DIANA CARLA RODRIGUES LIMA

**Forma e arborização em cânions urbanos:
tendências de estresse térmico para o pedestre em cenários
futuros de Umuarama/PR**

**SÃO CARLOS
2018**

DIANA CARLA RODRIGUES LIMA

**Forma e arborização em cânions urbanos:
Tendências de estresse térmico para o pedestre em cenários futuros de Umuarama/PR**

Versão Corrigida

(Versão original encontra-se na unidade que aloja o Programa de Pós-graduação)

Tese apresentada ao Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo.

Área de Concentração: Arquitetura,
Urbanismo e Tecnologia

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Rosana Maria Caram

**SÃO CARLOS
2018**

AUTORIZO A REPRODUCAO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRONICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Instituto de Arquitetura e Urbanismo
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L732f   Lima, Diana Carla Rodrigues
            Forma e arborização em cânions urbanos: tendências
            de estresse térmico para o pedestre em cenários
            futuros de Umuarama/PR. / Diana Carla Rodrigues
            Lima; orientadora Rosana Maria Caram . -- São
            Carlos, 2017.
            251 p.

            Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em
            Arquitetura e Urbanismo, Arquitetura, Urbanismo e
            Tecnologia) -- Instituto de Arquitetura e Urbanismo,
            Universidade de São Paulo, 2017.

            1. conforto térmico em espaços abertos. 2.
            geometria urbana. 3. arborização urbana. 4.
            planejamento urbano bioclimático. 5. modelagem
            microclimática. I. Caram , Rosana Maria, orient. II.
            Título.]

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Diana Carla Rodrigues Lima**

Título da tese: **"Forma e arborização em cânions urbanos: tendências de estresse térmico para o pedestre em cenários futuros de Umuarama/PR"**

Data da defesa: **07/11/2017**

Orientador: **Profa. Dra. Rosana Maria Caram**

Comissão Julgadora:

Resultado:

Profa. Dra. Rosana Maria Caram
(IAU/USP)

Aprovada

Profa. Dra. Karin Maria Soares Chvatal
(IAU/USP)

APROVADA

Profa. Dra. Carolina Lotufo Bueno Bartholomei
(UNESP)

aprovada

Prof. Dr. Paulo Fernando Soares
(UEM)

APROVADA

Prof. Dr. Wiclef Dymurgo Marra Junior
(EESC/USP)

APROVADA

Coordenadora e Presidente da Comissão de Pós-Graduação do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo: **Profa., Dra. Cibele Saliba Rizek.**

Dedico esse trabalho aos meus pais, Alberto e Regina, por tudo.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente a Deus, sempre presente em minha caminhada.

À minha família, minha eterna gratidão. Agradeço aos meus pais, Alberto e Regina, por terem possibilitado minha trajetória de estudos, por sempre me estimularem a alcançar meus objetivos e por me darem forças em todos os momentos. A constante determinação dos dois em alcançar seus ideais é um grande exemplo para minha própria busca. Aos meus irmãos, por todo o apoio e carinho. Ao Diego, pelo incentivo e companheirismo.

Meu muito obrigada a professora Dr^a. Rosana Maria Caram, por ter compartilhado comigo seu conhecimento, pela orientação e dedicação. Além disso, a força e incentivo transmitidos por ela foram essenciais para que eu concluísse esse trabalho.

Agradeço às professoras Dr^a. Carolina Lotufo Bueno-Bartholomei e Dr^a. Karin Maria Soares Chvatal pelas contribuições na banca de qualificação, essenciais para o andamento e conclusão dessa pesquisa.

Ao professor Dr. Paulo Fernando Soares, pelo constante apoio e também por ter me incentivado a pesquisar o conforto térmico em espaços abertos quando me orientou no mestrado.

À querida amiga Layane, pela amizade e apoio durante toda a pesquisa. Aos colegas de doutorado, professor Igor, Ariela e Mena, pelo companheirismo e incentivo. Às amigas de conforto, Mariana e Marieli, pela troca de experiências e constante encorajamento. A todos os colegas da Universidade Estadual de Maringá, pela frequente motivação.

Ao Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos da Universidade de São Paulo, por ter possibilitado a realização dessa pesquisa. Meus sinceros agradecimentos a todos os professores e funcionários.

E finalmente, agradeço a todos que colaboraram e participaram desta pesquisa de forma direta ou indireta.

Resumo

LIMA, Diana Carla Rodrigues. Forma e arborização em cânions urbanos: tendências de estresse térmico para o pedestre em cenários futuros de Umuarama/PR. 2017. 251p. Tese (Doutorado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Paulo, São Carlos, 2017.

A evolução da forma urbana adequada ao seu contexto climático é determinante para a qualidade ambiental dos espaços abertos. Porém, em diversas cidades o crescimento urbano acelerado ocorre quase sem nenhum controle ou planejamento. Esse descontrole é apontado como causa de prejuízos ao ambiente natural e construído, entre eles, o desconforto térmico nos espaços abertos. No Brasil, o Plano Diretor é o instrumento dos governos municipais que regula o desenho urbano; no entanto, nota-se um distanciamento entre os aspectos ambientais e a formulação dos planos e leis municipais. A cidade de Umuarama, no noroeste do Paraná, tem assistido a um intenso crescimento urbano, porém, ainda há na cidade uma flexibilidade para a gestão da forma urbana. Atualmente, está em fase de aprovação o novo Plano Diretor Municipal, que propõe a ampliação da área urbana onde é permitida a verticalização, e o Plano Municipal de Arborização Urbana, que busca promover o controle e o aumento da arborização urbana. Face ao proposto pelos planos, essa pesquisa tem como objetivo principal verificar as tendências de estresse térmico no nível do pedestre em futuros cenários de cânions urbanos na área central de Umuarama. O cânion urbano, referente ao espaço conformado pela via e edifícios adjacentes, foi adotado como objeto de estudo por se constituir na menor unidade microclimática urbana e no principal espaço aberto de uso público. A metodologia aplicada se baseia em levantamento de dados em campo; simulação de diferentes cenários de configuração urbana através de modelagem microclimática com o programa ENVI-met, para situação de verão e inverno; e aplicação do índice de conforto térmico Temperatura Fisiológica Equivalente - PET. Os resultados demonstraram que diferentes combinações dos parâmetros da forma urbana, especificamente, da geometria do cânion urbano e arborização presente no seu interior, resultam em tendências diversas de estresse térmico para o pedestre. Os maiores níveis de estresse térmico no nível do pedestre foram observados no período diurno, em situação de verão; esses níveis tendem a ser menores com o aumento da relação H/W e da arborização no interior dos cânions urbanos. Além disso, verificou-se menor amplitude térmica em cânions com maior cobertura verde. Em cânions urbanos com orientação N-S, o aumento da cobertura verde no interior do cânion urbano foi mais importante para a redução do índice PET do que em cânions com orientação L-O; por outro lado, nesses cânions com orientação L-O, o aumento da relação H/W foi mais representativo para minimizar o PET. A compreensão do comportamento do PET nos diversos cenários demonstrou que novas configurações da forma urbana são compatíveis com a qualidade ambiental dos espaços abertos desde que aplicadas estratégias do desenho urbano climaticamente orientado. Ao final, com base nos resultados, foram traçadas recomendações relacionadas à geometria e cobertura verde das vias urbanas a favor do conforto térmico dos usuários desses espaços.

Palavras-chave: conforto térmico em espaços abertos; cânions urbanos; geometria urbana; arborização urbana; planejamento urbano bioclimático; modelagem microclimática.

Abstract

LIMA, Diana Carla Rodrigues. Form and afforestation in urban canyons: trends of pedestrian thermal stress in future scenarios of Umuarama-PR. 2017. 251p. Thesis (Doctorate) - Architecture and Urban Design Institute of São Paulo, São Carlos, 2017.

The appropriate evolution of urban form for your climate context is determinant to open spaces environmental quality. However, it is observed that in several cities the accelerated urban growth occurs almost without any control or planning. This lack of control is pointed as the cause of damage to the built and natural environment, including the thermal discomfort in open spaces. In Brazil, the Master Plan is the instrument of the municipal governments that regulates the urban design; however, there is a gap between environmental aspects and the formulation of plans and municipal laws. The city of Umuarama in the Northwest of Paraná, has seen an intense urban growth, however, there is still a flexibility to the management of urban form. Actually, the new municipal Master Plan is in the approval phase, it proposes the expansion of the urban area where verticalization is permitted, and the municipal urban afforestation plan, that seeks to promote and control the increase of urban afforestation. In view of proposed plans, this research has as main objective to verify the trends of thermal stress in the pedestrian's level in future scenarios of urban canyons in the central area of Umuarama. The urban canyon, referring to the space formed by the via and adjacent buildings, was adopted as object of study because it is the smallest unit microclimatic and the main urban open space for public use. The methodology applied is based on in loco data collection; simulation of different scenarios of urban setting through microclimatic modeling with the ENVI-met program, for summer and winter condition; and application of thermal comfort index Physiological Equivalent Temperature - PET. The results showed that different combinations of the urban form parameters, specifically, the urban canyon geometry and afforestation present in your interior, result in various trends of thermal stress to the pedestrian. The highest levels of thermal stress in the pedestrian level were observed during the day, in summer; these levels trend to be smaller with increasing H/W ratio and afforestation in urban canyons. In addition, there has been less thermal amplitude in canyons with more green coverage. In urban canyons with N-S orientation, increasing the green coverage inside the urban canyon was more important for the reduction of the PET index than in the canyons with L-O orientation; on the other hand, in those canyons with L-O orientation, increasing the H/W ratio was more representative to minimize the PET. Understanding PET behavior in different scenarios demonstrated that new urban form settings are compatible with the open spaces environmental quality since applied urban design strategies climatically guided. In the end, based on the results, were delineated recommendations related urban streets geometry and green coverage in favour of thermal comfort of the users of these spaces.

Keywords: thermal comfort in open spaces; urban canyons; urban geometry; urban afforestation; bioclimatic urban planning; microclimatic modeling.

Lista de Figuras

Figura 1: População por determinação de tamanhos com dados históricos (1950-2010) e projetada com dados para 2050	32
Figura 2: Representação esquemática das camadas da atmosfera para abordagem do clima urbano	45
Figura 3: Representação esquemática das escalas climáticas e camadas verticais, (a) mesoescala, (b) escala local, (c) microescala	46
Figura 4: Representação esquemática do aquecimento noturno nos centros urbanos	48
Figura 5: Representação de cânions urbanos e diferentes formações microclimáticas no seu interior	62
Figura 6: Relação H/W (H/L) e Fator de Visão do Céu (Ψ)	73
Figura 7: Relação W/H: espaços claustrofóbicos, espaços de recolhimento e expansivo, respectivamente	74
Figura 8: Relação W/H e radiação solar	79
Figura 9: Fluxos de vento em cânions urbanos: (a) fluxo de rugosidade isolada; (b) fluxo com interferência de esteira; (c) fluxo turbulento	81
Figura 10: Relação entre urbanização e pressão ecológica em metrópoles mundiais	88
Figura 11: Relação entre a densidade construída e a forma arquitetônica	90
Figura 12: Localização Umuarama: Brasil – Paraná	117
Figura 13: Estado do Paraná – Mesorregiões Geográficas	117
Figura 14: Limites administrativos da região metropolitana do município de Umuarama – PR.	119
Figura 15: Mapa de Umuarama, espaços públicos e privados	122
Figura 16: Expansão urbana de Umuarama-PR	124
Figura 17: Vista aérea de Umuarama-PR e vista aérea noturna do centro da cidade	124
Figura 18: Zoneamento de Umuarama	126
Figura 19: Zoneamento proposto pelo novo PDM	130
Figura 20: Recorte do Zoneamento do PDM de 2004 e do proposto pelo novo plano de 2016	131
Figura 21: Fluxograma geral das fases metodológicas	136
Figura 22: Avenida Paraná, Umuarama – PR	139
Figura 23: Localização dos cânions urbanos de estudos	140
Figura 24: Mapa esquemático com a delimitação da área de estudo	142

Figura 25: Esquema da construção dos cenários de cânions urbanos	146
Figura 26: Localização do ponto de monitoramento das variáveis microclimáticas.....	152
Figura 27: Valores médios de temperatura do ar (°C) e de umidade relativa do ar (%) em São Paulo e em Umuarama	165
Figura 28: Gráfico comparativo entre a temperatura do ar (°C) observada e simulada para situação de inverno e verão e gráfico comparativo entre a umidade relativa do ar (%) observada e simulada para situação de inverno e verão	169
Figura 29: Gráfico comparativo entre a velocidade do ar (m/s) observada e simulada para situação de inverno e verão e gráfico comparativo entre a temperatura radiante média (°C) observada e simulada para situação de inverno e verão	170
Figura 30: Gráfico de Bland-Altman para a diferença de média das variáveis simuladas e observadas	171
Figura 31: Gráficos de ocorrência (%) dos níveis de estresse térmico em cada cenário de cânion urbano, considerando situação de verão e inverno	190
Figura 32: Gráfico de variação do PET nos cenários em relação a 22°C.....	191
Figura 33: Variação do PET por horários nos cenários com origem em C1(LO) – situação de verão e inverno, respectivamente.....	192
Figura 34: Variação do PET por horários nos cenários com origem em C2(NS) – situação de verão e inverno, respectivamente	192
Figura 35: Variação do PET por horários nos cenários com origem em C3(LO) – situação de verão e inverno, respectivamente.....	193
Figura 36: Variação do PET por horários nos cenários com origem em C4(NS) – situação de verão e inverno, respectivamente	193
Figura 37: Variação do PET diurno e noturno em função de H/W e CV nos cenários com origem em C1(LO) – situação de verão	199
Figura 38: Variação do PET diurno e noturno em função de H/W e CV nos cenários com origem em C1(LO) – situação de inverno	199
Figura 39: Variação do PET diurno e noturno em função de H/W e CV nos cenários com origem em C2(NS) – situação de verão	200
Figura 40: Variação do PET diurno e noturno em função de H/W e CV nos cenários com origem em C2(NS) – situação de inverno	200
Figura 41: Variação do PET diurno e noturno em função de H/W e CV nos cenários com origem em C3(LO) – situação de verão	201

Figura 42: Variação do PET diurno e noturno em função de H/W e CV nos cenários com origem em C3(LO) – situação de inverno	201
Figura 43: Variação do PET diurno e noturno em função de H/W e CV nos cenários com origem em C4(NS) – situação de verão.....	202
Figura 44: Variação do PET diurno e noturno em função de H/W e CV nos cenários com origem em C4(NS) – situação de inverno	202
Figura 45: Gráficos de dispersão entre H/W e $T_{rm}(^{\circ}C)$, entre H/W e $V(m/s)$ nos cenários com origem em C1(LO) e C3 (LO) e entre H/W e $V(m/s)$ nos cenários com origem em C2(NS) e C4(NS)	204
Figura 46: Gráficos de dispersão entre CV e $T_{rm}(^{\circ}C)$ e entre CV e $V(m/s)$	204
Figura 47: Gráficos de dispersão entre H/W e PET, por período e situação de inverno e verão	206
Figura 48: Gráficos de dispersão entre CV e PET, por período e situação de inverno e verão	206
Figura 49: Gráfico de superfície de resposta para a variável PET, de acordo com H/W e CV, para os dados diurnos	209
Figura 50: Gráfico de superfície de resposta para a variável PET, de acordo com H/W e CV, para os dados noturnos.....	211
Figura 51: Gráfico de superfície de resposta para a variável PET, de acordo com H/W e CV, para os dados diurnos dos cânions com orientação L-O.....	213
Figura 52: Gráfico de superfície de resposta para a variável PET, de acordo com H/W e CV, para os dados diurnos dos cânions com orientação N-S.....	215

Lista de Tabelas

Tabela 1: Absortância solar (α)	63
Tabela 2: Albedo dos materiais	66
Tabela 3: Classificação das UCZs.....	76
Tabela 4: Índices de conforto térmico usados em estudos de conforto térmico em espaços abertos	97
Tabela 5: Intervalos de conforto térmico do PMV e do PET	99
Tabela 6: Médias meteorológicas históricas de Umuarama, Paraná	120
Tabela 7: Parâmetros de uso e ocupação do solo para as zonas da área central de Umuarama	127
Tabela 8: Parâmetros de uso e ocupação do solo para as zonas da área central de Umuarama-ZCS1.....	129
Tabela 9: Classificação da LCZ.....	138
Tabela 10: Quadro resumo das características gerais dos cânions urbanos de estudo.....	141
Tabela 11: Configuração dos parâmetros de ocupação do solo para os cenários de cânions urbanos	144
Tabela 12: Quadro resumo das características dos cânions urbanos de estudo	147
Tabela 13: Configuração da espécie arbórea criada no modelo	156
Tabela 14: Dimensões e visualização da área modelada dos cânions urbanos	157
Tabela 15: Configuração dos dados de entrada no modelo.....	162
Tabela 16: Escala PET.....	164
Tabela 17: Resultado dos testes de concordância e do modelo de regressão entre as variáveis simuladas e observadas	172
Tabela 18: Legenda de cores e nível de estresse térmico na escala PET	173
Tabela 19: Legenda esquemática dos códigos utilizados nos cenários.....	174
Tabela 20: Índice PET médio nos cenários em situação de verão.....	174
Tabela 21: Índice PET médio nos cenários em situação de inverno.....	174
Tabela 22: Resultados das simulações no cânion urbano 1, situação de verão	175
Tabela 23: Resultados das simulações no cânion urbano 1, situação de inverno	176
Tabela 24: Resultados das simulações no cânion urbano 2, situação de verão	177
Tabela 25: Resultados das simulações no cânion urbano 2, situação de inverno	178
Tabela 26: Resultados das simulações no cânion urbano 3, situação de verão	179
Tabela 27: Resultados das simulações no cânion urbano 3, situação de inverno	180

Tabela 28: Resultados das simulações no cânion urbano 4, situação de verão	181
Tabela 29: Resultados das simulações no cânion urbano 4, situação de inverno.....	182
Tabela 30: Diagramas polares de obstrução da visão do céu – cenários com origem em C1 (LO)	183
Tabela 31: Diagramas polares de obstrução da visão do céu – cenários com origem em C2 (NS)	184
Tabela 32: Diagramas polares de obstrução da visão do céu – cenários com origem em C3 (LO)	185
Tabela 33: Diagramas polares de obstrução da visão do céu – cenários com origem em C4 (NS)	186
Tabela 34: Análise de covariância do modelo de regressão – dados diurnos	208
Tabela 35: Resultados do teste de <i>Tukey</i> para comparação entre as médias de PET dos níveis das variáveis horário, estação e cânion, para os dados diurnos.	208
Tabela 36: Análise de covariância do modelo de regressão – dados noturnos.....	210
Tabela 37: Resultados do teste de <i>Tukey</i> para comparação entre as médias de PET dos níveis das variáveis horário, estação e cânion, para os dados noturnos	211
Tabela 38: Análise de covariância do modelo de regressão – dados diurnos para os cânions com orientação L-O	212
Tabela 39: Resultados do teste de <i>Tukey</i> para comparação entre as médias de PET dos níveis das variáveis horário, estação e cânion, para os dados diurnos em cânions com orientação L- O.....	213
Tabela 40: Análise de covariância do modelo de regressão – dados diurnos para os cânions com orientação N-S	214
Tabela 41: Resultados do teste de <i>Tukey</i> para comparação entre as médias de PET dos níveis das variáveis horário, estação e cânion, para os dados diurnos em cânions com orientação N- S	215
Tabela 42: Recomendações de cobertura verde para diferentes intervalos de relação H/W em cânions urbanos com orientação L-O e delimitação dos intervalos no gráfico de contorno	219
Tabela 43: Sugestão de cobertura verde para relação H/W inferior a 0,39 para avenidas com orientação L-O de aproximadamente 35 metros de largura.....	220
Tabela 44: Sugestão de cobertura verde para relação H/W de 0,39 a 1,03 para avenidas com orientação L-O de aproximadamente 35 metros de largura.....	221
Tabela 45: Sugestão de cobertura verde para relação H/W inferior a 0,39 para ruas com orientação L-O de aproximadamente 16 metros de largura.....	222

Tabela 46: Sugestão de cobertura verde para relação H/W de 0,39 a 1,30 para ruas com orientação L-O de aproximadamente 16 metros de largura	223
Tabela 47: Sugestão de cobertura verde para relação H/W de 1,30 a 1,70 para ruas com orientação L-O de aproximadamente 16 metros de largura	224
Tabela 48: Recomendações de cobertura verde para diferentes intervalos de relação H/W em cânions urbanos com orientação N-S e delimitação dos intervalos no gráfico de contorno	225
Tabela 49: Sugestão de cobertura verde para relação H/W inferior a 1,06 para avenidas com orientação N-S de aproximadamente 35 metros de largura	226
Tabela 50: Sugestão de cobertura verde para relação H/W inferior a 1,06 para ruas com orientação N-S de aproximadamente 20 metros de largura	227
Tabela 51: Sugestão de coberturas verdes para relação H/W de 1,06 a 1,60 para ruas com orientação N-S de aproximadamente 20 metros de largura	228

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Coeficiente de Aproveitamento
CMNP	Companhia Melhoramentos Norte do Paraná
CNUMAD	Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
CO ₂	Dióxido de carbono
CV	Cobertura verde
FVC	Fator De Visão Do Céu
GEE	Gases de Efeito Estufa
H/W	Hight/ Width
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
LCZ	Local Climate Zone
L-O	Leste - Oeste
N-S	Norte - Sul
PDM	Plano Diretor Municipal
PET	Physiological Equivalent Temperature
PMA	Plano Municipal de Arborização Urbana
PMV	Predicted Mean Vote
WMO	World Climate Programme
UCL	Urban Canopy Layer

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO	CONCEITO	UNIDADE
Ta	Temperatura do ar	°C
Tg	Temperatura de globo	°C
Trm	Temperatura radiante média	°C
UR	Umidade relativa do ar	%
V	Velocidade do ar	m/s
ΔT_{u-r}	Intensidade da ilha de calor	°C
z0	Comprimento da rugosidade	

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	29
1.1	OBJETIVOS.....	34
1.2	HIPÓTESES.....	34
1.3	METODOLOGIA	34
1.4	ESTRUTURA DA TESE.....	35
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	37
2.1	O CRESCIMENTO URBANO E O PLANEJAMENTO URBANO BIOCLIMÁTICO	37
2.1.1	As questões ambientais e o crescimento urbano	38
2.1.2	A cidade e o clima urbano	43
2.1.3	O Planejamento Urbano Bioclimático e as Legislações Urbanísticas.....	51
2.2	INFLUÊNCIA DA FORMA URBANA NO CONFORTO TÉRMICO	60
2.2.1	Cânions urbanos	61
2.2.2	Propriedades térmicas dos materiais constituintes das áreas urbanas.....	63
2.2.3	Arborização urbana	68
2.2.4	Geometria urbana	73
2.2.5	Densidade urbana.....	84
2.3	ESTUDO DO CONFORTO TÉRMICO EM ESPAÇOS ABERTOS	92
2.3.1	Índices de conforto térmico para espaços abertos.....	94
2.3.2	O uso de simulação computacional microclimática para o estudo do conforto térmico em espaços abertos: o programa ENVI-met.....	102
3	AMBIENTE URBANO DE ESTUDO	117
3.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS.....	117
3.2	CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS.....	119
3.3	CIDADE PLANEJADA	120
3.4	CRESCIMENTO URBANO	122

3.5	LEGISLAÇÃO URBANA: PLANO DIRETOR MUNICIPAL E PLANO MUNICIPAL DE ARBORIZAÇÃO URBANA.....	125
4	MATERIAIS E MÉTODOS	135
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	136
4.1.1	Caraterísticas e delimitação dos cânions urbanos existentes	138
4.1.2	Caraterísticas dos cenários de cânions urbanos	143
4.2	LEVANTAMENTO DE DADOS E SISTEMATIZAÇÃO	151
4.2.1	Levantamento físico da área	151
4.2.2	Levantamento das variáveis climáticas.....	152
4.3	SIMULAÇÃO MICROCLIMÁTICA COM FERRAMENTA COMPUTACIONAL.....	153
4.3.1	Modelagem dos cânions urbanos	154
4.3.2	Configuração dos dados de entrada	161
4.3.3	Configuração e sistematização dos dados de saída.....	162
4.3.4	Análise de correspondência das medidas.....	162
4.4	APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE CONFORTO TÉRMICO PET	164
4.5	SISTEMATIZAÇÃO DOS DADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS	165
4.5.1	Apresentação e discussão dos resultados	165
4.5.2	Análise de correlação entre variáveis	166
4.5.3	Modelos de regressão linear múltipla	166
4.6	RECOMENDAÇÕES.....	168
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	169
5.1	ANÁLISE DE CORRESPONDÊNCIA DAS MEDIDAS.....	169
5.2	SIMULAÇÕES DOS CENÁRIOS DE CÂNIONS URBANOS.....	173
5.3	ANÁLISE DE CORRELAÇÕES ENTRE VARIÁVEIS.....	203
5.4	MODELOS DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA	207
5.4.1	Período diurno	207
5.4.2	Período noturno.....	210
5.4.3	Período diurno – cânions com orientação L-O	212

5.4.4	Período diurno – cânions com orientação N-S.....	214
6	RECOMENDAÇÕES	217
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	229
7.1	PRINCIPAIS RESULTADOS	229
7.2	APLICAÇÃO DO MODELO ENVI-MET	232
7.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	233
8	REFERÊNCIAS	235

1 INTRODUÇÃO

O ambiente urbano pode ser entendido como um ecossistema adaptado às necessidades do homem. Sua configuração, necessária ao seu funcionamento, se transforma ao longo do tempo para atender às necessidades da sociedade. No atual contexto, essas modificações são introduzidas de forma rápida e, muitas vezes, resultam em alterações adversas ao meio urbano, comprometendo o conforto térmico humano e diminuindo a qualidade de vida nessas áreas.

A concentração da população nas áreas urbanas é crescente. No Brasil, a população urbana representava em média 81% em 2000, tendo aumentado para 84% em 2010. Esse valor se eleva para 85,3% no estado do Paraná e para 92% na cidade de Umuarama, estudo de caso dessa pesquisa (IBGE, 2016). Da concentração da população em áreas urbanas decorre a maior vulnerabilidade das condições climáticas dos maiores centros em função da grande massa construída.

No Brasil, diversas cidades têm crescido quase sem nenhum controle ou planejamento, superando a capacidade dos governos locais em prover adequada infraestrutura e qualidade de vida aos usuários do espaço urbano. A ausente ou precária atuação de políticas públicas no controle e normalização do uso do solo e das construções urbanas tem conduzido as cidades a reprodução de modelos urbanos de baixa qualidade ambiental. Por um lado, observa-se uma explosão da malha urbana, um forte processo de verticalização e uso intensivo do solo, e por outro, a proliferação de assentamentos que desconsideram, sobretudo, as restrições do sítio físico e climático (GOMES; LAMBERTS, 2009).

Esse descontrole causa sérios danos no ambiente natural e construído e ocasiona significativas alterações no campo térmico da cidade (ASSIS, 2006). Diversos estudos e pesquisas, realizados sob diversas opções metodológicas, apontam a inter-relação entre as características urbanas e o clima local resultante. Os principais parâmetros envolvem a densidade construída das áreas urbanas, uso do solo, a presença de vegetação arbórea, as propriedades térmicas dos materiais que compõe os elementos urbanos e seus edifícios e a geometria dos cânions urbanos (LOMBARDO, 1985; BARBIRATO, 1998; ASSIS, 2000; DUARTE, 2000; BUENO-BARTHOLOMEI, 2003; ELIASSON; SVENSSON, 2003; PEZZUTO, 2007; GOMES; LAMBERTS, 2009; GARTLAND, 2010; ARMSON et al., 2012; LABAKI et al. 2012, ANDREOU, 2014; MAKROPULOU; GOSPODINI, 2016).

As regulamentações urbanas voltadas ao planejamento da cidade deveriam assegurar que os usuários dos espaços urbanos e, essencialmente, os pedestres, estivessem bem servidos de espaços abertos de qualidade, porém, o desconforto térmico ou estresse térmico nas áreas abertas urbanas é apontado como uma das principais consequências das alterações climáticas na escala da cidade (JOHANSSON, 2006; MAVROGIANNI et al., 2011; ROSSI; KRÜGUER; NIKOLOPOULOU, 2011; PERINI; MAGLIOCCO, 2014; COUTTS et al., 2015; TALEGHANI et al., 2015).

Nesse passo, é importante ressaltar que a forma urbana, aqui entendida sob aspectos quantitativos, relativos a densidades construídas e livres, a geometria urbana e a composição das superfícies (LAMAS, 1992), exerce significativa influência no conforto térmico em áreas urbanas. Esses diversos elementos da forma urbana interagem de diferentes maneiras com o meio e impactam diretamente nas formações microclimáticas.

A menor unidade de análise dos microclimas urbanos, no que tange a forma urbana, é o cânion urbano. Ele se refere ao espaço conformado pela via e edifícios adjacentes e constitui uma unidade geométrica básica que pode ser usada para construir estruturas urbanas maiores (NAKAMURA; OKE, 1988). Os principais elementos que influenciam as alterações microclimáticas são a geometria, a orientação, a presença de coberturas verdes e o albedo das superfícies, sendo a densidade urbana um parâmetro determinante para essas características (NAKAMURA; OKE, 1988; OKE, 1988; PEARLMUTTER, 1998; BOURBIA; AWBI, 2004; SILVA, 2013; SHISHERGAR, 2013; ANDREOU, 2014; DIMITROVA et al., 2014; ERELL et al. 2014; MINELLA, 2014; COUTTS et al., 2015).

Diferentes combinações desses elementos afetam os ambientes exteriores em relação a temperatura do ar, temperatura superficial, permeabilidade e velocidade do vento, distribuição da radiação e da iluminação solar. A densidade construída e a porção de céu visível, resultante da geometria urbana, têm sido apontadas como condicionante do aquecimento noturno e a temperatura radiante média, como a principal variável determinante do nível de estresse térmico diurno nesses ambientes (STEWART; OKE, 2012; ERELL et al., 2014; MAKROPOULOU; GOSPODINI, 2016).

Dessa forma, a configuração dos cânions urbanos influi diretamente no conforto térmico dos espaços abertos, especialmente, no nível do pedestre. A aplicação de princípios bioclimáticos é imprescindível para a produção de um desenho urbano climaticamente orientado que proporcione conforto térmico nos espaços abertos (HIGUERRAS, 2006). A formação de um

microclima mais ameno atrai um maior número de pessoas para as áreas abertas, contribuindo para a habitabilidade e vitalidade urbanas, além disso aumenta a qualidade de vida dos milhares de pessoas que vivem nas cidades, incentivando atividades ao ar livre e, principalmente, encorajando os moradores da cidade a diminuir o uso de veículos motorizados (CHEN; NG, 2011; ERELL; PEARMUTTER; WILLIAMON, 2011; ROSSI; KRUGER; NIKOLOPOULOU, 2011).

No Brasil, o Plano Diretor é o instrumento dos governos municipais direcionado à definição do padrão de desenvolvimento da ocupação urbana do seu território e, consequentemente, regulador do desenho urbano. Com a aprovação do Estatuto da Cidade, em 2001 (BRASIL, 2001), criou-se a possibilidade de desenvolver estudos urbanísticos considerando aspectos ambientais para a qualidade urbana que sirvam de subsídio para a elaboração do Plano Diretor. Porém, no Estatuto as questões referentes aos aspectos ambientais do desenho urbano são tratadas de forma simplificada e genérica, resultando no distanciamento entre o urbanismo bioclimático e a formulação dos planos e leis municipais.

De acordo com pesquisas conduzidas pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas - IPCC (SETO et al, 2014), é importante que pesquisas e estratégias de planejamento urbano associadas ao clima urbano sejam direcionadas para cidades de pequeno e médio porte de países em desenvolvimento, uma vez que um terço do crescimento da população urbana entre 1950 e 2010 (1,16 bilhões) ocorreu nesses assentamentos (Figura 1). Nessas áreas de rápida expansão urbana, onde é esperada a maior parte do crescimento urbano no futuro, há maior flexibilidade para a gestão da forma urbana e da infraestrutura, mas muitas vezes existe uma capacidade limitada de governança, técnica, financeira e institucional.

A cidade de Umuarama, com pouco mais de 100.000 habitantes, localizada na região Noroeste do estado do Paraná, se enquadra nessas características. Fundada em 1955 (IBGE, 2010) pela Companhia Melhoramentos Norte do Paraná, ela faz parte de uma rede de cidades, fundadas pela mesma companhia, cujos traçados urbanos atestavam uma qualidade urbanística e ambiental inicial que as distinguiam no cenário nacional (REGO; MENEGUETTI, 2008). Além disso, a Companhia arborizou a cidade e reservou áreas verdes urbanas para minimizar o impacto negativo com queimadas e cortes de árvores nativas para sua colonização (MENEGUETTI, 2007).

Figura 1: População por determinação de tamanhos com dados históricos (1950-2010) e projetada com dados para 2050
Fonte: adaptado de UN DESA (2010).

No entanto, nos últimos anos, motivada pelos programas governamentais de estímulo à construção civil e pelas circunstâncias econômicas nacionais e locais, a cidade assistiu a um crescimento urbano nunca antes ocorrido na região (HULSMAYER, 2014). Historicamente, sabe-se que todo processo acelerado de expansão imobiliária pode extrapolar a capacidade dos governos locais em prover adequada infraestrutura e qualidade de vida aos usuários do espaço urbano e assim acarretar impactos negativos às cidades.

O crescimento urbano de Umuarama tem sido predominantemente horizontal, através da incorporação de novas glebas ao uso urbano durante o processo de parcelamento, na forma de loteamentos, desmembramentos ou condomínios, já o processo de verticalização não ocorre de forma intensa, mas já se faz presente. Recentemente, um vídeo institucional do município divulgou Umuarama como a cidade com maior número de edifícios por habitante. Acredita-se que a partir da aprovação do novo Plano Diretor de Umuarama (2016), que se encontra em fase de aprovação, a verticalização poderá ser mais intensa, uma vez que o plano propõe a ampliação da área da cidade onde a verticalização será permitida, essencialmente em áreas pertencentes ao plano original da cidade.

Na lei de uso e ocupação do solo de Umuarama, pertencente ao novo Plano Diretor, observa-se que, assim como em avenidas mais largas, com canteiro central arborizado e áreas permeáveis, como em ruas estreitas sem canteiros, é prevista a mesma taxa de ocupação e números de pavimentos. Além disso, também pode ser observada, nessa mesma área central,

a diminuição da massa arbórea devido a remoção, pouco criteriosa, de espécies arbóreas em frente às fachadas comerciais.

Quanto a arborização, está em fase de desenvolvimento na cidade o Plano Municipal de Arborização Urbana, que prevê a manutenção das espécies existentes, preenchimentos das áreas “sem sombra” e regras para a arborização da cidade. No entanto, apesar da preocupação com a manutenção do verde urbano observa-se que, em consonância com a legislação específica de muitas cidades brasileiras, não existem prescrições urbanísticas peculiares à produção qualificada dos espaços construídos ou que visem manter a qualidade ambiental do seu traçado original. Faltam parâmetros que considerem o clima urbano como condição indissociável em sua construção por meio dos quais o crescimento da cidade possa ser regulado e orientado, essencialmente enquanto ainda existe flexibilidade para a melhor definição da forma urbana.

Perante o exposto, lança-se o **questionamento**: como a consolidação das propostas dos planos municipais no cenário urbano irão influenciar o microclima da cidade e, conseqüentemente, o conforto térmico dos seus usuários?

Corroborando com essas preocupações, Erell, Pearlmutter e Williamson (2011), assim como Yang, Wong e Li (2016), apontam que existe uma clara necessidade de pesquisas que estabeleçam uma relação entre alterações microclimáticas devido a diferentes desenhos urbanos e o conforto em espaços abertos.

Assim, uma forma de responder esse questionamento é através do estudo de diferentes configurações que o desenho urbano pode assumir, face ao proposto pelos planos, através de modelagem microclimática, o que possibilita a verificação das tendências de estresse térmico que os recintos urbanos podem proporcionar.

Nessa pesquisa, adotou-se a menor unidade microclimática urbana como **objeto de estudo**, o cânion urbano, aqui representado pelo espaço conformado entre a via e os edifícios no seu alinhamento. A via pública é o principal elemento de composição da forma urbana e o principal espaço aberto de uso público, onde se estabelecem inúmeras relações e interferências ambientais (ROMERO, 1998). Além disso, optou-se por vias localizadas no centro da cidade, de grande importância para a dinâmica urbana e onde existe maior concentração de pedestres.

1.1 OBJETIVOS

O **objetivo principal** da pesquisa é verificar as tendências de estresse térmico no nível do pedestre em cenários de cânions urbanos na área central de Umuarama, Paraná, face as transformações de forma urbana previstas pelo Plano Diretor Municipal e Plano de Arborização Urbana do município.

Os objetivos específicos são:

- Analisar os efeitos da forma urbana, essencialmente da arborização e da geometria do cânion, no microclima do cânion urbano;
- Avaliar a aplicação do programa de modelagem microclimática ENVI-met para a pesquisa proposta;
- Contribuir, através dos resultados, com o desenho urbano que proporcione conforto térmico aos usuários dos espaços abertos do local de estudo.

1.2 HIPÓTESES

Com fundamento nas diversas interações microclimáticas que ocorrem no interior do cânion urbano e sua influência no conforto térmico dos espaços abertos, trabalha-se com a seguinte hipótese: diferentes combinações dos parâmetros da forma urbana, particularmente, da geometria do cânion urbano e arborização presente no seu interior, resultam em tendências diversas de estresse térmico para o pedestre; a compreensão desse comportamento pode contribuir com o direcionamento do desenho urbano climaticamente orientado no que diz respeito à conciliação dos planos municipais.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia aplicada é apoiada em levantamento de dados em campo e simulação computacional. Ela se baseia na avaliação do estresse térmico no nível do pedestre através de modelagem microclimática computacional de cenários de cânions urbanos elaborados a partir de situações existentes e propostas pelo novo Plano Diretor Municipal e do Plano de Arborização Urbana. A construção dos cenários futuros envolve transformações na geometria urbana e na arborização. A simulação dos cenários foi feita para situação de verão e de inverno.

Ela se divide em seis etapas principais:

- Caracterização da área de estudo;
- Levantamento de dados microclimáticos e sistematização;
- Simulação microclimática com o programa ENVI-met;
- Aplicação do índice de conforto térmico Temperatura Fisiológica Equivalente -PET, com a utilização do programa RayMan;
- Sistematização dos dados e análise dos resultados;
- Recomendações.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

A tese está estruturada em 7 capítulos, sendo o primeiro esta introdução, que apresenta a justificativa do tema, o objeto de estudo, objetivos da pesquisa, hipóteses e metodologia.

O capítulo 2 apresenta o fundamento teórico da pesquisa importantes para a compreensão dos conceitos e técnicas considerados nessa pesquisa. Nele discute-se como as questões ambientais são discutidas e inseridas no contexto urbano face ao seu acelerado crescimento. Caracteriza-se o urbanismo bioclimático, e aborda-se, de um lado, a importância de um planejamento urbano climaticamente orientado e do outro, a presença de legislações urbanas distanciadas dessa preocupação. Também são apresentados os elementos da forma urbana que exercem influência no microclima urbano e no conforto térmico em espaços abertos. Por fim, são abordados os índices de conforto térmico utilizados para estudo de conforto térmico em espaços abertos, assim como a realização desses estudos através da modelagem microclimática computacional.

O capítulo 3 apresenta a área em estudo, a cidade de Umuarama, no Paraná. São apresentadas as características gerais e históricas da cidade e as particularidades em relação ao crescimento urbano. Também são abordadas as alterações propostas do novo Plano Diretor Municipal, referente aos parâmetros de uso e ocupação do solo, e a elaboração do Plano Municipal de Arborização Urbana.

O capítulo 4 aborda a metodologia e os materiais utilizados na presente pesquisa. Nele são descritas cada etapa para a realização da pesquisa, assim como os procedimentos utilizados para o levantamento de dados, simulação microclimática computacional, a forma de análise dos dados e testes estatísticos aplicados.

No capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados através de quadros, tabelas e gráficos e também através da aplicação de testes estatísticos. No capítulo 6, com base nos resultados, são propostas recomendações dos parâmetros da forma urbana de estudo que visem menores níveis de estresse térmico nos pedestres. Por fim, no capítulo 7 são expostas as considerações finais acerca da pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esse capítulo tem como objetivo caracterizar e discutir os fundamentos teóricos importantes para a compreensão dos conceitos e técnicas considerados nessa pesquisa. O capítulo está dividido em 3 seções. Na seção 2.1 discute-se a importância da aplicação de um planejamento urbano alinhado com o clima urbano local, assim como das legislações urbanísticas, para a mitigação dos efeitos adversos que o acelerado crescimento urbano tem ocasionado.

Na seção 2.2 são abordados os elementos da forma urbana que, por condicionarem a formação dos microclimas na cidade, atuam na sensação de conforto térmico nos espaços internos e, principalmente, externos. Por fim, na seção 2.3 são discutidos estudos de conforto térmico em espaços abertos, através dos índices utilizados nas avaliações, em especial o índice PET utilizado nessa pesquisa, e também, da realização desses estudos através de modelagem microclimática computacional.

2.1 O CRESCIMENTO URBANO E O PLANEJAMENTO URBANO BIOCLIMÁTICO

O ambiente urbano pode ser entendido como um ecossistema adaptado às necessidades do homem. Seu funcionamento implica na configuração de um metabolismo próprio, responsável pela maioria das modificações ambientais. Contudo, essas modificações ambientais são introduzidas de forma rápida e intensa, o que se traduz na dinâmica urbana e tem por consequência alterações adversas ao meio urbano e à própria sociedade, comprometendo sua qualidade de vida e seu desenvolvimento sustentado.

Os efeitos causados pela urbanização e ação antrópica são sentidos pelas alterações climáticas decorrentes das mudanças das características térmicas da superfície, de novos padrões de circulação do ar, da impermeabilização da superfície, da alta densidade construída e do calor gerado pelas atividades humanas. A soma desses fatores produz um clima distinto do clima encontrado na área rural; a área urbana apresenta valores de temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, quantidade de radiação solar, precipitações, nebulosidade e poluição diferentes dos existentes nas áreas rurais próximas a ela.

Como resultado das alterações climáticas locais, observa-se o desconforto térmico tanto nas áreas abertas como no interior dos edifícios. Um planejamento urbano adequado considerando os aspectos ambientais pode minorar os impactos ao meio, e propiciar maior conforto térmico aos usuários. Dessa forma, faz-se necessária uma compreensão dos

elementos participantes desse processo e de como o planejamento urbano bioclimático pode atuar na mitigação dos efeitos do crescimento urbano e na busca pelo conforto térmico nas áreas urbanas, sendo este o objetivo desta seção.

2.1.1 As questões ambientais e o crescimento urbano

O crescimento acelerado das áreas urbanas tem sido visto como símbolo de uma crise ambiental. No Brasil, assim como em outros países em desenvolvimento, as cidades têm crescido praticamente sem nenhum controle ou planejamento, ultrapassando a capacidade dos governos locais em prover adequada infraestrutura e qualidade de vida. Este tipo de processo de urbanização causa sérios impactos no ambiente natural e construído, sendo um dos efeitos mais adversos aquele que se manifesta na atmosfera local.

O movimento moderno criou um paradigma de cidade não mais admissível ao panorama atual. Conforme Assis (2005), a cidade moderna, devido ao seu modo de organização e concentração de atividades, produz mudanças significativas sobre seus estratos naturais de suporte; essa cidade também é fruto de certos condicionantes energéticos historicamente específicos, tais como a garantida e maciça apropriação de recursos, até então facilmente transportáveis e a preços acessíveis.

Até meados do século XX, essas condições deram apoio, à desagregação funcional da Cidade Moderna, como preconizava a Carta de Atenas, documento síntese dos princípios urbanísticos desse período. Assim, a cidade industrializada contemporânea, que surgiu desses princípios, aplicados em maior ou menor proporção à praticamente todas as partes do mundo, é resultado de um modelo urbano concentrador e, ao mesmo tempo, dispersador de recursos, que foi respaldado pelo paradigma de um aporte constante e ilimitado de energia a baixo-custo (ASSIS, 2005).

A partir de meados do século passado, no entanto, uma nova visão veio se desenvolvendo, no sentido de ajustar as áreas urbanas às novas restrições quanto a utilização de recursos ambientais. As discussões internacionais desenvolvidas a partir daí alertavam quanto às previsões e alertas a respeito do crescimento da população mundial e o consequente crescimento das cidades e de suas demandas por todos os tipos de recursos e, dessa forma, apontaram tanto para os efeitos de uma crise energética de proporções mundiais quanto para o impacto ambiental gerado pelo consumo da energia de base fóssil (BRANDÃO, 2009).

Na linha do tempo, a discussão das relações entre o homem e as questões ambientais iniciou-se na Conferência de Estocolmo (United Nations Conference on the Human Environment), realizada em 1972. No entanto, a problemática urbana, em conjunto com a discussão sobre as questões ambientais, passou a ser abordada apenas a partir de duas conferências que discutiram questões relacionadas com o tema da habitação social, Habitat I, em Vancouver, em 1976 e vinte anos depois, Habitat II, em 1996, em Istambul. Sua importância se deu em debater a cidade enquanto estrutura determinada pelos seres humanos para viver em sociedade e prover suas necessidades e não um mal a ser evitado (TORRES et al. 2013).

