto 03)		
	PET Médio (°C)	Mínimo (°C)	Máximo (°C)	PET Médio (°C)	Mínimo (°C)	Máximo (°C)
LL-T	32,6	20,6	54,2	31,2	20,1	54,0
LL-TP	32,5	20,7	54,1	31,2	20,2	53,9
LL-B	32,5	20,6	54,1	30,9	19,9	53,8
LL-BP	32,4	20,7	54,1	31,0	20,1	53,9
FF-T	32,5	20,6	54,2	30,9	19,8	54,0
FF-TP	32,5	20,6	54,2	30,8	19,8	53,9
FF-B	32,4	20,5	54,2	30,9	19,8	53,9
FF-BP	32,3	20,6	54,1	30,8	19,9	53,9
LL-TV	29,1	21,2	43,0	28,6	20,7	42,7
LL-TPV	28,9	21,1	42,4	28,5	20,7	42,3
LL-BV	28,7	20,7	42,6	28,0	20,2	41,8
LL-BPV	28,5	20,8	41,6	27,9	20,2	41,3
FF-TV	29,2	21,3	43,1	28,2	20,1	42,8
FF-TPV	28,7	21,0	42,1	28,0	20,1	42,1
FF-BV	29,0	20,9	43,1	27,8	19,8	42,3
FF-BPV	28,1	20,6	41,4	27,6	19,9	41,4

Fonte: Elaborado pela Autora.

O Quadro 46 apresenta as diferenças entre os valores do índice PET (°C), comparando-se o cenário mais desfavorável (FF-T) com os demais analisados. Os valores de PET máximo no cenário FF-T foram 54,20°C e 53,96°C, na via secundária e na calçada, respectivamente. Esse cenário apresenta como característica o tipo de remembramento dos lotes frente e fundo e os edifícios no formato torre. Entre os cenários sem o uso de vegetação arbórea, o formato dos edifícios não resultou em diferenças significativas no valor do PET máximo, sendo todas inferiores a 0,2°C. Com a inserção das árvores, o tipo de remembramento apresentou pouca influência no desempenho dos cenários. No formato dos edifícios, o tipo base com torre e *pilotis* obteve condições mais favoráveis ao conforto térmico. Desta forma, os cenários com o melhor desempenho climático foram o FF-BPV, com -12,83°C (via secundária), e o LL-BPV com -12,64°C (calçada), comparado ao cenário com o pior desempenho climático, o FF-T. Em seu estudo sobre cânions urbanos em Teerã/ Irã (cidade de clima semiárido), Farhadi et al. (2019) observaram um resultado semelhante, dado que ao aumentar a cobertura de vegetação urbana em 10%, o PET diminuiu 9,36 °C.

Quadro 46. Valores de diferenciação térmica, identificados a partir do índice PET máximo diurno (°C) entre o cenário FF-T e os demais cenários urbanos simulados.

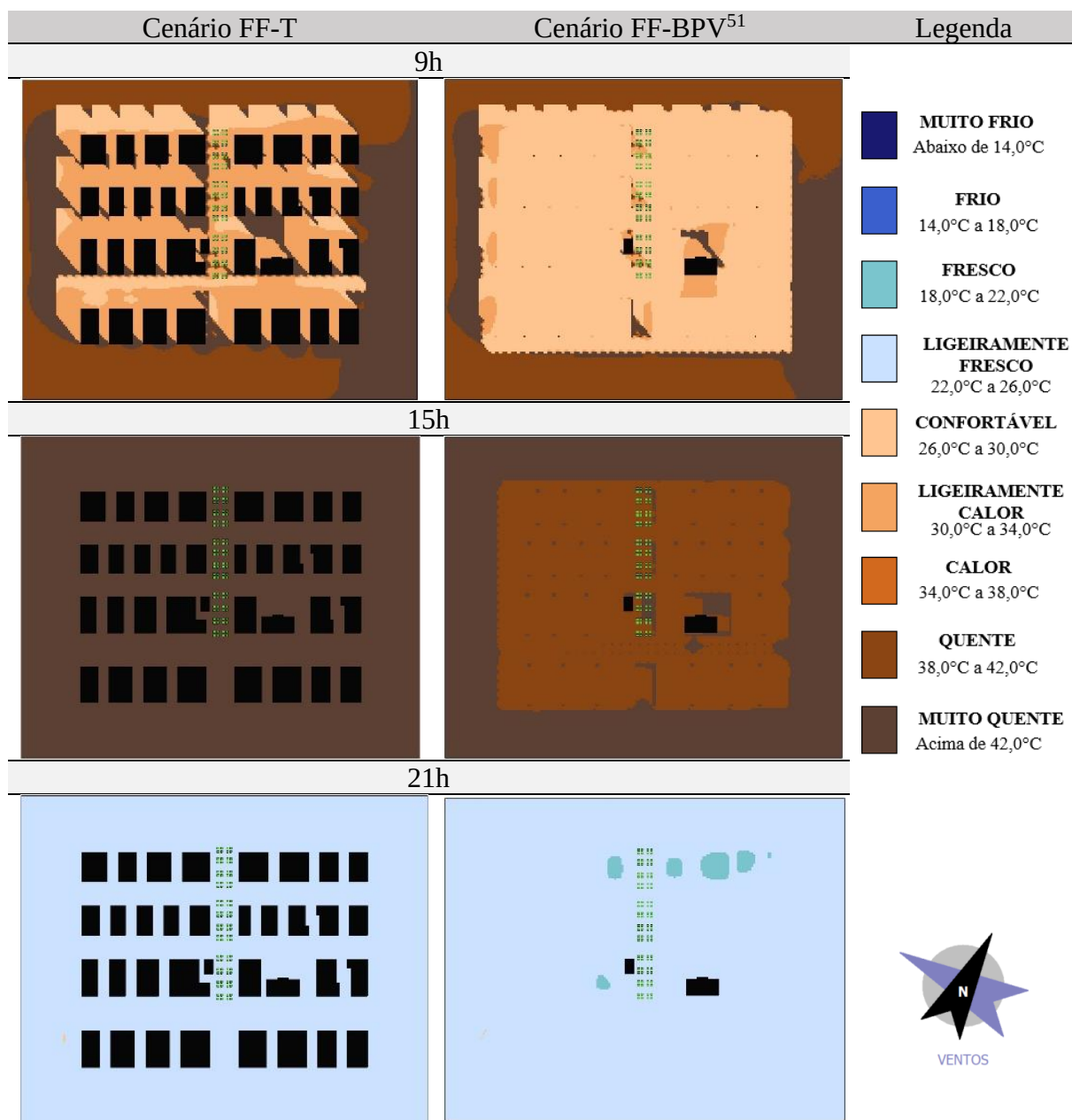
FF-T	Diferença: Cenário – (FF-T)															
PET máximo (°C)	LL - T	LL - TP	LL - B	LL - BP	FF - T	FF - TP	FF - B	FF - BP	LL - TV	LL - TPV	LL - BV	LL - BPV	FF - TV	FF - TPV	FF - BV	FF - BPV
Via Secundária 54,20	-0,04	-0,09	-0,08	-0,14	54,20	-0,05	-0,02	-0,11	-11,25	-11,77	-11,60	-12,58	-11,11	-12,14	-11,14	-12,83
Calçada 53,96	-0,01	-0,03	-0,12	-0,11	53,96	-0,07	-0,03	-0,10	-11,24	-11,62	-12,15	-12,64	-11,13	-11,88	-11,68	-12,59

Fonte: Elaborado pela Autora.

A análise quantitativa dos dados destacou os cenários FF-T e FF-BPV por seus desempenhos menos e mais satisfatório, respectivamente. A fim de analisar qualitativamente esse resultado, o Quadro 47 apresenta os mapas 2D⁵⁰ dos dados do índice PET dos cenários em questão, na altura do pedestre (1,5m), para os seguintes períodos: manhã (às 9h), tarde (às 15h), e noite (às 21h). Os mapas 2D dos demais cenários estão apresentados no Apêndice E.

Quadro 47. Perfis e Mapas 2D dos dados do índice PET dos cenários FF-T e FF-BPV, na altura do pedestre (1,5m), para o período quente e seco.

⁵⁰ Diante das limitações técnicas enfrentadas durante o desenvolvimento da presente pesquisa, relacionadas ao software ENVI-met, tornou-se inviável gerar os dados do índice PET para a composição dos perfis.



Às 9h, é notável a influência dos parâmetros de modelagem dos cenários urbanos hipotéticos. No cenário FF-T, percebe-se a projeção da sombra gerada pelos edifícios e como nessa área o PET foi mais ameno. No entanto, no interior do cânion a sensação térmica varia entre “confortável”, “ligeiramente quente” e “muito quente”. Já o cenário FF-BPV, caracterizado por apresentar remembramento dos lotes tipo frente e fundo, edifícios no formato base com torre, adoção de *pilotis* e inserção de vegetação arbórea nas calçadas; apresentou a

⁵¹ Neste momento, o cenário FF-BPV foi selecionado, por apresentar o valor mais elevado de diferenciação térmica, ao comparar com o cenário FF-T.

sensação térmica de “confortável” na maior parte da fração urbana simulada. No período mais crítico do dia, às 15h, nenhum dos cenários alcançou a sensação de conforto térmico. No entanto, enquanto no cenário FF-T o índice PET foi acima de 42°C (muito quente), no cenário FF-BPV variou entre 38°C e 42°C, o que correspondeu a uma sensação térmica de “quente”.

Às 21h, ambos os cenários apresentaram uma variação do PET entre 22°C a 26°C (ligeiramente fresco). Mas é interessante pontuar que no cenário FF-BPV, em alguns pontos abaixo dos *pilotis* a sensação térmica é de 18°C a 22°C (fresco). Esse dado indica o potencial de amenização térmica por meio da forma dos edifícios, ao passo que o tipo base com torre e adoção de *pilotis* gerou uma maior projeção de área sombreada no nível do pedestre, ao mesmo tempo que aumentou a permeabilidade do fluxo de ar, que diante da inserção da vegetação, apresentava um valor mais elevado de umidade relativa do ar. Além disso, na conformação do microclima do cânion urbano, o formato torre do edifício nos pavimentos mais elevados favoreceu a velocidade das trocas térmicas entre o interior do cânion e a abóbada celeste, reduzindo os efeitos da ICU. Em climas quentes e secos, a combinação desses fatores propiciou condições mais favoráveis ao conforto térmico. Dentre os aspectos da forma urbana analisados (ver Quadro 34), o FCV explicou melhor a variação do PET, não como resultado isolado da massa edificada, mas como resultado da geometria urbana e a cobertura da superfície (inserção de vegetação). Yahia et al. (2017) chegaram a mesma constatação, ao analisar o microclima de cânions urbanos, em cidade de clima tropical de savana⁵².

4.1.5 Síntese da Análise de Desempenho Climático

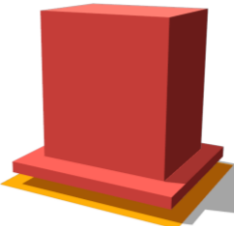
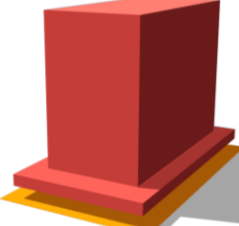
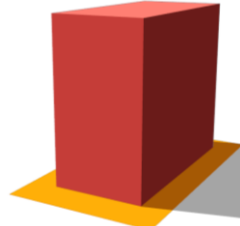
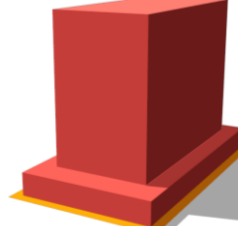
A partir da análise dos dados horários ao longo do dia, da análise estatística descritiva e comparativa efetuada para as variáveis climáticas, buscou-se mensurar a influência da forma urbana no microclima e no conforto térmico ao ar livre, no nível do pedestre, com base no índice PET.

Para as condições simuladas, os cenários cujos edifícios possuíam formato base com torre e adoção de *pilotis* (BP) obtiveram os resultados mais favoráveis, tanto para o remembramento dos lotes tipo frente e fundo (FF) quanto tipo lado a lado (LL). Sobre o tipo de remembramento, o LL obteve resultados mais favoráveis com relação à TRM, por gerar uma maior projeção da área de sombra no interior do cânion, em função do efeito de fachada contínua. No entanto, o

⁵² Segundo a classificação climática de Köppen, a cidade de Arapiraca/AL se enquadra no clima tropical de savana (Alvares et al., 2013).

tipo FF demonstrou potencializar o aproveitamento da ventilação natural e resfriamento evaporativo. Isso porque no modelo de remembramento dos lotes frente e fundo, os recuos laterais gerados pelos edifícios ao longo da via reduziram o efeito de canalização do fluxo de ar, o que favorece a permeabilidade nas vias perpendiculares e à sotavento, que, por sua vez, também influencia na distribuição da umidade relativa do ar no interior do cânion urbano. A síntese dos resultados encontra-se descrita no Quadro 48.

Quadro 48. Síntese dos resultados dos parâmetros climáticos e do PET obtidos para os cenários de maior destaque nas simulações.

	LL-BP	FF-BP	FF-T	FF-B
				
TRM	Menores valores máximos	Valores máximos inferiores aos demais cenários (exceto LL-BP)	Maiores valores máximos	Valores máximos superiores aos demais cenários (exceto FF-T)
PET				
UR	-	Maiores valores máximos	-	Menores valores mínimos
Var	Menores velocidades do ar	-	Maiores velocidades do ar, principalmente na calçada	-

Fonte: Elaborado pela Autora.

O uso de vegetação arbórea foi o parâmetro de modelagem de impacto mais significativo na amenização térmica, resultando em reduções de até 25,4°C na TRM, entre os cenários FF-T (66,9°C) e LL-BPV (41,5°C); e no aumento da umidade relativa do ar, de 5% (nos cenários sem a inserção das árvores) a 11% (nos cenários com a inserção das árvores), em relação ao período diurno (especificamente às 15h – período com as condições climáticas mais adversas durante o dia) e noturno, respectivamente. O incremento da umidade relativa do ar não favoreceu à redução da temperatura do ar, nesse sentido, foi pouco significativo. Assim, a principal contribuição da proposta de uso de vegetação adotada (inserção linear de árvores nas calçadas) consistiu na redução do desconforto térmico, com redução de até 12,8°C nos valores máximos do índice PET, ao comparar os cenários FF-BPV(41,4°C) e FF-T (54,2°C). O primeiro, caracterizado pelo remembramento frente e fundo, edifícios com base e torre com a adoção de

pilotis, e a presença de vegetação arbórea de grande porte na calçada; enquanto o segundo, possui o mesmo tipo de remembramento, no entanto, os edifícios são do formato torre e sem a inserção das árvores. Portanto, tais reduções foram atribuídas ao sombreamento proporcionado pelas copas das árvores.

Ao considerar o clima semiárido e a metodologia adotada, observou-se a percepção da sensação de conforto térmico, no nível do pedestre, a partir das 18h até às 9h da manhã, conforme ilustrado nas Figuras 69 e 70. Com base na análise quantitativa, destacaram-se dois cenários: FF-BPV e FF-T, por seus desempenhos mais e menos satisfatórios, respectivamente. No Quadro 49, pode-se observar os valores das variáveis climáticas analisadas às 9h, às 15h (período com a sensação térmica mais crítica de desconforto) e às 21h, dos cenários citados. Em destaque na cor verde estão os dados do cenário com a inserção de vegetação arbórea nas calçadas, evidenciando o efeito de amenização térmica da mesma em cada variável. Às 15h, por exemplo, a temperatura do ar apresentou uma redução de 1,1°C, na TRM foi de 26,3°C e na umidade relativa do ar houve um aumento de 4,9%. O valor da velocidade dos ventos foi reduzido, pois as árvores e o formato dos edifícios diminuem o efeito da canalização dos ventos no interior do cânion. No entanto, permitem uma melhor permeabilidade do mesmo à sotavento e nas vias perpendiculares à via principal, o que reduz as zonas de estagnação de ar. Por fim, o PET apresentou uma redução de 13,4°C.

Quadro 49. Valores das variáveis climáticas analisadas nos cenários FF-BPV e FF-T às 9h, 15h e 21h..

Calçada (Ponto 03)							
Horário	Cenário	Temp. do Ar (°C)	TRM (°C)	Umid. R. do Ar (%)	Vel. dos Ventos (m/s)	PET (°C)	Sensação Térmica
9h	FF-BPV	27,6	28,8	60,0	0,7	28,6	Conforto
	FF-T	29,2	30,3	50,6	1,4	29,2	Conforto
15h	FF-BPV	34,3	40,6	36,1	0,6	40,6	Desconforto
	FF-T	35,4	66,9	31,2	1,2	54,0	Desconforto
21h	FF-BPV	28,0	19,3	61,3	1,3	24,1	Conforto
	FF-T	25,7	19,9	72,8	0,7	23,5	Conforto

Fonte: Elaborado pela Autora.

Ao considerar as condições extremas que os cenários foram modelados, como o período das simulações (quente e seco – verão) e a ocupação do solo segundo o limite da saturação da verticalização e ocupação urbana, ou seja, com uma padronização no formato e alturas dos edifícios⁵³; evidencia-se o potencial do planejamento urbano na conformação de um microclima mais favorável à qualidade de vida urbana. Medidas podem ser implementadas para tornar viável a composição de uma infraestrutura verde nos cânions urbanos, de modo a reduzir a temperatura do ar e a TRM, ao passo que eleve a umidade relativa do ar e a velocidade dos ventos. A exemplo, tem-se: aumentar a rugosidade da forma urbana, a adoção de fachadas verdes, a inserção de árvores no interior do lote, a composição da mesma com arbustos e gramas, o uso de determinados vazios urbanos para a composição de áreas verdes, o uso da base dos edifícios para compor um segundo “pavimento urbano” com elementos verdes, e tantas outras estratégias que podem ser implementadas para potencializar o aproveitamento do sombreamento, ventilação natural e resfriamento evaporativo. Como resultado, pode-se inferir a possibilidade de se promover a sensação de conforto térmico ao longo do dia, nos dois períodos do ano: quente e seco/ quente e úmido. Para isso, é imprescindível que estudos multidisciplinares sejam incorporados ao processo de planejamento urbano de Arapiraca, especialmente na área da bioclimatologia urbana.

4.2 Análise de Correlação entre os Parâmetros Climáticos e Urbanísticos

De forma a refinar a análise dos dados, a análise de correlação entre os parâmetros climáticos e urbanísticos torna possível identificar quais os parâmetros urbanísticos de maior ou menor impacto na conformação do microclima no interior do cânion urbano, e como eles se interrelacionam. A correlação foi mensurada por meio do coeficiente de correlação de Pearson (r), que varia entre -1 (indica uma correlação perfeita negativa, em que o aumento de uma variável está associado à diminuição da outra), +1 (indica uma correlação perfeita positiva, isso significa que à medida que uma variável aumenta, a outra também aumenta proporcionalmente), e 0 (indica que não há correlação linear entre as variáveis) (Triola, 2017).

De acordo com Larson e Faber (2010), a avaliação do nível de significância do coeficiente de correlação (r) é dado a partir do número de pares de dados de uma amostra. De acordo com

⁵³ Edifícios de mesma altura corresponde a uma baixa rugosidade, o que reduz a velocidade dos ventos no nível do pedestre.

o número de amostra da presente pesquisa, o valor crítico para um coeficiente de correlação significativo é 0,497 ($\alpha = 0,05$), para o nível de significância de 95%, e 0,623 ($\alpha = 0,01$), para o nível de significância de 99%. Nesse sentido, adotou-se o nível de significância de 95%. Com relação ao coeficiente de correlação (r), o Quadro 50 apresenta a classificação dos graus de correlação, que variam entre perfeita, forte, moderada, fraca e ausente (podendo ser positiva ou negativa):

Quadro 50. Classificação do grau de correlação a partir do valor do coeficiente de correlação (r).

-1,0	-0,95	-0,50	-0,10	0	+0,10	+0,50	+0,95	+1,0
negativa	negativa	negativa	negativa	ausência	positiva	positiva	positiva	positiva
perfeita	forte	moderada	fraca		fraca	moderada	forte	perfeita

Fonte: Beiguelman (1996).

A primeira etapa no tratamento dos dados correspondeu a uma análise preliminar acerca da matriz de correlação entre as variáveis independentes (parâmetros urbanísticos) avaliadas com base nos cenários urbanos hipotéticos propostos, para identificar possíveis relações ou padrões de interdependência entre essas variáveis, subsídio para a tomada de decisões sobre intervenções urbanísticas. Os valores calculados dos parâmetros urbanísticos de cada cenário modelado foram inseridos em uma tabela através do programa *EXCEL*, o que tornou possível gerar os valores da matriz de correlação.

Na Tabela 2, pode-se observar os valores significativos de correlação entre os parâmetros calculados, destacados em verde, que indicam uma forte associação entre eles. A exemplo, tem-se os dados da correlação negativa forte entre o índice de densidade arbórea e o FCV ($r = -0,963$) e a taxa de ocupação e o recuo progressivo ($r = -0,93005$). No primeiro caso, esse valor indica que, sob um mesmo padrão de massa edificada, o uso de árvores de grande porte pode aumentar a obstrução da abóbada celeste, gerando uma maior projeção da área sombreada no nível do pedestre, no interior do cânion urbano. A redução do FCV pela massa edificada pode gerar sérios danos no aproveitamento da ventilação natural (Brandão, 2020), além de reduzir a área de solo permeável e disponível para a inserção de elementos verdes, aumentando a probabilidade de ocorrência de enchentes nas cidades e diminuindo a umidade relativa do ar, respectivamente.

No segundo caso, a correlação negativa forte indica que à medida que a taxa de ocupação aumenta (ou seja, maior proporção do lote ocupado por edificações), o recuo progressivo tende a diminuir (menor distância entre as edificações e os limites do lote). Essa relação é significativa

no contexto do microclima urbano, pois ambos os parâmetros influenciam, especialmente, na temperatura do ar, TRM e velocidade dos ventos. Na temperatura do ar, o aumento da taxa de ocupação e a redução do recuo progressivo promovem a compactação dos espaços urbanos, o que intensifica a absorção e retenção de calor pelas superfícies construídas. Essa configuração contribui para as ICU, elevando a temperatura do ar e prejudicando o conforto térmico.

Na TRM, uma maior taxa de ocupação associada a um menor recuo progressivo reduz o espaço disponível para vegetação arbórea. O que diminui a área sombreada no interior do cânion, assim como pode agravar os problemas de escoamento superficial e enchentes. A respeito da velocidade dos ventos, essa correlação resulta em maior densidade construtiva somada à menor porosidade do tecido urbano, criando barreiras ao fluxo de ar. Ocasionalmente uma redução da velocidade dos ventos, que é essencial para dissipar o calor em ambientes urbanos. Os resultados demonstram que a relação entre parâmetros urbanísticos tradicionais e os denominados avançados, assim como apontam a importância de políticas urbanísticas que equilibrem adensamento com o aproveitamento das principais estratégias bioclimáticas para Arapiraca, como o incentivo do recuo progressivo com a incorporação de vegetação nas calçadas e interior do lote.

Tabela 2. Matriz de correlação para os parâmetros urbanísticos aplicados aos cenários urbanos hipotéticos.

	FCV	H/W	TO	IDA	Po Vedif	Recuo P.
FCV	1					
H/W	0,122853	1				
TO	-0,0071	0,454507	1			
IDA	-0,963	-3,5E-17	1,6E-17	1		
Po Vedif	-0,01853	0,150988	0,267018	0	1	
Recuo P.	0,002255	-0,64466	-0,93005	0	-0,29119	1

Fonte: Elaborado pela Autora.

A próxima etapa correspondeu a análise de quais os parâmetros urbanísticos apresentam maior ou menor grau de influência no desempenho climático, nos pontos de análise dos cenários urbanos hipotéticos. O que permitiu a compreensão dos fatores determinantes do microclima, subsídio para a formulação de diretrizes urbanísticas que promovam o aproveitamento das principais estratégias bioclimáticas locais. O que contribui para um planejamento urbano sustentável e resiliente, adaptado às condições do clima semiárido. Os coeficientes de correlação foram gerados através da ferramenta *EXCEL*, utilizando o suplemento Análise de Dados, como apresenta as Tabelas 03 (via secundária) e 04 (calçada da via principal).

Tabela 3. Coeficientes de correlação obtidos a partir das variáveis dependentes (variáveis ambientais da via secundária) e a as variáveis independentes (parâmetros urbanísticos).

Variáveis Dependentes		Variáveis Independentes					
		FCV	H/W	TO	IDA	Po Vedif	Recuo Prog.
TRM (°C)	Máx. diurna	0,9988	-0,0188	-0,0160	-0,9988	-0,0429	0,0188
	Máx. noturna	-0,9658	-0,2025	-0,1989	0,9665	0,0709	0,2025
Umid. relativa do ar (%)	Máx. diurna	-0,9885	0,0854	0,0867	0,9872	0,0923	-0,0854
	Máx. noturna	-0,9893	0,0831	0,0853	0,9880	0,0847	-0,0831
	Mín. diária	-0,9792	0,0054	0,0071	0,9804	0,1578	-0,0054
Velocidade média dos ventos (m/s)		0,8748	-0,0756	-0,0851	-0,8721	-0,1261	0,0756
PET (°C)	Máx. diurno	0,9972	-0,0216	-0,0212	-0,9972	-0,0519	0,0216
	Máx. noturno	0,2926	-0,7493	-0,7499	-0,2853	-0,4607	0,7493

Fonte: Elaborado pela Autora.

Tabela 4. Coeficientes de correlação obtidos a partir das variáveis dependentes (variáveis ambientais da calçada) e a as variáveis independentes (parâmetros urbanísticos).

Variáveis Dependentes		Variáveis Independentes					
		FCV	H/W	TO	IDA	Po Vedif	Recuo Prog.
TRM (°C)	Máx. diurna	0,9906	-0,0394	-0,0293	-0,9986	-0,0261	0,0396
	Máx. noturna	-0,3745	-0,6636	-0,5846	0,4007	0,3346	0,6711
Umid. relativa do ar (%)	Máx. diurna	-0,8670	0,1615	0,2512	0,9181	0,1687	-0,1588
	Máx. noturna	-0,8652	0,1543	0,2474	0,9178	0,1594	-0,1516
	Mín. diária	-0,9507	0,0503	0,0698	0,9722	0,1761	-0,0503
Velocidade média dos ventos (m/s)		0,8726	-0,2191	-0,0282	-0,8050	-0,2814	0,2200
PET (°C)	Máx. diurno	0,9871	-0,0365	-0,0333	-0,9980	-0,0366	0,0365
	Máx. noturno	0,5966	-0,5495	-0,6607	-0,6559	-0,0846	0,5493

Fonte: Elaborado pela Autora.

Destacados na cor verde estão os valores com correlação forte (indica que há uma relação mais previsível entre as variáveis, sendo útil para criar modelos de predição) ou moderada (sugere que a relação é significativa, mas que outras variáveis podem estar influenciando o comportamento observado), conforme a classificação do Quadro 50. A correlação fraca não significa que a relação entre as variáveis seja irrelevante, mas sim que ela é limitada ou

secundária em comparação a outros fatores externos, não incluídos na análise. A respeito dos dados obtidos, a análise de correlação foi feita a partir das variáveis climáticas.

Na TRM, os resultados na via secundária (S) e calçada (C) corresponderam a:

TRM Máx. Diurna:

- **Correlação Positiva Forte** com FCV (0,9988-S/ 0,9906-C): O alto coeficiente de correlação indica que áreas com maior exposição ao céu (FCV) apresentam TRM diurnas mais elevadas, devido ao aumento na incidência de radiação solar direta.
- **Correlação Negativa Forte** com IDA (-0,9988-S/ -0,9986-C): A presença de vegetação reduz a TRM diurna, em função do sombreamento e pelo resfriamento evaporativo proporcionado pelas árvores. Estudos recentes corroboram com esse resultado e destacam o papel da arborização urbana para amenização térmica da TRM (Emmanuel et al., 2019; Yang et al., 2020; Habibi et al., 2024).

TRM Máx. Noturna:

- **Correlação Negativa Forte** com FCV (-0,9658-S): Quanto maior o FVC menor será a TRM máxima noturna. À noite, o calor armazenado pelas superfícies urbanas, ao longo do dia, é emitido. No céu mais obstruído, a velocidade das trocas térmicas entre o interior do cânion urbano e a abóbada celeste é reduzido, gerando o acúmulo de calor, aumentando a TRM nesse período (Oke et al., 1991; Taleghani et al., 2014; Oke et al., 2017).
- **Correlação Negativa Forte** com IDA (-0,9665): No período noturno, quanto maior for o número de árvores, menor a probabilidade de aumento da TRM noturna, na conformação do microclima.
- **Correlação Positiva Moderada** com Recuo Progressivo (0,6711-C): Indica que quanto maior o valor do presente parâmetro urbanístico, maior a probabilidade de aumento da TRM noturna.
- **Correlação Negativa Moderada** com H/W (-0,6636-C) e a TO (-0,5846-C): A relação H/W e a TO estão inversamente correlacionados com a TRM noturna, indicando que quanto maior os valores correspondentes a esses parâmetros, maior a probabilidade de redução da TRM noturna no nível microclimático.

Com relação à umidade relativa do ar, os resultados na via secundária (S) e calçada (C) foram:

Umidade Relativa do Ar Máx. Diurna:

- **Correlação Positiva Forte** com IDA (0,9872-S/ 0,9181-C): A vegetação arbórea aumenta a umidade relativa do ar devido à evapotranspiração.
- **Correlação Negativa Forte** com FCV (-0,9885-S): O mais elevado coeficiente de FCV, tem maior probabilidade de reduzir a umidade relativa do ar no microclima.
- **Correlação Negativa Moderada** com FCV (-0,8670-C): Quanto maior o coeficiente de FCV, menor a umidade relativa do ar.

Umidade Relativa do Ar Mín. Diária:

- **Correlação Negativa Forte:** com o FCV (-0,9792-S/ -0,9507-C): A correlação forte sugere que o FCV tem grande influência na umidade relativa noturna, indicando que quanto maior o coeficiente do FCV, menor o dado da umidade relativa do ar no microclima do cânion urbano.
- **Correlação Positiva Forte** com IDA (0,9804-S/ 0,9722-C): Assim como no período diurno, o índice de densidade arbórea apresenta correlação positiva forte com a umidade relativa mínima diária. Por meio da evapotranspiração, a vegetação aumenta o vapor de água no ar, o que leva ao aumento da umidade relativa e à redução da temperatura do ar. Esse dado indica o papel das árvores em elevar os valores da umidade relativa do ar, importante variável climática em climas quentes e secos. Além disso, Liao et al. (2021), destacaram que o sombreamento gerado por suas copas reduz a radiação solar incidente no interior do cânion urbano, reduzindo a TRM, que influencia diretamente no conforto térmico, no nível do pedestre.

Acerca da velocidade média dos ventos, na via secundária (S) e calçada (C), a análise da correlação indicou que:

- **Correlação Positiva Moderada** com FCV (0,8748-S/ 0,8726-C): Áreas com maior coeficiente de FCV, favorecem o aumento da velocidade dos ventos em cânions urbanos, na escala do pedestre. Assim como demonstrou a análise qualitativa dos dados horários da velocidade dos ventos nos cenários, Kouklis e Yiannakou (2021) também observaram que cânions urbanos profundos e estreitos contribuíram para a diminuição mais acentuada na velocidade do vento.
- **Correlação Negativa Moderada** com IDA (-0,8721-S/ -0,8050-C): Em acordo com o estudo de Lin et al. (2008) e Bochenek e Klemm (2021), a densidade arbórea possui uma correlação negativa moderada, ao reduzir a velocidade dos ventos, agindo como

barreira. Uma alternativa para aumentar a velocidade dos ventos, na escala do pedestre, seria aumentar a rugosidade e a porosidade urbana (Kedissa et al., 2017; Mohammed; Salman, 2018; Lobaccaro et al., 2019).

Por fim, para o índice de conforto térmico PET, a análise da correlação na via secundária (S) e calçada (C) indicou que:

Índice de Conforto Térmico (PET) Máx. Diurna:

- **Correlação Positiva Forte** com FCV (0,9972-S/ 0,9871-C): A alta correlação positiva entre o FCV e da Temperatura Equivalente Fisiológica - PET indica que, em climas quente e seco, as áreas mais abertas e expostas ao céu geram desconforto térmico durante o dia, devido à maior incidência solar direta. Em consonância, Venhari et al. (2019) observaram o mesmo padrão de correlação, e identificaram que em climas extremamente quentes, o FCV mínimo (0,22) e máximo (0,82) levaram a uma diferença de 10,2 °C no PET.
- **Correlação Negativa Forte** com IDA (-0,9972-S/ -0,9980): O maior índice de arborização, em cânions urbanos, reduz o desconforto térmico diurno, devido ao sombreamento e resfriamento evaporativo, o que corrobora com a pesquisa de Taleghani (2018) e Yin et al. (2024), que ao elaborar uma revisão sistemática acerca das estratégias de mitigação de calor em cânions urbanos, identificaram os benefícios de resfriamento das árvores no meio ambiente urbano e no conforto térmico ao ar livre.

Índice de Conforto Térmico (PET) Máx. Noturna:

- **Correlação Positiva Moderada** com o FCV (0,5966-C) e o recuo progressivo (0,7493-S/ 0,5493-C): Esse dado indica que quanto maior os valores correspondentes a estes parâmetros urbanísticos, maior a probabilidade do aumento da Temperatura Equivalente Fisiológica (PET), durante a noite.
- **Correlação Negativa Moderada** com H/W (-0,7493-S/ -0,5495-C) e a TO (-0,7499-S/ -0,6607-C) e o IDA (-0,6559-C): Indicando que o aumento desses parâmetros, aumenta a probabilidade de redução da Temperatura Equivalente Fisiológica para o microclima do cânion urbano, no período noturno.

Adotando-se o nível de significância de 95%, os valores que podem ser denominados como significantes foram os correspondentes aos coeficientes do FCV e o IDA, em relação às variáveis climáticas analisadas; e a relação H/W e TO, em relação à correlação com a TRM e o

índice PET. Nesse sentido, confirma-se a influência dos parâmetros urbanísticos adotados no desempenho climático do cânion urbano, com base no clima semiárido para o período quente e seco, na fração urbana selecionada da cidade de Arapiraca/AL. Esses resultados corroboram com pesquisas recentes, que ressaltam a importância de estudos preditivos na elaboração do planejamento urbano, visando a melhoria da qualidade de vida e a resiliência das cidades às mudanças climáticas (Taleghani et al., 2014; Ruiz et al., 2017; Lai et al., 2019; Venhari et al., 2019; Nasrollahi et al., 2021; Abdelhafez et al., 2022; Roshan et al., 2022; Zhang et al., 2022; Yin et al., 2024).

A respeito da última etapa, que trata de identificar dos coeficientes de determinação (R^2), foram elaborados gráficos de dispersão, tendo sido geradas as equações de regressão linear correspondentes (equações preditivas), com base nas variáveis climáticas e nos parâmetros urbanísticos. O coeficiente de determinação está intrinsecamente relacionado ao poder de explicação da equação de regressão. Segundo Larson e Faber (2010), quanto maior o R^2 , melhor é a previsão da variável dependente. Desta forma, a presente pesquisa selecionou os pares de dados com coeficientes de determinação acima de 0,5. Os gráficos apresentam as seguintes informações estatísticas: coeficiente de correlação (r), coeficiente de determinação (R^2); a linha de regressão e sua equação, que torna possível prever os valores de y (correspondente à variável dependente - variável climática), para um dado valor de x (corresponde à variável independente - parâmetro urbanístico); coeficiente de determinação ajustado⁵⁴ (R^2 ajustado) e do erro padrão⁵⁵.

É importante destacar que, tomou-se os dados de correlação da **TRM máxima**, a **umidade relativa do ar mínima**, **média da velocidade dos ventos** e o **índice PET máximo**, para o ponto situado ao centro da via secundária (s) e na calçada da via principal (C). Nas Figuras 73 a 80 tem-se os gráficos e as equações referentes à análise de regressão linear.

⁵⁴ O R^2 ajustado pondera o coeficiente de determinação (R^2) pelo número de variáveis independentes e pelo tamanho da amostra o (Hair et al, 2009).

⁵⁵ O erro padrão é uma medida estatística que representa a precisão ou incerteza com que uma média amostral representa a média da população (Hair et al, 2009).

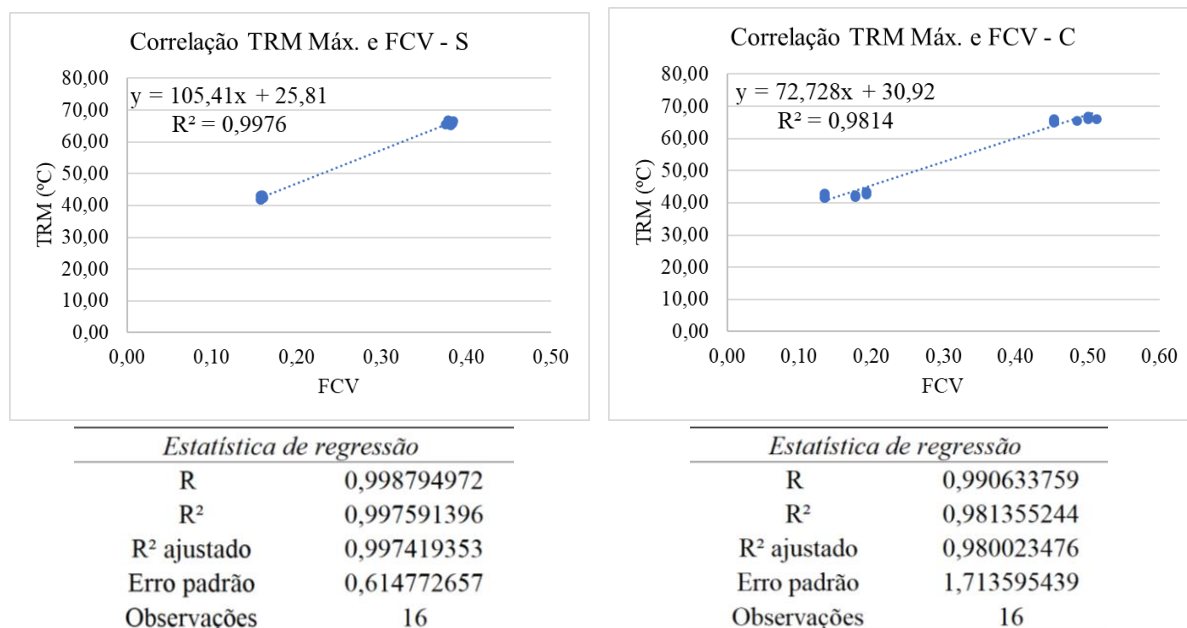


Figura 73 – Diagrama de dispersão – representação da regressão linear com base na correlação entre a TRM máxima (variável dependente) e o FCV (variável independente): coeficiente de determinação (R^2) = 0,997 (S)/ 0,981 (C).

Fonte: Elaborado pela Autora.

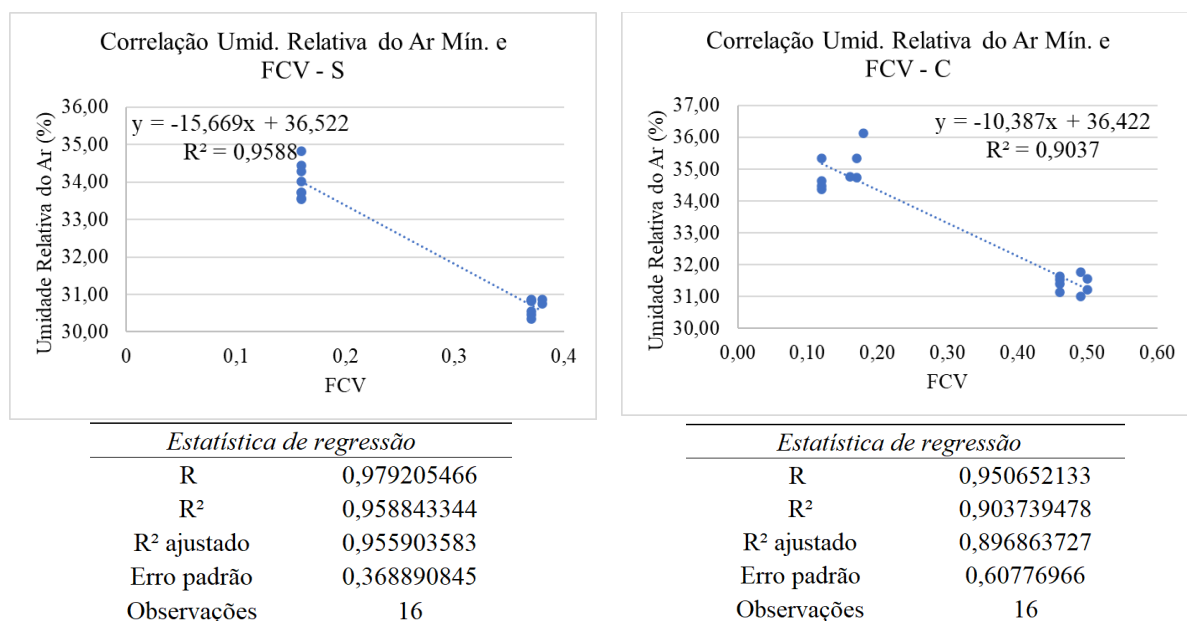
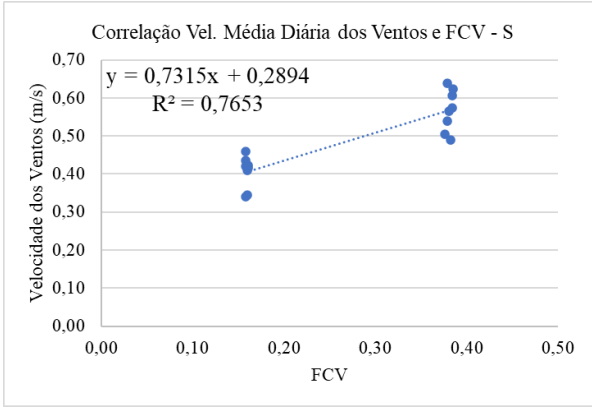
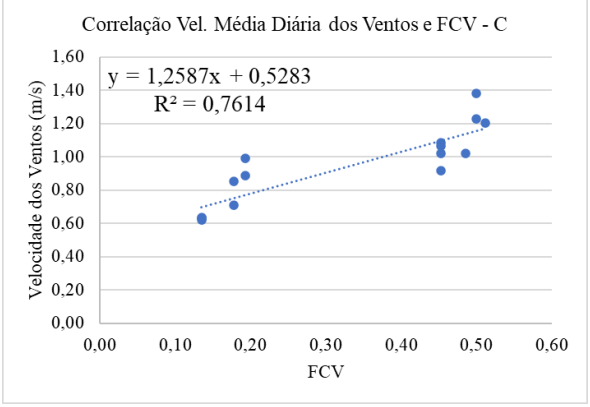


Figura 74 – Diagrama de dispersão – representação da regressão linear com base na correlação entre a Umidade relativa do ar mínima (variável dependente) e o FCV (variável independente): coeficiente de determinação (R^2) = 0,958 (S)/ 0,903 (C).

Fonte: Elaborado pela Autora.



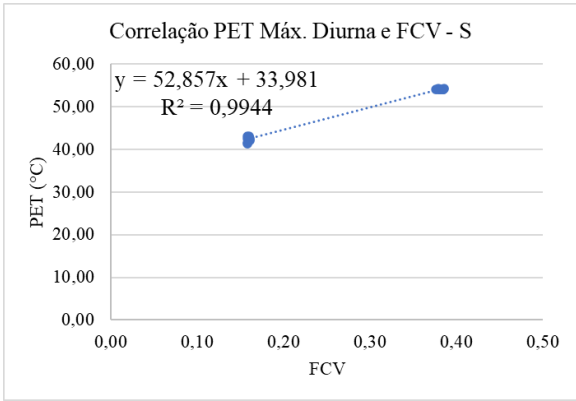
Estatística de regressão	
R	0,874798127
R ²	0,765271763
R ² ajustado	0,74850546
Erro padrão	0,048085292
Observações	16



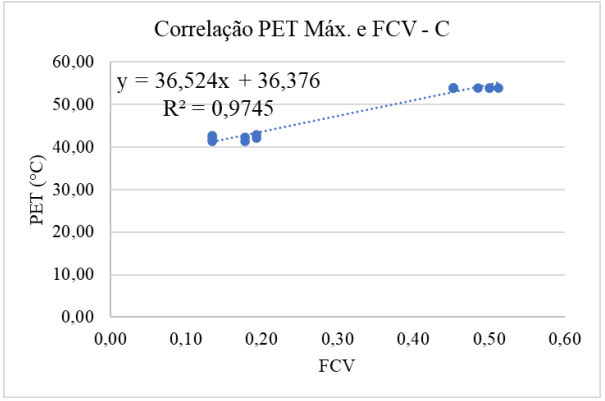
Estatística de regressão	
R	0,872556778
R ²	0,761355332
R ² ajustado	0,744309284
Erro padrão	0,120457449
Observações	16

Figura 75 – Diagrama de dispersão – representação da regressão linear com base na correlação entre a Velocidade média dos ventos (variável dependente) e o FCV (variável independente): coeficiente de determinação (R^2) = 0,765 (S)/ 0,761 (C).

Fonte: Elaborado pela Autora.



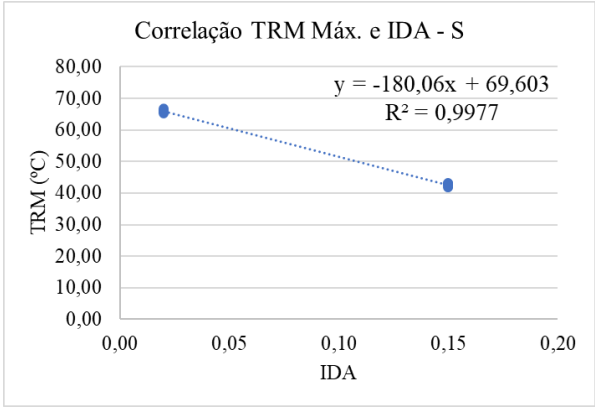
Estatística de regressão	
R	0,997202835
R ²	0,994413493
R ² ajustado	0,994014457
Erro padrão	0,470215907
Observações	16



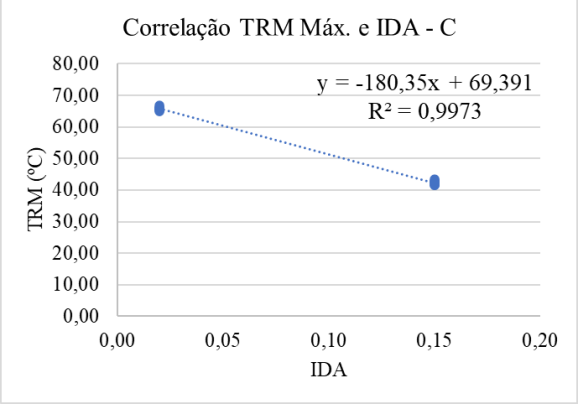
Estatística de regressão	
R	0,987146887
R ²	0,974458976
R ² ajustado	0,972634617
Erro padrão	1,010775207
Observações	16

Figura 76 – Diagrama de dispersão – representação da regressão linear com base na correlação entre o PET máximo (variável dependente) e o FCV (variável independente): coeficiente de determinação (R^2) = 0,994 (S)/ 0,974 (C).

Fonte: Elaborado pela Autora.