Em 1987, entre estas duas conferências, o Relatório de Brundtland, Nosso Futuro Comum, como resultado do trabalho da Comissão Mundial para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (World Commission on Environment and Development), divulgou a primeira definição de desenvolvimento sustentável como sendo o “modelo de desenvolvimento que satisfaz as necessidades das gerações presentes sem afetar a capacidade de gerações futuras de também satisfazer suas próprias necessidades” (BRUNDTLAND, 1987).

Nas décadas seguintes, foram realizadas grandes conferências mundiais, como a Conferência das Nações Unidas Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), no Rio de Janeiro, em 1992, a Rio+10, em Johannesburgo, em 2002, e mais recentemente, em 2012, a Rio +20, também no Rio de Janeiro. Nessas conferências, protocolos internacionais foram firmados a fim de rever as metas e elaborar mecanismos para o desenvolvimento sustentável, sendo ainda, um importante tema em debate, o desafio global de melhorar o nível de consumo da população de menor renda e diminuir o impacto ambiental dos assentamentos humanos no planeta.

No Brasil, ainda na década de 70, a questão ambiental começou a ser discutida timidamente quando foram criadas instituições não governamentais preocupadas com a questão e, mais tarde, as agências ambientais governamentais. Até a década de 80 estes foram os dois principais agentes da questão ambiental, agindo basicamente com enfoque na preservação ambiental, combatendo a poluição industrial e a destruição de belezas paisagísticas por empreendimentos humanos e preservando algumas amostras de ecossistemas. É importante considerar que houve uma importação acrítica do modelo internacional, que deixou de fora questões como o controle populacional e o saneamento básico, que já haviam sido resolvidas nos países industrializados. A realização CNUMAD em 1992 no Rio de Janeiro, a Rio 92, foi o marco definitivo da questão ambiental no Brasil (BRANDÃO, 2009).

Da CNUMAD, foram produzidos importantes documentos, destacando a Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas e a Agenda 21 Global. A Agenda 21 Brasileira elaborou um panorama da realidade nacional e apontou como principais entraves para a sustentabilidade das cidades brasileiras, o acesso à terra, o déficit habitacional, o saneamento ambiental, o transporte e o trânsito. Sob a forma de estratégias, a agenda apresenta as propostas para a construção da sustentabilidade das cidades brasileiras, que se referem, entre elas, ao uso e ocupação do solo urbano, buscando a melhoria das condições de vida da população e da qualidade ambiental e aos padrões de produção e consumo da cidade, com o objetivo de reduzir os custos e desperdícios e incentivando o desenvolvimento de tecnologias urbanas sustentáveis (CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE O MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, 1995).

De forma geral, essas conferências foram marcadas por disputas ideológicas, econômicas e políticas, e as ações seguintes continuam aquém das expectativas e muitos problemas ambientais não foram solucionados. Nelas, consolidou-se a visão do desenvolvimento sustentável como a base para a elaboração de políticas relacionadas ao meio-ambiente e crescimento urbano e, embora isso sugira que haja um consenso nos meios científicos e políticos, o desenvolvimento sustentável ainda é um conceito amplo e de difícil aplicação prática.

A temática do desenvolvimento sustentável, assim como sua conceituação, continua em evolução e tem sido alvo de várias discussões. Acseirad (2009) define a sustentabilidade urbana como a capacidade das políticas urbanas se adaptarem à oferta de serviços, à qualidade e à quantidade das demandas sociais, buscando o equilíbrio entre as demandas de serviços urbanos e investimentos em estrutura. No âmbito das cidades, um dos principais conceitos de sustentabilidade defendidos na atualidade baseia-se na necessidade do equilíbrio entre *inputs* e *outputs* no sistema urbano, resgatando referências do conceito de ecossistema. Assim, de acordo com Barbirato, Barbosa e Torres (2012), a sustentabilidade urbana estaria mais próxima quanto menor o fluxo de entrada e saída de energia, materiais e resíduos de sua área.

No entanto, encontram-se na literatura, alertas sobre a crescente banalização do uso do termo “desenvolvimento sustentável”, que atualmente tem sido usado em discursos para reforçar diferentes interesses tanto políticos quanto econômicos, não incorporando princípios básicos para o efetivo alcance do desenvolvimento sustentável em ações governamentais.

Costa (2000) afirma que o consenso gerado em torno do termo, na verdade, é muito mais resultado de sua generalidade e imprecisão do que da sua consistência.

É consenso e manifesta, entretanto, a necessidade de se pensar em soluções que promovam o resgate da qualidade de vida nas áreas urbanas e a redução dos impactos ambientais, tanto no nível do consumo de recursos naturais, quanto no da produção de resíduos. Ou seja, o processo de urbanização deve ser baseado no redirecionamento do atual padrão de produção e consumo da cidade, a partir da otimização da relação do homem com o meio natural.

Dentre os aspectos consensuais nesse cenário, Roméro e Reis (2012), também destacam a grande importância do setor energético que, juntamente com os setores de água e saneamento, de transportes e telecomunicações, edifícios e ambiente construído, forma a infraestrutura essencial para qualquer modelo de desenvolvimento, principalmente quando se verifica a sinergia existente entre a energia e esses setores da infraestrutura.

As áreas urbanas concentram grande parte da população mundial e das atividades econômicas, sociais, culturais, e o acelerado processo de expansão pelo qual essas áreas passam resulta numa demanda e consumo crescentes de energia, água e outras matérias-primas. Além do crescimento acelerado, outra característica importante da urbanização é a concentração. A população urbana não vem só crescendo, mas se concentrando cada vez mais em grandes cidades, o que corrobora ainda mais com o aumento da pressão no meio natural, o impacto no clima em escala local e, possivelmente, global.

Em 1988, foi criado o Intergovernmental Painel on Climate Change (IPCC), configurado pela World Meteorological Organization (WMO) e United Nations Environment Program (UNEP), para preparar, com base nas informações científicas disponíveis, avaliações sobre todos os aspectos da mudança climática e seus impactos, com vista à formulação de estratégias com respostas mais realistas (IPCC, 2014).

De acordo com uma pesquisa conduzida pelo IPCC, a urbanização é uma tendência mundial com consequências significativas para emissões de efeito estufa e alterações climáticas. Atualmente mais da metade da população vive em áreas urbanas e a cada semana a população urbana global aumenta em 1,3 milhões. Até 2050, estima-se que a população urbana global irá aumentar de 2,5 a 3 bilhões e corresponderá de 64% a 69% da população mundial. Fato agravante é que a expansão das áreas urbanas é em média duas vezes mais rápida do que o crescimento da população urbana e o aumento esperado de cobertura do

solo urbano, durante as primeiras três décadas do século XXI, será maior que a expansão urbana cumulativa em toda a história humana (SETO et al., 2014).

As áreas urbanas geram cerca de 80% do produto interno bruto (PIB), o que estabelece a relação de urbanização com o aumento da renda; a maior renda urbana, por sua vez, está correlacionada com maior consumo de uso de energia e as emissões de gases poluentes. Em 2006, as áreas urbanas representavam de 67 a 76% do consumo de energia e de 71 a 76% das emissões de gás carbônico (CO²) relacionadas com a energia. A emissão de gases poluentes, dentre os quais, o mais conhecido o CO², apresenta ainda outro desdobramento climático, o efeito estufa (GEE). As emissões desses gases absorvem a radiação infravermelha emitida pela Terra, dificultando o seu resfriamento. Modelos e estudos feitos a partir de uma avaliação do IPCC indicam aumentos de 0,6°C na temperatura média global e que novos aumentos de até 4,5°C seriam possíveis, com o aumento resultante de até 80 cm no nível dos oceanos (IPCC, 2014).

Ainda de acordo com o IPCC (2014), a mudança climática global pode ser causada por processos naturais da própria Terra ou por forças externas, incluindo variações na intensidade da luz solar, ou ainda, pela ação do homem. Nesse sentido, o aumento da emissão de GEE é considerado uma das causas das alterações climáticas em curso. Em termos globais 14% da geração antropogênica de GEE é oriunda da agricultura e 17% da mudança do uso do solo e silvicultura; os quase 70% restantes correspondem a atividades majoritariamente urbanas: energia (26%), indústria (19%), transportes (13%) e construção (8%). Os estudos do IPCC apontam para a necessidade de reduzir essas emissões entre 50% a 85% até 2050, para manter o aquecimento global entre 2°C e 2,4°C.

Dessa forma, as áreas urbanas atuam como principais agentes no processo de mudança climática, seja no impacto do crescimento das áreas urbanas nas mudanças climáticas, seja no impacto das mudanças climáticas nas cidades, principalmente através do aumento da sua massa construída e aumento na demanda de energia.

Seto et al. (2014) apontam que as próximas duas décadas são uma oportunidade para mitigar os efeitos adversos das áreas urbanas já que grande parte das cidades do mundo irá se desenvolver principalmente durante este período. Os autores destacam, ainda, que os elementos chave do planejamento e projeto urbano são a densidade, uso misto do solo, conectividade e acessibilidade.

Nesse sentido, o documento brasileiro de Diretrizes para Formulação de Políticas Públicas em Mudanças Climáticas (BIDERMAN, 2009) aponta que o desafio da sustentabilidade urbana abrange a compatibilização das necessidades de ocupação e uso do solo pelo homem com a capacidade de suporte do território; esta condição está relacionada, principalmente, com o aumento do consumo de energia que contribui para o aumento das emissões de GEE. Apesar de genéricas, o documento propõe diretrizes com o objetivo de mitigar as mudanças climáticas no setor de energia, construção e transportes.

No Brasil, o acelerado processo de urbanização não acompanhou um planejamento urbano adequado na maioria de suas cidades. Conforme Gomes e Lamberts (2009), a ausência de políticas públicas que atuassem no sentido do controle e normalização do uso do solo e das construções urbanas encaminhou as cidades a reproduzir modelos urbanos de baixa qualidade ambiental. Observa-se uma explosão da malha urbana, um acelerado processo de verticalização e uso intensivo do solo, bem como a proliferação de assentamentos que desconsideram, sobretudo, as restrições do sítio físico e climático.

O crescimento acelerado e desordenado das cidades acarreta profundas consequências no desempenho do sistema do clima urbano e dessa forma é de fundamental importância o conhecimento do clima para o planejamento urbano adequado às necessidades ambientais.

2.1.2 A cidade e o clima urbano

O clima pode ser definido como a feição característica e permanente do tempo, num lugar, em meio as suas infinitas variações; ele é a condição média do tempo em uma dada região, baseada em medições. Tempo, por sua vez, estado essencialmente variável, é o estado atmosférico em determinado momento, considerado em relação a todos os fenômenos meteorológicos como temperatura, umidade e ventos (MASCARÓ, 2004).

São considerados fatores climáticos globais, as condicionantes que determinam e dão origem ao clima em seus aspectos mais gerais: a radiação solar, latitude, longitude, altitude, ventos, massa de terra e água; já a temperatura, a umidade, as precipitações, a nebulosidade, a velocidade e direção dos ventos e a insolação, como os condicionantes externos do clima geral (ROMERO, 1983).

Conforme Monteiro (2003), a modificação substancial de um clima local ocasionada pela urbanização caracteriza o clima urbano. Assim, o clima urbano pode ser definido como um

sistema que abrange o clima de um determinado espaço terrestre e sua urbanização. O clima urbano, apesar de local, está intimamente relacionado com o clima regional, numa escala mais ampla, mas também pode ser subdividido em escalas menores até chegar aos microclimas.

A climatologia urbana, estudo científico do clima urbano, possui uma longa história. Estudos sobre o clima urbano iniciaram no começo do século XIX, na Europa. O trabalho de Luke Howard (1833 apud BARBOSA, 2005) publicado pela primeira vez em 1818, sobre o clima de Londres, foi um dos primeiros trabalhos a observar as diferenças de temperatura na cidade em relação ao meio rural, por meio da análise de observações meteorológicas.

Após a Segunda Guerra Mundial, muitos trabalhos foram desenvolvidos acerca da temática do clima urbano, principalmente nos Estados Unidos, Japão e Europa, devido à intensificação do processo de crescimento e expansão das áreas urbanas. Destacam-se os estudos de Landsberg (1956) que representa o marco histórico nos estudos climatológicos, pois é a primeira síntese sobre estudos do clima urbano; Chandler (1965 apud MONTEIRO, 2003), que apresenta uma monografia sobre as modificações climáticas da cidade de Londres; e Oke (2009), que elaborou a compreensão do clima urbano em diferentes escalas de abordagem. No Brasil, boa parte dos estudos sobre o clima urbano parte da contribuição teórica de Monteiro (2003), em que o clima urbano é abordado como sistema a partir dos canais da percepção humana.

O conhecimento do clima urbano está relacionado com o balanço de energia de uma superfície urbana. Trata-se do seccionamento da energia radiante absorvida na superfície da terra em fluxos de calor que controlam o clima da superfície até uma altura onde as trocas verticais de calor são consideradas desprezíveis para um determinado estudo (OKE, 2009). Dependem de diversos fatores, como da umidade da atmosfera e do solo, da velocidade do vento, da rugosidade da superfície, da estabilidade atmosférica, das propriedades térmicas e dos perfis da temperatura da superfície, dentre outros.

Oke (2009) define duas camadas da atmosfera para abordagem do clima urbano, uma referente à Camada Limite Urbana (*Urban Boundary Layer-UBL*) e outra à Camada do Dossel Urbano ou camada intra-urbana (*Urban Canopy Layer-UCL*) (Figura 2).

Figura 2: Representação esquemática das camadas da atmosfera para abordagem do clima urbano
Fonte: adaptado de Oke (1976).

A UCL (*Urban Canopy Layer*) consiste na camada de ar abaixo dos elementos de rugosidade urbana, como coberturas das edificações e árvores. Esta faixa compreende a microescala, onde ocorrem os processos de trocas de calor entre as superfícies construídas dos arredores mais próximos, principalmente afetada pela geometria e materiais construtivos. Em áreas densamente construídas esse limite fica logo abaixo dos telhados, mas em grandes áreas abertas ele pode ser inexistente. A profundidade dessa camada também varia em função do vento, quanto maior sua velocidade menor pode ser o limite (OKE, 1976).

A segunda camada a UBL situa-se acima da primeira e compreende a faixa da mesoescala ou de escala local, suas características são condicionadas pela natureza da superfície urbana em seu limite inferior. Essa camada passa a se chamar Pluma Urbana (*Urban Plume*) quando abaixo dela se desenvolve uma camada de limite rural (ibid.).

A escala de abordagem do clima urbano sobre uma determinada área é uma questão metodológica importante quando do seu estudo. Conforme Oke (2009), existem três escalas de interesse nas áreas urbanas: a mesoescala, a escala local e a microescala. A mesoescala corresponde ao clima regional, que é consequência da latitude, altitude, topografia e influência das massas de ar. A mesoescala abrange toda a cidade ou região, por isso as condições de clima apresentadas podem atingir algumas dezenas de quilômetros. Seus dados são fornecidos pelas estações meteorológicas, porém, dependendo do tamanho da cidade, uma única estação meteorológica pode não ser capaz de representar as características dessa escala.

A escala local inclui os efeitos climáticos das características da paisagem, como topografia, cobertura de superfície, tamanho e espaçamento dos edifícios e a atividade humana. Com

isso, pode envolver a área de um bairro ou de diversos bairros que apresentem características urbanas similares. Já a microescala compreende a altura média dos elementos de rugosidade, considerando os elementos morfológicos individuais como edifícios, árvores, ruas, pátios, jardins e a dimensão de cada um desses elementos. Esta escala representa os microclimas urbanos, definidos pelo conjunto de elementos e pela configuração espacial delineada pela sua composição (ibid.) (Figura 3).

Figura 3: Representação esquemática das escalas climáticas e camadas verticais, (a) mesoescala, (b) escala local, (c) microescala
Fonte: adaptado de Oke (2006).

Portanto, o microclima equivale a um desvio climático de características singulares e reconhecíveis, em que se leva em consideração o efeito antrópico sobre o entorno, assim como a influência que suas modificações exercem sobre o espaço urbano. Ele é resultado da configuração urbana, da geometria dos edifícios, das características térmicas dos materiais, da forma de uso e ocupação do solo. O clima de uma cidade pode ser formado por diversos microclimas distintos, cada um determinado pelas características de seu entorno imediato (MASCARÓ, 2004; OKE, 2009).

De acordo com Landsberg (1981), as características das superfícies urbanas que interferem nas condições climáticas locais são: a rugosidade, que influencia a direção e velocidade dos ventos e a distribuição vertical da temperatura do ar; o albedo, que interfere na distribuição

vertical da temperatura do ar; a capacidade calorífica e a condutividade dos materiais, que exercem influência nas distribuições horizontal e vertical da temperatura do ar; e a permeabilidade, que está relacionada com o escoamento das águas pluviais. Katzshener, Reinold e Lourenço (1999) também apontam como efeitos da interferência das áreas construídas urbanas no clima regional o fato de a cidade se constituir em uma barreira contra os ventos regionais e as mudanças no balanço da radiação quando comparadas ao meio natural.

O resultado da produção do clima urbano sob o ponto de vista da percepção humana foi dividido por Monteiro (2003) em três grupos: o conforto térmico, expresso através de componentes termodinâmicos, como o calor, ventilação e umidade, e que afeta a todos permanentemente; a qualidade do ar, abrangendo a poluição atmosférica, um dos grandes problemas na qualidade ambiental das grandes cidades; e os impactos meteorológicos, no que se refere as precipitações.

O balanço energético em determinada superfície é substancialmente modificado pela urbanização, com a diminuição da dissipação de calor e maior armazenamento de energia térmica. Segundo Givoni (1998), dentre os principais fatores dessas mudanças estão: a localização da cidade dentro da região, a topografia, o tamanho das cidades, a densidade da área construída, a cobertura do solo, a altura dos edifícios, a orientação e a largura das ruas, a divisão dos lotes, os efeitos dos parques e áreas verdes e detalhes específicos do desenho dos edifícios.

As alterações geradas pelas áreas urbanas no clima regional têm como fenômeno mais característico a formação da ilha de calor, que se caracteriza pelo aumento da temperatura do ar, ocasionada pelas ações antrópicas no meio. As ilhas de calor podem estar restritas a construções isoladas e a pequenas áreas, como também a áreas urbanas mais extensas, tais como bairros ou distritos e são conhecidas como fenômenos tipicamente noturnos (Figura 4) (LOMBARDO, 1985).

Figura 4: Representação esquemática do aquecimento noturno nos centros urbanos
Fonte: adaptado de Voogt (2004).

A intensidade da ilha de calor é a diferença máxima de temperatura entre a área urbana e o entorno. Dados resultantes de diversos estudos mostram que a intensidade da ilha de calor pode chegar a 15°C. Com o aumento da temperatura, outros parâmetros de clima também podem sofrer alterações: a radiação solar global é bastante reduzida devido à sua progressiva dispersão e absorção; a velocidade dos ventos na camada superior aos edifícios é também reduzida comparada com a velocidade dos ventos em áreas desobstruídas, devido à rugosidade específica da cidade e também ao efeito ilha de calor. Além disso, a precipitação e a nebulosidade são também alteradas. A concentração de poluentes na atmosfera pode ser até 10 vezes maior e a temperatura do ar pode chegar a ser, em média, 2°C mais alta (SANTAMOURIS et al., 2001).

Segundo Gartland (2010), entre as consequências da ilha de calor urbana estão o desconforto térmico em regiões quentes ou com verões quentes, e o consequente aumento no consumo de energia para condicionamento dos ambientes, favorecimento de inversões térmicas, alterações do equilíbrio ambiental local, como aumento da temperatura das águas pluviais que chegam aos corpos d'água.

Landsberg (1997) apontou média de temperatura anual de 0,5°C a 3°C a mais no ambiente urbano e a umidade relativa 10% menos em relação ao meio natural, principalmente em dias de uso de aquecimento da cidade com equipamentos de climatização artificial. Entre outros fatores, observou também que a corrente de ar quente ascendente, junto ao aumento de poluentes, pode provocar um aumento de precipitações, conhecidas como chuva ácida, que podem ser danosas à cidade, corroendo a massa construída, prejudicando a vida ali existente e poluindo os cursos d'água ao serem canalizados.

Lombardo (1985) e Oke et al. (1991) apontam como principais aspectos que influenciam as ilhas de calor a geometria do cânion urbano, as propriedades térmicas dos materiais, a redução de superfícies para evaporação; o calor antropogênico (sistemas de transporte, de geração de energia e outras fontes de calor), o efeito estufa urbano e a redução da transferência de calor turbulento através das vias. Os efeitos das ilhas de calor podem abranger tanto o aumento das necessidades de resfriamento quanto de aquecimento em edificações, embora a demanda por resfriamento tenda a ser muito maior.

Assis (2000), em sua tese, defendeu a possibilidade de alcançar e preservar boas condições climáticas nos recintos urbanos, principalmente em relação ao conforto térmico, através do planejamento urbano e de seus instrumentos regulamentadores, analisando a variável geometria da malha urbana. Segundo ela, um melhor arranjo entre as edificações de um determinado lugar, do ponto de vista térmico, pode ser obtido a partir de critérios de acesso e controle da insolação e iluminação natural para a economia de energia. Os resultados dos estudos aplicados a Belo Horizonte, mostraram que um modelo físico é capaz de representar bem os fatos da ilha de calor, enquanto fenômeno noturno, em uma área urbana real e que, no caso da cidade estudada, obstruções da abóbada celeste da ordem de 40% já são suficientes para causar o efeito de ilha calor.

Santamouris, Tsangrassoulis e Klitsikas (2000) e Erell e Williamson (2007) relacionam os efeitos da ilha de calor urbana com o consumo de energia. Os autores demonstram em seus trabalhos que além de existir uma redução da energia para aquecimento, ocorre também um aumento na carga de resfriamento de edifícios e que estão diretamente relacionadas à distribuição espacial da ilha de calor urbana.

O aumento da temperatura nas áreas urbanas exerce um grande impacto na demanda de eletricidade para o condicionamento de ar nos edifícios, além de proporcionar o aumento da poluição e emissão de gases de efeito estufa. De acordo Santamouris, Tsangrassoulis e Klitsikas (2000), o efeito de aquecimento das ilhas de calor acentua ainda mais o uso de energia para resfriamento no verão, nas cidades estadunidenses com população superior a 100.000 habitantes, prevê-se que o pico de carga elétrica irá aumentar de 1,5% a 2% a cada 1°F de aumento da temperatura.

Akbari, Pomerantz e Taha, (2001) e Mavrogianni et al., (2011) assinalam que o efeito de ilha de calor urbana representa um grande desafio para uma possível sustentabilidade urbana. Não apenas a ilha de calor aumenta o consumo de energia nos edifícios para refrigeração e

causa desconforto térmico em áreas urbanas, mas também aumenta os dias de fumaça e neblina pela poluição do ar em áreas urbanas, com prejuízos à saúde, principalmente, quando acima de 32°C.

Diversos estudos e pesquisas, realizados sob diversas opções metodológicas, apontam a inter-relação entre as características urbanas e o clima resultante local (BARBIRATO, 1998; ASSIS, 2000; DUARTE E SERRA, 2003, COSTA, LABAKI E ARAUJO, 2005; PEZZUTO 2007; GOMES E LAMBERTS, 2009). Os principais parâmetros envolvem a densidade construída das áreas urbanas, uso e ocupação do solo, as propriedades térmicas dos materiais que compõem os elementos urbanos e seus edifícios e as características de cânion urbano. Como resultado são propostos parâmetros de auxílio ao planejamento urbano e instrumentos reguladores do uso e ocupação do solo.

Uma pesquisa clássica é a de Lombardo (1985) que comprovou a existência de uma alta correlação entre os tipos de uso do solo e a variação das temperaturas superficiais na cidade de São Paulo. Em áreas mais verticalizadas e com densidade populacional acima de 300 habitantes por hectare, com reduzida área de vegetação, verificou-se diferenças de 10°C com relação a áreas com mais espaços livres, com presença de vegetação ou reservatórios d'água.

Eliasson e Svensson (2003) analisaram as variações espaciais de temperatura e sua relação com o uso e ocupação do solo urbano através de uma aproximação estatística. O estudo foi realizado através da coleta de dados em 30 locais diferentes na cidade de Goteborg (Suécia), durante o período de 18 meses. Os resultados mostraram variações de temperatura estatisticamente significantes entre diferentes tipos de uso e ocupação do solo para todos os tipos de condições climáticas.

Pezzuto (2007) avaliou a influência dos diferentes usos do solo e seu efeito climático nos espaços urbanos abertos, adotando como estudo de caso a região central da cidade de Campinas (SP), caracterizada pela grande concentração de área construída, adensamento populacional e complexidade de uso do solo. As análises envolveram a inter-relação entre os parâmetros climáticos e a organização espacial urbana a partir do Sistema de Informação Geográfica (SIG). Verificou-se que o uso do solo urbano interfere tanto na temperatura do ar quanto na sensação térmica dos usuários.

Bonhomme, Adolphe e Haddou (2012), integraram as condicionantes clima urbano, forma urbana e demanda de energia, ao criarem um método simplificado de análise e mapeamento

morfológico do tecido urbano para auxiliar no estudo da climatologia e do impacto da forma urbana na demanda de energia de edificações.

As pesquisas desenvolvidas pelo IPCC (2014) mostram que o aumento da temperatura média global, ocasionada pelas mudanças climáticas, terá um impacto maior nas cidades onde já ocorre o fenômeno da ilha de calor, aumentando ainda mais as exigências de energia para arrefecimento de edifícios, bem como a emissão de gás carbônico e a poluição do ar.

Como visto, os diversos estudos conduzidos a respeito do clima urbano e seus condicionantes indicam que várias estratégias são eficazes para diminuir os efeitos da ilha de calor. Milner, Davies e Wilkinson (2012) explicam que uma estratégia eficaz para atenuar a ilha de calor é o aumento de espaços verdes na cidade, mas que, no entanto, essa estratégia entra em conflito com outra de mitigação de mudança de clima urbano, que é o aumento da densidade construída para criar cidades mais compactas. Este conflito ilustra a complexidade para o desenvolvimento de diretrizes eficazes para as áreas urbanas.

Dentro deste contexto, o conhecimento dos fatores climáticos, juntamente com as características do sítio, tais como topografia, vegetação, corpos d'água, morfologia, entre outros, é de fundamental importância para o estudo do conforto térmico e da elaboração de diretrizes urbanísticas que visem minimizar os efeitos adversos da urbanização nas condições climáticas nas cidades.

2.1.3 O Planejamento Urbano Bioclimático e as Legislações Urbanísticas

O homem modifica o ambiente natural e construído para criar novas condições de habitabilidade desde a pré-história. A prática da construção adaptada ao clima também é bastante antiga e foi uma das principais estratégias adotada pelo homem para construir seu abrigo, já que essa prática refletia sua própria condição de sobrevivência diante das adversidades climáticas.

Vitrúvio (1997), por volta do ano 700, já alertava que antes de começar a fazer as fundações das muralhas de uma cidade, se deveria escolher um lugar com ar salubre, que fosse alto e de temperatura agradável, não exposto a geadas; que uma vez terminadas as muralhas, a distribuição na cidade deveria levar em consideração o sol e os ventos; e que os edifícios deveriam ser preparados desde o início levando-se em conta o clima do local onde seria construído.

Porém, a arquitetura bioclimática passou a ganhar importância a partir da abordagem das questões de sustentabilidade relacionadas a arquitetura e urbanismo, no final da década de 1980 e início da década de 1990. O termo “arquitetura bioclimática” surgiu na década de 60, a partir de pesquisas de Aladar e Victor Olgyay (OLGYAY, 1963) e consiste na adequada e harmoniosa relação entre ambiente construído, clima e seus processos de troca de energia, tendo como objetivo final o conforto ambiental humano. Os irmãos Olgyay também desenvolveram um diagrama bioclimático que propõe estratégias de adequação do edifício ao clima.

Em 1969, Givoni (1976), concebeu sua carta bioclimática para edifícios, propondo estratégias para adaptação da arquitetura ao clima para obtenção do conforto térmico, levando em consideração as condições externas e internas do edifício. Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), uma pesquisa com o objetivo de selecionar uma metodologia bioclimática a ser adotada para o Brasil, através de uma revisão bibliográfica abordando o tema bioclimatologia aplicada à arquitetura, concluiu que o trabalho de Givoni (1976) é o mais adequado às condições brasileiras.

De acordo com Torres et al. (2012), a bioclimatologia é uma das concepções que mais contribuem para a eficiência termo-energética de um edifício. Ela trata da relação entre o usuário e as condições climáticas, por isso o termo projeto de arquitetura bioclimática é utilizado para designar a arquitetura em harmonia com o meio natural.

Um dos principais objetivos do projeto bioclimático é pensar o edifício com um desenho racional, que interaja com o entorno e com a natureza e que se baseie nas condições ambientais a fim de obter o conforto térmico no interior do edifício com o mínimo de consumo de energia (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Romero (1988) explica que na arquitetura bioclimática o próprio ambiente construído atua como mecanismo de controle das variáveis do meio, através de seu invólucro (paredes, pisos, coberturas), seu entorno (água, vegetação, sombra, terra) e, também, através do aproveitamento dos elementos e fatores do clima para melhor controle do vento e do sol.

Para auxiliar no projeto de arquitetura bioclimática, a Norma Brasileira NBR 15220-3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005) estabelece o zoneamento bioclimático brasileiro, subdividindo o país em oito Zonas Bioclimáticas. A norma define as características principais e dá diretrizes construtivas para cada uma das oito zonas

bioclimáticas, com relação a elementos como o dimensionamento de aberturas e sombreamento e às estratégias bioclimáticas mais recomendadas para cada localidade.

Jirón (2012) explica que na arquitetura bioclimática são priorizados os sistemas passivos sobre os sistemas ativos ou mecânicos uma vez que os primeiros tendem a priorizar o uso de energia renovável e não poluente, já com o uso de sistemas mecânicos há um aumento no consumo de energia associado ao aumento da poluição atmosférica.

Rómero e Reis (2012) elucidam que as tecnologias passivas são aquelas que se utilizam das condições locais para atingir os níveis desejados de conforto ambiental e eficiência energética. As tecnologias passivas utilizam amplamente as envoltentes verticais e horizontais, opacas e transparentes, e não exigem a utilização de nenhum tipo de energia para o seu funcionamento, a não ser a energia solar eletromagnética. Uma vez esgotadas as possibilidades passivas, de essas tecnologias estarem corretamente equacionadas com o terreno existente e o programa de projeto, parte-se para as tecnologias ativas. Estas, por sua vez, complementam as passivas e geram consumo energético.

Todavia, a aplicação dos princípios bioclimáticos é imprescindível também na escala urbana, com o principal objetivo de minimizar os efeitos adversos do crescimento urbano através do uso racional dos recursos naturais, a adequada morfologia urbana baseada na interação com o clima e o meio natural e com o mínimo de transferência de dejetos e rejeitos para outros ecossistemas atuais e futuros. Além disso, o urbanismo bioclimático ao proporcionar conforto térmico, favorece a redução de consumo de energia, tanto na escala urbana, quanto no nível dos edifícios, proporcionando a consequente redução de emissão de poluentes e GEE.

O conceito de urbanismo bioclimático foi difundido por Higuera (2006), que defendeu a importância da bioclimatologia aplicada no espaço urbano. Segundo ela, a abordagem do urbanismo bioclimático deve estar associada à capacidade de análise da carga dos sistemas naturais locais a uma matriz de interações entre os aspectos ambientais (insolação, ventos, vegetação, recursos energéticos e hídricos, e geomorfologia) e as variáveis do ambiente urbano (estrutura de circulação, espaços livres e áreas verdes, condições das quadras, lotes e edificações).

Dessa forma, através do conhecimento da climatologia urbana, a cidade bioclimática deve incorporar instrumentos de planejamento urbano capazes de estimular o aproveitamento dos recursos naturais locais dos espaços externos urbanos e no nível do edifício, favorecendo a

qualidade ambiental urbana e proporcionando o conforto térmico ao homem (TORRES et al., 2013).

De acordo com Silveira (2007), o processo de construção dos espaços urbanos, sob o enfoque bioclimático, envolve o conhecimento das informações climáticas do local, da observação das necessidades humanas em relação ao conforto ambiental, das soluções tecnológicas que devem tirar partido das condições desejáveis e evitar as indesejáveis, através do estudo do sítio, da orientação solar, do sombreamento, das formas dos edifícios, dos materiais de revestimento do solo, da ventilação natural, das relações entre as áreas abertas e das construídas.

Erel, Pearlmutter e Williamon (2011) defendem que a qualidade de vida das pessoas que vivem nas cidades poderia ser melhorada se a forma da cidade evoluísse de maneira adequada ao seu contexto climático. Segundo eles, o desenho urbano climaticamente responsável é vital para qualquer noção de sustentabilidade, pois permite que os edifícios utilizem fontes de energias renováveis para aquecimento e para a refrigeração passiva, aumenta o conforto dos pedestres, incentivam atividades em espaços ao ar livre e, também, pode encorajar os moradores da cidade a diminuir a sua dependência de veículos privados.

A WMO fornece indicações para integrar o clima nas tomadas de decisões urbanas e alerta que a ineficiente utilização das fontes de energia na cidade, desde o transporte até a falta de um planejamento urbano adequado, atua entre as principais causas do aumento global de GEE, que é o fator que mais contribui para o aquecimento do planeta. Apesar de genéricas, a WMO (1996), propõe diretrizes para o planejamento e projeto urbanos climaticamente responsáveis, dentre elas: a melhoria do conforto ambiental dos habitantes, tanto no exterior quanto no interior das edificações; a redução da demanda de energia operante para condicionamento artificial dos edifícios; a preservação dos corredores locais de ventilação sobre o assentamento urbano, principalmente das massas noturnas descendentes de ar, responsáveis pela exaustão do calor acumulado durante o dia; a variação da altura dos edifícios para melhorar as condições locais de ventilação; e a adequada orientação solar e arranjo dos edifícios.

O IPCC (2014) observa que o desenvolvimento do planejamento urbano adequado às condições climáticas é uma das principais estratégias para combater os efeitos adversos da urbanização, assim como a formação de ilhas de calor e emissão de gases de efeito estufa. Reforça-se que as estratégias são muito mais eficazes quando consideradas em conjunto com

diversos aspectos do desenho urbano, incluindo a incidência de radiação solar, ventos, a paisagem urbana e edifícios.

De acordo com as contribuições teóricas desenvolvidas através dos estudos da climatologia urbana, Barbirato, Barbosa e Torres (2012) apontam como as principais diretrizes de planejamento para construção da cidade bioclimática, segundo Higuera (2006), as seguintes:

- Adoção de soluções urbanísticas baseadas nas particularidades do sítio urbano (clima, topografia, cultura e outros);
- Promoção do uso misto e diversidade de atividades concentradas em áreas urbanas centrais, objetivando a redução de viagens e o do consumo de energia para o transporte, bem como a segurança urbana;
- Integração, ampliação e projeto de espaços urbanos abertos, com o objetivo de minimizar as condições ambientais adversas e atuar como espaços de convívio social;
- Estímulo de densidades construídas moderadas ou altas, através do planejamento, em comparação com a baixa densidade de casas dispersas, promovendo a diminuição de custos com energia e infraestrutura; em zonas climáticas em que a recomendação seja a baixa densidade, promover a realização de estudos para outras densidades de acordo com o comportamento das variáveis climáticas;
- Aproveitamento dos recursos naturais na estrutura urbana e o controle de reciclagem dos resíduos sólidos;
- Incentivo de técnicas arquitetônicas de condicionamento passivo através de soluções possíveis para a redução de consumo de energia;
- Incentivo a políticas de prioridade ao tráfego de pedestres, especialmente em áreas centrais, através do planejamento do traçado viário.

Assis (2005) explica que embora seja reconhecida a importância da climatologia urbana para o planejamento e a preservação da qualidade ambiental do meio urbano, sua aplicação às atividades de planejamento e projeto das áreas urbanas ainda é limitada. Isso, segundo ela, provavelmente se deve em parte à abordagem fragmentada e desintegrada entre os diversos campos do conhecimento envolvidos, e em parte ao fato de que a grande maioria dos trabalhos nessa área, tanto no Brasil como no exterior, são descritivos e seus resultados ficam restritos ao caso em estudo.

Nesse mesmo sentido, Eliasson (2000) investigou como a informação do clima era utilizada no processo de planejamento urbano por um grupo interdisciplinar envolvendo climatologistas e

planejadores urbanos. O estudo mostrou que os planejadores urbanos se interessavam pelas informações climáticas, no entanto, elas tiveram pouco impacto durante o processo de planejamento, por razões como falta de sistematização das informações, aspectos políticos e de mercado. O autor recomenda que os climatologistas busquem conhecer a demanda de informações necessárias por parte dos planejadores urbanos e que estes, por sua vez, conscientizem-se da importância do conhecimento do clima urbano para ser usado não apenas durante o processo de planejamento, mas também durante tomadas de decisões.

Duarte (2010) defende que os estudos científicos realizados nessa área devem expressar os resultados utilizando uma linguagem conhecida pelos planejadores urbanos. Para ela, uma grande dificuldade para a integração entre a climatologia urbana e as ações de planejamento e desenho urbano é a complexidade da modelagem; cada área tem sua limitação e nem sempre as informações de uma área chegam à outra. Assim, apesar da importância dos estudos em climatologia, a fusão entre essas áreas ainda está em construção.

Por outro lado, nas últimas décadas, o desempenho e a qualidade ambiental dos espaços construídos têm sido cada vez mais abordados e cobrados nos discursos e colocadas em prática por meio da elaboração de regulamentações e legislações urbanísticas. Com a emergência, sobretudo, da problemática energética, essas regulamentações, em diversos países, renovam-se cada vez mais ambiciosas. Entretanto, a preocupação com o desempenho térmico visa quase exclusivamente a escala dos edifícios, a abordagem dessa problemática na escala urbana ainda é ainda pouco expressiva.

Martins, Bonhomme e Adolphe (2013) apontam que essa dificuldade encontra-se em vários aspectos, entre outros: a carência de estudos quantitativos mais aprofundados sobre o impacto da forma urbana no clima urbano, assim como sobre os efeitos do microclima na demanda de energia para condicionamento artificial dos edifícios urbanos (tais estudos devem contribuir para a construção de banco de dados de base para dado contexto climático e morfológico); a ausência de modelos matemáticos mais precisos que abordem os complexos fenômenos físicos em múltiplas escalas simultaneamente; e de poucos estudos prospectivos de modelagem de cenários futuros a partir da evolução da forma urbana existente. Portanto, a abordagem dessa problemática deve começar com estudos que possam subsidiar a elaboração de instrumentos de intervenção e controle do solo urbano, baseados em indicadores de desempenho e parâmetros que possam responder apropriadamente a cada contexto em favor de uma melhor qualidade ambiental dos espaços construídos.

A consideração de aspectos bioclimáticos para o planejamento e projeto urbanos está atualmente mais desenvolvida na Europa, onde as metodologias tratam não apenas dos levantamentos a serem efetuados, como também da cartografia para apresentação dos resultados e das sínteses de diagnóstico e intervenção. Os critérios adotados para o planejamento geralmente consideram a eficiência energética no ordenamento do uso e ocupação do solo (considerando tanto o condicionamento passivo, que implica em critérios de acesso ao sol e aos ventos, quanto à integração de fontes renováveis à matriz energética urbana, como a energia solar e eólica), a preservação dos canais principais de ventilação, a manutenção das condições adequadas de umidade através de áreas verdes e preservação dos corpos d'água, e, também, estratégias bioclimáticas específicas para cada zona climática, que se estendem à escala do edifício. Os resultados obtidos pela aplicação dessa metodologia em cada sítio urbano passam a configurar a legislação de parcelamento, uso e ocupação do solo, e os códigos de obra de cada local (HIGUERAS, 2006).

De acordo com IPCC (2014), para a concepção e implementação de políticas de planejamento urbano eficientes, com metas de redução de gases de efeito estufa, arranjos institucionais, mecanismos de governança e recursos financeiros devem estar alinhados. É imprescindível que haja vontade política para apoiar o planejamento urbano com vistas a mitigar os efeitos adversos do crescimento urbano.

Bianco et al. (2011) explicam que as estratégias de mitigação compreendem, principalmente aspectos ligados à forma urbana e ao ambiente construído. A forma urbana envolve os aspectos macroestruturais das cidades, como a dispersão do tecido urbano, o traçado urbano, a distribuição de espaços livres, as densidades urbanas, padrões de usos do solo e mobilidade. Já os aspectos do ambiente construído envolvem as questões relativas à estrutura urbana em microescala, como a disposição, dimensões e orientação das construções, os materiais construtivos e os sistemas de infraestrutura.

Braga (2012) aponta que a questão da regulação do uso do solo urbano é essencial para que possam ser traçadas estratégias de adaptação das cidades às mudanças climáticas. Porém, a forma como ocorrem as tomadas de decisões sobre o uso do solo e o crescimento das cidades abarca um sistema complexo, no qual operam agentes públicos e privados. Esse sistema compreende, de um lado, o mercado imobiliário, para o qual o solo urbano é uma mercadoria e cuja produção deve ser expandida, e por outro, estruturas legais, administrativas e fiscais,

através das quais o Estado deve regular a produção e o uso do solo, tendo em vista o interesse coletivo e a função social da cidade.

No Brasil, o Plano Diretor é o instrumento dos governos municipais direcionado à definição do padrão de desenvolvimento da ocupação urbana do seu território. Ele é desenvolvido a partir de uma avaliação científica da realidade física, social, econômica, política e administrativa do município, e apresenta um conjunto de propostas para o desenvolvimento socioeconômico e para a organização espacial do uso do solo urbano, das redes de infraestrutura e de outros elementos fundamentais da estrutura urbana (VILLAÇA, 1999).

No entanto, a legislação urbana nas cidades brasileiras tem características tecnocráticas e de regulação do mercado imobiliário, tornando-a instrumento de especulação e de valorização imobiliária, em detrimento da inclusão dos segmentos fora do mercado e de novas demandas sociais relativas à qualidade ambiental e ao uso racional de recursos naturais (ASSIS et al., 2007).

Com a aprovação do Estatuto da Cidade, Lei 10.257, de 10 de julho de 2001, criou-se a possibilidade de desenvolver estudos urbanísticos considerando aspectos ambientais para a qualidade urbana que sirvam de subsídio para a elaboração do Plano Diretor. Conforme Assis et al. (2007), este instrumento procurou dar um novo enfoque aos planos diretores estimulando processos participativos de gestão territorial e ampliando o acesso à terra urbanizada e regularizada, de forma a atender à função social da propriedade urbana.

O art. 2º do Estatuto da Cidade (BRASIL, 2001) estabelece que a política urbana tenha por objetivo ordenar o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e da propriedade urbana, mediante, entre outras coisas, a garantia ao direito a cidades sustentáveis, entendido como o direito à terra urbana, à moradia, ao saneamento ambiental, à infraestrutura, ao transporte e aos serviços públicos, ao trabalho e ao lazer, para as presentes e futuras gerações; ao planejamento do desenvolvimento das cidades, da distribuição espacial da população e das atividades econômicas do município e do território sob sua área de influência, de modo a evitar e corrigir as distorções do crescimento urbano e seus efeitos negativos sobre o meio ambiente.

O Estatuto (BRASIL, 2001) prevê ainda que deve ser evitado “o parcelamento do solo, a edificação ou o uso excessivo ou inadequado em relação à infraestrutura urbana” (artigo 2º), no entanto, não estabelece os instrumentos nem os padrões urbanísticos necessários para o

uso, ocupação e parcelamento do solo compatíveis com tais diretrizes. No rol dos instrumentos gerais (artigo 4º), ele prevê a adoção de normas e padrões de parcelamento do solo ambientalmente mais sustentáveis, porém não estabelece parâmetros para sua aplicabilidade, o que faz com que os planos diretores tendam a não incorporar essas questões como instrumentos de planejamento.

Assim, mesmo com o Estatuto, as questões referentes aos aspectos ambientais do desenho urbano são tratadas de forma simplificada e genérica, resultando em um grande distanciamento entre o urbanismo bioclimático com relação aos planos, códigos e leis municipais.

De acordo com Assis et al. (2007) é comum, por exemplo, associar o conforto ambiental urbano ou o urbanismo bioclimático ao conceito de planejamento ambiental, cuja experiência no Brasil tem basicamente adicionado à metodologia convencional de planejamento territorial e urbano as questões, claramente importantes, de preservação e/ou conservação de sistemas naturais, e a intervenção paisagística em áreas degradadas ou de vazios urbanos.

Contudo, o aproveitamento dos recursos naturais ainda não é uma prática incorporada às ações do planejamento urbano no país; do mesmo modo, o estabelecimento de diretrizes para uso e ocupação do solo, de forma geral, não é feito com base nas condições climáticas de cada local, observando-se uma grande homogeneidade de recomendações na legislação brasileira contraditória à grande diversidade de domínios climáticos no território nacional (ASSIS et al., 2007; BRAGA, 2012).

Na perspectiva de mitigar os impactos adversos do crescimento urbano, o planejamento urbano cumpre um papel fundamental, na medida em que a forma como se estruturam as cidades e como se dão os usos do solo afeta a qualidade de vida urbana. Nesse sentido, como visto, é indispensável o conhecimento do clima local para o planejamento urbano, assim como para a elaboração das legislações urbanísticas, conforme premissas do urbanismo bioclimático, com vistas à obtenção de equilíbrio entre o desenvolvimento e a observação das premissas ambientais.

2.2 INFLUÊNCIA DA FORMA URBANA NO CONFORTO TÉRMICO

A sensação de conforto térmico está relacionada ao esforço realizado pelo organismo para manter o equilíbrio térmico. Para isso, existem constantes trocas de calor entre o corpo e o meio. Essas trocas são regidas pelas leis da física e influenciadas por mecanismos de adaptação fisiológica, por condições ambientais e fatores individuais (FROTA; SCHIFFER, 2001).

A norma ISO 7730 (1994) define conforto térmico como sendo “aquele estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente térmico”. Se a relação de todas as trocas de calor a que está submetido o corpo for nula e a temperatura da pele e suor estiverem dentro de certos limites, pode-se dizer que o homem sente conforto térmico. Por outro lado, o estado de insatisfação do corpo humano com o ambiente térmico, quando submetido a situações ambientais extremas de frio ou calor, é chamado de estresse térmico.

A sensação de conforto térmico relaciona-se a fatores subjetivos ao se considerar preferências individuais, mas também a uma série de fatores físicos relativos à configuração urbana. Dentre esses fatores físicos estão os elementos da forma urbana, que dependendo da maneira que estão organizados, se traduzem em diferentes condições climáticas.

A manutenção de boas condições climáticas nos recintos urbanos, especialmente possível na escala microclimática, através do planejamento urbano e arranjo adequado entre elementos da forma urbana, como a geometria da malha urbana, densidades construídas, materiais constituintes e a vegetação, possibilitam melhores condições de conforto térmico (SPIRN, 1995; GIVONI, 1998; ASSIS, 2000; DUARTE; SERRA, 2003; ROSSI; KRUGER; NIKOLOPOULOU, 2011).

Conforme Lamas (1992), a forma urbana pode ser analisada sob aspectos quantitativos, que se referem a uma organização quantitativa, tais como densidades, superfícies, fluxos, coeficientes volumétricos, dimensões, perfis, entre outros; aspectos de organização funcional, que se relacionam com as atividades humanas e aos usos do espaço urbano, o residencial, o comercial, o industrial, etc.; aspectos qualitativos, que se referem ao conforto ambiental dos espaços; e, aspectos figurativos relacionados com a comunicação estética do espaço urbano.

Aqui, a abordagem da forma urbana se refere aos primeiros, aos aspectos quantitativos. Esses diversos elementos da forma urbana interagem de diferentes maneiras com o meio e impactam diretamente nas variáveis microclimáticas. Dessa forma, o conforto térmico no

ambiente urbano está associado aos aspectos formais da cidade, relacionados ao seu desenho.

A seguir será apresentada a definição e caracterização de cânions urbanos, que, por se conformarem na menor unidade de análise dos microclimas urbanos, são configurações importantes no estudo do conforto térmico em espaços abertos. Posteriormente, serão abordados os principais componentes da forma urbana que condicionam os níveis de conforto térmico no espaço construído, uma vez que seu entendimento, e a maneira como eles interagem com o meio, é de grande importância para um planejamento urbano que vise espaços urbanos com qualidade ambiental.

2.2.1 Cânions urbanos

O estudo do clima em cânions urbanos é de relevância não apenas para a climatologia urbana, mas também para assegurar o conforto térmico nos espaços abertos das cidades. Os cânions urbanos são configurações espaciais que constituem a menor unidade de análise dos microclimas urbanos. Um cânion urbano refere-se ao espaço conformado pela via e edifícios adjacentes e constitui uma unidade geométrica básica que pode ser usada para construir estruturas urbanas maiores (NAKAMURA; OKE, 1988).

O cânion urbano forma uma das unidades fundamentais que compreende a camada de dossel urbana (urban canopy layer) ou camada intraurbana. Desde a superfície até o nível das coberturas, esta camada tem um clima distinto que é afetado por influências de microescala (OKE, 1976). Eles são formados pelo volume de ar delimitado pelas paredes dos edifícios adjacentes e pela via entre eles e, também, pelas inter-reflexões produzidas nas suas superfícies, que resultam em microclimas peculiares ao clima da cidade (OKE, 1976; BARBIRATO; SOUZA; TORRES, 2007) (Figura 5).

Conforme Barbirato, Souza e Torres (2007), quando relacionados à forma urbana utilizada na modelagem climática, os cânions se referem a uma unidade geométrica de natureza tridimensional e correspondem a um perfil de via urbana com uma orientação específica em relação ao eixo norte-sul. Na literatura são comumente encontrados os termos em inglês “*urban canyon*” ou “*urban street canyon*”. De acordo com Oke (1989), a dimensão aproximada dessa unidade microclimática é de 30 metros de largura (via), por 10 metros de altura (edifícios), por 300 metros de comprimento.

Figura 5: Representação de cânions urbanos e diferentes formações microclimáticas no seu interior
Fonte: modificado de Coutts et al. (2015).

As características do interior do cânion são fatores importantes para o conforto dos pedestres, uma vez que elas afetam a concentração de calor, o fluxo de ventos e a concentração de poluentes. Além disso, a influência da geometria do cânion na perda de calor das construções ou na demanda de refrigeração influencia na conservação de energia nas áreas urbanas (NAKAMURA; OKE, 1988; SHISHEGAR, 2013).

Dessa forma, o conhecimento do microclima dos cânions urbanos em relação a sua geometria, assim como a outros aspectos urbanos determinantes na sua formação, como os materiais constituintes e a densidade urbana, além dos fatores meteorológicos, é de reconhecida importância para o planejamento urbano.

Diversos autores estudaram como a forma do cânion interage com os diversos parâmetros de microescala climática no seu interior (NAKAMURA; OKE, 1988; OKE, 1987; PEARLMUTTER, 1998; BOURBIA; AWBI, 2004; ERELL; PEARLMUTTER; WILLIAMON, 2011; ANDREOU, 2014; NAKATA-OSAKI; SOUZA; RODRIGUES, 2015; MAKROPOULOU; GOSPODINI, 2016) e, também, como essas configurações urbanas afetam os níveis de conforto térmico do pedestre (ALITOUDETT; MAYER, 2006; MINELLA; ROSSI; KRÜGUER, 2009; ROSSI; KRÜGUER; NIKOLOPOULOU, 2011; SILVA, 2013). A seguir, juntamente com as pesquisas realizadas sobre o tema, serão abordados os elementos da forma urbana que exercem influência na formação de microclimas urbanos e, conseqüentemente, no conforto térmico em cânions urbanos.

2.2.2 Propriedades térmicas dos materiais constituintes das áreas urbanas

Um papel importante às alterações no microclima urbano é atribuído à substituição da cobertura vegetal por materiais construtivos, que absorvem grande parte da energia solar convertendo-a em calor, ocasionando desconforto térmico em regiões mais quentes, nos períodos de verão, e contribuindo para a formação das ilhas de calor.

Os materiais utilizados na construção das áreas urbanas possuem diferentes propriedades dos materiais que compõe as áreas rurais, o que influencia na quantidade de energia térmica acumulada e irradiada para a atmosfera. As características desses materiais são expressas principalmente pela sua capacidade de armazenar calor, pela absortividade da radiação solar e pelo albedo.

Esses materiais podem ter desempenhos diversos em relação à radiação térmica incidente. A radiação incidente num material construtivo terá parcela refletida, parcela absorvida e, se for um material translúcido, parte transmitida. A absorptância solar (α) é definida como “o quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície”, já a refletância solar (ρ) como o “quociente da taxa de radiação solar refletida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície (ABNT, 2005).

A radiação absorvida pelo material é transformada em energia e devolvida ao ambiente externo através das trocas térmicas de calor (GIVONI, 1998). Os materiais de construção são seletivos à radiação solar (radiação de onda curta) e a principal determinante desta característica é a sua cor superficial. Materiais com cores mais claras absorvem menor quantidade da radiação solar que os com cores mais escuras, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1: Absortância solar (α)

Cores	α
Preta	0,85-0,98
Vermelha	0,65-0,80
Amarela	0,50-0,70
Branca	0,23-0,49

Fonte: ABNT (2005).

Pesquisas, como a de Synnefa, Santamouris e Livada (2006) e a de Pereira, Guisi e Guths (2013) apontam para o uso de materiais de alta refletância e emitância como estratégia para redução do ganho de calor em cidades de clima quente. Esses materiais ou revestimentos são

chamados de materiais frios e são, em grande parte, tintas claras, especialmente as brancas. Tais materiais refletem grande parte da energia solar incidente e irradiam grande parte do calor absorvido, não aumentando consideravelmente sua temperatura superficial.

Porém, é importante salientar que a absorptância solar das superfícies opacas não é influenciada apenas pela sua cor superficial. Conforme Roriz, Dornelles e Roriz (2007), também influenciam diretamente a absorptância da superfície, características como a composição química do material que a compõe, caracterizada por sua absorptividade, a rugosidade do material, a ondulação da superfície e sua manutenção ao longo do tempo.

Parte da radiação solar absorvida por determinado material aquecerá o mesmo e terá parcela reemitida para fora e parcela emitida para o ambiente interno. A emissividade é a propriedade térmica que rege a quantidade de energia térmica que é emitida por unidade de tempo para o ambiente interno; essa propriedade pertence à camada superficial do material emissor, assim como a absorptividade. A emissividade é definida como “quociente da taxa de radiação emitida por uma superfície pela taxa de radiação emitida por um corpo negro, à mesma temperatura” (ABNT, 2005).

Segundo Romero (2007), uma importante característica para o controle dos materiais é seu comportamento ao conduzir o calor, ou seja, sua condutibilidade térmica. Quanto maior a capacidade de conservação do calor, mais branda será a troca de temperatura propagada através do material.

Conforme Givoni (1998) em cidades densamente ocupadas, grande parte das trocas de calor por radiação ocorre nas superfícies das coberturas, dessa forma, o uso de cores claras nas coberturas poderia promover uma temperatura superficial menor do que a temperatura do ar externo da região, uma vez que a perda de radiação de ondas longas por reflexão excederia a radiação absorvida. Como o ar frio é mais denso que o ar aquecido, ele desce para as ruas da cidade.

Absorptâncias menores reduzem os ganhos de calor solar do edifício sem necessariamente alterar as perdas. Ao mesmo tempo, altas emissividades podem incrementar as trocas de calor por radiação em ondas longas. Dorneles (2008) explica que, a partir desse princípio, pesquisadores financiados pela Comissão de Energia da Califórnia desenvolveram pigmentos “frios” para pintura de coberturas, com o objetivo de minimizar as cargas térmicas de

edificações. Estes pigmentos, embora mantenham a aparência normal das telhas, provocam alta refletância solar na região do infravermelho-próximo.

Atualmente, existem diversos tipos de materiais classificados como “frios” (*cool materials*) disponíveis para uso em superfícies de áreas urbanas ou em edificações. De acordo com Dorneles, Caram e Sichieri (2014) a maioria desses materiais é de cor branca ou de cores claras, no entanto, para atender a crescente necessidade de produtos coloridos, por questão de preferência estética em alguns casos, pesquisadores e fabricantes tem trabalhado no desenvolvimento de materiais frios coloridos. Nesse sentido, os autores avaliaram comparativamente tintas frias e convencionais, de cores correspondentes, para pintura externa de paredes e coberturas através da caracterização de suas absorções e emissividades, bem como o desempenho térmico delas a partir de medições de temperaturas superficiais. Os resultados indicaram que tintas frias com baixa absorção no infravermelho-próximo, porém de cor e tonalidade iguais às tintas convencionais, tiveram menores absorções solares, resultando na possibilidade de se utilizar cores de tonalidade mais escura.

Outra propriedade bastante importante quanto ao desempenho térmico das áreas urbanas é o albedo. O albedo é um índice que representa a capacidade que o material tem de refletir parte da radiação solar incidente, variando de 0 a 1. Quanto maior o albedo, maior a porcentagem da radiação incidente que é refletida, e, assim, uma menor parcela de energia é convertida em calor, resultando em temperaturas superficiais menores. É importante ressaltar que a maior ou menor retenção desse calor no interior do material dependerá da emissividade da superfície, materiais com alta emissividade, são bons emissores de ondas longas, e rapidamente dissipam a energia absorvida sob a forma de ondas curtas (ROMERO, 2007).

Os albedos dos materiais mais utilizados nas construções do meio urbano são, normalmente, menores que os das superfícies rurais. Romero (2007) explica que o efeito da geometria urbana faz com que o albedo decresça quando comparado com superfícies horizontais, já que a radiação fica limitada, mesmo os albedos das áreas urbanas sendo iguais aos da área rural. Assim, nas áreas urbanas, a combinação do albedo das superfícies com a disposição geométrica urbana resulta em albedos médios 0,15 mais baixos que os das áreas rurais, com exceção de parques e áreas com solos escuros (Tabela 2).

Tabela 2: Albedo dos materiais

Superfície	Albedo
Asfalto	0,05-0,20
Concreto	0,10-0,35
Tijolo	0,20-0,40
Pedra	0,20-0,35
Madeira	0,40
Brita	0,08-0,18
Areia Seca	0,18-0,30

Fonte: elaborado pela autora a partir de Mascaró (2004) e Romero (2007).

Em uma pesquisa, Sailor (1995) simulou alterações no albedo e na porcentagem de cobertura vegetal de Los Angeles e demonstrou que apenas aumentando o albedo das coberturas seria possível uma redução da temperatura na área central da cidade de aproximadamente 1,4°C; no caso da cobertura vegetal a redução seria em torno de 1,3°C. Já as simulações do efeito combinado das duas estratégias resultaram em ganhos quase em dobro, correspondendo a uma economia de energia de aproximadamente 2% para a cidade.

Abkari, Menon e Rosenfield (2008) fizeram uma relação entre o albedo e emissões de poluentes e estimaram que, em uma escala global, aumentar os albedos dos telhados urbanos e das superfícies pavimentadas induz a uma força radioativa negativa equivalente a compensação de 44Gt de emissões de CO².

Yang, Lau e Quian (2011), assim como Erell et al. (2014) analisaram os efeitos que a aplicação de albedos mais altos na pavimentação de cânions urbanos exerce no conforto térmico dos pedestres. De acordo com os resultados observou-se que apesar de haver uma redução da temperatura do ar a que os pedestres estavam expostos, o aumento do albedo não contribuiu significativamente com o conforto térmico dos usuários. Yang, Lau e Quian (2011), perceberam mudanças representativas no nível de conforto dos pedestres de Shangai em locais com aumento de albedo apenas no período noturno, e os melhores níveis de conforto, inclusive para o período diurno, foram obtidos com a adição de massa arbórea, que promoveu uma redução de 15 °C de Temperatura Equivalente Fisiológica (PET), de acordo com as simulações.

Quanto ao efeito combinado da vegetação arbórea com materiais de elevado albedo, Erell et al. (2014) explicam que onde a vegetação é abundante o potencial para a modificação do microclima pela aplicação de superfícies de albedo alto normalmente é menor. O que ocorre é que o sombreamento promovido pelas árvores minimiza os ganhos potenciais da absorção

de luz solar direta e, portanto, essas superfícies sombreadas, mesmo com um baixo albedo, ficam mais frias do que superfícies não sombreadas e, assim, têm um efeito favorável no conforto térmico.

Giordano e Krüger (2014) realizaram o mapeamento da Irradiância Global Horizontal (IGH) média em diversas regiões brasileiras com o objetivo de correlacioná-la com o potencial de redução da temperatura superficial que se pode atingir com o incremento do albedo. A partir de mapas temáticos, os autores concluíram que a adoção de materiais de alto albedo nas superfícies urbanas pode ter um impacto bastante significativo na melhoria do conforto térmico urbano; para a região tropical analisada, os potenciais de arrefecimento foram em torno de 3 a 5°C/0,1 albedo.

Estudos também foram realizados correlacionando o aumento do albedo das áreas urbanas com a economia de energia. Konopacki e Akbari (2012) realizaram um estudo em cinco cidades norte-americanas, com o objetivo de mitigar as ilhas de calor urbanas, através de simulações dos efeitos diretos e combinados indiretos do aumento de arborização sombreando os edifícios, e do uso de materiais de albedo elevado nas superfícies urbanas (coberturas, pavimentos e fachadas). Como resultado, os autores estimaram uma redução no consumo elétrico no horário de pico das cidades estudadas em torno de 1,8GW, e uma economia de aproximadamente US\$ 30milhões para as cidades de Chicago e Sacramento.

Da mesma forma, Yang, Wang e Kaloush (2015) apontam que em termos de consumo de energia, os maiores albedos resultam em economia de energia para resfriamento e eventuais aumentos de consumo com aquecimento, cuja magnitude depende de interações de fatores ambientais urbanos, incluindo características de construção, forma urbana, localizações geográficas, clima local, entre outros. Apontam ainda que, quando aplicado em grande escala, o uso de albedos altos tem impacto positivo na qualidade do ar urbano, direta ou indiretamente.

Makropoulou e Gospodini (2016) investigaram as condições microclimáticas em três espaços abertos no centro da cidade de Volos, Grécia, com diferentes formas e diferentes materiais de construção e pavimentação. Como resultado os autores observaram que as temperaturas do ar no interior de blocos mais fechados e intensamente impermeabilizados, com menores albedos, tiveram uma média de temperatura do ar até 4° C maior do que em outros pontos da cidade. Eles concluíram que a geometria urbana quando combinada com superfícies

urbanas impermeáveis de baixa capacidade térmica e materiais de baixa refletância, como asfalto e cimento, influencia o ambiente térmico dos espaços livres.

Através das diversas pesquisas, tem-se a importância da escolha dos materiais que compõem os espaços urbanos para assegurar a manutenção de características microclimáticas favoráveis ao conforto do pedestre. Em relação ao albedo dos pavimentos, a aplicação de albedos mais elevados é mais percebida na temperatura superficial do que na temperatura do ar, além disso, é mais eficiente em locais de clima quente quando integrado à arborização urbana.

2.2.3 Arborização urbana

A presença de áreas arborizadas desempenha uma série de vantagens à cidade, criando microclimas mais amenos e, como consequência, atuando no rigor térmico. Diversas pesquisas reconhecem a propriedade de arrefecimento térmico do espaço urbano promovido por diversas espécies arbóreas, especialmente potencializado quando em conjunto com superfície gramada (SHASHUA-BAR; HOFFMAN, 2000; ONISHIA et al., 2010; YANG; LAU; QIAN, 2011; DIMITROVA et al. 2014; PERINI; MAGLIOCCO, 2014).

A arborização na cidade atua em modificações abrangendo desde o campo térmico de ruas e praças até a escala urbana, dependendo da sua configuração e da área plantada. Entre as propriedades condicionantes da avaliação da contribuição das espécies ao espaço térmico urbano, estão: área arborizada ou plantada, espécie, densidade da copa, disposição das espécies arbóreas nos espaços abertos (ruas, praças, parques), condição hídrica, propriedades do solo, fatores psicrométricos e condições climáticas (GIVONI, 1998; BUENO-BARTHOLOMEI, 2003; MASCARÓ, 2004; OKE, 2009; ABREU; LABAKI, 2010; ERELL; PEARLMUTTER; WILLIAMSON, 2011; FAVRETTO; CHVATAL, 2011; ABREU, 2012).

Em cidades com clima quente e seco, a proporção das diferenças de temperatura do ar entre áreas arborizadas e áreas sem sombreamento, pode ser mais significativa do que em cidades com condições climáticas diversas (ERELL; PEARLMUTTER; WILLIAMSON, 2011). Sob agrupamentos de árvores de copa densa, a redução na temperatura do ar pode chegar a 4°C, comparadas a áreas com exposição direta à radiação solar (MASCARÓ, 2004).

Corroborando com os resultados de diversas pesquisas, Lima (2009), constatou que sob altas temperaturas e baixa umidade relativa do ar a arborização age de maneira mais perceptível,

regulando as condições térmicas dos espaços urbanos. A presença significativa de vegetação arbórea em uma praça na cidade de Maringá, Paraná, contribuiu para a redução da temperatura média do ar em até 1,4°C, quando comparada com outra praça com pouca vegetação, ao mesmo tempo que incentivou a comunidade a utilizar o espaço como área de lazer ou como opção de área de passagem no trajeto diário.

As árvores promovem o controle da temperatura e da umidade, pela evapotranspiração e pelo sombreamento. Através da evapotranspiração, ocorre o resfriamento das folhas e do ar adjacente, devido à retirada de calor latente. Já o sombreamento atenua a radiação solar incidente e, consequentemente, o aquecimento das superfícies, atenuando a temperatura superficial destas e a emissão de radiação de onda longa para o meio (LOMBARDO, 1985; GIVONI, 1998; ROMERO, 2007; LABAKI et al., 2011). Devido ao comportamento seletivo na absorção de diferentes comprimentos de onda, a radiação solar visível e infravermelha pode ser interceptada pelas espécies arbóreas entre 60 a 90 % (LABAKI et al., 2011).

Em relação à radiação solar, Bueno-Bartholomei e Labaki (2003) explicam que diferentes espécies arbóreas apresentam desempenho distinto quanto a sua redução. Isso ocorre devido às características específicas das espécies, como densidade da copa, tamanho, forma e cor das folhas e, também, idade da árvore e fase de crescimento.

Bueno-Bartholomei (2003) avaliou a atenuação da radiação solar por diferentes espécies arbóreas, assim como o conforto térmico proporcionado por elas, através do método do Voto Médio Estimado (VME). Os resultados mostraram que não existe uma relação direta entre a diminuição da radiação solar e o conforto térmico proporcionado pela sua sombra avaliado pelo VME. Entre as espécies analisadas, o Jambolão, a Cassia e o Ficus, foram as que mais atenuaram a radiação solar, 92,8%, 88,6% e 863%, respectivamente. As espécies que mais contribuíram para a melhoria dos índices de conforto térmico foram a Pata de Vaca e o Sombreiro, que atenuaram a radiação em 81,7% e 78,6%, respectivamente.

Também em uma avaliação do conforto térmico propiciado por diferentes espécies arbóreas, Abreu e Labaki (2010), constataram que o conforto térmico propiciado pelas diferentes espécies ao longo do ano, dependem da arquitetura da sua copa. A avaliação realizada com três diferentes índices de conforto térmico, o VME ou PMV (Predicted Mean Vote), o PET (Temperatura Equivalente Fisiológica) e a Carta Tridimensional Bioclimática, verificou que dentre as espécies analisadas, o Ipê Amarelo foi a espécie que proporcionou melhor sensação de conforto térmico, e que as espécies perenes, como o Jambolão e a Mangureira tiveram

condições mais confortáveis encontradas à sombra da copa da árvore. Esse último resultado foi explicado pela característica termorreguladora das árvores, que mantem a temperatura e a umidade relativa do ar ao seu redor em um intervalo adequado para seu sustento.

O resfriamento do campo térmico diurno das áreas arborizadas, conforme Oke (1996), ocorre principalmente em locais com grande massa arbórea e com piso gramado irrigado. A máxima intensidade de arrefecimento ocorre no período da tarde ou início da noite. Em parques urbanos secos ou com arborização esparsa as temperaturas do ar são altas durante o dia, em função da exposição à radiação solar, porém, no período noturno, pode haver uma diminuição na temperatura do ar nesses locais quando comparada a temperatura do entorno, devido à emissão de radiação de onda longa. Essas diferenças do campo térmico entre áreas verdes e o entorno construído, quando representativas, caracteriza o fenômeno de escala local denominado efeito Oásis.

Em um estudo sobre o efeito do sombreamento das árvores nas temperaturas em áreas urbanas de Manchester, Armson, Stringer e Ennos (2012), constataram que o efeito de resfriamento ocasionado por esse sombreamento é mais perceptível quando avaliadas as temperaturas das superfícies dos pavimentos sombreados. Os resultados mostraram que, quando sombreada, a temperatura de superfície da grama pode ser de 4 a 6°C menor que a temperatura do ar e a temperatura de superfície do concreto pode ser reduzida em até 19°C. Além disso, o estudo mostrou que o sombreamento das árvores pode contribuir com uma redução da temperatura do ar de 1 a 2°C, dependendo da espécie.

De acordo com Wong e Chen (2009) apud Yang, Lau e Qian (2011), o efeito de resfriamento da vegetação está intimamente relacionado com a densidade da folhagem, que pode ser quantificada pelo índice de área de folha. Esse índice é definido como a área total de um único lado da folha de uma espécie arbórea pela unidade de área do solo. Quanto a esse efeito de resfriamento, Perini e Magliocco (2014), em um estudo realizado na Itália, constataram que o arrefecimento da temperatura do ar em espaços abertos proporcionado por espécies arbóreas em áreas densamente construídas pode proporcionar uma economia no consumo de energia para o condicionamento artificial de edifícios de até 37%.

A vegetação arbórea também pode ser empregada para controlar a direção e a velocidade dos fluxos de ar. Ela atua na melhoria da ventilação e na aeração urbana, permitindo a circulação de ar e facilitando a dispersão dos poluentes. No entanto, a dispersão dos poluentes depende ainda do fluxo dos ventos no nível da rua para gerar a mistura com as camadas de ar menos

poluído. Em ruas com vegetação muito densa, a dispersão pode ficar comprometida pela diminuição dos ventos, sendo importante considerar este efeito em ruas de tráfego intenso (GIVONI, 1998).

Nesse sentido, Wania et al. (2012) realizaram um estudo através de simulação computacional para verificar a influência da vegetação na dispersão de poluentes de tráfego em cânions urbanos. Segundo os autores, elevadas coberturas verdes atuam na redução da velocidade do vento no nível da rua e podem aumentar a concentração de partículas poluentes. Essa situação pode ser agravada em cânions urbanos profundos onde a velocidade do ar é baixa. Com base nos resultados, os autores recomendam que em cânions com relação H/W acima de 0,5, altas coberturas verdes sejam evitadas, em especial, deve ser evitado o total sombreamento da via por espécies arbóreas. Assim, é importante que haja porosidade na cobertura vegetal de ruas e avenidas de tráfego para possibilitar a diluição de poluentes com o ar limpo presente acima da camada de dossel urbana.

Givoni (1998) destaca a importância do sombreamento das vias de circulação de pedestres, para a promoção da qualidade ambiental urbana. É importante considerar que nas ruas mais estreitas os edifícios proporcionam maior sombreamento para pedestres nas calçadas, mas no caso de vias mais largas, é essencial a adoção de vegetação arbórea. Nesse sentido, Dimitrova et al. (2014) verificaram que o sombreamento proporcionado pela arborização em cânions urbanos proporciona temperaturas do ar até 1° C mais baixas do que o sombreamento proporcionado por edifícios.

De acordo com Ali-Toudert e Mayer (2006), o uso de espécies arbóreas alinhadas em cânions urbanos proporciona melhores condições térmicas para o pedestre, principalmente através da diminuição da radiação térmica pelo sombreamento, porém essas vantagens são pouco observadas no espaço circundante. Em cânions mais profundos a presença de vegetação arbórea é mais relevante em ruas com orientação Leste-Oeste, nas quais o lado Norte (Hemisfério Norte) é o mais adequado para o plantio das espécies.

Corroborando com esses resultados, Andreou (2014), em análise dos efeitos da vegetação em cânions urbanos no mediterrâneo, constatou que em cânions profundos, as árvores proporcionam um aumento de 20% no sombreamento, nos meses de verão, na superfície horizontal em ruas no eixo Leste-Oeste (L-O). Já em ruas orientadas no sentido Norte-Sul (N-S), o incremento no sombreamento é menos significativo, no máximo 7%. Por outro lado, Shashua-Bar e Hoffman (2004) mostraram que a presença de arborização em linha em áreas

de Tel-Aviv, Israel, propiciou temperaturas do ar de 1 a 2,5°C mais baixas do que em ruas sem vegetação, no horário mais quente do dia, às 15:00h; os efeitos de resfriamento foram semelhantes para cânions no eixo N-S e no eixo L-O. As diferenças mais significativas foram obtidas em cânions de menor proporção H/W.

Coutts et al. (2015), através do monitoramento de variáveis microclimáticas em dias de verão, analisaram o efeito da vegetação arbórea no microclima de cânions urbanos em Melbourne, Austrália. Os cânions possuíam orientação L-O, com contrastantes coberturas arbóreas (alta e baixa) e diferentes geometrias urbanas (cânions profundos e superficiais). No cânion superficial (relação H/W de 0,27 a 0,32) com presença de arborização houve um arrefecimento em média de 0,2 a 0,6 °C durante o dia, chegando ao máximo de 1,5°C. No cânion profundo (relação H/W de 1,06 – 0,54), a influência do sombreamento promovido pelas copas das árvores foi mascarada pelo efeito do sombreamento dos altos edifícios. Observou-se que a presença das árvores foi muito eficaz na redução do estresse térmico (UTCI) diurno no verão, reduzindo o estresse térmico de muito forte (UTCI > 38 ° C) até forte (UTCI > 32°C). Os autores concluíram, ainda, que a influência das árvores na redução da temperatura do cânion foi fortemente condicionada pela redução na temperatura radiante e que seu efeito é altamente localizado e variável, dependendo da forma das espécies, da geometria do cânion e de condições meteorológicas.

Considerando o efeito extremamente localizado das áreas verdes, quanto à sua proporção e distribuição em áreas urbanas, Givoni (1998), Spirn (1995), e Assis, (1990), recomendam a sua distribuição pelo espaço construído. Segundo Givoni (1998), os efeitos das plantas no clima nas áreas construídas dependem da fração de áreas verdes, públicas e privadas, relativa a toda a área urbana construída. Mascaró e Mascaró (2002) recomendam limitar a incidência da radiação solar em, no mínimo, dois terços da área de circulação de pedestres, praças e estacionamentos no período quente.

O posicionamento das árvores nas vias também deve considerar seus efeitos noturnos. Conforme Coutts et al. (2015), a cobertura proporcionada pelas copas das árvores pode dificultar as perdas de radiação de onda longas no interior do cânion, dependendo de sua geometria, e também reduzir significativamente a velocidade do vento, desejável em períodos quentes. Dessa forma, as árvores devem ser colocadas estrategicamente para maximizar sua área de sombra, porém espaçadas o suficiente para permitir o resfriamento atmosférico noturno.

Em relação a escolha das espécies arbóreas, recomenda-se que seja feita considerando os aspectos climáticos locais; o local onde serão plantadas; suas características morfológicas; a idade; a manutenção requerida para cada espécie e as formas de associação das espécies entre elas e em relação ao espaço em que estão inseridas (BUENO-BASTHOLOMEI, 2003). Recomenda-se espécies caducifólias, que perdem suas folhas no período das temperaturas mais baixas, para cidades de clima temperado ou que apresentem desconforto por frio no inverno. Além disso, devem ser utilizadas preferencialmente espécies nativas (MINELLA, 2014).

2.2.4 Geometria urbana

O microclima nos cânions urbanos é fortemente afetado pela incidência solar e suas condições de sombreamento. Parâmetros como a altura dos edifícios e distância entre eles e a orientação da via caracterizam a geometria urbana e o desenho do cânion, definindo as condições de acesso da radiação solar nesse espaço e, conseqüentemente, exercendo um papel determinante nas condições de conforto dos espaços abertos.

Assim, a geometria urbana se refere às relações nos cânions urbanos entre a altura dos edifícios e a distância entre eles e sua orientação. Diferentes configurações afetam a temperatura do ar, temperatura superficial, o fluxo de ar, a radiação e a iluminação solar de forma distinta ao longo do gabarito das edificações.

A configuração da geometria urbana pode ser determinada tanto pela relação entre a altura e a largura da via através da relação H/W (H : *High*, W : *Width*), como pelo Fator de Visão do Céu (FVC), determinado por um ângulo (Ψ). A Figura 6 ilustra as relações de altura (H) e espaçamento entre as edificações (L), proporção H/W e o FVC (Ψ). Nota-se pela figura que quanto maior a relação H/W , menor o FVC.

Figura 6: Relação H/W (H/L) e Fator de Visão do Céu (Ψ)
Fonte: Mascaró (2004).

Oke (1988) tem investigado como o clima urbano e a geometria dos cânions estão relacionados e como esses resultados podem contribuir com o planejamento urbano com um desenho climaticamente orientado. Ele sugeriu relações H/W para cidades de médias latitudes ($45^\circ N$), com um limite inferior próximo de 0,4, para proporcionar um grau de proteção e reter uma porção da ilha de calor nos períodos frios. Recomendou, também, um limite superior de 0,60 a 0,65 que assegura tanto a dispersão atmosférica quanto a manutenção do acesso solar no interior dos cânions.

Romero (2001) classifica os espaços configurados entre edifícios, resultantes da sua geometria urbana, em três categorias: expansivos, de recolhimento e claustrofóbicos (Figura 7). A avaliação desses espaços é feita segundo o índice W/H , em detrimento da relação H/W .

Figura 7: Relação W/H : espaços claustrofóbicos, espaços de recolhimento e expansivo, respectivamente
 Fonte: Romero (2001).

Os espaços claustrofóbicos são áreas de densidade alta, com proporções $W=1/8H$, $W=1/4H$ e $W=1/2H$. Eles absorvem calor muito acima do nível do solo e verificam um amortecimento do ciclo térmico; nesse caso, a temperatura normalmente permanece estável durante o dia e só é alterada por um fator extremo. Nos recintos de densidade média, chamados de espaços de recolhimento, com proporções $W=H$, $W=2H$ e $W=3H$, a absorção de calor ocorre próxima do solo e a possibilidade de inversão térmica é menor, ou seja, a temperatura no interior do cânion tende a ser igual à da parte exterior. Já nos espaços expansivos, com baixa densidade ($W \geq 4H$) a maior parte da radiação é refletida e a possibilidade de inversão térmica é baixa. Nesse último caso, a temperatura no espaço formado pelos edifícios tende a ser igual à do exterior (ROMERO, 2009).

Quando confrontados os espaços classificados por Romero (2001) com os estudos de Oke (1988), o intervalo da razão H/W proposto por Oke (ibid.), classificam-se como espaços de recolhimento. Oke (2006) também estabelece uma classificação de Zonas Climáticas Urbanas (UCZ) associadas a diferentes formas urbanas e organizadas de acordo com a geometria urbana, representada por sua relação H/W , rugosidade e taxa de ocupação do solo (Tabela 3).

A rugosidade ou comprimento da rugosidade (z_0) é a classificação proposta por Oke (2006) para terrenos urbanizados utilizada nos estudos de análise das alterações no fluxo de ventos. Esse atributo corresponde à altura a partir do solo onde a velocidade do vento é igual a zero, considerando um perfil vertical cuja variação apresente comportamento logaritmo com a altitude. Classifica-se em “4” ($z_0=0,10\text{m}$) para espaços abertos com poucos obstáculos (edifícios ou árvores isoladas); “5” ($z_0=0,25\text{m}$) espaços ásperos, com obstáculos espalhados; “6” ($z_0=0,5\text{m}$) espaços muito ásperos, áreas moderadamente cobertas por edifícios baixos com afastamentos significativos; “7” ($z_0=1,0\text{m}$) áreas densamente construídas com pouca variação de altura; “8” ($z_0=2,00\text{m}$) espaços caóticos, centros urbanos compostos por edifícios altos e baixos (OKE, 2006).

Conforme Oke (2009), a porção do céu visível ou o Fator de Visão do Céu (FVC) é um índice que revela o quanto de céu disponível existe sobre determinado ponto da superfície terrestre para que se realizem as trocas de energia naquele ponto. O tamanho das edificações interfere nesse fator, quanto mais baixas as edificações e quanto maior o espaçamento entre elas, maior será a porção de céu visível. Esse fator é um parâmetro adimensional que expressa a relação geométrica entre a superfície terrestre e o céu, quantificando a área de céu visível e a respectiva projeção da obstrução pelos elementos da superfície. A projeção dessa edificação na abóbada celeste é a porção do céu por ela obstruída para o observador. Seu valor numérico é sempre menor que a unidade, pois dificilmente se encontram regiões urbanas que não apresentem nenhuma obstrução do horizonte (nesse caso seu valor seria a unidade). A estimativa do fator de visão do céu pode ser feita por processos analíticos, por fotografia, por processamento de imagens, por diagramas ou por gráficos.

Tabela 3: Classificação das UCZs

Zona Climática Urbana (UCZ)	Imagem	Rugosidade	Relação H/W	Taxa de ocupação (%)
1. Área urbana intensamente desenvolvida com arranha-céus com revestimento. Exemplo: torres do centro urbano		8	>2	>90
2. Área urbana intensamente desenvolvida, com alta densidade urbana, com edifícios de 2 a 5 pavimentos, revestidos de pedras ou tijolos. Exemplo: antigo centro urbano.		7	1,0-2,5	>85
3. Área urbana desenvolvida, com média densidade urbana com edificações de casas, lojas e apartamentos alinhadas ou isoladas, mas próximas. Exemplo: bairro residencial		7	0,5-1,5	70-85
4. Área urbana desenvolvida, baixa ou média densidade com edifícios baixos e amplos e estacionamento pavimentado. Exemplo: centro de compras e armazéns		5	0,05-0,2	70-95
5. Área urbana com desenvolvimento médio, baixa densidade, suburbana, com 1 ou 2 pavimentos. Exemplo: subúrbio residencial.		6	0,2-0,6 Até >1 com árvores	35-65
6. Uso misto com edifícios amplos e paisagem aberta. Exemplo: instituições como hospitais, universidades e aeroportos.		5	0,1-0,5 Depende das árvores	<40
7. Áreas semi-rurais, casas espalhadas em paisagem natural ou área agrícola. Exemplo: fazendas		4	>0,05 Depende das árvores	<10

Legenda: edifícios; vegetação; solo impermeável; solo permeável

Fonte: adaptado de Oke (2006).

A principal diferença entre a relação H/W e o FVC, é que a primeira não leva em consideração elementos como árvores, pérgolas, marquises ou perfis verticais diferentes, dentre outros, por sua vez o FVC é determinado a partir de um ponto e engloba todos os elementos presentes no local (ROSSI, 2012). Dessa forma, em uma rua, por exemplo, existem diversos FVC, que variam de acordo com o ponto escolhido, já a relação H/W simplifica a geometria do cânion a partir do perfil predominante. Para a escolha do índice deve ser levado em consideração o tipo de avaliação a ser realizada, sendo os dois utilizados para estabelecer relações de geometria em cânions urbanos.

Existe um consenso de que a geometria urbana interfere no ambiente térmico nos cânions urbanos de alguma forma, porém a relação entre a geometria e os diversos parâmetros ambientais nem sempre é facilmente comprovada quando demonstrada de forma estatística. Entre os estudos que corroboram com evidências da influência da geometria para a formação do ambiente térmico, citam-se as pesquisas de Nakamura e Oke (1988); Assis (2000); Duarte e Serra (2003); Svensson (2004); Ali-Toudert e Mayer (2007); Minella et al. (2009); Rossi, Krüger e Nikolopoulou (2011); Silva (2013); Shishegar (2014); Taleghani et al. (2015). Conforme Svensson (2004), os diferentes resultados encontrados na literatura podem ocorrer em função dos diferentes métodos e procedimentos para a obtenção dos dados.

Nakamura e Oke (1988) foram pioneiros na pesquisa sobre evolução temporal e distribuição espacial da temperatura do ar em cânions urbanos (ALI-TOUDERT; MAYER, 2006). Em um de seus estudos, na cidade de Kyoto, Japão, os autores encontraram uma diferença de 0,5 a 1°C entre os valores de temperatura do ar entre a cobertura e o interior de um cânion com orientação L-O e relação H/W próxima de um. As diferenças maiores foram em relação às coberturas e 0,5 metros do solo, onde os maiores valores de temperaturas do ar foram registrados. A diferença pouco significativa foi atribuída, principalmente, às turbulências do ar na camada interurbana.

Pearlmutter (1998), em seu estudo realizado em Dimona, Israel, encontrou diferenças mais representativas entre a temperatura do ar no interior do cânion, a uma altura de 1,70 m, e no nível acima das coberturas. As diferenças foram de aproximadamente 3 °C, considerando dois cânions perpendiculares (orientação N-E e L-O) com geometria compacta, regular e simétrica (relação H/W de 1). Os resultados obtidos também apontaram que a amplitude térmica no interior do cânion foi menor que a registrada no nível acima das coberturas, o que, segundo o autor, pode estar relacionado ao aquecimento das paredes no interior do cânion.

Oke (2009) explica que os efeitos de aquecimento e resfriamento relacionados à geometria em cânions urbanos são distintos para as condições diurnas e noturnas. Durante o dia, o sombreamento das edificações pode provocar uma diminuição na quantidade de radiação que atinge o solo e, dessa forma, na temperatura do ar próximo ao nível da rua. Por outro lado, o cânion tende a acumular calor proveniente da radiação de ondas curtas recebidas pelas superfícies, promovendo seu aquecimento.

No período noturno, nas primeiras horas após o pôr-do-sol, o calor armazenado é liberado na forma de radiação de ondas longas. Porém, quanto mais obstruído é um local no meio urbano, menor sua capacidade de troca térmica radiativa, o que dificulta a irradiação térmica do calor. Ou seja, quanto maior a relação H/W , menor é o fator de visão do céu e de dissipação da radiação de ondas longas, diminuindo, assim, a taxa de resfriamento das áreas urbanas através da redução do transporte turbulento devido ao abrigo do vento e da quantidade de calor antropogênico liberado. Esses fatores contribuem para o aquecimento noturno, e conseqüentemente, com a formação de ilhas de calor. Cânions urbanos profundos podem produzir uma ΔT_{u-r} (ilha de calor urbana) de 5 a 7°C (OKE, 1987).

Em relação ao fenômeno da ilha de calor resultante de algumas geometrias urbanas, Oke (2009) explica que ele pode ser benéfico em cidades de latitude média no período de inverno, já que ele diminui a necessidade de aquecimento artificial, promovendo a conservação de energia. Porém, o efeito da ilha de calor em situação de verão proporciona alto nível de estresse térmico. Para localidades com indicações de inadequação térmica, o desenho urbano deve ser utilizado de maneira a favorecer o maior conforto térmico aos espaços internos e externos às edificações.

Johansson (2006), em sua pesquisa realizada em Fez, no Marrocos, constatou que uma geometria compacta nos cânions urbanos é desejável no período do verão, porém no inverno um cânion mais largo é favorável para o aquecimento solar passivo. Conforme, Erell e Williamson (2007), em locais com cânions urbanos profundos e estreitos, a ΔT_{u-r} pode ser negativa ao meio dia, resultando em temperaturas mais baixas que o entorno circundante, efeito denominado de *cool island* ou ilha de frescor. Esse fenômeno, assim como a ilha de calor, ocorre preferencialmente em dias de sol, sem nebulosidade, e associado a ventos fracos.

Romero (2001) explica que no espaço densamente construído, ou seja, onde há uma pequena distância entre os edifícios, a trajetória da radiação solar é complexa. Parte significativa de

radiação chega às coberturas sobre o nível do solo, mas apenas uma parte pequena chega ao solo. A radiação que incide nas fachadas é parcialmente refletida nas paredes das construções vizinhas, dependendo do albedo dos materiais construtivos. Ao final desse processo, apenas uma pequena parte da radiação solar incidente nas paredes é refletida para a atmosfera, enquanto a maior parte é absorvida pelas paredes dos edifícios.

A intensidade da perda de radiação de onda longa para o céu das paredes e do solo dependem da porção do céu visível no qual ela é liberada, ou seja, “a fração do céu que a parede ‘vê’ ” (ROMERO, 2001, p. 89). A radiação de onda longa emitida pelas paredes verticais pode ser apenas metade do que é emitida pela cobertura numa área semelhante. Isso ocorre quando grande parte da abóboda celeste “vista” pela parede está obstruída por outras construções. Em uma área de densidade média, relação W/H próxima de 1, a maior parte da radiação refletida incide em outras edificações ou no solo, já em uma área de alta densidade, quando W é igual ou inferior a $1/4H$, a maior parte da absorção ocorre muito acima do nível do solo (Figura 8) (ROMERO, 2001).

Figura 8: Relação W/H e radiação solar
Fonte: Romero (2001).

Nesse sentido, Matzarakis; Rutz e Mayer (2010) destacam a importância da troca radiante em cânions urbanos principalmente em condições de calor, também reconhecida por outros pesquisadores (LINDBERG et al., 2013; ERELL et al., 2014; JOHANSSON et al., 2014). O parâmetro normalmente usado para descrever os efeitos radiantes é a Temperatura Radiante Média (T_{RM}), um indicador que descreve o valor médio entre a radiação térmica que incide sobre as superfícies do local, (objetos e seres vivos) e as aquece, e a radiação que elas emitem de volta para o ambiente (ERELL et al., 2014). Conforme Lindberg et al. (2013), o sombreamento proporcionado pelos edifícios em cânions com baixos valores de FVC, assim

como elevada massa arbórea, proporcionam menores valores de temperatura radiante média, especialmente em condições de céu limpo. Porém, segundo os autores, no inverno essas condições podem não ser desejáveis.

Oke (2009), em relação às trocas radiantes no interior dos cânions urbanos, analisou o comportamento da radiação solar em um cânion urbano com orientação N-S, H/W igual a 1, paredes de alvenaria pintadas de branco, sem janelas e com solo composto por vegetação dispersa. O autor observou que após o meio dia, a fachada Leste recebeu apenas radiação difusa e irradiação da parede oposta e o solo recebeu insolação somente ao meio-dia, sendo registrado o maior valor de radiação comparado com as outras superfícies. Durante a noite, observou-se que a perda de calor foi pequena devido ao reduzido FVC. Segundo o autor, a razão H/W influencia na forma como a radiação solar penetra nos cânions, e quanto maior essa relação, mais prejudicada será a perda de calor nesse espaço. Além disso, o albedo dos materiais que compõe o cânion também influi na sua capacidade de armazenar calor.

De acordo com Bourbia e Awbi (2004) a orientação das ruas influencia na formação do microclima em cânions urbanos. Os autores verificaram em sua pesquisa que em ruas orientadas no sentido N-S, 40 a 80% da via é sombreada, ao mesmo tempo que em ruas no eixo NO-SE, apenas de 30 a 50% da rua é sombreada ao longo do ano. Ali-Toudert e Mayer (2006) também analisaram diferentes configurações urbanas com diferentes orientações. Eles observaram que os valores máximos de temperatura do ar estavam relacionados à quantidade de radiação solar recebida pelos cânions. Quanto à orientação das vias, observaram que nos cânions orientados no sentido N-S os maiores valores de temperatura do ar ocorrerem no início da tarde, período de maior incidência de radiação solar, já nos cânions com orientação L-O, os maiores valores de temperatura ocorreram no final da tarde.