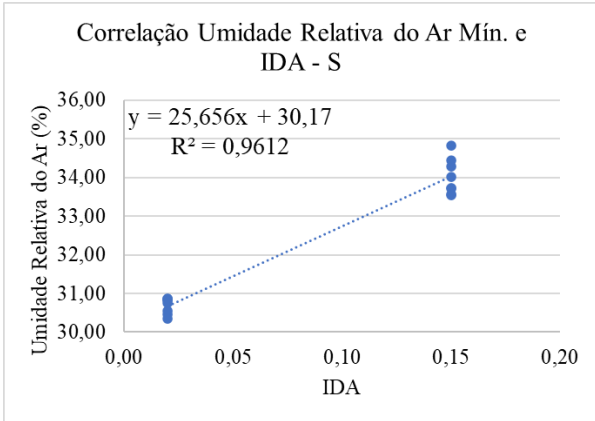
Estatística de regressão	
R	0,998840525
R ²	0,997682394
R ² ajustado	0,997516851
Erro padrão	0,603047639
Observações	16



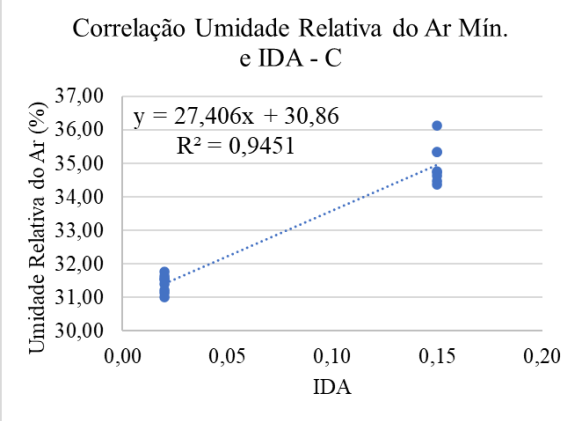
Estatística de regressão	
R	0,998630428
R ²	0,997262732
R ² ajustado	0,997067213
Erro padrão	0,656581393
Observações	16

Figura 77 – Diagrama de dispersão – representação da regressão linear com base na correlação entre a TRM máxima (variável dependente) e o IDA (variável independente): coeficiente de determinação (R^2) = 0,997 (S)/ 0,997 (C).

Fonte: Elaborado pela Autora.



Estatística de regressão	
R	0,980429872
R ²	0,961242734
R ² ajustado	0,958474358
Erro padrão	0,357976406
Observações	16



Estatística de regressão	
R múltiplo	0,97215702
R-Quadrado	0,945089272
R-quadrado ajustado	0,941167077
Erro padrão	0,459032581
Observações	16

Figura 78 – Diagrama de dispersão – representação da regressão linear com base na correlação entre a Umidade relativa do ar mínima (variável dependente) e o IDA (variável independente): coeficiente de determinação (R^2) = 0,961 (S)/ 0,945 (C).

Fonte: Elaborado pela Autora.

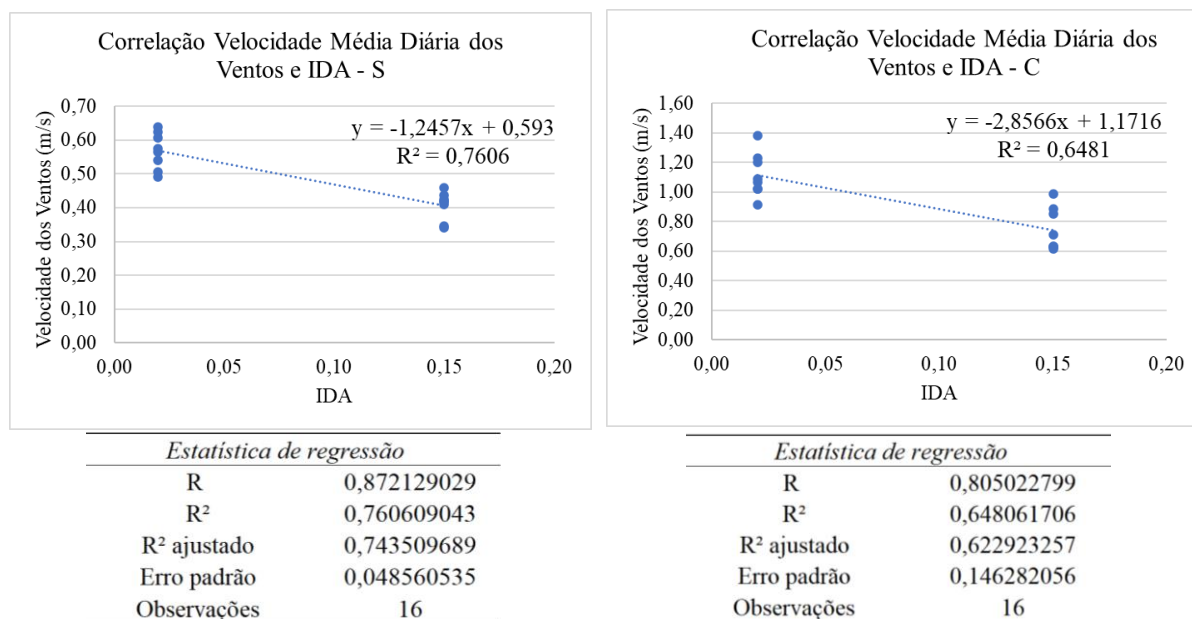


Figura 79 – Diagrama de dispersão – representação da regressão linear com base na correlação entre a Velocidade média dos ventos (variável dependente) e o IDA (variável independente): coeficiente de determinação (R^2) = 0,760 (S)/ 0,648 (C).

Fonte: Elaborado pela Autora.

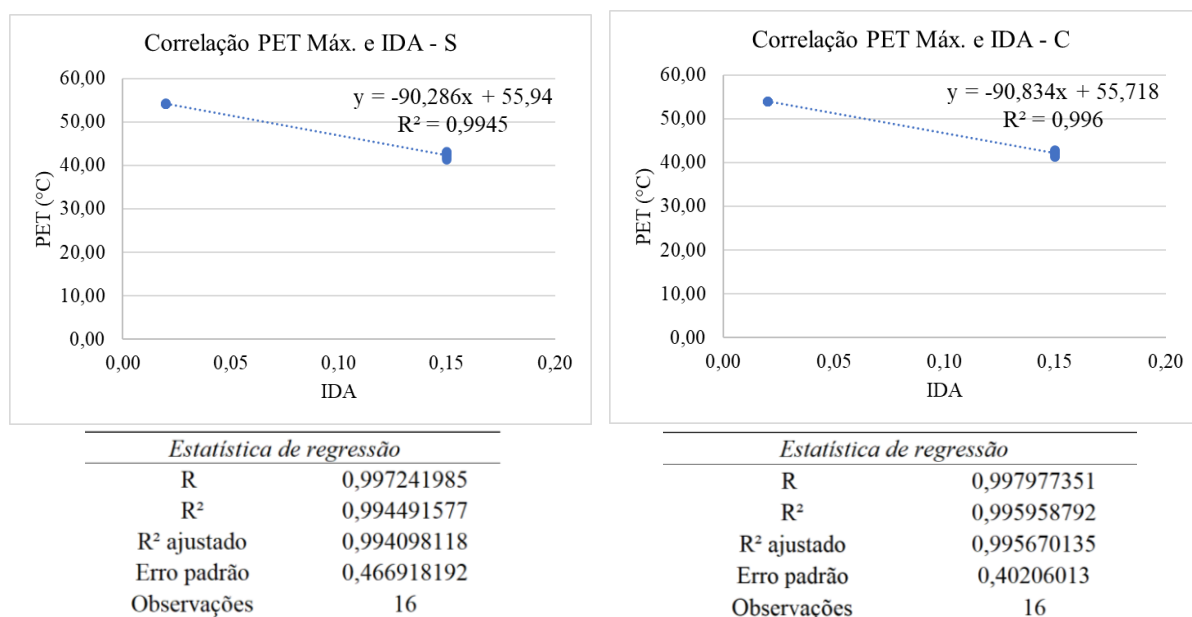


Figura 80 – Diagrama de dispersão – representação da regressão linear com base na correlação entre o PET máximo (variável dependente) e o IDA (variável independente): coeficiente de determinação (R^2) = 0,994 (S)/ 0,996 (C).

Fonte: Elaborado pela Autora.

Entre os parâmetros urbanísticos, o FCV e o IDA apresentaram o R^2 acima de 0,5. Observa-se que esses parâmetros influenciaram no desempenho térmico de todas as variáveis climáticas adotadas, indicando uma forte associação entre as variáveis e o potencial de

explicação da equação, gerada a partir da regressão linear. Com relação à TRM, o valor do coeficiente de determinação para o FCV foi igual a 0,9976 para a via secundária e 0,9814 para a calçada (ver Figura 77). Isso indica que 99,76% e 99,77% da variação na TRM máxima pode ser explicada pela variação no coeficiente do FCV, enquanto o restante dos 0,24% e 0,23% podem ser explicados por outros fatores.

Padrão de comportamento semelhante foi encontrado na representação da regressão linear com base na correlação da Temperatura Equivalente Fisiológica (PET): 0,9944 no ponto S e 0,9745 no ponto C (ver Figura 76), o que reforça a intrínseca relação entre o FCV e o conforto térmico ao ar livre, na escala do pedestre. Nesse sentido, torna-se importante destacar que, segundo os parâmetros de modelagem, a redução do FCV não deve ser dada pela massa edificada, pois prejudicaria a permeabilidade dos ventos na malha urbana e diminuiria o solo permeável disponível para inserção de uma infraestrutura verde no interior do cânion. É interessante que esse ajuste do FCV seja feito pelo uso de vegetação arbórea (que também promove o aumento da umidade relativa do ar), podendo ser somado à forma dos edifícios.

Na umidade relativa do ar mínima, o valor do coeficiente de determinação continuou alto para o FCV, com 0,9588 para o ponto S e 0,9037 para o ponto C (ver Figura 74). Assim, 95,88% e 90,37%, respectivamente, da variação na umidade relativa do ar mínima pode ser explicada pela variação no coeficiente do FCV, enquanto o restante dos 4,12% e 9,63% podem ser explicados por outros fatores, como a inserção de vegetação. Dentre as variáveis climáticas, a velocidade média dos ventos apresentou o menor valor do coeficiente de determinação para o FCV. No ponto S, o coeficiente de determinação R^2 foi de 0,7653, enquanto para o ponto C, foi 0,7614 (ver Figura 75). Esse dado indica que 76,53% e 76,14% da variação na velocidade média dos ventos pode ser explicada pela variação no coeficiente do FCV. O restante dos 23,47% e 23,86%, respectivamente, podem ser explicados por outros fatores, como a orientação das vias, a rugosidade, o formato e o espaçamento entre os edifícios.

A respeito da IDA, os valores dos coeficientes de determinação permaneceram altos entre as variáveis climáticas analisadas, assim como o padrão observado no FCV. Convém destacar que, apesar do FCV e do IDA apresentarem elevado coeficiente de determinação, a composição desses parâmetros urbanísticos está vinculada aos demais. Assim, os parâmetros urbanísticos tradicionais e avançados devem ser tratados a partir de uma análise holística, para promover o conforto térmico ao ar livre, no período quente e seco. O mesmo deve ocorrer com as variáveis climáticas analisadas, dado o alto grau de correlação com os parâmetros urbanísticos, comprovou-se o efeito de amenização térmica microclimática, com base na adoção das

principais estratégias bioclimáticas para o clima de Arapiraca/ AL (sombreamento, ventilação natural e resfriamento evaporativo). Além disso, reforça-se a emergente necessidade de revisão da legislação que trata do uso e ocupação do solo urbano em Arapiraca/AL.

4.3 Considerações a respeito do processo de verticalização para a cidade de Arapiraca/AL

A partir dos resultados obtidos, foram formuladas considerações sobre o processo de verticalização em Arapiraca e os possíveis impactos no microclima:

- Sobre a altura das edificações, a baixa rugosidade superficial do tecido urbano, resultante das edificações com alturas semelhantes, reduziu a velocidade dos ventos no interior dos cânions urbanos simulados. Contudo, o sombreamento gerado pelos edifícios contribuiu para a redução da Temperatura Radiante Média, quando comparados a edificações térreas (Brandão, 2020). Como recomendações, uma alternativa é verticalizar com o aumento da rugosidade superficial e a adoção de pavimentos vazados ou pilotis, possibilitando a maior permeabilidade aos ventos, ao tempo que mantem o cânion sombreado, favorecendo assim o conforto térmico do pedestre. O conforto térmico pode ainda ser potencializado com inserção de vegetação arbórea.
- Quanto ao recuo progressivo, o mesmo possibilita condições mais favoráveis à permeabilidade da malha urbana, aumentando a velocidade dos ventos, em comparação com o recuo mínimo inicial. No entanto, aumentar o espaçamento entre os edifícios diminui as áreas sombreadas no interior do cânion urbano, o que provocará o aumento da Temperatura Radiante Média (Brandão, 2020). A TRM tem uma relação direta com índice de Temperatura Equivalente Fisiológica (PET). A análise estatística apontou que o FCV foi o parâmetro urbanístico de maior impacto no índice PET. Isto indica que, em climas semiáridos (para o período quente e seco), as áreas mais abertas e expostas ao céu geram desconforto térmico durante o dia. Isso se deve à maior incidência solar direta, que aumenta a TRM. As recomendações são promover a adoção do recuo progressivo e estimular a inserção de elementos verdes⁵⁶ na malha urbana. Desta forma, potencializa-se o aproveitamento das três principais estratégias bioclimáticas locais: sombreamento, ventilação natural e resfriamento evaporativo.

⁵⁶ Elementos verdes: árvores nas calçadas e interior dos lotes, podendo ser associadas à arbustos; substituição das áreas impermeabilizadas por solo natural ou grama; e fachada verde. Obs.: A cobertura verde tem efeito para a amenização térmica no interior da edificação.

- Com relação ao formato dos edifícios, o **Edifício Torre** gerou o aumento da velocidade dos ventos à barlavento, devido à canalização do fluxo de ar, enquanto reduziu a velocidade do mesmo à sotavento. O **Edifício Torre com Pilotis** gerou o aumento da velocidade dos ventos à barlavento, devido à canalização do fluxo de ar. À sotavento, a presença de *pilotis* aumentou a velocidade dos ventos. Reduziu a área de sombra, o que eleva a Temperatura Radiante Média. Em ambos os formatos, tem-se a redução da área de sombra, o que eleva a Temperatura Radiante Média. Esse formato possibilita o uso da área livre do lote para inserção de vegetação, apresentando potencial para incrementar a qualidade urbana, por meio de espaços públicos mais fluidos, a vivacidade e a gentileza urbana. O **Edifício Base com Torre** produz uma redução da velocidade dos ventos no nível do pedestre, em função da obstrução gerada pela base do edifício. Contudo, a área de sombra projetada pelo edifício aumentou, o que reduziu a Temperatura Radiante Média, contribuindo para o conforto térmico. Além disso, favorece o uso misto do solo e a interação social. No **Edifício Base com Torre e Pilotis**, a adoção de *pilotis* contribui para a permeabilidade dos ventos, aumentando a velocidade do fluxo de ar, à barlavento e à sotavento. Mantém-se a maior área de sombra gerada pela base do edifício, o que reduz a Temperatura Radiante Média e contribui para o conforto térmico, além de favorecer o uso misto do solo e interação social. *Opilotis* possibilita o uso da área livre do lote para inserção de vegetação, e o uso do topo (*rooftop*) e cobertura da base do edifício para inserção de elementos verdes. Tais características conferem potencial para incrementar a qualidade urbana, por meio de espaços públicos mais fluidos, a vivacidade e a gentileza urbana. Nesse sentido, a adoção de *pilotis* e o formato dos edifícios torre e base com torre influenciam na permeabilidade da malha urbana e no acesso solar em cânions urbanos. Como recomendação, tem-se de estimular a adoção da tipologia construtiva de edifícios no formato base com torre e adoção de *pilotis*, que apresentou o efeito de potencializar o aproveitamento das estratégias bioclimáticas locais (sombreamento, ventilação natural e resfriamento evaporativo). Além disso, de acordo com Jane Jacobs (2011), tem-se a integração de usos mistos, pois a base pode abrigar comércio e serviços, promovendo a interação social e reduzindo a necessidade de deslocamentos urbanos.
- Quanto ao tipo de remembramento dos lotes, o tipo de remembramento LL permite uma maior área de sombra projetada no interior do cânion urbano, o que reduz a Temperatura Radiante Média, que possui estreita ligação com o índice de Temperatura Equivalente Fisiológica – PET. Assim, foram obtidos os resultados mais favoráveis ao conforto

térmico no nível do pedestre. No entanto, a malha com remembramento tipo FF potencializou o aproveitamento da ventilação natural e resfriamento evaporativo. Para a fração urbana analisada, a recomendação é verticalizar com o remembramento tipo FF, favorecendo a permeabilidade dos ventos, o que gera o aumento da velocidade do mesmo. O sombreamento no nível do pedestre pode ser alcançado com a inserção de vegetação arbórea, que também elevará os dados de umidade relativa do ar (resfriamento evaporativo).

- Sobre o uso da vegetação, foi o parâmetro de modelagem de impacto mais significativo na amenização térmica, resultando em reduções superiores a 28,9°C na TRM e no aumento da umidade relativa do ar, de 5% a 11%. O incremento da umidade relativa do ar não favoreceu à redução da temperatura do ar, nesse sentido, foi pouco significativo. Assim, a principal contribuição da proposta de uso de vegetação adotada (inserção linear de árvores nas calçadas) para a redução do desconforto térmico, com reduções superiores a 11°C nos valores máximos do índice PET, foi atribuída ao sombreamento proporcionado pelas copas das árvores. A fim de possibilitar a inserção das árvores nas calçadas, o que também auxiliará na permeabilidade das águas pluviais (evitando a ocorrência de enchentes), é imprescindível a preservação da acessibilidade nas calçadas. A recomendação é que, ao considerar o clima local, para incrementar os valores da umidade relativa do ar no período mais crítico do dia (às 15h), é necessário compor um sistema de elementos verdes (coberta e fachada verde; árvores nas calçadas e interior dos lotes, composições com arbustos; e o aumento das áreas de solo natural ou com grama – permeável).

Os resultados das simulações indicaram a ocorrência de desconforto térmico no intervalo entre as 9h e 18h, demonstrando o impacto negativo da verticalização no limite da saturação da ocupação dos lotes. Isto demonstra a imprescindibilidade da revisão do atual Plano Diretor (Arapiraca, 2006) e Código de Obras e Edificações (Arapiraca, 2001) para compor medidas que possam otimizar o aproveitamento das principais estratégias bioclimáticas locais (sombreamento, ventilação natural e resfriamento evaporativo).

A relação entre urbanização e degradação ambiental não pode ser entendida como processos diretamente associados. Por meio da inserção de estudos climáticos no planejamento urbano é possível compor cidades sustentáveis e resilientes.



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A urbanização é um processo socioeconômico complexo que representa a gradativa modificação do ambiente natural para o construído, que conforma um clima tipicamente urbano. A ausência de planejamento e a descontinuidade administrativa, comumente, ocasionam outros dois processos: o adensamento construtivo e a degradação do ambiente. Tais processos resultam na perda da qualidade de vida em decorrências de diversos impactos ambientais (como as ICU, enchentes, desmoronamentos, efeito *smog*, entre outros). Diante desse cenário, há um crescente debate acerca da necessidade de conciliar o crescimento e desenvolvimento urbano e econômico com o equilíbrio entre geração de riqueza e qualidade de vida e ambiental no meio ambiente urbano, de forma a promover um desenvolvimento sustentável.

Na abordagem preditiva, tem-se um importante aspecto para o estudo da adequação urbana ao clima local, os princípios da bioclimatologia urbana. Nesse contexto, a presente pesquisa visou analisar a influência da verticalização nas condições de conforto térmico ao ar livre na escala do pedestre, no contexto climático semiárido de Arapiraca/AL. Diante do Plano Diretor municipal vigente, observou-se a ausência de parâmetros urbanísticos essenciais para o controle e ordenamento do uso e ocupação do solo, especialmente os que regulam a compactidade urbana. Tal situação configura sérios riscos ambientais à população. Assim, ao considerar que o planejamento urbano deve prever medidas a curto, médio e longo prazo, a forma urbana foi tratada de forma a conciliar o aproveitamento das estratégias bioclimáticas locais (sombreamento, ventilação natural e resfriamento evaporativo) a partir de parâmetros urbanísticos tradicionais e avançados.

Os capítulos teóricos permitiram compreender os conceitos e as contribuições recentes acerca dos temas que envolvem o desenvolvimento da pesquisa, desde a configuração da cidade como principal palco das atividades humanas, o crescente debate sobre as alterações climáticas advindas do processo de urbanização e como planejamento urbano multidisciplinar e sustentável tem o potencial de minimizar ou evitar os efeitos adversos da ação humana. Com base na bioclimatologia urbana, torna-se possível realizar estudos climáticos e projeções de possíveis impactos no microclima local, que podem subsidiar as atuações dos gestores urbanos. Nesse contexto, o planejamento urbano sustentável parte do princípio de que cidades compactas e de alta densidade, compostas de usos mistos da terra e comunidades caminháveis, são mais eficientes. Aliado ao recente processo de verticalização da cidade de Arapiraca, tem-se a

iminente revisão do Plano Diretor. Assim, a presente pesquisa trouxe contribuições pertinentes que podem auxiliar os gestores públicos no planejamento urbano.

Mediante a metodologia aplicada, com base na abordagem preditiva, os resultados obtidos demonstraram que o objetivo geral foi alcançado. Para isso, o ponto de partida foi caracterizar o processo de urbanização e o clima de Arapiraca/AL. O presente objeto de estudo é classificado como cidade de médio porte, e, nos últimos anos, tem-se observado um processo inicial de verticalização em determinados tipos de tecidos urbanos. No entanto, a implantação dos edifícios ocorre na ausência de parâmetros urbanísticos que regulem essa tipologia construtiva. Além disso, O Plano Diretor Participativo da cidade⁵⁷ ainda não conta com a revisão e criação de instrumentos jurídicos, como a Lei de Uso e Ocupação do Solo, Código de Edificações e Urbanismo⁵⁸, Código do Meio Ambiente e Lei de Zoneamento. Nesse contexto, o crescimento e desenvolvimento urbano de Arapiraca se encontra vulnerável aos interesses do mercado imobiliário sem nenhum estudo quanto aos impactos climáticos decorrentes dos padrões construtivos adotados. Observando-se os tecidos urbanos com tendência à verticalização identificados na cidade, foi selecionada a fração urbana que serviria de base para a modelagem dos cenários urbanos hipotéticos. Assim, no tecido Horizontal Disperso, foi selecionada uma fração situada no perímetro que corresponde a Avenida Deputada Ceci Cunha, por apresentar diversos vazios urbanos e edificações verticalizadas.

Na caracterização do clima de Arapiraca/AL, foi realizado um levantamento de pesquisas recentes que apresentam o perfil climático da cidade e as principais estratégias bioclimáticas para adequação da forma urbana. A análise do perfil climático se fez necessária para compor os dados de entrada no *software* ENVI-met, enquanto as estratégias bioclimáticas, para a definição dos parâmetros de modelagem dos cenários urbanos hipotéticos. Nesse processo, foram fundamentais os estudos de Torres (2017) e Torres e Freitas (2023)⁵⁹, para obtenção da calibração do modelo micro meteorológico para a configuração do arquivo climático; e de Silva (2019), para identificar as principais estratégias bioclimáticas (sombreamento, ventilação natural e resfriamento evaporativo) para a adequação da forma urbana de Arapiraca/AL, no

⁵⁷ Arapiraca, 2006.

⁵⁸ Arapiraca, 2001.

⁵⁹ Em sua tese e em estudos posteriores, Torres (Torres, 2017; Torres; Freitas, 2023) realizou a calibração do modelo ENVI-met para simulação computacional de cenários hipotéticos, para diferentes tipos de tecidos urbanos na cidade de Arapiraca/AL, legitimando o seu uso por futuros pesquisadores. Por analisar uma fração urbana no tecido que fora abordado pelos autores citados, optou-se por utilizar a calibração já disponível e válida.

período quente e seco. Assim, o dia 03/01/2016 foi selecionado para gerar as simulações computacionais.

Com relação à análise preditiva, o próximo passo consistiu em definir os parâmetros de modelagem dos cenários urbanos hipotéticos. Para isso, a Revisão Sistemática de Literatura - RSL (com base no método PRISMA) desempenhou um papel fundamental. Como resultado, observou-se que o *software* de simulação computacional para análise do clima urbano mais utilizado foi o ENVI-met; que o índice de conforto térmico ao ar livre mais utilizado foi o PET; que as variáveis climáticas comumente adotadas para análise dos resultados foram a temperatura do ar, a TRM, a umidade relativa do ar e a velocidade e direção dos ventos; que os modelos foram simulados com base no dia mais quente do verão, com maior temperatura e umidade relativa do ar; e que, à respeito da forma urbana, as estratégias bioclimáticas com melhores índices de desempenho térmico podem ser agrupadas com relação à geometria urbana, o albedo dos materiais da superfície urbana (coberta/fachada/solo), e a inserção de vegetação. Visando alinhar os parâmetros de modelagem às principais estratégias bioclimáticas locais, mantiveram-se os mesmos valores de albedo dos materiais das cobertas e edifícios em todos os cenários. Quanto às propriedades térmicas das superfícies (vias, calçadas e interior do lote), foram considerados os valores dos materiais já existentes, observados em visitas *in loco*. De maneira geral, a RSL permitiu delimitar a pesquisa, ao indicar os parâmetros de modelagem dos cenários urbanos hipotéticos dentre uma grande quantidade de possibilidades.

Acerca dos parâmetros de modelagem, ressalta-se que a presente pesquisa adotou como recorte os efeitos no microclima, a partir do conforto térmico ao ar livre, em um cenário onde a verticalização ocorresse no limite da saturação da ocupação urbana em todos os lotes da fração urbana selecionada. Por essa razão os edifícios apresentam a mesma altura, correspondendo a uma baixa rugosidade, com coeficientes de aproveitamento elevados⁶⁰. A abordagem adotada para a elaboração dos cenários não considerou buscar um modelo de ocupação ideal, mas sim o panorama apresentado com a inserção de parâmetros bioclimáticos, a partir da influência da geometria urbana (expressa pela relação H/W e FCV) e do uso de vegetação no microclima de cânions urbanos, na escala do pedestre, utilizando como indicadores: temperatura do ar, TRM, umidade relativa do ar, e velocidade e direção dos ventos. Além disso, também foi considerado

⁶⁰ Estudos anteriores já demonstraram a importância do aproveitamento da ventilação natural, na conformação do microclima, para se obter condições favoráveis ao conforto térmico na escala do pedestre, na presente fração urbana (Brandão, 2020; Brandão; Barbosa, 2023; Brandão; Barbosa, 2024). Assim, visando a permeabilidade dos ventos no interior do cânion urbano, aumentar valor do coeficiente de aproveitamento permite o uso do recuo progressivo, representando uma estratégia mais adequada sob o ponto de vista bioclimático do que aumentar a taxa de ocupação dos terrenos.

o índice PET. Assim, foram compostos 16 cenários urbanos hipotéticos com a adoção dos seguintes parâmetros urbanísticos: recuo progressivo, Taxa de Ocupação (TO), Porosidade do Volume Edificado (Po Vedif), uso de *pilotis*, formato dos edifícios, tipo de remembramento dos lotes, Fator de Céu Visível (FCV), relação H/W e Índice de Densidade Arbórea (IDA).

Com o intuito de investigar o padrão de comportamento das variáveis ambientais relacionadas ao conforto térmico, correlacionando com os aspectos da forma urbana, para o período quente e seco, os resultados das simulações computacionais foram analisados em duas etapas: a análise qualiquantitativa comparativa do comportamento climático de cada variável considerada; e a análise de correlação entre os parâmetros climáticos e urbanísticos. Convém destacar que a presente pesquisa não pretendeu defender um determinado padrão de forma urbana, visto que o planejamento urbano deve ser pautado por estudos bioclimáticos, de caráter individualizados, segundo as características climáticas, geográficas, culturais e urbanas locais. Apesar da quadra, como unidade mínima de planejamento urbano, potencializar a incorporação das estratégias bioclimáticas, é essencial o amadurecimento da viabilidade legal e jurídica e estudos bioclimáticos para a sua efetiva aplicação e a instrumentalização do Plano Diretor.

Diante da realidade do presente objeto de estudo, a cidade de Arapiraca/AL, há um crescente avanço em pesquisas para compreensão do clima urbano local e o conforto térmico, na escala do microclima⁶¹. No entanto, quanto ao aparato jurídico e legal, no que tange o planejamento urbano e gestão territorial, infelizmente, um planejamento urbano bioclimático ainda é uma realidade ainda distante. Nesse contexto, não é recomendado que o crescimento urbano ocorra segundo os interesses do mercado imobiliário. Por isso, como contribuição teórica da pesquisa, buscou-se atender às solicitações climáticas locais por meio do lote, considerando o aumento da densidade construtiva.

A análise qualiquantitativa comparativa do desempenho climático se deu por meio dos dados horários ao longo do dia, da análise estatística descritiva e comparativa efetuada, e a análise dos perfis e mapas 2D dos cenários simulados. Nesse contexto, confirmou-se a hipótese de que a forma urbana dos cânions influencia no microclima e no conforto térmico ao ar livre, no nível do pedestre, com base no índice PET. Vale destacar que as temperaturas do ar máximas alcançadas nos diferentes cenários foram semelhantes, com diferenças inferiores a 1°C. Assim,

⁶¹ Barbirato; Torres; Barbosa, 2015; Brandão, 2017; Torres, 2017; Silva, 2019; Brandão, 2020; Silva; Barbosa; Batista, 2020; Pereira; Brandão; Barbosa, 2021; Silva; Barbosa, 2022; Brandão; Barbosa, 2023; Leal; Barbosa, 2023; Torres; Freitas, 2023; Brandão; Barbosa, 2024.

para avaliação do desempenho climático, considerou-se as demais variáveis climáticas para as análises dos resultados das simulações.

Com relação aos parâmetros de modelagem dos cenários urbanos hipotéticos, o uso de vegetação arbórea exerceu um impacto mais significativo na amenização térmica, resultando em: reduções de até 25,4°C na TRM, ao comparar os cenários FF-T (66,9°C) e LL-BPV (41,5°C); no aumento da umidade relativa do ar, de até 5% (para os cenários sem acréscimo de vegetação arbórea) a 11% (para os cenários com acréscimo de vegetação arbórea), em relação ao período diurno (especificamente às 15h – período com as condições climáticas mais adversas durante o dia) e noturno, respectivamente. O incremento da umidade relativa do ar não favoreceu a redução da temperatura do ar, sendo pouco significativo nesse sentido. Assim, a principal contribuição da proposta de uso de vegetação adotada (inserção linear de árvores nas calçadas) para a redução do desconforto térmico, com reduções de até 12,8°C nos valores máximos do índice PET, entre os cenários FF-T (54,2°C) e FF-BPV (41,4°C), foi atribuída ao sombreamento proporcionado pelas copas das árvores.

No contexto climático de Arapiraca, esse resultado demonstrou que, ao considerar o aumento da densidade construtiva pela verticalização, sem o devido planejamento urbano, a inserção de vegetação arbórea nas calçadas, como elemento verde, é insuficiente para aumentar os dados da umidade relativa do ar, principalmente no período mais crítico do dia, às 15h, quando os valores da temperatura do ar são mais elevados. Tal resultado sinaliza a necessidade de planejar a infraestrutura verde⁶² urbana com o estímulo da adoção das cobertas e fachadas verdes; da redução de áreas impermeáveis, dando lugar ao uso do solo natural e grama; e do plantio de árvores no interior dos lotes. Para isso, é imprescindível alinhar tais medidas nos parâmetros urbanísticos, como a Taxa de Permeabilidade, Taxa de Ocupação, Recuos mínimos e progressivos e o Índice de Densidade Arbórea. Assim, será possível integrar o aproveitamento das principais estratégias bioclimáticas locais (sombreamento, ventilação natural e resfriamento evaporativo) na ocupação do solo urbano, com reconhecidos benefícios para o microclima e qualidade ambiental da cidade.

Convém salientar o papel da calçada como elemento do planejamento e uso do solo urbano. A norma NBR 9050 (NBR, 2020), que trata da acessibilidade a edificações, mobiliário,

⁶² Infraestrutura Verde, no contexto do planejamento urbano e regional, trata-se de um conjunto de áreas naturais e outros espaços abertos conectados que preservam os valores e as funções dos ecossistemas, como a proteção de mananciais, o controle ambiental, a regulação do clima, além de oferecer oportunidades de recreação e lazer, proporcionando uma ampla variedade de benefícios para a sociedade (Santos; Enokibara, 2021).

espaços e equipamentos urbanos, indica a medida mínima de 1,5 m de largura para as calçadas, e desta medida a faixa livre ou passeio deve ter 1,2 m, para uso exclusivo à circulação de pedestres. Nesse sentido, a medida restante seria para faixa de serviço, que serve para alocar canteiros, árvores e postes de iluminação/ sinalização. Ao considerar a importância de conformar um microclima mais ameno no percurso do pedestre nos passeios urbanos, recomenda-se uma revisão da regulamentação para aumentar a medida mínima exigida da faixa de serviço da calçada, nas áreas urbanas a serem parceladas, de forma a proporcionar a inserção de diferentes espécies arbóreas nos novos parcelamentos na zona de expansão urbana. Além disso, faz-se necessário o estudo da viabilidade de infraestrutura no que tange as raízes das árvores, de forma a selecionar a espécie mais adequada para o espaço ofertado.

O processo de implantação de Residenciais Horizontais Fechados em Arapiraca teve início em 2006 e ainda está em desenvolvimento. Nesse sentido, é possível que nessas áreas sejam implementadas medidas que viabilizem a aplicação de princípios bioclimáticos adequados ao clima local, resultado de estudos como a presente pesquisa. A exemplo, tem-se o aumento da faixa de serviço das calçadas, para permitir o plantio de árvores de grande porte e arbustos e a inserção de canteiros centrais arborizados entre as vias. Nas áreas urbanas já consolidadas, pode-se intervir ao incentivar o cultivo de espécies arbóreas no interior do lote, às margens das calçadas, para que seja possível alcançar o perímetro de trânsito dos pedestres. Além disso, é possível a promoção de iniciativas no processo de composição do projeto arquitetônico dos edifícios, para prever estruturas verdes nas fachadas, cobertas e nos pavimentos base, quando houver.

A respeito dos demais parâmetros de modelagem, os cenários cujos edifícios possuíam formato base com torre⁶³ e adoção de *pilotis* obtiveram os resultados mais favoráveis, tanto para o remembramento dos lotes tipo frente e fundo (FF) quanto tipo lado a lado (LL), pois a base dos edifícios gerou uma maior obstrução da abóbada celeste, no nível do pedestre, oferecendo uma projeção maior da área de sombra; ao passo que a adoção de *pilotis* favoreceu a permeabilidade dos ventos. Já os cenários com edifícios no formato torre, sem *pilotis* e com o remembramento LL obtiveram os resultados mais desfavoráveis, devido à maior incidência

⁶³ Apesar dessa tipologia apresentar uma taxa de ocupação mais elevada, em comparação com o edifício no formato torre, o que reduz a área que elementos verdes poderiam ser inseridos, a base pode ser utilizada como um ‘segundo pavimento urbano’, onde o projeto dos edifícios pode prever áreas para a inserção de elementos verdes. Além disso, tem-se a qualidade urbana, por meio de espaços públicos mais fluidos, de uso misto, que promovem a vivacidade e gentileza urbana. Pontos que são abordados nos seguintes Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: 9. Indústria, inovação e infraestrutura, 10. Redução das desigualdades, 11. Cidades e Comunidades Sustentáveis e 13. Ação contra a mudança global do clima (Ministério do Desenvolvimento Regional, 2022).

solar direta, a redução da permeabilidade dos ventos à barlavento e, especialmente, à sotavento. Os dados simulados demonstraram a estreita relação entre a TRM e a Temperatura Equivalente Fisiológica - PET.

Sobre a velocidade dos ventos, o parâmetro adotado para a rugosidade (os edifícios foram modelados com a mesma altura), demonstrou afetar diretamente a velocidade das massas de ar que alcançaram a estrutura urbana. A rugosidade influencia nas condições de permeabilidade dos ventos e, conseqüentemente, no ambiente térmico no interior de uma estrutura urbana. Assim, para o aproveitamento da ventilação natural, como estratégia bioclimática, é indicado aumentar a rugosidade, estimulando a diversidade na altura das edificações, e aumentar a porosidade da malha urbana, pela distribuição e formato dos edifícios e a adoção de *pilotis*. No período em que a temperatura do ar é elevada a ponto de tornar a ventilação natural desconfortável, recomenda-se associá-la ao uso de vegetação arbórea, que contribui para a redução da temperatura do ar e da TRM, o aumento da umidade relativa e o direcionamento e/ou moderação da velocidade dos ventos.

Os resultados também indicaram que no período diurno, a partir das 9h até às 17h, não foi possível atingir a sensação de conforto térmico nos pontos de análise dos dados. Torna-se importante destacar que a presente pesquisa adotou como recorte a influência da verticalização nas condições de conforto térmico ao ar livre, considerando que a mesma ocorra nos limites da saturação da ocupação urbana, tomando como referência um dia com condições de temperatura do ar e umidade relativa do ar extremas, no verão. Ao considerar os resultados obtidos, estudos futuros podem ser feitos com o fim de atingir a sensação de conforto térmico, por meio do: aumento da rugosidade, composição de uma infraestrutura verde (com a inserção de elementos verdes), redução das superfícies urbanas impermeáveis, e adoção adequada dos materiais que revestem a superfície dos elementos urbanos. Além disso, faz-se necessário realizar a calibração do PET⁶⁴ para a cidade de Arapiraca/AL, o que se tornou inviável, em vista o cronograma da presente pesquisa, devido às limitações advindas do início da pandemia pelo COVID-19.

Na segunda etapa, foi verificado, inicialmente, a matriz de correlação entre as variáveis independentes (parâmetros urbanísticos) avaliadas com base nos cenários urbanos hipotéticos propostos. Os resultados apontaram uma correlação negativa forte entre o Índice de Densidade

⁶⁴ A calibração do índice PET (*Physiological Equivalent Temperature*) é o processo de ajustar os valores do índice para refletir as preferências térmicas locais. Dentre as etapas que compõe o processo de calibração, tem-se a pesquisa com participantes locais, a partir de questionários de conforto com pedestres ou moradores para avaliar a percepção térmica, avaliação e preferências térmicas, aceitação pessoal e tolerância (Krüger et al., 2018).

Arbórea e o Fator de Céu Visível ($r = -0,963$), indicando que, sob um mesmo padrão de massa edificada, o uso de árvores de grande porte pode aumentar a obstrução da abóbada celeste, gerando uma maior projeção da área sombreada no nível do pedestre, no interior do cânion urbano. A redução do FCV pela massa edificada pode gerar sérios danos no aproveitamento da ventilação natural⁶⁵, além de reduzir a área de solo permeável e disponível para a inserção de elementos verdes, aumentando a probabilidade de ocorrência de enchentes nas cidades e diminuindo a umidade relativa do ar, respectivamente.

Houve, também, uma correlação negativa forte entre a taxa de ocupação, e o recuo progressivo ($r = -0,93005$). Indicando que à medida que a taxa de ocupação aumenta (ou seja, maior proporção do lote ocupado por edificações), o recuo progressivo tende a diminuir (menor distância entre as edificações e os limites do lote). Essa relação é significativa no contexto do microclima urbano, pois ambos os parâmetros influenciam, especialmente, na temperatura do ar, temperatura radiante média (TRM) e velocidade dos ventos. Na temperatura do ar, o aumento da taxa de ocupação e a redução do recuo progressivo promovem a compactação dos espaços urbanos, o que intensifica a absorção e acúmulo de calor pelas superfícies construídas, resultando em maior irradiação térmica para o entorno. Essa configuração contribui para as Ilhas de Calor Urbana, elevando a temperatura do ar e a TRM, prejudicando o conforto térmico.

Ainda com relação à compactação dos espaços urbanos, isso pode diminuir a área livre disponível para a inserção de vegetação arbórea, diminuindo a área sombreada no interior do cânion, assim como pode agravar os problemas de escoamento superficial e enchentes. A respeito da velocidade dos ventos, essa correlação resulta em maior densidade construtiva somada à menor porosidade do tecido urbano, criando barreiras ao fluxo de ar, e ocasionando uma redução da velocidade dos ventos. A velocidade dos ventos é essencial para dissipar o calor em ambientes urbanos, reduzindo a carga térmica acumulada durante o dia, o que favorece o conforto térmico urbano. Os resultados demonstram a relação entre parâmetros urbanísticos tradicionais e os denominados avançados, assim como apontam a importância de políticas urbanísticas que equilibrem adensamento com o aproveitamento das principais estratégias bioclimáticas para Arapiraca, como o incentivo do recuo progressivo com a incorporação de elementos verdes no interior do cânion urbano.

No estudo de correlação linear entre variáveis dependentes (variáveis ambientais da via secundária) e as variáveis independentes (parâmetros urbanísticos), adotou-se o nível de

⁶⁵ Brandão, 2020; Brandão, Barbosa, 2024.

significância de 95%. Verificou-se que os valores que podem ser denominados como significantes foram os correspondentes aos coeficientes de correlação do FCV e do IDA, em relação às variáveis climáticas analisadas (TRM, umidade relativa do ar, velocidade dos ventos e o índice PET); e a relação H/W e TO, em relação à correlação com a TRM e o índice PET. Na análise dos coeficientes de determinação, foram selecionados os pares de dados com valores acima de 0,5. Os parâmetros de FCV e IDA influenciaram no desempenho climático de todas as variáveis climáticas adotadas. Esse resultado indica uma forte associação entre as variáveis e o potencial de explicação da equação, gerada a partir da regressão linear simples. É importante destacar que, apesar do FCV e do IDA apresentarem elevado coeficiente de determinação, a composição desses parâmetros urbanísticos está vinculada aos demais. Assim, os parâmetros urbanísticos tradicionais e avançados devem ser tratados a partir de uma análise holística, para promover o conforto térmico ao ar livre, no período quente e seco.

Nesse sentido, confirmou-se o efeito de amenização microclimática, com base na adoção das principais estratégias bioclimáticas para o clima de Arapiraca/ AL (sombreamento, ventilação natural e resfriamento evaporativo). Ao considerar o crescimento das cidades, no modelo de cidade compacta é imprescindível o desenvolvimento de estudos que abordem o controle do adensamento construtivo, visando o conforto térmico ao ar livre, de forma a melhorar a qualidade de vida e sustentabilidade do meio ambiente urbano. Além disso, ressalta-se a importância de estudos preditivos na composição do planejamento urbano, especialmente na composição dos parâmetros urbanísticos que possam contribuir para conformação da forma urbana adequada ao clima local. Por fim, reforça-se a emergente necessidade de revisão da legislação que trata do uso e ocupação do solo urbano de Arapiraca/AL, para incorporação de parâmetros urbanísticos tradicionais e avançados⁶⁶.

A respeito dos resultados alcançados, algumas limitações devem ser consideradas, como a realização das simulações computacionais dos cenários paramétricos para um único período do ano, o quente e seco (verão). Assim, é indicado que estudos sejam feitos para o período quente e úmido e no equinócio, dada a relevância do caminho do sol no aproveitamento do sombreamento como estratégia bioclimática. O caminho do sol determina os ângulos de incidência solar nas superfícies horizontais (ruas, praças) e verticais (fachadas de edificações), ao longo do dia e do ano. Um planejamento adequado pode minimizar o impacto da radiação

⁶⁶ É importante destacar que os resultados obtidos são específicos para a fração urbana analisada, para estudos de outras cidades médias é imprescindível considerar as características climáticas e urbanísticas, para estudo da forma urbana. No caso da função urbana, aspectos culturais e econômicos também são inseridos.

direta em horários críticos (meio-dia e tarde) e nas fachadas mais expostas, como as voltadas para o oeste e leste. Em climas quentes e secos ou semiáridos, onde o controle da radiação solar é essencial para a mitigação do calor, compreender a trajetória solar é fundamental para otimizar o sombreamento e promover o conforto térmico.

Outra limitação correspondeu às questões técnicas, como o número de cenários urbanos hipotéticos, e a indisponibilidade de capacidade computacional adequada ao uso da versão mais recente do *software* ENVI-met. Seria demandado um extenso número de cenários urbanos hipotéticos para atingir a complexidade que envolve todos os fatores ambientais e da morfologia urbana na análise do desempenho climático do cânion urbano. Em um cenário real, tem-se questões sociais (relacionadas à cultura local, à vizinhança), de infraestrutura (do sistema viário, de saneamento e energia), jurídicas (relacionadas às leis municipais de uso e ocupação do solo urbano) e econômicas, que necessitam ser consideradas no adensamento urbano com base no processo de verticalização. Para a presente pesquisa, foram selecionados e fundamentados, conforme descrito no capítulo de metodologia, os 16 cenários urbanos utilizados na análise, de forma a contemplar os principais aspectos relevantes à avaliação do desempenho climático no contexto do cânion urbano.

Com relação ao uso do *software* ENVI-met, inicialmente, pretendeu-se utilizar a versão mais recente do programa, cedida gratuitamente mediante um pedido feito à equipe ENVI-met. Contudo, em face das limitações técnicas de equipamentos com uma configuração computacional de alta performance, seu uso foi inviabilizado. Além disso, observou-se que, por se tratar de uma licença *online*, a instabilidade da rede de *internet* local não permitiu o progresso de algumas simulações-testes, realizadas em computadores *gamers* emprestados por pessoas que se solidarizaram com a presente pesquisa. Nesse sentido, diante dos inúmeros erros de cálculos, gerados pelas falhas de *internet*; e do tempo de simulação dos cenários (entre 5 e 7 dias), comumente interrompidos por quedas de energia, optou-se por não prosseguir com a versão mais recente (ENVI-met 5.5.1) para as simulações. Assim, a versão ENVI-met 4.0 foi adotada para realizar as simulações computacionais.

É importante destacar que, mediante a metodologia adotada na presente pesquisa, ambas as versões apresentam os mesmos recursos necessários para alcançar os objetivos propostos. Diversos pesquisadores também utilizaram a versão mencionada para a simulação dos cenários

urbanos hipotéticos⁶⁷. A versão mais recente foi utilizada para a extração e tratamento dos dados gerados, pela possibilidade de obter o índice de conforto PET através da interface BIO-met do programa. Com relação ao cenário em que a pesquisa foi desenvolvida, uma grande limitação foi imposta em seu início, em 2020: vivenciar a pandemia COVID-19; o que gerou algumas dificuldades para seguir o cronograma apresentado no Plano de Doutorado, como o início das atividades junto ao Programa de Pós-Graduação, pela inesperada necessidade de adaptação para as aulas e/ou assessoramentos de forma remota.

Ao final da presente pesquisa, tornar-se-á possível apontar diversos temas que podem ser abordados em trabalhos futuros, como:

- A análise do período quente e úmido em cidade de clima semiárido, de forma a se constituir parâmetros que atinjam condições térmicas favoráveis ao conforto térmico ao ar livre durante todos os períodos do ano;
- A análise de cenários urbanos hipotéticos com o aumento da rugosidade;
- Analisar o efeito de diferentes tipos de materiais nas cobertas, fachadas e superfície do solo urbano, com enfoque no albedo;
- Analisar o efeito de outros tipos de elementos verdes;
- Analisar outros tipos de tecido urbano;
- Analisar os efeitos da forma associada à função urbana⁶⁸, no desempenho térmico em cânions urbanos.