A geometria do cânion também determina o fluxo de ar no seu interior. Ele está condicionado principalmente à rugosidade e à porosidade urbana. A rugosidade relaciona-se à relação H/W e a orientação das ruas. Já a porosidade está relacionada ao modo como as edificações e obstáculos possibilitam a permeabilidade dos ventos e é representada pela razão entre o comprimento e a largura do cânion (L/W – *Length/Width*). Nos cânions urbanos, quando a direção do fluxo de ar dominante é normal (aproximadamente 30 graus em relação ao eixo longitudinal da via), ocorrem três tipos de regimes de fluxos de ar, considerando edificações com alturas homogêneas (OKE, 1988) (Figura 9).

Figura 9: Fluxos de vento em cânions urbanos: (a) fluxo de rugosidade isolada; (b) fluxo com interferência de esteira; (c) fluxo turbulento

Fonte: Oke (1988).

Conforme Oke (1988), quando as edificações estão bem distanciadas entre si ($H/W < 0,05$) não há interação entre os campos de vento, dando origem ao fluxo de rugosidade isolada. Em cânions com relação H/W entre 0,05 e 0,65 ocorre o fluxo com interferência de esteira: o atrito entre o fluxo de ar principal e o topo das edificações, gera um vórtice a sota-vento no interior do cânion que é impulsionado por deflexão, gerada pela face da parede a barlavento da edificação seguinte. Já em cânions mais profundos ($H/W > 0,65$), dependendo da velocidade do vento, cria-se um vórtice de circulação estável no interior do cânion que não interage com o campo de vento acima, originando o fluxo turbulento.

Em uma análise realizada por Carvalho, Corbella e Silva (2005), sobre atributos da morfologia urbana e variáveis climáticas em uma fração urbana de João Pessoa, verificou-se que existe uma correlação entre o FVC e a temperatura do ar, a velocidade do vento e o índice de aproveitamento e também entre a taxa de ocupação e a insolação. Gomes e Lamberts (2009), também verificaram correlações semelhantes na cidade de Montes Claros. As variáveis urbanísticas, densidade construída e FVC, apresentaram uma significativa influência na formação de ilhas de calor; dentre elas, na área central da cidade a variável fator de visão do céu teve ainda maior influência.

Bourbia e Boucheriba (2010) fizeram diversos monitoramentos de temperatura do ar e temperatura superficial em sete cânions urbanos na cidade de Constantine, Argélia, de clima quente e árido. Os cânions possuíam relações H/W de 1 a 4,8 e FVC entre 0,076 e 0,58. Eles observaram que quanto maior a relação H/W , menores as temperaturas superficiais e

temperatura do ar e consequentemente, em locais com maiores FVC, maiores as temperaturas externas do ar.

Souza (2010) analisou as relações entre o FVC, a temperatura urbana e o consumo de energia, na cidade de Bauru. Dentre as diversas relações entre esses fatores, observou-se uma taxa de 8,5% de aumento do consumo de energia elétrica à medida que ocorre um incremento de 1°C na intensidade da ilha de calor no verão. Essa configuração de maior consumo foi verificada para vias implantadas com valores de FVC entre 0,70 e 0,75.

Yuan e Chen (2011) analisaram o efeito do FVC na ilha de calor em áreas urbanas de Hong Kong e também realizaram um estudo paramétrico para relacionar o FVC com a ocupação do solo e altura dos edifícios, dois parâmetros práticos de planejamento. O estudo indicou que se cuidadosamente controlados, esses dois fatores, altura das edificações e ocupação do solo, os planejadores urbanos podem eficazmente utilizar o FVC como instrumento para mitigar a formação das ilhas de calor urbanas em áreas densamente ocupadas. Os estudos mostraram também que os efeitos combinados dos parâmetros podem ser diversos em locais com diferentes densidades de ocupação do solo; em uma das simulações, os efeitos combinados de forma positiva poderiam promover a diminuição de aproximadamente 0,4°C em uma área no centro da cidade.

Andreou (2014), realizou análises comparativas de sombreamento e condições de acesso da luz solar por simulação computacional em dois cânions urbanos, localizados na ilha de Tinos (latitude 37°N), Grécia, com diferentes características geométricas e de densidade urbana. O primeiro local analisado trata-se de um centro tradicional, compacto e com alta proporção H/W, entre 2 e 4; e o segundo, um centro contemporâneo caracterizado por ruas retas e menor proporção H/W, entre 0,7 e 0,9. Os resultados mostraram que em ruas com orientação N-S o aumento da razão H/W aumenta o sombreamento ao longo do ano, principalmente quando comparado às ruas orientadas no sentido L-O, que só apresentam considerável diferença de sombreamento com aumento da relação H/W a partir de 2,0. Conclui-se, também, que as ruas no eixo L-O ganham mais calor no verão e também são mais favoráveis ao resfriamento da carga energética do edifício, especialmente as do centro contemporâneo (baixa relação H/W); no entanto, essas características diminuem consideravelmente conforme aumenta a relação H/W.

Nakata-Osaki, Souza e Rodrigues (2015) desenvolveram uma ferramenta computacional desenvolvida como extensão de um programa que utilizada a plataforma SIG (Sistemas de

Informação Geográfica) para cálculo da máxima intensidade da ilha de calor noturna ($\Delta T_{u-r}(\max)$) baseada no modelo simplificado desenvolvido por Oke (1981). Utilizando a ferramenta, os autores verificaram a influência da geometria urbana na formação do fenômeno em cânions de relação H/W de 0,25 a 4,0 e com rugosidade (Z_0) entre 0,2 e 2,0. Para calibração do modelo simulado foram usados dados medidos em cânions de duas cidades brasileiras: São José do Rio Preto e Bauru. Verificou-se uma tendência de aumento da $\Delta T_{u-r}(\max)$ em relação ao valor H/W . Para um mesmo valor H/W , nos cânions mais homogêneos e com maiores áreas ocupadas pelas edificações ($Z_0 < 2,0$), as formações de ilhas de calor noturnas foram maiores do que as verificadas em cânions com maiores áreas de fachada e com alturas de edificações mais heterogêneas ($Z_0 \geq 2,0$). Os autores atribuem essa última diferença aos diferentes efeitos na turbulência dos ventos e nas áreas sombreadas pela geometria urbana.

Em uma avaliação do conforto térmico em cinco diferentes formas urbanas, Taleghani et al. (2015) observaram que a duração da radiação solar direta e a temperatura radiante são os parâmetros que mais exercem influência na sensação térmica do pedestre em cânions urbanos no período diurno. Das cinco formas analisadas por simulação computacional para as condições climáticas holandesas, os resultados mostraram, que a sensação térmica em cânions formados por edifícios esparsos, com o maior FVC das formas analisadas, fornece maior radiação solar direta e também resultou nos piores resultados de conforto térmico. As melhores situações de conforto foram obtidas no centro de edificações tipo pátio, com o menor FVC das formas em estudo. Em relação a orientação dos modelos, tanto os cânions orientados no sentido N-S quanto os com orientação L-O receberam quantidades similares de insolação e ventilação natural, porém melhores níveis de conforto térmico foram observados nos cânions com orientação N-S.

Hove et al. (2015) realizaram um estudo em que relacionam os efeitos da ilha de calor com as características geométricas de áreas urbanas em Roterdã, Holanda, com a densidade construída e com o conforto térmico. Os resultados mostraram consideráveis formações de ilha de calor noturna em áreas densamente construídas, com edifícios altos e alta taxa de impermeabilização, especialmente em dias quentes sob condições de céu limpo. A fração de área construída apresentou correlação de 50 a 90% com a formação da máxima ilha de calor intraurbana, que variou de 4,3 a 8 °C. Além disso, os autores observaram maiores índices de estresse térmico nas áreas urbanas quando comparados com a área rural; os maiores níveis de estresse térmico, principalmente no período noturno, apresentaram correlação positiva com características de densidade urbana, tais como menores FVC.

Dessa forma, observa-se que a geometria urbana, medida pela relação H/W ou pelo FVC está diretamente relacionada com as variações de densidade construída nas áreas urbanas. Por essa razão, e por sua influência nas condições térmicas urbanas, faz-se necessária a compreensão de como são tratadas e definidas as densidades no meio urbano.

2.2.5 Densidade urbana

A densidade urbana é de suma importância entre os elementos de desenho urbano. Uma dada densidade urbana pode resultar em características que condicionam o clima urbano de maneiras diferentes, tais como a fração do solo urbano coberta por edifícios, na propriedade térmica dos materiais constituintes dos espaços urbanos, na geometria dos cânions urbanos e nas áreas disponíveis para a vegetação na cidade.

Os parâmetros de uso e ocupação do solo, assim como as diretrizes para o parcelamento do solo correspondem a importantes fatores urbanísticos de definição da densidade urbana, que combinados com características climáticas locais, resultam em diferentes níveis de conforto térmico nas áreas urbanas.

No Brasil, o planejamento e o controle do uso e ocupação do solo são condicionados essencialmente pelas normas municipais de uso e ocupação do solo urbano ou zoneamento integrantes do plano diretor de cada município. Eventualmente, normas ambientais, de preservação do patrimônio histórico, entre outras não necessariamente municipais, também incidem sobre o território e limitam as possibilidades de aproveitamento do terreno urbano. Mas é a legislação urbanística municipal que estabelece, como regra geral, como e quanto se poderá construir em cada terreno urbano e para quais usos. É importante ressaltar que tais atividades devem, necessariamente, ser pensadas no marco do Estatuto da Cidade, que regulamentou o capítulo sobre política urbana da Constituição Federal de 1988 (CF/88), tendo o Plano Diretor Municipal como peça estratégica para orientar o desenvolvimento urbano.

O uso do solo é compreendido como o conjunto das diversas atividades consideradas para cada parcela, ou zona, do solo urbano. Já a ocupação do solo abrange o conjunto de parâmetros para ocupação dos lotes em cada parcela ou zona urbana. Como os municípios tem liberdade para formular os parâmetros urbanísticos a serem utilizados para regular o uso e ocupação do solo urbano, existem variações quanto a sua adoção e os padrões de mensuração variam, dependendo dos estudos urbanos. No Brasil, os mais usuais são os seguintes:

- Lote: terreno servido de infraestrutura básica; a legislação estabelece o tamanho mínimo e máximo para os lotes de novos parcelamentos;
- Testada: frente do lote definida pela linha que estabelece a separação entre a propriedade imobiliária e o logradouro público;
- Coeficiente de Aproveitamento (CA) ou Índice de Aproveitamento do Terreno (conhecido internacionalmente como *plot ratio* ou *floor area ratio* - FAR): relação entre a área edificável ou já construída e a área do terreno, ou seja, um índice que define o potencial construtivo dos lotes;
- Taxa de Ocupação (conhecido internacionalmente como *site coverage*): relação entre a projeção horizontal da(s) edificação(ões) e a área do lote;
- Afastamento: distância mínima a manter entre a edificação e as divisas do lote;
- Taxa de Permeabilidade: percentual da área total do terreno que não pode ser impermeabilizada;
- Gabarito: altura máxima das edificações, definida pela altura da edificação ou número máximo de pavimentos.

Uma das estratégias do planejamento urbano bioclimático é a diversidade de usos do solo, ou seja, a presença de diferentes atividades na mesma zona ou zoneamento. Esse arranjo aproxima as residências, de empregos, áreas de prestação de serviços e áreas de lazer, diminuindo a demanda por transporte motorizado e reduzindo as distâncias percorridas, resultando em menores gastos energéticos com mobilidade.

Jacobs (2000, p.221) defende a aceitação da diversidade e densidade das cidades como características fundamentais para sua vitalidade. Segundo ela a variedade de usos intensifica o uso dos espaços e têm um papel importante na garantia da dinâmica dos fluxos no espaço público: “todos sabem que uma quantidade imensa de pessoas se concentra nos centros das cidades e que, se não houvesse tal concentração, não haveria centro urbano que se prezasse – certamente não com a diversidade típica de centros”.

Gonçalves (2004) explica que no caso de um bairro em que predomina o uso residencial, ou um distrito primordialmente financeiro, por exemplo, esses usos podem atingir até 80% da área, permitindo o restante para a inserção de usos complementares, como comércio ou lazer. Essas combinações garantiriam a vitalidade urbana e o maior aproveitamento da infraestrutura urbana e do próprio edifício, passando das tradicionais oito horas diárias, para dezesseis horas.

Em um estudo realizado por Chen et. al. (2011), em relação aos parâmetros de uso e ocupação do solo e consumo de energia em cidades de acelerado crescimento urbano no sul da China, observou-se que o tamanho da cidade está relacionado com o consumo de energia por habitante, notadamente devido ao crescimento econômico e o aumento da demanda de tráfego. Os autores concluíram, principalmente, que a irregularidade na distribuição do uso do solo e a predominância de longos caminhos a serem percorridos também afetam o consumo de energia com automóveis.

A relação de diversidade do uso solo com a ocupação urbana constitui parte do argumento pelas vantagens econômicas e sociais da alta densidade urbana. No entanto, o estabelecimento de parâmetros para adensamento e verticalização ainda são pontos polêmicos entre os pesquisadores, urbanistas e gestores.

A forma como ocorre a ocupação do solo nas cidades impacta diretamente no clima urbano, sendo a densidade construída um dos indicadores mais apontados pelos pesquisadores por afetar os microclimas nas áreas urbanas, pelo seu efeito cumulativo, determinante na modificação do clima regional pela urbanização. A densidade construída é definida pela relação direta entre a área construída total e a área total de um terreno, e corresponde ao Coeficiente de Aproveitamento.

Áreas urbanas de alta densidade podem provocar sobrecarga da infraestrutura urbana e causar uma saturação do solo urbano, aumentando a pressão de demanda sobre este, produzindo um meio ambiente inadequado ao desenvolvimento urbano. A alta densidade construída representa um risco maior de degradação ambiental, principalmente pelo aumento da poluição e possibilidade de maior geração de resíduos sólidos, se não for bem gerenciada. Fator agravante é o aumento do ruído urbano, provocado pela maior concentração de pessoas.

Essas densidades elevadas também afetam o clima urbano. Em geral, elas contribuem para o aumento da temperatura do ar e a diminuição da umidade relativa do ar, decorrente, principalmente, da substituição da cobertura vegetal pelos volumes edificadas e pelas vias de circulação, interferindo no albedo das superfícies urbanas e no processo de evaporação.

O adensamento construtivo também interfere na permeabilidade ao vento, modificando sua velocidade e direção, o que pode, entre outras consequências, dificultar a dispersão de poluentes. Essas alterações no microclima urbano afetam o conforto térmico nos espaços

externos, no consumo de energia elétrica das edificações e podem causar ou intensificar o fenômeno ilha de calor. Além disso, o menor recuo entre as edificações e a formação de cânions urbanos profundos, pode ocasionar dificuldade de acesso à iluminação e ventilação naturais, obrigando as edificações a recorrerem a sistemas mecanizados.

Por outro lado, o espalhamento urbano tem seus problemas e tem sido questionado, ele pode ocorrer como consequência de processos como a baixa densidade urbana resultante de lotes com áreas grandes e a falta de continuidade da malha urbana, chamada de *leapfrogging* ou vazios urbanos (MASCARÓ, 2001). Em baixas densidades, principalmente quando associada à dispersão das atividades na cidade (residencial x serviços), há um maior incentivo ao uso do veículo automotor privado, seja devido às longas distâncias a serem percorridas e/ou a precariedade dos sistemas de transporte público. Em consequência, aumentam-se os gastos energéticos com transportes e investimentos necessários em infraestrutura.

Conforme Acioly e Davidson (1998), os municípios que incentivam, em seus planos de crescimento, políticas de aumento da densidade urbana, justificam-se pela eficiência no fornecimento e manutenção das infraestruturas e serviços urbanos e pela dinâmica econômica criada pelas relações de proximidade entre empresas. Por esse aspecto, a alta densidade tende a facilitar a oferta e distribuição eficiente de infraestrutura, enquanto que baixas densidades representam longas redes de infraestrutura, em potencial estado de ociosidade para poucos consumidores e, portanto, altos custos de investimentos per capita tanto para instalação quanto na operação.

Rogers (2001) e Edwards (2004) defendem o modelo de cidade densa ou compacta em que as atividades sociais e econômicas se sobrepõem a fim de diminuir o consumo de recursos e o nível de poluição, aumentando a eficiência energética urbana e evitando a expansão da cidade sobre a área rural. Os autores apontam como vantagens desse modelo: a manutenção de uma rede de transporte público, maior conexão entre os bairros, melhoria no microclima urbano e aumento na eficiência energética dos edifícios em locais de clima frio, onde a perda de calor de um edifício pode se converter em ganho para outro.

Além disso, Rogers (2001) aponta que quanto mais intenso for o uso do solo, menor a distância de viagem e maior a viabilidade de percursos a pé e de bicicleta, havendo menor necessidade do uso do carro. Essa diminuição do uso do automóvel também proporciona a oportunidade de um maior convívio social da comunidade urbana e o uso de outros modos de locomoção, contribuindo para uma mobilidade inclusiva destinada a todos os cidadãos.

Nesse passo, a cidade compacta tem sido comumente indicada como uma das mais apropriadas para o uso racional de energia e preservação dos recursos naturais. Mascaró (2001) aponta como vantagens dessa forma, a redução do número de viagens e consequente redução da emissão de poluentes, otimização da infraestrutura, proteção das áreas agrícolas rururbanas e diversidade cultural e social, e como desvantagens, o aumento da poluição, a perda de qualidade de vida e a redução de áreas verdes.

A Figura 10 mostra a relação entre a urbanização em algumas metrópoles do mundo e a pegada ecológica (EF) expressa em hectares globais per capita (gha./cap). Observa-se que em Houston a pegada ecológica per capita, ou seja, a pressão do consumo da população sobre os recursos naturais, é significativamente maior do que em cidades como Santiago e Tóquio, cidades mais compactas, notadamente em relação à mobilidade e moradia.

Figura 10: Relação entre urbanização e pressão ecológica em metrópoles mundiais
Fonte: Salat (2010).

Assim como em diversos países, as perspectivas de uma cidade mais eficiente através do modelo compacto também estão sendo adotadas em políticas de desenvolvimento urbano na Noruega. Por essa razão, Holden e Norland (2005) realizaram uma avaliação em oito áreas residenciais na região metropolitana de Oslo para avaliar a relação entre os parâmetros de uso e ocupação do solo e a eficiência energética urbana. Os autores constataram que nas áreas centrais, mais densas, as pessoas gastam menos energia com transporte, ou seja, se locomovem mais a pé e de bicicleta. No entanto, as análises mostraram que habitantes de áreas com maiores densidades (no caso, Rykkinn e Bjorndal) consomem mais energia com viagens de lazer realizadas de avião, o que indica que esse possa ser um possível efeito indireto da alta densidade, ocasionado, por exemplo, pela falta de áreas verdes. Por essa razão, os autores apontam que deve haver um limite para a densificação urbana.

Cabe ressaltar que a densidade construída por si só não é um indicador de qualidade urbana, pois com uma mesma densidade é possível compor diferentes formas urbanas, com diferentes configurações de espaços abertos, condições microclimáticas e distribuições de usos, que interferem diversamente na qualidade de vida.

Nesse sentido, Rogers (1999) realizou um estudo com três composições diferentes ilustrando como diferentes formas arquitetônicas apresentando diferentes resultados em relação aos espaços públicos e privados podem resultar na mesma densidade construída, no caso 75 habitações por hectare. A primeira composição arquitetônica resultou em edifícios de gabarito alto, implantados em espaços abertos, com baixa taxa de ocupação, onde não há jardim privado e relação direta do edifício com as ruas ao redor. Na segunda situação, ocorre um layout típico de Londres, com habitações baixas e horizontais, de 2 a 3 pavimentos, com jardins frontais privados. Nesse caso os espaços públicos e livres são definidos pela continuação da rua, que tem seu potencial reduzido devido à maior taxa de ocupação do solo. A terceira composição é constituída de edifícios de gabarito intermediário, implantados no perímetro do lote conformando um jardim interno semi-público que contém serviços e facilidades para os moradores. No pavimento térreo são distribuídas atividades comerciais e de serviços visando à vitalidade urbana (Figura 11).

Este último cenário proposto para o desenvolvimento urbano, buscando-se um precedente histórico, se assemelha às formas urbanas que aparecem como exemplares de paisagens em Copenhague e Barcelona, consideradas de alta densidade de ocupação do solo urbano, com bons serviços de transporte público, menor consumo de energia *per capita* que as cidades dispersas com baixa densidade, baseadas no transporte automotor privado.

Contudo, Mascaró (2001) destaca a falta de preocupação com fatores como o clima ou as condições socioeconômicas locais e o impacto no ambiente natural ou construído que essa forma urbana pode produzir se implantada sem considerar esses aspectos. Para a região tropical, por exemplo, ele aponta que densificar as formas urbanas em prol de um bom transporte público poderia ser um erro, já que esse não é um projeto de futuro fundamentado na experiência do passado; apesar de que bons resultados, em determinadas circunstâncias, poderiam ser obtidos.

Figura 11: Relação entre a densidade construída e a forma arquitetônica
Fonte: adaptado de Rogers (1999).

Sabe-se que o cenário da compactação urbana se fundamenta em exemplos históricos, alguns deles projetados com alto grau de dependência de energia e mecanização. Por essa razão, Mascaró (2001) recomenda que esta estratégia seja cuidadosamente avaliada no caso da cidade tropical e subtropical úmida, pois as consequências energéticas e ambientais são desfavoráveis. O autor cita o exemplo de Porto Alegre, cujo Plano Diretor prevê a densificação da cidade. Em simulação computacional das condições de ventilação natural urbana para o cenário antes da consolidação do plano comparada com a simulação do cenário de adensamento proposto, verificou-se a perda de ventilação no novo tecido urbano resultante, mais significativa em alguns bairros da cidade. Esse resultado poderá causar desconforto térmico ou elevado consumo de energia, que impacta forte e negativamente no meio ambiente em geral.

Ainda tratando de densidades, é preciso fazer uma distinção entre densidade construída e densidade populacional. A densidade populacional urbana, e a forma como ocorre sua distribuição nas áreas urbanas, é um aspecto importante que influi tanto no clima local quanto na própria dinâmica socioeconômica da área. É importante ressaltar também que alta

densidade construída não significa necessariamente alta densidade populacional. Gusson (2014) cita como exemplo a cidade de São Paulo, que possui na área central uma densidade média de 1000 empregos/ha e, no entanto, no distrito com maior densidade habitacional da cidade, o da República, possui 197 hab/ha.

As densidades residenciais nos bairros centrais de São Paulo, aproximadamente 94 hab./ha (habitantes por hectare) (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2010) são pequenas quando comparadas ao recomendado por Rueda (2006) para as cidades espanholas. O autor indica uma densidade mínima de 45 habitações por hectare e a recomendável, para a Espanha, em torno de 60 habitações por hectare, o equivalente a 157,5 hab./ha e 210 hab./ha, respectivamente, considerando uma média de 3,5 habitantes por habitação.

A esse fato, Mascaró (2001) observa que a principal causa do espalhamento urbano nas cidades brasileiras é a falta de continuidade da malha urbana, resultante de um grande número de vazios dentro do perímetro urbano. Normalmente existem aproximadamente 30 lotes por hectare, o que representa próximo de 100 hab./ha (caso todos estivessem ocupados), mesmo com apenas uma edificação por lote. No entanto, a densidade média registrada para as cidades de porte médio é de apenas 40 hab./ha.

Os estudos que analisam a dispersão urbana no Brasil trabalham com a hipótese de uma densidade mais econômica. Em estudos relacionando densidade demográfica e custo com urbanização, realizados por Mascaró (1989), considerando o padrão de moradia mais econômico, a densidade mais adequada variou entre 300 e 350 hab./ha, com o mínimo de 40 hab./ha. Para o caso da região subtropical úmida, essas densidades permitem ainda se ter uma boa qualidade ambiental da cidade, ambiências urbanas agradáveis microclimaticamente quando associadas a perfis heterogêneos ou a afastamentos laterais entre edificações, uma vez que favorecem a insolação de inverno e a ventilação permanente do recinto urbano e dos ambientes dos edifícios que a ele se abrem, contribuindo para retirar a poluição do ar.

Duarte e Serra (2003) defendem que é possível obter-se maior densidade, como pretendida por alguns planos diretores nas cidades brasileiras para reduzir os custos de infraestrutura e serviços, e pregada por pesquisadores para reduzir deslocamentos e consumo de energia, através do aumento da taxa de ocupação e coeficiente de aproveitamento, desde que aumente também a proporção de corpos d'água e vegetação. A ideia é equilibrar a maior densidade construída com os elementos naturais, exigindo-se uma determinada área verde por lote e permitindo a construção em altura quando possível.

Nessa mesma linha, Miana (2010) constatou em sua tese que a alta densidade urbana e a qualidade ambiental são compatíveis desde que as questões ambientais sejam inseridas no processo de projeto e que as soluções sejam adequadas a cada sítio. Segundo a autora, o adensamento urbano pode apresentar um efeito positivo na cidade através de um maior aproveitamento da infraestrutura, da redução de deslocamentos, do uso mais eficiente do espaço público e da potencialização da vitalidade urbana. Além disso, a aplicação criteriosa de estratégias de desenho urbano fundamentadas em princípios de desempenho ambiental alcança áreas urbanas de melhor qualidade e mais eficientes.

Por fim, é interessante observar que em suas pesquisas, Oke (1988) já havia afirmado que um desenho urbano de extremos, com centro muito denso e periferia espalhada, resulta em uma cidade com clima pobre. Além disso, o estudo das particularidades de cada cidade é essencial para a proposição de um desenho e planejamento urbanos compatível com as necessidades da população, visando a qualidade de vida nos espaços fechados e, essencialmente, nos abertos, que conferem vitalidade às áreas urbanas.

2.3 ESTUDO DO CONFORTO TÉRMICO EM ESPAÇOS ABERTOS

Tem sido crescente nos últimos anos o interesse em estudar e analisar o conforto térmico em espaços abertos nas áreas urbanas. Seu estudo visa principalmente à melhoria térmica de espaços existentes e o planejamento de novos espaços. Independente da função desses espaços, sabe-se que a compreensão do conforto térmico neles pode influenciar positivamente sua qualidade e o uso e comportamento das pessoas.

Nesse sentido, Chen e Ng (2011) ressaltam que os espaços externos são de suma importância para a sustentabilidade das cidades, uma vez que eles abrigam o tráfego de pedestres e diversas atividades ao ar livre, o que contribui para a habitabilidade e vitalidade urbanas. Nikolopoulou (2004 apud ROSSI; KRUGER; NIKOLOPOULOU, 2011) observa que espaços urbanos bem planejados melhoraram o clima local, a imagem da cidade e encorajam o planejamento de outras áreas. Além disso, atraem um maior número de pessoas, para o turismo e para o comércio e, também, trabalhadores e moradores, tornando a área mais atrativa economicamente.

Em grandes cidades, muitas pessoas passam grande parte do tempo em espaços fechados e artificialmente climatizados para abrigar-se do calor. No entanto, esse estilo de vida leva a

uma série de problemas, tais como o consumo de energia para arrefecimento dos edifícios, consequências negativas para a saúde física e mental dos ocupantes e, ainda, pode resultar em espaços urbanos menos vibrantes e socialmente sustentáveis. O encorajamento para maior utilização dos espaços abertos urbanos é possível através da concepção de espaços externos termicamente confortáveis (YANG; LAU; QIAN, 2011).

Segundo Erell, Pearlmutter e Williamon (2011), um desenho urbano climaticamente orientado, que proporcione conforto térmico aos usuários dos espaços abertos, melhora a qualidade de vida dos milhares de pessoas que vivem nas cidades, incentivando atividades ao ar livre e, ao aumentar o conforto dos pedestres, encorajando os moradores da cidade a diminuir o uso de automóveis privados. Por essa razão, as condições microclimáticas têm sido consideradas essenciais para a atratividade dos espaços abertos.

Dessa forma, observa-se que dentre os muitos fatores que determinam a qualidade dos espaços abertos, as condições térmicas têm grande importância e são consideradas em diversas pesquisas, uma vez que o uso desses espaços pelas pessoas traz benefícios para as cidades em diversas perspectivas, incluindo ambientais, sociais e econômicas.

Como visto anteriormente, o conforto térmico nos espaços abertos é resultado, não apenas das características climáticas de um local, mas de uma série de fatores que se referem à forma urbana e que interferem de maneira significativa na expressão microclimática desses espaços. Portanto, face às transformações as quais o desenho da cidade é submetido ou conduzido, faz-se necessário entender e quantificar como mudanças previstas ou sugeridas por planos urbanos podem afetar a qualidade térmica dos espaços abertos. Esse entendimento auxilia na condução do desenho urbano orientado climaticamente.

Assim, dada a importância desses estudos, essa seção tem como objetivo abordar a forma como é modelado e quantificada o conforto térmico dos espaços abertos, através da utilização dos índices. Posteriormente, é abordada a utilização da modelagem microclimática computacional como principal ferramenta para realizar estudos nessa área, também são apresentadas diferentes pesquisas que utilizaram esse instrumento para analisar e simular o conforto térmico nos espaços externos.

2.3.1 Índices de conforto térmico para espaços abertos

O conforto térmico humano é conformado pela percepção do indivíduo do ambiente circundante e mediado pelos mecanismos de resposta pessoal desse indivíduo. Assim, a modelagem de conforto térmico requer, em primeiro lugar, um meio de descrever o ambiente térmico externo e a fisiologia térmica interna, que juntos determinam o balanço térmico entre o corpo e o ambiente. O estresse térmico resultante é então correlacionado com a percepção subjetiva chamada de sensação térmica, que envolve as preferências expressas por pessoas expostas à combinação específica de condições térmicas (ERELL et al., 2014).

Os primeiros estudos de conforto térmico foram realizados em ambientes internos e levou ao desenvolvimento de uma série de índices projetados para capturar o efeito combinado de quatro parâmetros ambientais - temperatura do ar (T_a), umidade relativa (UR), velocidade do ar (V_a), temperatura radiante média (T_{rm}) - e parâmetros pessoais - vestimenta e atividade. Os índices foram, de forma geral, expressos em termos de uma temperatura equivalente, segundo o qual os outros parâmetros foram mantidos constantes em níveis que eram considerados típicos da maioria das condições interiores (CHEN; NG, 2011).

Dessa forma, os índices de conforto térmico buscam reunir o efeito conjunto dessas variáveis, ambientais e pessoais, em um parâmetro. De forma geral, os índices são desenvolvidos fixando os tipos de variáveis pessoais e, então, englobam as diversas condições ambientais que determinam respostas iguais por parte dos indivíduos (FROTA; SCHIFFER, 2001). Conforme Blazejczyk et al. (2012), ao longo dos anos foram desenvolvidos mais de 100 diferentes tipos de índices térmicos descrevendo as trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente, sendo a maioria deles para condições internas.

Frota e Schiffer (2001) classificam os índices de conforto térmico em índices biofísicos, fisiológicos e subjetivos. Os índices biofísicos se fundamentam nas trocas de calor entre o corpo e o ambiente e correlacionam os elementos de conforto com as trocas de calor que originam esses elementos. Os índices fisiológicos se baseiam nas reações fisiológicas que se originam de condições conhecidas de temperatura seca do ar, temperatura radiante média, umidade do ar e velocidade do ar. Já os índices subjetivos se baseiam nas sensações subjetivas de conforto térmico que são experimentadas em condições nas quais os elementos de conforto térmico variam.

Do mesmo modo, Johansson et al. (2014) explicam que os índices de conforto térmico podem ser divididos em racionais e empíricos. Os índices empíricos são resultantes de estimativas subjetivas, como por exemplo, através da correlação entre a percepção térmica subjetiva e variáveis climáticas medidas. Porém, esse tipo de predição pode ser restrito ao local ou tipo de clima onde a pesquisa foi realizada.

Em relação aos índices racionais, tanto a norma ISO 7730 (2005) quanto a ASHRAE 55 (2010), desenvolvidas para ambientes internos, recomendam o uso do Voto Médio Preditado (PMV – *Predicted Mean Vote*), também conhecido como Voto Médio Estimado (VME). Já o guia de engenharia alemã VDI 3797 (2008), desenvolvido para uso em ambientes externos, recomendam o uso do índice PMV, do índice de Temperatura Percebida (PT - *Perceived Temperature*) e do índice de Temperatura Fisiológica Equivalente (PET - *Physiological Equivalent Temperature*).

Diferentemente do estudo do conforto térmico em áreas internas, seu estudo em áreas externas é um campo de pesquisa recente. Por essa razão, são comuns os estudos nessa área que utilizem métodos e índices de conforto térmico para ambientes internos (JOHANSSON et al., 2014). Porém, nos últimos anos, o uso destes índices para a avaliação de ambientes externos tem sido questionado por vários autores (HÖPPE, 2002; SPAGNOLO; DE DEAR, 2003; NIKOLOPOULOU, STEEMERS; 2003; CHEN; NG, 2011; JOHANSSON et al., 2014). Sua aplicação para a descrição de espaços ao ar livre é complexa, pois muitas vezes esses espaços têm mudanças rápidas de condições climáticas, especialmente em relação à radiação e aos ventos.

Outras pesquisas têm mostrado que somente parâmetros físicos não são suficientes para a avaliação do conforto térmico em espaços abertos, as variáveis psicológicas e socioculturais também influenciam a avaliação do ambiente (NIKOLOPOULOU; STEEMERS, 2003; SCHIMID, 2005; KNEZ et al., 2009; CHEN; NG, 2011; KÁNTOR; ÉGERHÁZI; UNGER, 2012; DOBBERT, 2015). Além disso, os transeuntes podem apresentar maior tolerância térmica pelas oportunidades de adaptação, como escolher caminhar por espaços ao sol ou à sombra, por exemplo (SPAGNOLO; DE DEAR, 2003; MINELLA; ROSSI; KRÜGUER, 2011). Porém, Johansson et al. (2014) relatam que não existem normas ou manuais que instruem como aplicar questionários em relação a esses aspectos.

Chen e Ng (2011) e Johansson et al. (2014) apresentaram revisões sobre os estudos de conforto térmico em áreas abertas realizados na última década e, assim como Monteiro e Alucci (2010), mostraram que, nesse período, foram realizadas diversas pesquisas sobre o

tema em cidades de diferentes climas e culturas. Além disso, as revisões apontam a diversidade de índices de conforto térmico criados, inicialmente, para ambientes internos e, depois, para áreas externas. Como consequência, as diversas pesquisas na área utilizam diferentes metodologias e índices. Os autores apontam para a importância de novas pesquisas e também para a necessidade de normas e manuais para a melhor realização, aplicação e comparação desses estudos.

Nesse passo, preocupados com a variedade como são classificados os espaços abertos nas pesquisas que abordam variações microclimáticas e conforto térmico nas cidades, Stewart e Oke (2012) propuseram uma classificação das áreas urbanas para esses estudos, chamada Zona Climática Local (*Local Climate Zone* - LCZ), que se aplica facilmente às pesquisas e é realizada apenas através da observação do local do estudo. Segundo eles, muitos estudos diferenciam apenas as áreas urbanas das rurais o que dificulta estudos comparativos. Essa classificação pode facilitar a documentação dos dados e comparação entre espaços semelhantes, além de fornecer uma convenção objetiva para medir o efeito do aquecimento noturno em toda a cidade.

Johansson et al (2014), em sua revisão dos instrumentos e métodos utilizados para avaliar o conforto térmico em espaços externos, avaliaram 26 estudos realizados na última década. A maior parte dos estudos avaliados determinaram algum tipo de índice de conforto térmico. O índice adotado variou entre os estudos e vários deles usaram mais de um. O índice mais adotado foi o PET, seguido pela Nova Temperatura Efetiva Padrão (SET*- *Standard Effective Temperature*) e pelo PMV; entre ele, os dois primeiros tiveram aplicações crescentes nos últimos anos. O Índice Térmico de Temperatura Universal (UTCI – *Universal Thermal Climate Index*), o índice mais recente, foi usado uma vez.

A Tabela 4 mostra os índices racionais mais usados nos estudos de conforto térmico em espaços abertos, de acordo Johansson et al (2014), apesar de alguns deles terem sido desenvolvidos para aplicação em ambientes internos.

Tabela 4: Índices de conforto térmico usados em estudos de conforto térmico em espaços abertos

Índice	Descrição	Referências
Voto Médio Predito - PMV	Principalmente para espaços internos; inclui todas as variáveis meteorológicas que afetam o conforto térmico	ISSO 7730 (2005), ASHRAE (2001)
Nova Temperatura Efetiva Padrão – SET*	(temperatura do ar, unidade do ar, velocidade do vento e temperatura radiante) assim como as variáveis pessoais (vestimenta e atividade).	ASHRAE 55 (2010), ASHRAE (2001), Blazejczyk et al. (2012)
Temperatura Efetiva -ET* (Effective Temperature)	Principalmente para espaços internos; considera apenas quatro variáveis meteorológicas, considerando que a vestimenta e a atividade são padronizadas para atividade sedentária.	ASHRAE (2001), Blazejczyk et al. (2012)
Temperatura Percebida – PT	Baseada na equação do PMV, mas pode ser usada para espaços abertos.	VDI 3787 (2008), Blazejczyk et al. (2012)
Temperatura Fisiológica Equivalente - PET	Desenvolvida para espaços externos, considera apenas quatro variáveis meteorológicas, a vestimenta e a atividade são padronizadas.	Höppe (1999), VDI 3787 (2008), Blazejczyk et al. (2012)
Índice Térmico de Clima Universal (UTCI)	Desenvolvido para espaços externos; não requer informações de vestuário. Condição de referência para a atividade: média metabólica de 135W/m ² e caminhada a velocidade de 1,1m/s.	Blazejczyk et al. (2012), Havenith et al. (2011)

Fonte: adaptado de Johansson et al. (2014).

A diminuição do uso do PMV nos estudos mais recentes pode estar associada a baixa correlação entre o PMV e a percepção térmica subjetiva verificada em diversas pesquisas (MINELLA; ROSSI; KRÜGUER, 2011; CHENG et al., 2012; DOBBERT, 2015). Por outro lado, o índice PET tem sido amplamente utilizado em variadas pesquisas de conforto térmico em espaços abertos em locais com diferentes condições climáticas (MINELLA; ROSSI; KRÜGUER, 2009; LABAKI et al. 2010; CHENG et al., 2012; KETTERER; MATZARAKIS, 2014; HOVE et al., 2015; TALEGHANI et al., 2015).

O índice Temperatura Fisiológica Equivalente (PET) foi desenvolvido por Mayer e Höppe (1987) para ser aplicado em ambientes externos ou internos. Este índice foi fundamentado no modelo *Munich Energy-balance Model for Individuals* (MEMI), que é um modelo de balanço de calor termofisiológico que considera todos os processos básicos de termorregulação, tais como a vasoconstrição ou vasodilatação periférica e a taxa de suor fisiológico. O índice

considera as variáveis de temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e umidade relativa do ar (MAYER; HÖPPE, 1987).

O PET representa a temperatura equivalente, considerando um ambiente de referência, no qual o balanço térmico de um indivíduo é mantido com a temperatura da pele e do centro do corpo iguais às condições em avaliação. Para a obtenção do PET, considera-se os seguintes dados climáticos do ambiente de referência e os dados pessoais: velocidade do ar de 0,1 m/s; temperatura radiante média igual à temperatura do ar; pressão de vapor de água de 12 hPa (umidade relativa de 50%, temperatura do ar de 20°C); atividade metabólica de 80W (atividade leve) e 0,9 de isolamento térmico (vestimenta) (HÖPPE, 1999).

O uso do PET é adequado em análises de conforto térmico em espaços abertos, uma vez que ele traduz a avaliação complexa de um ambiente térmico externo para um cenário interno numa base fisiologicamente equivalente que pode ser mais facilmente interpretada (CHEN; NG, 2011). Ele é expresso em graus Celsius e é similar ao índice PMV, comumente utilizado. Matzakaris, Mayer e Iziomon (1999) relacionaram os intervalos de PMV de percepção térmica aos níveis de estresse térmico do corpo humano para os correspondentes intervalos do PET, que é válido para os valores assumidos de atividade metabólica e isolamento térmico da vestimenta (tabela 5).

Assim, conforme a Tabela 5, o conforto térmico segundo o PET, ou seja, a ausência de estresse térmico para um ambiente de referência, seria próximo de 21°C ou entre 18°C e 23°C. Os valores mais baixos representam condições de estresse térmico para o frio crescentes e valores mais altos, condições crescentes de estresse térmico para o calor.

Tabela 5: Intervalos de conforto térmico do PMV e do PET

PMV	PET (°C)	Percepção Térmica	Nível de Estresse Térmico
		muito frio	estresse extremo ao frio
-3.5	4	frio	estresse forte ao frio
-2.5	8	pouco frio	estresse moderado ao frio
-1.5	13	leve frio	estresse leve ao frio
-0.5	18	confortável	sem estresse térmico
0.5	23	leve calor	estresse leve ao calor
1.5	29	pouco calor	estresse moderado ao calor
2.5	35	calor	estresse forte ao calor
3.5	41	muito calor	estresse extremo ao calor

Fonte: Matzakaris, Mayer e Iziomon (1999).

Monteiro (2008) realizou uma proposição de calibração de vários modelos preditivos de conforto térmico em espaços abertos para diferentes alcances microclimáticos. A proposição foi realizada através de correlações entre variáveis microclimáticas urbanas e preferência e percepção térmica individuais com valores de simulação preditiva de conforto. Ele estabeleceu para a cidade de São Paulo os limites de temperatura PET entre 18°C e 26°C para a neutralidade térmica ou ausência de estresse térmico, ampliando a faixa apresentada por Matzakaris, Mayer e Iziomon (1999), de 18 °C a 23 °C.

Do mesmo modo, Hirashima (2010) propôs a calibração do PET para espaços abertos de Belo Horizonte. O método se baseou na medição de variáveis microclimáticas em campo e na aplicação de questionários em dias representativos de cada uma das estações do ano, durante os anos de 2009 e 2010. O processo de amostragem considerou a população adulta, saudável e aclimatada às condições climáticas. Considerando que durante a pesquisa o inverno foi mais

quente que a média, na calibração do PET, a autora delimitou três intervalos PET: “confortável” com limite superior de 30,5 °C, “calor” de 30,5 °C a 35 °C, e “muito calor” com limite superior de 35 °C.

A maioria dos estudos que empregam o índice de PET utiliza a ferramenta computacional de domínio público RayMan (MATZARAKIS et al, 2009) para realizar os cálculos necessários para estimar seu valor. Os parâmetros de entrada para o cálculo do PET incluem os parâmetros ambientais: temperatura de bulbo seco, umidade relativa do ar e velocidade do vento. A temperatura radiante média (T_{rm}) também é solicitada, porém, através da entrada de valores de temperatura de globo, radiação difusa e albedo da superfície a T_{rm} pode ser calculada pelo programa (MATZARAKIS, 2012).

Quanto a essa última variável, Johansson et al. (2014), explicam que a temperatura radiante média é uma das variáveis mais importantes para o estudo do conforto térmico em áreas abertas especialmente em condições de calor e céu limpo. Ela resume a exposição do corpo à radiação de ondas curtas e longas (diretas, difusas, refletidas ou reemitidas) em um determinado ambiente. Assim como Erell et al. (2014), Johansson et al. (2014), explicam que a medição dessa variável, essencial para a aplicação em índices de conforto em ambientes externos, tem desvantagens como a dificuldade de se quantificá-la em ambientes complexos e de medi-la com precisão no local. Uma das maneiras de quantificá-la é utilizando modelos de simulação computacional.

Seja através do monitoramento de variáveis climáticas em campo ou através de simulação computacional, como dito antes, diversas pesquisas que analisam o conforto térmico em espaços abertos têm confrontado a aplicação dos índices mais usados para a predição do conforto térmico, o PMV e o PET. Elas têm feito isso, especialmente, através da comparação entre o conforto térmico predito e a sensação real obtida através da aplicação de questionários.

Nesse passo, em um estudo sobre conforto térmico em espaços abertos, em uma praça aberta de Hong Kong, Cheng et al. (2012) examinaram a aplicação dos índices PMV e PET. Os resultados mostraram que o PMV geralmente superestima a sensação térmica de calor no verão, assim como subestima a escala de frio no inverno. Já o PET apresentou com precisão a troca de calor termofisiológica do homem. Porém, segundo os autores, o PET pode subestimar o efeito de fluxos de calor latente e superestimar fluxos de calor radiante. De acordo com os

resultados, os autores apontaram como valores de PET neutro de 25°C no verão e de 21°C no inverno.

A aplicação desses índices também foi avaliada por Rossi e Krüger (2011) em uma análise do efeito diurno do FVC no microclima e nos níveis de conforto térmico em ruas de pedestre em Curitiba. Nessa análise, eles confrontaram os graus de estresse térmico calculados pelos índices PMV e PET e a sensação real obtida por meio dos questionários. Os autores observaram que os índices apresentaram maior correspondência entre si em dias com temperaturas mais altas. Os resultados também mostraram que em dias mais quentes o índice de conforto com melhor correlação com a sensação real foi o PET, enquanto em dias com temperaturas mais baixas foi o PMV. Os autores atribuem a esse resultado o fato de, em ambientes externos, as pessoas possuírem maior tolerância a variações térmicas do que em ambientes internos, isso é reforçado pela maior diferença encontrada entre a sensação real e o PMV, índice concebido para ambientes internos.