Conclui-se, portanto, que dentre os parâmetros de modelagem dos cenários urbanos hipotéticos, estabelecidos na metodologia da presente pesquisa, o tipo de remembramento e o formato dos edifícios foram determinantes para potencializar os benefícios advindos da estratégia de maior influência na conformação do microclima do cânion urbano: a inserção de vegetação. Ao considerar o clima semiárido, para o período quente e seco, a presença de árvores nos passeios aumentou a área de sombreamento, reduzindo os valores da temperatura radiante média ao passo que permitiu a conformação de uma massa urbana edificada que auxilia na permeabilidade dos ventos; gerou o aumento da umidade relativa do ar; e reduziu os efeitos de

⁶⁷ Sharmin; Steemers; Matzarakis, 2017; Chatterjee et al., 2019; Manteghi; Shukri; Lamit, 2019; Muniz-Gäal et al., 2019; Kotharkar; Bagade; Singh, 2020; Darbani et al., 2021; Sadeghi; Bahadori, 2021.

⁶⁸ A forma urbana envolve os usos e processos subjacentes que moldam uma cidade, incluindo seu uso do solo, sua economia e os ciclos do metabolismo urbano, que operam em diferentes escalas de tempo (Oke et al., 2017, p.483, tradução nossa).

canalização dos ventos nas vias principais, o que diminui as áreas de estagnação de ar nas ruas perpendiculares e à sotavento das edificações.

Ao considerar uma cidade de médio porte, a presente pesquisa aponta a importância de uma abordagem holística no processo de planejamento urbano, especificamente a respeito dos parâmetros urbanísticos (tradicionais e avançados) a serem estabelecidos, dada a forte correlação⁶⁹ entre o FCV e o índice PET, pois, o FCV é resultado da composição da forma urbana, isto é, a massa edificada e a infraestrutura verde. Diante das características climáticas do local (semiárido), destaca-se, também, a imprescindibilidade de prever a inserção de uma infraestrutura verde, considerando a forte correlação entre o índice de densidade arbórea e o índice PET, dos cenários simulados. Portanto, os gestores e legisladores urbanos devem estar aptos na compreensão dos princípios da bioclimatologia, especialmente na definição dos limites para o adensamento construtivo urbano, ao alinhar a relação entre área construída, volume edificado e área verde. Nesse processo, a avaliação do desempenho climático deve ser considerada como uma importante etapa a ser integrada. A partir de uma abordagem preditiva, torna-se possível compor os subsídios necessário para a composição dos instrumentos de regulamentação urbanística (como o plano diretor participativo e o código de obra e edificações), de acordo com o desempenho climático da forma urbana em diferentes escalas. A escala do cânion urbano influencia no conforto térmico ao ar livre na escala do pedestre, impactando, significativamente, na qualidade de vida do meio ambiente urbano⁷⁰.

⁶⁹ O que indica que há uma relação mais previsível entre as variáveis, sendo útil para criar modelos de predição.

⁷⁰ A qualidade de vida no meio ambiente urbano também está prevista no 11º Objetivo de Desenvolvimento Sustentável: Cidades e comunidades sustentáveis (Organização das Nações Unidas, 2015). Esse objetivo também está relacionado à saúde humana, dado a relação entre o microclima urbano e dados de internações hospitalares, como apontam os estudos de Krüger e Nedel (2022) para cidades brasileiras, e de Chai et al. (2020) para uma cidade de clima semiárido na China. Bunker et al. (2016) afirmaram que elevar ou diminuir a temperatura do ar em 1°C, aumenta os riscos à saúde humana. Após a pandemia da COVID-19, levantou-se diversas reflexões a respeito da qualidade de vida urbana, e como ela impacta na saúde e no conforto interno das edificações (Bhagat, et al., 2020; Dietz et al., 2020; Schibuola; Tambani, 2021; Abreu-Harbich et al., 2022; Franceschini et al., 2022; Silva; Pagel, 2023). Tal contexto evidencia a necessidade de um planejamento urbano pautado pelos princípios da bioclimatologia, aliado aos conceitos de vivacidade urbana e gentileza urbana.



REFERÊNCIAS

- ABDELHAFEZ, M. H. H.; ALTAF, F.; ALSHENAIFI, M.; HAMDY, O.; RAGAB, A. Achieving Effective Thermal Performance of Street Canyons in Various Climatic Zones. *Sustainability*, v. 14, n. 10780, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141710780>
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3:2005 - Desempenho Térmico de Edificações - Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social**. Rio de Janeiro, 2005.
- ABREU-HARBICH, L. V. de; MARQUES, A. L.; CAMPOS, L. M. G.; OBATA, S. H.; ALVIM, A. B. Valorização da Vegetação na Habitação durante a Pandemia: o Caso de São Paulo. *Revista Jatobá*, v. 4, 2022. DOI: 10.5216/revjat.v4.72248
- ACHOUR-YOUNSI, S.; KHARRAT, F. Outdoor Thermal Comfort: Impact of the Geometry of an Urban Street Canyon in a Mediterranean Subtropical Climate – Case Study Tunis, Tunisia. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 216, p. 689-700, jan. 2016. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.12.062
- AFIQ, W.; CHE SIDIK, N. A.; SAQR, K. Effects of buildings aspect ratio, wind speed and wind direction on flow structure and pollutant dispersion in symmetric street canyons: A review. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, v. 7, p. 158-165, jul. 2012.
- AKBARI, H.; MENON, S.; ROSENFELD, A. Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO₂. *Climatic Change*, v. 94, n. 3–4, p. 275–286, 20 jun. 2009.
- ALBUQUERQUE, F. S.; MOURA, G. R.; FERRAZ, R. S. **O semiárido brasileiro: desafios e perspectivas**. São Paulo: Editora FGV, 2017.
- ALCHAPAR, N. L.; PEZZUTO, C. C.; CORREA, E. N.; LABAKI, L. C. The impact of different cooling strategies on urban air temperatures: the cases of Campinas, Brazil and Mendoza, Argentina. *Theor Appl Climatol.*, 2016. DOI: DOI 10.1007/s00704-016-1851-5
- ALCHAPAR, N. L. et al. The impact of different cooling strategies on urban air temperatures: the cases of Campinas, Brazil and Mendoza, Argentina. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 130, n. 1–2, p. 35–50, 11 out. 2017.
- ALCHAPAR, N. L.; PEZZUTO, C. C.; CORREA, E. N. Parámetros urbanos morfo-materiales y su correlación con las temperaturas de aire en verano. *Ambiente Construído*, v. 18, n. 4, p. 199–213, out. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000400301>
- ALI-TOUDERT, F.; MAYER, H. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment*, v. 41, n. 2, p. 94–108, fev. 2006.

ALI-TOUDERT, F.; MAYER, H. Effects of asymmetry, galleries, overhanging façades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. **Solar Energy**, v. 81, n. 6, p. 742–754, jun. 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2006.10.007>.

ALLARD F., SANTAMOURIS, M. **Natural ventilation in buildings**. London: James & James; 1998.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507

AMBROSINI, D.; GALLI, G.; MANCINI, B.; NARDI, I.; SFARRA, S. Evaluating Mitigation Effects of Urban Heat Islands in a Historical Small Center with the ENVI-Met Climate Model. **Sustainability**, v. 6, p. 7013-7029, 2014. DOI: <https://doi.org/10.3390/su6107013>

AMORIM FILHO, O. B. Um esquema metodológico para o estudo das Cidades Médias. **In: II ENCONTRO NACIONAL DE GEÓGRAFOS**, 1976, Belo Horizonte. Resumo de comunicações. Belo Horizonte, 1976.

ANDRADE, T. C. Q. de; NERY, J. M. F. G.; SOUZA, S. H. M. de; PITOMBO, C. S.; FREIRE, T. M. M.; KATZSCHNER, L. Medição do conforto térmico em áreas públicas urbanas de Salvador-BA e calibração do índice de conforto PET usando a técnica árvore de decisão. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)**, v. 4, n. 2, p. 278–296, 2016.

ANDREOU, E. The effect of urban layout, street geometry and orientation on shading conditions in urban canyons in the Mediterranean, *Renew. Energy*, v. 63, p. 587–596, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.09.051>.

ANSI/ASHRAE Standard 55-2010. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, New York, USA, 2010.

ANTONINI, E.; VODOLA, V.; GASPARI, J.; DE GIGLIO, M. Outdoor Wellbeing and Quality of Life: A Scientific Literature Review on Thermal Comfort. **Energies**, v. 13, 2020. DOI: 10.3390/en13082079

ANTONUCCI, D.; BUENO, L. A construção do espaço público em Medellín: Quinze anos de experiência em políticas, planos e projetos integrados. **Arquitextos**, 2018

ARAPIRACA. **Lei Municipal nº 2.220, de 2001**. Institui Código de Obras e Edificações no Município de Arapiraca e dá outras Providências. Arapiraca: Câmara Municipal, 2020. Disponível em: < <http://www.arapiraca.al.gov.br> >. Acesso em: abr. 2020.

ARAPIRACA. **Lei Municipal nº 2.424, de 23 de janeiro de 2006**. Institui o Plano Diretor do Município de Arapiraca, estabelece as diretrizes gerais da política de desenvolvimento urbano e dá outras providências. Disponível em: <https://web.arapiraca.al.gov.br/arquivos/lei-no-2-4242006-plano-diretor-participativo-do-municipio-de-arapiraca/>. Acesso em: abr. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220-3: desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9050:2015: Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

BARAKAT, A.; AYAD, H.; EL-SAYED, Z. Urban design in favor of human thermal comfort for hot arid climate using advanced simulation methods. **Alexandria Engineering Journal**, v. 56, p. 533–543, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2017.04.008>

BARBIRATO, G. M., TORRES, S. C., BARBOSA, R. V. R. espaços livres e morfologia urbana: discussões sobre influências na qualidade climática e sustentabilidade urbana a partir de estudos em cidades no estado de Alagoas – Brasil. **Paisagem e Ambiente: ensaios**, n. 36, p. 49–68, 2015.

BARBOSA, A. **Urbanismo bioclimático: efeitos do desenho urbano na sensação térmica.** São Carlos, 2018. TESE (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) Universidade de São Paulo.

BARROS, A. H. C.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SILVA, A. B.; SANTIAGO, G. A. C. F. **Climatologia do Estado de Alagoas** / Alexandre Hugo Cezar Barros... [et al...] - - Dados eletrônicos. Recife: Embrapa Solos, 2012. 32 p.; il. - (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Solos, ISSN 1678-0892; 211). Disponível em: <<https://www.embrapa.br/solos/busca-de-publicacoes/-/publicacao/950797/climatologia-do-estado-de-alagoas>> Acesso em: nov. 2022.

BASTOS, F. de H.; MAIA, R. P.; CORDEIRO, A. M. N. **Geomorfologia.** Fortaleza: Editora da Universidade Estadual do Ceará (EdUECE), 138 p., 2015.

BEIGUELMAN, B. **Curso Prático de Bioestatística.** Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1996.

BERTAGNOLIO; LEMORT. **Simulation assisted audit and evidence based calibration methodology.** Laboratoire de thermodynamique. Université de Liege. 31p., 2010.

BEZERRA, E. V. M. **Impactos no Tráfego Derivados da Verticalização na Região Lindeira da Avenida Adjair da Silva Casé.** Caruaru, 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco.

BHAGAT, R. K. et al. Effects of ventilation on the indoor spread of Covid-19. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 903, n. F1, p. 1-18, set. 2020.

BITTENCOURT, L. S.; CÂNDIDO, C. **Introdução à ventilação natural.** Maceió: EDUFAL, 2008.

BLAŻEJCZYK, K.; NILSSON, H.; HOLMÉR, I. Solar Heat Load on Man -Review of Different Methods of Estimation. **International Journal of Biometeorology**, v. 37, p. 125–132, 1993.

BLAZEJCZYK, K.; JENDRITZKY, G.; BRÖDE, P.; FIALA, D.; HAVENITH, G.; EPSTEIN, Y.; PSIKUTA, A.; KAMPMANN, B. An introduction to the universal thermal climate index (UTCI). **Geographia Polonica**, v. 86, n. 1, p. 5–10, 2013.

BOHNENSTENGEL, S. I.; EVANS, S.; CLARK, P. A.; BELCHER, S. E. Simulations of the London urban heat island. **Q. J. R. Meteorol. Soc.**, v. 137, p. 1625–1640, 2011. DOI: 10.1002/qj.855

BOCHENEK, A. D.; KLEMM, K. Influence of canyon aspect ratio on microclimatic conditions: case of Lodz, Poland. **MATEC Web of Conferences**, v. 282, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201928202045>

BOCHENEK, A. D.; KLEMM, K. The impact of passive green technologies on the microclimate of historic urban structures: the Case Study of Lodz. **Atmosphere**, v. 11, n. 974, 2020. DOI: 10.3390/atmos11090974

BOCHENEK, A.D.; KLEMM, K. Effectiveness of Tree Pattern in Street Canyons on Thermal Conditions and Human Comfort. Assessment of an Urban Renewal Project in Historical District in Lodz (Poland). **Atmosphere**, v. 12, p. 01–19, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos12060751>

BOLAND, R.; HUNTER, G. **Urban Resilience and Compact Cities: A Climate-Smart Approach**. New York: Routledge, 2022.

BRANDÃO, L. K. de V. B. **A influência da verticalização no comportamento microclimático em cidade de clima semiárido**. Relatório do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), 2017a.

BRANDÃO, L. K. de V. B. **Verticalização e Microclimas**: estudo em fração urbana na cidade de Arapiraca-AL. Arapiraca, 2017b. Trabalho de Conclusão de Curso (Arquitetura e Urbanismo), Universidade Federal de Alagoas.

BRANDÃO, L. K. de V. B. **Verticalização e Ambiente Térmico Urbano**: análise de parâmetros urbanísticos integrados à abordagem bioclimática em Arapiraca, Alagoas. Maceió, 2020. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo), Universidade Federal de Alagoas.

BRANDÃO, L. K. de V.; BARBOSA, R. V. R. Modelagem de cânions urbanos em clima tropical de savana: relação entre os parâmetros geométricos e o microclima ao nível do pedestre. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 11, n. 83, p. 2318-8472, 2023. DOI: <https://doi.org/10.17271/23188472118320234706>.

BRANDÃO, L. K. de V.; BARBOSA, R. V. R. Efeitos da rugosidade superficial na variabilidade da ventilação natural em cânions urbanos, em clima tropical de savana. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 12, n. 86, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17271/23188472128620245307>

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). **Portaria nº 50, de 01 de fevereiro de 2013**, Anexo Geral V - Catálogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidros. Brasília: INMETRO, 2013.

BRITTER, R.; HANNA, S. R. Flow and dispersion in urban areas. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 35, p. 469–496, 2003.

BRÖDE, P.; FIALA, D.; BLAZEJCZYK, K.; HOLMÉR, I.; JENDRITZKY, G.; KAMPMANN, B.; TINZ, B.; HAVENITH, G. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). **International Journal of Biometeorology**, v. 56, p. 481–494, 2011.

BRUSE, M.; FLEER, H. Simulating Surface-Plant-Air Interactions Inside Urban Environments with a Three-Dimensional Numerical Model. **Environmental Modelling & Software**, v. 13, n. 34, p. 373–384, 1998.

CAMPBELL, G. S.; NORMAN, J. M. **An Introduction to Environmental Biophysics**. New York: Springer-Verlag, 286 p., 1998.

CARTILHA DE ARBORIZAÇÃO URBANA. Projeto: Qualidade Ambiental Urbana e Cidadania: incentivo à arborização urbana em comunidades de Arapiraca. Universidade Federal de Alagoas (UFAL), 2019.

CHATTERJEE, S.; KHAN, A.; DINDA, A.; MITHUN, S.; KHATUN, R.; AKBARI, H.; KUSAKA, H.; MITRA, C.; BHATTI, S. S.; DOAN, Q. V.; WANG, Y. Simulating micro-scale thermal interactions in different building environments for mitigating urban heat islands. **Science of the Total Environment**, v. 663, p. 610–631, 2019.

CHEN, H.; OOKA, R.; HUANG, H.; TSUCHIYA, T. Study on mitigation measures for outdoor thermal environment on present urban blocks in Tokyo using coupled simulation. **Build. Environ.**, v. 44, n. 11, 2009.

CHEN, Q.; LI, B.; LIU, X. An experimental evaluation of the living wall system in hot and humid climate. **Energy Build.**, v. 61, p. 298–307. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.030>.

CHEN, Y-C.; FRÖHLICH, D.; MATZARAKIS, A.; LIN, T-P. Urban Roughness Estimation Based on Digital Building Models for Urban Wind and Thermal Condition Estimation - Application of the SkyHelios Model. **Atmosphere**, v. 8, n. 247, 2017. DOI: 10.3390/atmos8120247.

COCEAL, O.; BECHER, S. E. A canopy model of mean winds through urban areas. **Q. J. R. Meteor. Soc.**, v. 130, n. 599, p.1349–1372, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1256/qj.03.40>.

COSTA, F. J. de M. **Ventilação e prescrições urbanísticas**: Uma aplicação simulada no bairro de Petrópolis em Natal/RN. 2001. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

COSTA, I. F. da; MAROJA, A. de M. Astronomia diurna: medida da abertura angular do Sol e da latitude local. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, n. 1, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0301>

DARBANI, E. S.; PARAPARI, D. M.; BOLAND, J.; SHARIFI, E. Impacts of urban form and urban heat island on the outdoor thermal comfort: A pilot study on Mashhad. **Jornal Internacional de Biometeorologia**, v. 65, n. 10, p. 1–17, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02091-3>

DE, B.; MUKHERJEE, M. Optimizing Street Canyon Orientation for Rajarhat Newtown, Kolkata, India. **Environmental and Climate Technologies**, v. 21, p. 5–17, 2017. DOI: 10.1515/rtuect-2017-0012

DE, B.; MUKHERJEE, M. Optimisation of canyon orientation and aspect ratio in warm-humid climate: Case of Rajarhat Newtown, India. **Urban Climate**, n. 24, p. 887–920, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.11.003>

DIETZ, L. et al. Novel Coronavirus (Covid-19) Pandemic: built environment considerations to reduce transmission. **Applied and Environmental Science**, v. 5, n. 2, p. 1-13, 2020.

DENG, J.; WONG, N. H.; ZHENG, X. Effects of street geometries on building cooling demand in Nanjing, China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 142, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110862>

DUARTE, C. A. **Planejamento Urbano e Desenvolvimento Sustentável: Desafios e Perspectivas para o Século XXI**. São Paulo: Edusp, 2017.

DUARTE, D. Densidade e qualidade ambiental: o inevitável, o desejável e o possível. In: GALICIA, S.; FREIXANET, V. **Hábitat Sustentable**. México, D.F.: UAM Azcapotzalco. p.85-99, 2012.

ERELL E, WILLIAMSON T. 2007. Intra-urban differences in canopy layer air temperature at a mid-latitude city. **International Journal of Climatology**, v. 27, p. 1243–1255, 2007. DOI: 10.1002/joc.1469

ENVI-MET. **Leading 3D Modelling Software for Urban Cooling and Climate Adaptive Planning**. Disponível em: <https://www.envi-met.com/>. Acesso em 27/06/2022.

ENVI-MET. **Technical Model Webpage**. Disponível em: <https://www.envi-met.info/>. Acesso em 13/11/2024.

ERELL, E.; PEARLMUTTER, D.; WILLIAMSON, T. **Urban microclimate: designing the spaces between buildings**. London: Earthscan, 2011.

EPSTEIN, Y.; MORAN, D.S. Thermal comfort and the heat stress indices. **Industrial Health**, v. 44, p. 388–398, 2006.

FAHMY, M.; SHARPLES, S.; YAHYIA, M. LAI based trees selection for mid latitude urban developments: a microclimatic study in Cairo, Egypt. **Build. Environ.**, v. 45, p. 345–357, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.014>

FARHADI, H.; FAIZI, M.; SANAEIAN, H. Mitigating the urban heat island in a residential area in Tehran: Investigating the role of vegetation, materials, and orientation of buildings. **Sustainable Cities and Society**, v. 46, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101448>

FARR, D. **Urbanismo sustentável: desenho urbano com a natureza**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

FAVRETTO, A. P. O.; SOUZA, L. C. L. A meta-analysis over geometric modeling simplifications in ENVI-met urban climate simulation. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 143–160, jan./mar. 2019.

FENG, N.; MA, J.; LIN, B. R.; ZHU, Y. X. Impact of landscape on wind environment in residential area. **J. Cent. S. Univ. Technol.**, v. 16, p. 80–83, 2009.

FENG, W.; DING, W.; FEI, M.; YANG, Y.; WEIHAN ZOU, W.; WANG, L.; ZHEN, M. Effects of traditional block morphology on wind environment at the pedestrian level in cold regions of Xi'an, China. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, p. 3218–3235, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00714-0>

FERREIRA, P. Alguns dados sobre o clima para edificação em Brasília. Dissertação de mestrado. FAU/UnB- 1965.

FISCHEREIT, J.; SCHLÜNZEN, K. H. Evaluation of thermal indices for their applicability in obstacle-resolving meteorology models. **International Journal of Biometeorology**, v. 62, p. 1887–1900, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1591-6>

FRANCESCHINI, P. B.; LIGUORI, I. N.; NEVES, L. Condições de conforto térmico e QAI em salas de aula naturalmente ventiladas durante a pandemia de Covid-19. **Ambiente Construído**, v. 22, n. 4, p. 217-231, 2022. DOI: [10.1590/s1678-86212022000400637](https://doi.org/10.1590/s1678-86212022000400637)

FRÖHLICH, D., GANGWISCH, M., MATZARAKIS, A. Effect of radiation and wind on thermal comfort in urban environments - Application of the RayMan and SkyHelios model. **Urban Climate**, v. 27, p. 1–7, 2019. DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212095518303225>

FREITAS, R. **Entre Mitos e Limites: as possibilidades de adensamento construtivo face à qualidade de vida no ambiente urbano**. Recife: Ed. Universitária UFPE, 270p, 2005.

FREITAS, R.; AZERÊDO, J. **Urbanismo bioclimático e cidades sustentáveis**. – [recurso eletrônico] Recife: Ed. UFPE, 2021.

GÁL, C. V.; KÁNTOR, N. Modeling mean radiant temperature in outdoor spaces, A comparative numerical simulation and validation study. **Urban Climate**, v. 32, 2020. DOI: [10.1016/j.uclim.2019.100571](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100571)

GALAGODA, R. U.; JAYASINGHE, G. Y.; HALWATURA, R. U.; RUPASINGHE, H. T. The impact of urban green infrastructure as a sustainable approach towards tropical micro-climatic changes and human thermal comfort. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 34, p. 1–9, 2018. DOI: [10.1016/j.ufug.2018.05.008](https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.05.008)

GANDEMER, J. & GUYOT, A. **Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti**. Paris: Ministère de la Qualité de la Vie, 1976.

GARTLAND, L. **Ilhas de calor**: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

GASPARI, J.; FABBRI, K.; LUCCHI, M. The use of outdoor microclimate analysis to support decision making process: Case study of Bufalini square in Cesena. **Sustainable Cities and Society**, v. 42, p. 206–215, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.07.015>

GIVONI, B. **Man Climate and Architecture**. Canada: Applied Science Publisher, 1969.

GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines, **Energy Build.**, v. 18, p. 11–23, 1992. DOI:10.1016/0378-7788(92)90047-K.

GIVONI, Baruch. **Passive and low energy cooling of buildings**. New York: John Wiley & Sons, 263p., 1994.

GIVONI, B. **Climate considerations in building and urban design**. New York: John Wiley & Sons. 1998.

GOMES, P. S.; LAMBERTS, R. O estudo do clima urbano e a interface com a legislação urbanística a partir do caso Montes Claros, MG. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 73–91, jan./ mar., 2009.

GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T.R. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. **Journal of Applied Meteorology**, v. 38, p. 1262–1292, 1999.

GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL (GBC Brasil). **Certificação LEED**. Disponível em: <https://www.gbcbrazil.org.br/certificacao/certificacao-leed/>. Acesso em 27/12/2024.

GRÜNBERG, P. R. M.; MEDEIROS, M. H. F. de; TAVARES, S. F. Certificação ambiental de habitações: comparação entre LEED for homes, processo AQUA e selo Casa Azul. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 17, n. 2, p. 195–214, abr./jun., 2014.

GÜNERALP, BURAK; ZHOU, YUYU; ÜRGE-VORSATZ, DIANA; GUPTA, MUKESH; YU, SHA; FRAGKIAS, PRALIT L. PATEL, MICHAEL; LI, XIAOMA; SETO, KAREN C. Global scenarios of urban density and its impacts on building energy use through 2050. **PNAS**, vol. 114, n. 34, p. 8945–8950, 2017. DOI: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1606035114>

GUSSON, C. dos S. (2020). **O impacto da verticalização no microclima urbano e no conforto térmico na escala do pedestre**: o papel da geometria e da envoltória dos edifícios. [Tese de Doutorado, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo] Biblioteca Digital USP. <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-29032021-104403/pt-br.php>

GUSSON, C. dos S.; DUARTE, D. H. S. Effects of Built Density and Urban Morphology on Urban Microclimate - Calibration of the Model ENVI-met V4 for the Subtropical Sao Paulo, Brazil. **Procedia Engineering**, v. 169, p. 2–10, 2016. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.10.001

HABIBI, K.; HOSEINI, D. M.; DEHSHTI, M.; KHANIAN, M.; MOSAVI, A. The Impact of Natural Elements on Environmental Comfort in the Iranian-Islamic Historical City of Isfahan. **Int. J. Environ. Res. Public Health**, v. 17, n. 5776, 2020. DOI:10.3390/ijerph17165776

HABIBI, A; TAFVIZI, R.; NIKKAR, M.; SHARIFI, E. Impact of Design Composition of Canyon Layout, Greenery, and Cool Surfaces on Outdoor Thermal Comfort in Hot-Dry Climate. **International Journal of Architectural Engineering & Urban Planning**, v. 34, n. 2, 2024. DOI: DOI: 10.22068/ijaup.833

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. Porto Alegre: Bookman, 699p., 2009.

HART, M.A.; SAILOR, D.J. Quantificar a influência do uso da terra e da superfície características da variabilidade espacial na ilha de calor urbana. **Climatologia Teórica e Aplicada**, v. 95, p. 397-406, 2009.

HAVENITH, G.; FIALA, D.; BŁAZEJCZYK, K.; RICHARDS, M.; BRÖDE, P.; HOLMÉR, I.; RINTAMAKI, H.; BENSHABAT, Y.; JENDRITZKY, G. The UTCI-clothing model. **Int. J. Biometeorol.**, v. 56, p. 461–470, 2012. DOI: 10.1007/s00484-011-0451-4

HIGUERAS, E. Urbanismo Bioclimático: Criterios medioambientales en la ordenación de asentamientos. **Cuadernos de Investigación Urbanística**, Instituto Juan de Herrera, 1998.

HIGUERAS, E. **Urbanismo bioclimático**. Barcelona: Gustavo Gili, 242 p., 2006.

HIGUERAS, E. La ordenanza bioclimática de Tres Cantos, Madrid. Últimos avances en planificación ambiental y sostenible. **Revista de Urbanismo**, n. 20, 2009.

HIRASHIMA, S. Q. da S.; KATZSCHNER, A.; FERREIRA, D. G.; ASSIS, E. S. de; KATZSCHNER, L. Thermal comfort comparison and evaluation in different climates. **Urban Climate**, v. 23, n. 1, p. 219–230, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2016.08.007>

HIRASHIMA, S. Q. da S.; ASSIS, E. S. de; NIKOLOPOULOU, M. Daytime thermal comfort in urban spaces: A field study in Brazil. **Building and Environment**, n. 107, p. 245–253, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.006>

HÖPPE, P. The Physiological Equivalent Temperature: a index for the biometeorological assessment of the thermal environment. **International Journal of Biometeorology**, Dordrecht, v. 43, p. 71–75, 1999. DOI: 10.1007/s004840050118

HÖPPE, P. Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. **Energy and Buildings**, v. 43, p. 661–665, 2002.

HUANG, J-M.; CHEN, L-C. A Numerical Study on Mitigation Strategies of Urban Heat Islands in a Tropical Megacity: A Case Study in Kaohsiung City, Taiwan. **Sustainability**, v. 12, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/su12103952>

HUANG, J.-M.; CHEN, L.-C. Synergistic Effects of Roadside Trees and Spatial Geometry on Thermal Environment in Urban Streets: A Case Study in Tropical, Medium-Sized City, Taiwan. **Buildings**, v.1, n. 2092, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13082092>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades**. Arapiraca: IBGE. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/al/arapiraca/panorama>. Acesso em: 27/06/2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico** - 2010. Arapiraca: IBGE. Disponível em: www.ibge.gov.br. Acesso em: 27/06/2019.

INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO (INSA). **O semiárido brasileiro**. Disponível em: <https://www.gov.br/insa/pt-br/semiarido-brasileiro>. Acesso em 23/07/2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Documentation**. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/about/>. Acesso em 27/06/2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) 2022a. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Summary for Policymakers**, 2022, Switzerland. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>. Acesso em: 27/06/2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) 2022b: **Summary for Policymakers** [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

JABAREEN, Y. Sustainable Urban Forms: Their Typologies, Models, and Concepts. **Journal of Planning Education and Research**, v. 29, n. 1, p. 38–52, 2020.

JACOBS, J. **Morte e vida de grandes cidades**. São Paulo: Editora WMF Martins Fontes, 3 ed., 2011.

JAMEI, E.; RAJAGOPALAN, P. Effect of street design on pedestrian thermal comfort. **Architectural Science Review**, 2018. DOI: 10.1080/00038628.2018.1537236

JENDRITZKY, G.; DE DEAR, R.; HAVENITH, G. UTCI - Why another thermal index? International **Journal of Biometeorology**, v. 56, p. 421–428, 2012.

JIN, H.; LIU, Z.; JIN, Y.; KANG, J.; LIU, J. The Effects of Residential Area Building Layout on Outdoor Wind Environment at the Pedestrian Level in Severe Cold Regions of China. **Sustainability**, v. 9, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9122310>

JOHNSON, G. T.; WATSON, I. D. The determination of view-factors in urban canyons. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v. 23, p. 329–335, 1984.

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. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.05.022

KEDISSA, C.; OUTTAS, S.; BELARBI, R. The impact of height/width ratio on the microclimate and thermal comfort levels of urban courtyards. **International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development**, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/2093761X.2017.1302830>

KÖPPEN, W. **Das geographische System der Klimate**. – KÖPPEN, W., R. GEIGER (Eds.): Handbuch der Klimatologie. Gebrüder Bornträger, Berlin, v. 1, p. 1–44, 1936.

KOTHARKAR, R.; BAGADE, A.; SINGH, P. R. A systematic approach for urban heat island mitigation strategies in critical local climate zones of an Indian city. **Urban Climate**, v. 34, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100701>

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, n. 3, p. 259–263, 2006. DOI: [10.1127/0941-2948/2006/0130](https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130)

KOUKLIS, G.-R.; YIANNAKOU, A. The Contribution of Urban Morphology to the Formation of the Microclimate in Compact Urban Cores: A Study in the City Center of Thessaloniki. **Urban Sci.**, v. 5, n. 37, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/urbansci5020037>

KRÜGER, E.; PEARLMUTTER, D.; RASIA, F. Evaluating the impact of canyon geometry and orientation on cooling loads in a high-mass building in a hot dry environment. **Appl. Energy**, v. 87, p. 2068–2078, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.11.034>.

KRÜGER, E. L.; MINELLA, F. O.; RASIA, F. Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil. **Building and Environment**, v. 46, p. 621–634, 2011. DOI: [10.1016/j.buildenv.2010.09.006](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.09.006)

KRÜGER, E. L.; GONZALEZ, D. E. G. Impactos da alteração no albedo das superfícies no microclima e nos níveis de conforto térmico de pedestres em cânions urbanos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 89–106, jul./set. 2016.

KRÜGER, E. L.; ROSSI, F. A.; CRISTELI, P. S.; SOUZA, H. A. de. Calibração de índice de conforto para espaços externos Physiological Equivalent Temperature (PET) para Curitiba. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 3, p. 135–148, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000300272>

LAI, D.; LIU, W.; GAN, T.; LIU, K.; CHEN, Q. A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces. **Science of The Total Environment**, v. 661, n. 15, p. 337–353, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.062>

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: PW, 192 p., 2013.

LARSON, R; FABER, B. **Estatística aplicada**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 637p., 2010.

LEE, S. H.; LEE, K. S.; JIN, W. C.; SONG, H. K. Effect of an urban park on air temperature differences in a central business district area. **Landscape and Ecological Engineering**, v. 5, n. 2, p. 183–191, 2009.

LEE, H.; MAYER, H. Thermal comfort of pedestrians in an urban streetcanyon is affected by increasing albedo of building walls. **Int. J. Biometeorol.**, v. 62, p. 1199–1209, 2018. DOI: 10.1007/s00484-018-1523-5

LEE, H.; MAYER, H. Solar elevation impact on the heat stress mitigation of pedestrians on tree-lined sidewalks of E-W street canyons – Analysis under Central European heat wave conditions. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 58, p. 01–12, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126905>

LEMOS, J. F. **Poluição Veicular**: avaliação dos impactos e benefícios ambientais com a renovação da frota veicular leve na cidade de São Paulo. São Paulo, 2010. Dissertação (Mestrado em Energia), Universidade de São Paulo.

LI, J.; WANG, J.; WONG, N. H. Urban Micro-climate Research in High Density Cities Case Study in Nanjing. **Procedia Engineering**, v. 169, p. 88 – 99, 2016. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.10.011

LI, J.; BOHONG ZHENG, B.; SHEN, W.; XIANG, Y.; CHEN, X.; QI, Z. Cooling and Energy-Saving Performance of Different Green Wall Design: A Simulation Study of a Block. **Energies**, v. 12, n. 2912, 2019. DOI:10.3390/en12152912

LIAO, J.; TAN, X.; BEDRA, K. B.; LI, J. Evaluating the 3D cooling performances of different vegetation combinations in the urban area. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, v. 21, n. 1, 2021. DOI: 10.1080/13467581.2021.1903905

LIN, B., LI, X., ZHU, Y., & QIN, Y. (2008). Numerical simulation studies of the different vegetation patterns' effects on outdoor pedestrian thermal comfort. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 96, p. 1707–1718, 2008. DOI: 10.1016/j.jweia.2008.02.006

LIN, T-P.; MATZARAKIS, A. Tourism climate and thermal comfort in Sun Moon Lake, Taiwan. **Int. J. Biometeorol.**, v. 52, p. 281–290, 2008. DOI 10.1007/s00484-007-0122-7

LIU, Z.; ZHENG, S.; ZHAO, L. Evaluation of the ENVI-Met Vegetation Model of Four Common Tree Species in a Subtropical Hot-Humid Area. **Atmosphere**, v. 9, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos9050198>

LIU, J.; ZHENG, B.; YANG, F. A. Simulation Study of the Impact of Urban Street Greening on the Thermal Comfort in Street Canyons on Hot and Cold Days. **Forests**, v. 14, n. 11, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14112256>

LIMONA, S. S.; AL-HAGLA, K. S.; EL-SAYAD, Z. T. Using simulation methods to investigate the impact of urban form on human comfort. Case study: Coast of Baltim, North Coast, Egypt. **Alexandria Engineering Journal**, v. 58, p. 273–282, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.02.002>

LOBACCARO, G.; ACERO, J. A.; MARTINEZ, G. S.; PADRO, A.; LABURU, T.; FERNANDEZ, G. Effects of Orientations, Aspect Ratios, Pavement Materials and Vegetation Elements on Thermal Stress inside Typical Urban Canyons. **Int. J. Environ. Res. Public Health**, v. 16, n. 3574, 2019. DOI: 10.3390/ijerph16193574.

LUCCHESI, J. R.; MIKURI, L. P.; FREITAS, N. V. S. DE; ANDREASI, W. A. Application of selected indices on outdoor thermal comfort assessment in Midwest Brazil. **International Journal of Energy and Environment**, v. 7, n. 4, p. 291–302, 2016.

LYRA, G. B.; PEREIRA, A. R. Parâmetros de Rugosidade Aerodinâmica sobre Vegetação Esparsa em Região Semiárida. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 2, p. 262–272, 2007.

KRÜGER, E. L.; ROSSI, F. A.; CRISTELI, P. S. SOUZA, H. A. de. Calibração do índice de conforto para espaços externos *Physiological Equivalent Temperature* (PET) para Curitiba. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 135–148, jul./set. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000300272>

MA, X.; FUKUDA, H.; ZHOU, D.; WANG, M. The Evaluation of Outdoor Thermal Sensation and Outdoor Energy Efficiency of a Commercial Pedestrianized Zone. **Energies**, v. 12, 2019. DOI: 10.3390/en12071324

MACEIÓ. **Lei Municipal nº 5.593, de 8 de fevereiro de 2007**. Institui o Código de Urbanismo e Edificações do Município de Maceió. Maceió: Câmara Municipal, 2020. Disponível em: <<http://www.maceio.al.gov.br>>. Acesso em: abr. 2020.

MANSO, M.; CASTRO-GOMES, J. Green wall systems: a review of their characteristics. **Renew. Sustain. Energy Rev.**, v. 41, p. 863–871, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.203>.

MANTEGHI, G.; SHUKRI, S. M.; LAMIT, H. Street Geometry and River Width as Design Factors to Improve Thermal Comfort in Melaka City. **Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences**, v. 58, n. 1, p. 15–22, 2019.

MARTINELLI, A.; CARLUCCI, F.; FIORITO, F. On the Role of the Building Envelope on the Urban Heat Island Mitigation and Building Energy Performance in Mediterranean Cities: A Case Study in Southern Italy. **Climate**, v. 12, n. 113, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/cli12080113>

MARTINS, T. A.; BONHOMME, M.; ADOLPHE, L. Análise do impacto da morfologia urbana na demanda estimada de energia das edificações: um estudo de caso na cidade de Maceió. **Ambiente Construído**, v.13, n. 4, p. 213–233, 2013.

MATZARAKIS, A., FRÖHLICH, D. Influence of urban green on human thermal bioclimate - application of thermal indices and micro-scale models. **Acta Horticult.**, n. 1215, p. 1–9, 2018. DOI: 10.17660/Acta Horticult.2018.215.1

MATZARAKIS, A., GANGWISCH, M., FRÖHLICH, D. RayMan and SkyHelios Model. In: Palme, M., Salvati, A. (eds) *Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies*.

Springer, Cham., 339-361, 2021. DOI: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-65421-4_16

MATZARAKIS, A.; MAYER, H. Another kind of environmental stress: Thermal stress. **WHO Newsletter**, v. 18, p. 7–10, 1996.

MATZARAKIS, A.; MUTHERS, S.; RUTZ, F. Application and comparison of UTCI and PET in temperate climate conditions. **Finisterra.**, v. 49, n. 98, p. 21–31, 2014.

MATZARAKIS, A.; RUTZ, F.; MAYER, H. Modelling the thermal bioclimate in urban areas with the Rayman model. **In:** The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/237253361_Modelling_the_thermal_bioclimate_in_urban_areas_with_the_RayMan_Model. Acesso em: out./2022.

MATZARAKIS, A., RUTZ, F., MAYER, H. Modelling Radiation fluxes in simple and complex environments - Application of the RayMan model. **International Journal of Biometeorology**, v. 51, p. 323–334, 2007.

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

MAUÁ, L. B. C.; GUADANHIM, S. J.; KANASHIRO, M. Ruas e a ocupação vertical recente: labirintos murados. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 2, p. 73–96, abr./jun. 2017.

MCRAE, I.; FREEDMAN, F.; RIVERA, A.; LI, X.; DOU, J.; CRUZ, I.; REN, C.; DRONOVA, I.; FRAKER, H.; BORNSTEIN, R. Integration of the WUDAPT, WRF, and ENVI-met models to simulate extreme daytime temperature mitigation strategies in San Jose, California. **Building and Environment**, v. 184, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107180>

MEIR, P.; GRACE, J.; MIRANDA, A. C. Photographic method to measure the vertical distribution of leaf area density in forests. **Agric. for Meteorol.**, v. 102, p. 105–111, 2000.

MENDONÇA, P. F. **Arapiraca e o semiárido: desenvolvimento e desafios climáticos**. Maceió: Editora Universitária, 2019.

MERONEY, R. N. Turbulent diffusion near buildings. **In:** Engineering Meteorology, Plate, E. (ed.), Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, 481–525, 1982.

MICHELON, T. **Análise por simulação computacional da influência de elementos vegetados e de sombreamento no conforto térmico ao nível do pedestre em microclima urbano para Florianópolis – SC**. Florianópolis, 2021. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Universidade Federal de Santa Catarina.

MILLS, G. An urban canopy-layer climate model. **Theor. Appl. Climatol.**, v. 57, p. 229–244, 1997.

MINELLA, F. C. O.; HONJO, S.; KRÜGER, E. L. Estratégias de melhoria do ambiente térmico diurno em situação de verão de uma fração urbana da cidade de São Paulo. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 4, p. 139–158, 2012. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.09.006

MINELLA, F. C. O.; KRÜGER, E. L. Proposição do índice “fração vegetada” e sua relação com alterações na temperatura do ar e no conforto térmico no período diurno e em situação de verão para Curitiba. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 353–371, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000100139>

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (MDR). **Guia para elaboração e revisão de planos diretores**. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/desenvolvimento-urbano/guia-para-elaboracao-e-revisao-de-planos-diretores>. Acesso em: 25 jan. 2025.

MOHAMMED, Y.; SALMAN, A. Effect of urban geometry and green area on the formation of the urban heat island in Baghdad city. **MATEC Web of Conferences**, v. 162, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816205025>.

MONTEIRO, C. A. F. **Teoria e clima urbano**. São Paulo, 181p. Tese (Livre Docência em Geografia) — Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo. 1976.

MONTEIRO, L. M.; ALUCCI, M. P. **Calibration of outdoor thermal comfort models**. The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture. Geneva, Switzerland, 2006.

MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. **Introduction to Linear Regression Analysis**. New Jersey: Wiley, 2012.

MORAIS, L. S.; SILVA, P. C. M.; MEDEIROS, W. D. A. Análise do Processo de Verticalização na Área Urbana do Município de Mossoró-RN: aspectos jurídicos e ambientais. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 2, n. 2, p. 171–182, 2007.

MUNIZ-GÄAL, L. P.; PEZZUTO, C. C.; CARVALHO, M. F. H. de; MOTA, L. T. M. Parâmetros urbanísticos e o conforto térmico de cânions urbanos: o exemplo de Campinas, SP. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 177–196, abr./jun. 2018.

MUNIZ-GÄAL, L. P.; PEZZUTO, C. C.; CARVALHO, M. F. H. de; MOTA, L. T. M. Urban geometry and the microclimate of street canyons in tropical climate. **Building and Environment**, n. 169, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106547>

NAKATA-OSAKI, C. M.; SOUZA, L. C. L. de; RODRIGUES, D. S. Impacto da geometria do cânion urbano na intensidade de ilha de calor noturna: análise através de um modelo simplificado adaptado a um SIG. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 3, p. 73–87, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212016000300093>

NASCIMENTO, L. C. P.; SILVA, C. F. e. **O conforto térmico de áreas escolares: análise da vegetação por meio do ENVI-met**. IV Congreso Latinoamericano de Simulación en Edificios, Mendoza-Argentina, 2019.

NASROLLAHI, N.; GHOSOURI, A.; KHODAKARAMI, J.; TALEGHANI, M. Heat-Mitigation Strategies to Improve Pedestrian Thermal Comfort in Urban Environments: A Review. **Sustainability**, v. 12, p. 01–22, 2020. DOI:10.3390/su122310000

NASROLLAHI, N.; NAMAZI, Y.; TALEGHANI, M. The effect of urban shading and canyon geometry on outdoor thermal comfort in hot climates: A case study of Ahvaz, Iran. **Sustainable Cities and Society**, v. 65, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102638>

NELO, L. M. de. A.; SILVA, L. F. da; RIBEIRO, A. P. Soluções Baseadas na Natureza para Mitigar o Calor Urbano: a Eficácia dos Corredores Verdes em Medellín, Colômbia. **Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes**, v. 12, n. 36, 2024.

NEVES, R. R. **Autossegregação em Cidades Médias**: Configuração intraurbana e práticas espaciais dos moradores de residenciais horizontais fechados, em Arapiraca-AL. Recife, 2022. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Urbano) Universidade Federal de Pernambuco.

NG, E. Policies and technical guidelines for urban planning of high- density cities—air ventilation assessment (AVA) of Hong Kong. **Build. Environ.**, v. 44, p. 1478–1488, 2009.

NGO, H. N. D.; MOTOASCA, E.; VERSELE, A.; PHAM, H. C.; BREESCH, H. Effect of neighbourhood courtyard design on the outdoor thermal comfort in a tropical city. **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**, 2022. DOI: :10.1088/1755-1315/1078/1/012035

NICHOLSON, S. E. A Pollution Model For street Level Air. **Atmospheric Environment**, v. 9, n. 1, p. 19–31, 1975.

NIKOLOPOULOU, M.; BAKER, N.; STEEMERS, K. Thermal comfort in outdoor urban spaces: understanding the human parameter. **Solar Energy**, v. 70, n. 3, p. 227–235, 2001. DOI:10.1016/s0038-092x(00)00093-1

NOGUEIRA, A. M. P.; ARAÚJO, I. A. L. de; BITTENCOURT, L. S.; RESTAINO, G. Impacto da verticalização no microclima urbano: o caso do bairro Guaxuma, em Maceió-AL, Brasil. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 9, n. 2, p. 72–85, 2018.

NOVAES, G. B. de A.; MONTEIRO, L. M. Calibração do ENVI-met para simulações termodinâmicas de espaços urbanos abertos em dias quentes. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 22, n. 4, p. 275–297, out./dez., 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212022000400640>

OJAGHLOU, M.; KHAKZAND, M. Thermal Comfort Characteristic of 5 Patterns of a persian Garden in a Hot-Arid Climate of Shiraz, Iran. **Journal of Landscape Ecology**, v. 121, n. 3, 2019. DOI: 10.2478/jlecol-2019-0016

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

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. London: Methuen, 372p., 1978.

OKE, T. R. Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island: comparison of scale

model and field observations. **Journal of Climatology**, v. 1, n. 1/4, p. 237-254, 1981

OKE, T.R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. **Journal of Climatology**, v. 1, p. 237–254, 1982.

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. Methods in urban climatology. **In: Applied Climatology**. Zürcher Geographische Schriften, v. 14, p. 19–29, 1984.

OKE, T.R. **Boundary Layer Climates**. London: Routledge, 435 p., 1987.

OKE, T.R. Street design and urban canopy layer climate. **Energy and Buildings**, v. 11, p. 103–113, 1988.

OKE, T.R. The micrometeorology of the urban forest, **Philosophical Transactions of the Royal Society**, Series B, v. 324, p. 335–351, 1989.

OKE, T. R. et al. Simulation of surface urban heat islands under “ideal” conditions at night Part 2: Diagnosis of causation. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 56, n. 4, p. 339–358, 1991.

OKE, T.R. The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects. **In: Wind Climate in Cities**. Cermak, J.E., Davenport, A.G., Plate, E.J. and Viegas, D.X., (eds.), Kluwer Academic, p. 81–102, 1995.

OKE, T. R. **Boundary layer climates**. New York: Routledge, 435p., 1996.

OKE, T. R. Siting and exposure of meteorological instruments at urban sites. **In: Air Pollution Modeling and its Application XVII**, Borrego, C. and A. L. Norman (eds), Springer, 2004.

OKE, T. R. **Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites**. World Meteorological Organization, Instruments and Observing Methods, Report n. 81, n. 1250. Canadá: WMO/TD, 2006.

OKE, T.R.; MILLS, G.; CHRISTEN, A.; VOOGT, J. A. **Urban climates**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

OLIVEIRA, P. M. P. de. **Cidade Apropriada ao Clima: A forma urbana como instrumento de controle do Clima Urbano**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade de Brasília. Brasília, 1985.