Labaki et al. (2012), em um estudo de conforto térmico em espaços públicos de passagem em ruas de pedestre em três cidades do estado de São Paulo, identificaram os limites PET de neutralidade térmica para cada cidade e as diferenças entre a sensação térmica real e o conforto térmico calculado pelo PET. Os limites para o PET de neutralidade térmica variaram entre as cidades: Campinas (20 a 29°C), Bauru (21 a 30°C) e Presidente Prudente (14 a 24°C). Segundo as autoras, os resultados mostraram que as maiores semelhanças entre a sensação térmica real e o estresse térmico pelo PET ocorreram em condições de tempo quente e as maiores diferenças, em condições de tempo frio e seco.

Andreou (2012) e Hove et al. (2015) utilizaram o índice PET para avaliar a relação entre características geométricas dos cânions urbanos, densidade construída e o albedo dos materiais com o conforto térmico em espaços abertos. Andreou (2012) verificou que no período diurno o conforto térmico é afetado principalmente pela exposição à radiação solar; a diferença entre áreas sombreadas e expostas a radiação solar correspondeu a 10°C na escala PET. Por outro lado, Hove et al. (2015) observaram que nas áreas urbanas densamente construídas, com maior impermeabilização e onde existe formação significativa de ilha de calor, ocorreu maior número de horas de estresse térmico, com PET superior a 23°C.

Tendo em vista que o índice PET tem sido amplamente aplicado e recomendado para pesquisas que estudam o conforto térmico em espaços abertos, além de ser adotado pelo guia alemão para planejadores urbanos (VDI, 1998), optou-se por sua adoção nessa pesquisa.

Como visto, sua aplicação é facilitada pelo modelo RayMan e, além disso, possibilita a comparação com os resultados obtidos em diversas outras pesquisas de conforto térmico em espaços abertos. A utilização dos índices de conforto térmico, como o PET, é igualmente feita em estudos que utilizam simulação computacional, como será abordado na próxima seção.

2.3.2 O uso de simulação computacional microclimática para o estudo do conforto térmico em espaços abertos: o programa ENVI-met

Os estudos que preveem o conforto térmico em áreas abertas em relação ao crescimento urbano são recentes e sua maior dificuldade está no número de variáveis e processos envolvidos. Nesse sentido, a modelagem numérica através de simulação computacional tem ganho popularidade, uma vez que possibilita um campo abrangente de estudos.

Kakon, Mishima e Kojima (2009) e Yang, Wong e Li (2016) apontam que uma razão para haver poucos estudos de conforto térmico em áreas abertas relacionadas ao desenho urbano é a complexidade da realização de medidas de campo devido ao grande número de variáveis e processos envolvidos no espaço urbano. Arnfield (2003), em sua revisão de pesquisas relacionadas ao clima urbano, observou que a modelagem numérica é uma metodologia adequada para lidar com as complexidades desse sistema. Por essa razão, de acordo com Yang, Wong e Li (2016), a modelagem numérica por simulação computacional tem ganho popularidade devido a sua controlabilidade, assim como o tempo e o recurso da frugalidade.

Além disso, a simulação computacional possibilitou um avanço dos estudos de conforto térmico não apenas em áreas abertas existentes, mas também para a simulação de diferentes possibilidades de desenho urbano, tornando-se assim, uma ferramenta importante para os planejadores urbanos.

Nesse ponto, é importante ressaltar que o termo simulação computacional se refere a qualquer algoritmo que mimetize um processo físico. A simulação computacional associada a disponibilidade de boas interfaces permite ao usuário a criação de modelos tridimensionais de construção, realizar uma simulação e exibir os resultados de forma a entender a tendência do comportamento de fenômenos naturais (REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006).

Os programas computacionais direcionados a simulação do microclima urbano variam substancialmente dependendo de suas características físicas e de suas resoluções espaciais e temporais (ARNSFIELD, 2003). Nesse sentido, Ketterer e Matzarakis (2014) apontam que os

programas de simulação microclimáticas mais apropriados para quantificar as mudanças no ambiente térmico urbano ocasionadas por mudanças no desenho urbano são: o ENVI-met (BRUSE; FLEER, 1998), o SOLWEIG (*solar and longwave environmental irradiance geometry*) (LINDBERG; HOLMER; THORSSON, 2008) e o RayMan (MATZARAKIS; RUTZ; MAYER, 2007).

O programa SOLWEIG foi desenvolvido pela Universidade de Göteborg e é um modelo muito preciso para simular a temperatura radiante média em ambientes externos, porém não simula os outros parâmetros de conforto térmico (LINDBERG; HOLMER; THORSSON, 2008).

Já o RayMan, mencionado anteriormente, trata-se de um modelo de acesso livre que foi desenvolvido por Matzarakis, Rutz e Mayer (2010) para o cálculo de conforto térmico em áreas externas. Ele simula o fluxo de radiação de ondas curtas e longas em ambientes urbanos tridimensionais simples ou complexos. O modelo possibilita o cálculo de densidades de fluxo de radiação, a duração do sol e espaços de sombra. Além disso, também possibilita o cálculo de índices de conforto térmico como o PET, o PMV, o SET e o UTCI através de um número limitado de dados de entrada.

Para o cálculo dos fluxos de radiação e índices térmicos, o modelo RayMan considera os dados de entrada gerais (data, horário, longitude, latitude, altitude), as variáveis climáticas (temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, nebulosidade, radiação solar global), além dos dados fisiológicos (peso, altura, idade, sexo, atividade e vestimenta). Já a temperatura radiante média (T_{rm}) pode ser inserida, se conhecida, ou calculada pelo programa (MATZARAKIS; RUTZ; MAYER, 2010).

Por sua vez, o programa ENVI-met (BRUSE; FLEER, 1998), de domínio público, é um dos primeiros programas que permitem reproduzir os principais processos atmosféricos incluindo a simulação dos fluxos de radiação, temperatura e umidade do ar, fluxo de ventos em uma base física bem fundamentada. Ali-Toudert (2005), em sua revisão de pesquisas de modelagens microclimáticas urbanas recomenda o programa ENVI-met como o modelo mais adequado para simular o microclima urbano em resoluções adequadas. Ele é considerado o modelo mais completo em termos de cálculo do conforto térmico em áreas abertas e os dados de saída abrangem os quatro principais parâmetros de conforto térmico: temperatura do ar, temperatura radiante média, umidade relativa do ar e velocidade do vento. Além disso entre os dados de saída também está a avaliação do conforto térmico pelo índice PMV. A versatilidade e a validade do ENVI-met também foi confirmada em estudo realizado por Emmanuel, Rosenlund e Johansson (2007).

Dessa forma, o ENVI-met tem sido usado em diversas pesquisas para analisar as interações entre o desenho urbano e o microclima em pequenas escalas (EMMANUEL; ROSENBLUND; JOHANSSON, 2007; YANG; LAU; QIAN, 2011; NG et al. 2012; ROSSETI, 2013; SILVA, 2013; KETTERER; MATZARAKIS, 2014; SCHMITZ, 2014; MACIEL, 2015; TALEGHANI et al., 2015; YANG; WONG; LI, 2016). Também tem sido comum nas pesquisas a utilização do ENVI-met em conjunto com o RayMan. O ENVI-met é utilizado para a simulação de cenários de microclima urbano e fornece como dados de saída os parâmetros necessários para o cálculo de conforto térmico, que podem ser, posteriormente, inseridos no modelo RayMan para o cálculo do índice PET (YANG; LAU; QIAN, 2011; KETTERER, MATZARAKIS; 2014; MINELLA, 2014; DOBBERT, 2015b; TALEGHANI et al., 2015; YANG; WONG; LI, 2016).

O programa ENVI-met foi desenvolvido por Bruse e equipe de pesquisadores do Departamento de Geografia da Universidade de Bochum (BRUSE; FLEER, 1998). Ele é um modelo computacional microclimático tridimensional (3D) criado para simular as interações entre superfícies, ar e vegetação em um ambiente urbano e é baseado nas leis fundamentais da dinâmica dos fluidos e termodinâmicas. O modelo computacional possui uma resolução de 0,5 a 10 metros no espaço e 10 segundos no tempo o que permite análises das interações entre os edifícios e as superfícies e vegetação em pequenas escalas, além de uma compreensão detalhada do microclima no nível do pedestre (BRUSE; FLEER, 1998).

Na simulação numérica, o fluxo de ar dentro do cânion é governado pela equação Navier-Stokes para escoamento tridimensional incompressível junto com a equação de conservação de massa. A distribuição da temperatura do ar e umidade específica atmosférica é dada pela equação convecção-difusão e o processo turbulento dentro do cânion é modelado usando o modelo de turbulência fechado ($E-\epsilon$). As equações estão disponíveis em Bruse e Fleer (1998).

Os fluxos radiantes na área do modelo são modificados pela obstrução proporcionada pelos edifícios e pela vegetação. Um valor de coeficiente é introduzido para incluir esses efeitos e variam de 1 para fluxos sem obstáculos para 0 para fluxos totalmente obstruídos. A obstrução da radiação solar depende do FVC. O programa considera o fluxo de radiação de ondas curtas e longas e também considera o calor latente da vegetação e de elementos de água em seus cálculos (YANG; WONG; LI, 2016).

Em relação a vegetação, o programa calcula os principais fatores relacionados à sua influência no meio, como a transpiração, o balanço energético da folha e o balanço da água do sistema solo vegetação. O programa também considera o efeito do sombreamento das árvores, bem

como o efeito fisiológico da fotossíntese e abertura dos estômatos. O ENVI-met, atualmente, é o único modelo numérico projetado para a simulação de microclimas urbanos que permite uma análise mais detalhada das condições das copas das árvores (DOBBERT, 2015). Bruse e Fleer (1998) apresentam os coeficientes para obstruções pela vegetação para radiação de ondas curtas diretas e difusas assim como para radiações de onda longa. Além disso, também podem ser modelados no programa diferentes tipos de solo e superfície através de propriedades como o albedo.

Porém, apesar das vantagens do uso do ENVI-met, Emmanuel, Rosenlund e Johansson (2007) apontam algumas limitações do modelo. Uma delas diz respeito ao fato de que dados meteorológicos externos não podem ser incorporados às condições do contorno (borda do modelo) e os parâmetros iniciais, incluindo temperatura, umidade e velocidade do vento, são mantidos constantes a uma altura de 2.500 metros durante a simulação. Por essa razão a temperatura do ar durante o dia pode ser subestimada pelo modelo.

Outra limitação do modelo é que o armazenamento de calor em edifícios não é considerado na modelagem, todos os edifícios possuem uma temperatura interna constante, além disso as transmitâncias térmicas para paredes e telhados são as mesmas para todos os edifícios. Essas limitações podem prejudicar a análise das perdas de radiação de onda longa especialmente no período noturno (BRUSE; FLEER, 1998). Além disso, o ENVI-met não simula o calor antropogênico que pode causar um aumento significativo da temperatura no ambiente real (WONG et al., 2012 apud YANG; WONG; LI, 2016).

Diversas pesquisas nacionais e internacionais envolvendo modelagem computacional do microclima urbano e análise do conforto térmico em ambientes abertos com o programa ENVI-met, principalmente, relacionadas a influência dos elementos do desenho urbano têm sido conduzidas. A seguir serão apresentadas pesquisas que utilizam o ENVI-met como ferramenta principal para a simulação microclimática de cenários urbanos em espaços abertos, com vistas a revelar as potencialidades e limitações da aplicação do programa.

Kakon, Mishima e Kojima (2009) realizaram um estudo com simulação utilizando o modelo ENVI-met para avaliar os efeitos que o incremento da taxa de ocupação previsto nas novas normas do código de obras causariam em relação ao conforto térmico de Dhaka, Bangladesh, uma cidade caracterizada pela alta densidade urbana e de clima tropical. O estudo foi realizado em três diferentes cânions urbanos representativos da cidade. Primeiramente, foram feitos levantamentos das variáveis climáticas nos três cânions para a caracterização das

condições térmicas existentes. Depois, os cânions foram configurados de acordo com as novas normas de ocupação do solo e simulados no ENVI-met, em condições de um dia típico de verão. Os resultados mostraram que o conforto térmico nas áreas abertas dos cânions, calculado pelo *Temperature Humidity Index* (THI), já era inadequado e que, com o aumento da ocupação do solo, haverá um impacto negativo nas condições microclimáticas na maior parte dos locais analisados. Os autores observaram ainda, que as alterações microclimáticas ocorrem de forma diferente em cada local, variando de acordo com a orientação do cânion e com o FVC, nesse caso influenciado por diferentes larguras viárias. Por fim, os autores concluem que os resultados obtidos mostraram que a simulação microclimática dos cenários futuros, possibilitada pelo modelo ENVI-met, pode contribuir com um planejamento e um desenho urbano sensível as condições climáticas e que possa mitigar o estresse térmico em espaços abertos, principalmente em condições de verão.

Yang, Lau e Qian (2011), analisaram o efeito de diversas estratégias de desenho urbano no conforto térmico de áreas abertas de Shangai, China, focando no uso de albedos mais altos para a pavimentação urbana e no uso da vegetação. Para as análises, utilizaram simulação numérica do software ENVI-met através da criação de cenários com combinações de diferentes albedos e presença de vegetação. Primeiramente, os autores realizaram medições das variáveis climáticas em duas quadras residenciais de rápido crescimento urbano, para confrontar com os resultados simulados e avaliar a precisão do modelo numérico. Após a simulação, realizada com cenários que envolvem diversas estratégias de desenho urbano, o conforto térmico em cada cenário foi avaliado com o PET. Os resultados da pesquisa mostraram que um aumento global de 0,4 no albedo da superfície do solo aumenta o estresse térmico em 5 a 7°C na escala PET durante o dia e diminui o estresse térmico em 1 °C durante a noite. Além disso, os autores também verificaram que o aumento da área verde, especialmente com vegetação arbórea, aumenta o conforto térmico consideravelmente. Quanto a comparação dos dados medidos e dos dados simulados, os autores observaram que, assim como relatado por outros autores, o ENVI-met tende a subestimar os valores de temperatura do ar durante o dia e superestimar os valores de temperatura do ar no período noturno; assim, o efeito de resfriamento proporcionado pelo sombreamento pela vegetação foi subestimado entre 0,5 a 1,5 °C pelo modelo numérico.

Ketterer e Matzarakis (2014) realizaram simulações de cenários envolvendo diversas configurações de desenho urbano para uma área urbana residencial na cidade de Stuttgart, na Alemanha. As simulações foram feitas com o objetivo de avaliar medidas de adaptação do

desenho urbano para minimizar o estresse térmico durante o verão e permitir o acesso do sol durante todo o ano e que possam ser aplicadas ao planejamento urbano. Os diversos cenários contemplaram variações de áreas verdes, orientação solar e razão H/W do cânion urbano. As simulações foram realizadas no ENVI-met 3.5 e a avaliação do estresse térmico em áreas abertas foi feita pelo PET e simulado no RayMan e no TIC-ENVI-met (*Thermal Indice Calculator for ENVI-met*). Como resultado os autores observaram que o PET em áreas arborizadas foi aproximadamente 10°C mais baixo comparado com áreas com menos vegetação e 25°C mais baixo que em outros cenários sem vegetação. Além disso, verificaram que o estresse térmico no local de estudo pode ser reduzido em cânions com orientação NO-SE combinado com razão H/W de pelo menos 1,5, uma vez que essa configuração permite o acesso solar durante o inverno e maximiza a frequência de conforto térmico durante todo o ano. Em relação a aplicação do ENVI-met 3.5 os autores apontam como vantagens do software a possibilidade de avaliar as condições térmicas biometeorológicas humanas em estruturas urbanas complexas em modelos de microescala, além disso, a resolução é maior do que nas versões anteriores: 0,2m a 10m para períodos curtos de simulação. Entre as desvantagens na utilização do software, como apontado por outros autores, estão as temperaturas radiantes médias superestimadas para condições diurnas e subestimadas em condições noturnas, influenciando em valores PET, também superestimados para condições diurnas. Além disso, essa versão ainda desconsidera as diferenças térmicas do vento, que são importantes para o resfriamento noturno em algumas regiões, como o local do estudo.

Perini e Magliocco (2014) analisaram a influência de diversas variáveis de desenho urbano na formação do microclima e no conforto térmico de espaços abertos, através do índice PMV, em áreas típicas das cidades de Milão, Gênova e Roma, na Itália. As variáveis analisadas foram a densidade construída, a geometria urbana e a presença de vegetação no solo ou nos telhados. O estudo foi realizado utilizando como ferramenta o software ENVI-met 3.1, que possibilitou a simulação de diferentes configurações (72 cenários) em relação às variáveis analisadas, para o dia típico de verão e para o dia mais quente (*Hottest Summer Day*) de cada cidade. As simulações iniciaram às 10h e os resultados foram gerados para às 13h. Como resultado, os autores observaram que a presença de vegetação tanto no nível do solo quanto nos telhados contribui com a diminuição da temperatura do ar em áreas abertas, porém a vegetação no solo (grama e espécies arbóreas) é mais eficiente para o conforto térmico do que a presença dos telhados verdes. Observaram, também, que quanto mais profundo o cânion e quanto maior a temperatura do ar, maior o efeito do resfriamento proporcionado

pela vegetação arbórea. Além disso, observaram que na maior parte dos casos analisados, densidades maiores resultam em temperaturas do ar mais altas. Com os resultados do arrefecimento da temperatura do ar proporcionado pela presença de grama ou vegetação arbórea, os autores também fizeram um cálculo simplificado da média de economia no consumo de energia para resfriamento artificial, que variou de 3 a 37% de economia para área menos densa com menos vegetação e área mais densa com mais vegetação, respectivamente. Por fim, os autores apontam que a simulação microclimática com a ferramenta ENVI-met se mostrou satisfatória para as análises realizadas.

Taleghani et al. (2015), compararam cinco diferentes formas urbanas e seu efeito no microclima urbano e no conforto térmico dos pedestres nos espaços abertos dos Países Baixos. Os cinco cenários variaram em relação a geometria dos edifícios e orientação dos cânions urbanos. As condições microclimáticas de cada cenário foram simuladas no ENVI-met e os dados foram convertidos para o índice PET utilizando o RayMan, com as condições térmicas do dia mais quente do ano de referência da cidade de Delf. Primeiro, foram feitas medições de parâmetros microclimáticos em um local que representa uma das cinco formas analisadas, na cidade de Delf, a fim de validar o modelo simulado. Comparando-se os dados medidos com os dados simulados, observou-se que a temperatura simulada foi de até 1.2 °C mais alta que a medida. Os autores atribuem essa diferença ao fato de, no dia em que ocorreram as medições em campo, o céu ter apresentado nebulosidade em alguns períodos e o ENVI-met não prever situações de variação de nebulosidade como um dos parâmetros de configuração. Sendo assim, recomenda-se que as medições para validar o modelo sejam feitas em condições de céu limpo. Os resultados da pesquisa mostraram que a duração da incidência direta do sol e a temperatura radiante, influenciados pela forma urbana, exercem o papel mais importante no conforto térmico de áreas abertas.

Yang, Wong e Li (2016) investigaram o efeito do desenho de cânions urbanos no conforto térmico em uma rua do centro empresarial de Singapura utilizando o ENVI-met 3.1. Inicialmente os autores realizaram medições em múltiplos pontos da rua para validar o modelo simulado no software. Para analisar os efeitos das estratégias de desenho urbano no conforto térmico, foram criados diferentes cenários para a simulação, que envolvem variações na orientação da rua, relação H/W e vegetação, totalizando 11 cenários. A simulação foi feita para o dia mais quente dentre os dias que foram realizadas as medições em campo e foram feitas para o período das 4h até as 22h; porém a comparação entre os cenários foi feita para as 15h, o horário mais quente conforme os resultados simulados. A avaliação do conforto

térmico foi feita utilizando-se o índice PET; para as condições de Singapura, um intervalo PET de 24 °C a 30 °C é caracterizado como confortável. A validação do modelo pôde ser feita para múltiplos pontos, conforme monitorados no local, fornecendo assim uma validação mais confiável e compreensível. Em relação a validação da temperatura do ar, os autores observaram que as temperaturas medidas e simuladas seguem a mesma tendência nos diversos pontos, porém, o modelo simulado subestimou de 0.1 a 1 °C a temperatura do ar diurna, o que deve ser devido a não consideração do calor antropogênico pelo modelo; além disso superestimou as temperaturas noturnas em até 2.5 °C, mostrando que o resfriamento noturno pode não ter sido capturado pelo modelo. Em relação a temperatura radiante média, houveram maiores discrepâncias, durante o dia os valores simulados foram superestimados e durante a noite, subestimados. Os autores atribuem essa diferença à falta de armazenamento de calor no modelo. Apesar das discrepâncias entre valores medidos e simulados, os autores apontam que as variações são aceitáveis e que é possível uma comparação microclimática entre cenários que contemplem diferentes estratégias de desenho urbano e que para efeito de comparação entre o conforto térmico nas áreas abertas esses pequenos erros são pouco significantes. Nesse estudo, eles verificaram que em Singapura os cânions urbanos com orientação NO – SE proporcionam maior estresse térmico do que as ruas orientadas no sentido NE – SO e que a proporção H/W igual a 3 pode ser considerada um limite em relação ao conforto térmico do pedestre. Além disso, também verificaram que a presença de vegetação arbórea é mais eficiente para o conforto térmico do que a presença de áreas plantadas com grama.

Carfan (2011), em sua tese, realizou a análise do conforto térmico de três áreas urbanas da cidade de Ourinhos, São Paulo. A principal ferramenta metodológica adotada foi a simulação computacional no programa ENVI-met. As áreas de estudo foram escolhidas de acordo com a dinâmica urbana e climática e foram classificadas em urbano denso, urbano permeável e expansão urbana. Inicialmente, foram realizadas medições de campo nos dias 10/06/2009 e 15/02/2010 durante 24h, em uma das áreas de estudo (área urbana densa) com o objetivo de calibrar o modelo do ENVI-met. Através de aplicação de índices de correlação, a autora verificou que o modelo respondeu satisfatoriamente às variações microclimáticas. Posteriormente, no programa ENVI-met, foram feitas as simulações para situação de verão e inverno em datas idênticas a das medições em campo. Foram simulados os três cenários existentes e mais outros três cenários virtuais que tiveram como base a área urbana densa; a primeira considerou a alteração na altura das edificações de 5 para 30 m, a segunda

considerou a inserção de vegetação na quadra central e a terceira considerou a mudança de orientação de NO-SE para L-O. Como dados de entrada, foram utilizados os dados coletados nas medições em campo e entre os dados de saída, foi utilizado o PMV, para a análise do conforto térmico. Em relação ao uso do ENVI-met, a autora aponta que o modelo representou as condições microclimáticas com significância estatística e possibilitou a análise dos diferentes cenários. Porém, é possível observar que os valores simulados de temperatura do ar podem ter sido superestimados, foi predita, por exemplo, 43,4°C, na área urbana densa, às 14h, para condições de inverno; no mesmo horário e local, para condições de verão, a temperatura máxima do ar simulada atingiu 58,7°C. Todavia, apesar de ser possível ter havido uma superestima dos valores simulados, foi possível a comparação entre os cenários simulados. Entre os resultados a autora observou que, no verão, a área urbana densa, tanto a da situação existente quanto a com aumento dos gabaritos, e a área de expansão urbana apresentaram poucas situações de conforto; já as demais áreas, apresentaram-se desconfortáveis durante toda a análise. Portanto, segundo a autora, as modificações feitas nos cenários não foram suficientes para mitigar o desconforto térmico das áreas urbanas abertas.

Silva (2013), no contexto climático de Brasília, avaliou em sua tese o conforto térmico de cavidades urbanas, definidas por ele como uma fração do cânion urbano. Foram feitas análises comparativas entre cenários de cavidades urbanas, envolvendo diferentes relações W/h, orientações e materiais conformadores da base da cavidade. Para controlar a variância dos resultados das diversas simulações realizadas, o autor optou por modelar cenários hipotéticos das diferentes relações morfológicas. Os cenários representam 21 situações com diferentes índices W/h, todos com cem metros quadrados de área e o mesmo arranjo formal, alterando-se a altura das edificações e mantendo-se a largura viária. Ainda, alternando a orientação de implantação do edifício, resultaram 42 tipos e em cada um desses 42 tipos, foi modificada a composição do solo, totalizando seis diferentes configurações: asfalto, concreto, pedra, solo natural, grama e área arborizada. Ao final, foram obtidos 252 tipos diferentes. Para a etapa de modelagem, foram utilizados os programas Sketch Up, AutoCAD e ENVI-met. As simulações microclimáticas foram realizadas no ENVI-met, e como parâmetro de simulação foi utilizado o grau de desempenho do conforto humano no espaço aberto, obtido por meio do índice de conforto de PMV. Foram feitas simulações para os períodos climáticos de época seca (mês de setembro) e época úmida (mês de janeiro). Em relação aos horários, elas foram feitas para o período de 24h e registradas de 3 em 3h: 6 h, 9 h, 12 h, 15 h, 18 h e 21 h. Para a configuração

climática da cidade de Brasília no programa, o autor utilizou valores de parâmetros microclimáticos anteriormente calibrados por pesquisadores da Universidade de Brasília. Para a extração e tratamento dos dados provenientes do processo de simulação computacional, foram utilizados o Excel e o Leonardo, que é um *plugin* de apresentação de mapas do programa ENVI-met. As análises dos resultados foram feitas, principalmente, para dois horários mais representativos, o horário inicial da manhã (9h) e o final da tarde (18h). Em relação ao uso da ferramenta computacional, o autor aponta que ela se mostrou como uma estratégia bastante útil, porém explica que a geração de mapas no *plugin* Leonardo se revelou um método lento e que demanda muito tempo para a análise. Quanto a opção pelo uso do índice PMV o autor explica que foi para facilitar a interpretação dos resultados de conforto térmico, uma vez que ele se mostrou-se de fácil compreensão e, ao ser utilizado dentro da plataforma do programa ENVI-met, poupou uma série de operações e retrabalho caso fosse utilizado outro índice. Como principais resultados, observou-se que cavidades urbanas com relação W/h entre 1 e 7 e orientadas no sentido Norte-Sul se apresentaram mais confortáveis, a partir disso o autor definiu para o clima de Brasília três categorias de cavidades urbanas.

Rosseti (2013) analisou o efeito da incorporação da vegetação no meio urbano através do uso de telhados verdes na formação de ilhas de calor urbanas na cidade de Cuiabá, através de simulação pelo software ENVI-met. A área de estudo escolhida foi um bairro de uso predominantemente residencial (bairro Jardim Califórnia), o que se deve a proximidade dos telhados em relação às áreas de ocupação humana, como ruas, passeios e quintais. A metodologia do trabalho envolveu duas fases principais, uma de levantamento microclimático, para a validação do modelo, e levantamento espacial e outra de simulação. Na primeira etapa, o levantamento microclimático foi realizado nos períodos de janeiro a março de 2013 (período quente úmido) e julho a setembro do mesmo ano (período quente e seco), através de uma estação micrometeorológica fixa e um transecto móvel. Os horários escolhidos para o monitoramento, 6h, 14h e 20h, tiveram como base o comportamento diário da ilha de calor urbana. Já o levantamento espacial foi realizado utilizando-se aerofotogrametria e complementada por observações em campo. Na segunda etapa, foram realizadas as simulações com o programa ENVI-met. Antes de serem simulados os cenários de estudo, a autora validou o programa, através da modelagem de um cenário idêntico ao local onde estava instalada a estação fixa de monitoramento.

Através da comparação dos valores medidos e preditos e da aplicação de testes estatísticos, Rosseti (2013) observou a correlação entre os valores medidos e preditos, sendo essa maior

para a temperatura do ar e menor para a umidade relativa do ar. Posteriormente, foram simulados os cenários durante os dois períodos do ano, para quatro cenários diferentes: um cenário real, um com incorporação do telhado vegetado em 10% dos telhados, outro em 50% e outro em 100%. Cada cenário foi simulado para 48 horas, com registros a cada 1 hora. Os resultados foram trabalhados em planilhas do Excel e também apresentados como mapas temáticos configurados no *plugin* do ENVI-met, Leonardo 3.75. O conforto térmico foi analisado pelo índice PMV, um dos dados de saída do programa ENVI-met. De uma forma geral, a autora explica que os resultados confirmam a validade do programa de simulação como uma ferramenta de previsão microclimática. Como resultado, foi observado que todos os cenários interferem no microclima local, o que valida o telhado vegetado como uma estratégia para mitigação dos efeitos da ilha de calor urbana, especialmente na área acima dos telhados e ao nível dos quintais. No cenário de 100%, foram obtidos os impactos mais expressivos, admitindo redução na temperatura do ar de até 1,56°C e aumento da umidade relativa do ar de até 4,8%. Porém, observou-se também que os cenários com telhado verde não interferem no conforto térmico ao nível do solo.

Em uma pesquisa que também envolve a vegetação como principal elemento, Minella (2014) propôs, em sua tese, um índice que identifica a quantidade de cobertura vegetal necessária para reduzir a temperatura do ar em ambientes urbanos da cidade de Curitiba. A metodologia se baseou em coleta de dados microclimáticos em campo e simulação computacional de cenários reais e alternativos com o programa ENVI-met. Apesar de o índice ter sido desenvolvido para a cidade de Curitiba, primeiro a autora realizou estudos pilotos para as cidades de Genebra, Paris e São Paulo, que serviram como suporte para o desenvolvimento do estudo em Curitiba. A primeira etapa metodológica envolveu a medição de parâmetros microclimáticos em campo, com o objetivo de identificar as características microclimáticas de cada cidade e também de calibrar o modelo no programa. Todas as medições foram realizadas no período do verão; em Curitiba, foram feitas em 4 dias no início do mês de março, durante seis horas seguidas, sendo os pontos monitorados localizados na Avenida Sete de Setembro e na Linha Verde. Posteriormente, foram realizadas as simulações computacionais com a ferramenta ENVI-met (versão 3.1 Beta 5), que possibilitou a comparação entre cenários atuais e cenários alternativos. Para a configuração dos dados climáticos, para Curitiba, foram utilizados dados climáticos fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados de saída (temperatura e umidade do ar, velocidade do vento e temperatura radiante

média) foram selecionados para o cálculo posterior dos índices de conforto térmico PET e UTCI.

Antes da simulação de todos os cenários, Minella (2014) realizou a validação do cenário atual de cada localidade através de uma série de testes de calibração para melhor ajustar os dados simulados aos dados microclimáticos medidos em campo. Para a calibração, a autora utilizou a temperatura do ar como referência, para as outras variáveis procurou-se semelhança na obtenção de valores médios. Nos testes iniciais realizados para Curitiba, os dados de temperatura simulados ficaram acima dos medidos. Todas as simulações foram realizadas considerando situações de verão, período de maior relevância da arborização para o conforto térmico em espaços abertos. As simulações foram realizadas para dois dias completos, a partir de 0h, e as primeiras 33 horas foram descartadas, considerando o recorte analisado, das 10h às 15h; nos cenários futuros, as simulações foram feitas para um dia típico. Em relação a acuidade da ferramenta ENVI-met a autora aponta como limitações do modelo: a modelagem ortogonal, que resulta na simplificação da forma urbana; a padronização da temperatura interna das edificações a um valor constante e a não consideração do efeito de inércia térmica da massa edificada. Além disso, também aponta a dificuldade de estabelecer critérios para realizar o ajuste de dados medidos e preditos, não sendo possível obter um cenário simulado idêntico ao cenário real, medido. Apesar dessas questões, é ressaltado que a ferramenta que tem sido empregada em diversos estudos se mostrou eficaz para o cumprimento dos objetivos propostos na pesquisa. Entre os resultados, a autora verificou que a máxima redução na temperatura do ar em Curitiba foi de 1,5°C e que os fatores que contribuem para essa redução são a forma de distribuição das árvores e a densidade da copa. O índice proposto para Curitiba, relação entre a cobertura vegetal e a área construída, explica a redução média da temperatura do ar em 88,3%. A partir de sua aplicação, a redução de 1°C na temperatura do ar deve ser esperada para um aumento de 49% de cobertura vegetal.

Também adotando a cidade de Curitiba como estudo de caso, mais especificamente o Eixo Estrutural Sul, Schmitz (2014), em sua tese, simula as condições climáticas futuras em cenários do microclima local para os anos de 2036 e 2061. Nesses cenários, ela também avalia o conforto térmico em espaços abertos e, a partir dessa análise, propõe diretrizes com vistas a mitigar os efeitos do aquecimento global na área de estudo e em novas áreas urbanas. Primeiramente, foram feitos levantamentos e sistematização de dados em relação a caracterização do clima e do meio ambiente em área do Bairro Batel no Setor Especial Estrutural – zoneamento onde se insere o Eixo Estrutural Sul. Os monitoramentos de

parâmetros microclimáticos foram realizados durante 4 dias do mês de fevereiro de 2012 (verão) e durante 3 dias no mês de agosto do mesmo ano (inverno) em horário próximos ao nascer do sol (7h às 8h), horário mais quente (15h às 16h) e próximo ao anoitecer (19 às 20h). Também foram feitos levantamentos de dados para caracterização do meio urbano natural, através de imagens de satélite, levantamentos aerofotogramétricos, mapas, entre outros. Os dados levantados foram sistematizados por meio da formação de uma base cartográfica composta por mapas gerados pelo software ArcGIS. Posteriormente, foram feitas modelagens de cenários do microclima local, para os anos de 2036 e 2061, considerando a evolução das temperaturas médias, conforme previsto pelo IPCC e da consolidação da ocupação na área de estudo, através da projeção do crescimento populacional para o bairro e projeção de crescimento da área construída.

Em uma etapa seguinte, Schimitz (2014), utilizando a ferramenta ENVI-met, avaliou as condições climáticas do espaço em estudo para os anos modelados e, também, avaliou o nível de conforto térmico nos espaços abertos de estudo através do índice UTCI. Além disso, foram simulados cenários alternativos com a aplicação de diferentes estratégias de desenho urbano visando o incremento do conforto térmico. Essas estratégias foram organizadas em grupos de cenários: rugosidade e porosidade; densidade construída; tamanho da estrutura urbana; orientação; permeabilidade do solo; propriedades termodinâmicas dos materiais; áreas verdes; uso e ocupação do solo; e estratégias de proteção do clima e adaptação às mudanças climáticas. Para a simulação, considerou-se o período de 24 horas, com início às 4h para os dias 22/02/2011 e 11/08/2011; no modelo simulado foram inseridos 6 receptores para comparar os valores simulados no cenário existente com os obtidos no monitoramento em campo. Também foram feitas verificações de correspondência entre dados medidos e simulados, para verificar os melhores parâmetros de configuração do programa até que os resultados obtidos fossem satisfatórios quando confrontados à bibliografia disponível, no entanto a calibração para o período de verão apresentou baixa correspondência. Em relação ao uso do programa ENVI-met a autora apontou que foi uma ferramenta útil e satisfatória para a simulação de cenários climáticos futuros. A maior dificuldade apontada foi em relação a correspondência entre os dados monitorados em campo e os simulados. A autora também aponta como uma limitação da ferramenta a necessidade de redução da área modelada em decorrência do tempo de processamento. Como resultado da análise do conforto térmico através da simulação dos cenários futuros e dos cenários alternativos, a autora constatou que ações simples, de curto e médio prazo, podem influenciar no conforto térmico urbano, sendo

possível a aplicação de diretrizes capazes de reduzir significativamente os efeitos do aquecimento global sobre o microclima e conforto térmico nos espaços abertos da área de estudo.

Em sua avaliação da influência da arborização no conforto térmico, realizada em sua tese, Dobbert (2015b) também aplicou a simulação computacional. A autora utilizou o índice de floresta urbana (IFU) para avaliar a interferência da quantidade de cobertura arbórea em quatro áreas da cidade de Campinas em relação às condições de conforto térmico, estimadas pelos índices PMV e PET. As áreas selecionadas (Bairro Jardim Paineiras, Bairro Cambuí, Centro e Comunidade Vila Brandina) possuem características distintas em relação à tipologia das edificações e à cobertura arbórea; essa última, quantificada através de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento. Em um primeiro momento foram feitos monitoramentos microclimáticos simultâneos nas quatro áreas de estudo, durante cinco dias consecutivos, nos meses de agosto (verão) e fevereiro (verão) de 2013. Simultaneamente, foram realizados questionários aplicados aos usuários das áreas de estudo em relação a sensação térmica, para comparação com os índices calculados, e também a respeito da percepção do usuário em relação à arborização urbana. Quanto a utilização do índice PMV e PET, ela verificou que no caso de estudo, houve discordância entre os limites estabelecidos para a sensação térmica votada e a predita pelos índices. O cálculo dos índices desconsidera as particularidades de cada indivíduo e, segundo ela, devem ser consideradas as idiosincrasias de cada população a fim de se estabelecerem diferentes parâmetros para análise do conforto térmico. A autora aponta, ainda, a necessidade de uma calibração desses índices para o Brasil. Como resultado das entrevistas e cálculo dos índices, a autora coloca que, apesar de alguns resultados indicarem a interferência da arborização urbana no conforto térmico, devido a diferença da tipologia e morfologia das quatro áreas em estudo, não foi possível afirmar que apenas a presença de maior quantidade de árvores seja a única variável influente do conforto térmico.

Em uma etapa posterior, através do emprego da ferramenta ENVI-met 3.1, Dobbert (2015b) quantificou as alterações no microclima urbano proporcionado pela vegetação. Para o cenário de simulação foi utilizada apenas uma área, o Largo do Rosário localizado no Centro, por se apresentar como uma área pouca arborizada; os cenários alternativos foram compostos por mais 4 cenários prevendo o incremento da arborização e relacionando o tipo de solo, densidade da copa e altura da árvore. A simulação foi feita para situação de verão (dia 16/02/2013) e o tempo de simulação foi de 48 horas, tendo início às 21h. Os dados climáticos

de entrada foram obtidos na Estação Meteorológica do Instituto Agronômico de Campinas. A autora aponta que o programa foi calibrado para as condições de estudo, mas não descreve como foi feita a calibragem. Como resultado das simulações, a autora verificou uma queda de 1°C a cada 10% de acréscimo de árvores de copa densa com altura de 15 metros; nos diferentes cenários a redução foi de até 1,4°C no horário mais quente do dia. Em relação à validação do programa ENVI-met ela aponta que os valores simulados de temperatura do ar ficaram muito próximos aos dados medidos e que, no entanto, houve grande diferença dos valores de umidade relativa do ar, indicando a necessidade de se realizar mais simulações para a detecção do motivo da discrepância. Aponta ainda, que o programa exige muitas horas de trabalho, aumentando a medida que também aumenta o tamanho da malha estipulada. Porém, apesar da área delimitada para a simulação ter sido reduzida, os resultados das simulações atenderam ao objetivo proposto.

Por fim, é manifesta a diversidade de aplicações realizadas com o programa ENVI-met para a simulação microclimática e análise de conforto térmico em espaços abertos. Apesar das limitações apontadas pelas pesquisas, sua utilização é recomendada para viabilizar a previsão das condições térmicas em cenários urbanos com diretrizes de desenho ainda não consolidadas. Pelas vantagens apontadas, além de outras vantagens, como a interface simples e o grande número de dados de saída e o modelo ser de domínio público, justifica-se a opção pela aplicação dessa ferramenta nessa pesquisa.

3 AMBIENTE URBANO DE ESTUDO

Nesse capítulo são apresentadas as características gerais do ambiente urbano de estudo, a cidade de Umuarama, no Paraná. Também são expostas as diretrizes da legislação urbanística, no que se refere ao Pano Diretor Municipal e ao Plano Municipal de Arborização Urbana.

3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

O município de Umuarama está situado no estado do Paraná, na chamada Mesorregião Noroeste do Paraná (Figura 12 e Figura 13). Localiza-se a 23°47'S de latitude e 53°18' de longitude e altitude próxima de 480 metros. Sua extensão territorial é de 1232,8 km².

Figura 12 - Localização Umuarama: Brasil – Paraná.
Fonte: elaborado pela autora, com base em IPARDES (2015).

Figura 13 : Estado do Paraná – Mesorregiões Geográficas
Fonte: IBGE (2011).

A mesorregião Noroeste está localizada, em toda a sua extensão territorial, no Terceiro Planalto ou Planalto Trapp do Paraná, constituído por derrames basálticos. A conformação de sua paisagem é bastante uniforme, em relevo suavemente ondulado e a uma altitude média de 300 metros acima do nível do mar. Nesta porção do Terceiro Planalto está a formação Arenito Caiuá que, associada ao clima da região, deu origem a solos com séria suscetibilidade à erosão hídrica e eólica e à baixa fertilidade (IPARDES, 2004).

Essa mesorregião é composta por 61 municípios divididos em três microrregiões polarizadas pelos municípios de Umuarama, Paranavaí e Cianorte, ocupando cerca de 12,4% da área do Paraná e uma população estimada em 2013 de 709.132 habitantes, 7% da população do Estado. Com exceção de Umuarama e Paranavaí, os demais municípios que compõe essa mesorregião possuem população abaixo de 80.000 habitantes (IBGE, 2010) e o grau de urbanização da mesorregião é o quarto do estado, 83,40% (IBGE, 2010).

Conforme o censo de 2010 (IBGE, 2011), a população total de Umuarama, 18º município mais populoso do estado, era de 100.676 habitantes, sendo 93.455 moradores da área urbana, ou seja, 92% da população. A densidade demográfica da unidade territorial levantada foi de 81,67 hab/km², pequena quando comparada com cidades de população e economia semelhante como Apucarana com 120.919 habitantes e densidade demográfica de 216,55 habitantes/km². Em 2015, a população da cidade foi estimada em 108.218 (IBGE, 2015) um crescimento de aproximadamente 7,5% desde 2010.

Umuarama, em virtude da sua projeção regional, é classificada pelo IBGE (2010) como Centro Sub-Regional, e cidade polo da microrregião de Umuarama. Essa microrregião engloba 21 municípios e possui uma população estimada em 275.238 habitantes. Em 2012, a cidade teve sua importância no cenário regional corroborada pela criação da Região Metropolitana de Umuarama, que inclui 23 municípios (Figura 14).

Figura 14: Limites administrativos da região metropolitana do município de Umuarama – PR.
Fonte: Hulsmeier (2014).

De acordo com o censo demográfico do IBGE de 1991, o conceito demográfico de cidade média abrange aquela que possui entre 100 mil e 500 mil habitantes. Dessa forma, apesar de possuir pouco mais que 100 mil habitantes, Umuarama pode ser considerada uma cidade média.

Conforme Hulsmeier (2014), essa qualificação para Umuarama pode ser reforçada com a conceituação de cidade média proposta por Amorim Filho e Serra (2001 apud HULLSMEYER, 2014), baseada em atributos como: interações constantes e duradouras tanto com seu espaço regional quanto com aglomerações urbanas de hierarquia superior; tamanho demográfico funcional suficiente para que possam oferecer um amplo leque de bens e serviços ao espaço microrregional a elas ligado; diferenciação do espaço intraurbano, com um centro funcional já bem caracterizado e uma periferia dinâmica, evoluindo segundo um modelo semelhante ao das grandes cidades, ou seja, por meio da multiplicação de novos centros habitacionais periféricos.

3.2 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

O clima da região onde o município de Umuarama está localizado, conforme classificação de Köppen, é do tipo Cfa. O clima é subtropical e caracteriza-se por possuir temperatura inferior a 18°C no mês mais frio e temperatura média no mês mais quente acima de 22°C. Além disso,

caracteriza-se também por verões quentes e geadas pouco frequentes, com tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, sem estação seca definida (IAPAR, 2016).

Conforme o zoneamento bioclimático brasileiro, estabelecido pela NBR 15220-3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005), a cidade de Umuarama pertence a Zona Bioclimática 3, que recomenda como estratégias para o verão, o sombreamento e a ventilação cruzada, e para o inverno, o aquecimento solar.

A Tabela 6 mostra as médias históricas medidas na estação meteorológica de Umuarama, no período de 1972 a 2015. Observa-se que a temperatura média anual é de 22,2°C, a umidade relativa do ar média é de 67,6% e a média de precipitações é de 1660 mm por ano. A temperatura máxima absoluta, 39,8 °C foi registrada no mês de março e a mínima absoluta, -1,4 °C, no mês de julho (IAPAR, 2016).

Tabela 6: Médias meteorológicas históricas de Umuarama, Paraná

Temperatura do ar °C								U.R	Precip.	Evap.	Insol
Mês	Média Max	Média Min.	Máx. Abs.	Ano	Min. Abs.	Ano	Méd. Comp.	Média (%)	Média Total (mm)	Média Total (mm)	Média Total (horas)
Jan	30,7	21,2	38,1	2006	12,1	1980	25,2	72	172,4	111,6	221,3
Fev	30,7	21,1	38,4	2014	12,5	1987	25,0	73	159,9	98,0	201,47
Mar	30,3	20,5	39,8	2005	8,5	1987	24,7	70	122,6	116,6	232,6
Abr	28,3	18,3	36,6	2005	5,1	1999	22,6	68	124,2	116,4	227,7
Mai	24,8	15,4	34,0	2009	2,5	2007	19,4	71	148,0	108,8	206,8
Jun	23,7	14,2	31,0	2010	0,9	1994	18,1	70	117,4	111,5	196,7
Jul	24,0	13,8	32,2	2006	-1,4	1975	18,1	65	80,9	138,0	214,9
Ago	26,0	15,2	35,9	1999	0,5	1978	19,9	59	71,7	181,3	225,7
Set	26,8	16,3	38,8	2012	3,2	1980	21,0	62	136,3	160,5	196,1
Out	28,6	18,4	37,9	2014	8,2	1985	23,0	65	177,5	146,8	219,2
Nov	29,6	19,5	39,2	1985	9,5	1992	24,1	65	171,8	141,3	234,9
Dez	30,5	20,6	38,8	2011	11,5	2011	24,9	71	177,0	133,6	230,8
Ano	27,8	17,9						67,6	1660	1564	2608

Fonte: IAPAR (2016).