OLIVEIRA, H. M. **Verticalização Urbana e Segregação Socioespacial em Imperatriz-MA: uma abordagem a partir dos bairros Jardim Três Poderes e Maranhão Novo**. Porto Nacional, 2017. Dissertação (Mestrado em Geografia) Universidade Federal do Tocantins.

OLIVEIRA, P. M.; FERREIRA, L. C. Urbanismo Sustentável e a Forma Urbana Compacta: Análise Crítica das Políticas Públicas no Brasil. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, v. 23, n. 2, p. 58–77, 2021.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentavel>. Acesso em 27/06/2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/>. Acesso em 27/06/2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Department of Economic and Social Affairs. **Population Division. World Urbanization Prospects 2018: Highlights** (ST/ESA/SER.A /352), 2019.

ORLANDONI-MERLI, G.; RAMONI-PERAZZI, J.; PULIDO, M. O. P. Calidad del Aire y Enfermedades Respiratorias bajo Diversos Esquemas de Circulación Vial en Bucaramanga (Santander, Colombia). **Revista Lasallista de Investigación**, v. 18, p. 1 – 14, 2021.

OTHMAN, H. A. S.; ALSHBOUL, A. A. The role of urban morphology on outdoor thermal comfort: The case of Al-Sharq City – Az Zarga. **Urban Climate**, v. 34, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100706>

PBMC. **Mudanças Climáticas e Cidades**. Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas [Ribeiro, S.K., Santos, A.S. (Eds.)]. PBMC, COPPE – UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 116p., 2016. ISBN: 978-85-285-0344-9.

PAGE, M. J.; MCKENZIE, J. E.; BOSSUYT, P. M.; BOUTRON, I.; HOFFMANN, T. C.; MULROW, C. D.; SHAMSEER, L.; TETZLAFF, J. M.; AKL, E. A.; BRENNAN, S. E.; CHOU, R.; GLANVILLE, J.; GRIMSHAW, J. M.; HRÓBJARTSSON, A.; LALU, M. M.; LI, T.; LODER, E. W.; MAYO-WILSON, E.; MCDONALD, S.; MCGUINNESS, L. A.; STEWART, L. A.; THOMAS, J.; TRICCO, A. C.; WELCH, V. A.; WHITING, P.; MOHER, D. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **Research Methods & Reporting**, 2021. DOI: 10.1136/bmj.n71

PEREIRA, J. D. S.; BRANDÃO, L. K. de V.; BARBOSA, R. V. R. Análise da distribuição espacial de áreas verdes urbanas na qualidade térmica em região de clima semiárido. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 7, p. 01-09, 2021.

PERINI, K.; OTTELÉ, M.; FRAAIJ, A. L. A.; HAAS, E. M.; RAITERI, R. Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. **Build. Environ.**, v. 46, p. 2287–2294, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.009>

QUADROS, B. M. de; PIGLIAUTILE, I.; PISELLO, A. L.; Krüger, E.; MIZGIER, M. O. Reliability of urban microclimate simulations: spatio-temporal validation through intra-urban canyon transects for outdoor thermal comfort analysis. **International Journal of Biometeorology**, v. 68, n. 12, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00484-024-02784-5>

RAJAN, E. H. S.; AMIRTHAM, L. R. Urban heat island intensity and evaluation of outdoor thermal comfort in Chennai, India. **Environment, Development and Sustainability**, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01344-w>

RAMYAR, R.; RAMYAR, A.; KIALASHAKI, Y.; BRYANT, M.; RAMYAR, H. Exploring reconfiguration scenarios of high-density urban neighborhoods on urban temperature-The

case of Tehran (Iran). **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 44, p. 01–20, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126398>

RAZZAGHMANESH, M.; BEECHAM, S.; SALEMI, T. The role of green roofs in mitigating Urban Heat Island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia. **Urban For. Urban Green.**, v. 15, p. 89–102, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.11.013>

RIBEIRO, S. K.; SANTOS, A. S. **Mudanças climáticas e cidades**. Rio de Janeiro: COPPE-UFRJ, 116 p., 2016. Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas.

REFLORA. **Herbário Virtual**. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/herbarioVirtual/>. Acesso em 28/4/2023

RESTREPO-BETANCUR, L. F.; PEÑA-SERNA, C.; MARTÍNEZ-GONZÁLEZ, M. F. Climate change in the city of Medellín –Colombia, throughout fifty years (1960-2010). **Revista DYNA**, p. 312 – 318, 2019.

ROCHA, I. dos S. **Produção e Valorização do Espaço Urbano de Vitória da Conquista: uma análise das estratégias e transformações no bairro Boa Vista**. Salvador, 2011. Dissertação (Mestrado em Geografia) Universidade Federal da Bahia.

ROGERS, R. **Cidades para um pequeno planeta**. Barcelona: Gustavo Gili, 2001.

ROMERO, M. **Princípios bioclimáticos para o desenho urbano**. [S. l.], 2000.

ROMERO, M. A. B. **Arquitetura bioclimática do espaço público**. Brasília: Editora da UnB, 2001.

ROMERO, M. A. B. Correlação entre o microclima urbano e a configuração do espaço residencial de Brasília. **Fórum Patrimônio: Mudanças climáticas e o impacto das cidades**, v. 4, n. 1, p.9–22. 2011.

ROSHAN, G.; MOGHBEL, M.; TALEGHANI, M. Spatial analysis of bioclimatic patterns over Iranian cities as an important step in sustainable development. **Sustainable Cities and Society**, v. 83, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103939>

ROSSI, F. A.; KRÜGER, E.; DRACH, P. **Calibração do índice PET para Curitiba e Rio de Janeiro**. XIV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído (ENCAC) e X Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído (ELACAC), Balneário Camboriu, 2017.

RUI, L.; BUCCOLIERI, R.; GAO, Z.; GATTO, E.; DING, W. Study of the effect of green quantity and structure on thermal comfort and air quality in an urban-like residential district by ENVI-met modelling. **Building Simulation**, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0498-9>

RUIZ, M. A.; SOSA, M. B.; CORREA, E. N.; CANTÓN, M. A. Design tool to improve daytime thermal comfort and nighttime cooling of urban canyons. **Landscape and Urban Planning**, v. 167, p. 249-256, 2017. DOI: [10.1016/j.landurbplan.2017.07](https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.07)

SADEGHI, A. R.; BAHADORI, Y. Urban Sustainability and Climate Issues: The Effect of Physical Parameters of Streetscape on the Thermal Comfort in Urban Public Spaces; Case Study: Karimkhan-e-Zand Street, Shiraz, Iran. **Sustainability**, v. 13, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su131910886>

SAFIKHANI, T.; ABDULLAH, A. M.; OSSEN, D. R.; BAHARVAND, M. A review of energy characteristic of vertical greenery systems. **Renew. Sustain. Energy Rev.**, v. 40, p. 450–462, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.166>.

SALAT, S. **Designing Resilient Cities: Bioclimatic Urbanism and Global Change**. London: Wiley, 2017.

SAMPAIO, R. F.; MANCINI, M. C. Estudos de Revisão Sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. **Rev. bras. fisioter.**, São Carlos, v. 11, n. 1, p. 83–89, jan./fev. 2007.

SANTAMOURIS, M.; SYNNEFA, A.; KARLESSI, T. Using Advanced Cool Materials in the Urban Built Environment to Mitigate Heat Islands and Improve Thermal Comfort Conditions. **Solar Energy**, v. 85, n. 12, p. 3085–3102, 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. **Sol. Energy**, v. 103, p. 682–703, 2014.

SANTAMOURIS, M.; DING, L.; FIORITO, F.; OLDFIELD, P.; OSMOND, P.; PAOLINI, R.; PRASAD, D.; SYNNEFA, A. Passive and active cooling for the outdoor built environment—Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects. **Sol. Energy**, v. 154, p. 14–33, 2017.

SANTOS, A. P.; OLIVEIRA, R. M.; LIMA, T. R. **Políticas públicas e desenvolvimento regional no semiárido brasileiro**. Brasília: IPEA, 2020.

SCUSSEL, M. C. B.; SATTLER, M. A. Cidades em (trans)formação: impacto da verticalização e densificação na qualidade do espaço residencial. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 3, p. 137–150, jul./set. 2010.

SANTOS, M. F. N. dos; ENOKIBARA, M. Infraestrutura Verde: conceitos, tipologias e terminologia no Brasil. **Paisag. Ambiente: Ensaios**, v. 32, n. 47, 2021. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.2359-5361.paam.2021.174804>

SAYAD, B.; HELMI, M. R.; OSRA, O. A.; ABED, A. M.; ALHUBASHI, H. H. Microscale Investigation of Urban Heat Island (UHI) in Annaba City: Unveiling Factors and Mitigation Strategies. **Sustainability**, v. 16, n. 747, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16020747>

SCHIBUOLA, L.; TAMBANI, C. High energy efficiency ventilation to limit Covid-19 contagion in school. **Energy & Buildings**, v. 240, p. 110882, jun. 2021.

SEPLAG/AL. Secretaria de Estado do Planejamento, Gestão e Patrimônio. **Regiões Geográficas Imediatas de Alagoas**. Arapiraca: SEPLAG/SINC/GGEO, 2020. Disponível em: <https://dados.al.gov.br/catalogo/dataset/mapas-de-caracterizacao>

territorial/resource/9820eecf-fe49-468c-9dd1-732c619e0d33?inner_span=True>. Acesso em: nov. 2022.

SETO, K. C.; REGENS, S.; MARVEL, S. The Environmental Impact of Urban Expansion: A Global Assessment. **Nature Communications**, v. 9, n. 3, p. 1–11, 2018.

SHAHMOHAMADI, P.; CHE-ANI1, A. I.; A. RAMLY, A.; MAULUD, K. N. A.; MOHD-NOR, M. F. I. Reducing urban heat island effects: A systematic review to achieve energy consumption balance. **International Journal of Physical Sciences**, v. 5, n. 6, p. 626–636, 2010.

SHAREEF, S. The Influence of Greenery and Landscape Design on Solar Radiation and UHI Mitigation: A Case Study of a Boulevard in a Hot Climate. **World**, v. 3, p. 175–205, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/world3020010>

SHARMIN, T.; STEEMERS, K.; MATZARAKIS, A. Microclimatic modelling in assessing the impact of urban geometry on urban thermal environment. **Sustainable Cities and Society**, v. 34, p. 293–308, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2017.07.006>

SHASHUA-BAR, L.; HOFFMAN, M. Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: an empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. **Energy Build.**, v. 31, p. 221–235, 2000.

SHASHUA-BAR, L.; ERELL, E.; PEARLMUTTER, D. The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment. **International Journal of Climatology**, v. 31, p. 1498–1506, 2011.

SHEN, X.; LI, J.; WANG, S.; SU, L.; LI, L. The Impact of Tree-Planting Location on the Microclimate and Thermal Comfort of the Micro-Public Space. **Pol. J. Environ. Stud.**, v. 32, n. 1, p. 717–730, 2023. DOI: [10.15244/pjoes/155867](https://doi.org/10.15244/pjoes/155867)

SHINZATO, P.; DUARTE, D. H. S. Impacto da vegetação nos microclimas urbanos e no conforto térmico em espaços abertos em função das interações solo-vegetação-atmosfera. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 197–215, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000200250>

SHISHEGAR, N. Desenho de ruas e microclima urbano: analisando os efeitos da geometria viária e orientação sobre fluxo de ar e acesso solar em cânions urbanos. **Jornal de Tecnologias de Energia Limpa**, v. 1, 2013.

SILVA, C. F. e. **O Conforto Térmico de Cavidades Urbanas**: contexto climático do Distrito Federal. Brasília, 2013. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) Universidade de Brasília.

SILVA, E. M.; SOUZA, J. P.; CASTRO, A. M. Critérios de delimitação do semiárido brasileiro: análise e impactos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 10, n. 2, p. 123–138, 2014.

SILVA, F. T. da; ALVAREZ, C. E. de. An integrated approach for ventilation's assessment on outdoor thermal comfort. **Building and Environment**, v. 87, p. 59–71, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.01.018>

SILVA, M. F. da. **Estratégias bioclimáticas para seis cidades alagoanas**: contribuições para a adequação da arquitetura ao clima local. Alagoas, 2019. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Universidade Federal de Alagoas.

SILVA, M. F. da.; BARBOSA, R. V. R. Regime de ventos em cidades de diferentes regiões geográficas de Alagoas a partir de dados meteorológicos recentes. **Revista Brasileira de Climatologia**, Dourados, MS, v. 31, 2022.

SILVA, S. V. de O.; PAGEL, E. C. Contribuições para a qualidade do ar interior em salas de aula pós pandemia de COVID-19. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 14, 2023. DOI: [10.20396/parc.v14i00.8670256](https://doi.org/10.20396/parc.v14i00.8670256)

SILVA, W. S.; BARBOSA, R. V. R.; BATISTA, J. O. Desempenho térmico de sistema de cobertura vegetada na região do semiárido alagoano. **Braz. J. of Develop.**, v. 6, p. 103449-103466, 2020.

SILVA JUNIOR, E. R. **Urbanismo Paramétrico**: Experimentos para uma cidade compacta e sustentável. SIGraDi 2016, XX Congress of the Iberoamerican Society of Digital Graphics 9-11, Buenos Aires, Argentina, November, 2016.

SODOUDI, S.; ZHANG, H.; CHI, X.; MÜLLER, F.; LI, H. The influence of spatial configuration of green areas on microclimate and thermal comfort. **Urban Forest. Urban Green.**, v. 34, p. 85–96, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.06.002>

SOUZA, E. **Edifícios em avaliação**: 12 certificações de construção sustentável para conhecer. ArchDaily Brasil. Acessado 24 Jul 2023. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/946288/edificios-em-avaliacao-12-certificacoes-de-construcao-sustentavel-para-conhecer>. ISSN 0719-8906

SOUZA, F. C. de; AGUIAR, J. O. Cidades verticais – um novo padrão de cidades modernas: um estudo de caso sobre a verticalização urbana de Campina Grande/PB e seus impactos socioambientais (1960-2012). **Fronteiras - Revista Catarinense de História**, n. 39, p. 179–194, 2022. DOI: <https://doi.org/10.29327/253484.1.39-9>

SOUZA, G. M. M. DE; CALLEJAS, I. J. A.; DURANTE, L. C.; ROSSETI, K. DE A. C.; NUNES, G. K.; MASCARO, L. P.; BONALDO, J. P. Benefícios microclimáticos e de conforto térmico proporcionado pela vegetação arbórea na região tombada do Centro Histórico. **Engineering and Science**, v. 13, n. 2, 2024. DOI: [10.18607/10.18607/ES20241316849](https://doi.org/10.18607/10.18607/ES20241316849)

SOZËN, I.; ORAL, G. K. Outdoor thermal comfort in urban canyon and courtyard in hot arid climate: A parametric study based on the vernacular settlement of Mardin. **Sustainable Cities and Society**, v. 48, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.12.026>

SRIVANIT, M.; JAREEMIT, D. Modeling the influences of layouts of residential townhouses and tree-planting patterns on outdoor thermal comfort in Bangkok suburb. **J. Build. Eng.**, v. 30, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101262>

STEYN, D. G. Effects of a small scrub fire on the surface radiation budget. **Royal Meteorological Society**, v. 3, n. 7, p. 253–264, 1980.

STONE, R. J. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. **Solar Energy**, v. 51, n. 4, p. 289–291, 1993.

STONE, J. R., 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.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. **American Meteorological Society**, Canada, p. 1879–1900, 2012. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00019.1

SUDENE. **Resolução nº 158/2022**, de 25 de agosto de 2022. Disponível em: <http://www.sudene.gov.br>. Acesso em: 10 set. 2023.

SUDENE. **Relatório técnico sobre a delimitação do semiárido brasileiro**. Recife: Sudene, 2023.

SUNDBORG, A. Local climatological studies of the temperature conditions in an urban area. **Tellus**, v. 2, p. 222–232, 1950.

TALEGHANI, M. Outdoor thermal comfort by different heat mitigation strategies- A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* v. 81, p. 2011–2018, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.010>.

TALEGHANI, M.; KLEEREKOPER, L.; TENPIERIK, M.; VAN DEN DOBBELSTEEN, A. Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. **Building and Environment**, v. 83, p. 65–78, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.014>.

TALEGHANI, M.; SAILOR, D.; BAN-WEISS, G. A. Micrometeorological simulations to predict the impacts of heat mitigation strategies on pedestrian thermal comfort in a Los Angeles neighborhood. **Environ. Res. Lett.**, v. 11, n. 2, 2016.

TORRES, S. C. (2017) **Forma e Conforto**: estratégias para (re)pensar o adensamento construtivo urbano a partir dos parâmetros urbanísticos integrados à abordagem bioclimática. Recife, 2017. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Urbano — Universidade Federal de Pernambuco), Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2017.

TORRES, S. C.; FREITAS, R. M. A influência de parâmetros urbanísticos no desempenho climático de tecidos urbanos: Uma análise preditiva em Arapiraca-AL, Brasil. GOT: **Revista de Geografia e Ordenamento do Território**, v. 25, p. 22-47, 2023. DOI: <https://doi.org/10.17127/got/2023.25.002>.

TRIOLA, M. F. **Introdução à Estatística**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2017.

TSILINI, V.; PAPANTONIOU, S.; KOLOKOTSA, D. D.; MARIA, E. A. Urban gardens as a solution to energy poverty and urban heat island. **Sustainable Cities and Society**, v. 14, p. 323-333, 2015.

TSOKA, S.; TSIKALOUDEKI, K.; THEODOSIOU, T.; BIKAS, D. Urban Warming and Cities' Microclimates: Investigation Methods and Mitigation Strategies — A Review. **Energies**, v. 13, 2020. DOI: 10.3390/en13061414

UGEDA JÚNIOR, J. C.; AMORIM, M. C. C. T. Reflexões acerca do Sistema Clima Urbano e sua Aplicabilidade: pressupostos teórico-metodológicos e inovações técnicas. **Revista do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo**, volume especial, p.160–173, 2016.

UNGER, J. Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: review and new approach. **Clim. Res.**, v. 27, n. 3, p. 253–264, 2004. DOI:10.3354/cr027253

VENHARI, A. A.; TENPIERIK, M.; TALEGHANI, M. The role of sky view factor and urban street greenery in human thermal comfort and heat stress in a desert climate. **Journal of Arid Environments**, v. 166, p. 68-76, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.04.009>

WAI, K. M.; YUAN, C.; LAI, A.; YU, P. K. N. Relationship between pedestrian-level outdoor thermal comfort and building morphology in a high-density city. **Science of the Total Environment**, v. 708, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134516>
WANG, Y.; AKBARI, H.; CHEN, B. Urban geometry and environmental urban policy development. **Procedia Engineering**, v. 169, p. 308–315, 2016.

WANG, Z.; SONG, J.; CHAN, P. W.; LI, Y. The urban moisture island phenomenon and its mechanisms in a high-rise high-density city. **International Journal of Climatology**, p. 01–21, 2020. DOI: 10.1002/joc.6672

WEN, C-Y.; JUAN, Y-H.; YANG, A-S. Enhancement of City Breathability with Half Open Spaces in Ideal Urban Street Canyons. **Building and Environment**, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.048>.

WMO (1983). **Guindace to Meteorological Instruments and Methods of Observation**. World Meteorological Organization N°8, 5th edition, Geneva Switzerland.

XUE, Y.; WANG, Y.; PENG, H.; WANG, H.; SHEN, J. The impact of building configurations and anthropogenic heat on daily urban air temperature cycles. **Building and Environment**, v. 169, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106564>

YAHIA, M. W.; JOHANSSON, E.; THORSSON, S.; LINDBERG, F.; RASMUSSEN, M. I. Effect of urban design on microclimate and thermal comfort outdoors in warm-humid Dar es Salaam, Tanzania. **Int. J. Biometeorol.**, 2017. DOI 10.1007/s00484-017-1380-7

YANG, S. R.; LIN, T. P. An integrated outdoor spaces design procedure to relieve heat stress in hot and humid regions. **Building and Environment**, v. 99, p. 149–160, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.01.001>

YANG, X.; ZHAO, L.; BRUSE, M.; MENG, Q. An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments. **Energy and Buildings**, v. 54 p. 243–251, 2012.

YANG, X.; ZHAO, L.; BRUSE, M.; MENG, Q. Evaluation of a microclimate model for predicting the thermal behavior of different ground surfaces. **Building and Environment**, v. 60, p. 93–104, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.008>

YANG, X.; LI, Y.; LUO, Z.; CHAN, P. W. The urban cool island phenomenon in a high-rise high-density city and its mechanisms. **International Journal of Climatology**, v. 37, p. 90–904, 2017. DOI: [10.1002/joc.4747](https://doi.org/10.1002/joc.4747)

YANG, Y.; ZHANG, X.; LU, X.; HU, J.; PAN, X.; ZHU, Q.; SU, W. Effects of Building Design Elements on Residential Thermal Environment. **Sustainability**, v. 10, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10010057>

YIN, S.; LANG, W.; XIAO, Y.; XU, Z. Correlative Impact of Shading Strategies and Configurations Design on Pedestrian-Level Thermal Comfort in Traditional Shophouse Neighbourhoods, Southern China. **Sustainability**, v. 11, n. 1355, 2019. DOI: [10.3390/su11051355](https://doi.org/10.3390/su11051355)

YIN, Y.; MIZOKAMI, S.; MARUYAMA, T. An analysis of the influence of urban form on energy consumption by individual consumption behaviors from a microeconomic viewpoint. **Energy Policy**, v. 61, p. 909–919, 2013.

YIN, Y.; LI, S.; XING, X.; ZHOU, X.; KANG, Y.; HU, Q.; LI, Y. Cooling Benefits of Urban Tree Canopy: A Systematic Review. **Sustainability**, v. 16, n. 4955, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16124955>.

YOLA, L.; SIONG, H. C. Impact of Urban Canyon Direction on Solar Radiation and Airflow in Hot and Humid Regions. **Asian Journal of Behavioural Studies (AjBeS)**, v. 3, n. 13, p. 88–97, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.21834/ajbes.v3i13.146>

Zhang, J.; Zhang, F.; Gou, Z.; Liu, J. Assessment of macroclimate and microclimate effects on outdoor thermal comfort via artificial neural network models. **Urban Climate**, v. 42, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101134>

APÊNDICE A - Definição e formulação matemática dos parâmetros urbanísticos tradicionais e avançados

Parâmetros urbanísticos tradicionais e avançados.		
Parâmetro	Conceito	Cálculo
Tradicionais	Coeficiente de Aproveitamento (CA) Fator que multiplicado pela área do lote, indica a área máxima construída. É definido pela razão da área total construída e a área do lote. Unidade: adimensional	$CA = A_{TC} / A_{TL}$ A_{TC} : área total construída A_{TL} : área total do lote
	Taxa de ocupação (TO) Dado pela razão entre a área construída no solo pela área total do lote. Apresentando a taxa de ocupação no solo. Baixas TO combinadas a altos CA incentivam a verticalização. Unidade: %	$TO = A_{CS} / A_{TL}$ A_{CS} : área construída no solo A_{TL} : área total do lote
	Gabarito Indica a altura máxima das edificações. Unidade: m (metros)	-
	Recuos mínimos Determinam a distância da borda do lote a partir da qual se pode edificar. Apresenta um valor fixo de acordo com o tipo de face do lote: frontal, posterior e laterais. Unidade: m (metros)	-
	Recuos Progressivos Determinam a distância da borda do lote a partir da qual se pode edificar. Apresenta um valor progressivo, de acordo com o número de pavimentos. Unidade: m (metros)	$R = R_i + (n-2)/2^{71}$ R_i : recuo inicial n : nº de pavimentos
	Taxa de Permeabilidade Indica a porcentagem do lote que deve ser deixada permeável, sem construção ou impermeabilização. Unidade: %	$TP = A_p \times 100 / A_{TL}$ A_p : área permeável A_{TL} : área total do lote
Avançados	Porosidade do Volume Edificado (Po Vedif) Relação do volume edificado livre (permeável /poroso) pelo volume total edificado na malha urbana. Unidade: adimensional	$PoVedif = \sum V_{abe\ edi} / V_{tot\ const}$ $V_{abe\ edi}$: Volume aberto no edifício (m³) $V_{tot\ const}$: Volume total edificado na malha urbana (m³)
	Prospecto Médio ⁷² Indica a relação da altura média ponderada das edificações pela largura da rua. Unidade: adimensional	$Pm = H_{MED} / l$ H_{MED} : altura média (m) ponderada das edificações. l : largura da rua (m).
	Densidade de área frontal (FAD) ⁷³ Também conhecido por Comprimento de rugosidade. Descreve a rugosidade de uma determinada superfície, indicando a altura na qual a velocidade horizontal do vento tende a zero. Unidade: adimensional	$FAD = A_{FVC} / A_T$ A_{FVC} : área frontal do volume construído (à barlavento). A_T : área total (m²)
	Índice de densidade arbórea (IDA) Indica o número de árvores existentes no perímetro de 100m². Unidade: %	$IDA = (n / \text{Área}_T) \times 100$ n : nº de árvores Área_T : área total analisada
	Rugosidade Absoluta (Rg Ab) Integra a diversidade de alturas e a permeabilidade do tecido.	$Rg\ Ab = \sum_{const.} Si.Hi / \sum_{const.} Si + \sum_{vazio} Sj$ Si : área construída do edifício. Hi : altura do edifício. Sj : área no elemento não construído j (área de espaços livres)

Fonte: Adaptado de Torres (2017).

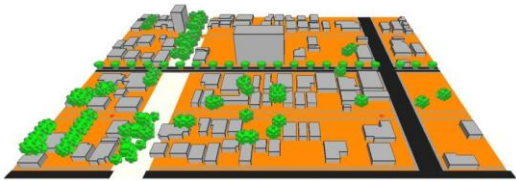
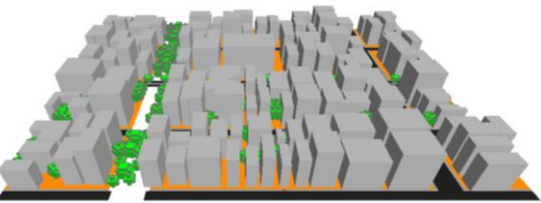
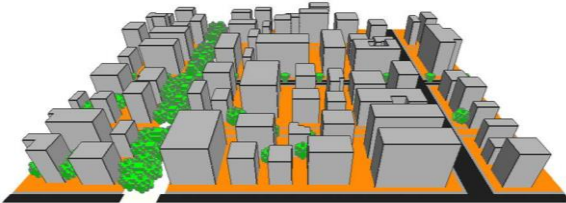
⁷¹ Fórmula obtida no Código de Urbanismo e Edificações de Maceió (2007) na Zona residencial 5 (UR-5).

⁷² De acordo com Martins, Bonhomme e Adolphe (2013).

⁷³ De acordo com Lyra e Pereira (2007) e Yang, Zhao, Bruse, Meng (2012)

APÊNDICE B - Síntese das pesquisas anteriores no TCC (Brandão, 2017) e Dissertação (Brandão, 2020)

Ao finalizar a **graduação**, no estudo que resultou no Relatório Final do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) (Brandão, 2017a) e no Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) (Brandão, 2017b), buscou-se analisar o impacto da verticalização em microclimas urbanos. Nesse sentido, a partir de uma fração da cidade com tendência à verticalização foram elaborados quatro modelos para simulação computacional, como apresenta o Quadro abaixo:

Modelos simulados para o TCC.	
Modelo 1	Modelo 2
	
Ocupação observada no período em questão.	Ocupação dos lotes vazios com edificações térreas, segundo os parâmetros presentes no Código de Obras e Edificações (Arapiraca, 2001).
Modelo 3	Modelo 4
	
Ocupação dos lotes com edificações verticalizadas, segundo os parâmetros presentes no Código de Obras e Edificações (Arapiraca, 2001).	Ocupação dos lotes com edificações verticalizadas, segundo a adoção da fórmula do recuo progressivo presente no Código de Urbanismo e Edificações de Maceió (2007), especificamente da Zona de Uso Residencial 5 (UR-5).
Fonte: Adaptado de Brandão (2017).	

Os modelos foram calibrados para simular no período quente e seco. A análise dos modelos partiu das seguintes variáveis climáticas: as temperaturas potenciais máxima e mínima, e direção e velocidade dos ventos; em três períodos do dia: às 9h, 15h e 21h. Como resultado, os Modelos 01 e 02, de edificações térreas, apresentaram os valores mais elevados de temperatura potencial máxima nos três horários analisados, em comparação com os Modelos 03 e 04. A razão da altura das edificações (H) e o distanciamento entre os edifícios (W), relação H/W , exercem impacto direto na incidência de radiação solar direta nas fachadas e na superfície do solo (Romero, 2001). Em cânions urbanos profundos, as edificações verticalizadas geram

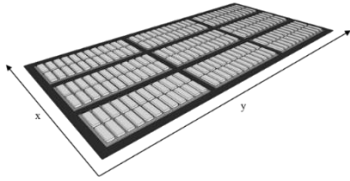
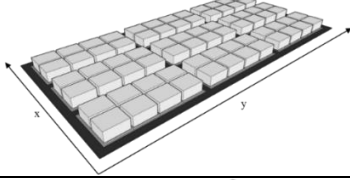
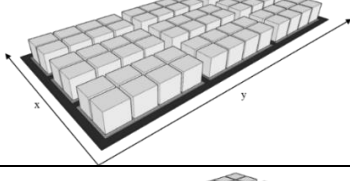
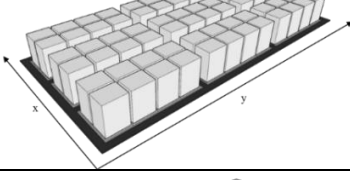
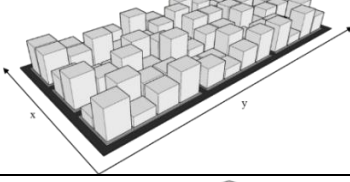
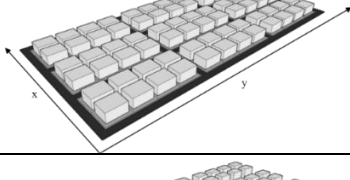
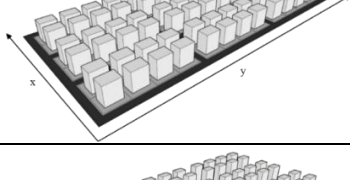
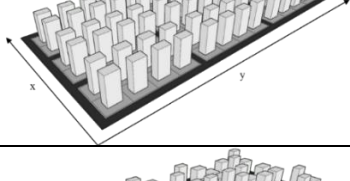
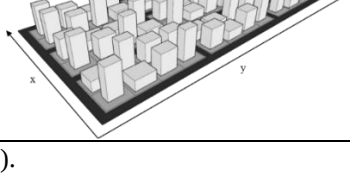
áreas de sombra no nível acima do solo, enquanto a incidência da radiação solar direta ocorre, predominantemente, nas fachadas a partir de uma determinada altura.

Entre os cenários verticalizados, foi observado que o modelo 03 apresentou valores mais baixos de temperatura potencial máxima. O uso do recuo mínimo inicial e progressivo resultou em cenários que diferiram na relação H/W e no grau de obstrução da abóbada celeste, o Fator de Céu Visível (FCV). O FCV influencia na radiação recebida/emitida pelas superfícies no interior do cânion e a radiação emitida/recebida pela abóbada celeste (Erell; Pearlmutter; Williamson, 2011). Isso demonstrou que no clima analisado, quanto maior a obstrução, menor quantidade de radiação solar recebida, o que gerou condições mais favoráveis à diminuição da temperatura potencial máxima no nível do pedestre (Brandão, 2017).

A respeito da direção e velocidade dos ventos, nos Modelos 01 e 04 foram observadas a diminuição das zonas de sombra de vento aliado a melhor porosidade e rugosidade do tecido urbano, em comparação com os Modelos 02 e 03. O uso do recuo progressivo demonstrou potencializar o aproveitamento da ventilação natural. Portanto, a análise comparativa dos modelos indicou que a fração urbana verticalizada apresentou condições mais favoráveis ao conforto térmico na escala do pedestre, dado o clima semiárido da cidade de Arapiraca, especialmente em função do aproveitamento do sombreamento gerado pelas edificações. O que coincide com a primeira estratégia bioclimática para o período quente e seco apontada por Silva (2019).

Durante o **mestrado**, de forma a dar continuidade à pesquisa, na dissertação o objetivo foi analisar a influência da geometria urbana no que tange o adensamento urbano por meio da verticalização no ambiente térmico urbano, de forma a contribuir para o planejamento urbano em cidade de clima semiárido. Nesse contexto, a unidade urbana para estudo foi o cânion urbano. Semelhante ao método utilizado no TCC, a mesma fração urbana de Arapiraca foi selecionada, cujo tecido apresenta tendência à verticalização, como fora observado por Torres (2017). Os modelos foram calibrados para o período quente e seco, que corresponde à estação com elevadas taxas de temperatura do ar, o verão. Desta forma, chegou-se aos seguintes modelos:

Modelos simulados para a Dissertação, com Norte igual a 0° e 45°.

Modelo	Características	3D
Modelo 1 e 10 REF	Edificações de 1 pavimento em todos os lotes da quadra, com aplicação do recuo mínimo inicial (cenário sem verticalização como referência da situação atual), e de incidência da ventilação predominante perpendicular/oblíqua às edificações (N=0°/45°).	
Modelo 2 e 11 RI-05	Edificações de 5 pavimentos em todos os lotes da quadra, com aplicação do recuo mínimo inicial, e de incidência da ventilação predominante perpendicular/oblíqua às edificações (N=0°/45°).	
Modelo 3 e 12 RI-10	Edificações de 10 pavimentos em todos os lotes da quadra, com aplicação do recuo mínimo inicial, e de incidência da ventilação predominante perpendicular/oblíqua às edificações (N=0°/45°).	
Modelo 4 e 13 RI-15	Edificações de 15 pavimentos em todos os lotes da quadra, com aplicação do recuo mínimo inicial, e de incidência da ventilação predominante perpendicular/oblíqua às edificações (N=0°/45°).	
Modelo 5 e 14 R-RI	Edificações de 5, 10 e 15 pavimentos distribuídos de forma aleatória, por meio de sorteio, nos lotes da quadra, com aplicação do recuo mínimo inicial, e de incidência da ventilação predominante perpendicular/oblíqua às edificações (N=0°/45°).	
Modelo 6 e 15 RP-05	(RP-05), com edificações de 5 pavimentos em todos os lotes da quadra, com aplicação do recuo progressivo, e de incidência da ventilação predominante perpendicular/oblíqua às edificações (N=0°/45°).	
Modelo 7 e 16 RP-10	Edificações de 10 pavimentos em todos os lotes da quadra, com aplicação do recuo progressivo, e de incidência da ventilação predominante perpendicular/oblíqua às edificações (N=0°/45°).	
Modelo 8 e 17 RP-15	Edificações de 15 pavimentos em todos os lotes da quadra, com aplicação do recuo progressivo, e de incidência da ventilação predominante perpendicular/oblíqua às edificações (N=0°/45°).	
Modelo 9 e 18 R-RP	Edificações de 5, 10 e 15 pavimentos distribuídos de forma aleatória, por meio de sorteio, nos lotes da quadra, com aplicação do recuo progressivo, e de incidência da ventilação predominante perpendicular/oblíqua às edificações (N=0°/45°).	

Fonte: Adaptado de Brandão (2017).

Os parâmetros para modelagem dos cenários partiram do seguinte pressuposto: o aproveitamento das principais estratégias bioclimáticas para o objeto de estudo (Arapiraca/AL): sombreamento e ventilação natural (porosidade e rugosidade da malha). Nesse sentido, foram considerados aspectos da geometria do cânion urbano, expressa pela relação H/W, FCV e orientação, a fim de obter condições favoráveis ao conforto térmico ao ar livre na escada do pedestre. A relação H/W e o FCV foram resultantes da adoção de edificações térreas e verticalizadas, com gabarito máximo de 45m, com uso do recuo mínimo inicial e progressivo, tomando o lote como unidade mínima de planejamento.

A altura das edificações foi determinada mediante observação dos edifícios já presentes na fração urbana tomada como base para modelagem dos cenários urbanos hipotéticos, assim, foram modelados cenários com 5, 10, 15 e 5/10/15 pavimentos. Nos cenários com edificações de número de pavimentos variados (5/10/15), a seleção do gabarito por lote foi determinada de forma aleatória, por meio de sorteio. Com relação à orientação, foi adotada de norte igual a 0° e 45°, para analisar a influência da ventilação natural (predominante perpendicular e oblíqua às quadras e vias, respectivamente), e do sombreamento das edificações, com base na orientação solar.

Para a obtenção dos dados climáticos foram inseridos quatro receptores (R) em diferentes pontos a partir da quadra central: o receptor 01 (R1) está à frente da quadra central, enquanto o receptor 02 (R2) está à sotavento e o receptor 03 (R3), à barlavento da quadra central, e por último, o receptor 04 (R4), está situado no interior da quadra central. Ao considerar a altura de 1,5m, os seguintes dados climáticos foram coletados para análise comparativa entre os modelos: temperatura do ar, Temperatura Radiante Média (TRM), velocidade e direção dos ventos e o índice de Voto Médio Estimado (*Predicted Mean Vote* - PMV). Para a análise foram adotados os seguintes horários: às 9h, 15h e 21h, conforme indicação da OMM.

Ao considerar que os parâmetros de modelagem partiram do princípio de potencializar o aproveitamento das estratégias bioclimáticas de sombreamento (SO) e ventilação natural (VN), a respeito da influência da forma urbana (relação H/W, FCV e orientação) no microclima do cânion urbano, com base no conforto térmico ao ar livre na escala do pedestre, destacaram-se alguns pontos:

Síntese dos resultados obtidos na dissertação de Brandão (2020).

Geometria do cânion		Gabarito
Relação H/W e FCV	SO	Os modelos verticalizados apresentaram condições mais favoráveis ao conforto térmico ao ar livre, na escala do pedestre, em comparação com o modelo com edificações térreas. O aumento do gabarito das edificações gerou a diminuição da TRM, variável climática que influencia diretamente em índice de conforto térmico. Isso se deve ao maior grau de obstrução da abóbada celeste, que aumentou a dimensão de área sombreada no interior do cânion urbano. Esse resultado coincide com os princípios apontados por Romero (2000) para regiões tropicais quente. A forma urbana compacta reduz a exposição à radiação solar direta, e aumenta a área sombreada. Em consonância, tem-se a pesquisa de Pereira, Masiero e Bourscheidt (2021), que ao analisar duas regiões com diferentes configurações urbanas em Santos/SP, observou que, durante a estação quente, o perímetro com edificações verticalizadas apresentou uma redução de aproximadamente 4°C na temperatura do ar em comparação com áreas de menor densidade construída. Resultados semelhantes também foram encontrados por Nogueira et al. (2018) e Muniz-Gäal et al. (2020).
	VN	O aproveitamento da ventilação natural, parte de duas abordagens, a porosidade e a rugosidade da malha urbana, que influencia na velocidade dos ventos. Os modelos com edificações térreas apresentaram baixa rugosidade de superfície, o que gerou uma maior quantidade do fluxo de ar passando pela camada limite, que levou ao aumento da velocidade dos ventos, especialmente nas vias paralelas à direção predominante dos ventos. Nos modelos verticalizados, a redução da rugosidade de superfície gerou a diminuição da permeabilidade dos ventos dentro do cânion urbano. Com exceção dos modelos com incidência da ventilação predominante oblíqua às edificações, especialmente os modelos 17 e 18, que apresentaram velocidade dos ventos superiores às observadas nos cenários de edificações térreas. Isso demonstra que o aproveitamento da ventilação natural pode ser potencializado em cânions urbanos, desde que haja o devido planejamento, sob o viés da bioclimatologia.
	Recuo mínimo inicial e progressivo	
	SO	Os modelos com uso do recuo mínimo inicial apresentaram uma redução dos valores de TRM e do índice PMV. O uso do recuo mínimo inicial gerou condições mais favoráveis para o conforto térmico. Isso demonstra a influência do FCV no conforto térmico a nível do pedestre em climas como o de Arapiraca/AL, especialmente no período quente e seco. Resultado semelhante foi encontrado por Huang e Chen (2020). É importante pontuar que a temperatura do ar não apresentou diferenças significativas.
Orientação	VN	Os modelos com uso do recuo mínimo inicial apresentaram valores de velocidade dos ventos inferiores em comparação com os modelos com uso do recuo progressivo. Além disso, foi observado a canalização dos ventos nas vias paralelas à direção predominante dos ventos. O que gerou diversas zonas de sombra de vento no interior dos lotes e à sotavento. A proximidade entre as edificações gerou uma malha com baixa rugosidade de superfície, o que acarretou a baixa permeabilidade dos ventos no interior do cânion urbano, e nem mesmo o cenário com edificações de diferentes gabaritos trouxe resultados diferentes. Este quadro se agrava ao considerar que a malha com uso do recuo mínimo inicial apresentou baixa porosidade, assim, a velocidade dos ventos a nível do pedestre também sofreu diminuição. Fenômeno oposto ocorreu nos modelos com uso do recuo progressivo, especialmente quando a orientação do norte foi de 45° como será apresentado a seguir.
	SO	As variáveis climáticas de temperatura do ar e TRM apresentaram um resultado similar, dado que a orientação do traçado urbano frente à radiação solar alterou o sentido da projeção da sombra gerada pelas edificações. Contudo, nos modelos com norte de 45° houve o aumento da velocidade dos ventos. A incidência da ventilação oblíqua à orientação do traçado urbano contribuiu para uma malha urbana mais permeável. Na composição do microclima nos modelos de incidência da ventilação oblíqua às edificações, somou-se o aumento da velocidade dos ventos no nível do pedestre, assim, foi observado índices mais próximos ao conforto térmico do que os modelos de incidência da ventilação perpendicular às edificações. Com relação ao tipo de recuo, apesar dos modelos com uso do recuo progressivo potencializarem o aproveitamento da ventilação natural, os modelos com uso do recuo mínimo inicial geraram menores valores de TRM, o que gerou a diminuição no índice PMV, devido a maior influência desta variável climática em índices de conforto térmico ao ar livre no nível do pedestre. Esse resultado coincide com pesquisas recentes, como a de Yahia et al. (2017), que ao estudar uma cidade de clima quente e seco, observaram que a diminuição da TRM teve maior influência no índice de conforto do que aumentar a velocidade dos ventos.
	VN	Os modelos com norte igual a 0° apresentam as vias paralelas à incidência dos ventos predominantes. Desse modo, esperava-se que em função do efeito da canalização dos ventos, que gera o aumento da velocidade do fluxo de ar, esses modelos apresentariam os valores mais elevados da velocidade dos ventos. A análise dos resultados demonstrou que os modelos com norte de 45° tiveram um melhor desempenho. Entre modelos com edificações de mesmo número de pavimentos a diferença foi de até 1,39m/s. No caso dos modelos com edificações de 5/10/15 pavimentos, a diferença chegou a 1,46m/s. A respeito da porosidade, os modelos com uso do recuo progressivo potencializaram o aproveitamento da ventilação natural. Os resultados reforçam o efeito da orientação do traçado urbano, assim como a rugosidade e porosidade da superfície, que potencializa o aproveitamento da ventilação natural no nível do pedestre.

Fonte: Elaborado pela Autora.

APÊNDICE C - Revisão sistemática de literatura: efeitos climáticos de cânions urbanos em cidades de clima semiárido

Este Apêndice compreende a descrição da metodologia adotada e do resultado da Revisão Sistemática de Literatura (RSL) sobre os efeitos climáticos de cânions urbanos no contexto de cidades de clima semiárido. Esta RSL foi necessária para a definição dos parâmetros de modelagem utilizados na configuração dos cenários urbanos hipotéticos simulados. Com base no método PRISMA, realizado no dia 02 de dezembro de 2021, a RSL visou identificar as estratégias bioclimáticas a partir dos elementos que compõe a forma urbana, como: a geometria urbana, o tecido urbano (a partir do albedo dos materiais) e o uso de vegetação; como premissa para a definição de diretrizes urbanísticas para um planejamento urbano sustentável.

A.1 Metodologia Aplicada na RSL

A RSL, assim como outras formas de estudo de revisão, é uma forma de pesquisa que parte de uma fonte de dados para reunir a literatura sobre determinado tema científico. A diferença da RSL consiste em partir de uma pergunta formulada de forma clara, adotar um método sistematizado e explícito para a identificação das palavras-chave, para a busca, triagem, seleção dos artigos e síntese da informação selecionada. Esse tipo de abordagem confere a possibilidade de aplicação e clareza ao resultado apresentado dos artigos analisados em pesquisa (Sampaio; Mancini, 2007). Dentre os modelos de RSL, a presente pesquisa tomou o método PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses* - Itens de Relatório Preferidos para Revisões sistemáticas e Meta-análises). A meta-análise, que corresponde aos métodos estatísticos que podem ou não ser utilizados para analisar e resumir os resultados dos artigos reunidos.

O PRISMA parte de um checklist de 27 itens divididos em 7 tópicos principais: Título, Resumo, Introdução, Métodos, Resultados, Discussão e Outras Informações (Page et al., 2021). No PRISMA é estabelecido um processo para seleção dos estudos (ver Figura 89), desde a identificação das palavras-chave, à determinação da base de dados e a seleção/triagem dos artigos obtidos, até o tratamento para a informação coletada dos artigos reunidos. Nesse contexto, a identificação das palavras-chave partiu da observação dos termos comumente usados para esse fim nos artigos pesquisados de forma livre e por publicações recomendadas por autores da área, conforme a Figura 90 apresenta. Desta forma, chegou-se as seguintes palavras-chave: Clima Semiárido; ENVI-met; Morfologia Urbana; Conforto Térmico.

Os artigos foram buscados nos seguintes bancos de dados: SCOPUS e *WEB OF SCIENCE*. Nesse contexto, foi necessário definir as *strings* de busca (ver Quadro 33), assim como alguns filtros de pesquisa, como: português e inglês como idioma. Só foram considerados artigos completos publicados em revista, e não foi estipulado prazo temporal das publicações. A pesquisa resultou em 353 artigos científicos, dos quais 162 foram do banco de dados da Scopus e 191, da *Web of Science*. Após a identificação e exclusão das 102 duplicadas, restaram 251 trabalhos.

Categorias de stress térmico de acordo com os índices UTCI e PET.

Termos Principais	Palavras-chave (SCOPUS)	Palavras-chave (<i>Web of Science</i>)
Clima Semiárido	{tropical climate} OR {hot tropical climate} OR {hot tropical climate} OR {semi-arid tropical climate} OR {arid tropical climate} OR {semi-arid climate} OR {urban climate} OR microclimate OR {urban microclimate}	("tropical climate" OR "hot climate" OR "hot tropical climate" OR "semi-arid tropical climate" OR "arid tropical climate" OR "semi-arid climate" OR "urban climate" OR microclimate OR "urban microclimate")
ENVI-met	{ENVI-met} OR {simulation with ENVI-met} OR {computer simulation} OR {hypothetical models} OR {urban fraction} OR calibration OR {modeling parameters} OR {calibration parameters} OR Rayman	("ENVI-met" OR "simulation with ENVI-met" OR "computer simulation" OR "hypothetical models" OR "urban fraction" OR "calibration" OR "modeling parameters" OR "calibration parameters" OR "Rayman")
Morfologia Urbana	{urban morphology} OR {urban canyon} OR verticalization OR {urban density} OR {H/W ratio} OR {H/W} OR {constructive density} OR {verticalized area} OR {sky view factor} OR SVF OR {urban form} OR {urban geometry} OR {vertical urban geometry} OR shading OR {heat islands} OR {thermal inversion} OR {anthropogenic heat} OR {compact city} OR {bioclimatic urbanism} OR {urban planning} OR {urban parameters} OR {urban sustainability}	("urban morphology" OR "urban canyon" OR "verticalization" OR "urban density" OR "H/W ratio" OR "H/W" OR "constructive density" OR "verticalized area" OR "sky view factor" OR "SVF" OR "urban form" OR "urban geometry" OR "vertical urban geometry" OR "shading" OR "heat islands" OR "thermal inversion" OR "anthropogenic heat" OR "compact city" OR "bioclimatic urbanism" OR "urban planning" OR "urban parameters" OR "urban sustainability")
Conforto Térmico	{thermal comfort} OR {thermal discomfort} OR {thermal conditioning} OR {thermal range} OR {thermal regulation} OR {microclimatic impact} OR {climate variable} OR PET OR {Physiological Equivalent Temperature} OR PMV OR {Predicted Average Vote} OR {UTCI} OR {average radiant temperature} OR {thermal stress} OR pedestrian	("thermal comfort" OR "thermal discomfort" OR "thermal conditioning" OR "thermal range" OR "thermal regulation" OR "microclimatic impact" OR "climate variable" OR "PET" OR "Physiological Equivalent Temperature" OR "PMV" OR "Predicted Average Vote" OR "UTCI" OR "Universal Thermal Climate Index" OR "Universal Thermal Climate Index" OR "average radiant temperature" OR "thermal stress" OR "pedestrian")

Fonte: Elaborado pela Autora.