3.3 CIDADE PLANEJADA

A fundação do município de Umuarama ocorreu no dia 26 de junho de 1955 (IBGE, 2010) e está relacionada com o processo de ocupação e colonização dos chamados Norte Velho, Norte Novo e Norte Novíssimo do Paraná, que se constituíram em um terreno fértil para as companhias imobiliárias e colonizadoras. Entre 1926 e 1966, 96 “cidades novas” foram fundadas por diferentes companhias imobiliárias chamadas fronteiras do café (ROSANELLI, 2009).

A Companhia de Terras Norte do Paraná, que em 1951 passou a se chamar Companhia Melhoramentos Norte do Paraná (CMNP), fundou uma rede de cidades que teve início na cidade de Londrina até a cidade de Umuarama. Rego et al. (2004) explicam que foram implantados 62 núcleos urbanos que obedeceram basicamente a dois critérios gerais: acompanhar a linha férrea, no caso das cidades de maior importância, ou as estradas de rodagem, quando não houvesse ferrovia, e se situar no espigão.

Dessa forma, foram idealizados quatro núcleos habitacionais destinados às grandes cidades do norte e do oeste do Paraná, fundados sucessivamente e distanciados um do outro em aproximadamente cem quilômetros: Londrina, Maringá, Cianorte e Umuarama. Entre as quatro cidades, contava-se com uma série de assentamentos urbanos menores, que teriam uma distância ideal para facilitar a vida nas áreas rurais próximas (REGO et al., 2004).

Seguindo esse plano geral, as quatro cidades principais foram desenhadas por engenheiros e agrimensores e, apesar de atenderem prioritariamente aos interesses comerciais e especulativos, na maioria das cidades os traçados urbanos atestavam uma qualidade urbanística e ambiental inicial que as distinguiam no cenário nacional (REGO; MENEGUETTI, 2008; ROSANELLI, 2009).

Umuarama foi a última das cidades criadas pela Companhia, projetada em 1960 para ser mais uma urbanização às margens da ferrovia, embora a ferrovia não tenha jamais atingido a cidade. Seu plano apresentou um desenho geométrico e mais complexo do que nas outras cidades, bastante fragmentado e dissonante das características do terreno. No plano da cidade, mostrado na Figura 15, nota-se que os espaços livres, bem como o sistema viário, assumiram um papel estrutural na sua configuração (REGO et al., 2004; HULLSMEYER, 2014).

Figura 15: Mapa de Umuarama, espaços públicos e privados
Fonte: Rego et al. (2004).

3.4 CRESCIMENTO URBANO

Os programas governamentais de estímulo à construção civil e as circunstâncias econômicas nacionais e locais, nos últimos anos, estimularam o crescimento urbano de cidades médias, como Umuarama. Na cidade, a aprovação de novos loteamentos e a construção civil registrou os maiores índices de crescimento das últimas décadas.

De acordo com Hulsmeier (2014), em um período de um ano, entre maio de 2010 e maio de 2011, a expansão urbana de Umuarama contou com 20 novos loteamentos aprovados, juntos eles ocupam uma área de 1,67km². Em relação ao impacto na economia da cidade, segundo o autor, a estimativa é que se tenha gerado 230 milhões de reais apenas com a venda dos terrenos. Em 2011, a prefeitura da cidade concedeu alvará de construção para 264,4 mil m², sendo 65 mil m² apenas no primeiro quadrimestre, enquanto outros municípios de população e economia semelhantes no estado, como Campo Mourão e Toledo, não ultrapassaram 50 mil m².

De acordo com a pesquisa IPC Marketing (2016), que avalia o índice de potencial de consumo das cidades brasileiras, Umuarama está entre as seis primeiras cidades do interior do estado no ranking de crescimento do potencial de consumo entre 2010 e 2015. Porém, Hullsmeyer (2014) explica que enquanto em outras cidades, como no oeste paranaense, a demanda por *commodities* e produtos agrícolas são as maiores causas do crescimento, em Umuarama, o mercado imobiliário é o principal promotor desse crescimento.

Historicamente, sabe-se que surtos de expansão imobiliária podem superar a capacidade dos governos locais em prover adequada infraestrutura e qualidade de vida aos usuários do espaço urbano e assim acarretar grandes impactos negativos às cidades, tais como, problemas ambientais, segregação, carência de áreas verdes, sobrecarga do sistema viário e defasagem de investimentos em infraestrutura.

A expansão imobiliária de Umuarama tem ocorrido mais por expansão urbana, através da incorporação de novas glebas do que por densificação. Segundo Hullsmeyer (2014), esse primeiro processo ocorreu através da implantação de loteamentos baseados nos antigos lotes rurais devido, principalmente, à falta de opções para um possível crescimento físico previsto das cidades projetadas pela CMNP. A Figura 16 mostra a expansão urbana em termos espaciais a cada ciclo de cinco anos, tomando como base o projeto implantando nos anos 1960.

Como pode ser observado na Figura 16, a incorporação dessas novas glebas determina as características de um novo tecido urbano. Rigatti (2002) elucida que é justamente neste momento que as cidades originalmente planejadas, como no caso de Umuarama, vão se distanciando de suas distinções, enquanto a fragmentação da forma urbana passa a ser consequência direta de sua expansão, normalmente rápida, e sem um novo planejamento que a suporte. Comumente, as premissas urbanísticas presentes no plano original são abandonadas e substituídas pela aplicação genérica da legislação e da dinâmica do mercado imobiliário.

Figura 16: Expansão urbana de Umuarama-PR
Fonte: Hulsmeyer (2014).

Por outro lado, apesar do processo de densificação, representado pelo crescimento vertical, não ser tão evidente quanto a expansão horizontal, ele é perceptível, principalmente através da presença espalhada de edifícios e construções verticais na área mais central da cidade, como pode ser observado na Figura 17. Conforme vídeo institucional em comemoração do aniversário da cidade (UMUARAMA 60 ANOS, 2015), Umuarama é a cidade do Paraná com maior número de edifícios por habitante. Ainda conforme dados da Secretaria Municipal de Planejamento Urbano, os projetos para construção aprovados pela prefeitura municipal são para diversas áreas da cidade, inclusive direcionados a construção de edifícios verticais.

Figura 17: Vista aérea de Umuarama-PR e vista aérea noturna do centro da cidade.
Fonte: ACIU (2016).

Nesse passo, o novo plano diretor do município que está sendo elaborado para substituir o plano que venceu em 2004, promove a ampliação das áreas urbanas onde a verticalização será permitida, o que antes acontecia essencialmente nas zonas de alta e média densidade urbana. Essa possibilidade vem de encontro a defesa da densificação urbana por diversos pesquisadores e urbanistas, principalmente em relação aos menores custos envolvidos com a infraestrutura urbana quando comparados ao investimento no mesmo setor em cidades com crescimento por espalhamento urbano.

3.5 LEGISLAÇÃO URBANA: PLANO DIRETOR MUNICIPAL E PLANO MUNICIPAL DE ARBORIZAÇÃO URBANA

A legislação urbana é composta pela coleção de leis, decretos e normas que regulam o uso e ocupação da terra urbana. Ela estabelece a maneira como é permitido intervir ou não no espaço urbano e regula o desenvolvimento da cidade através do planejamento urbano. Para o escopo dessa pesquisa, interessam o Plano Diretor Municipal (PDM), no que se refere a lei de zoneamento, uso e ocupação do solo, e o Plano Municipal de Arborização Urbana (PMA), esse último em fase de elaboração.

O Plano Diretor de Umuarama (2004) foi criado em 2004 e tem como obrigatoriedade, como em todos municípios, passar por uma reformulação a cada dez anos. Por essa razão, esse documento se encontra vencido. O novo plano está em processo de finalização, a favor do estabelecimento de diretrizes para a política de desenvolvimento e expansão urbana baseadas nas novas demandas e realidade municipal.

Em audiência pública para tratar da revisão do PDM de Umuarama, realizada na prefeitura da cidade, no dia 24 de março de 2016, a gestora do plano apontou propostas de transformações estruturais e mudanças significativas na lei de zoneamento. O plano anterior classificava as áreas populacionais como de baixa, média e alta densidade e, conforme a gestora (informação verbal)¹, essa classificação confusa, dificulta a compreensão do zoneamento urbano, uma vez que não especificado ao que se refere as densidades mencionadas, se referente a densidade populacional, habitacional ou construída, por exemplo.

No PDM de 2004, a Lei Complementar nº 125/04 dispõe sobre o Zoneamento, o Uso do solo e a Ocupação do solo no município. A Figura 18 mostra o zoneamento de Umuarama,

---

¹ Informação fornecida por Bounassara na audiência pública de revisão do Plano Diretor Municipal de Umuarama, em 2016.

conforme o PDM de 2004 (PLANO DIRETOR DE UMUARAMA, 2004). É possível observar que a área central da cidade abrange diferentes zonas: Zona Central, Zona de Comércio e Serviços, Zona Residencial de Alta Densidade, Zona Residencial de Baixa Densidade e Zona de Serviços III. A área delimitada pela cor azul claro, a Zona Central, possui como eixo a porção da Avenida Paraná pertencente ao plano original da cidade. Essa zona também funciona como um eixo de comércio e serviços e é onde é permitido o maior coeficiente de aproveitamento (6,0) e maior altura, 15 pavimentos, sendo permitido até 18 com aquisição de potencial construtivo ou solo criado. A Tabela 7 resume os usos permitidos e tolerados (não abrange os usos permissíveis) e os parâmetros de ocupação do solo para as zonas citadas.

Figura 18: Zoneamento de Umuarama
Fonte: Plano Diretor de Umuarama (2004).

Tabela 7: Parâmetros de uso e ocupação do solo para as zonas da área central de Umuarama

Usos		Ocupação							
Permitidos	Tolerados	Lote Mín. (m²)	Testa-da Mín. (m)	C.A.	T.O. (%)	Taxa Permeab. Mín. (%)	Alt. Max. (pav)	Recuo Front. (m)	Afastamen-to das Divisas (m)
ZC- Zona Central									
-Habitação coletiva; transitória 1 e 2; -Uso comunitário2 -Comércio e serviços vicinal 1 e 2; bairro e setoriais	-Habitação unifamiliar; em série; e de uso institucional -Uso comunitário	490	14,00 Esquina: 17,50	6,0 (8,0-APC)	Tér. e 1 pav.: 75% Demais pav. 50%	10%	15 (18-APC)	4,00 Térreo e 1 pav.: facultado	Térreo e 1 pav. sem abertura: facultado. Com abertura: 1,50 Demais pav. Até 6: 2,50 Demais pav. Mais de 6: 2,50 + 0,10 por pav.
ZCS - Zona de Comércio e Serviços									
-Habitação coletiva; transitória 1 e 2; -Comércio e serviços vicinal 1 e 2; bairro e setoriais	-Habitação unifamiliar; em série -Uso comunitário	490	14,00 Esquina: 17,50	4,0 (5,0-APC)	Tér. e 1 pav.: 75% Demais pav. 50%	20%	12 (15-APC)	4,00 Térreo e 1 pav.: facultado	Térreo e 1 pav. sem abertura: facultado. Com abertura: 1,50 Demais pav. Até 6: 2,50 Demais pav. Mais de 6: 2,50 + 0,10 por pav.
ZAD - Zona Residencial de Alta Densidade									
-Habitação coletiva; e em série. -Comércio e serviços vicinal 1 e 2; -Uso comunitário	-Habitação unifamiliar; e institucional -Uso comunitário-Saúde	490	14,00 Esquina: 17,50	3,0 (4,0-APC)	60%	25%	6 (8-APC)	4,00	Térreo e 1 pav. sem abertura: facultado. Com abertura: 1,50 Demais pav. 2,50
ZBD - Zona Residencial de Baixa Densidade									
-Habitação unifamiliar; e em série. -Comércio e serviços vicinal 1; --Uso comunitário	-Comércio e serviço vicinal 2; -Uso comunitário o-ensino e saúde	360	12,00 Esquina: 16,00	1,2	60%	30%	2	4,00	Sem abertura: facultado. Com abertura: 1,50

Tabela 7 (conclusão): Parâmetros de uso e ocupação do solo para as zonas da área central de Umuarama

ZSIII - Zona de Serviços III									
-Habitação coletiva; e transitória. -Comércio e serviços vicinal 1 e 2; de bairro e setoriais	-Habitação unifamiliar -Uso comunitário-Saúde	490	14,00 Esquina: 17,50	3,0 (4,0-APC)	Tér. e 1 pav.: 75% Demais pav. 50%	20%	6 (8-APC)	4,00 Térreo e 1 pav.: facultado	Térreo e 1 pav. sem abertura: facultado. Com abertura: 1,50 Demais pav. 2,50

APC: aquisição de potencial construtivo

Fonte: elaborado pela autora a partir do Plano Diretor de Umuarama (2004).

Através das informações da Tabela 7, é possível observar que apesar de haver uma separação das zonas em “zona de comércio e serviços” e “zona residencial” os dois usos são permitidos em todas as zonas, com algumas distinções em relação ao tipo de habitação e porte do comércio e serviço. Observa-se, também, que a taxa de permeabilidade mínima do solo varia de uma zona para outra, contraditoriamente, diminuindo conforme aumenta a “densidade” ou o coeficiente de aproveitamento. Esses vários aspectos, somados a fragmentação da legislação, dificulta o entendimento e a consulta pela população.

O novo Plano Diretor Municipal (2016) foi disponibilizado temporariamente pela Prefeitura de Umuarama para a apreciação dos participantes da audiência pública de revisão do plano. A Figura 19 mostra o zoneamento proposto para a cidade. No mapa com a proposta do novo zoneamento, observa-se o aumento do perímetro urbano proporcionando maior área de expansão urbana. Também se percebe que as zonas antes classificadas por densidade agora são identificadas como zonas residenciais ou de comércio e serviço.

Comparando o zoneamento da área central da cidade do plano de 2004 com o novo plano, como mostrado na Figura 20, é possível notar que a maior parte da área central agora pertence a Zona de Comércio e Serviço 1 (ZCS1). Essa zona abrange o que antes era a Zona Central (máximo 15 ou 18 pavimentos), a Zona de Comércio e Serviços (máximo 12 ou 15 pavimentos), a Zona de Serviços III (máximo 6 ou 8 pavimentos) e também parte da Zona Residencial de Baixa Densidade (máximo 2 pavimentos).

A Tabela 8 resume os parâmetros de uso e ocupação do solo previstos para essa zona pela Minuta de Anteprojeto de Lei de Uso e Ocupação do Solo do novo PDM (2016). A ZCS1 permite construir até 12 pavimentos, diminuindo o número permitido em algumas áreas pelo plano anterior e aumentando em outras. Dessa forma, é importante destacar, que independente da

largura da via, a altura máxima permitida (40 metros) é a mesma, ou seja, não são considerados os efeitos da maior ou menor relação entre altura e largura do cânion urbano. Essa situação já ocorria no plano anterior, porém em menor proporção, uma vez que a zona onde se podia construir mais em altura, a ZC, se comportava como um eixo de comércio e serviços e de possível verticalização, não abrangendo uma área tão grande como no novo plano.

Um fato agravante é a possibilidade de edificações comerciais ocuparem o alinhamento predial, ou seja, é dispensável o recuo frontal, que poderia contribuir com a diminuição da relação H/W em vias estreitas. Além disso, o novo plano prevê a autorização da ocupação de 100% dos terrenos localizados nas avenidas comerciais (não especificadas no plano) o que contradiz e compromete a presença da taxa de permeabilidade mínima de 20% da área do lote.

Tabela 8: Parâmetros de uso e ocupação do solo para as zonas da área central de Umuarama-ZCS1

Usos			Ocupação						
Permitidos	Permissível	Proibidos	Testada min. (m)	Lote Mín. (m²)	C.A.	T.O. (%)	Taxa Permeabi. Mín. (%)	Núm. Pav.	Afastamento das Divisas (m)
-Habitação unifamiliar em série, Uso comunitário -Comércio e Serviço Vicinal e de centralidade	-Habitação multifamiliar -Comércio e serviço regional ou específico -Indústria caseira ou incômoda	- Habitação unifamiliar e de interesse social - Atividades de Grande Porte -Indústria nociva ou	10 Es-quina: 12	250 Es-quina: 300	2,5	70% Avenidas comerciais: 100%	20%	12	Lateral:1,5 Fundo 1,5 Comerciais: dispensável

Fonte: Plano Diretor de Umuarama (2016).

Figura 19: Zoneamento proposto pelo novo PDM
 Fonte: Plano Diretor de Umuarama (2016).

Figura 20: Recorte do Zoneamento do PDM de 2004 e do proposto pelo novo plano de 2016
 Fonte: Plano Diretor de Umuarama (2004) e Plano Diretor de Umuarama (2016), respectivamente, com modificações da autora.

Em relação ao coeficiente de aproveitamento, nessa mesma zona, nota-se seu decréscimo em relação à anterior Zona Central, de 2,5 e 6,0, respectivamente, e aumento apenas na porção que antes pertencia a Zona de Baixa Densidade, de 1,2 para 2,5. Ainda não estão previstos no novo PDM quanto se poderá construir a mais através da aquisição de potencial construtivo.

Acredita-se que por ser de interesse imobiliário, a questão do aumento da área urbana que possibilita a verticalização foi assunto pouco debatida durante a audiência pública, tendo sido defendida como uma das áreas da cidade que pretende atender as novas demandas de crescimento do município.

Por outro lado, questões bastante discutidas durante a audiência pública, principalmente pelos cidadãos, foram a mobilidade urbana e a acessibilidade. Ficou evidente a preocupação da população com a qualidade dos passeios públicos, especialmente nas áreas centrais da cidade, haja vista que os maiores deslocamentos por caminhada ocorrem nessa área. A preocupação com o corte excessivo de árvores e a consequente diminuição do sombreamento também foi abordada pelos cidadãos.

Tendo em vista essas preocupações dos moradores, pode-se entender que existe uma preocupação com a qualidade do espaço do pedestre, representada, inclusive, pelo ambiente térmico. O que não existe, porém, por parte da população em geral, é a compreensão de como os parâmetros de ocupação do solo, alterados na proposta do novo PDM, podem afetar a qualidade térmica no nível das calçadas e, também, da cidade como um todo.

Quanto à regulação da arborização urbana, ela não é prevista no plano diretor, mas sim no Plano Municipal de Arborização Urbana (PMA). Ele tem como objetivo principal estabelecer diretrizes de planejamento para a implantação e manejo da arborização urbana. Em Umuarama, o plano se encontra em fase de aprovação pela Câmara Municipal e começou a ser desenvolvido em 2013 através da Secretaria de Agricultura e Meio Ambiente de Umuarama em parceria com Associação em Defesa ao Meio Ambiente (ADEMA) e Universidade Paranaense (UNIPAR). A partir da aprovação do plano, o município poderá implementar ações direcionadas a arborização urbana com posterior criação e aprovação de uma lei municipal.

Para a confecção do plano, foi feito um diagnóstico detalhado sobre a vegetação arbórea presente no município, abrangendo as características de cada espécie, riscos que algumas oferecem, diretrizes para substituição e áreas carentes de arborização. Dessa forma, com o PMA, é esperado pela prefeitura que seja possível melhor preservar as espécies existentes e, também, ampliar a quantidade com vistas a fornecer mais sombra e qualidade de vida aos moradores da cidade (SANDRI, 2016).

Conforme levantamento realizado pela Secretaria de Agricultura e Meio Ambiente de Umuarama, há aproximadamente 55 m² de área sombreada por árvores para cada morador do município, o que faz com que a cidade seja a segunda do Paraná com mais sombra por habitante (GARRIDO, 2016). É importante considerar que desde o início da colonização da cidade, a CMNP arborizou a cidade e reservou áreas verdes urbanas para minimizar o impacto

negativo com queimadas e cortes de árvores nativas para sua colonização (MENEQUETTI, 2007).

O plano de arborização veio de encontro a falta de arborização nos novos loteamentos e, principalmente, ao número excessivo de cortes de árvores. Especialmente no centro da cidade, onde a maioria das espécies arbóreas são nativas e adultas, pode ser observada a diminuição da massa arbórea devido a remoção, pouco criteriosa, de espécies em frente às fachadas comerciais.

Segundo o secretário de agricultura e meio ambiente (UMUARAMA ILUSTRADO, 2015), a prefeitura do município recebe em média 750 pedidos de corte de árvores por mês, pelos motivos mais diversos; entre eles, a maior parte não se justifica e não são atendidos. Porém, devido à falta de informação por meio da população quanto a importância da vegetação arbórea, muitas são cortadas sem autorização da prefeitura. Esse fato corrobora com o levantamento realizado por Delespinasse et al. (2011), em que se identificou o vandalismo como uma das dificuldades apresentadas para a manutenção da arborização da cidade.

Um dos projetos previstos no PMA é o “Programa Mais Sombra” que visa o plantio de mudas de árvores em locais onde existe falha de sombra, como por exemplo, nos locais do centro da cidade em que as espécies existentes foram removidas. O projeto visa também a formação de uma equipe, que além de realizar o plantio das mudas, ficará responsável pela sua manutenção, como pela poda de condução (GARRIDO, 2016). Apesar do caráter publicitário do projeto, tendo em vista o objetivo de manter a cidade no “ranking” de segunda cidade mais arborizada do estado, a efetivação do PMA poderá trazer diversos benefícios a cidade, essencialmente, ao ambiente térmico.

Por fim, em relação aos planos em andamento, nota-se que, se por um lado existe a preocupação por parte dos órgãos públicos com a manutenção do verde urbano, de outro, observa-se, através da proposição das leis de uso e ocupação do solo, que faltam parâmetros que considerem o clima como condição indissociável em sua construção, por meio dos quais o crescimento da cidade possa ser regulado e orientado. Por essa razão, se faz importante estudos que possam avaliar as tendências de modificações microclimáticas a partir das propostas formuladas nas legislações urbanísticas e, assim, possibilitar a criação de estratégias alinhadas com o conforto térmico no meio urbano.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo são apresentados o método adotado e os materiais utilizados. O procedimento metodológico aplicado visa atingir o objetivo proposto, ou seja, verificar as tendências de estresse térmico no nível do pedestre em cenários de cânions urbanos na área central da cidade de Umuarama, tendo em vista o proposto pelo Plano Diretor Municipal e o Plano Municipal de Arborização Urbana.

A pesquisa é apoiada em levantamento de dados em campo e simulação computacional. Ela se baseia, principalmente, na avaliação do estresse térmico no nível do pedestre através de modelagem microclimática com ferramenta computacional de cenários de cânions urbanos. A construção dos cenários futuros envolve transformações na geometria urbana e na arborização.

Ela se divide em seis etapas principais:

- a) Caracterização da área de estudo;
- b) Levantamento de dados e sistematização;
- c) Simulação microclimática;
- d) Aplicação do índice de conforto térmico - PET;
- e) Sistematização dos dados e análise dos resultados;
- f) Recomendações.

O fluxograma apresentado na Figura 21 resume as principais etapas. Cada uma delas é explicada detalhadamente nas seções que seguem.

Figura 21: Fluxograma geral das fases metodológicas

Fonte: elaborado pela autora.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Esta seção consiste na apresentação das características dos cânions urbanos existentes selecionados para o estudo, assim como na caracterização dos cenários futuros nos quais serão analisadas as tendências de estresse térmico para o pedestre.

Para a realização da análise, foram selecionados 4 cânions urbanos da cidade de Umuarama. Optou-se pela delimitação de cânions pertencentes ao tecido urbano do plano original da cidade e localizados na área central, mais precisamente, na ZCS1, conforme proposto pelo novo PDM (2016) e exposto na seção 3.5. Essa escolha se deu em razão das transformações que podem ocorrer na forma urbana nessa área, caso consolidada a ocupação urbana face ao proposto pelas novas diretrizes de uso e ocupação do solo.

Além disso, essa escolha se deu pela grande importância do centro urbano na dinâmica da cidade. De um lado, ele concentra grande parte das atividades econômicas, possui localização privilegiada e boa infraestrutura. De outro, possui importância simbólica e cultural, nele localizam-se as primeiras praças e edifícios da cidade. E, principalmente, é no centro da cidade que ocorre a maior concentração de pedestres, seja para o deslocamento entre locais de comércio e serviço, para a socialização nos espaços livres das calçadas ou, ainda, para manifestações culturais.

Em relação às características físicas do centro de Umuarama, para o estudo do microclima, a área de estudo se classifica como LCZ6₅, conforme a classificação de zona climática local (LCZ) proposta por Stewart e Oke (2012). Conforme exposto no capítulo 2, essa classificação objetiva facilitar as comparações entre diversas pesquisas que avaliam o microclima urbano. Esse sistema representa de forma genérica e uniforme a composição da LCZ através da composição de edifícios, vegetação e materiais, porém sem descrever as peculiaridades de cada local.

A Tabela 9 apresenta as características da subclasse LCZ6₅, que representa a associação de duas classes: o 6 representa a classe predominante do conjunto padrão de LCZs e o 5 representa uma classe presente, mas com menor representatividade.

Tabela 9: Classificação da LCZ

Características/ LCZ	LCZ 6	LCZ 5
Representação esquemática		
Definição	Aberto de baixa altura: arranjo aberto de edifícios de altura baixa (1 a 3 pavimentos). Presença de área permeável (vegetação baixa e árvores espalhadas). Materiais de construção: tijolo, pedra, telha e concreto.	Aberto de média altura: arranjo aberto de edifícios de altura média (3 a 9 pavimentos). Presença de área permeável (vegetação baixa e árvores espalhadas). Materiais de construção: concreto, aço, pedra e vidro.
Fator de visão do céu	0,6 - 0,9	0,5 - 0,8
Razão H/W	0,3 - 0,75	0,3 - 0,75
Fração edificada da superfície (%)	20 - 40	20 - 40
Fração impermeável da superfície (%)	20 - 50	30 - 50
Fração permeável da superfície (%)	30 - 60	20 - 40
Altura dos elementos rugosos (m)	3 - 10	10 - 25
Classe de rugosidade do terreno (Z_0)	5 - 6	5 - 6
Albedo da superfície	0,12 - 0,25	0,12 - 0,25
Saída de calor antropogênico ($W m^{-2}$)	<25	<25

Fonte: elaborado pela autora a partir de Stewart e Oke (2012).

4.1.1 Características e delimitação dos cânions urbanos existentes

A escolha dos cânions partiu da seleção inicial de uma das vias localizadas no centro da cidade, que apresenta maior fluxo de pedestres devido à grande concentração de comércio e serviços em seu trajeto, a Avenida Paraná (Figura 22). Ela apresenta grande importância como eixo estruturador do traçado urbano e também na vitalidade e cultura da cidade, uma vez que é nela onde se realizam os desfiles municipais e manifestações populares.

Além disso, a localização de restaurantes em sua extensão e sua proximidade com a maior universidade da cidade, a Universidade Paranaense, conferem a essa avenida um movimento noturno de pedestres representativo, ao contrário de outras vias que não possuem movimentação noturna significativa.

Figura 22: Avenida Paraná, Umuarama – PR
Fonte: ACIU, 2016.

Assim, tendo como ponto de partida a Avenida Paraná (Cânion 1), foram escolhidas as outras três vias: uma via perpendicular a ela, ou seja, com diferente orientação, porém com semelhante relação H/W, nesse caso representada principalmente pela largura viária, a Avenida Apucarana (Cânion 2). A terceira via, a Rua Ministro Oliveira Salazar (Cânion 3) é paralela à Avenida Paraná, porém mais estreita, ou seja, com maior relação H/W. E, por fim, a quarta via, a Rua Aricanduva (Cânion 4), perpendicular ao cânion 3 e com semelhante relação H/W.

A dimensão do comprimento do cânion foi adotada a partir do indicado por Oke (1989) como dimensões aproximadas de cânion urbano para estudos microclimáticos: 30 metros de largura (via) por 300 metros de comprimento. Assim, o comprimento de cada cânion envolveu duas ou três quadras, dependendo da orientação, de forma a atingir essa dimensão aproximada. A largura, no caso de estudo, variou de acordo com a largura de cada via. Já em relação à altura dos edifícios, predominam edifícios de 2 pavimentos, com aproximadamente 6 metros de altura. A Figura 23 mostra a localização e ilustra os cânions urbanos selecionados e a Tabela 10 resume as características de cada cânion.

Em relação ao relevo dos cânions urbanos de estudo, existem desníveis suaves. O cânion urbano 1 possui inclinação de aproximadamente 3,5%; semelhante ao cânion urbano 3, paralelo a ele, com aproximadamente 3% de inclinação. Já os cânions urbanos com orientação N-S, possuem inclinação um pouco maior, tanto o cânion urbano 2 quanto o 3, possuem inclinação de 4,5%, aproximadamente.

Figura 23: Localização dos cânions urbanos de estudos
Fonte: Google Earth (2016) com modificações da autora.

Tabela 10: Quadro resumo das características gerais dos cânions urbanos de estudo

Caracte-rísticas	Planta Esquemática	Corte Esquemático	Razão H/W
Cânion urbano 1 LO			0,17
Cânion urbano 2 NS			0,17
Cânion urbano 3 LO			0,37
Cânion urbano 4 NS			0,30

É importante apontar que a área de estudo não corresponde apenas a área conformada pelos cânions urbanos selecionados para a análise. Essa área é delimitada de forma a abranger uma quadra urbana no alinhamento de cada cânion selecionado, conforme ilustrado na Figura 24. A seleção dessa área tem como objetivo obter melhores resultados na etapa de modelagem microclimática.

Figura 24: Mapa esquemático com a delimitação da área de estudo
Fonte: Google Earth (2016) com modificações da autora.

4.1.2 Características dos cenários de cânions urbanos

Os cenários de cânions urbanos envolvem possibilidades de cenários futuros tendo em vista possíveis transformações urbanas após a consolidação do novo Plano Diretor Municipal (2016) e do Plano Municipal de Arborização. A elaboração desses cenários tem como objetivo entender como os parâmetros de forma urbana analisados afetam as variáveis microclimáticas e assim, contribuir para o desenho urbano que proporcione conforto térmico aos usuários dos espaços abertos.

A construção dos cenários de cada cânion urbano partiu da configuração semelhante ao existente e da elaboração de cenários futuros que contemplem situações extremas quanto à geometria urbana e à arborização presente nas vias, conforme o permitido e recomendado pelos planos.

Em relação à geometria, considerou-se um cenário com edificações de 2 pavimentos, conforme predomínio no cenário existente; um cenário extremo com edifícios de 12 pavimentos, consolidado perante as possibilidades do Novo Plano Diretor em termos de ocupação do solo; e um cenário intermediário, com 7 pavimentos, para ampliar a análise e comparação do comportamento das variáveis microclimáticas em relação a esse parâmetro.

Para a construção dos cenários, além dos gabaritos, também foram respeitados os demais parâmetros de ocupação do solo propostos no novo PDM. O coeficiente de aproveitamento utilizado foi o máximo permitido para a construção dos cenários com 7 e 12 pavimentos. Em todos os cenários as construções ocupam o alinhamento predial. A Tabela 11 mostra a configuração adotada para cada edificação a partir de um lote padrão existente na área de estudo, conforme cada parâmetro, variando conforme o número de pavimentos estabelecido. Ressalta-se que a taxa de ocupação nos lotes de cenários com 7 e 12 pavimentos é menor que nos cenários com 2 pavimentos devido à adequação ao coeficiente de aproveitamento máximo permitido (2,5).

Em terrenos com dimensões diferentes foram mantidos os mesmos parâmetros de coeficiente de aproveitamento, taxa de ocupação, afastamento frontal e lateral e taxa de permeabilidade. O afastamento do fundo variou conforme as dimensões do terreno.

Tabela 11: Configuração dos parâmetros de ocupação do solo para os cenários de cânions urbanos

Parâmetro	Permitido (PDM, 2016)	Adotado		
		2 pavimentos	7 pavimentos	12 pavimentos
Dimensões do lote	Testada mínima: Meio de quadra -10m Esquina – 12m	Testada – 14,00 m Profundidade- 35,00 m *dimensões de lote predominantes na área de estudo		
Área do lote	Meio de quadra – 250m ² (mínimo) Esquina – 300 m ² (mínimo)	490,00 m ²		
Coefficiente de aproveitamento	2,5 (máximo)	1,4	2,5	2,5
Taxa de ocupação	70% (máxima)	70%	Até o 2º pavimento: 50% Torre: 30%	Até o 2º pavimento: 35% Torre: 20%
Taxa de permeabilidade	20% (mínima)	20%	20%	20%
Afastamento frontal	Dispensado	0	0	0
Afastamento lateral	Com abertura: 1,5m (mínimo)	0	Até o 2º pavimento: 0 Torre: 2,00m	Até o 2º pavimento: 0 Torre: 2,00m
Afastamento fundo	Com abertura: 1,50m (mínimo)	10,5m	Até o 2º pavimento: 17,50m Torre: 20,0m	Até o 2º pavimento: 22,50 Torre: 26,50
Área total construída	1225,00 m ² (exemplo terreno padrão)	686,00 m ²	1225,00 m ²	1225,00 m ²

Em relação à arborização, os cenários de geometria urbana foram combinados com as possibilidades em relação à presença de arborização. Em virtude da possível consolidação do Plano Municipal de Arborização Urbana, a primeira configuração adotada foi de cenários com arborização na calçada e no canteiro central, quando existente.

Foi adotada uma segunda configuração intermediária com a presença de arborização apenas de um lado da calçada, ou apenas no canteiro, quando houver, respeitando o mesmo distanciamento e utilização de espécies que na situação anterior. Essa situação é uma possibilidade perante o desejo dos comerciantes de deixarem mais “visível” a fachada das lojas, além de diminuir o conflito com a rede elétrica.

Quando localizada apenas na calçada, sua presença será visando o sombreamento da via e de acordo com o recomendado na literatura (ALI-TOUDERT; MAYER, 2006). Assim, nas vias L-O a arborização é adotada para a calçada do lado sul, uma vez que o lado norte da calçada é na maior parte do dia sombreado pelos edifícios. Nas vias N-S as árvores são posicionadas na calçada leste. Esta segunda configuração visa o sombreamento proporcionado pela arborização aos pedestres, assim como fachadas, no período da tarde, período de maior

desconforto térmico no verão, e quando as calçadas do lado oeste são sombreadas pelos edifícios.

Por fim, visando a análise do efeito da vegetação nos cânions urbanos, também foram construídos cenários sem a presença de vegetação arbórea. Atualmente, alguns dos cânions existentes se encontram com densa vegetação arbórea, próxima do proposto pelo plano de arborização, enquanto outros apresentam arborização predominante de um lado da calçada. Devido a essa variação em relação à arborização nos cânions existentes, não foram elaborados cenários que contemplem a vegetação arbórea existente, uma vez que sua comparação com outros cenários não apresentaria contribuição significativa.

Como dito anteriormente, o Plano Municipal de Arborização prevê a manutenção do verde existente na cidade, além do aumento ou reposição de espécies arbóreas objetivando o aumento de áreas sombreadas. Assim, nos cenários que possuem arborização, foram mantidos os espaçamentos de aproximadamente 14 metros de uma espécie para outra e sua locação no passeio público a 0,50m do rebaixo da calçada, como previsto no Anexo VIII do novo PDM (2016).

A espécie utilizada foi a mesma predominante no centro da cidade, a sibipiruna (*Caesalpinia pluviosa*). Trata-se de uma árvore nativa de médio porte, com altura entre 8 e 16 metros, fuste de até 40 cm de diâmetro e copa entre 12 e 16 metros de diâmetro (LORENZI, 2002; SILVA, 2013). A copa grande dessa espécie possui maior capacidade de produção de sombra e, conseqüentemente, proporciona maior conforto térmico. O índice da área da planta (PAI), usado para descrever a quantidade de bloqueio da luz pelos seus elementos (caule, galhos e folhas), é igual a 0,92 (ABREU, 2012). Em sua pesquisa, Abreu (2012) observou que essa espécie possui o melhor desempenho microclimático em relação à diversas outras espécies analisadas, que é associado às suas características do PAI e de Cobertura Verde.

Para quantificar a arborização em cada cenário de cânion urbano, a fim de possibilitar análises quantitativas, a presença de arborização em cada cenário foi expressa através do índice de cobertura verde (CV). Para tanto, considerou-se como cobertura verde a área de projeção da arborização no interior de cada cânion (CAVALHEIRO et al., 1999; MINELLA, 2014), desconsiderando os cruzamentos viários.

Para as áreas permeáveis considerou-se forração de grama. No interior de cada lote foram consideradas faixas de área gramada respeitando o mínimo exigido pelo PDM (2016), de 20% de área permeável (Tabela 11). Nas calçadas, considerou-se como área gramada caixa de 1,50 x1,50 metros para o plantio da árvore, conforme Abreu (2012), maior do que o valor recomendado pelo Anexo XII novo PDM (2016). Nos canteiros, considerou-se 35% da área do canteiro como gramada, próximo ao existente.

Dessa forma, tendo em vista as características adotadas para as construções dos cânions urbanos, através da combinação dessas características, foi possível a análise de estresse térmico nos cânions urbanos quanto a geometria urbana, presença de vegetação arbórea e orientação do cânion. As combinações resultaram em 36 cenários, conforme ilustra a Figura 25. As características dos cenários de cânions urbanos estão resumidas na Tabela 12. Nessa última tabela, estão apresentados cortes e plantas dos cenários de cânions sem escala e representados esquematicamente a fim de facilitar a identificação de cada cenário; os pontos em vermelho representam a localização do pedestre (ponto receptor) que será abordado adiante.

Figura 25: Esquema da construção dos cenários de cânions urbanos

Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 12: Quadro resumo das características dos cânions urbanos de estudo

CÂNION 1			
Orientação	L-O		
Geometria	A		
Arborização	d	e	f
Código	C1 (LO) A-d	C1 (LO) A-e	C1 (LO) A-f
Razão H/W	0,17	0,17	0,17
CV	0,00	0,20	0,65
Corte esquemático			
Planta esquemática			
Geometria	B		
Arborização	d	e	f
Código	C1 (LO) B-d	C1 (LO) B-e	C1 (LO) B-f
Razão H/W	0,60	0,60	0,60
CV	0,00	0,20	0,65
Corte esquemático			
Planta esquemática			
Geometria	C		
Arborização	d	e	f
Código	C1 (LO) C-d	C1 (LO) C-e	C1 (LO) C-f
Razão H/W	1,03	1,03	1,03
CV	0,00	0,20	0,65
Corte esquemático			
Planta esquemática			

Tabela 12 (continuação): Quadro resumo das características dos cânions urbanos de estudo

CÂNION 2			
Orientação	N-S		
Geometria	A		
Arborização	d	e	f
Código	C2 (NS) A-d	C2 (NS) A-e	C2 (NS) A-f
Razão H/W	0,17	0,17	0,17
CV	0,00	0,18	0,65
Corte esquemático			
Planta esquemática			
Geometria	B		
Arborização	d	e	f
Código	C2 (NS) B-d	C2 (NS) B-e	C2 (NS) B-f
Razão H/W	0,60	0,60	0,60
CV	0,00	0,18	0,65
Corte esquemático			
Planta esquemática			
Geometria	C		
Arborização	d	e	f
Código	C2 (NS) C-d	C2 (NS) C-e	C2 (NS) C-f
Razão H/W	1,03	1,03	1,03
CV	0,00	0,18	0,65
Corte esquemático			
Planta esquemática			

Tabela 12 (continuação): Quadro resumo das características dos cânions urbanos de estudo

CÂNION 3			
Orientação	L-O		
Geometria	A		
Arborização	d	e	f
Código	C3 (LO) A-d	C3 (LO) A-e	C3 (LO) A-f
Razão H/W	0,37	0,37	0,37
CV	0,00	0,45	0,96
Corte esquemático			
Planta esquemática			
Geometria	B		
Arborização	d	e	f
Código	C3 (LO) B-d	C3 (LO) B-e	C3 (LO) B-f
Razão H/W	1,31	1,31	1,31
CV	0,00	0,45	0,96
Corte esquemático			
Planta esquemática			
Geometria	C		
Arborização	d	e	f
Código	C3 (LO) C-d	C3 (LO) C-e	C3 (LO) C-f
Razão H/W	2,25	2,25	2,25
CV	0,00	0,45	0,96
Corte esquemático			
Planta esquemática			

Tabela 12 (conclusão): Quadro resumo das características dos cânions urbanos de estudo

CÂNION 4			
Orientação	N-S		
Geometria	A		
Arborização	d	e	f
Código	C4 (NS) A-d	C4 (NS) A-e	C4 (NS) A-f
Razão H/W	0,30	0,30	0,30
CV	0,00	0,31	0,69
Corte esquemático			
Planta esquemática			
Geometria	B		
Arborização	d	e	f
Código	C4 (NS) B-d	C4 (NS) B-e	C4 (NS) B-f
Razão H/W	1,05	1,05	1,05
CV	0,00	0,31	0,69
Corte esquemático			
Planta esquemática			
Geometria	C		
Arborização	d	e	f
Código	C4 (NS) C-d	C4 (NS) C-e	C4 (NS) C-f
Razão H/W	1,80	1,80	1,80
CV	0,00	0,31	0,69
Corte esquemático			
Planta esquemática			

4.2 LEVANTAMENTO DE DADOS E SISTEMATIZAÇÃO

O levantamento e sistematização dos dados do local de estudo se constituem nas atividades que visam produção dos documentos e informações necessárias a posterior simulação dos cenários. Essa etapa está dividida em levantamento físico e levantamento das variáveis climáticas.

4.2.1 Levantamento físico da área

a) Levantamento primário

O levantamento primário se refere ao levantamento em campo das características necessárias para modelagem da área existente para, posteriormente, analisar a correspondência entre dados medidos e simulados. Foram levantados gabarito de altura e materiais que compõe as áreas construídas através de observação e contagem do número de pavimentos dos edifícios existentes em toda a área de estudo (Figura 24).

b) Levantamento secundário

Se refere ao levantamento proveniente de fontes secundárias necessárias à modelagem da área existente e dos cenários:

- Mapa da cidade de Umuarama com extensão dwg contendo os perímetros das quadras, lotes, edificações e canteiros fornecidos pela prefeitura do município;
- Imagem de satélite da área em estudo.

c) Planta-base dos cenários

Essa etapa se refere a elaboração da planta baixa de cada cenário de cânion urbano utilizada para a modelagem em 3 dimensões na ferramenta Envi-MET. Os desenhos foram feitos utilizando o programa computacional AutoCAD 2016, versão educacional.

Inicialmente foi feito um recorte no mapa da cidade com extensão dwg, de forma a abranger apenas a área de estudo, conforme ilustrado na Figura 24. Depois disso, foram representadas as informações para cada cenário de cânion urbano separadamente, conforme apresentado na Tabela 11, resultando no desenho de 36 plantas base. Como ilustrado na Tabela 12, em cada planta-base foram representados os limites das quadras, lotes, edificações, ruas, calçadas, canteiros, áreas gramadas e árvores. Nos edifícios a diferença de gabarito foi diferenciada por cores.

Além desses desenhos das plantas-base para os cenários, também foi configurada uma planta-base do cânion urbano 1 existente. Sua configuração foi necessária para a modelagem utilizada para análise de correspondência dos dados. Para a representação desse cenário existente, as informações contidas no mapa com extensão dwg foram atualizadas e complementadas através de sua sobreposição à imagem de satélite e utilização das informações de gabarito de altura levantados no local.

Cada planta-base foi exportada para arquivo de imagem formato jpg e depois transformado em bitmap para dar suporte à modelagem dos cenários no programa de simulação microclimática.

4.2.2 Levantamento das variáveis climáticas

a) Monitoramento das variáveis microclimáticas in loco

O monitoramento das variáveis microclimáticas in loco foi realizado para verificar a correspondência dos valores medidos com os valores do modelo simulado. Ele foi realizado no cânion urbano 1. A Figura 26 ilustra a localização do ponto de monitoramento, localizado na calçada do lado sul do cânion urbano 1, na Avenida Paraná, próximo a uma árvore, sombreado em alguns horários do dia.

Figura 26: Localização do ponto de monitoramento das variáveis microclimáticas

Fonte: elaborado pela autora.

As variáveis microclimáticas medidas foram a temperatura do ar (T_a), a umidade relativa do ar (UR), a temperatura de globo (T_g) e a velocidade do ar. A Temperatura radiante média (T_{rm}) foi calculada pela fórmula de convecção forçada conforme a ISO 7726 (1998).

O monitoramento foi realizado em situação de inverno, no dia 23 de agosto de 2016, e de verão, no dia 27 de fevereiro de 2017, conforme disponibilidade de instrumentos e condições do céu. Nos dois dias as variáveis microclimáticas foram registradas às 6h, 9h, 12h, 15h, 18h, 21h e 00h, os mesmos horários simulados na ferramenta computacional a fim de possibilitar a validação da ferramenta através da comparação de dados medidos e dados simulados. O monitoramento foi feito em condições de céu limpo e os instrumentos utilizados foram:

- Tripé posicionado a 110 cm do solo;
- Data logger 177-H1, marca Testo, com 2 canais de temperatura, sensor externo de umidade conectado a um sensor de temperatura da marca Testo, modelo 0613, com globo plástico cinza de 40 mm confeccionado com bola de pingue-pongue oficial pintada na cor cinza médio;
- Anemômetro, marca Testo, modelo 405.

b) Levantamento das variáveis climáticas do município

Refere-se ao levantamento dos dados climáticos necessários à simulação computacional. Para a simulação do cenário real e validação do programa foram utilizados os dados da estação automática do Sistema Meteorológico do Paraná – SIMEPAR localizada em Umuarama, Paraná, referente aos dias 23 de agosto de 2016 e dia 27 de fevereiro de 2017. Os dados climáticos utilizados para as simulações dos cenários de cânions urbanos também foram fornecidos pelo SIMEPAR.