O próximo passo foi a submissão dos trabalhos restantes aos critérios de inclusão e exclusão, empregados na seguinte ordem: leitura do título, leitura do resumo e leitura do texto completo. A presente pesquisa considerou os seguintes critérios:

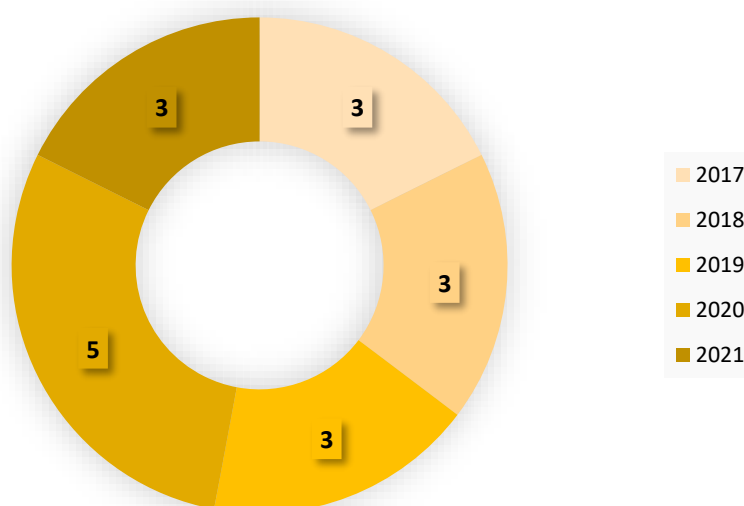
Critérios de inclusão e exclusão da RSL.

INCLUSÃO	(a) Serão incluídos trabalhos que já possuam aprovação pela comunidade científica. (b) Serão incluídos os trabalhos que utilizarem o ENVI-met como ferramenta computacional para simulação de cenários urbanos hipotéticos. (c) Serão incluídos os trabalhos que tratem do estudo do microclima urbano, com ênfase na morfologia urbana em ambientes de alta densidade construtiva.
EXCLUSÃO	(a) Serão excluídos os trabalhos que analisem o conforto de uma única edificação ou no interior da edificação. (b) Serão excluídos os trabalhos publicados como artigos curtos, pôsteres e afins. (c) Serão excluídos os trabalhos que apresentam a análise sem especificar o método utilizado. (d) Serão excluídos os trabalhos que analisam climas diferentes do semiárido.

Fonte: Elaborado pela Autora.

Após a submissão dos 251 trabalhos aos critérios de inclusão e exclusão, restaram somente 17 artigos. O que aponta a necessidade do aprofundamento em pesquisas acerca do clima urbano em cidades de clima As. A Figura 45 apresenta o recente interesse pela pesquisa da tipologia do clima em questão, especialmente em 2020. Em sua maioria, os trabalhos se concentraram em cidades do continente asiático, com alguns exemplos no continente africano e da América do Sul. O Quadro 35 identifica as revistas de sua publicação.

Distribuição por ano dos artigos obtidos para revisão.



Fonte: Elaborado pela Autora.

Distribuição do n° de publicações por revista científica.

Revistas	N° de Publicações		
	1	2	3
<i>Urban Forestry & Urban Greening</i>			
<i>Building and Environment</i>			
<i>Urban Climate</i>			
<i>International Journal of Biometeorology</i>			
<i>Journal of Building Engineering</i>			
<i>Sustainability</i>			
<i>Theoretical and Applied Climatology</i>			
<i>Int. Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development</i>			
<i>Sustainable Cities and Society</i>			
<i>Environmental and Climate Technologies</i>			
<i>International Journal of Biometeorol</i>			
<i>Journal of Landscape Ecology</i>			
<i>Science of the Total Environment</i>			
<i>Environment, Development and Sustainability</i>			

Fonte: Elaborado pela Autora.

A análise dos 17 artigos finais indicou que:

- Os trabalhos visaram estudar o impacto da forma urbana no conforto térmico ao ar livre, a nível do pedestre (1,5m do solo), a partir de estratégias bioclimáticas para minimizar efeitos climáticos adversos, como a ICU, em cidades de clima semiárido;
- O índice de conforto térmico ao ar livre mais utilizado foi o PET, com exceção de apenas um artigo, que fez uso do Voto Médio Estimado (*Predicted Mean Vote - PMV*);
- As variáveis climáticas adotadas para análise dos resultados foram: a TRM, a temperatura do ar, a umidade relativa do ar e a velocidade e direção do vento;
- Em sua totalidade, os modelos foram simulados com base no dia mais quente do verão, com maior temperatura e umidade relativa do ar, a partir do ano de referência.

As estratégias adotadas podem ser agrupadas com base na: geometria urbana, albedo dos materiais de superfície e no uso de vegetação. Assim, a presente revisão adota a mesma estrutura.

A.1.1 Estratégias a Respeito da Geometria Urbana

A geometria urbana exerce um importante papel para amenizar os efeitos das ICU, proporcionando conforto térmico ao ar livre na escala do pedestre (Mills, 1997; Unger, 2004; Alchapar et al., 2016; Jin et al., 2017; Kedissa; Outtas; Belarbi, 2017; Oke et al., 2017; Sharmin; Steemers; Matzarakis, 2017; Yang et al., 2018; Ramyar et al., 2019; Srivanit; Jareemit, 2020).

As estratégias bioclimáticas referente a geometria urbana dos cânions foram tratadas da seguinte forma: pela relação H/W , o FCV e a orientação. A relação H/W , entendida como a proporção entre a altura das edificações e a distância entre elas (dada pela soma da largura das vias, passeios e recuos frontais), pode influenciar no FCV, que é o grau de obstrução da abóbada celeste de um determinado ponto do solo, contudo, o FCV pode sofrer influência de diversos elementos urbanos, como marquises, árvores, dentre outras. Assim, é possível trabalhar a adequação da geometria dos cânions urbanos de forma concomitante entre a relação H/W e o FCV. A disposição do traçado viário do cânion urbano e suas edificações compõem sua orientação (De; Mukherjee, 2017).

Oke (1988) sugeriu que para cada tipo de clima há uma proporção ideal da relação H/W . O que deve ser avaliado de acordo com as estratégias bioclimáticas de cada cidade, para cada período do ano, durante o dia e a noite. De e Mukherjee (2018) analisaram os efeitos térmicos de cânions urbanos rasos ($H/W=0,6$), regulares ($H/W=1$) e profundos ($H/W=2,5$), com base na relação H/W , durante o dia. Como resultado, nos modelos de cânions urbanos profundos as condições térmicas eram mais favoráveis ao pedestre no ambiente externo. Algumas áreas chegaram a apresentar uma diferença no índice PET de até $7,5^{\circ}\text{C}$, em comparação com os demais modelos. O que coincide com os resultados das pesquisas de Kotharkar, Bagade e Singh, (2020) na cidade de Nagpur na Índia, onde observaram uma redução na temperatura em $2,5^{\circ}\text{C}$ em cânions profundos, em comparação com os cenários de cânions rasos.

É importante destacar, que a forma urbana de cânions profundos tende a diminuir a velocidade da ventilação e reter radiação de onda longa, que resulta na menor capacidade de troca térmica radiativa entre o interior do cânion e a abóbada celeste, o que contribui para o seu aquecimento no período noturno (Oke, 1981; Oke et al., 2017; Chatterjee et al., 2019; Kouklis; Yiannakou, 2021; Feng et al., 2021). Apesar da TRM ser uma variável climática extremamente importante no conforto térmico do pedestre, a velocidade e permeabilidade dos ventos não podem ser negligenciadas. Em cidade de clima semiárido, Yahia et al. (2017) ressaltaram que:

- a) A forma urbana, quanto a sua geometria, deve conciliar simultaneamente o aproveitamento das estratégias de sombreamento e ventilação natural;
- b) No período quente e seco, as altas temperaturas podem aquecer os ventos, por condução, tornando-o indesejável para a promoção de conforto térmico ao ar livre, assim, torna-se importante desenvolver estratégias para proteção dos ventos nesse período ou de diminuição da temperatura do ar;
- c) Em cidades de baixa latitude, ao meio-dia solar, especialmente durante o equinócio, os edifícios não poderão gerar áreas sombreadas ao nível do pedestre, o que implica na necessidade de medidas adicionais,

como dispositivos de sombreamento ou o uso de vegetação de copas densas. Assim, torna-se imprescindível conciliar o aproveitamento do sombreamento gerado pelos edifícios, sem prejudicar a permeabilidade dos ventos e o desempenho térmico noturno.

Rajan e Amirtham (2021) realizaram um estudo em Chennai, cidade metropolitana localizada no sul da Índia, com base no FCV para analisar os efeitos térmicos de cânions urbanos com os seguintes valores: 0,15; 0,32; 0,33; 0,40; 0,45; 0,50; 0,57 e 0,69. Os autores observaram que a diferença do PET entre o cânion pouco obstruído e mais obstruído chegou a 15°C, às 14 hr, o que indica que o sombreamento tem maior impacto no conforto térmico do pedestre que a velocidade dos ventos, devido a influência da TRM. Isto reforça a estreita relação entre o conforto térmico ao ar livre e os valores de TRM (Matzarakis; Mayer; Rutz, 2006; Yahia et al., 2017; Huang; Chen, 2020). Yahia et al. (2017) analisaram o FCV, a cobertura da área construída e a razão de área útil (*Floor Area Ratio* - FAR) com relação ao indicador de conforto térmico PET, e verificaram uma relação linear mais expressiva ($R^2=0,55$) entre FCV e o PET. Desse modo, no processo de planejamento das cidades, a partir de modelos preditivos, torna-se importante construir cenários hipotéticos com base no FCV, resultando do trabalho conjunto entre a relação H/W e elementos urbanos, como a vegetação.

De e Mukherjee (2018) também testaram o desempenho térmico de cânions urbanos profundos quanto a sua orientação. Para isso, modelaram cenários sob as seguintes orientações: 0°, 15°, 30° e 45°. Os autores observaram que os cânions urbanos sob orientação entre 30° e 45°, oblíquos à direção predominante dos ventos, apresentam melhores resultados quanto a sua velocidade e permeabilidade, o que corrobora com a pesquisa de Krüger, Pearlmutter e Rasia (2010). Yahia et al. (2017) observaram que aumentar a velocidade do vento de 0,2 m/s para 4 m/s pode reduzir o PET em até 5°C. Assim, torna-se evidente o potencial das estratégias quanto a geometria urbana em minimizar o armazenamento de calor no interior do cânion urbano e diminuir a incidência de radiação solar direta por sombreamento dos edifícios, durante o verão. Além disso, tem-se o aproveitamento dos fluxos dos ventos, de forma a aumentar sua velocidade e permeabilidade, o que contribui para a melhora do conforto térmico ao ar livre, do uso da ventilação passiva dos edifícios, assim como auxilia na dispersão dos poluentes (Givoni, 1998; Ali-Toudert; Mayer, 2007). As três estratégias influenciam de forma direta no SEB do cânion urbano.

A.1.2 Estratégias a Respeito do Albedo nos Materiais de Superfície

As estratégias a respeito do albedo partem do pressuposto de que a adoção de materiais de superfície adequados pode condicionar a mitigação das ICU (Akbari; Menon; Rosenfeld, 2009; Santamouris; Synnefa; Karlessi, 2011; Santamouris et al., 2017; Lee; Mayer, 2018). A partir dos estudos levantados, observou-se que as estratégias se concentram na análise da aplicação de diferentes materiais de superfície nas seguintes faces: no solo, fachadas e telhado.

Estabelecer um valor de albedo adequado parte, inicialmente, do seu objetivo: favorecer o conforto térmico no interior da edificação ou o conforto térmico ao ar livre. Além disso, é imprescindível considerar o tipo de clima da região, visto que o desempenho térmico de determinada geometria urbana em cidade de clima frio difere da mesma geometria em realidade de clima quente (Huang; Chen, 2020). Nesse contexto, os estudos de Darbani et al. (2021) apontaram que em cânions urbanos em cidade de clima quente e seco é mais indicado o uso de materiais de baixo albedo no solo e fachadas, pois materiais com superfície de albedo mais alto refletem a radiação solar recebida, assim, mais radiação é percebida, aumentando também a TRM. Além disso, é preciso considerar o desconforto por ofuscamento, percebido pelos pedestres, em função dos materiais de alto albedo no solo e nas fachadas. Esses efeitos também foram observados por Farhadi, Faizi e Sanaieian (2019), Teerã, no Irã.

No telhado, a adoção de materiais de alta refletividade ou materiais “frios” tem maior potencial de beneficiar o conforto térmico no interior da edificação, em função da capacidade da superfície de refletir uma parte da radiação solar incidente, o que reduz o aquecimento da superfície. Farhadi, Faizi e Sanaieian (2019), afirmaram que em decorrência do uso de materiais frios no telhado pode ocorrer a redução no consumo de energia do edifício durante o verão. No que tange o conforto térmico no interior do cânion urbano, a nível do pedestre, a adoção de materiais frios no telhado tem menor impacto. Na pesquisa de Kotharkar, Bagade e Singh (2020), a redução na temperatura foi próxima de 0,3°C.

A.1.3 Estratégias a Respeito do Uso de Vegetação

A vegetação apresenta diversos benefícios para a mitigação das ICU, como: a diminuição da temperatura de superfície e a TRM, por meio do sombreamento gerado por suas copas; a diminuição da temperatura do ar e o aumento umidade relativa do ar, através da

evapotranspiração; a diminuição do efeito *smog* fotoquímico⁷⁴ e poluição do ar, a partir da redução do CO₂, em função do seu processo natural de fotossíntese; e a diminuição da velocidade dos ventos, por servir como barreira ao fluxo de ar (Shashua-Bar, Hoffman, 2000; Feng et al., 2009; Lee et al., 2009; Shashua-Bar; Erell; Pearlmutter, 2011; Yahia et al., 2017; Ojaghlou; Khakzand, 2019). A densidades das árvores pode ser expressa por dois fatores: Índice de Área Foliar (Leaf Area Index - LAI) e Densidade de Área Foliar (Leaf Area Density - LAD) (Meir; Grace; Miranda, 2000).

O uso da vegetação como estratégia para mitigação das ICU em espaços urbanos pode ser por meio de: parques (Tsilini et al., 2015; Liu; Zheng; Zhao, 2018; Huang; Chen, 2020; Kotharkar; Bagade; Singh, 2020), árvores nas ruas ou passeios (Ambrosini et al., 2014; Sodoudi et al., 2018; Ma et al., 2019; Liu; Zheng; Yang, 2023; Souza et al., 2024), telhados verdes (Razzaghmanesh; Beecham; Salem, 2016) e paredes verdes (Galagoda et al., 2018). Na escala do cânion urbano, o parque não se enquadra, então será desconsiderado. O telhado verde ameniza os efeitos das ICU (Santamouris, 2014), todavia, seus efeitos tem maior impacto no interior das edificações, sendo pouco expressivos a nível do pedestre (Chen *et al.*, 2009; Taleghani; Sailor; Ban-Weiss, 2016; Farhadi; Faizi; Sanaieian, 2019; Ramyar et al., 2019). De acordo com a pesquisa de Huang e Chen (2020), a redução na temperatura do ar foi próxima de 0,2°C, desse modo, a adoção do telhado verde como estratégia bioclimática para conforto térmico ao ar livre na escala do pedestre em cânions urbanos também será desconsiderada.

Huang e Chen (2020) também observaram que o plantio de árvores nas ruas ou passeios tem o potencial de reduzir a velocidade dos ventos, em cerca de 0,1 m/s, o que auxilia em diminuir o efeito de canalização do fluxo de ar nas vias paralelas à incidência dos ventos, possibilitando a permeabilidade dos ventos nas vias perpendiculares. Aumentar a velocidade dos ventos em áreas de estagnação de ar tem o efeito positivo em reduzir o valor do PET, como mostrou a pesquisa de Yahia et al. (2017). Nesse contexto, vale destacar a importância da análise prévia das espécies de árvores, de acordo com: sua altura e área de copa, por gerar regiões de pressão positiva e negativa, o que altera a direção dos ventos (Ramyar et al., 2019); e seu valor de LAI, considerando as diferentes estações do ano, pelo potencial de aumentar a taxa de transpiração (Ng, 2009).

⁷⁴ O efeito *smog* fotoquímico é a poluição atmosférica, sobretudo em áreas urbanas, por ozônio e outros compostos originados por reações fotoquímicas, reações químicas causadas pela luz solar (LEMOS, 2010).

Ao estudar os efeitos do desenho urbano no microclima e conforto térmico ao ar livre em Dar es Salaam/Tanzânia, cidade de clima tropical de savana, Yahia et al. (2017) observaram uma redução no PET em até 14°C, durante o dia, em espaços com presença de vegetação. As árvores oferecem melhores condições térmicas aos pedestres nos cânions urbanos, em função do sombreamento, que gera a diminuição da exposição à radiação solar direta nas ruas e passeios, onde é comum o uso de materiais de baixo albedo (Yahia et al., 2017). Com relação a temperatura do ar, Ramyar et al. (2019) observaram uma diferença de até 2°C, pela manhã, e até 4°C, pela tarde, pelo acréscimo de vegetação nas vias de Teerã, no Irã. Esses resultados estão de acordo com Darbani et al. (2021) e Farhadi, Faizi e Sanaieian (2019). Srivanit e Jareemit (2020) analisaram a influência da presença de árvores nos passeios e a distância entre ela, a 4 m, 6m e 14 m. Como resultado, puderam observar que, áreas sem árvores e áreas com árvores com distância de 4 m apresentam uma diferença na TRM de até 23°C. O espaçamento deve ser quantificado com relação a área de copa das árvores, de forma a não haver áreas sem sombreamento no caminho do pedestre.

Com relação ao conforto térmico ao ar livre em cânions urbanos, na escala do pedestre, a distribuição de árvores altas e de copas densas, ao longo das vias ou passeios, é uma estratégia mais eficaz do que alocar a vegetação em um ponto único, como é o caso dos parques (Chatterjee et al., 2019; Kotharkar; Bagade; Singh, 2020). Fahmy et al. (2010), apontaram a importância da análise do LAI, em que o LAI de copa de árvore igual a 1 intercepta, aproximadamente, metade da radiação direta de ondas curtas, ao passo que um LAI igual a 4, pode interceptar 100% da radiação, reduzindo o TRM em 7°C e o PET em 4°C.

As fachadas verdes, também conhecidas como jardim vertical, parede verde, paisagismo vertical ou sistema de *greening* vertical (*Vertical Greening Systems – VGS*) são plantas, podendo ser de diferentes espécies, cultivadas em superfícies verticais em paredes internas ou externas de edificações (Perini et al., 2011; Safikhani et al., 2014). O VGS auxilia na mitigação das ICU, redução da temperatura, controle de poeira e poluição, atenuação de ruído, redução no consumo de energia e promoção da saúde humana; tornando-o uma estratégia eficaz nos períodos de verão e inverno, condicionando condições térmicas mais favoráveis ao microclima (Manso; Castro-Gomes, 2014). No interior do cânion, a nível do pedestre, a influência do VGS é geralmente medida na parede, a 10 cm de distância e a 1 m de distância. Em cidades de clima semiárido, o efeito do VGS na parede gera uma diferença de até 8°C na temperatura do ar, a 10 cm de distância gera uma diferença de até 1,37°C e a 1 m de distância, de até 0,61°C, segundo estudo de Galagoda et al. (2018) para Colombo, região metropolitana na costa oeste do Sri

Lanka. Um ganho importante seria no aumento da umidade relativa do ar durante o dia, devido a evapotranspiração e substrato úmido das plantas (Chen; Li; Liu, 2013).

A.2 Conclusões

Com base na Revisão Sistemática de Literatura foi possível observar quais os pontos relevantes, na literatura mais recente, no que tange a adequação da forma urbana ao tipo de clima semiárido. A geometria urbana pode ser tratada por meio da relação H/W, FCV e a orientação das vias. O adequado uso dos materiais de superfície no solo, fachadas e telhado tem o potencial de amenizar as ICU, assim como diminuir a temperatura no interior das edificações, o que reduz o consumo de energia em recursos artificiais de climatização. Assim, é preciso ponderar o valor do albedo dos materiais para beneficiar o conforto térmico externo e interno às edificações. O uso de vegetação tem sido amplamente estudado pelo seu potencial de gerar áreas sombreadas (diminuindo a TRM e a temperatura do ar), aumentar a umidade relativa do ar e diminuir a poluição do ar. Além disso, o uso de vegetação nas vias ou passeios urbanos pode somar às estratégias a respeito da geometria urbana, especialmente no FCV, a partir do limite em que a relação H/W prejudicar o aproveitamento da ventilação natural.

Diante da condição climática de Arapiraca/AL, do potencial de compor diretrizes urbanísticas sustentáveis que irão nortear o seu crescimento vertical, da lacuna de conhecimento existente sobre o impacto da verticalização no microclima e no conforto térmico da cidade, a presente pesquisa visou abordar a influência da **geometria urbana** e do **uso de vegetação** no microclima de cânions urbanos, na escala do pedestre, com base no **PET**, **TRM**, **umidade relativa do ar**, e **velocidade e direção dos ventos**.

APÊNDICE D - Quadros com levantamento das calibrações do índice PET

Sensações térmicas e a classificação do PET (°C) para diferentes cidades.

Sensação Térmica	Europa Central Matzarakis e Mayer (1996)	Sun Moon Lake, Taiwan Lin e Matzarakis (2008)	São Paulo/ SP, Brasil Monteiro e Alucci (2006)	Belo Horizonte/MG, Brasil Hirashima et al. (2018)	Curitiba/PR, Brasil Krüger et al. (2018)
Muito Frio	< 4	< 14	< 3	-	-
Frio	4-8	14-18	3-10	< 12	-
Fresco	8-13	18-22	10-17	13-15	-
Ligeiramente Fresco	13-18	22-26	-	-	-
Confortável	18-23	26-30	17-26	16-30	13
Ligeiramente Calor	23-29	30-34	-	-	13-25
Calor	29-35	34-38	26-34	31	25-37
Quente	35-41	38-42	34-43	32-35	-
Muito Quente	> 41	> 42	> 43	< 36	-

Fonte: Elaborado pela Autora.

Sensações térmicas e a classificação do PET (°C) para diferentes cidades.

Sensação Térmica	Rio de Janeiro/RJ, Brasil Rossi et al. (2017)	Vitória/ES, Brasil Silva e Alvarez (2015)	Campo Grande/MS, Brasil Lucchese et al. (2016)	Salvador/BA, Brasil Andrade et al (2016)
Muito Frio	-	-	< 11	-
Frio	-	18-20	11-15	-
Fresco	-	-	-	-
Ligeiramente Fresco	-	20-22	15-21	-
Confortável	-	22-30	21-27	26,8
Ligeiramente Calor	22	30-34	27-32	-
Calor	22-36	-	-	26,8-29,4
Quente	36-49	34-46	> 32	29,4-34,1
Muito Quente	-	> 46	-	> 34,1

Fonte: Elaborado pela Autora.

APÊNDICE E - Resultados das simulações computacionais dos cenários urbanos hipotéticos

TEMPERATURA DO AR

Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Via Principal - Temperatura do Ar.

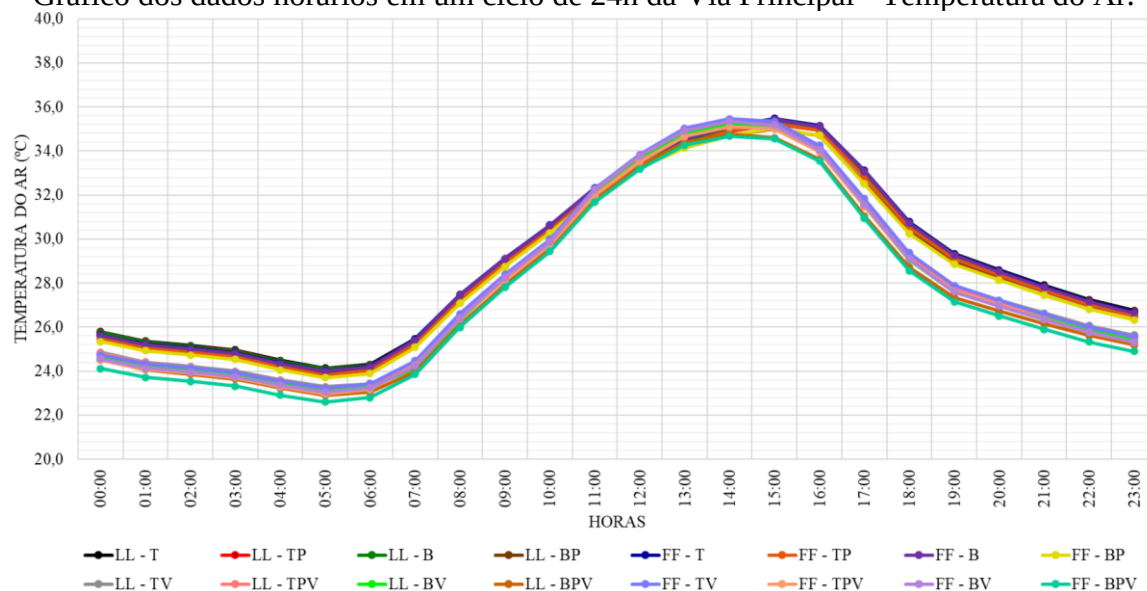


Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Via Secundária - Temperatura do Ar.

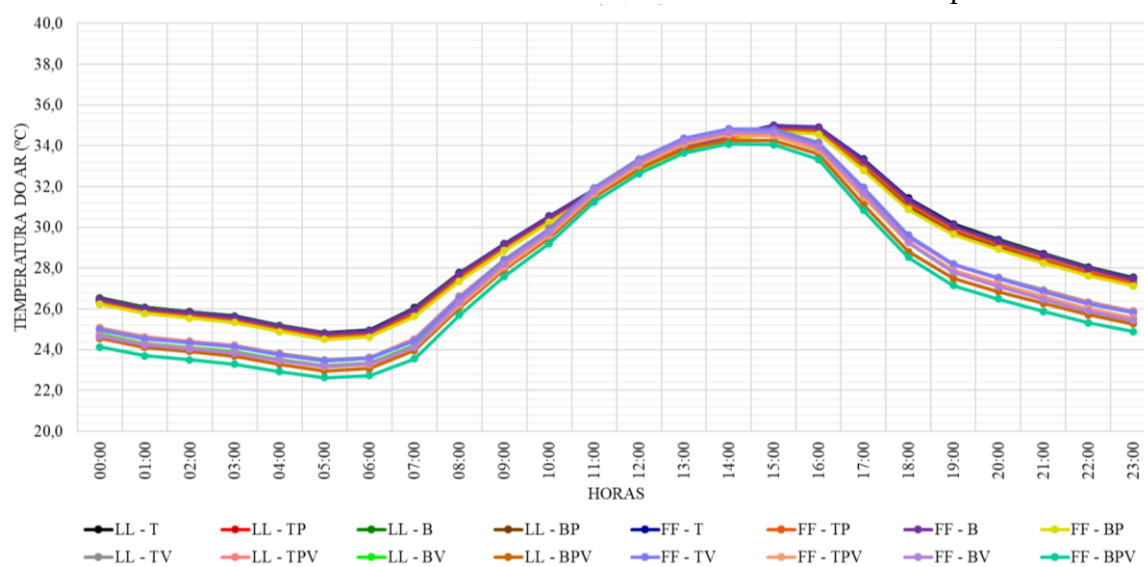
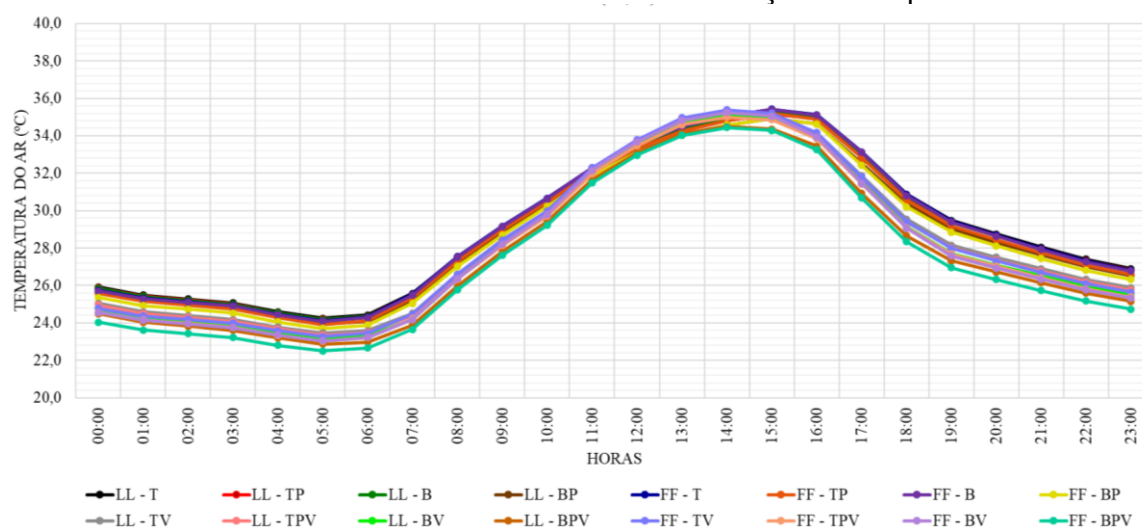


Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Calçada - Temperatura do Ar.



Estatísticas Descritivas da Via Principal - Temperatura do Ar.

Cenários	T. Média (°C)	Desvio Padrão	Mínimo (°C)	Máximo (°C)
LL-T	29,00	3,85	24,13	35,33
LL-TP	28,92	3,82	24,08	35,22
LL-B	28,95	3,86	24,09	35,30
LL-BP	28,72	3,80	23,92	35,01
FF-T	28,99	3,94	24,01	35,47
FF-TP	28,79	3,92	23,83	35,26
FF-B	28,96	3,93	23,99	35,43
FF-BP	28,60	3,89	23,70	35,05
LL-TV	28,20	4,19	23,29	35,33
LL-TPV	28,11	4,15	23,23	35,16
LL-BV	28,03	4,22	23,13	35,23
LL-BPV	27,75	4,13	22,90	34,77
FF-TV	28,23	4,25	23,23	35,46
FF-TPV	27,96	4,21	22,96	35,09
FF-BV	28,04	4,28	23,06	35,35
FF-BPV	27,56	4,21	22,59	34,68
Diferença entre o valor máximo e mínimo	1,44	0,48	1,54	0,79

Fonte: Elaborado pela Autora.

Estatísticas Descritivas da Via Secundaria - Temperatura do Ar.

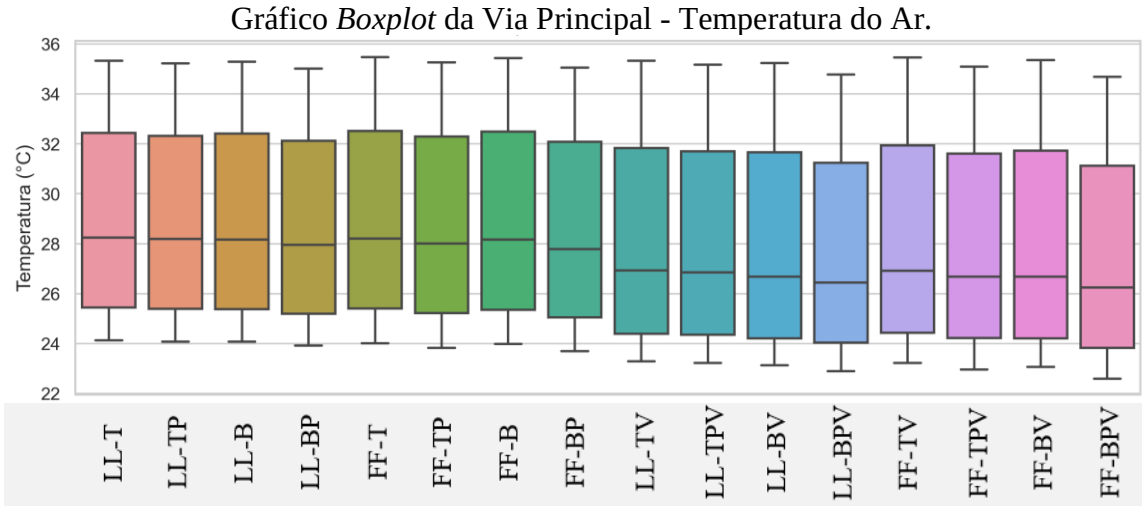
Cenários	T. Média (°C)	Desvio Padrão	Mínimo (°C)	Máximo (°C)
LL-T	29,35	3,44	24,82	34,97
LL-TP	29,29	3,42	24,79	34,90
LL-B	29,33	3,43	24,81	34,94
LL-BP	29,11	3,41	24,65	34,74
FF-T	29,33	3,46	24,79	35,00
FF-TP	29,16	3,47	24,63	34,87
FF-B	29,31	3,45	24,79	34,96
FF-BP	28,99	3,45	24,52	34,70
LL-TV	28,28	3,97	23,50	34,82
LL-TPV	28,21	3,93	23,46	34,69
LL-BV	28,02	4,04	23,22	34,67
LL-BPV	27,70	3,96	22,96	34,27
FF-TV	28,22	3,99	23,46	34,82
FF-TPV	27,93	3,98	23,16	34,53
FF-BV	27,97	4,06	23,20	34,68
FF-BPV	27,38	4,03	22,63	34,09
Diferença entre o valor máximo e mínimo	1,97	0,65	2,19	0,88

Fonte: Elaborado pela Autora.

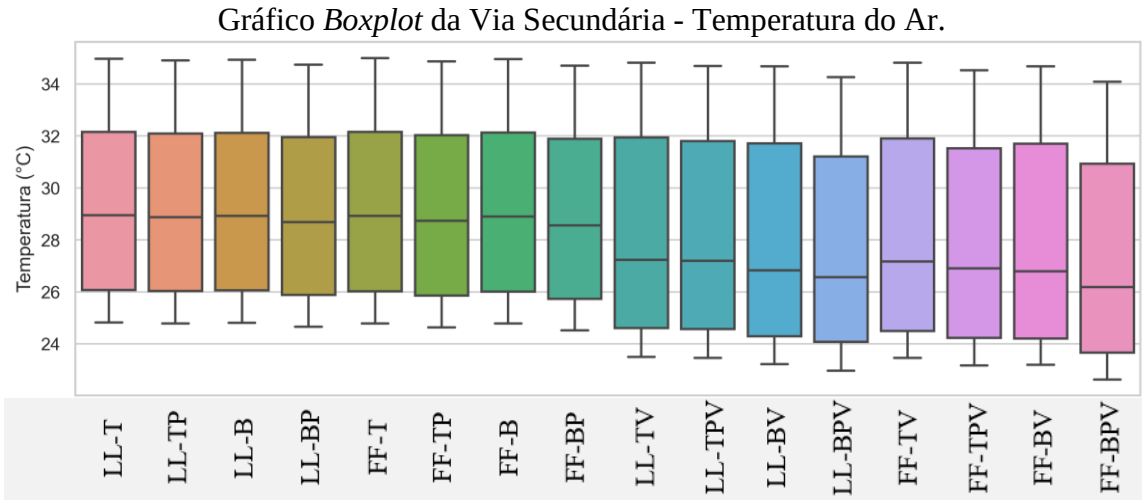
Estatísticas Descritivas da Calçada - Temperatura do Ar.

Cenários	T. Média (°C)	Desvio Padrão	Mínimo (°C)	Máximo (°C)
LL-T	29,07	3,79	24,24	35,30
LL-TP	28,98	3,76	24,18	35,17
LL-B	29,01	3,82	24,18	35,28
LL-BP	28,71	3,75	23,95	34,92
FF-T	29,04	3,88	24,10	35,42
FF-TP	28,82	3,86	23,92	35,19
FF-B	29,01	3,88	24,08	35,40
FF-BP	28,56	3,84	23,70	34,94
LL-TV	28,33	4,09	23,46	35,22
LL-TPV	28,20	4,05	23,36	35,01
LL-BV	28,07	4,16	23,18	35,13
LL-BPV	27,66	4,05	22,86	34,50
FF-TV	28,24	4,20	23,27	35,38
FF-TPV	27,96	4,16	23,03	35,01
FF-BV	28,00	4,24	23,05	35,24
FF-BPV	27,37	4,16	22,50	34,44
Diferença entre o valor máximo e mínimo	1,7	0,49	1,74	0,98

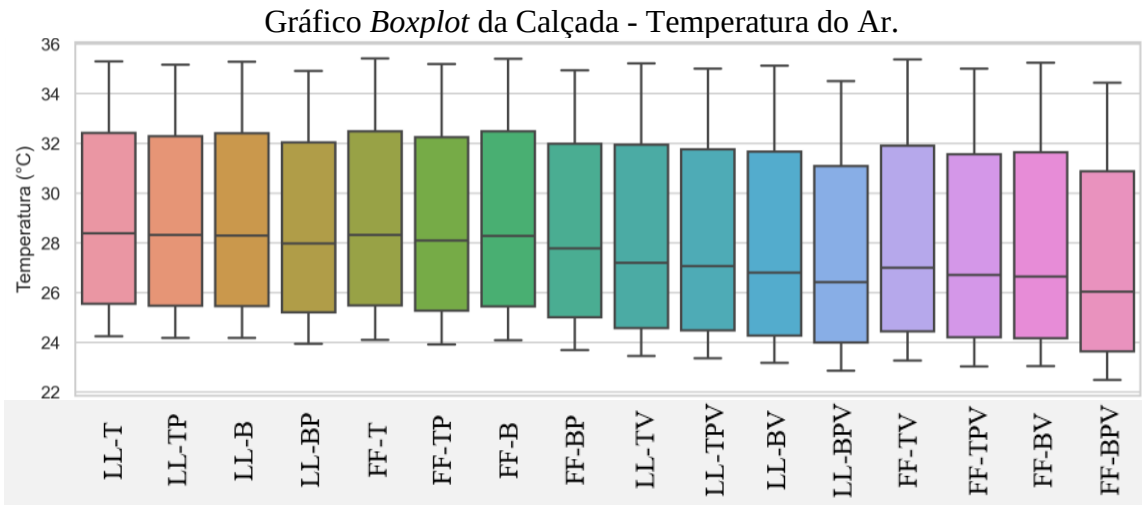
Fonte: Elaborado pela Autora.



Fonte: Elaborado pela Autora.

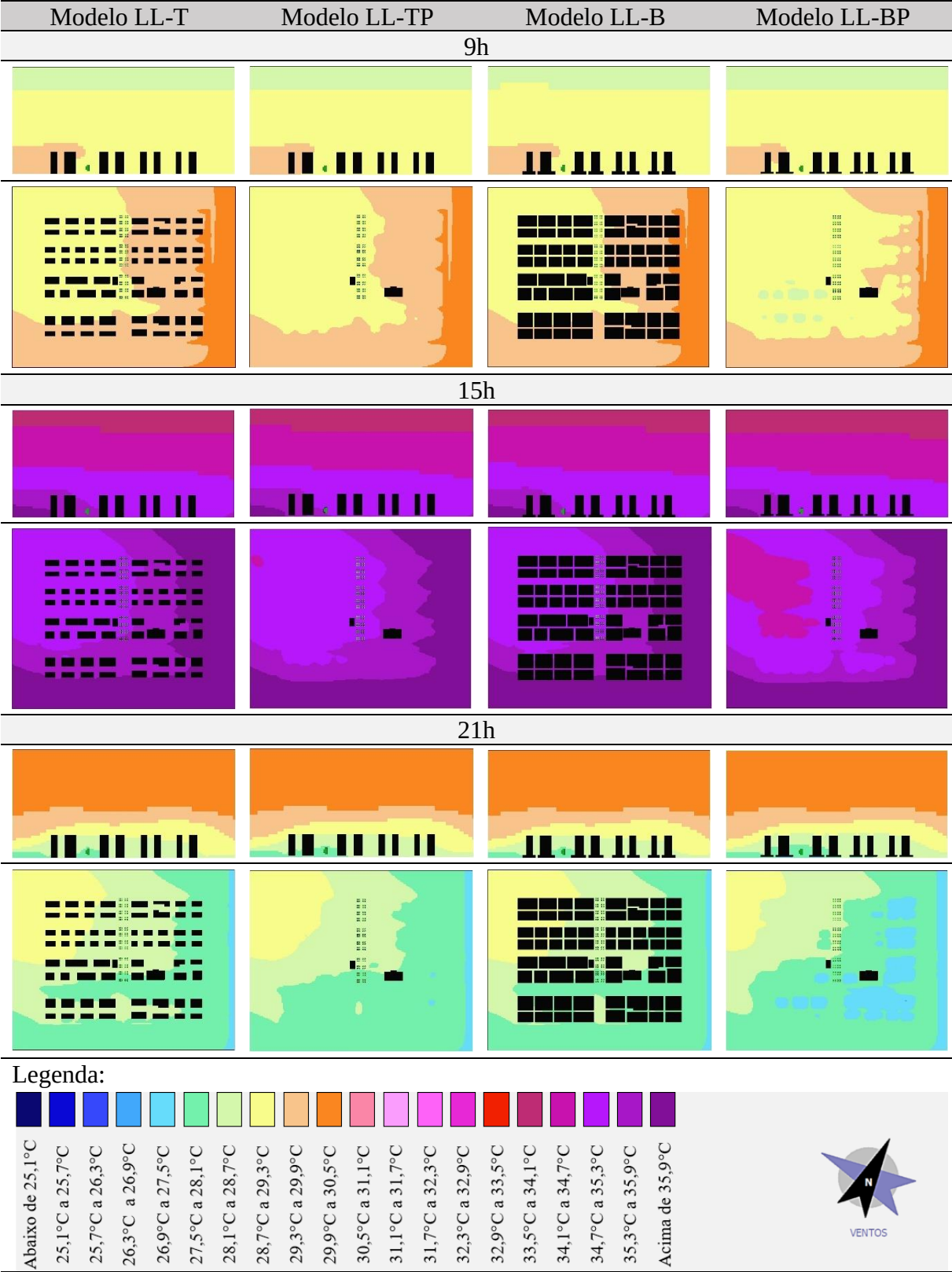


Fonte: Elaborado pela Autora.



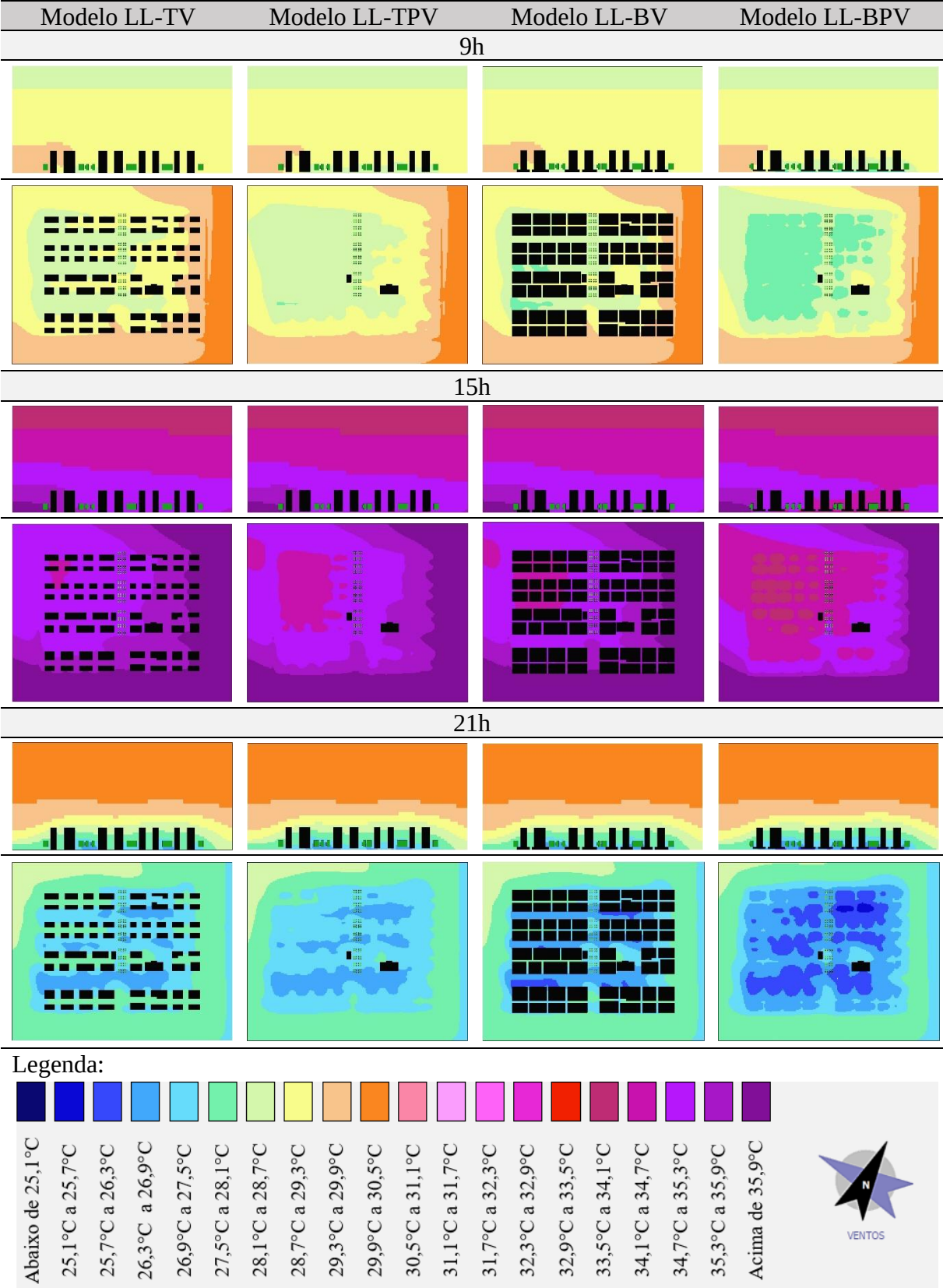
Fonte: Elaborado pela Autora.

Perfis e Mapas 2D dos dados de temperatura do ar dos modelos com rememramento tipo LL, na altura do pedestre (1,5m), para o período quente e seco.



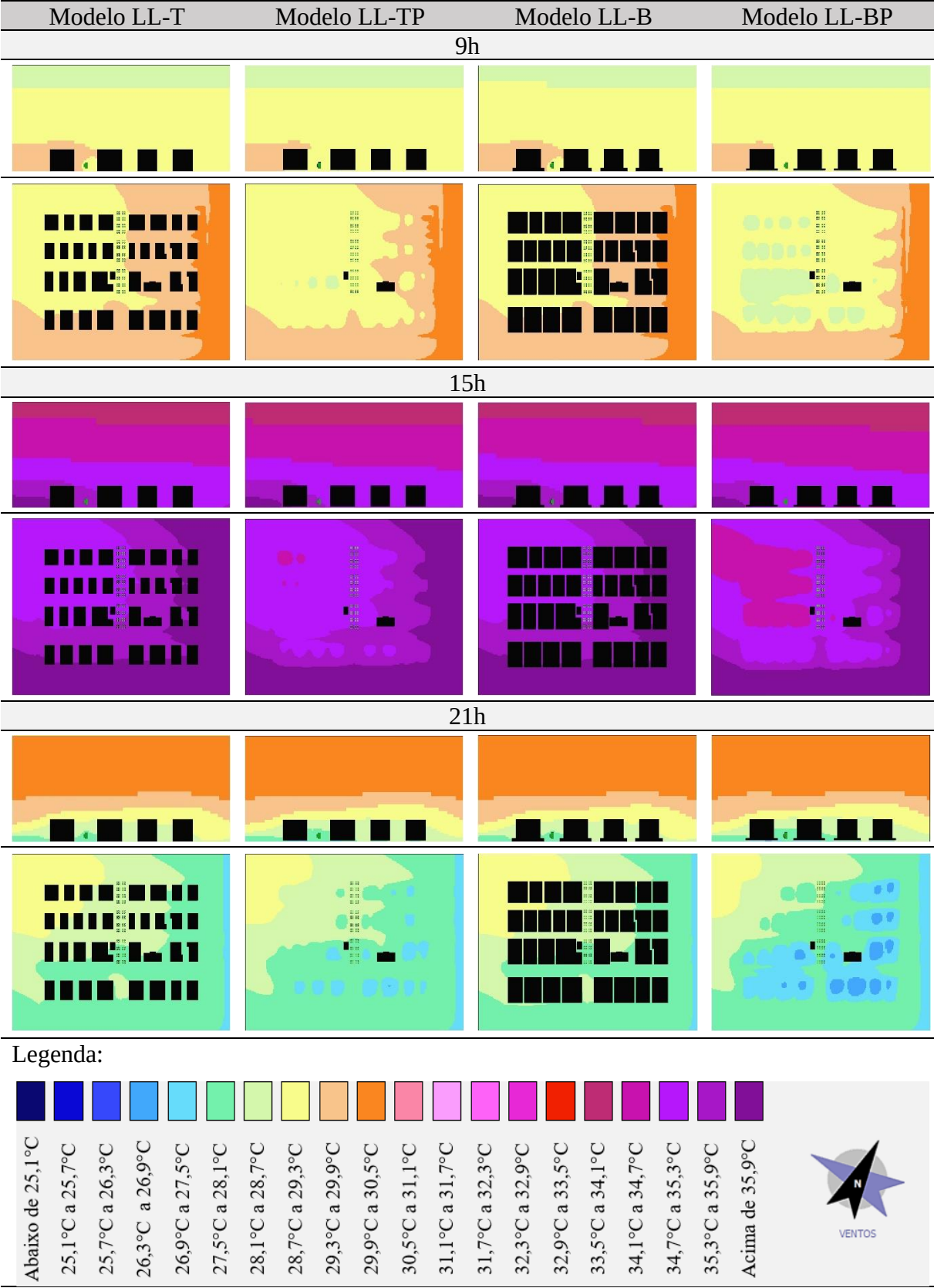
Fonte: Elaborado pela Autora.

Perfis e Mapas 2D dos dados de temperatura do ar dos modelos com rememramento tipo LL-V, na altura do pedestre (1,5m), para o período quente e seco.



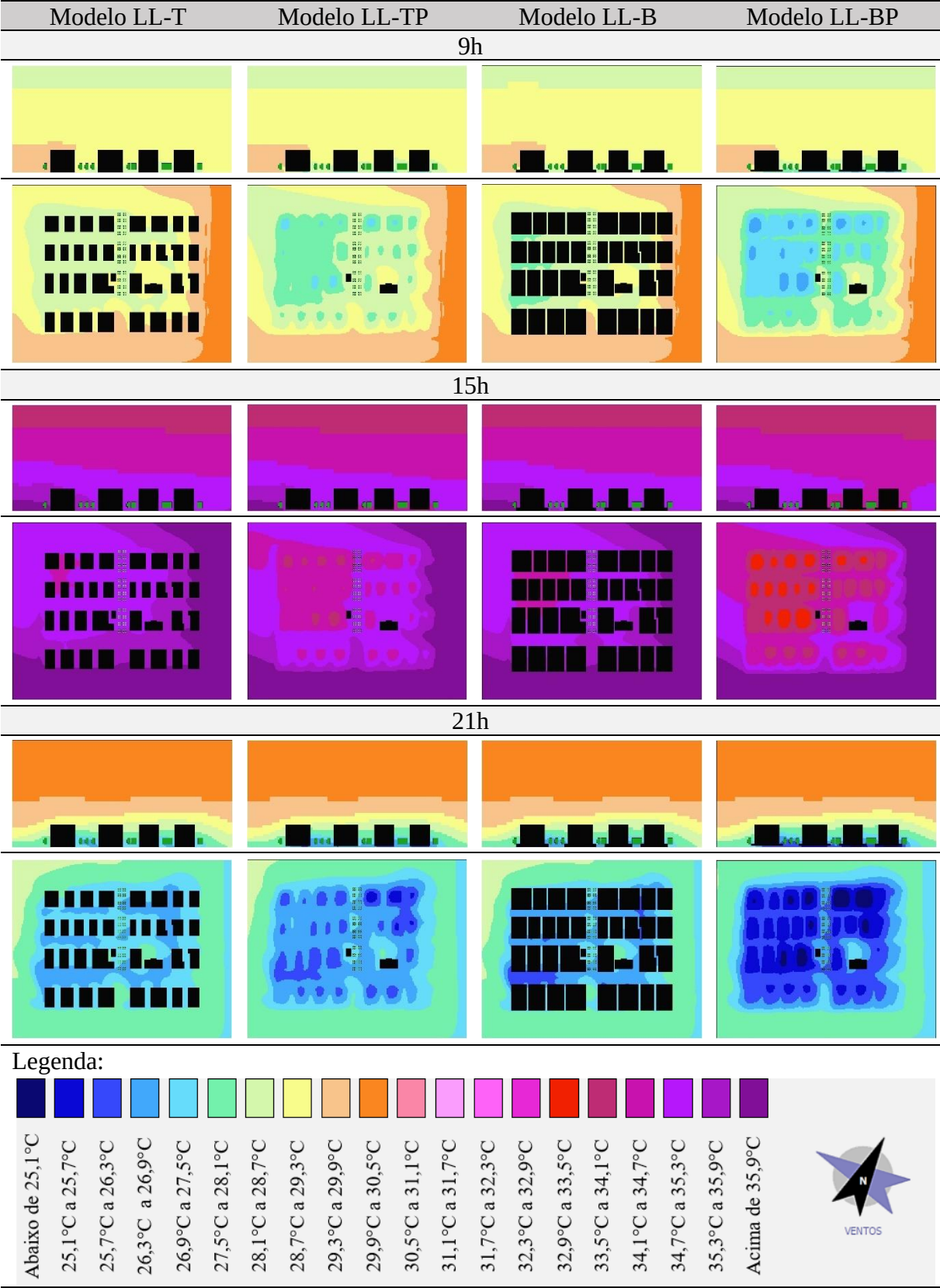
Fonte: Elaborado pela Autora.

Perfis e Mapas 2D dos dados de temperatura do ar dos modelos com remembramento tipo FF, na altura do pedestre (1,5m), para o período quente e seco.



Fonte: Elaborado pela Autora.

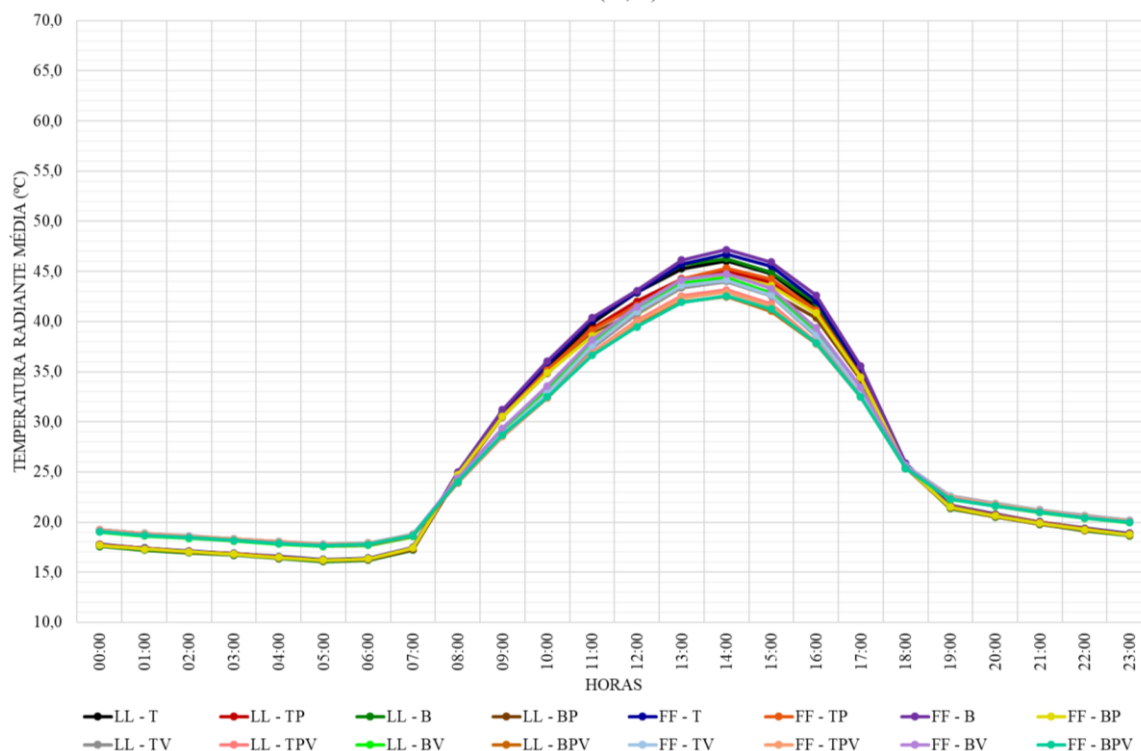
Perfis e Mapas 2D dos dados de temperatura do ar dos modelos com remembramento tipo FF-V, na altura do pedestre (1,5m), para o período quente e seco.



Fonte: Elaborado pela Autora.

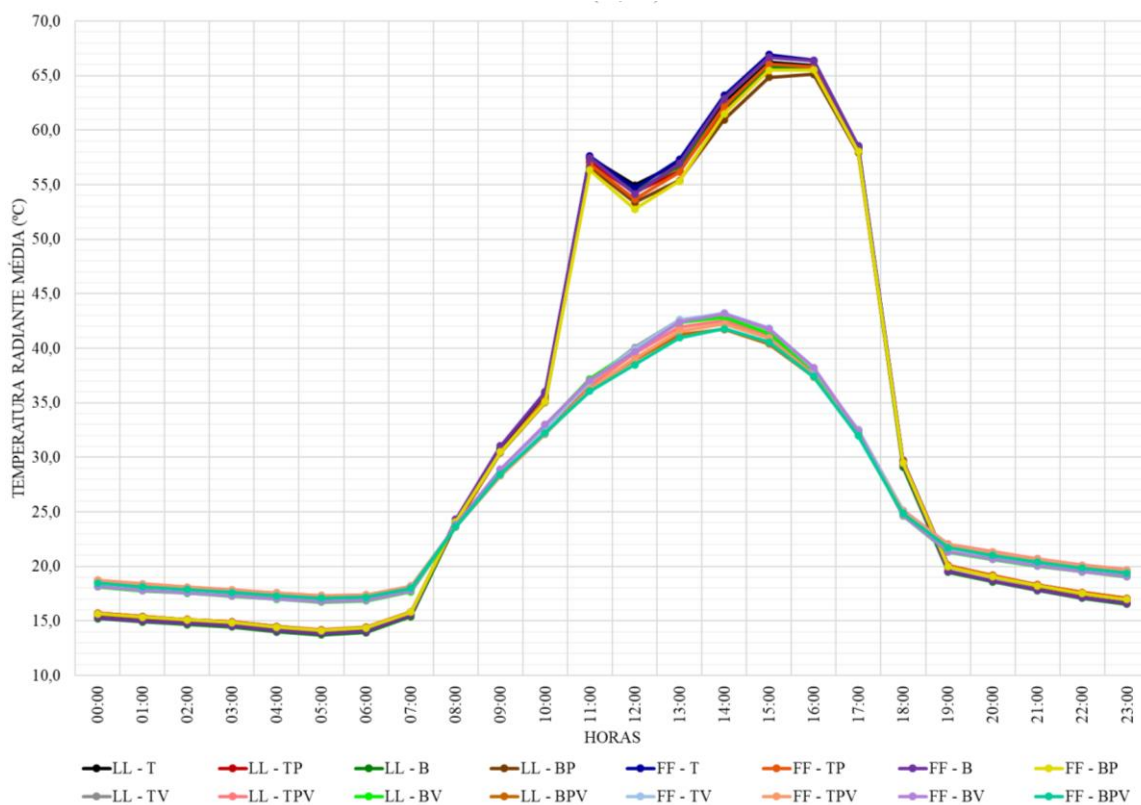
TRM

Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Via Principal - TRM.



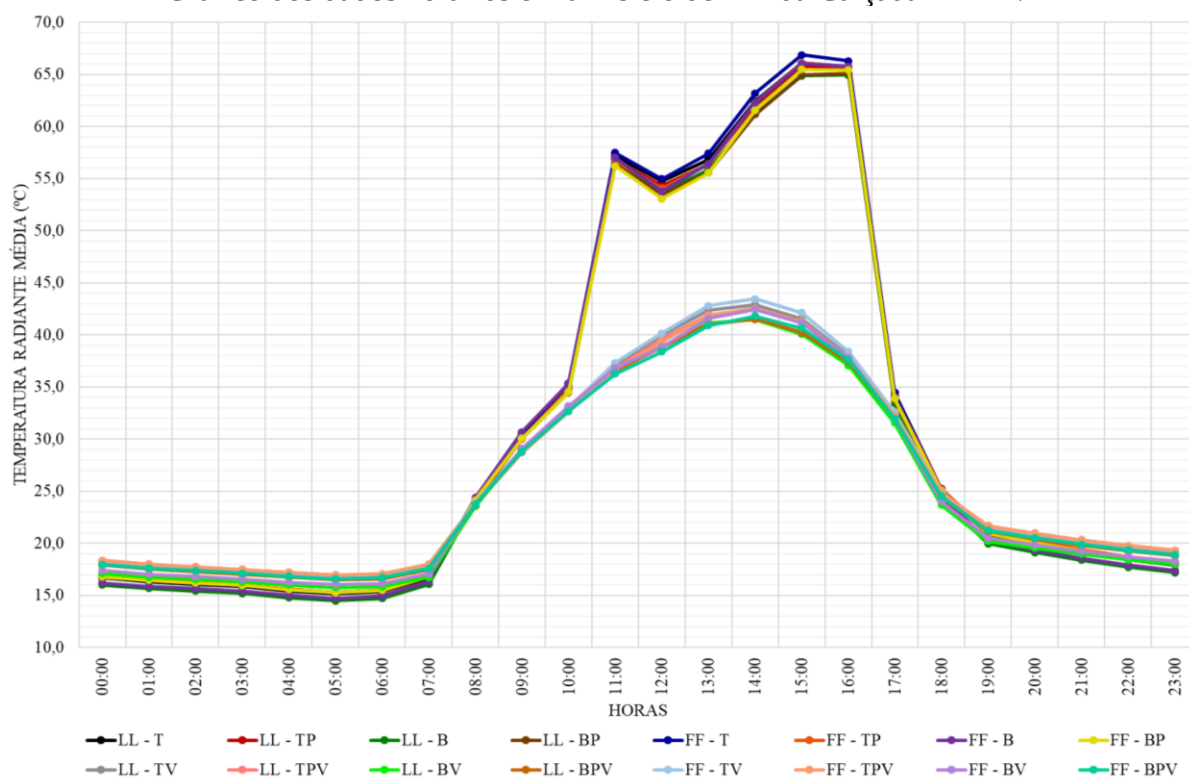
Fonte: Elaborado pela Autora.

Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Via Secundária - TRM.



Fonte: Elaborado pela Autora.

Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Calçada - TRM.



Estatísticas Descritivas da Via Principal - TRM.

Cenários	TRM Média (°C)	Desvio Padrão	Mínimo (°C)	Máximo (°C)
LL-T	26,97	11,14	16,21	46,02
LL-TP	26,73	10,79	16,22	45,07
LL-B	26,99	11,32	16,09	46,27
LL-BP	26,44	10,49	16,17	44,06
FF-T	27,17	11,31	16,27	46,71
FF-TP	26,76	10,81	16,22	45,33
FF-B	27,27	11,52	16,21	47,17
FF-BP	26,55	10,56	16,19	44,62
LL-TV	26,85	9,47	17,80	43,98
LL-TPV	26,63	9,18	17,80	43,16
LL-BV	26,90	9,78	17,57	44,37
LL-BPV	26,43	9,05	17,65	42,48
FF-TV	26,93	9,53	17,85	44,11
FF-TPV	26,57	9,12	17,79	42,94
FF-BV	27,06	9,88	17,67	44,76
FF-BPV	26,43	9,06	17,65	42,56

Fonte: Elaborado pela Autora.

Estatísticas Descritivas da Via Secundária - TRM.

Cenários	TRM Média (°C)	Desvio Padrão	Mínimo (°C)	Máximo (°C)
LL-T	31,38	19,89	14,06	66,24
LL-TP	31,27	19,64	14,16	65,72
LL-B	31,08	19,93	13,72	65,77
LL-BP	30,99	19,38	14,08	65,11
FF-T	31,54	20,02	14,15	66,93
FF-TP	31,28	19,64	14,19	66,05
FF-B	31,29	20,08	13,83	66,67
FF-BP	31,07	19,43	14,14	65,53
LL-TV	26,31	9,44	17,25	43,16
LL-TPV	26,20	9,19	17,33	42,54
LL-BV	25,99	9,62	16,73	42,83
LL-BPV	25,91	9,06	17,09	41,75
FF-TV	26,33	9,45	17,29	43,24
FF-TPV	26,07	9,07	17,31	42,26
FF-BV	26,05	9,65	16,79	43,16
FF-BPV	25,86	9,02	17,08	41,81

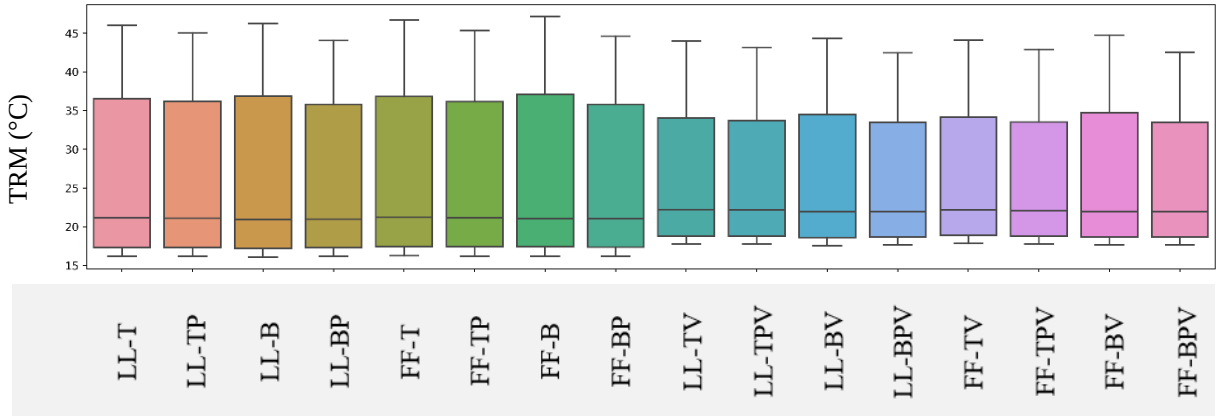
Fonte: Elaborado pela Autora.

Estatísticas Descritivas da Calçada - TRM.

Cenários	TRM Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
LL-T	30,63	18,60	15,12	66,07
LL-TP	30,62	18,38	15,30	65,77
LL-B	29,97	18,49	14,50	64,94
LL-BP	30,37	18,12	15,24	65,09
FF-T	30,89	18,78	15,22	66,86
FF-TP	30,66	18,41	15,29	66,08
FF-B	30,33	18,69	14,72	66,01
FF-BP	30,44	18,17	15,28	65,46
LL-TV	26,04	9,60	16,79	42,91
LL-TPV	26,04	9,38	16,96	42,51
LL-BV	25,10	9,65	15,74	41,48
LL-BPV	25,58	9,30	16,49	41,51
FF-TV	26,24	9,71	16,91	43,46
FF-TPV	26,03	9,35	16,97	42,56
FF-BV	25,44	9,75	16,04	42,46
FF-BPV	25,63	9,26	16,60	41,82

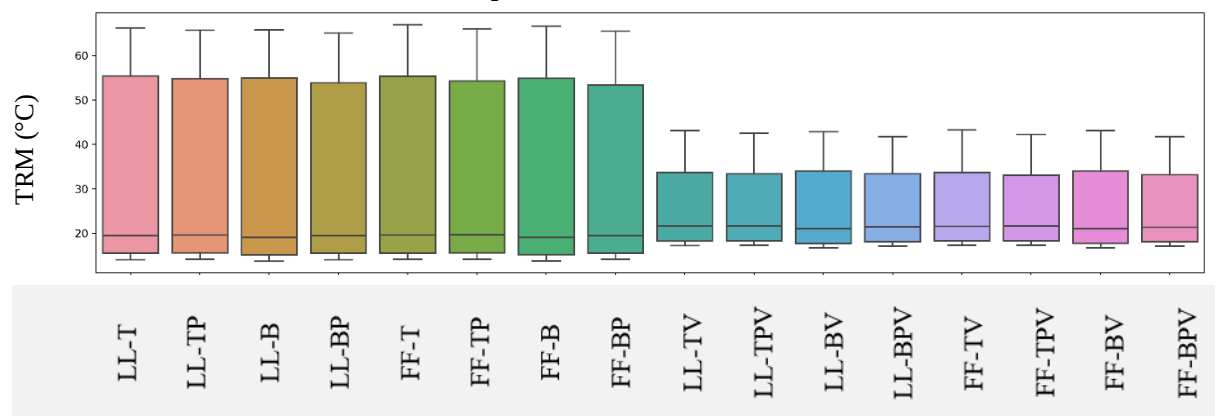
Fonte: Elaborado pela Autora.

Gráfico *Boxplot* da Via Principal - TRM.



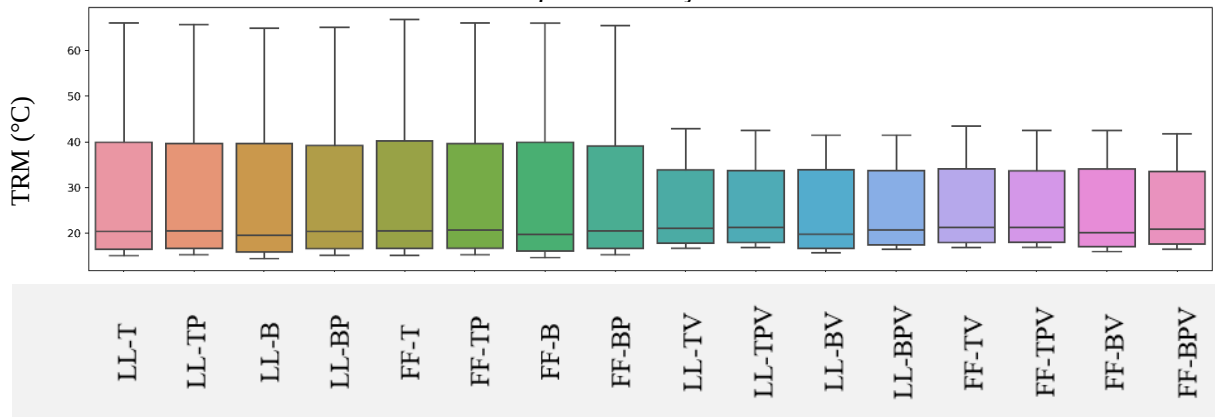
Fonte: Elaborado pela Autora.

Gráfico *Boxplot* da Via Secundária - TRM.



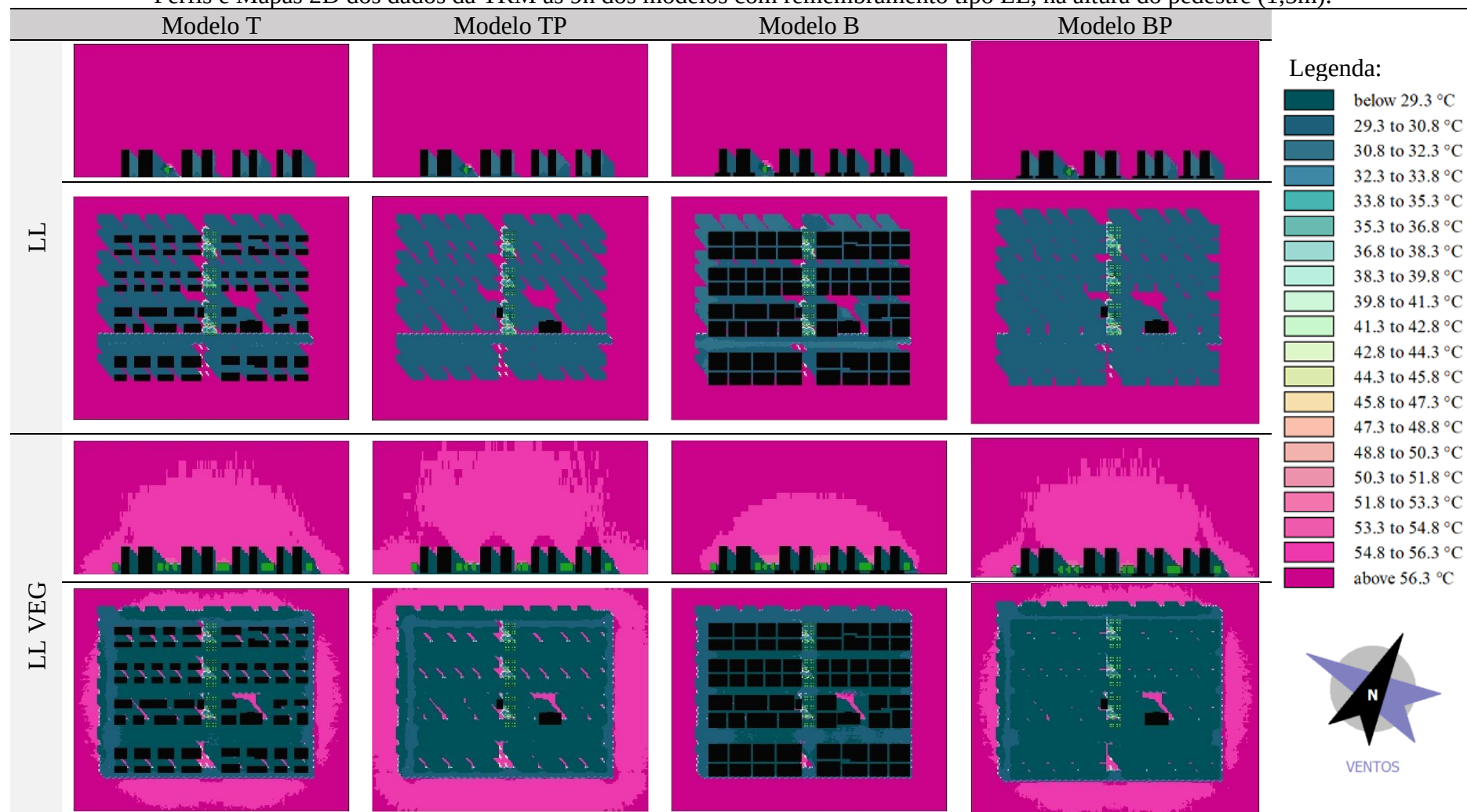
Fonte: Elaborado pela Autora.

Gráfico *Boxplot* da Calçada - TRM.



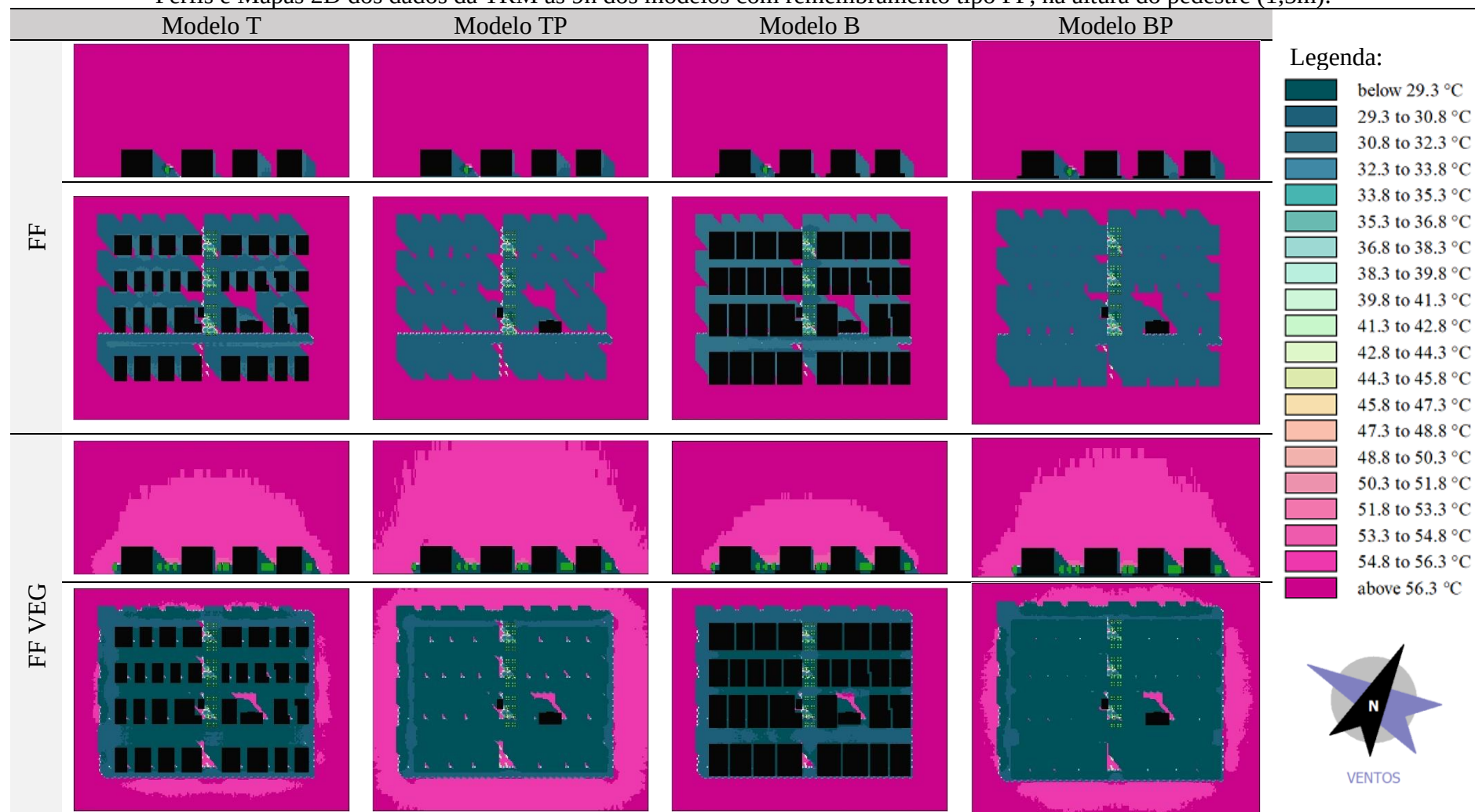
Fonte: Elaborado pela Autora.

Perfis e Mapas 2D dos dados da TRM às 9h dos modelos com remembramento tipo LL, na altura do pedestre (1,5m).



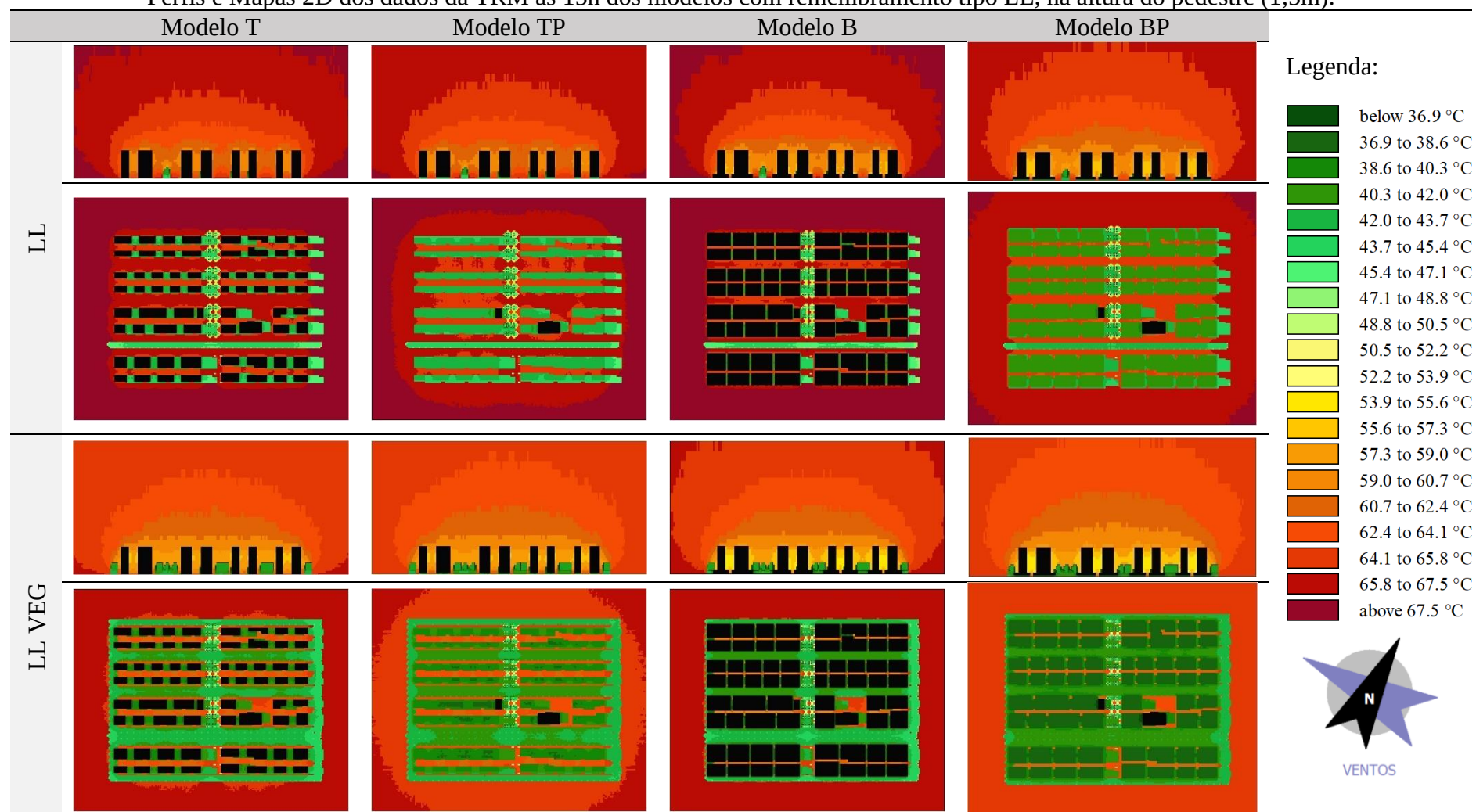
Fonte: Elaborado pela Autora.

Perfis e Mapas 2D dos dados da TRM às 9h dos modelos com rememoração tipo FF, na altura do pedestre (1,5m).



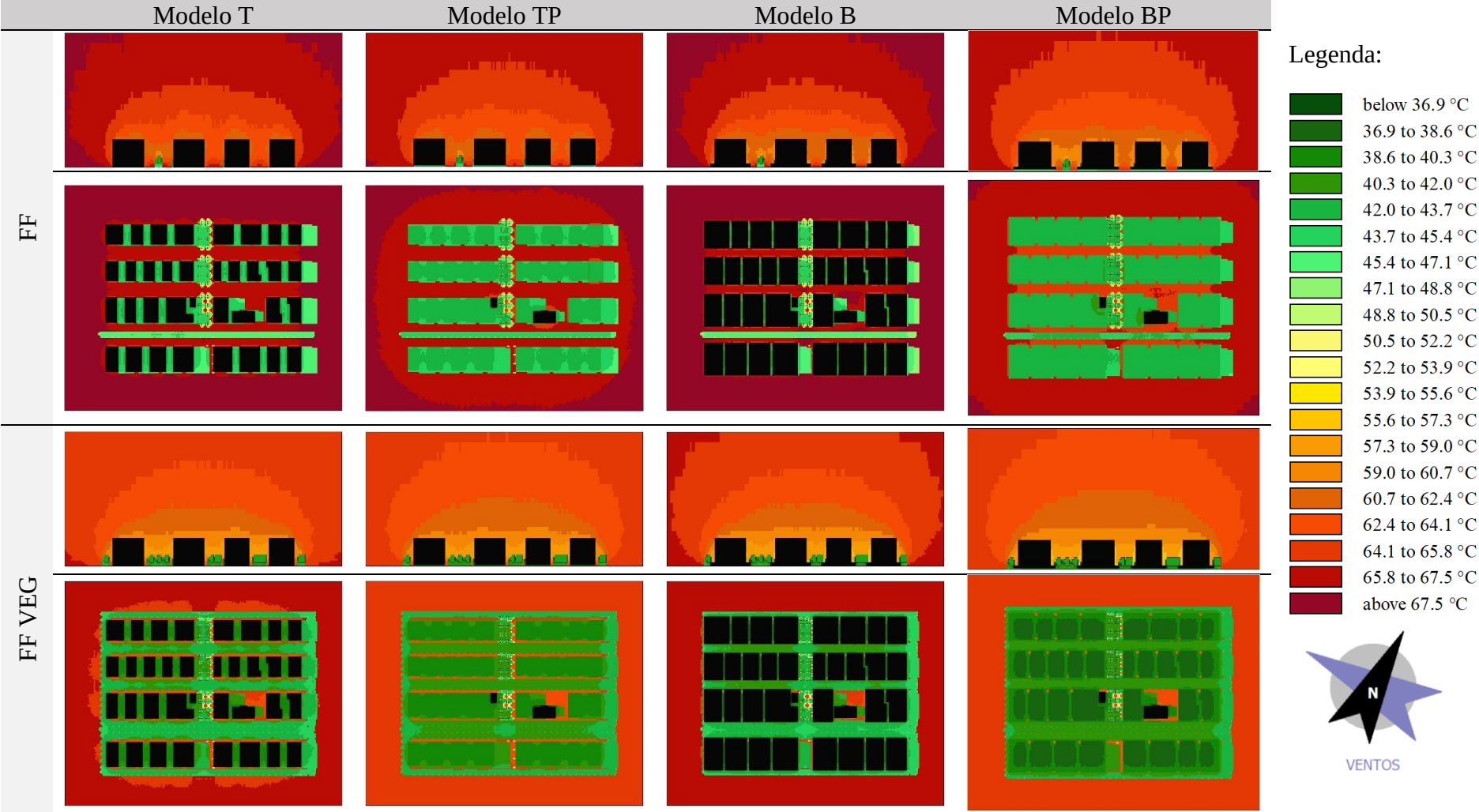
Fonte: Elaborado pela Autora.

Perfis e Mapas 2D dos dados da TRM às 15h dos modelos com remembramento tipo LL, na altura do pedestre (1,5m).



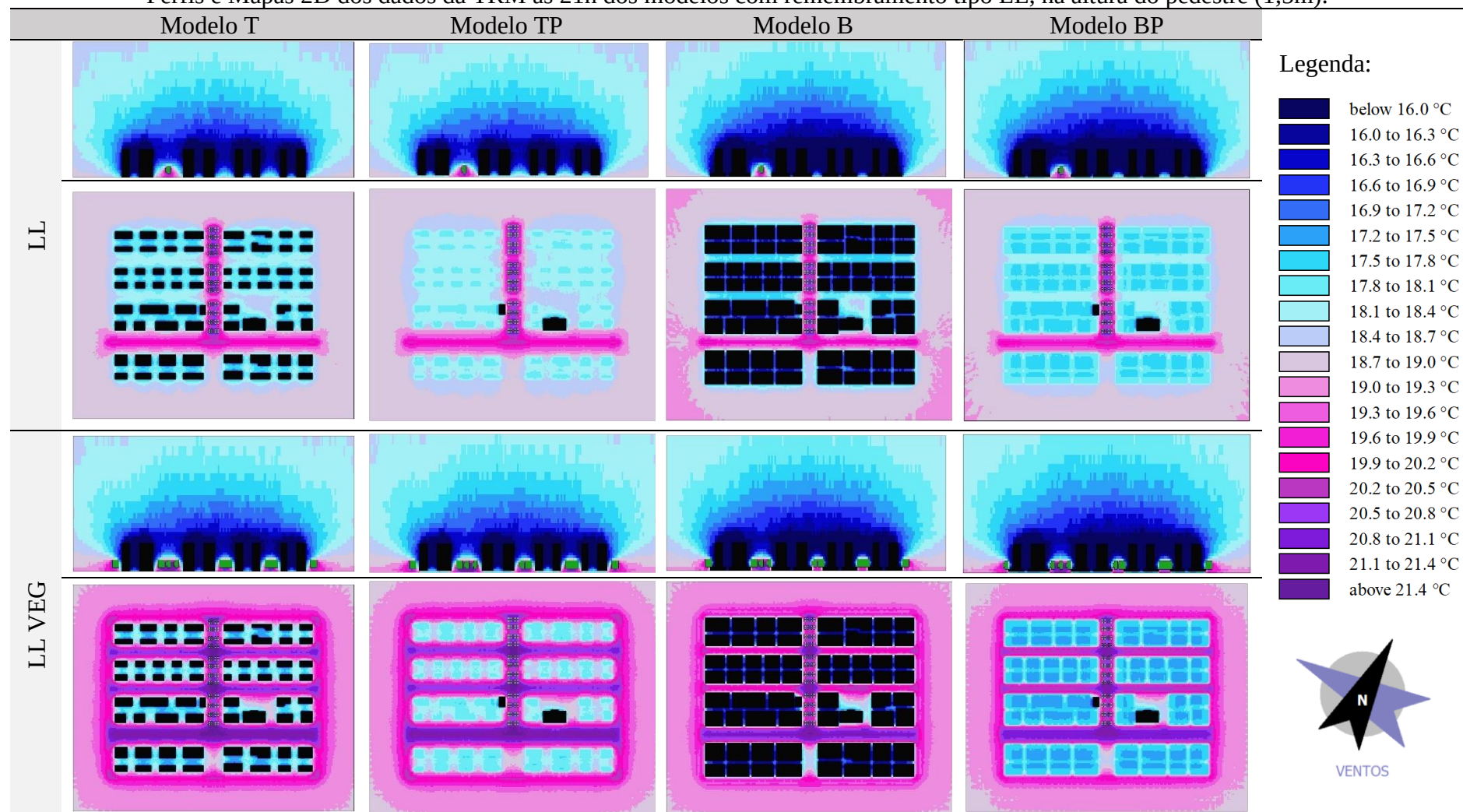
Fonte: Elaborado pela Autora.

Perfis e Mapas 2D dos dados da TRM às 15h dos modelos com remembramento tipo FF, na altura do pedestre (1,5m).



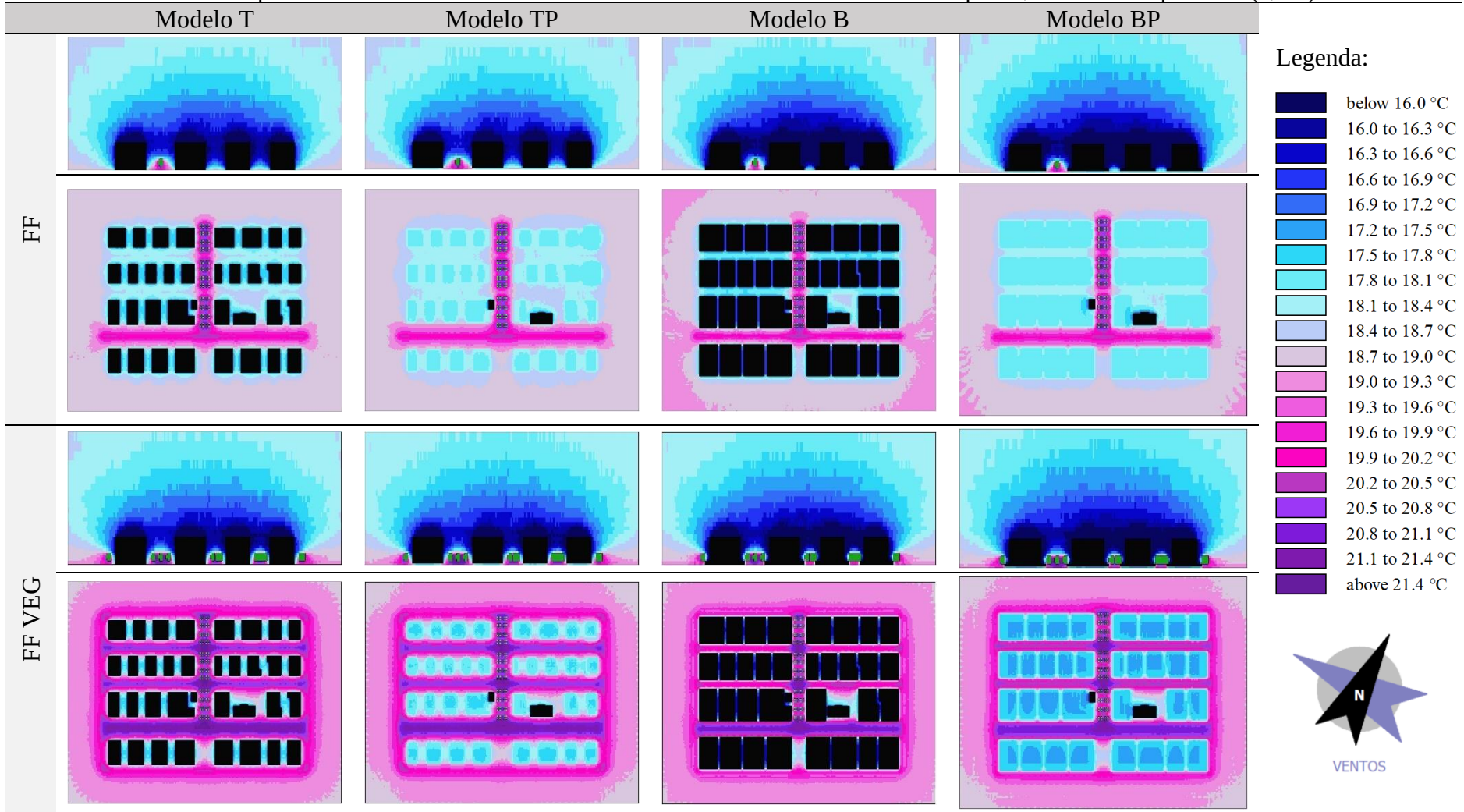
Fonte: Elaborado pela Autora.

Perfis e Mapas 2D dos dados da TRM às 21h dos modelos com remembramento tipo LL, na altura do pedestre (1,5m).



Fonte: Elaborado pela Autora.