4.3 SIMULAÇÃO MICROCLIMÁTICA COM FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Para a simulação do microclima urbano foi utilizada a ferramenta computacional ENVI-met 4. O uso do ENVI-met possibilitou a simulação microclimática dos cenários de cânion urbano e, assim, a geração de dados para o cálculo posterior do estresse térmico no nível do pedestre em cada cenário.

O uso dessa ferramenta computacional foi escolhido por reproduzir de modo dinâmico os processos microclimáticos do meio urbano, atendendo a um ciclo diário. Além disso, ele é um

programa de domínio público, possui a interface simples e grande variedade de dados de saída.

As simulações foram realizadas separadamente por cenário de cânion urbano. Cada cenário abrange a delimitação do cânion a ser analisado e o entorno composto por 1 quadra urbana, conforme delimitado anteriormente na Figura 24. A opção por simular cada cenário individualmente se deu devido ao elevado tempo de processamento do programa quanto maior a área simulada. As configurações do programa foram feitas de acordo com o proposto por Rosseti (2013); Minella (2014) e Schimitz (2015).

Primeiramente foi simulado o cenário referente ao cânion urbano 1 existente, em situação de inverno e verão, para possibilitar a validação do modelo. Posteriormente, foram simulados os demais cenários.

4.3.1 Modelagem dos cânions urbanos

Essa etapa corresponde a fase de modelagem de cada cenário de cânion urbano analisado. A modelagem é elaborada na própria interface do ENVI-met, no módulo *Spaces*.

Primeiramente, foi importado o arquivo de imagem planta-base de cada cenário em formato bitmap. A imagem serve de apoio para a construção do modelo correspondente a cada cenário. O norte foi rotacionado em 16 graus no sentido horário para melhor definição da modelagem. O ângulo de rotação do norte é informado assim que a imagem é importada no módulo *Spaces*.

O módulo *Spaces* é apresentado em uma interface bidimensional, mas possibilita a modelagem do cenário de estudo nas três dimensões espaciais. Ele é organizado sobre uma malha regular, composta por módulos de tamanhos iguais, chamados de *grid* (células de grade). Primeiro, dimensiona-se a célula de grade nas direções horizontais x e y, sendo o valor mínimo de 1 x 1m. É importante considerar que quanto menor o tamanho da grade, mais detalhado ficará o modelo, porém o tamanho final do domínio será maior, o que poderá demandar maior tempo de processamento. Alguns pesquisadores utilizam em seus modelos células de grade de 5,0 x 5,0 m (CARFAN et al, 2009; MINELA, 2009), 2,0 x 2,0 m ou 1,5 x 1,5 m (ROSSETI, 2013); a primeira resolução facilita o processamento, porém, em alguns casos não representa adequadamente a realidade, já a segunda configuração pode comprometer o tempo de obtenção dos resultados.

Nessa pesquisa, assim como em Schimitz (2014), o modelo foi desenhado com células de 2,5 x 2,5m e 3,0 m para a altura (z), com o objetivo de reproduzir as dimensões dos edifícios e dos seus afastamentos o mais próximas das dimensões reais e previstas, porém visando menos tempo de processamento.

Para a configuração das células de grade verticais, existem opções equidistantes ou telescópicas (dimensões variáveis). Na primeira opção, as células de grade possuem o mesmo tamanho na direção vertical, e a primeira célula, a mais próxima do solo, é subdividida em cinco partes iguais. No segundo caso é possível aplicar um fator de escala indicado na forma de um percentual de incremento aplicado a partir da segunda célula; aplicar o percentual de incremento a partir de uma determinada altura; ou utilizar um valor de variação de altura equidistante sem que ocorra o fracionamento da primeira célula (BRUSE, 2016). Nesse caso, foi utilizada a opção telescópica, uma vez que a primeira opção é mais adequada quando existe interesse nos processos que ocorrem nas diferentes camadas verticais (MINELLA, 2014).

Bruse (2016) recomenda que a altura do modelo seja no mínimo 2,5 vezes a altura do maior edifício. Considerando-se que nos diversos cenários o edifício mais alto possui 12 pavimentos (12 células de grade de 3,0m), um total de 36 metros de altura, a altura do modelo deverá ser de 90 metros no mínimo. Como a limitação da altura é de 30 células, nesse caso equivalendo a 90 metros, foi adotada a opção telescópica com variação de altura equidistante.

Na área que circunda o limite da área principal, no plano horizontal, foi acrescentada uma área que compõe a borda do modelo (*nesting grids*), que consiste em um campo de transição bidimensional para os fluxos de vento e radiação solar, a fim de evitar instabilidades na borda da área principal. A quantidade de células de borda adotada foi de 4 células, conforme proposto por Schimitz (2014).

O modelo final da grade corresponde a soma da área principal e da área de borda, sendo o tamanho máximo permitido de 250x250x30. Para cada célula de grade foram informadas as alturas dos edifícios, materiais constituintes dos edifícios e de cobertura do solo e presença vegetação. A altura dos edifícios e a presença de vegetação arbórea foi configurada conforme as características de cada cenário de cânion urbano.

Todas as paredes e coberturas dos edifícios foram configurados com o mesmo material, uma vez que analisar o efeito de sua composição não faz parte do escopo dessa pesquisa. Antes da definição desses materiais foram feitas simulações do cânion urbano 1 existente com algumas

opções de combinações mais próximas das existentes: para as paredes, blocos de concreto na cor cinza claro ou blocos de alvenaria na cor bege e para a cobertura laje de concreto ou telhas cerâmicas. Os materiais adotados foram definidos com base na proximidade dos resultados simulados com os medidos. Foram utilizados materiais padrão do programa e os valores dos albedos foram alterados conforme proposto por Sailor e Fan (2002): blocos de concreto na cor cinza claro para paredes (albedo de 0,2) e laje de concreto na cobertura (albedo 0,3).

As calçadas públicas e as áreas impermeabilizadas no interior dos lotes foram configuradas com pavimento de concreto cinza médio (albedo 0,3) e as vias de tráfego com asfalto (albedo 0,2). Já para as áreas permeáveis, tanto públicas quanto privadas, considerou-se superfície gramada, porém a altura da grama existente no banco de dados do programa foi alterada de 50 cm para 20 cm, conforme proposto por Minella (2014). A área de borda do modelo foi configurada com solo argiloso, conforme recomendado por Bruse (2008, apud Brandão, 2009) para não camuflar os dados da área principal.

A vegetação arbórea, composta por sibipirunas, foi criada a partir de uma opção disponibilizada no banco de dados do modelo e sua configuração foi baseada nas características da espécie disponíveis na literatura (ABREU, 2012) e na configuração de espécies de copa densa brasileiras adotadas por Shinzato e Duarte (2012) e Rosseti (2013). A Tabela 13 mostra as características da espécie arbórea criada para a modelagem no módulo *Albero*.

Tabela 13: Configuração da espécie arbórea criada no modelo

Tipo	Árvore decídua
Tipo de fixação do CO ₂	C3
Albedo da folha	0,20
Altura da planta	15 m
Diâmetro da copa	12 m
LAD- Densidade de área foliar (m ² /m ³) no perfil vertical de 10 camadas na planta	LAD1: 0,08; LAD2: 0,08; LAD3:0,08; LAD4: 0,08; LAD5 0,25; LAD6: 1,15; LAD7: 1,06; LAD8: 1,05; LAD9: 0,92; LAD10:0,40
RAD – densidade de área radicular (m ² /m ³) no perfil vertical de 10 camadas na planta	RAD1: 0,10; RAD2: 0,10; RAD3: 0,10; RAD4: 0,10; RAD5: 0,10; RAD6: 0,10; RAD7: 0,10; RAD8: 0,10; RAD9: 0,10; RAD10: 0,10.

Ainda nessa fase, foram inseridos receptores. Um receptor representa a localização de um pedestre no cenário modelado, ou seja, um ponto na área modelada para o qual foram obtidos os parâmetros microclimáticos. Em cada cenário foi inserido um receptor, com a mesma localização para cada cânon de origem, identificado pelas coordenadas x e y. Ele foi

posicionado no passeio público, a uma altura de 1,50 m, entre duas árvores, quando existentes. Apenas na simulação do cânion urbano 1 existente o receptor foi posicionado no mesmo ponto do monitoramento das variáveis microclimáticas. Ao final, o modelo foi revisado e salvo com a extensão .IN.

A Tabela 14 mostra a dimensão modelada, em metros e em *grids*, de cada cânion urbano. Através do exemplo do cenário intermediário de cada cânion, com edifícios de 7 pavimentos e arborização no canteiro ou de um lado da calçada (cenário B-e). A Tabela 14 também mostra a visualização dos cenários modelados no módulo *Spaces* em duas dimensões e em três dimensões. A localização do receptor em cada cânion está indicada na visualização em duas dimensões. Essa localização é mantida nas outras variações de cenários de cada cânion.

Tabela 14: Dimensões e visualização da área modelada dos cânions urbanos

Cânion	C1
Dimensões da área modelada (x; y; z) (m)	310; 175; 90
Dimensões da área modelada (x; y; z) (grids)	124; 70; 30
Visualização em 2 dimensões no módulo <i>Spaces</i> e localização do receptor (C1 – B-e)	
Visualização em 3 dimensões no módulo <i>Spaces</i> (C1 – B-e)	

Tabela 14 (continuação): Dimensões e visualização da área modelada dos cânions urbanos

Cânion	C2
Dimensões da área modelada (x; y; z) (m)	167,5; 260; 90
Dimensões da área modelada (x; y; z) (grids)	67; 104; 30
Visualização em 2 dimensões no módulo <i>Spaces</i> e localização do receptor (C2 – B-e)	
Visualização em 3 dimensões no módulo <i>Spaces</i> (C2 – B-e)	

Tabela 14 (conclusão): Dimensões e visualização da área modelada dos cânions urbanos

Cânion	C4
Dimensões da área modelada (x; y; z) (m)	155; 260; 90
Dimensões da área modelada (x; y; z) (grids)	62; 104; 30
Visualização em 2 dimensões no modulo <i>Spaces</i> e localização do receptor (C4 – B-e)	
Visualização em 3 dimensões no módulo <i>Spaces</i> (C4 – B-e)	

4.3.2 Configuração dos dados de entrada

A configuração dos dados de entrada é feita no módulo *ConfigWizard* do Envi-MET. Essa fase compreende, principalmente, a configuração dos parâmetros de tempo de simulação e dos dados de entrada das variáveis climáticas.

Visando a representatividade dos dados, as simulações foram feitas para situação de inverno e verão. Para tanto, estabeleceu-se os dias de solstício de inverno, 21 de junho de 2016 e de verão, 21 de dezembro de 2016. A simulação realizada validação do programa foi realizada para os mesmos dias em que foram realizados os monitoramentos no local: dias 23 de agosto de 2016 e 27 de fevereiro de 2017.

A fim de abranger parte representativa das horas de maior utilização do espaço público e de seguir a recomendação da Organização Mundial de Meteorologia (OMM) para estudos de clima urbano (SILVA, 2013), as variáveis microclimáticas foram registradas às 6h, 9h, 12h, 15h, 18h, 21h e 00h.

Em relação ao tempo de simulação, Bruse (2016) aconselha a utilização de 48 horas de simulação ou no mínimo o uso de 24 horas. Ele também recomenda que o início da simulação tenha início ao nascer do sol ou no período noturno, pois, por se tratar de um modelo de simulação numérica, ele exige um determinado tempo para estabilização dos dados. Dessa forma, foram realizadas 48 horas de simulação, com início às 00 horas, sendo descartadas as primeiras 30 horas. O salvamento dos dados foi configurado para cada 3 horas.

Para a configuração climática de inicialização foram utilizados os dados fornecidos pela estação automática do Sistema Meteorológico do Paraná – SIMEPAR localizada em Umuarama. Quanto ao valor da umidade específica do ar a 2.500 m (em g/kg), proveniente de radiossondagem e que permanece constante durante a simulação, foram utilizados valores medidos no Aeroporto de Londrina, Paraná, obtido no site da Universidade de Wyoming (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). Ressalta-se que o aeroporto de Londrina, distante aproximadamente 260 km de Umuarama, é o mais próximo da cidade de estudo que disponibiliza essas informações.

A rugosidade do local de monitoramento das variáveis climáticas, que corresponde a localização da estação do SIMEPAR, foi configurada com o valor de 0,01 referente a área rural sem obstáculos (OKE, 2006). Em relação à quantidade de nuvens no modelo, considerou-se

céu sem nuvens. Para configuração de outros dados disponíveis para edição, como condições iniciais do solo e dispersão de poluentes, foram mantidas as definições padrão do programa. A Tabela 15 mostra os dados de entrada para cada situação de simulação.

Tabela 15: Configuração dos dados de entrada no modelo

Dado de entrada	Inverno	Verão	Inverno-validação	Verão-validação
Data de início	20/06/2016	20/12/2016	22/08/2016	26/02/2017
Início da simulação	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00
Tempo total de simulação (h)	48	48	48	48
Intervalo de saída de dados dos receptores (min)	180	180	180	180
Velocidade do ar a 10 m de altura (m/s)	2,87	2,56	2,95	2,82
Direção do vento (graus)	90	90	90	90
Temperatura do ar inicial (°C)	16,34	24,90	15,7	25,4
Umidade específica a 2500m (g/kg)	4,25	9,49	6,89	8,65
Umidade Relativa do ar (%)	67	71	63	72

4.3.3 Configuração e sistematização dos dados de saída

A configuração dos dados de saída se iniciou na etapa de modelagem dos cenários de cânions urbanos a partir da inserção dos receptores que representam os pedestres. Para cada cenário simulado foi gerado um arquivo com dados de variáveis microclimáticas obtidas no ponto do receptor. Esses dados foram extraídos em planilhas do programa do Excel. Os dados selecionados foram as variáveis climáticas para o cálculo de conforto térmico pelo índice PET: temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e temperatura radiante média, no ponto receptor a uma altura de 1,50 metros.

Posteriormente, os dados de saída foram sistematizados no programa Excel. Eles foram organizados em tabelas por cenário e por período de verão e inverno com os dados horários estabelecidos para análise (6h, 9h, 12h, 15h, 18h, 21h e 00h). Essa organização teve como objetivo facilitar a visualização e organização dos dados para posterior aplicação do índice PET.

4.3.4 Análise de correspondência das medidas

Como dito anteriormente, o cânion urbano 1 existente, inclusive com a vegetação como se apresenta, foi simulado para a análise de correspondência entre as medidas simuladas com a ferramenta ENVI-met e as medidas observadas no local. Para a análise, foram aplicados testes estatísticos com o auxílio do ambiente estatístico R (R Development Core Team, 2015), versão 3.3.1, de acesso livre.

A escolha da ferramenta R foi por se tratar de um software livre, amplamente utilizado em trabalhos científicos (PROVETTE et al., 2011). Apesar de sua plataforma pouco amigável, essa ferramenta possibilita grande flexibilidade na análise dos dados e criação de gráficos.

Inicialmente, a fim de comparar as medidas reais e as medidas simuladas foram construídos gráficos de Bland-Altman. Esse gráfico relaciona as médias dos dois métodos com a diferença entre eles e permite avaliar a relação das discordâncias com as medidas avaliadas. A observação de muitas diferenças fora do intervalo de confiança indicam que as medidas diferem (HIRAKATA; CAMEY, 2009).

Além disso, conforme o recomendado por Minella (2014), foram aplicados dois testes estatísticos para avaliar a concordância, que indicam o afastamento entre os valores simulados e os medidos, o erro médio quadrático (RMSE) e o índice de concordância de Willmott.

No RMSE (equação 1) valores próximos de zero indicam menor correspondência entre os valores simulados e medidos. No índice de concordância de Willmott (equação 2), que varia de zero a 1, valores próximos de 1 indicam maior correspondência entre as medidas.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}}$$

Equação 1

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{y}| + |x_i - \bar{x}|)^2}$$

Equação 2

Onde:

x_i é o valor medido

y_i é o valor simulado

n é o número de observações

Também foi aplicada a regressão linear entre as medidas reais e simuladas. Nesse caso, um coeficiente angular (β_1) próximo de 1, isto é, quando o 1 está dentro do intervalo de confiança construído em torno desse coeficiente, a um nível de 95% de confiança, não há indicação de diferença entre as medidas simuladas e observadas (MONTGOMERY; RUNGER; HUBELE, 2004).

As configurações dos modelos simulados, conforme exposto na seção anterior, foram estabelecidas após os resultados simulados apresentarem correspondência com as variáveis

obtidas no local. O modelo foi simulado com opções diferentes de materiais e foram feitos ajustes nos dados de entrada até que os valores simulados fossem ajustados da melhor maneira possível às variáveis microclimáticas reais, conforme o recomendado por Rosseti (2013) e Minella (2014).

4.4 APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE CONFORTO TÉRMICO PET

O cálculo do nível de estresse térmico do pedestre pelo índice PET foi feito através da ferramenta computacional RayMan Pro 2.3 (MATZARAKIS; RUTZ; MAYER; 2010). Os parâmetros de entrada para o programa foram extraídos das simulações microclimáticas de cada cenário pelo ENVI-met, em planilhas do Excel. A avaliação foi feita para o ponto receptor em cada cenário, para situação de inverno e de verão, para os seguintes horários: às 6h, 9h, 12h, 15h, 18h, 21h e 00h.

Para o cálculo do PET, utilizou-se como variáveis pessoais as de um homem padrão conforme a norma ISO 8996 (2004). Foram adotadas as seguintes características: 30 anos de idade, 1,75 m de altura e peso igual a 70 kg. A taxa metabólica adotada foi de 110 W, para atividade moderada, como caminhada, e o valor de isolamento térmico das roupas considerado foi de 0,5 clo, para o verão e 0,9 clo para o inverno (ISO 7730; 2005).

A escala PET utilizada foi a escala calibrada por Monteiro (2008) para a cidade de São Paulo (Tabela 16) por se tratar da cidade com características climáticas que mais assemelham à área de estudo com escala PET calibrada. A Figura 27 mostra os valores de temperatura média do ar (°C) e da umidade relativa do ar (%) para São Paulo e Umuarama. Observa-se que as variações de temperatura média do ar e umidade relativa do ar nas duas cidades são semelhantes. Umuarama apresenta temperatura do ar em média 1,4 °C acima dos valores observados em São Paulo e umidade relativa do ar, em média 10% mais baixa.

Tabela 16: Escala PET

PET (°C)	Percepção Térmica	Nível de Estresse Térmico
< 4	muito frio	estresse forte ao frio
< 12	frio	estresse moderado ao frio
< 18	pouco frio	estresse leve ao frio
18-26	neutra	sem estresse térmico
> 26	pouco calor	estresse leve ao calor
> 31	calor	estresse moderado ao calor
> 43	muito calor	estresse forte ao calor

Fonte: Monteiro (2008) com adaptações da autora.

Figura 27: Valores médios de temperatura do ar (°C) e de umidade relativa do ar (%) em São Paulo e em Umuarama

Fonte: Dados Umuarama: IAPAR (2016); dados São Paulo: Instituto Nacional de Meteorologia (2016) com adaptações da autora

4.5 SISTEMATIZAÇÃO DOS DADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nessa etapa os dados foram apresentados e analisados. Para a melhor compreensão do comportamento das variáveis foram realizadas análises de correlações entre as variáveis de estudo e propostos modelos de regressão linear múltipla.

4.5.1 Apresentação e discussão dos resultados

Os resultados foram apresentados e discutidos na forma de quadros com os dados sistematizados e também através de gráficos comparativos. Nessa etapa, para auxiliar a análise dos dados foram apresentados diagramas polares de obstrução do céu, elaborados para o ponto receptor em cada cenário de estudo e para situação de verão e de inverno.

Os diagramas polares foram modelados para ilustrar a obstrução do céu proporcionada por diferentes relações H/W e CV em cada cenário. Além disso, os diagramas auxiliaram na análise dos dados, uma vez que possibilitam identificar em quais horários de estudo houve incidência direta de radiação solar no ponto receptor (pedestre) e em quais houve interceptação da radiação solar direta proporcionada por edifícios ou árvores.

Os diagramas foram construídos através da ferramenta computacional SkyHelios (MATZARAKIS; MATUSCHEK, 2011), uma ferramenta de acesso livre. Essa ferramenta possibilita a obtenção de gráficos de fatores microclimáticos que podem ser utilizados de

forma integrada a outros modelos computacionais como auxílio para quantificar as condições climáticas relevantes em áreas urbanas complexas (ibid.).

Primeiro, os obstáculos (edifícios e árvores) foram modelados com a ferramenta RayMan Pro e salvos com a extensão obs; posteriormente, os obstáculos foram importados no modelo SkyHelios. Para a obtenção do diagrama foram informadas as coordenadas geográficas do local de estudo, ponto para obtenção do diagrama, idêntico a localização do ponto receptor inserido no Envi-MET, dia e mês do ano.

4.5.2 Análise de correlação entre variáveis

Nessa etapa foram analisadas as correlações individuais entre variáveis microclimáticas, a relação H/W, a cobertura verde (CV) e o PET. Essa verificação permitiu a compreensão das variáveis que exercem maior influência nos níveis de estresse térmico do pedestre.

Para isso, foi aplicado o teste de correlação de Pearson (1986). O coeficiente de correlação de Pearson (r) varia no intervalo de $(-1,1)$. O sinal indica a direção da correlação, inversa (negativa) ou direta (positiva), enquanto o valor indica a força da correlação. Quanto mais próximo o coeficiente estiver de -1 ou 1 , mais forte é a correlação entre as variáveis. Porém, se a correlação for igual a zero, significa que não existe relação entre as variáveis em estudo.

As análises foram realizadas com a utilização do ambiente estatístico R (*R Development Core Team*), versão 3.3.1. O nível de significância foi fixado em 5%.

4.5.3 Modelos de regressão linear múltipla

Posteriormente, foram propostos modelos de regressão linear múltipla para a construção de modelos que avaliem as relações entre as variáveis da forma urbana e o nível de estresse térmico no nível do pedestre, calculado pelo índice PET. Uma vez que o índice de conforto térmico PET apresentou um comportamento distinto em relação ao período para o qual foi simulado, o modelo foi ajustado separadamente para os dados diurnos (12h e 15h) e noturnos (21h e 00h). Também foram propostos modelos separados para os cânions urbanos com orientação L-O e com orientação N-S, considerando dados diurnos (12h e 15h).

A variável dependente considerada neste estudo foi o PET e as variáveis independentes foram: horário, estação, H/W e CV, assim como interações e termos de segundo grau, como apresentado a seguir:

$$PET \sim \text{Horário} + \text{Estação} + HW + CV + \text{Cânion: } HW + \text{Cânion: } CV + HW: CV + HW^2 + CV^2$$

Onde:

$Y \sim X$: modelo de regressão em que Y é a variável dependente e X é a variável independente;

$Y \sim X_1 + X_2$: modelo considera os efeitos principais das variáveis X_1 e X_2 ;

$Y \sim X_1: X_2$: modelo leva em conta somente a interação entre X_1 e X_2 ;

$Y \sim X^2$: modelo leva em conta o efeito do termo de segundo grau da variável X .

Para as variáveis categóricas utilizou-se a codificação em variáveis *dummies*. Na codificação em *dummies*, as variáveis originais são transformadas em artificiais assumindo valores de 0 ou 1, onde zero indica ausência de atributo e um, sua presença.

A influência de cada variável no modelo de regressão foi avaliada por meio da análise de covariância, que decompõe a covariância total em somas de quadrados referente aos resíduos e aos efeitos fixos incluídos no modelo (BUSSAB; MORETTIN, 2012). A qualidade do ajuste foi verificada pela análise dos resíduos, através de gráficos para a avaliação dos pressupostos de normalidade, homocedasticidade e independência dos resíduos.

Para comparar os níveis das variáveis categóricas, foi aplicado o teste de *Tukey* da diferença honestamente significativa (HSD) (ibid.). Para tamanhos de amostras iguais, o teste de *Tukey* declara duas médias significativamente diferentes se o valor absoluto de suas diferenças amostrais ultrapassar:

$$TSD = q_{\alpha}(k, N - k) \sqrt{\frac{QME}{n}}.$$

Onde k o número de grupos, N o total de observações, n o número de observações por grupo e QME o erro quadrático médio.

Por fim, para avaliar a influência de H/W e CV no PET foram utilizadas técnicas de superfície de resposta. Esse método se refere a uma técnica estatística utilizada para modelagem e análise de situações nas quais a variável resposta é influenciada por outros fatores. Seu objetivo é determinar a sensibilidade da variável resposta a mudanças dos níveis dos fatores de interesse e, assim, otimizar os resultados da resposta (MONTGOMERY; RUNGER; HUBELE,

2004). Nessa pesquisa, a variável resposta se refere ao PET e os fatores de interesse, H/W e CV. Para a visualização gráfica da superfície de resposta foram construídos gráficos de contorno.

Assim como para as análises de correlações, os modelos de regressão linear múltipla foram realizados com o auxílio do ambiente estatístico R (*R Development Core Team*), versão 3.3.1, e o nível de significância foi fixado em 5%.

4.6 RECOMENDAÇÕES

A partir da análise dos resultados, da construção dos modelos de regressão linear múltipla e da construção das superfícies de resposta foram traçadas recomendações para o desenho urbano. As recomendações relacionam valores de razão H/W, resultantes de cenários de cânions urbanos elaborados a partir das diretrizes do novo PDM, com coberturas verdes, visando a obtenção de menores níveis de estresse térmico no nível do pedestre. Da mesma forma, foram propostos valores limites para a relação H/W para as duas orientações de cânions urbanos.

Ao final, sugestões de aplicação das recomendações foram apresentadas em quadros com descrição da sugestão e ilustrações esquemáticas separadas por avenidas e ruas com orientação L-O e avenidas e ruas com orientação N-S.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são apresentados os resultados da pesquisa obtidos através da aplicação das etapas expostas no capítulo anterior. Primeiro é apresentada a análise de correspondência das medidas observadas no local e das medidas simuladas através da aplicação de testes estatísticos. Depois, são apresentados os resultados das simulações, índices PET, discussão dos resultados e análises estatísticas.

5.1 ANÁLISE DE CORRESPONDÊNCIA DAS MEDIDAS

Para verificar a correspondência das medidas observadas no local e simuladas, as variáveis microclimáticas monitoradas no cânion urbano 1 existente foram comparadas com as variáveis simuladas no programa ENVI-met em um cenário modelado semelhante ao existente, conforme explicado no capítulo “materiais e métodos”.

A Figura 28 e a Figura 29 mostram as variáveis microclimáticas (temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do ar e temperatura radiante média) observadas no local e simuladas, para situação de inverno e verão. Através das figuras é possível perceber as variações entre os dados.

Figura 28: Gráfico comparativo entre a temperatura do ar (°C) observada e simulada para situação de inverno e verão e gráfico comparativo entre a umidade relativa do ar (%) observada e simulada para situação de inverno e verão

Figura 29: Gráfico comparativo entre a velocidade do ar (m/s) observada e simulada para situação de inverno e verão e gráfico comparativo entre a temperatura radiante média (°C) observada e simulada para situação de inverno e verão

Através da Figura 28, observa-se que os valores de T_a observados e simulados seguem a mesma tendência nos diversos horários de estudo, porém no modelo simulado os valores são em média 0,9°C e 2°C mais baixos, para situação de verão e inverno, respectivamente. Apenas no período noturno (21h e 00h), em situação de verão, o valor simulado é mais alto que o observado, em média 0,3°C. Esses resultados se assemelham aos observados por Yang, Wong e Li (2016) em seus comparativos entre os dados medidos em campo e simulados no modelo ENVI-met.

Em relação aos valores da UR (Figura 28), observa-se que as medidas observadas e simuladas seguem a mesma tendência no período diurno; no modelo simulado a umidade relativa do ar foi em média 6,2% e 6,9% mais alta nesse período (6h às 15h) no verão e no inverno, respectivamente. Já no período noturno (21h e 00h) a UR simulada foi em média 14,0% mais baixa no verão e 8,1% mais baixa no inverno. Da mesma forma, Rosseti (2013) e Dobbert (2015b), observaram que a estimativa da UR não é tão expressiva quando da T_a , apesar de terem verificado a correlação positiva entre a UR observada e simulada.

Percebe-se pela Figura 29, que a velocidade do ar medida no local e simulada, nas duas estações, não seguem a mesma tendência, tendo sido a V simulada em média 0,2 m/s e 0,4 m/s mais alta no inverno e verão, respectivamente. Por outro lado, na mesma figura (Figura 29) observa-se que a temperatura radiante média observada e simulada segue a mesma tendência nas duas estações. Porém, observa-se valores subestimados de Trm pelo modelo, especialmente às 9h e 12h no período de verão, diferença média de 11 °C, e no período

noturno, no inverno, uma diferença média de 7,9 °C. Yang, Wong e Li (2016) também observaram em sua pesquisa valores noturnos de Trm subestimados pelo modelo.

Esses resultados mostram que, como observaram outros pesquisadores (ROSSETI, 2013; MINELLA, 2014; DOBBERT, 2015b; YANG; WONG; LI, 2016), não é possível obter um cenário simulado idêntico ao cenário real, e a variável Ta é a mais fácil de ser usada como referência para ajuste dos dados medidos e preditos.

A análise de correspondência das medidas observadas no local e medidas simuladas no programa ENVI-met tem como objetivo constatar a representatividade do modelo em reproduzir o comportamento microclimático do ambiente urbano real. Para tanto, foram aplicados testes estatísticos para a verificação da correspondência.

A Figura 30 apresenta os gráficos de Bland-Altman para visualizar a relação das discordâncias das medidas avaliadas. Observa-se nos gráficos que apenas a variável Trm apresentou um ponto fora do limite inferior de concordância, com um intervalo de confiança de 95%. Já as demais variáveis não apresentaram nenhum ponto fora dos limites apontando que não há indícios de que as medidas diferem.

Figura 30: Gráfico de Bland-Altman para a diferença de média das variáveis simuladas e observadas

A Tabela 17 mostra o resultado da aplicação dos testes de índice de concordância de Willmott, RMSE e regressão linear. Observa-se na tabela que as medidas simuladas e observadas das variáveis temperatura do ar e temperatura radiante média, apresentaram índices de concordância de Willmott próximos de 1, assim como a umidade relativa do ar, o que indica que as medidas são concordantes.

Tabela 17: Resultado dos testes de concordância e do modelo de regressão entre as variáveis simuladas e observadas

Variável	d (Willmott)	RSME	β_1	IC (β_1 , 95%)
Temperatura do ar	0,976	1,722	1,010	0,840 1,179
Umidade relativa do ar	0,863	8,346	0,678	0,314 1,042
Velocidade do ar	0,171	0,491	-0,801	-2,014 0,413
Temperatura radiante média	0,961	5,903	0,937	0,700 1,174

O intervalo de confiança (IC) do coeficiente angular (β_1), obtido por meio do ajuste de um modelo de regressão entre os dados observados e simulados, mostra que não há diferença entre as medidas simuladas e observadas das variáveis Ta e Trm, uma vez que 1 está dentro do intervalo de confiança construído em torno desse coeficiente, a um nível de 95% de confiança.

Por outro lado, a velocidade do ar, apresentou um baixo valor de d , bem como do RMSE que apontou para uma baixa concordância entre os valores simulados e observados. Tal constatação é confirmada pelo intervalo de confiança do coeficiente angular (β_1), uma vez que o valor 1 não está contido no intervalo referente à V, indicando que há diferença entre as medidas.

Acredita-se que a discrepância entre os dados observados e preditos de V está relacionada ao método de monitoramento da variável, uma vez que ela apresenta alterações grandes de medida a cada minuto monitorado. Assim, destaca-se a importância de uma investigação do melhor método para o monitoramento dessa variável para fins de concordância de valores medidos e preditos por programas computacionais.

De forma geral, os resultados comparativos e das aplicações dos testes estatísticos reforçam a validade da ferramenta ENVI-met como um modelo de predição microclimática para áreas urbanas e, mais exatamente, para a presente pesquisa. Porém, deve-se haver preocupação com a modelagem dos cenários, configuração dos dados de entrada e posterior verificação da correspondência dos dados.

5.2 SIMULAÇÕES DOS CENÁRIOS DE CÂNIOS URBANOS

A influência da geometria do cânion urbano e da arborização urbana no conforto térmico dos pedestres foi expressa através do índice PET. A Tabela 20 e a Tabela 21 apresentam um resumo do comportamento do nível de estresse térmico através dos valores médios do índice PET obtidos em cada cenário, para situação de verão e inverno, respectivamente. Os resultados do índice PET são apresentados em uma escala de cores para facilitar a identificação do nível de estresse térmico. A

Tabela 18 mostra a escala utilizada e a Tabela 19 mostra uma legenda esquemática dos códigos utilizados para os cenários.

A Tabela 22 à Tabela 29 mostram os resultados de temperatura do ar (T_a), umidade relativa do ar (UR), velocidade do ar (V) e temperatura radiante média (T_{rm}) simulados e extraídos do software ENVI-met e o índice de conforto térmico PET calculado no programa RayMan. Os resultados estão separados por cânion de origem (C1, C2, C3 e C4) e por situação de verão e inverno. Cada tabela apresenta os resultados obtidos para as 9h, 12h, 15h, 21h e 00h, para cada cenário conforme a variação na relação H/W e cobertura verde (CV). Os resultados referentes às 6h foram descartados por não terem sido representativos para o período diurno ou noturno.

Na sequência, a Tabela 30 à Tabela 33 mostram os diagramas polares de obstrução do céu para o pedestre elaborado no modelo SkyHelios, para cada cenário de estudo para situação de verão e de inverno. Os diagramas polares foram modelados para ilustrar a obstrução do céu proporcionada por diferentes relações H/W e CV em cada cenário e auxiliaram a análise dos dados na identificação dos horários de estudo com incidência direta de radiação solar no pedestre.

Tabela 18: Legenda de cores e nível de estresse térmico na escala PET

PET °C	Sensação Térmica	Nível de Estresse Térmico
>43	muito calor	estresse forte ao calor
>31	calor	estresse moderado ao calor
>26	pouco calor	estresse leve ao calor
18-26	neutra	sem estresse térmico
<18	pouco frio	estresse leve ao frio
<12	frio	estresse moderado ao frio
<4	Muito frio	estresse forte ao frio

Fonte: Monteiro (2008), com modificações da autora.

Tabela 19: Legenda esquemática dos códigos utilizados nos cenários

Geometria	A		
Arborização	d	e	f
Corte esquemático			
Geometria	B		
Arborização	d	e	f
Corte esquemático			
Geometria	C		
Arborização	d	e	f
Corte esquemático			

Tabela 20: Índice PET médio nos cenários em situação de verão

CENÁRIO	A-d	A-e	A-f	B-d	B-e	B-f	C-d	C-e	C-f
C1 (LO)	33,0	33,6	29,6	30,8	30,7	28,5	29,6	29,0	27,4
C2 (NS)	34,3	32,8	31,0	32,5	32,5	30,4	30,8	31,0	29,5
C3 (LO)	32,8	29,2	29,5	29,1	27,7	27,6	27,9	26,3	26,2
C4 (NS)	34,4	32,9	31,4	32,7	30,4	30,2	28,7	28,7	28,4

Tabela 21: Índice PET médio nos cenários em situação de inverno

CENÁRIO	A-d	A-e	A-f	B-d	B-e	B-f	C-d	C-e	C-f
C1 (LO)	19,1	17,3	16,9	16,4	15,2	16,5	13,0	11,9	13,0
C2 (NS)	18,6	16,4	15,3	19,3	17,0	14,8	16,2	16,4	14,0
C3 (LO)	18,1	19,2	15,3	10,5	12,4	12,0	9,9	11,4	11,5
C4 (NS)	18,9	17,7	15,7	17,3	14,9	14,8	16,6	13,9	13,9

Tabela 22: Resultados das simulações no cânion urbano 1, situação de verão

VERÃO		C1 (LO)								
CENÁRIO		A-d	A-e	A-f	B-d	B-e	B-f	C-d	C-e	C-f
H/W		0,17	0,17	0,17	0,60	0,60	0,60	1,03	1,03	1,03
CV		0,00	0,20	0,65	0,00	0,20	0,65	0,00	0,20	0,65
HOR.	VAR.									
9h	Ta (°C)	26,2	26,7	26,2	26,6	26,7	26,3	26,5	26,4	26,2
	UR (%)	76,3	76,1	79,7	78,1	78,6	82,5	79,1	79,9	83,3
	V (m/s)	1,2	1,1	0,8	1,3	1,3	0,8	1,4	1,4	0,9
	Trm (°C)	58,9	59,2	34,4	58,4	58,2	32,8	57,5	56,9	31,8
	PET	39,0	40,0	28,2	38,8	38,8	27,6	37,9	37,5	26,8
12h	Ta (°C)	30,3	30,5	29,6	30,6	30,6	30,0	30,1	29,9	29,6
	UR (%)	60,5	60,2	64,5	61,5	62,2	66,2	63,3	64,6	67,8
	V (m/s)	1,2	1,1	0,8	1,3	1,3	0,9	1,5	1,5	0,9
	Trm (°C)	51,8	52,2	45,6	51,1	50,8	43,8	50,3	49,3	42,6
	PET	39	39,6	36,3	38,7	38,6	35,5	37,5	36,8	34,6
15h	Ta (°C)	32,8	33,0	31,9	32,6	32,5	32,1	31,7	31,4	31,3
	UR (%)	46,2	45,7	49,4	47,1	47,9	50,0	49,8	51,1	52,7
	V (m/s)	1,2	1,0	0,7	1,3	1,3	0,8	1,5	1,5	0,9
	Trm (°C)	68,5	68,9	51,2	46,9	46,3	45,3	45,2	43,2	43,2
	PET	49,9	50,9	41,1	38,4	38,1	38	36,5	35,3	36,2
18h	Ta (°C)	30,5	30,6	29,9	30,1	29,8	29,4	28,6	28,3	28,1
	UR (%)	47,0	47,0	49,7	47,9	49,0	50,9	52,2	53,6	55,2
	V (m/s)	1,2	1,1	0,8	1,4	1,3	0,8	1,6	1,5	0,9
	Trm (°C)	32,4	32,0	31,8	31,8	31,0	30,5	30,3	28,6	29,1
	PET	30	30	29,8	29,1	28,6	28,8	26,8	25,9	26,9
21h	Ta (°C)	26,4	26,5	26,2	26,2	26,1	25,8	25,9	25,6	25,4
	UR (%)	56,2	55,7	57,2	56,7	57,4	58,7	57,9	58,9	60,2
	V (m/s)	1,3	1,1	0,8	1,5	1,4	0,9	1,6	1,6	1,0
	Trm (°C)	19,0	19,8	20,8	19,4	19,7	20,4	19,1	18,9	20,0
	PET	20,7	21,2	21,9	20,5	20,6	21,2	20,1	19,8	20,6
00h	Ta (°C)	25,1	25,3	25,1	25,0	24,9	24,7	24,8	24,6	24,5
	UR (%)	58,1	57,6	58,7	58,6	59,2	60,3	59,4	60,3	61,3
	V (m/s)	1,4	1,2	0,8	1,5	1,4	0,9	1,7	1,6	1,0
	Trm (°C)	17,3	18,2	19,4	17,8	18,2	19,0	17,6	17,6	18,8
	PET	19,1	19,7	20,4	19,1	19,2	19,9	18,7	18,6	19,5

Tabela 23: Resultados das simulações no cânion urbano 1, situação de inverno

INVERNO		C1 (LO)								
CENÁRIO		A-d	A-e	A-f	B-d	B-e	B-f	C-d	C-e	C-f
H/W		0,17	0,17	0,17	0,60	0,60	0,60	1,03	1,03	1,03
CV		0,00	0,20	0,65	0,00	0,20	0,65	0,00	0,20	0,65
HOR.	VAR.									
9h	Ta (°C)	13,8	13,7	13,7	13,3	13,3	13,5	13,2	13,2	13,3
	UR (%)	79,9	81,1	82,2	84,4	84,7	84,6	84,4	84,9	85,1
	V (m/s)	1,2	1,1	0,8	1,3	1,3	0,8	1,4	1,4	0,9
	Trm (°C)	47,0	34,1	14,7	13,7	13,7	14,8	13,9	13,5	14,3
	PET	21,7	16,4	10,6	8,9	8,9	10,5	8,7	8,6	9,9
12h	Ta (°C)	19,7	19,1	19,2	19,6	19,1	19,6	18,4	18,4	18,8
	UR (%)	67,4	70,9	72,1	71,8	75,0	74,7	78,7	78,9	79,3
	V (m/s)	1,2	1,1	0,8	1,3	1,3	0,8	1,4	1,4	0,9
	Trm (°C)	61,0	60,8	61,7	60,6	60,0	60,2	26,4	25,8	26,2
	PET	33,9	33,8	36,3	33,1	32,4	35,8	16,7	16,5	18,5
15h	Ta (°C)	20,6	19,9	19,8	20,2	19,5	19,9	18,7	18,7	19,0
	UR (%)	60,9	64,5	66,2	64,6	68,0	68,3	72,0	72,4	72,8
	V (m/s)	1,2	1,0	0,8	1,3	1,3	0,8	1,5	1,5	0,9
	Trm (°C)	61,1	47,8	41,9	60,5	46,7	40,4	59,0	45,0	38,5
	PET	34,6	28,5	26,6	33,5	26,4	26	30,6	24,2	23,9
18h	Ta (°C)	16,0	15,7	15,5	15,4	15,2	15,2	15,0	14,9	14,9
	UR (%)	68,4	70,1	71,0	71,3	72,8	73,1	73,6	74,0	74,6
	V (m/s)	1,2	1,1	0,8	1,4	1,3	0,8	1,5	1,5	0,9
	Trm (°C)	7,5	8,2	9,9	7,9	8,4	9,8	7,9	8,3	9,7
	PET	9,4	9,5	10,3	8,8	8,9	10,1	8,4	8,4	9,6
21h	Ta (°C)	14,6	14,5	14,3	14,1	14,0	14,0	13,8	13,8	13,7
	UR (%)	68,7	70,4	71,2	71,8	73,0	73,4	73,5	74,0	74,6
	V (m/s)	1,2	1,0	0,7	1,3	1,3	0,8	1,5	1,5	0,8
	Trm (°C)	5,4	6,3	8,2	5,9	6,6	8,1	6,1	6,6	8,0
	PET	7,7	8,1	9,1	7,4	7,5	8,6	7	7,1	8,4
00h	Ta (°C)	14,0	13,8	13,7	13,4	13,3	13,3	13,2	13,1	13,1
	UR (%)	68,3	70,2	71,4	72,4	73,6	74,1	74,3	74,9	75,4
	V (m/s)	1,2	1,0	0,7	1,3	1,2	0,7	1,4	1,4	0,8
	Trm (°C)	4,5	5,5	7,5	5,1	5,7	7,3	5,3	5,8	7,3
	PET	7	7,4	8,4	6,6	6,8	8,1	6,4	6,4	7,7

Tabela 24: Resultados das simulações no cânion urbano 2, situação de verão

VERÃO		C2 (NS)								
CENÁRIO		A-d	A-e	A-f	B-d	B-e	B-f	C-d	C-e	C-f
H/W		0,17	0,17	0,17	0,60	0,60	0,60	1,03	1,03	1,03
CV		0,00	0,18	0,65	0,00	0,18	0,65	0,00	0,18	0,65
HOR.	VAR.									
9h	Ta (°C)	25,6	25,7	25,9	25,9	26,0	26,1	26,1	26,2	26,2
	UR (%)	80,8	81,3	81,7	83,2	83,6	83,9	85,7	85,8	86,1
	V (m/s)	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3
	Trm (°C)	33,5	32,9	31,4	32,8	32,2	32,3	30,2	30,1	30,3
	PET	28	27,7	27,9	28,6	28,4	28,5	27,9	28	28,1
12h	Ta (°C)	29,3	29,3	29,2	29,3	29,4	29,8	29,2	29,2	29,4
	UR (%)	65,7	66,5	68,1	67,3	67,6	67,7	69,5	69,9	70,4
	V (m/s)	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3
	Trm (°C)	52,7	52,7	45,5	51,3	51,3	44,0	41,6	41,4	41,3
	PET	40,4	40,4	37,3	40,5	40,6	36,9	35,2	35,5	35,6
15h	Ta (°C)	32,6	32,5	32,3	32,5	32,5	32,7	32,1	32,1	32,0
	UR (%)	47,3	48,2	49,3	49,1	49,2	49,7	51,6	51,9	52,7
	V (m/s)	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3
	Trm (°C)	69,8	69,8	55,0	69,5	69,4	53,6	67,9	67,4	51,3
	PET	52,5	52,5	44,4	53,3	53,2	43,9	51,9	52,3	42,6
18h	Ta (°C)	31,0	30,6	30,3	29,6	29,4	29,2	28,2	28,1	28,0
	UR (%)	45,8	47,6	48,9	50,4	51,3	52,4	55,5	56,2	57,2
	V (m/s)	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3
	Trm (°C)	53,7	38,3	34,6	32,2	31,7	31,4	30,7	30,1	29,8
	PET	42	33,7	32,1	30,5	30,1	29,8	28,8	28,5	28,6
21h	Ta (°C)	26,7	26,5	26,2	26,3	26,1	26,0	25,4	25,3	25,1
	UR (%)	55,5	56,8	57,5	57,6	58,3	59,0	61,7	62,1	62,8
	V (m/s)	0,6	0,6	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3
	Trm (°C)	19,7	20,0	21,1	19,3	19,6	20,4	18,5	18,7	19,5
	PET	22,2	22,2	22,9	22	22,2	22,5	21,3	21,6	21,8
00h	Ta (°C)	25,3	25,2	25,0	24,9	24,8	24,7	24,1	24,0	23,9
	UR (%)	57,7	58,7	59,3	60,0	60,6	61,1	63,7	64,1	64,6
	V (m/s)	0,6	0,6	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3
	Trm (°C)	17,8	18,2	19,5	17,5	17,8	18,7	16,8	17,1	18,1
	PET	20,4	20,4	21,4	20,2	20,5	20,8	19,7	20	20,4