Perfis e Mapas 2D dos dados da TRM às 21h dos modelos com remembramento tipo FF, na altura do pedestre (1,5m).



Fonte: Elaborado pela Autora.

UMIDADE RELATIVA DO AR

Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Via Principal – Umidade Relativa do Ar.

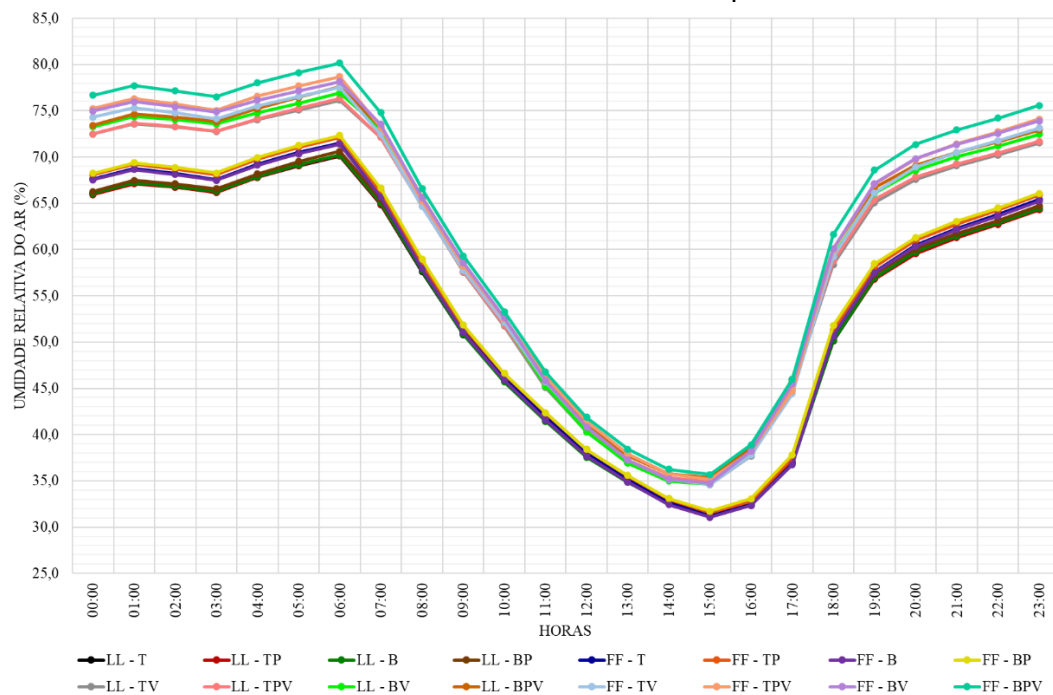


Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Via Secundária – Umidade Relativa do Ar.

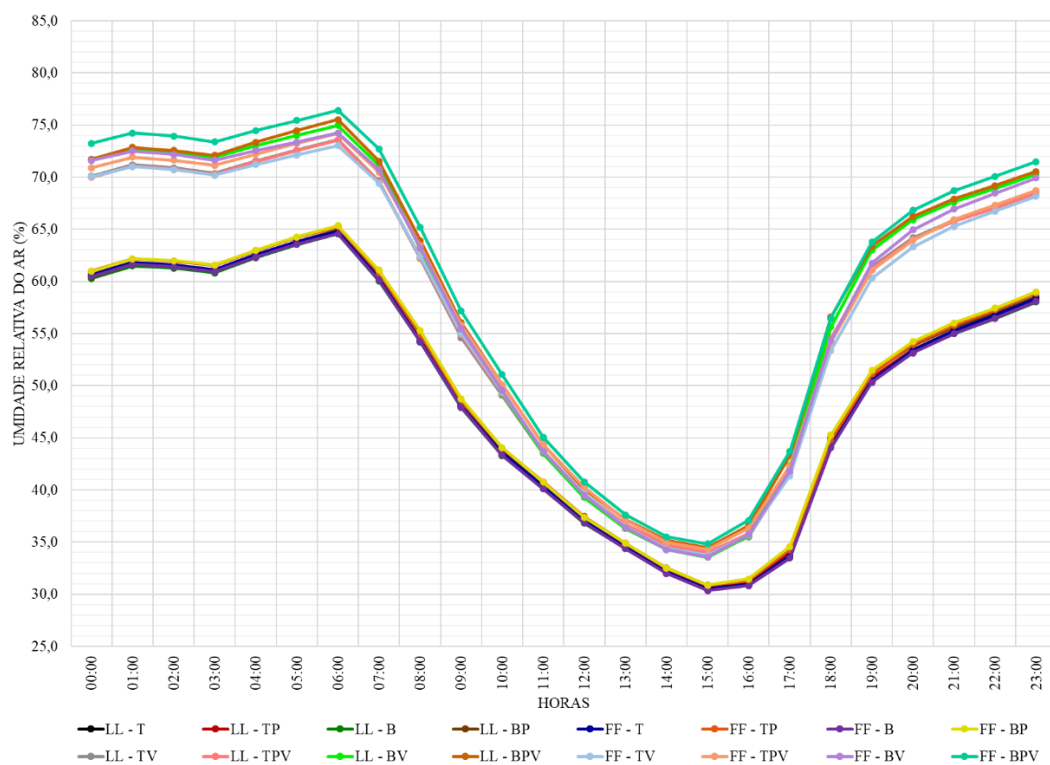
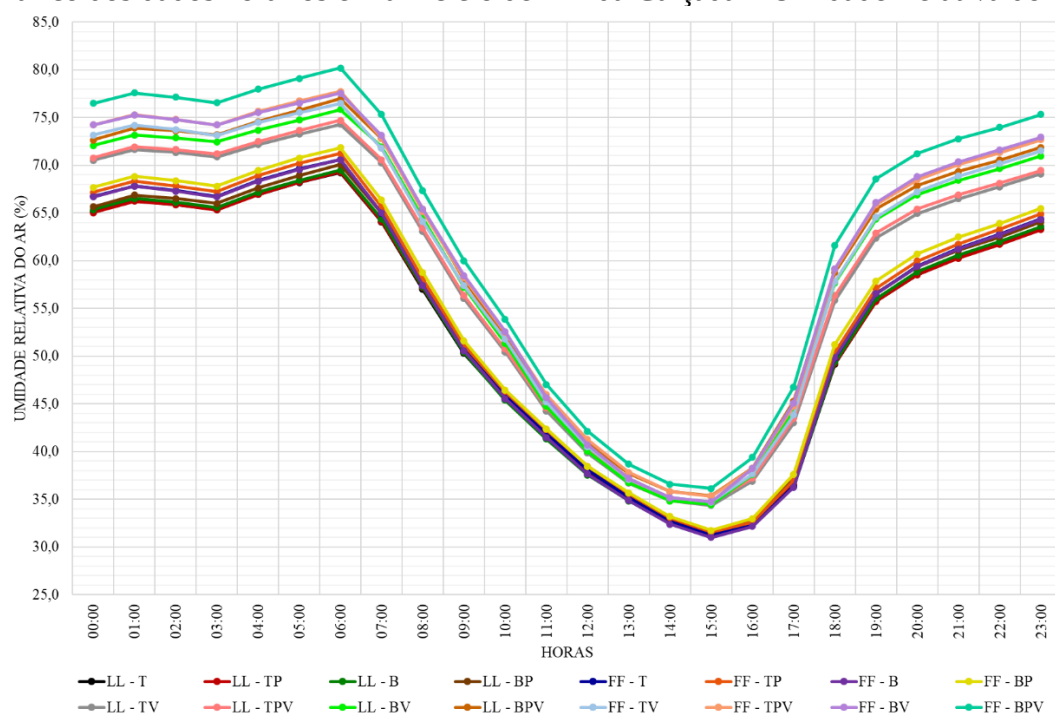


Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Calçada – Umidade Relativa do Ar.



Estatísticas Descritivas da Via Principal – Umidade Relativa do Ar.

Cenários	Um. Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
LL-T	53,99	13,67	31,42	70,12
LL-TP	54,03	13,59	31,54	70,17
LL-B	53,98	13,79	31,20	70,22
LL-BP	54,37	13,71	31,65	70,62
FF-T	54,69	14,24	31,25	71,49
FF-TP	55,18	14,29	31,57	72,09
FF-B	54,56	14,28	31,07	71,39
FF-BP	55,40	14,32	31,72	72,32
LL-TV	59,99	14,96	34,59	76,13
LL-TPV	60,17	14,90	34,89	76,35
LL-BV	60,62	15,28	34,61	76,90
LL-BPV	61,09	15,17	35,38	77,60
FF-TV	60,86	15,51	34,62	77,53
FF-TPV	61,63	15,71	35,15	78,68
FF-BV	61,48	15,73	34,74	78,17
FF-BPV	62,81	16,10	35,69	80,16

Fonte: Elaborado pela Autora.

Estatísticas Descritivas da Via Secundária - Umidade Relativa do Ar.

Cenários	Um. Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
LL-T	50,04	11,82	30,74	64,80
LL-TP	50,09	11,70	30,86	64,70
LL-B	49,81	11,84	30,45	64,59
LL-BP	50,27	11,77	30,84	64,91
FF-T	50,04	11,90	30,55	64,81
FF-TP	50,46	11,93	30,82	65,25
FF-B	49,81	11,90	30,34	64,57
FF-BP	50,60	11,93	30,86	65,35
LL-TV	57,59	14,42	33,73	73,58
LL-TPV	57,64	14,24	34,01	73,57
LL-BV	58,57	15,10	33,55	74,96
LL-BPV	59,13	14,83	34,45	75,53
FF-TV	57,37	14,23	33,73	73,03
FF-TPV	58,16	14,35	34,29	74,19
FF-BV	58,26	14,89	33,56	74,22
FF-BPV	59,96	15,10	34,82	76,41

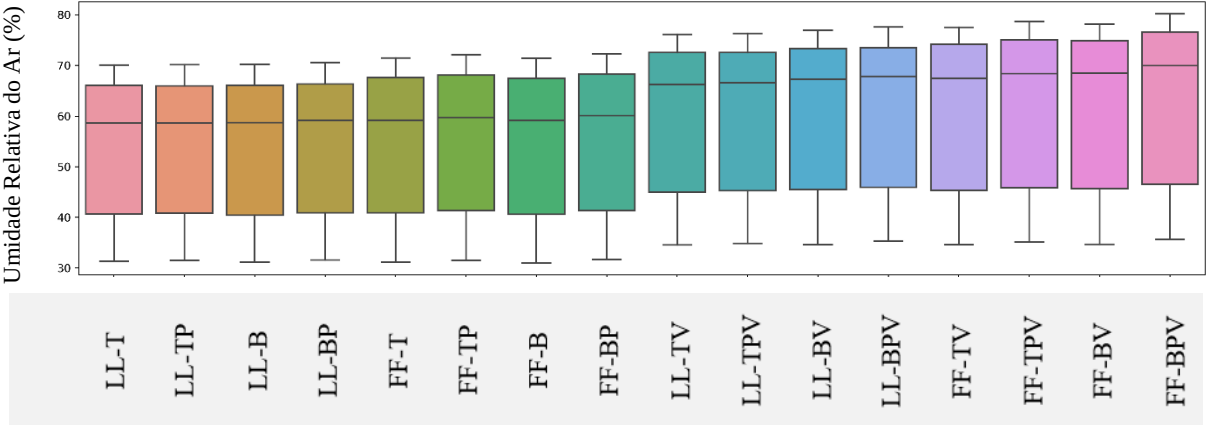
Fonte: Elaborado pela Autora.

Estatísticas Descritivas da Calçada - Umidade Relativa do Ar.

Cenários	Um. Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
LL-T	53,35	13,31	31,40	69,22
LL-TP	53,40	13,23	31,52	69,28
LL-B	53,43	13,51	31,14	69,48
LL-BP	53,97	13,46	31,65	70,05
FF-T	54,09	13,88	31,23	70,62
FF-TP	54,58	13,93	31,57	71,21
FF-B	53,97	13,97	31,00	70,58
FF-BP	55,07	14,09	31,76	71,84
LL-TV	58,34	14,32	34,36	74,29
LL-TPV	58,69	14,34	34,64	74,70
LL-BV	59,61	14,88	34,47	75,83
LL-BPV	60,48	14,89	35,35	76,95
FF-TV	60,00	15,06	34,73	76,48
FF-TPV	61,00	15,26	35,33	77,74
FF-BV	60,97	15,44	34,76	77,54
FF-BPV	62,98	15,89	36,13	80,17

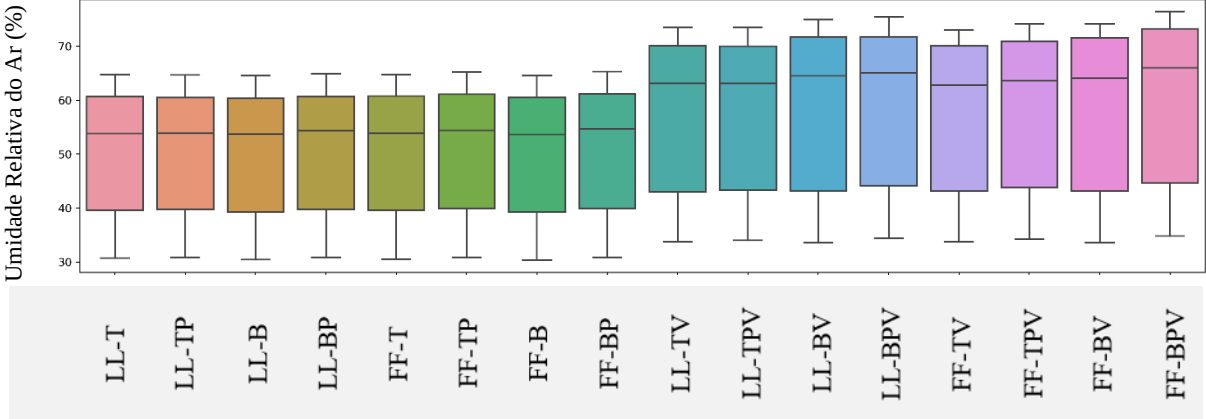
Fonte: Elaborado pela Autora.

Gráfico *Boxplot* da Via Principal - Umidade Relativa do Ar.



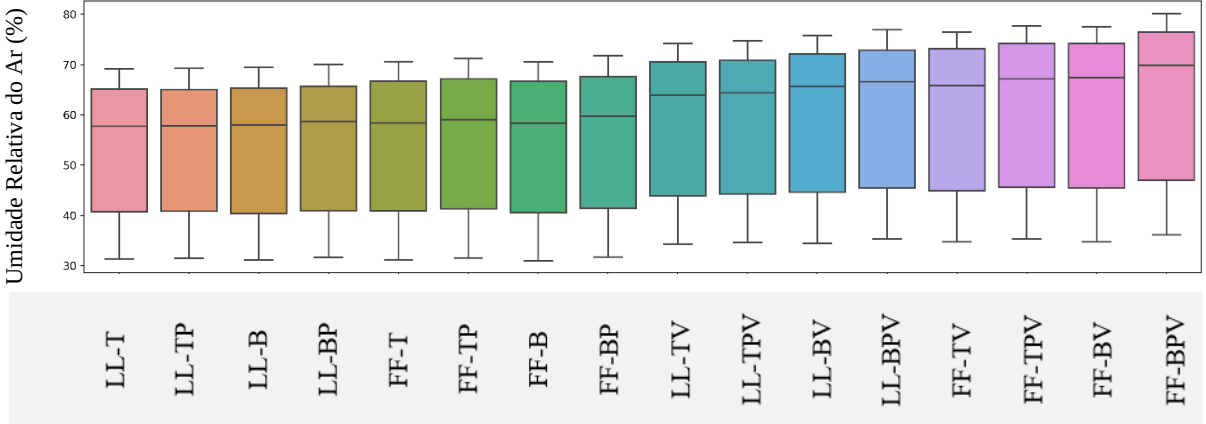
Fonte: Elaborado pela Autora.

Gráfico *Boxplot* da Via Secundária – Umidade Relativa do Ar.



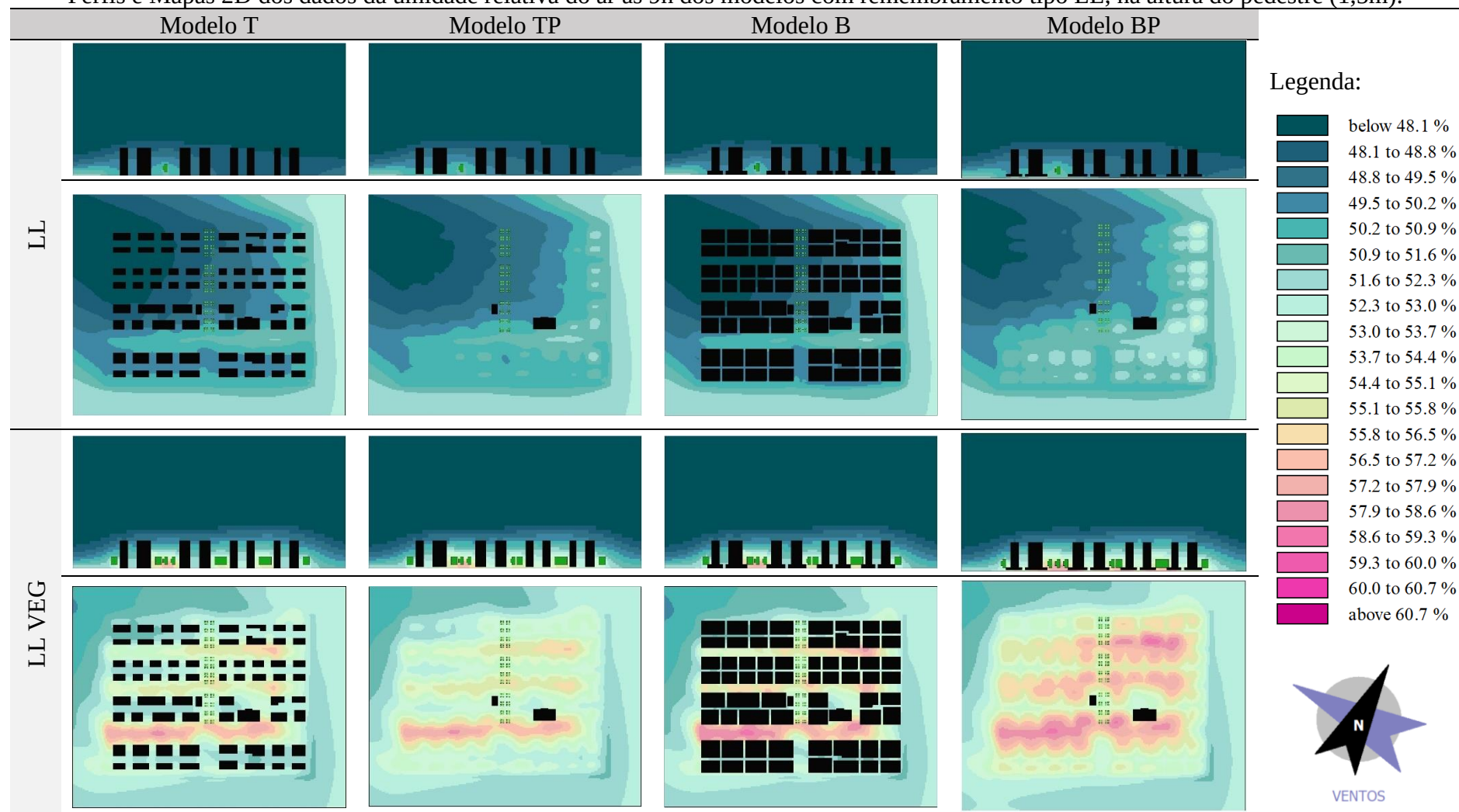
Fonte: Elaborado pela Autora.

Gráfico *Boxplot* da Calçada - Umidade Relativa do Ar.



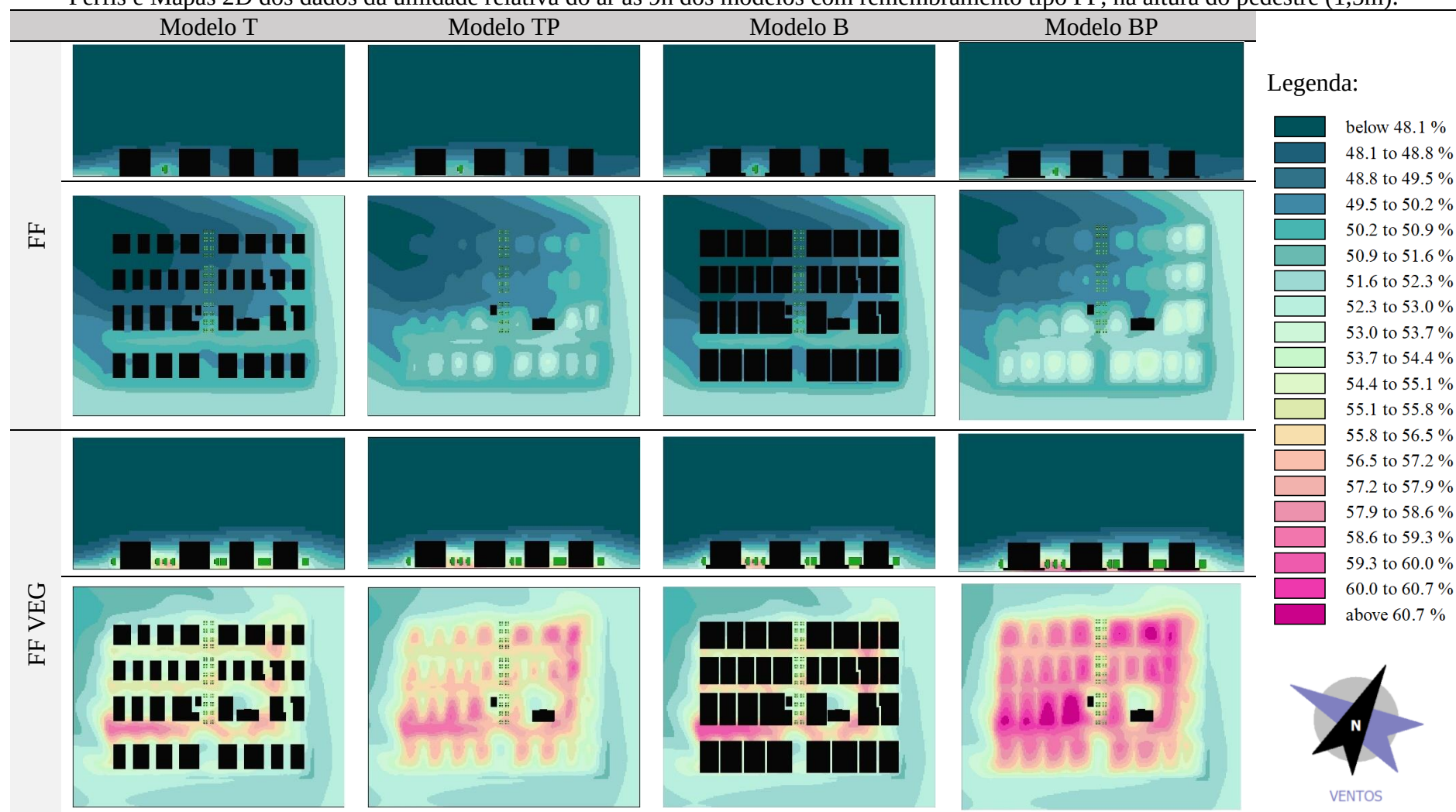
Fonte: Elaborado pela Autora.

Perfis e Mapas 2D dos dados da umidade relativa do ar às 9h dos modelos com rememoração tipo LL, na altura do pedestre (1,5m).



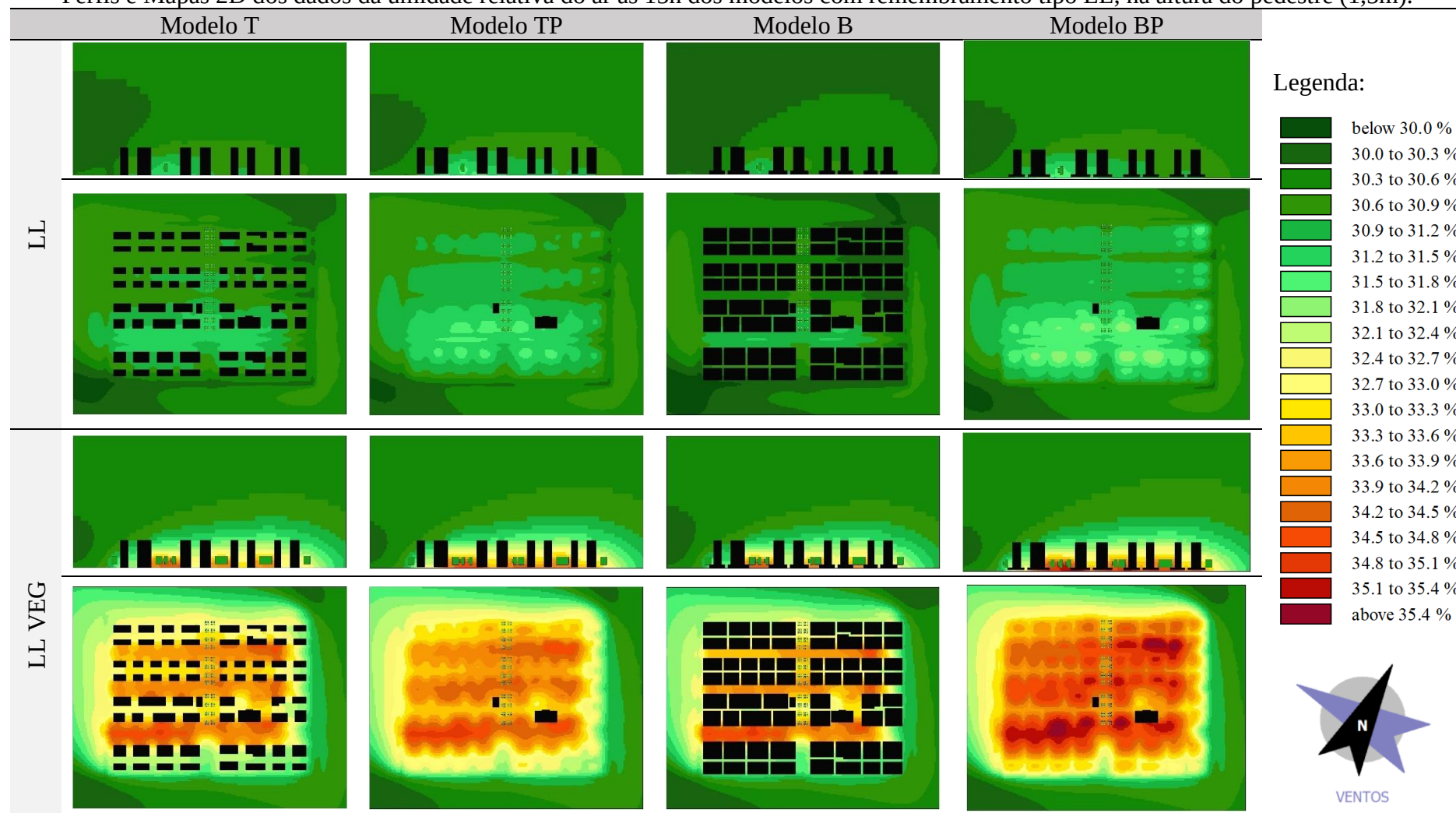
Fonte: Elaborado pela Autora.

Perfis e Mapas 2D dos dados da umidade relativa do ar às 9h dos modelos com rememramento tipo FF, na altura do pedestre (1,5m).



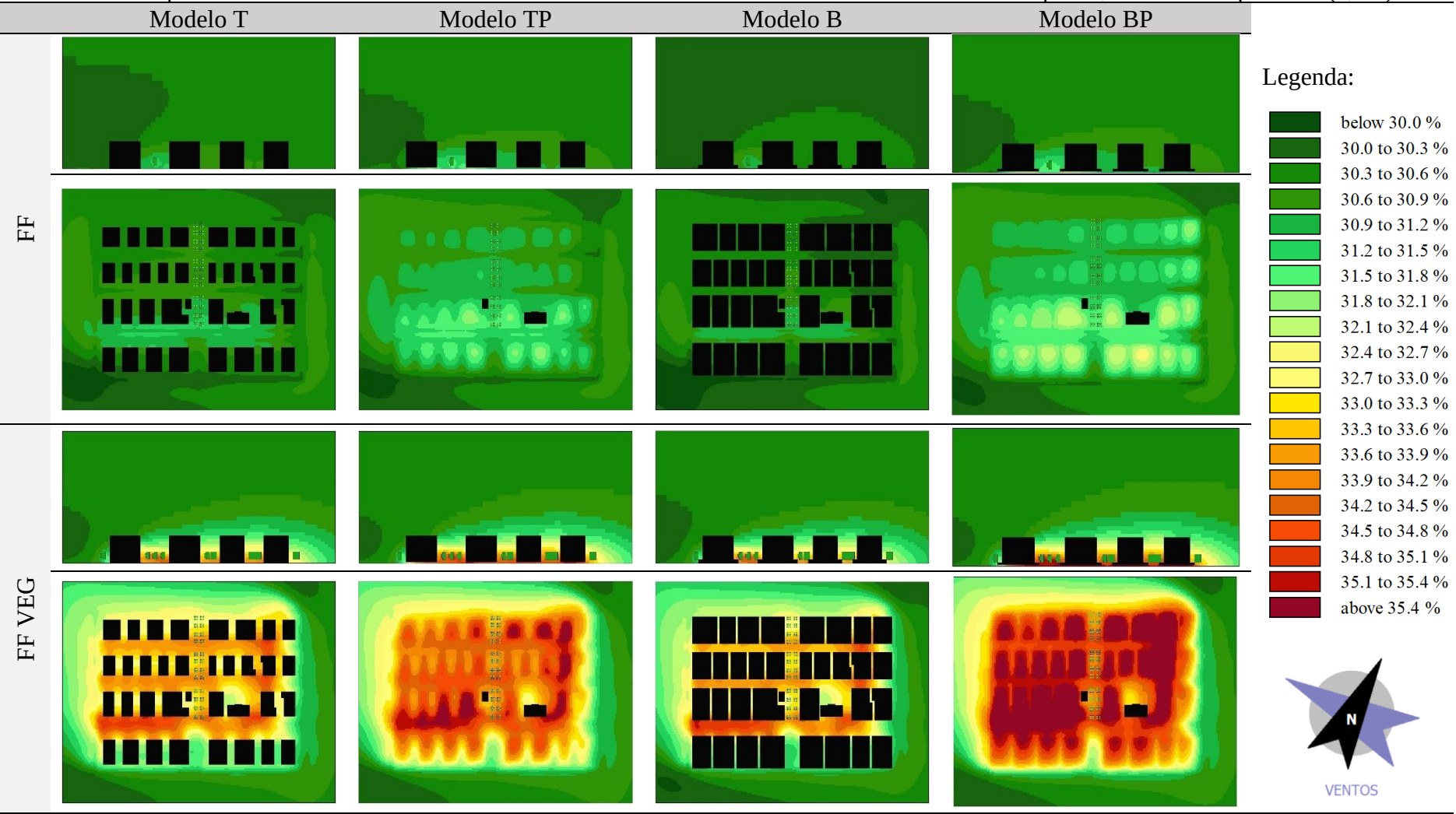
Fonte: Elaborado pela Autora.

Perfis e Mapas 2D dos dados da umidade relativa do ar às 15h dos modelos com remembramento tipo LL, na altura do pedestre (1,5m).



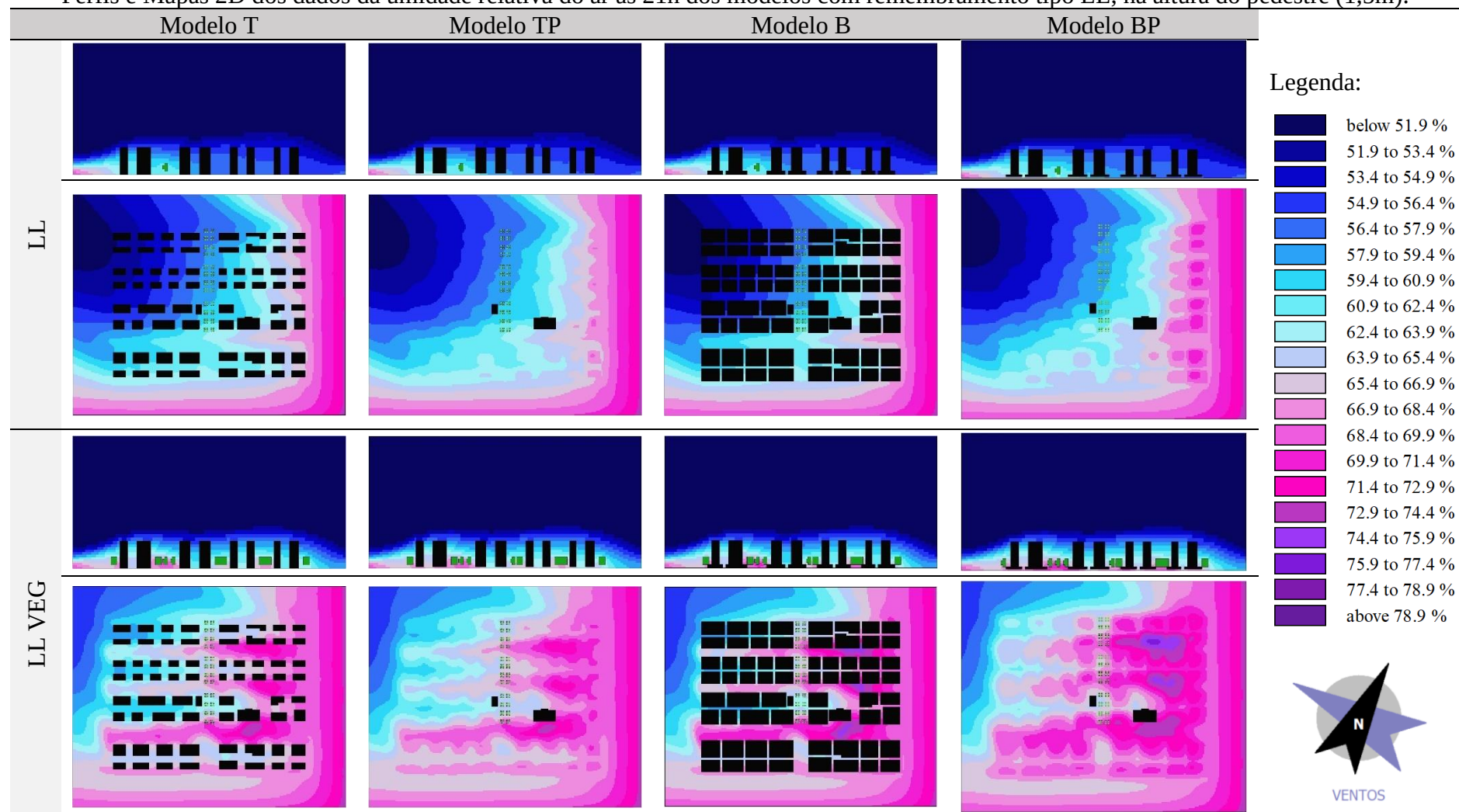
Fonte: Elaborado pela Autora.

Perfis e Mapas 2D dos dados da umidade relativa do ar às 15h dos modelos com remembramento tipo FF, na altura do pedestre (1,5m).



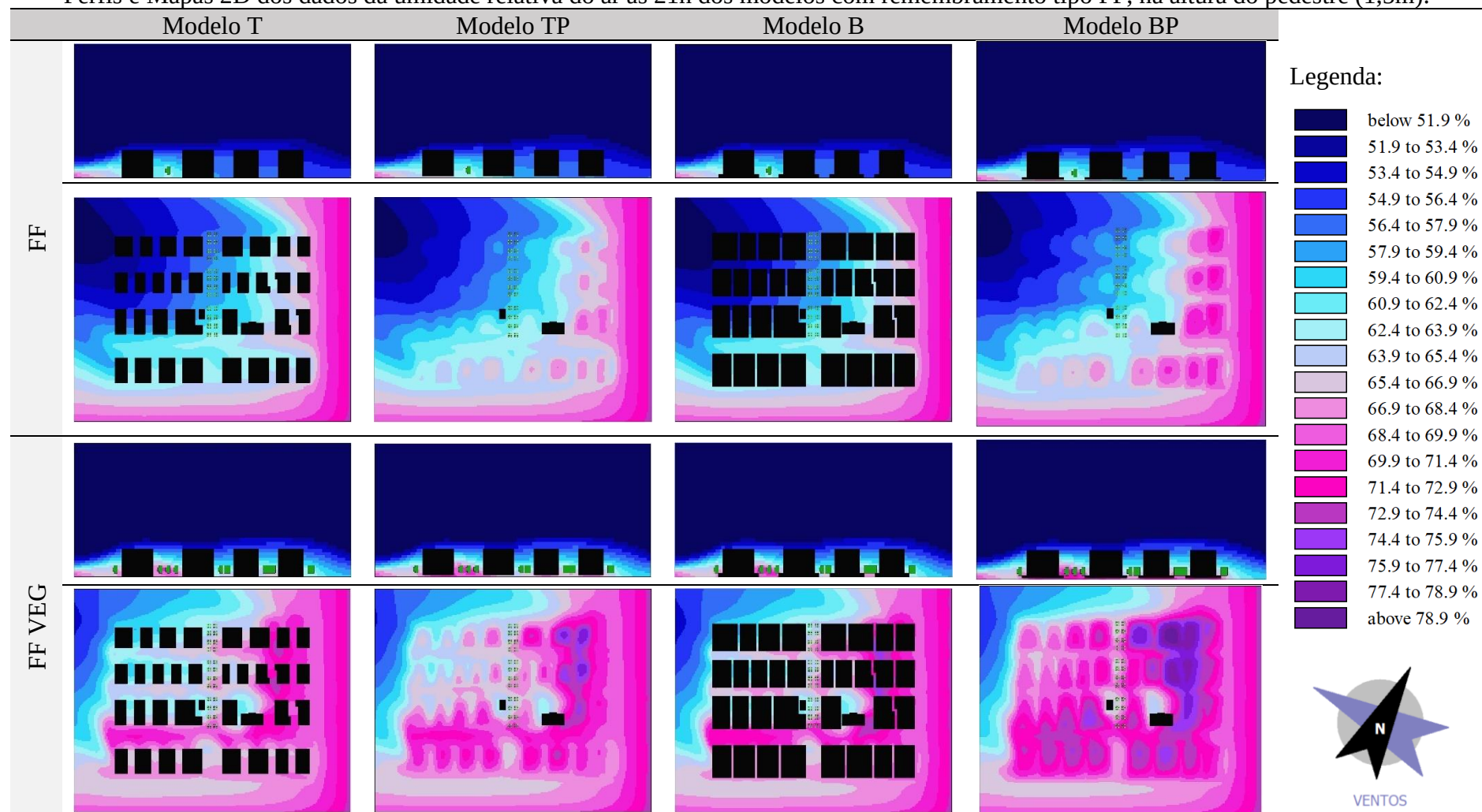
Fonte: Elaborado pela Autora.

Perfis e Mapas 2D dos dados da umidade relativa do ar às 21h dos modelos com remembramento tipo LL, na altura do pedestre (1,5m).



Fonte: Elaborado pela Autora.

Perfis e Mapas 2D dos dados da umidade relativa do ar às 21h dos modelos com remembramento tipo FF, na altura do pedestre (1,5m).



Fonte: Elaborado pela Autora.

VELOCIDADE E DIREÇÃO DOS VENTOS

Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Via Principal – Velocidade dos Ventos.

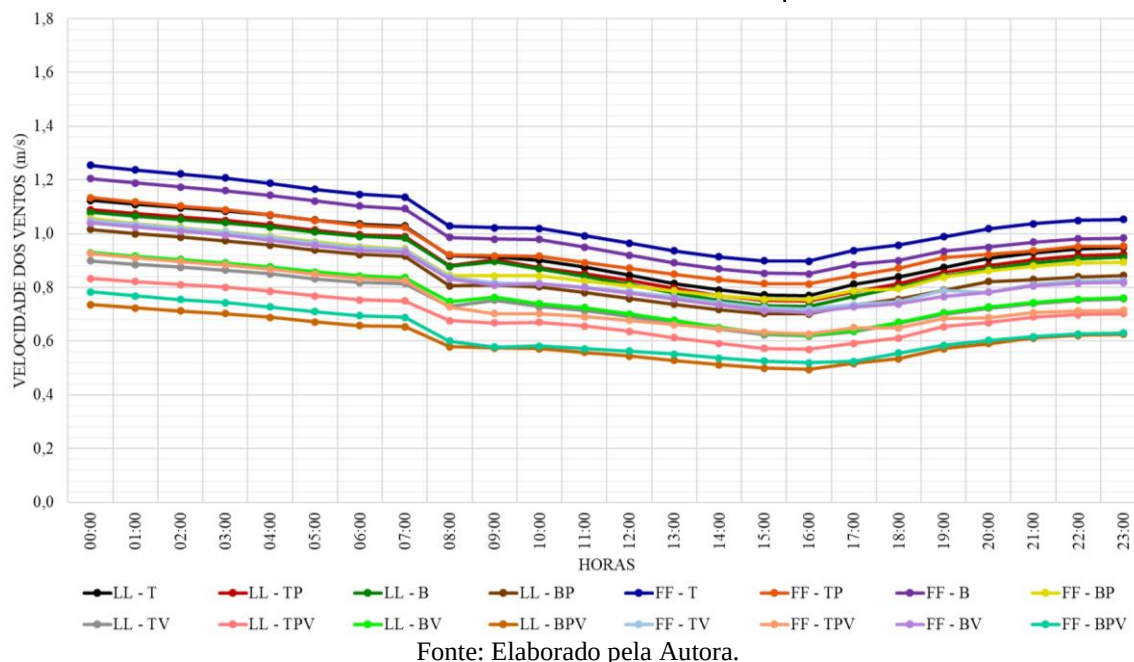


Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Via Secundária – Velocidade dos Ventos.

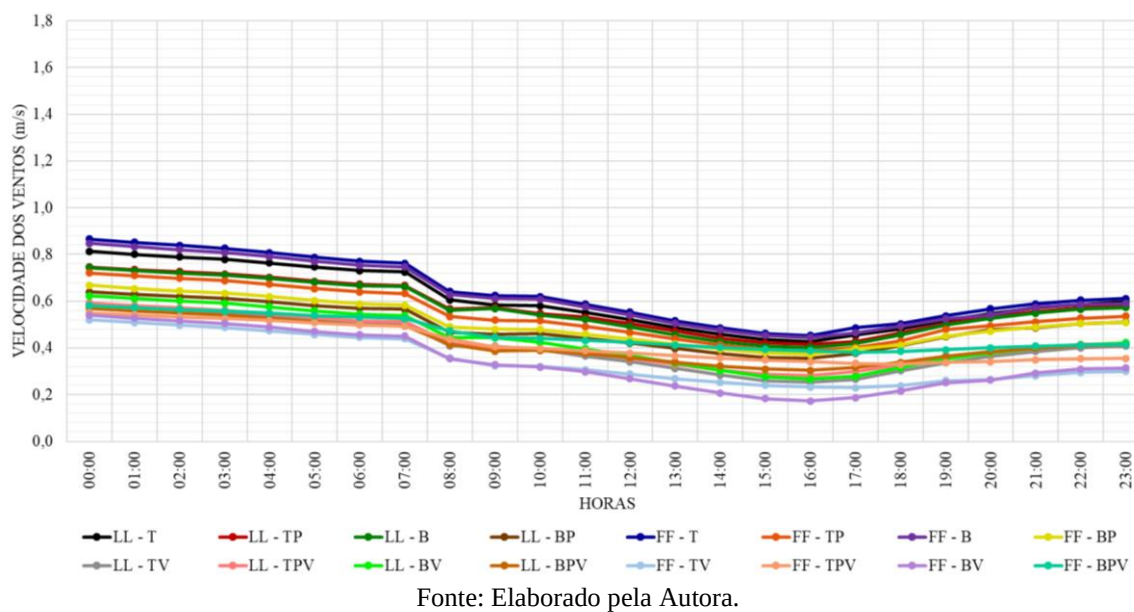
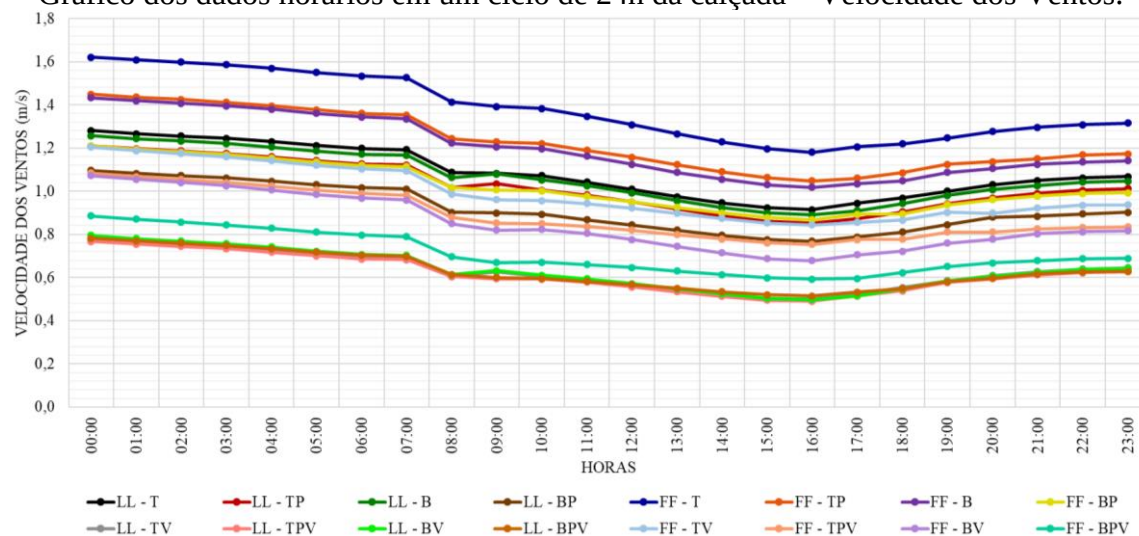


Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da calçada – Velocidade dos Ventos.



Estatísticas Descritivas da Via Principal – Velocidade dos Ventos.

Cenários	V. Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
LL-T	0,94	0,11	0,77	1,12
LL-TP	0,91	0,11	0,75	1,09
LL-B	0,90	0,11	0,73	1,08
LL-BP	0,84	0,10	0,70	1,02
FF-T	1,05	0,11	0,90	1,25
FF-TP	0,95	0,10	0,81	1,13
FF-B	1,00	0,11	0,85	1,20
FF-BP	0,88	0,09	0,75	1,06
LL-TV	0,75	0,09	0,62	0,90
LL-TPV	0,69	0,08	0,57	0,83
LL-BV	0,76	0,10	0,62	0,93
LL-BPV	0,60	0,08	0,49	0,74
FF-TV	0,85	0,11	0,72	1,05
FF-TPV	0,74	0,10	0,63	0,93
FF-BV	0,84	0,11	0,71	1,04
FF-BPV	0,63	0,08	0,52	0,78

Fonte: Elaborado pela Autora.

Estatísticas Descritivas da Via Secundária - Velocidade dos Ventos.

Cenários	V. Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
LL-T	0,61	0,13	0,43	0,81
LL-TP	0,57	0,11	0,41	0,75
LL-B	0,57	0,11	0,40	0,74
LL-BP	0,49	0,09	0,35	0,64
FF-T	0,64	0,14	0,45	0,87
FF-TP	0,54	0,11	0,39	0,72
FF-B	0,62	0,13	0,45	0,85
FF-BP	0,51	0,09	0,37	0,67
LL-TV	0,41	0,11	0,25	0,58
LL-TPV	0,42	0,10	0,28	0,59
LL-BV	0,44	0,12	0,27	0,62
LL-BPV	0,42	0,09	0,30	0,57
FF-TV	0,35	0,10	0,23	0,52
FF-TPV	0,42	0,08	0,33	0,55
FF-BV	0,34	0,12	0,17	0,54
FF-BPV	0,46	0,07	0,38	0,58

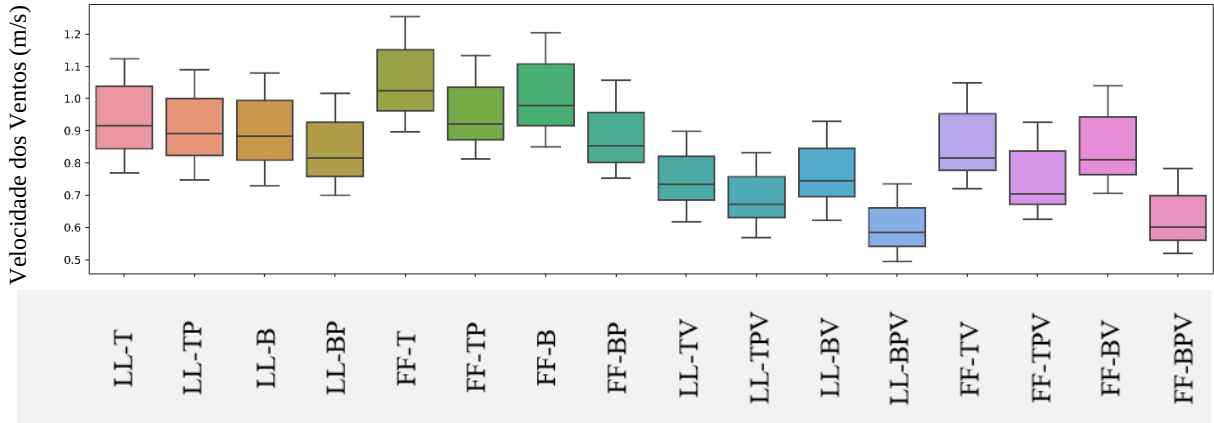
Fonte: Elaborado pela Autora.

Estatísticas Descritivas da Calçada - Velocidade dos Ventos.

Cenários	V. Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
LL-T	1,09	0,12	0,91	1,28
LL-TP	1,02	0,12	0,85	1,21
LL-B	1,06	0,12	0,89	1,26
LL-BP	0,92	0,11	0,77	1,10
FF-T	1,38	0,15	1,18	1,62
FF-TP	1,23	0,14	1,05	1,45
FF-B	1,20	0,14	1,02	1,43
FF-BP	1,02	0,11	0,87	1,21
LL-TV	0,63	0,08	0,50	0,77
LL-TPV	0,62	0,09	0,49	0,77
LL-BV	0,63	0,09	0,50	0,79
LL-BPV	0,63	0,09	0,52	0,78
FF-TV	0,99	0,12	0,84	1,20
FF-TPV	0,88	0,11	0,75	1,08
FF-BV	0,85	0,13	0,68	1,07
FF-BPV	0,71	0,10	0,59	0,89

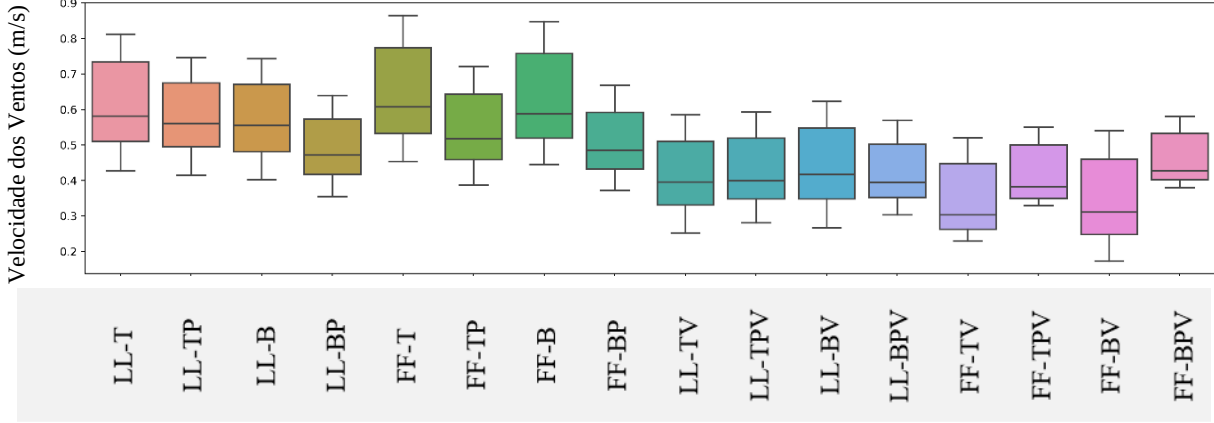
Fonte: Elaborado pela Autora.

Gráfico *Boxplot* da Via Principal - Velocidade dos Ventos.



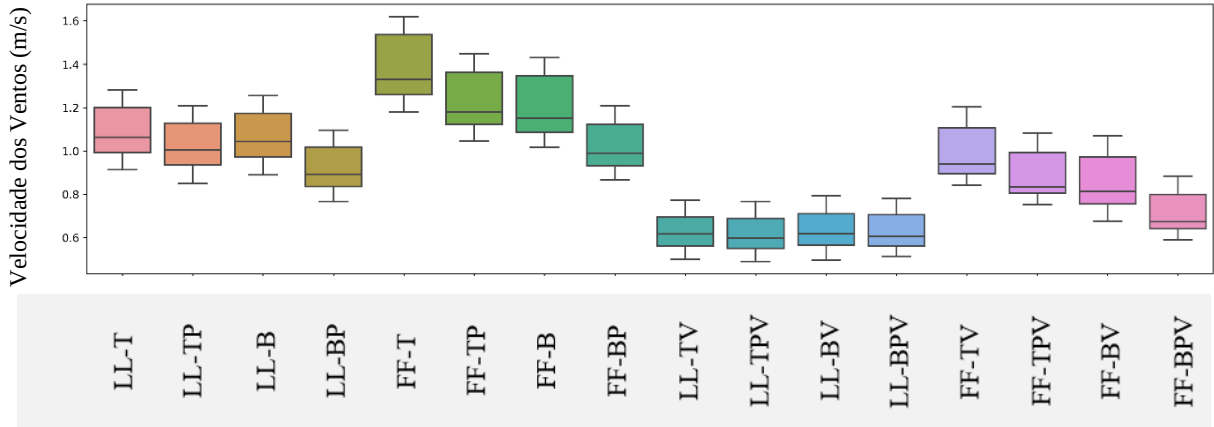
Fonte: Elaborado pela Autora.

Gráfico *Boxplot* da Via Secundária - Velocidade dos Ventos.



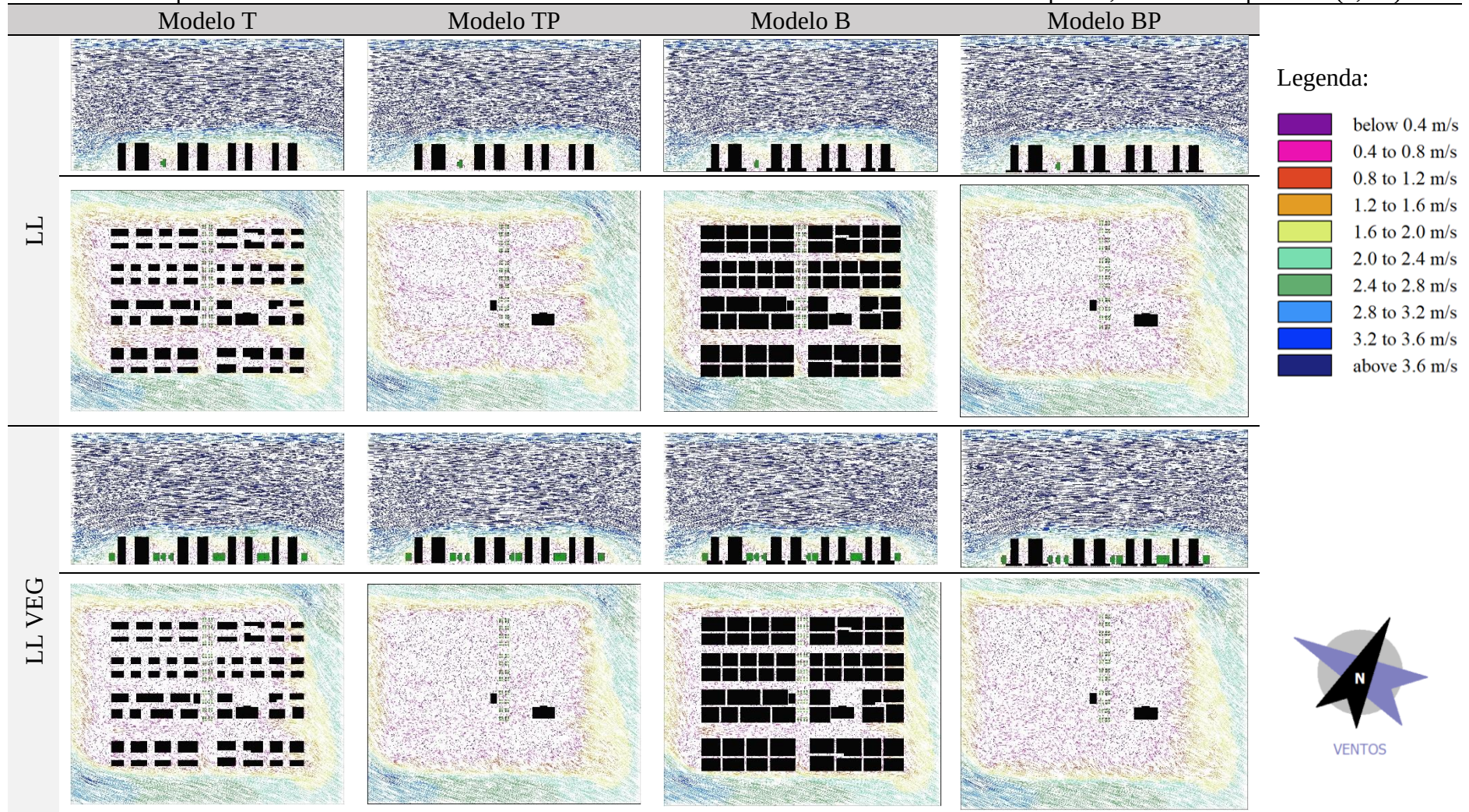
Fonte: Elaborado pela Autora.

Gráfico *Boxplot* da Calçada - Velocidade dos Ventos.



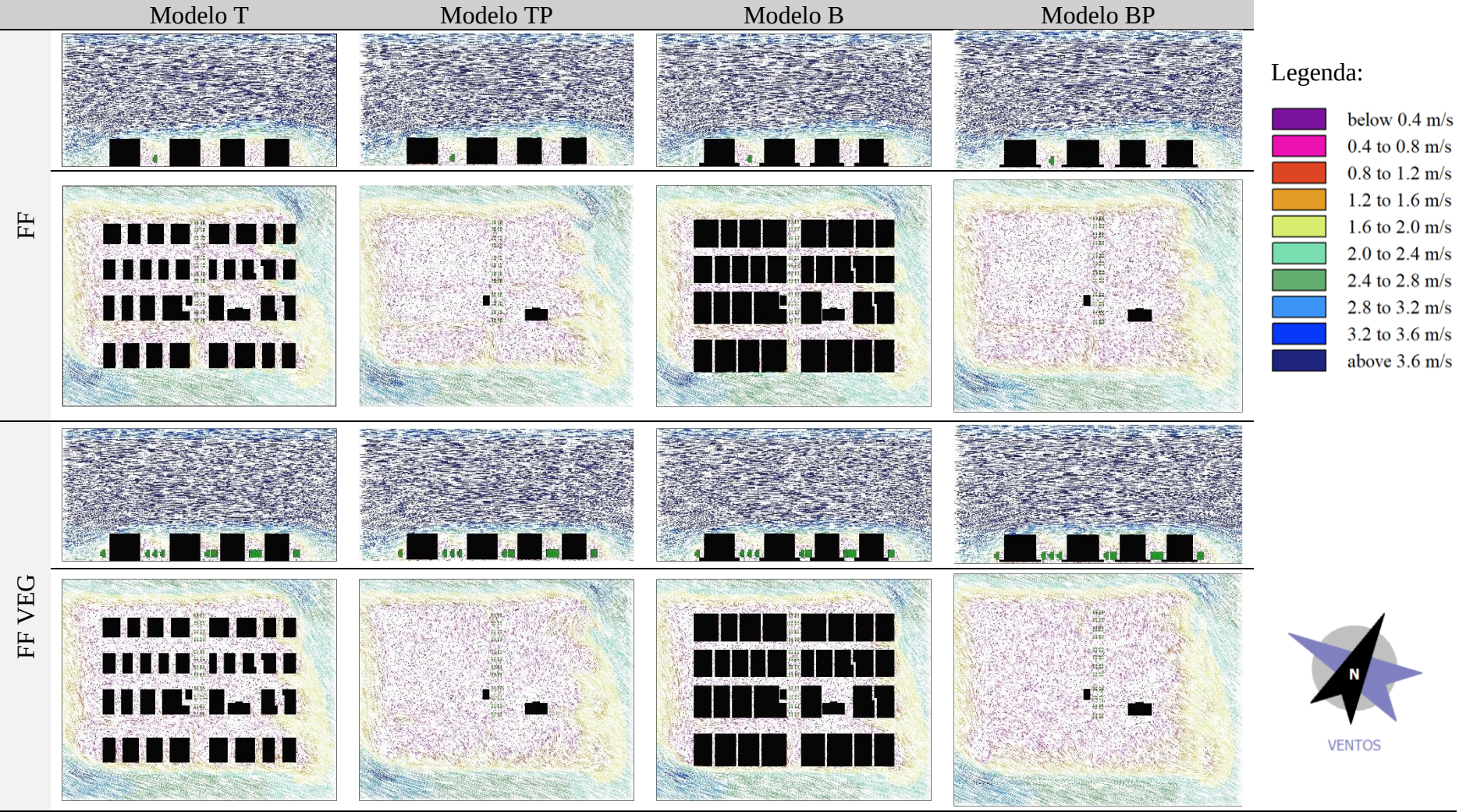
Fonte: Elaborado pela Autora.

Perfis e Mapas 2D dos dados da velocidade dos ventos às 15h dos modelos com remembramento tipo LL, na altura do pedestre (1,5m).



Fonte: Elaborado pela Autora.

Perfis e Mapas 2D dos dados da velocidade dos ventos às 15h dos modelos com remembramento tipo FF, na altura do pedestre (1,5m).



Fonte: Elaborado pela Autora.

PET

Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Via Principal – PET.

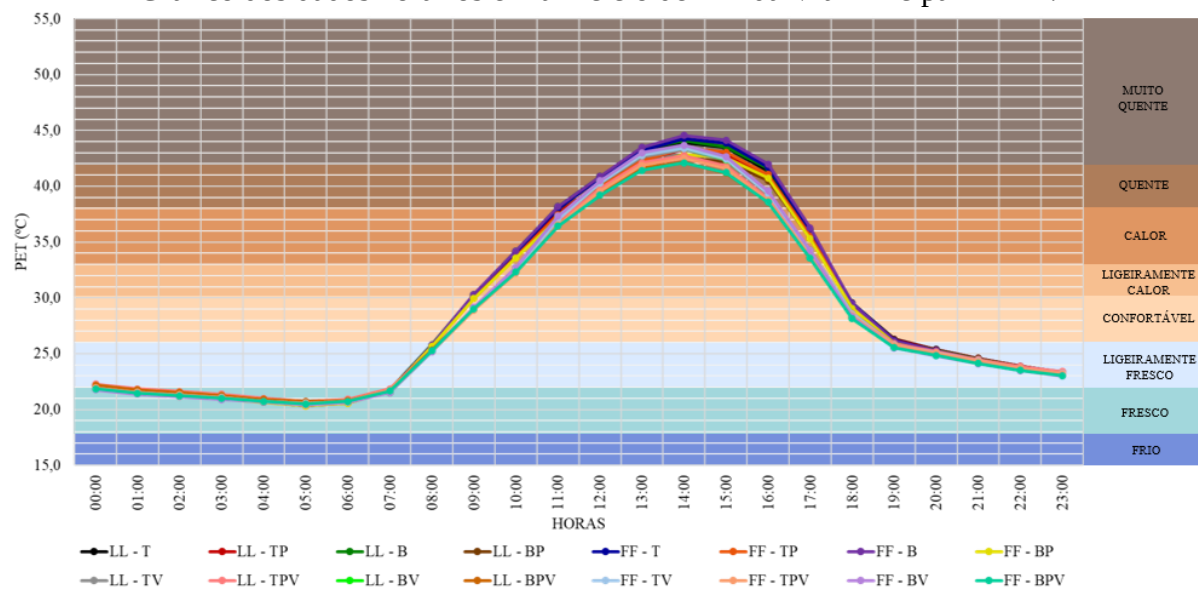


Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Via Secundária – PET.

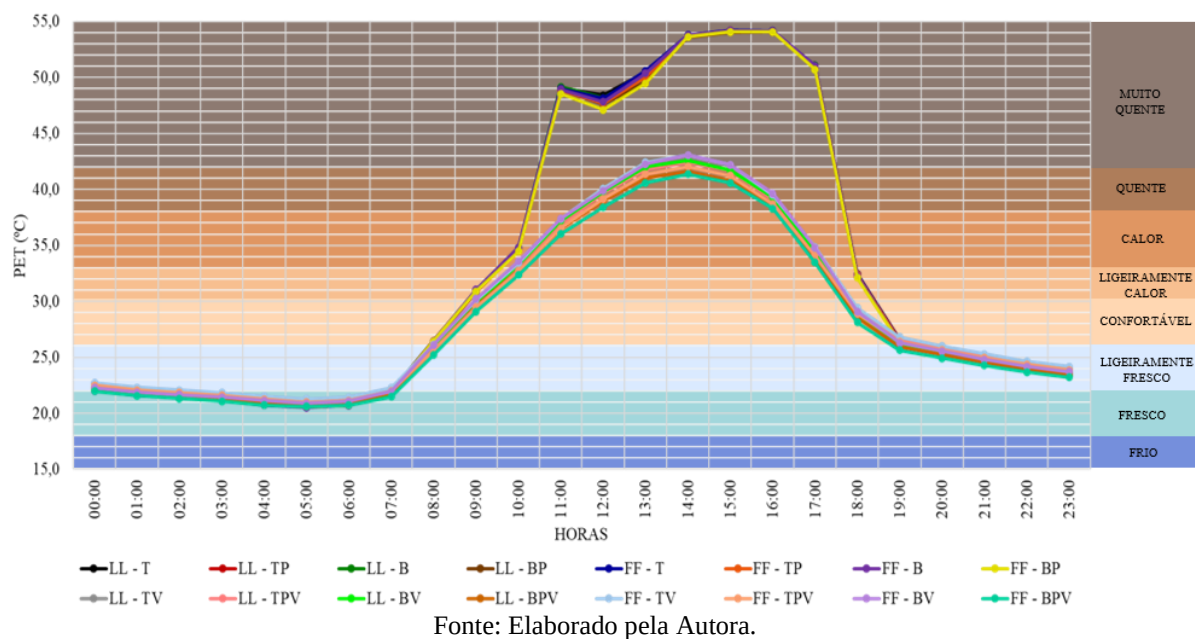
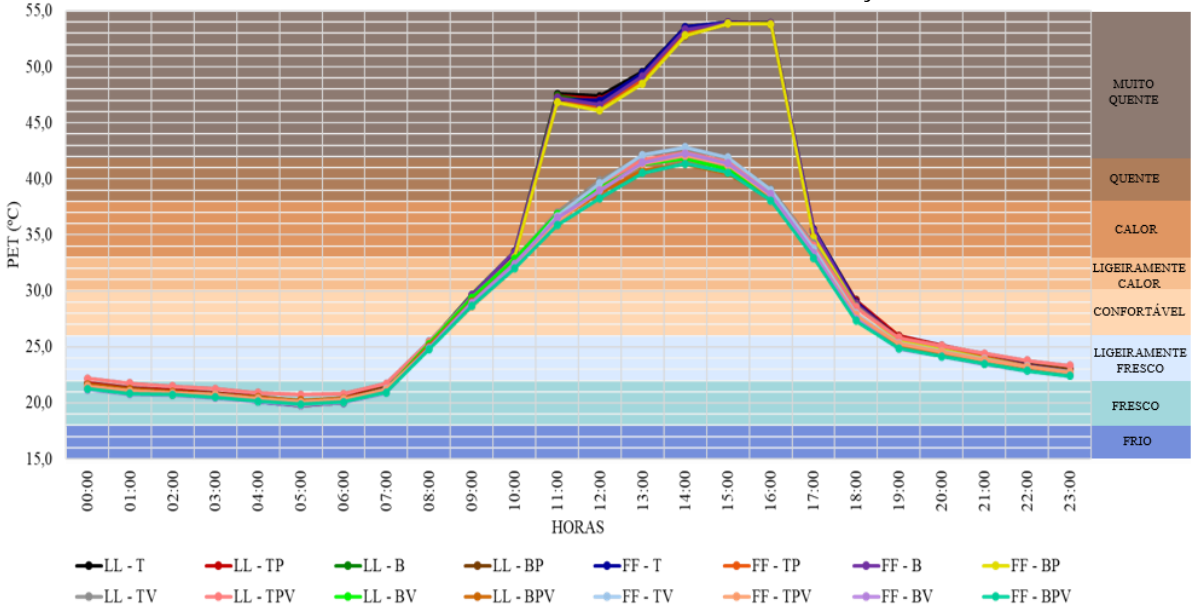


Gráfico dos dados horários em um ciclo de 24h da Calçada – PET.



Fonte: Elaborado pela Autora.

Estatísticas Descritivas da Via Principal – PET.

Cenários	PET Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
LL-T	29,15	8,51	20,54	43,91
LL-TP	28,98	8,28	20,55	43,27
LL-B	29,18	8,60	20,52	44,07
LL-BP	28,76	8,07	20,50	42,58
FF-T	29,13	8,67	20,35	44,28
FF-TP	28,86	8,35	20,34	43,39
FF-B	29,22	8,77	20,37	44,56
FF-BP	28,68	8,17	20,32	42,85
LL-TV	28,67	8,04	20,72	43,31
LL-TPV	28,58	7,82	20,73	42,76
LL-BV	28,58	8,20	20,56	43,43
LL-BPV	28,38	7,67	20,72	42,15
FF-TV	28,61	8,14	20,57	43,40
FF-TPV	28,38	7,83	20,55	42,51
FF-BV	28,57	8,32	20,41	43,68
FF-BPV	28,23	7,72	20,50	42,10

Fonte: Elaborado pela Autora.

Estatísticas Descritivas da Via Secundária - PET.

Cenários	PET Médio	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
LL-T	32,55	13,04	20,63	54,16
LL-TP	32,50	12,95	20,70	54,11
LL-B	32,48	13,06	20,57	54,12
LL-BP	32,43	12,90	20,70	54,06
FF-T	32,52	13,06	20,59	54,20
FF-TP	32,46	12,97	20,64	54,15
FF-B	32,44	13,07	20,50	54,18
FF-BP	32,32	12,89	20,61	54,09
LL-TV	29,09	7,78	21,16	42,95
LL-TPV	28,93	7,60	21,14	42,43
LL-BV	28,72	7,87	20,72	42,60
LL-BPV	28,46	7,49	20,77	41,62
FF-TV	29,21	7,77	21,28	43,09
FF-TPV	28,69	7,49	20,98	42,06
FF-BV	28,96	7,94	20,89	43,06
FF-BPV	28,12	7,45	20,62	41,37

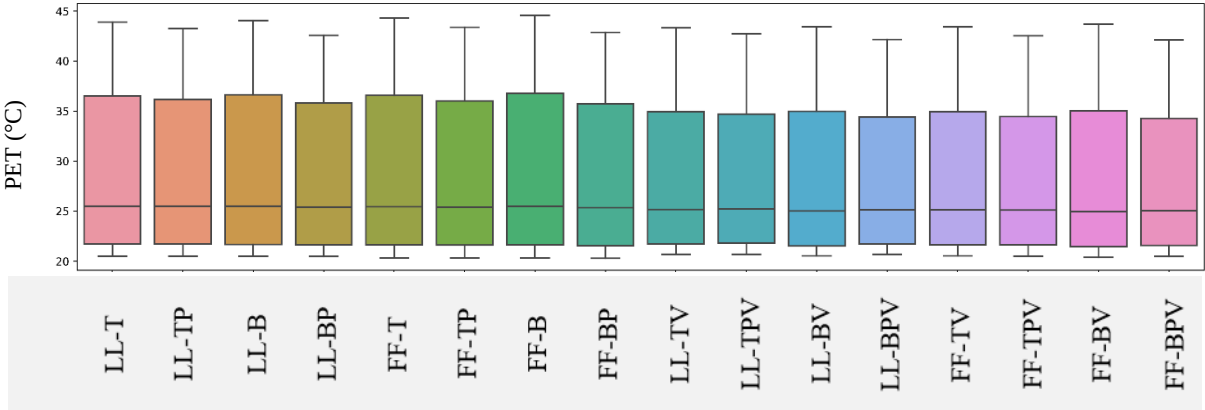
Fonte: Elaborado pela Autora.

Estatísticas Descritivas da Calçada - PET.

Cenários	PET Médio	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
LL-T	31,18	12,43	20,12	53,95
LL-TP	31,15	12,33	20,19	53,93
LL-B	30,92	12,36	19,92	53,84
LL-BP	30,98	12,26	20,11	53,85
FF-T	30,94	12,49	19,77	53,96
FF-TP	30,82	12,35	19,79	53,89
FF-B	30,91	12,45	19,77	53,93
FF-BP	30,76	12,29	19,85	53,86
LL-TV	28,60	7,90	20,72	42,72
LL-TPV	28,50	7,76	20,72	42,34
LL-BV	28,03	7,84	20,18	41,81
LL-BPV	27,90	7,62	20,23	41,32
FF-TV	28,15	8,10	20,09	42,83
FF-TPV	27,95	7,84	20,08	42,08
FF-BV	27,84	8,03	19,83	42,28
FF-BPV	27,61	7,68	19,88	41,37

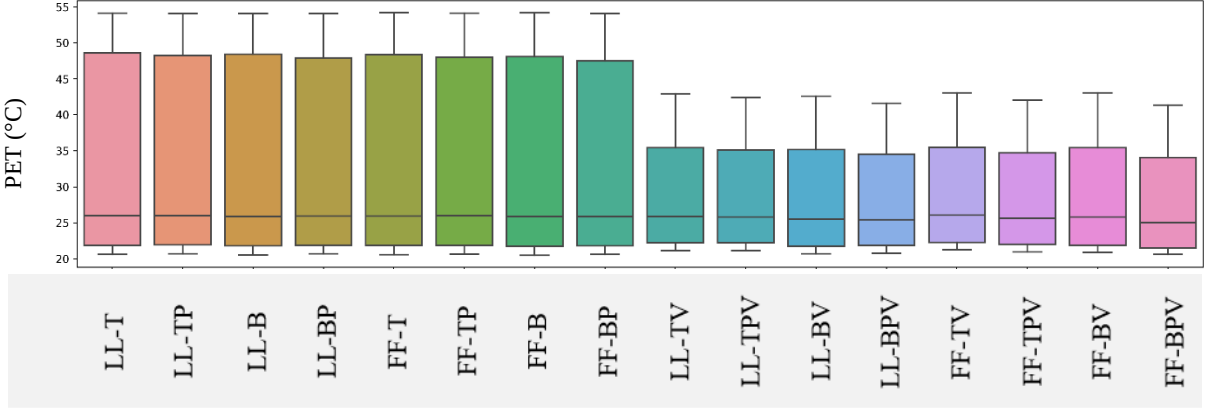
Fonte: Elaborado pela Autora.

Gráfico *Boxplot* da Via Principal - PET.



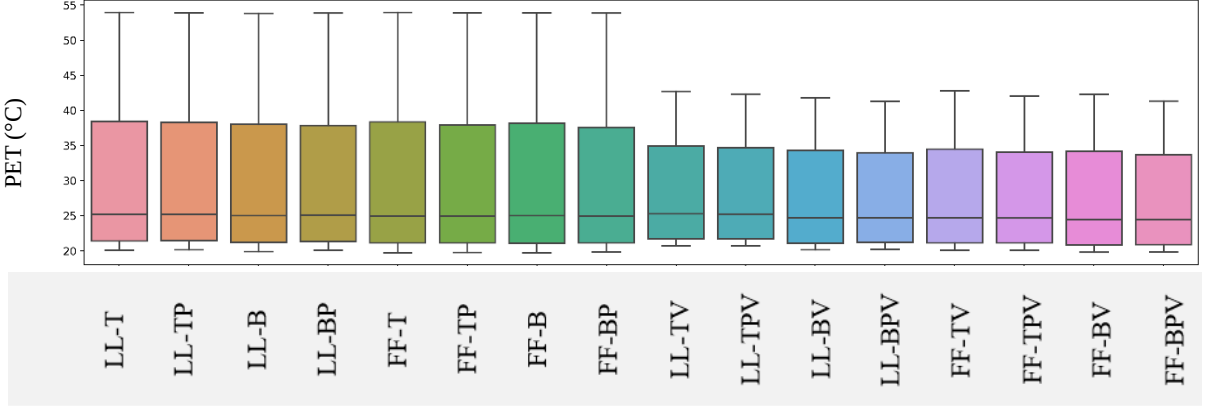
Fonte: Elaborado pela Autora.

Gráfico *Boxplot* da Via Secundária - PET.



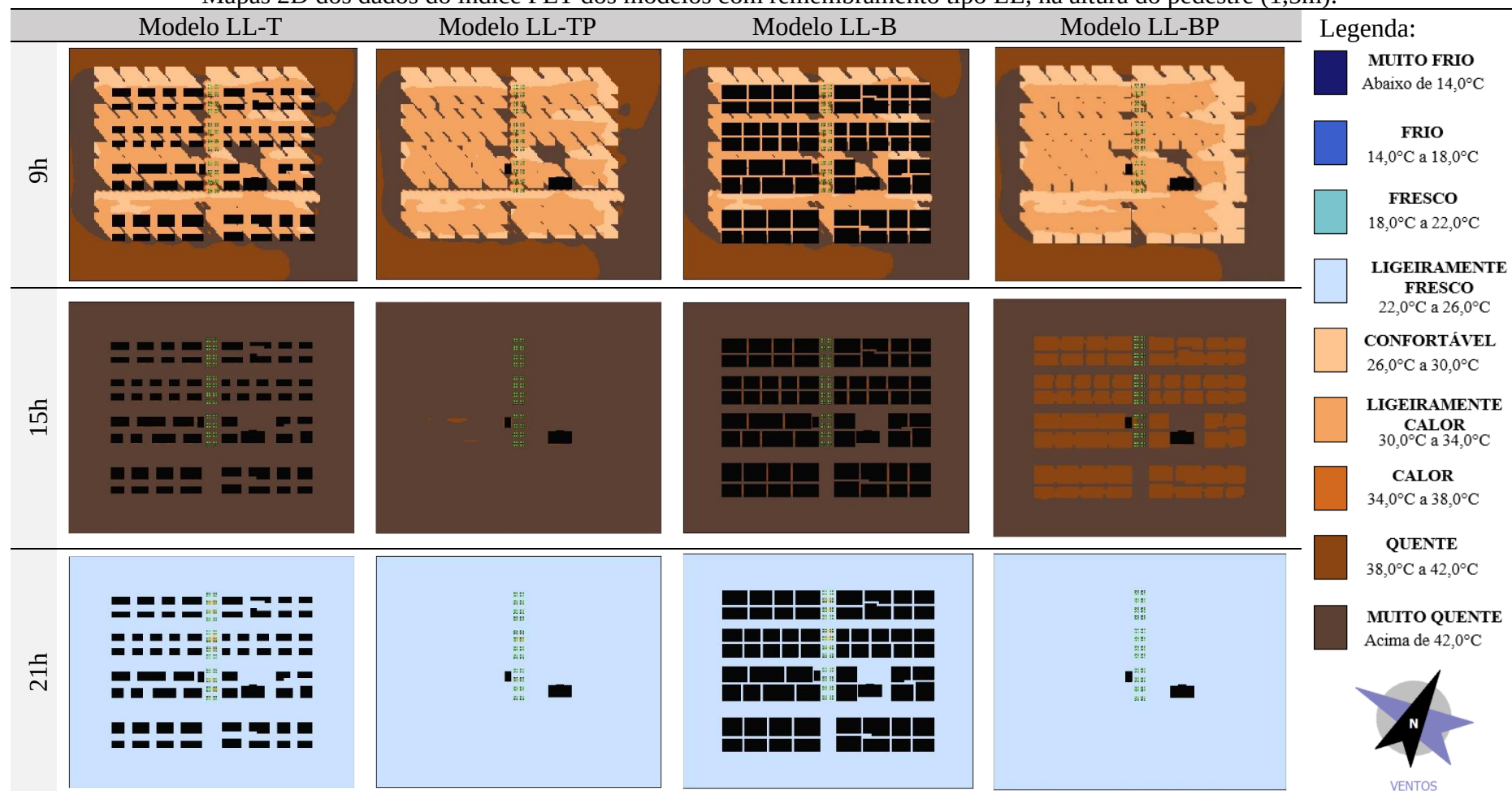
Fonte: Elaborado pela Autora.

Gráfico *Boxplot* da Calçada - PET.



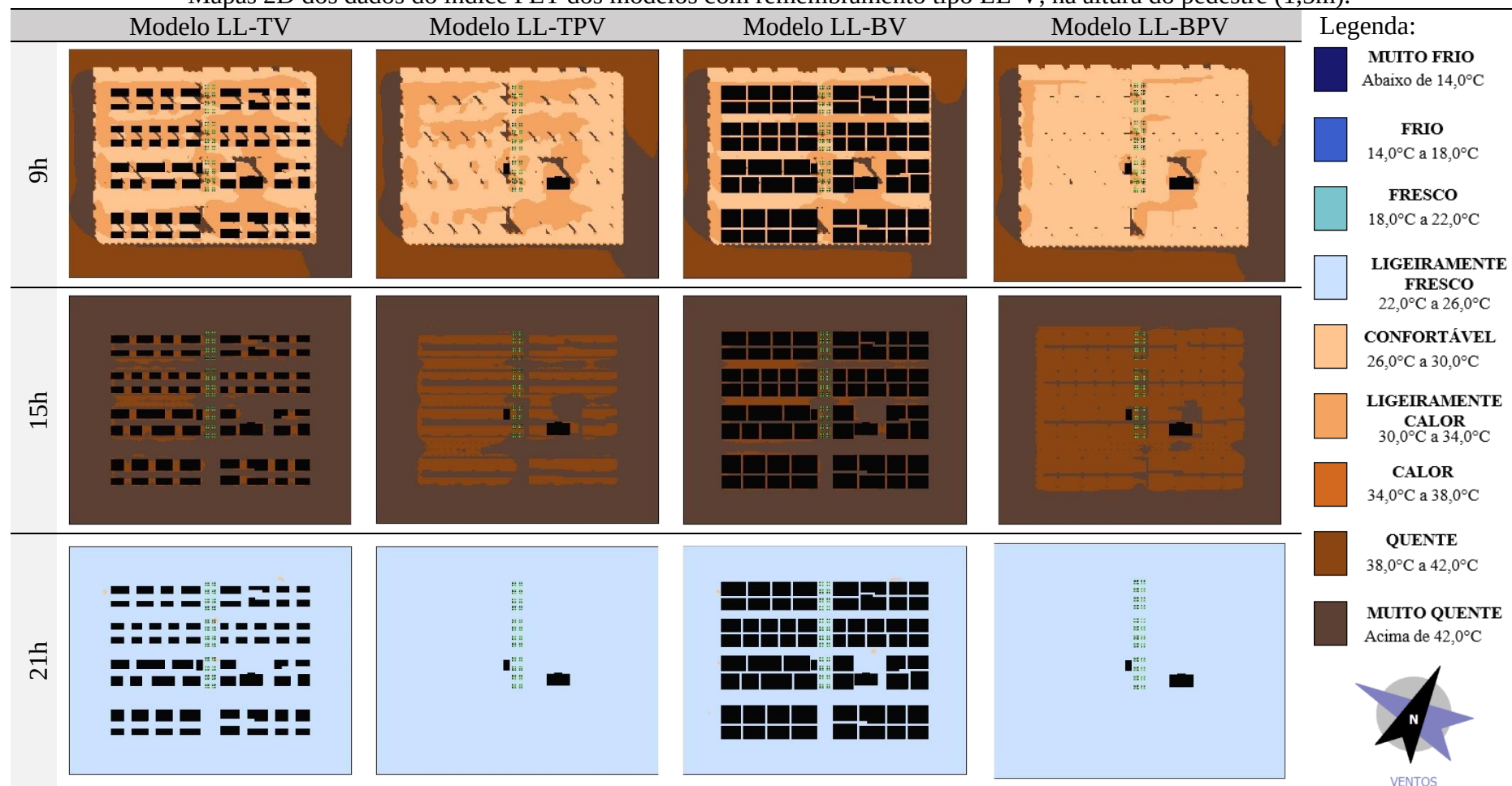
Fonte: Elaborado pela Autora.

Mapas 2D dos dados do índice PET dos modelos com remembramento tipo LL, na altura do pedestre (1,5m).



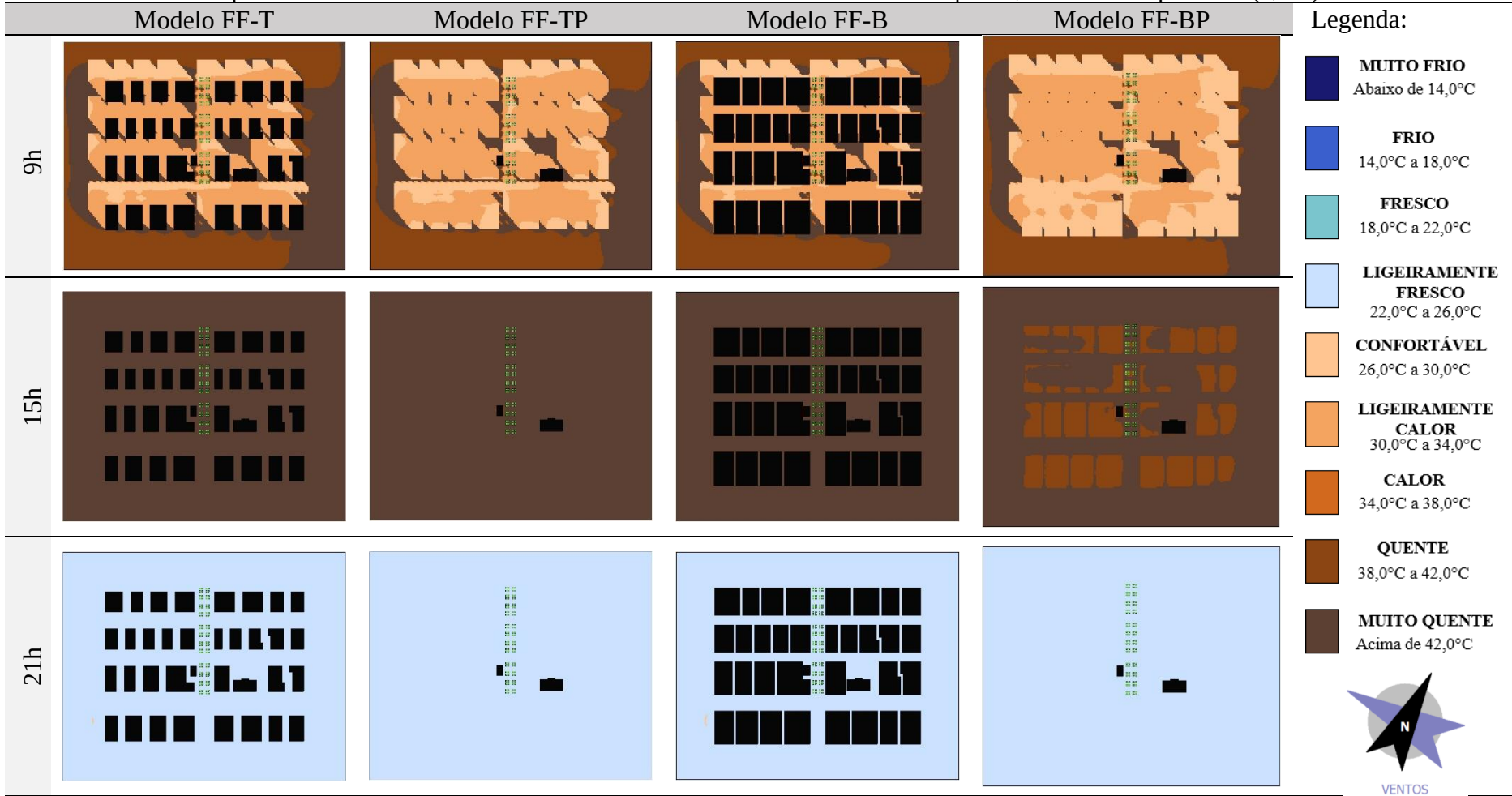
Fonte: Elaborado pela Autora.

Mapas 2D dos dados do índice PET dos modelos com remembramento tipo LL-V, na altura do pedestre (1,5m).



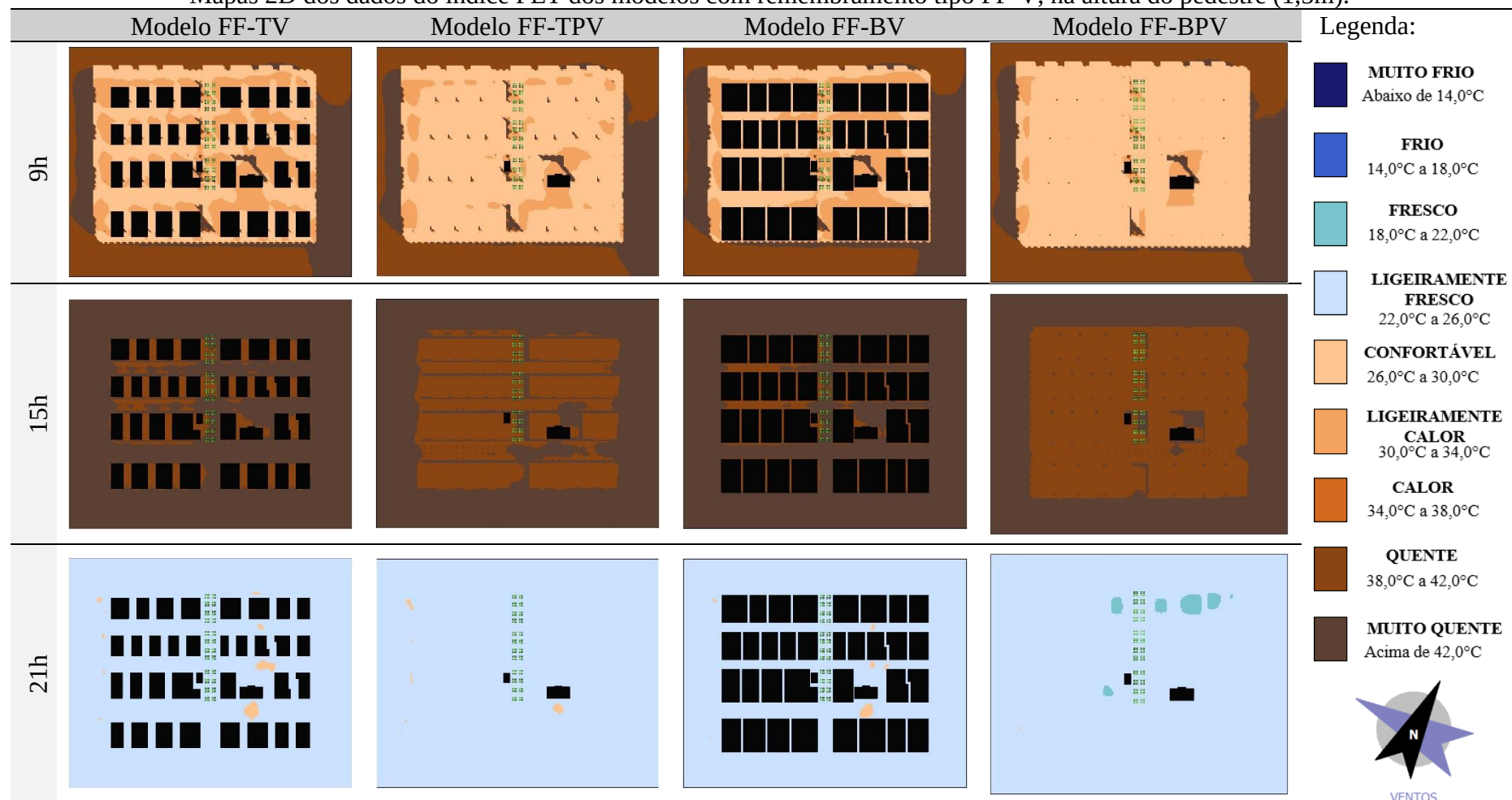
Fonte: Elaborado pela Autora.

Mapas 2D dos dados do índice PET dos modelos com remembramento tipo FF, na altura do pedestre (1,5m).



Fonte: Elaborado pela Autora.

Mapas 2D dos dados do índice PET dos modelos com remembramento tipo FF-V, na altura do pedestre (1,5m).



Fonte: Elaborado pela Autora.

APÊNDICE F - Imagens dos pontos de extração dos dados das variáveis climáticas, tomando como exemplo o cenário FF-T, às 11:30h

Imagem do Ponto Ponto 02 (79,126), na via secundária, com projeção do sombreamento



Imagem do Ponto Ponto 03 (79,66), na calçada, com projeção do sombreamento



ANEXO A - Dados climáticos coletados por Torres (2017), na estação INMET para o dia 03/01/2016 em Arapiraca/AL.

Tabela B1. Dados climáticos coletados no tecido Novo Horizonte no dia 03/01/2016.

Data	Temperatura do Ar	Umidade Relativa do Ar	Velocidade dos Ventos
01/03/16 12h0min0s	24.3	85	2,6
01/03/16 01h0min0s	24.3	82	2,2
01/03/16 02h0min0s	24.3	82	2
01/03/16 03h0min0s	24.2	80	2,5
01/03/16 04h0min0s	23.4	84	1
01/03/16 05h0min0s	23.1	85	0,6
01/03/16 06h0min0s	23.9	85	1,7
01/03/16 07h0min0s	26.7	69	3
01/03/16 08h0min0s	29.1	58	2,7
01/03/16 09h0min0s	31.1	51	2,1
01/03/16 10h0min0s	33.1	44	2,6
01/03/16 11h0min0s	34.8	40	2,6
01/03/16 12h0min0s	36.3	35	2,8
01/03/16 01h0min0s	36.9	33	2,6
01/03/16 02h0min0s	37.3	30	2,7
01/03/16 03h0min0s	37.9	29	2,8
01/03/16 04h0min0s	37.0	33	4
01/03/16 05h0min0s	32.4	40	1,5
01/03/16 06h0min0s	30.3	67	3,3
01/03/16 07h0min0s	29.0	72	3,5
01/03/16 08h0min0s	28.3	75	3,4
01/03/16 09h0min0s	27.4	77	3,9
01/03/16 10h0min0s	26.6	79	2,6
01/03/16 11h0min0s	26.1	81	2,4
Média	29,5	62,3	2,5
Máxima	37,9	85	4
Mínima	23,1	29	0,6
Amplitude	14,8	56	3,4

Fonte: Torres (2017).