Tabela 25: Resultados das simulações no cânion urbano 2, situação de inverno

INVERNO		C2 (NS)								
CENÁRIO		A-d	A-e	A-f	B-d	B-e	B-f	C-d	C-e	C-f
H/W		0,17	0,17	0,17	0,60	0,60	0,60	1,03	1,03	1,03
CV		0,00	0,18	0,65	0,00	0,18	0,65	0,00	0,18	0,65
HOR.	VAR.									
9h	Ta (°C)	13,4	13,4	13,6	12,9	13,0	13,1	12,6	12,6	12,6
	UR (%)	82,3	82,3	82,2	85,7	85,6	85,6	88,3	88,4	88,5
	V (m/s)	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3
	Trm (°C)	13,7	13,8	16,1	13,0	13,1	14,3	12,6	12,5	13,4
	PET	10,6	10,7	12,5	10,9	11,0	11,5	11,1	11,0	11,4
12h	Ta (°C)	18,5	18,6	18,6	18,6	18,8	18,9	18,6	18,7	18,8
	UR (%)	73,8	74,4	76,1	74,4	74,9	76,6	76,1	76,6	78,2
	V (m/s)	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3
	Trm (°C)	59,5	59,8	31,6	58,5	58,6	29,4	57,8	57,8	28,1
	PET	36,1	36,4	23,0	37,5	37,7	22,2	37,1	38,4	22,1
15h	Ta (°C)	19,8	19,5	19,5	19,7	19,7	19,8	18,8	18,8	18,9
	UR (%)	66,0	67,7	68,8	67,6	69,2	70,1	72,0	72,7	73,7
	V (m/s)	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3
	Trm (°C)	61,6	35,4	36,7	61,3	34,7	34,9	26,4	25,8	25,9
	PET	38,2	24,3	26,0	39,8	25,2	25,4	21,2	21,0	21,1
18h	Ta (°C)	15,8	15,6	15,4	15,5	15,4	15,4	15,1	15,1	15,0
	UR (%)	70,2	71,2	72,1	71,9	72,8	73,6	74,8	75,2	75,8
	V (m/s)	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3
	Trm (°C)	7,8	8,3	10,1	8,2	8,7	9,9	8,3	8,6	9,8
	PET	10,3	10,3	11,3	10,7	10,8	11,3	10,8	11,0	11,4
21h	Ta (°C)	14,6	14,5	14,3	14,1	14,0	14,0	13,6	13,6	13,5
	UR (%)	69,4	70,5	71,5	72,3	73,2	74,1	75,6	76,0	76,6
	V (m/s)	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3
	Trm (°C)	5,4	6,1	8,1	5,8	6,3	7,7	5,8	6,3	7,6
	PET	8,6	8,7	9,8	8,9	9,0	9,5	8,9	9,1	9,5
00h	Ta (°C)	13,9	13,8	13,7	13,3	13,2	13,2	12,7	12,7	12,6
	UR (%)	68,4	69,8	71,1	72,8	73,9	74,8	77,1	77,4	78,0
	V (m/s)	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3
	Trm (°C)	4,3	5,2	7,3	4,7	5,3	6,8	4,7	5,2	6,6
	PET	7,7	7,9	9,1	7,9	8,1	9,0	7,9	8,1	8,6

Tabela 26: Resultados das simulações no cânion urbano 3, situação de verão

VERÃO		C3 (LO)								
CENÁRIO		A-d	A-e	A-f	B-d	B-e	B-f	C-d	C-e	C-f
H/W		0,37	0,37	0,37	1,31	1,31	1,31	2,25	2,25	2,25
CV		0,00	0,45	0,96	0,00	0,45	0,96	0,00	0,45	0,96
HOR.	VAR.									
9h	Ta (°C)	26,2	25,8	25,9	26,4	26,0	26,1	26,3	26,0	26,1
	UR (%)	77,7	80,2	80,8	80,5	83,0	83,9	82,3	84,8	85,3
	V (m/s)	1,3	0,8	0,6	1,4	0,8	0,7	1,6	0,9	0,9
	Trm (°C)	59,0	33,5	33,8	57,1	30,8	30,7	56,1	29,3	29,3
	PET	38,7	27,5	28,3	36,7	26,4	26,8	36,4	25,6	25,7
12h	Ta (°C)	29,6	29,0	28,8	29,7	29,3	29,4	29,3	29,0	29,0
	UR (%)	64,0	66,8	68,1	65,8	68,3	69,7	68,1	70,4	71,6
	V (m/s)	1,3	0,8	0,7	1,4	0,8	0,8	1,7	0,9	0,9
	Trm (°C)	51,0	43,9	43,7	49,0	41,6	41,1	48,0	40,1	39,6
	PET	37,7	35	35	36,7	34,1	34	35,3	32,9	32,7
15h	Ta (°C)	32,1	31,4	31,1	31,5	31,4	31,3	30,8	30,7	30,6
	UR (%)	49,1	51,4	52,8	51,9	52,9	54,2	54,8	55,6	56,7
	V (m/s)	1,3	0,8	0,6	1,4	0,7	0,7	1,6	0,9	0,8
	Trm (°C)	68,2	53,1	52,6	45,5	45,4	44,2	42,5	42,4	41,4
	PET	48,2	41,5	41,6	36,6	37,7	37,1	34,3	35,3	34,9
18h	Ta (°C)	30,2	29,9	29,6	28,5	28,4	28,2	27,3	27,2	27,0
	UR (%)	48,4	49,8	50,9	54,0	54,9	55,9	58,6	59,5	60,4
	V (m/s)	1,4	0,8	0,6	1,4	0,7	0,7	1,7	0,9	0,9
	Trm (°C)	32,2	32,3	31,8	29,5	29,6	29,1	28,0	27,9	27,5
	PET	32,5	30	29,9	26,6	27,8	27,4	24,4	25,6	25,3
21h	Ta (°C)	26,3	26,1	26,0	25,6	25,5	25,3	25,0	24,8	24,7
	UR (%)	56,9	57,7	58,3	60,0	60,6	61,5	62,7	63,4	64,1
	V (m/s)	1,4	0,9	0,7	1,5	0,8	0,8	1,7	1,0	0,9
	Trm (°C)	18,8	19,8	20,3	18,5	19,3	19,5	17,8	18,7	18,9
	PET	20,5	21,2	21,7	19,8	20,7	20,7	18,9	19,7	19,9
00h	Ta (°C)	25,1	25,0	24,8	24,5	24,4	24,2	24,0	23,9	23,8
	UR (%)	58,6	59,2	59,7	61,4	62,0	62,8	63,6	64,2	64,8
	V (m/s)	1,4	0,9	0,7	1,5	0,8	0,8	1,7	1,0	1,0
	Trm (°C)	17,1	18,3	18,9	17,0	17,9	18,2	16,6	17,4	17,7
	PET	19	19,9	20,2	18,4	19,4	19,4	17,8	18,6	18,7

Tabela 27: Resultados das simulações no cânion urbano 3, situação de inverno

INVERNO		C3 (LO)								
CENÁRIO		A-d	A-e	A-f	B-d	B-e	B-f	C-d	C-e	C-f
H/W		0,37	0,37	0,37	1,31	1,31	1,31	2,25	2,25	2,25
CV		0,00	0,45	0,96	0,00	0,45	0,96	0,00	0,45	0,96
HOR.	VAR.									
9h	Ta (°C)	13,4	13,5	13,5	13,0	13,0	13,0	12,8	12,8	12,8
	UR (%)	81,5	81,4	81,9	84,8	85,0	85,4	85,8	86,1	86,5
	V (m/s)	1,3	0,8	0,7	1,4	0,8	0,8	1,6	0,9	0,9
	Trm (°C)	46,4	48,0	33,9	12,8	13,8	13,7	12,9	13,4	13,2
	PET	20,6	24,5	18,3	8,2	9,8	9,8	7,8	9,2	9,2
12h	Ta (°C)	18,8	19,1	18,5	18,1	18,3	18,5	18,0	18,1	18,2
	UR (%)	71,6	71,1	74,5	78,0	78,2	79,2	78,9	79,3	80,2
	V (m/s)	1,3	0,8	0,7	1,4	0,8	0,7	1,6	0,9	0,9
	Trm (°C)	59,9	45,6	33,8	25,8	26,8	26,4	24,8	25,2	24,7
	PET	32	27,8	22,3	16,2	18,6	19,1	15,4	17,5	17,3
15h	Ta (°C)	19,6	19,5	19,1	18,7	19,0	19,0	18,4	18,5	18,5
	UR (%)	65,6	65,3	68,9	72,7	72,9	73,5	74,3	74,7	75,3
	V (m/s)	1,3	0,8	0,6	1,4	0,7	0,7	1,6	0,9	0,9
	Trm (°C)	60,6	60,5	32,9	25,9	26,7	26,0	24,1	24,2	23,6
	PET	33,1	35,8	22,8	16,8	19,5	16,6	15,5	17,4	17,1
18h	Ta (°C)	15,6	15,7	15,4	15,0	15,0	14,9	14,8	14,8	14,8
	UR (%)	70,9	70,7	71,9	74,7	75,0	75,4	75,4	75,6	76,1
	V (m/s)	1,3	0,8	0,6	1,4	0,7	0,7	1,6	0,9	0,8
	Trm (°C)	7,1	9,0	9,6	7,9	9,2	9,6	8,1	9,2	9,5
	PET	8,9	10,2	10,6	8,5	10	10	8,2	9,4	9,7
21h	Ta (°C)	14,4	14,4	14,2	13,7	13,7	13,6	13,6	13,5	13,5
	UR (%)	71,2	71,2	71,9	74,8	75,2	75,7	75,9	76,3	76,7
	V (m/s)	1,3	0,8	0,6	1,4	0,7	0,7	1,6	0,8	0,8
	Trm (°C)	5,1	7,1	7,9	5,9	7,3	7,7	6,1	7,3	7,6
	PET	7,4	8,6	9,1	6,9	8,4	8,4	6,7	8	8,1
00h	Ta (°C)	13,7	13,7	13,6	13,0	13,0	12,9	12,8	12,7	12,7
	UR (%)	71,5	71,5	72,3	75,6	76,0	76,6	77,0	77,4	77,9
	V (m/s)	1,2	0,7	0,6	1,3	0,6	0,6	1,5	0,8	0,8
	Trm (°C)	4,2	6,2	7,1	5,0	6,4	6,8	5,2	6,4	6,8
	PET	6,7	8	8,4	6,2	7,8	7,9	5,9	7,1	7,3

Tabela 28: Resultados das simulações no cânion urbano 4, situação de verão

VERÃO		C4 (NS)								
CENÁRIO		A-d	A-e	A-f	B-d	B-e	B-f	C-d	C-e	C-f
H/W		0,30	0,30	0,30	1,05	1,05	1,05	1,80	1,80	1,80
CV		0,00	0,31	0,69	0,00	0,31	0,69	0,00	0,31	0,69
HOR.	VAR.									
9h	Ta (°C)	25,7	25,8	25,9	26,0	26,0	26,2	26,3	26,3	26,4
	UR (%)	81,8	82,9	82,9	84,8	85,3	85,9	87,1	87,8	88,5
	V (m/s)	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
	Trm (°C)	33,0	32,9	32,8	30,8	31,2	30,7	29,6	29,8	29,4
	PET	28,6	29,6	29,6	28,6	28,9	28,7	27,8	27,9	27,8
12h	Ta (°C)	29,3	29,0	29,1	29,3	29,5	29,6	29,2	29,3	29,3
	UR (%)	67,4	69,6	70,5	70,0	70,5	71,6	72,6	73,1	74,4
	V (m/s)	0,5	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	Trm (°C)	52,1	44,9	44,0	50,2	43,1	41,8	40,5	40,6	39,5
	PET	40,5	37,3	37,3	41	37	36,4	35,5	35,6	35
15h	Ta (°C)	32,5	32,1	31,9	32,3	32,2	32,1	31,6	31,5	31,4
	UR (%)	49,2	51,0	52,1	51,4	52,3	53,4	54,9	56,0	57,1
	V (m/s)	0,5	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	Trm (°C)	69,3	53,8	53,2	68,9	53,1	51,6	44,7	44,3	43,0
	PET	52,6	44	44	53,6	43,4	43,2	39	38,7	37,9
18h	Ta (°C)	30,7	30,3	29,7	28,8	28,6	28,4	27,5	27,3	27,2
	UR (%)	48,0	49,7	51,5	53,8	55,2	56,3	59,2	60,7	61,8
	V (m/s)	0,5	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	Trm (°C)	52,9	53,0	37,3	31,2	30,8	30,0	29,9	29,4	28,7
	PET	41,7	42,4	33,8	30,1	29,8	29,3	28,7	28,4	28
21h	Ta (°C)	26,3	26,1	25,7	25,6	25,4	25,3	24,7	24,5	24,4
	UR (%)	57,9	58,8	60,0	60,9	61,9	62,8	65,2	66,3	67,2
	V (m/s)	0,5	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	Trm (°C)	19,1	20,1	20,3	18,7	19,4	19,6	17,9	18,6	18,8
	PET	22,7	22,7	22,6	22,1	22,3	22,4	21,3	21,5	21,5
00h	Ta (°C)	25,0	24,8	24,6	24,3	24,2	24,0	23,5	23,3	23,2
	UR (%)	59,8	60,5	61,4	63,0	63,7	64,5	67,0	67,9	68,7
	V (m/s)	0,5	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	Trm (°C)	17,2	18,4	18,8	17,0	17,8	18,1	16,3	17,1	17,4
	PET	20,1	21,1	21,1	20,5	20,9	20,9	19,8	20	20,1

Tabela 29: Resultados das simulações no cânion urbano 4, situação de inverno

INVERNO		C4 (NS)								
CENÁRIO		A-d	A-e	A-f	B-d	B-e	B-f	C-d	C-e	C-f
H/W		0,30	0,30	0,30	1,05	1,05	1,05	1,80	1,80	1,80
CV		0,00	0,31	0,69	0,00	0,31	0,69	0,00	0,31	0,69
HOR.	VAR.									
9h	Ta (°C)	13,3	13,4	13,5	12,9	13,0	13,0	12,5	12,5	12,5
	UR (%)	82,8	83,1	83,0	86,6	86,5	86,9	89,6	89,7	90,3
	V (m/s)	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
	Trm (°C)	13,5	14,4	15,1	12,5	13,4	13,4	12,3	12,9	12,8
	PET	11,3	12,3	13,3	11,8	12,3	12,3	10,9	11,1	11,1
12h	Ta (°C)	18,6	18,5	18,6	18,7	18,8	19,1	18,7	18,7	18,9
	UR (%)	75,1	76,9	77,8	77,1	78,3	79,7	79,0	80,0	81,4
	V (m/s)	0,5	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	Trm (°C)	59,1	30,3	30,0	58,0	28,5	27,9	57,2	27,3	26,9
	PET	36,9	23,0	23,8	39,8	23,1	23,0	39,3	22,4	22,4
15h	Ta (°C)	19,7	19,7	19,3	19,4	19,5	19,6	18,6	18,6	18,6
	UR (%)	67,9	68,6	71,0	72,2	73,1	74,3	75,8	76,4	77,4
	V (m/s)	0,5	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	Trm (°C)	61,2	61,0	32,1	27,6	27,7	26,8	25,5	25,4	24,7
	PET	38,8	40,8	25,2	22,9	23,1	22,7	21,4	21,4	21,1
18h	Ta (°C)	15,5	15,4	15,2	15,1	15,0	14,9	14,7	14,7	14,6
	UR (%)	72,3	72,8	73,9	75,6	76,3	77,1	78,2	78,7	79,5
	V (m/s)	0,5	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	Trm (°C)	7,3	9,1	9,5	8,1	9,3	9,6	8,2	9,3	9,6
	PET	10,1	11,3	11,9	11,2	11,7	11,7	11,0	11,5	11,6
21h	Ta (°C)	14,3	14,2	14,0	13,7	13,6	13,5	13,2	13,1	13,0
	UR (%)	72,2	72,5	73,4	75,9	76,7	77,6	78,9	79,6	80,5
	V (m/s)	0,5	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
	Trm (°C)	5,1	7,0	7,6	5,8	7,1	7,5	5,8	6,9	7,3
	PET	8,5	9,7	10,3	9,4	9,9	10,0	9,1	9,0	9,1
00h	Ta (°C)	13,6	13,5	13,4	12,9	12,8	12,7	12,2	12,2	12,1
	UR (%)	71,9	72,6	73,7	76,7	77,5	78,4	80,4	81,0	81,9
	V (m/s)	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
	Trm (°C)	4,1	6,0	6,8	4,7	6,1	6,5	4,7	5,9	6,3
	PET	7,9	9,3	9,6	8,4	9,0	9,1	7,6	8,0	8,1

Tabela 30: Diagramas polares de obstrução da visão do céu – cenários com origem em C1 (LO)

Tabela 31: Diagramas polares de obstrução da visão do céu – cenários com origem em C2 (NS)

Tabela 32: Diagramas polares de obstrução da visão do céu – cenários com origem em C3 (LO)

Tabela 33: Diagramas polares de obstrução da visão do céu – cenários com origem em C4 (NS)

Os resultados obtidos mostram que a geometria do cânion e a presença de arborização nos cenários de cânions urbanos exercem influência significativa nas variáveis microclimáticas e consequentemente no nível de estresse térmico do pedestre. Essa influência está associada principalmente às alterações na temperatura radiante média e velocidade do ar. Essas mesmas variáveis, T_{rm} e V , resultaram em diferentes valores do PET nos cânions com orientação L-O (C1 e C3) e N-S (C3 e C4), uma vez que a radiação solar e o vento os alcançam de maneiras distintas.

As diferenças mais significativas do PET foram observadas no período diurno, especialmente às 12h e 15h, afetadas essencialmente pela T_{rm} , tanto em função de H/W quanto de CV . No período noturno, observou-se menor influência de H/W no PET, porém nota-se influência de CV no PET, uma vez que as variações nesse período foram, possivelmente, associadas a velocidade do ar.

Para situação de verão, a Tabela 20 mostra que as maiores médias do PET foram observadas nos cenários de cânions com menor relação H/W e com ausência de arborização. Em C2(NS)A-d e C4(NS)A-d foram obtidos os maiores valores de PET médios, 34,3 °C e 34,4 °C, respectivamente. Nesses cânions urbanos, com orientação N-S, o PET médio obtido no cenário com maior H/W e CV foi 5,9 °C menor do que no cenário com menor H/W e ausência de CV . Já nos cenários com orientação L-O, essa diferença foi de 6,75 °C.

A diferença de pouco mais de 1 °C na escala PET em média nos cenários A-d orientados no sentido N-S e L-O ocorreu mais em função da velocidade do ar do que por influência da temperatura radiante média. Como a direção do vento dominante é leste (90° em relação ao norte), nos cânions com orientação L-O (74° em relação ao norte) a velocidade do ar foi em média 0,6 m/s maior do que nos cânions com orientação N-S (-16° em relação ao norte). Essa variação resultou em valores menores do PET em C1 e C3. Os maiores valores do PET foram observados às 15h, sendo os maiores valores 52,6 °C (estresse forte ao calor) e 52,5 °C (estresse forte ao calor), obtidos nesse horário nos cânions C4(NS)A-d e C2(NS)A-d.

Ainda para situação de verão, os menores valores médios do PET foram obtidos nos cânions mais profundos e com maior CV . O menor PET médio registrado foi em C3(LO)C-f, no valor de 26,2°C (estresse leve ao calor), 8,2 °C na escala PET mais baixo que no cenário com maior valor PET médio. Os menores valores do PET foram observados no período noturno, sendo o menor valor, 17,8 °C (estresse leve ao frio), registrado às 00h em C3(LO)C-d. Às 15h, quando foram

observados os maiores valores do PET, o menor valor PET (34,3 °C), com nível de estresse térmico moderado ao calor, também foi observado nesse cenário.

Ressalta-se que, nesse último caso, os menores valores foram observados em cânions mais profundos sem arborização. Nesses cenários, com relação H/W de 2,25 e orientação L-O, a redução da Trm em função do aumento da cobertura verde foi menos significativa; houve redução de 1,2 °C às 15h, enquanto que nesse mesmo horário e cânion urbano, em relação ao cenário com menor relação H/W, a redução da Trm foi de 25,6 °C. Porém, observa-se uma redução na velocidade do ar com o aumento da arborização, o que resultou em um PET com valor mais baixo (0,6 °C) no cenário sem arborização. A mesma situação não ocorreu em cânions profundos com orientação N-S no período diurno, quando, de forma geral, a redução da Trm proporcionada pela arborização foi mais importante para a redução do PET.

Para situação de inverno, conforme a Tabela 21 o menor valor médio do PET também foi obtido em C3(LO)C-d (9,9 °C, estresse moderado ao frio), uma vez que esse é o cenário de cânion mais profundo e onde foram registrados os maiores valores de velocidade do ar. Os menores valores do PET foram observados às 00h, em C3(LO)C-d o PET foi de 7,6 °C. Já os maiores valores foram observados nos cenários de cânions mais rasos e sem arborização, 19,1 °C em C1(LO)A-d, e com arborização intermediária, 19,2 °C em C3 (LO)A-e; para as duas situações não houve estresse térmico.

Os valores do PET mais altos, no inverno, foram observados às 12h e 15h, sendo o maior valor, 40,8 °C (estresse moderado ao calor) observado em C4(NS)A-e às 15h. Nesse horário, a presença da arborização em um lado da via interferiu pouco na Trm, mas resultou na redução da velocidade do ar, fator que contribuiu para o valor do PET nesse cenário ser 2 °C mais alto na escala PET no cenário com arborização intermediária do que no cenário sem arborização. Nesse mesmo horário, o menor valor do PET, 15,5 °C (estresse leve ao frio), foi observado em C3(LO)C-d, o cenário de cânion urbano mais profundo, (relação H/W de 2,25), e onde foi registrado o maior valor de velocidade do ar (1,6m/s), ocasionado pela falta de barreira proporcionada pela vegetação arbórea e, possivelmente, pelo efeito corredor de vento.

Quanto ao comportamento noturno (9h e 00h) da Trm em relação a geometria do cânion urbano, nota-se que apenas para situação de inverno e em cenários sem arborização houve um pequeno aumento da Trm em função do aumento de H/W. A maior variação foi um aumento de 1°C que ocorreu em C3(LO), às 21 e às 00h, de A-d para C-d. Nota-se, também, que o aumento de CV no interior do cânion, diminuiu ou eliminou essa variação da Trm em

função do aumento de H/W . Apesar do pequeno aumento da T_{rm} nos cenários de cânions mais profundos, possivelmente resultante da menor dissipação de radiação de ondas longas nesses cenários, não pôde ser comprovado que houve aquecimento noturno; tampouco essa variação foi importante para o incremento do PET. Já em situação de verão, a T_{rm} foi menor nos cânions mais profundos, mesmo quando comparados os cenários sem arborização.

A Figura 31 mostra a porcentagem de ocorrência dos níveis de estresse térmico em cada cenário de cânion urbano, considerando situação de verão e inverno juntas. Observa-se que nos cenários com orientação L-O existem maiores ocorrências de estresse ao frio, enquanto que nos cenários com orientação N-S foram verificadas maiores ocorrências de estresse forte ao calor. De uma forma geral, as maiores ocorrências de ausência de estresse térmico são observadas nos cânions mais profundos, principalmente nos cânions com orientação L-O: em C1(LO) com H/W de 1,03 (33%) e em C3(LO) H/W de 1,31 (33%) e de 2,25 (33%). Nos cânions com orientação N-S observa-se que a maior ocorrência de neutralidade térmica foi em cenários com maior CV.

Legenda:

< 4	estresse forte ao frio	18-26	sem estresse térmico	> 26	estresse leve ao calor
< 12	estresse moderado ao frio			> 31	estresse moderado ao calor
< 18	estresse leve ao frio			> 43	estresse forte ao calor

Figura 31: Gráficos de ocorrência (%) dos níveis de estresse térmico em cada cenário de cânion urbano, considerando situação de verão e inverno

A Figura 32 mostra o afastamento do PET em relação a 22 °C na escala PET (valor médio de sensação de neutralidade térmica), considerando todos os cenários e horários de estudo, para situação de inverno e verão. A faixa verde no gráfico delimita o intervalo de sensação de neutralidade térmica (18 a 26 °C). O gráfico possibilita uma visão geral das tendências de distanciamento da neutralidade térmica para situação de inverno e verão.

Figura 32: Gráfico de variação do PET nos cenários em relação a 22°C

Nota-se pelo gráfico, que em situação de verão houve um afastamento maior dos valores do PET de 22 °C na escala PET do que em situação de inverno. Para situação de verão esse distanciamento foi em média de 12,5 °C e para situação de inverno, em média -11,2 °C. Essa diferença aumenta se forem considerados os horários de maior movimento de pedestres (9h, 12h, 15h e 18h), uma diferença de 13,2 °C para situação de verão e -3,2 °C para situação de inverno. Como foi mostrado anteriormente nas tabelas com os resultados, para situação de inverno também foi verificado estresse térmico ao calor e neutralidade térmica durante o dia. Assim, tem-se que a situação de verão, notadamente o período diurno, representou maiores tendências de estresse térmico aos pedestres nos diversos cenários de cânions urbanos.

A seguir serão discutidos o comportamento do índice PET em cada cenário, a partir do cânion urbano de origem (C1, C2, C3 e C4), separados por situação de inverno e verão. A Figura 33, Figura 34, Figura 35 e Figura 36 mostram a variação do PET por horários de estudo nos cenários, em situação de verão e inverno, com origem em C1(LO), C2(NS), C3(LO) e C4(NS), respectivamente.

Figura 33: Variação do PET por horários nos cenários com origem em C1(LO) – situação de verão e inverno, respectivamente.

Figura 34: Variação do PET por horários nos cenários com origem em C2(NS) – situação de verão e inverno, respectivamente

Figura 35: Variação do PET por horários nos cenários com origem em C3(LO) – situação de verão e inverno, respectivamente.

Figura 36: Variação do PET por horários nos cenários com origem em C4(NS) – situação de verão e inverno, respectivamente

A Figura 33 mostra os valores do PET por horários de estudo nos cenários com origem em C1(LO). Para situação de verão, observa-se que de uma forma geral, no período da manhã (9h às 15h) os cenários com maior CV (0,65) apresentaram valores do PET menores do que nos demais. No período noturno (21h e 00h) ocorreu uma inversão que também pode ser observada para situação de inverno (Figura 33), ou seja, nos cenários com maior CV foram observados maiores valores do PET. Esse fato é decorrente da redução da velocidade do ar proporcionada pelas árvores e também de maiores valores de T_{rm} , resultantes do menor FVC, como pode ser observado na Tabela 30.

Esses resultados confirmam as análises feitas por Coutts et al. (2015), que apontam que a cobertura proporcionada por espécies arbóreas pode diminuir as perdas de radiação de ondas longas no interior de cânions urbanos. Apesar desses resultados, a diferença do PET noturno considerando variações de H/W e CV é pouco significativa; nesse período a sensação do pedestre foi de neutralidade térmica em todos os cenários.

No período diurno são observadas maiores variações do PET em função de H/W e CV . Às 9h existe diferença significativa do PET nos cenários; naqueles com maior CV (0,65), o nível de estresse térmico do pedestre foi de estresse leve ao calor e nos demais, com menor CV , foi de estresse moderado ao calor. O resultado se deve aos menores valores de T_{rm} nesses cenários, pois, conforme pode ser visualizado nos diagramas polares (Tabela 30), a arborização presente na calçada protegeu o pedestre da incidência de radiação solar direta. Outra variação representativa ocorreu às 15h, nos cenários com menor relação H/W , sem arborização e com arborização no canteiro central ($CV=0,20$). Nesses cenários, o nível de estresse térmico do pedestre foi o mais alto, estresse forte ao calor, diferente dos outros cenários onde o estresse térmico foi moderado ao calor.

Para situação de inverno, os cenários de cânions urbanos mais rasos (A-d e A-e) registraram maiores valores de PET às 9h, resultando em sensação de neutralidade térmica ao pedestre, enquanto nos cânions mais profundos, o nível de estresse térmico foi de estresse forte ao frio. Às 12h existe diferença significativa do índice PET entre os cenários com maior relação H/W (1,03) e os demais, uma diferença média de 16°C na escala PET. No período noturno, a partir das 18h para situação de inverno, existe pouca variação do índice PET nos cenários e os resultados foram semelhantes à situação de verão.

A Figura 35 mostra os valores do PET por horários de estudo nos cenários com origem em C3(LO), em situação de verão e inverno, respectivamente. Para situação de verão, observa-se que o comportamento do PET nos cenários com origem em C3(LO) se assemelha ao dos cenários com origem em C1, principalmente no período noturno, com algumas diferenças relacionadas às maiores relações H/W em C3, mais evidenciadas no período diurno.

Nota-se na Figura 35 que no verão os maiores valores do PET no período diurno foram registrados no cenário A-d, com menor relação H/W (0,37) e sem cobertura verde. A maior diferença ocorreu às 15h, quando o nível de estresse térmico do pedestre foi de estresse forte ao calor, enquanto que no cenário C-f ($H/W=2,25$ e $CV=0,96$) foi de estresse moderado. Às 9h, nota-se uma diferença representativa de PET entre os cenários sem vegetação, com nível de

estresse térmico moderado ao calor, e os demais cenários, com nível de estresse leve e ausência de estresse térmico, nos cenários mais profundos e com arborização (C-e e C-f).

Ainda para situação de verão, em C3(LO) nota-se comportamento semelhante do PET nos cenários de cânions mais profundos (C-d, C-e, C-f), principalmente a partir das 15h. Nesses cenários, o sombreamento proporcionado pela presença de arborização foi mascarado pelo efeito de sombreamento dos edifícios, situação semelhante também pode ser observada em C1(LO).

Já em situação de inverno (Figura 35), assim como nos cenários com origem em C1, os maiores valores do PET diurnos ocorreram nos cenários mais rasos (A-d, A-e e A-f). Como pode ser observado nos diagramas polares (Tabela 32), houve incidência direta da radiação solar no pedestre esse horário nesses cenários, mesmo com a presença de arborização devido à baixa altura solar. Os valores do PET mais baixos foram observados nos cânions mais profundos e sem arborização (B-d e C-d). Nesses cânions mais profundos, com relação H/W de 1,31 e 2,25, não houve incidência de radiação solar direta (Tabela 32), resultando em T_{rm} muito próximas nesses cenários. Neles, a diferença do PET está associada, principalmente, a maior ou menor velocidade do ar, reduzida pela presença das copas das árvores. No período noturno, essa situação também pode ser observada, menores valores do PET nos cenários sem arborização.

A Figura 34 mostra a variação do PET por horários de estudo nos cenários com origem em C2(NS) em situação de verão e inverno, respectivamente. Nota-se que, assim como nos cenários com origem em C1(LO) e C3(LO), para situação de verão, nos cenários com maior CV (0,65) foram registrados os menores valores do PET. A variação mais representativa ocorreu no período diurno, às 15h, quando no cenário de cânion mais profundo (H/W=1,03) e arborização no canteiro central e calçadas (C-f) o PET foi 9,9°C menor que no cenário de cânion mais raso e sem arborização (A-d) e no cenário com arborização apenas no canteiro (A-e), variando o nível de estresse térmico do pedestre de moderado ao calor para estresse forte ao calor.

Esses resultados indicam que a arborização presente apenas no canteiro central nos cenários com vias mais largas (menor H/W) não foi suficiente para minimizar o nível de estresse térmico do pedestre no horário mais crítico (15h), uma vez que nesse horário os valores de PET dos cenários com arborização apenas no canteiro central (CV=0,65) foram semelhantes aos dos cenários sem arborização (CV=0). A arborização presente no canteiro central foi eficiente na redução do PET às 18h, pois proporciona sombreamento ao pedestre no cânion mais raso não

sombreado pelos edifícios (A-e) (Tabela 31). Nesse horário, a diferença do PET entre A-d e A-e foi de 8,3°C e houve redução da Trm de aproximadamente 4°C, porém em ambos o nível de estresse térmico do pedestre foi de estresse moderado ao calor.

No período noturno (21h e 00h), não houve variação significativa do PET nos diferentes cenários; assim como nos cenários com origem em C1(LO) e C3(LO), os maiores valores do PET foram registrados nos cenários com maior arborização, devido à atenuação da velocidade do ar pelas árvores e maiores valores de Trm. Nesse período, não foi possível constatar maiores valores do PET em função do menor FVC nos cânions mais profundos, ao contrário, como nesses cânions foram registrados menores valores de Ta e Trm, o PET teve pequena variação para menos, próxima de 1°C, nos cenários com maior relação H/W.

Para situação de inverno, conforme mostra a Figura 34, no período noturno a variação do PET foi pequena nos diferentes cenários e teve comportamento semelhante à situação de verão. No período diurno, assim como em situação de verão, os menores valores do PET foram registrados em cenários com maior CV e os maiores valores em cenários com menor CV; a maior variação foi observada às 15h. Nesse horário, o nível de estresse térmico do pedestre foi de estresse moderado ao calor em A-d e B-d e de neutralidade térmica nos demais cenários. Como no inverno a altura solar é menor, a presença de arborização apenas no canteiro central possibilitou menores níveis de estresse térmico nos cenários com essa configuração de CV (CV=0,18) às 15h.

A Figura 36 mostra a variação do PET nos cenários com origem em C4(NS) para situação de verão e inverno, respectivamente. Para situação de verão observa-se que a tendência de variação do PET em C4(NS) é semelhante aos cenários com origem em C2(NS); nesses cenários de C4(NS) os valores menores do PET estão associados a maiores relações H/W e maiores CV do que em C2(NS).

As diferenças mais significativas do PET foram registradas às 15h, quando nos cenários com maior relação H/W (1,80) o nível de estresse térmico do pedestre foi de moderado ao calor e nos cenários com menor relação H/W (0,30) foi de estresse forte ao calor. Através da figura, nota-se também que no cenário A-e, às 18h, o valor do PET é o maior de todos os cenários nesse horário (42,4°C), esse valor está associado a ausência de sombreamento ao pedestre por edifícios ou pela arborização presente de um lado da calçada (Tabela 33), que por sua vez, atenuou a velocidade do ar necessária à obtenção de menores valores de PET. No período noturno, houve pouca variação do PET, próxima de 1°C na escala PET, e a sensação do

pedestre foi de neutralidade térmica. Variação semelhante ocorreu no período noturno para situação de inverno (Figura 36), quando o nível de estresse térmico do pedestre foi de moderado para o frio em todos os cenários a partir das 18h.

Para situação de inverno, a Figura 36 mostra o comportamento do PET em relação a H/W e CV semelhantes aos cenários com origem em C2(NS). No período diurno foram observadas as maiores variações do PET entre os cenários, entre as quais os cenários com maior CV e menor H/W registraram menores valores do índice e os cenários sem arborização os maiores valores. A diferença mais representativa pôde ser observada às 12h, quando o nível de estresse térmico do pedestre foi de estresse leve ao calor nos cenários sem arborização onde houve incidência direta de radiação solar esse horário (Tabela 31); e ausência de estresse térmico em cenários com maior CV (0,69).

Ainda, é possível observar através da visualização e análise dos gráficos em conjunto que, de uma forma geral, nos cenários com maior CV a amplitude do PET foi menor durante as horas estudadas, enquanto que nos cenários sem cobertura arbórea se registrou a maior amplitude do PET em todos os cenários. Além disso, cabe destacar a maior variação do PET em função de H/W e CV no período diurno do que no período noturno, quando o índice sofreu pequenas variações.

A Figura 37 à Figura 44 correspondem a gráficos elaborados para melhor ilustrar os efeitos da relação H/W e de CV nos cenários de cânions urbanos nos períodos diurno e noturno. Elas mostram a variação do PET em cada cenário em função do H/W e CV. Os valores do PET foram separados em PET médio diurno, correspondente à média do índice observado das 9h às 15h; PET médio noturno, correspondente a média do índice às 21h e 0h; e PET médio, referente à média do PET observado em todos os horários de estudo. Os dados correspondentes às 18h não foram considerados no cálculo das médias diurna e noturna por não representar com nitidez nenhum dos períodos.

Através da visualização dos gráficos, se confirma a variação pouco representativa do PET no período noturno nos diferentes cenários; a pequena atenuação do seu valor está associada à ausência de arborização ou menores valores de CV e consequentemente de maiores valores de velocidade do ar. Por outro lado, existem variações significativas do PET no período diurno associadas às alterações de H/W e CV.

A Figura 37 e Figura 38 mostram essas relações para C1(LO) em situação de verão e inverno, respectivamente. Nelas, observa-se que no período diurno o PET tende a diminuir à medida que aumenta a relação H/W e, para situação de verão, a atenuação do PET também é claramente percebida com o aumento de CV. As duas situações estão associadas ao aumento do sombreamento do pedestre, hora proporcionada pelos edifícios, hora pelas copas das árvores e consequente redução da T_{rm} . As linhas de tendência adicionadas ao gráfico indicam essa atenuação.

Da mesma forma, em C3(LO) (Figura 41 e Figura 42), nota-se a atenuação do PET em função de H/W no período diurno, tanto no inverno quanto no verão. Também no período diurno, para situação de verão, o aumento de CV resultou em menores valores do PET, porém para situação de inverno, nos cenários de cânions mais profundos ocorreu situação contrária. Isso foi observado porque o sombreamento nos cânions mais profundos, como em B-f e C-f é proporcionado principalmente pelos edifícios, nesses casos, a atenuação da velocidade do ar pelas barreiras arbóreas resultou em maiores valores do PET. Cabe destacar que essa situação é desejável no período de inverno, uma vez que nos cenários com maior relação H/W o nível de estresse térmico é menor nos cenários com presença de arborização.

Já em C2(NS) (Figura 40), onde os cenários possuem menor relação H/W que em C3(LO), e também em função da orientação, a presença de arborização não foi tão importante para aumentar o PET médio diurno no inverno. Nesses cenários, o aumento de CV está relacionado a valores mais baixos de PET tanto no inverno quanto no verão (Figura 39) devido ao sombreamento proporcionado essencialmente pelas árvores e menos pelos edifícios. Para situação de verão, em C2(NS), nota-se que a influência de CV na atenuação do PET médio diurno é maior do que de H/W . Esse resultado é causado pela forma diferente como a radiação solar e o vento atingem cânions com diferentes orientações.

De maneira semelhante, para situação de verão, em C4 (NS) (Figura 43) nota-se que a presença de CV foi significativa na redução do PET médio diurno, principalmente nos cânions menos profundos (A-f e B-f), quando a arborização é mais eficaz para a atenuação da T_{rm} . Nesses cenários a redução do PET também está associada ao aumento da relação H/W . Para situação de inverno (Figura 44), assim como em C2 (NS), menores médias de PET diurno estão relacionadas ao aumento de CV, além de também estarem relacionados ao aumento de H/W .

Figura 37: Variação do PET diurno e noturno em função de H/W e CV nos cenários com origem em C1(LO) – situação de verão

Figura 38: Variação do PET diurno e noturno em função de H/W e CV nos cenários com origem em C1(LO) – situação de inverno

Figura 39: Variação do PET diurno e noturno em função de H/W e CV nos cenários com origem em C2(NS) – situação de verão

Figura 40: Variação do PET diurno e noturno em função de H/W e CV nos cenários com origem em C2(NS) – situação de inverno

Figura 41: Variação do PET diurno e noturno em função de H/W e CV nos cenários com origem em C3(LO) – situação de verão

Figura 42: Variação do PET diurno e noturno em função de H/W e CV nos cenários com origem em C3(LO) – situação de inverno

Figura 43: Variação do PET diurno e noturno em função de H/W e CV nos cenários com origem em C4(NS) – situação de verão

Figura 44: Variação do PET diurno e noturno em função de H/W e CV nos cenários com origem em C4(NS) – situação de inverno

5.3 ANÁLISE DE CORRELAÇÕES ENTRE VARIÁVEIS

As correlações permitem a verificação da medida da relação entre duas variáveis. Elas foram feitas a fim de constatar as variáveis que exercem maior influência nos níveis de estresse térmico do pedestre. Foram analisadas as correlações individuais entre as variáveis microclimáticas e a relação H/W e a cobertura verde (CV) e, também, entre o PET e os mesmos parâmetros de desenho urbano (H/W e CV).

A Figura 45 mostra o gráfico de dispersão entre H/W e Trm e entre H/W e V. O primeiro gráfico mostra a relação entre H/W e Trm, nele nota-se que apesar da grande dispersão, o Trm tende a diminuir à medida que H/W aumenta. O coeficiente de correlação obtido entre H/W e Trm foi de -0,171, o que indica uma pequena correlação negativa entre as variáveis que se mostrou significativa (valor $p < 0,001$). É importante considerar que essa correlação considerou dados diurnos e noturnos e situação de verão e inverno.

Os outros dois gráficos, mostrados na Figura 45, mostram a dispersão entre V e H/W, separados por orientação do cânion de origem: L-O, para os cenários com origem em C1(LO) e C3(LO); e N-S, para os cenários com origem em C2(NS) e C4(NS). Neles, observa-se que nos cenários com orientação L-O, não há uma relação evidente entre os valores de H/W e V. Possivelmente, esse resultado se deve ao uso de dados de V com interação de H/W com CV em alguns cenários, uma vez que nessa análise são relacionadas apenas duas variáveis e não há controle sobre as demais. Por outro lado, essa relação pode ser observada nos resultados das tabelas 21 e 22, 25 e 26, onde nota-se que quanto maior H/W maior a velocidade do vento, e que menores valores de V estão associados a presença de arborização.

Ao contrário do gráfico de dispersão L-O, nos cenários com orientação N-S, quanto maior o valor de H/W, menor tende a ser V. Os coeficientes de correlação de *Pearson* obtidos para os dados referentes à orientação L-O e N-S, foram de 0,110 e -0,639, respectivamente; a correlação foi significativa para a orientação N-S (valores p de 0,106 e $< 0,001$, respectivamente).

Figura 45: Gráficos de dispersão entre H/W e Trm(°C), entre H/W e V(m/s) nos cenários com origem em C1(LO) e C3 (LO) e entre H/W e V(m/s) nos cenários com origem em C2(NS) e C4(NS)

A Figura 46 mostra o gráfico de dispersão entre CV e Trm e entre CV e V. No gráfico de dispersão entre CV e Trm, nota-se que apesar da grande dispersão, a Trm tende a diminuir à medida que se aumenta CV. O coeficiente de correlação obtido foi de -0,121, apontando para uma pequena correlação negativa entre as variáveis, que se mostrou significativa (valor p de 0,012). A pequena correlação pode estar associada à interação com os valores noturnos, tendo em vista que a influência da arborização na redução da Trm é essencialmente durante o período diurno.

O gráfico de dispersão entre CV e V mostra que a velocidade do ar tende a diminuir com o aumento de CV. Apoiando os indícios visuais, o coeficiente de correlação entre CV e V, de -0,283, foi significativa ($p < 0,001$).

Figura 46: Gráficos de dispersão entre CV e Trm (°C) e entre CV e V(m/s)

A Figura 47 mostra o gráfico de dispersão entre H/W e PET. Como o índice de conforto térmico PET apresentou um comportamento distinto nos horários de estudo, conforme semelhança no seu comportamento, os horários foram agrupados em período diurno (12 e 15 horas),

intermediário (9 e 18 horas) e noturno (0 e 21 horas). O gráfico de dispersão também está separado por situação de inverno e verão.

Observa-se pelos gráficos as diferenças na distribuição do PET tanto em relação ao período quanto à situação de inverno ou verão; os valores de PET tendem a ser menores no período noturno e no inverno. Porém, para todos os períodos e estações, nota-se que os valores de PET decrescem à medida que aumentam os valores de H/W. Tal observação é confirmada pelo coeficiente de correlação de -0,144, indicando uma correlação significativa entre as variáveis (valor de $p=0,003$).

Os gráficos de dispersão entre CV e PET estão apresentados na Figura 48. Da mesma forma como em H/W e PET, os gráficos estão separados por períodos e situação de inverno e verão. Assim como na relação entre H/W e PET, observa-se que conforme CV aumenta, o PET tende a diminuir. A correlação entre as variáveis foi significativa (valor de $p=0,022$), igual a -0,11.

As correlações analisadas indicam que o aumento da relação H/W e de CV nos cânions urbanos de estudo estão relacionados a menores valores de T_{rm} e variações significativas na velocidade do ar. Conforme aumentam os valores de CV, diminuem os valores de V, por outro lado, maiores ou menores valores de V em função de H/W estão associados à orientação da via. Consequentemente, como esses parâmetros da forma urbana influenciam nas variáveis microclimáticas associadas ao PET, eles também exercem influência significativa no nível de estresse térmico no interior dos cânions urbanos no nível do pedestre, como foi constatado pelas correlações. Dessa forma, se mostra válida e importante a identificação de como esses parâmetros associados interferem no PET.

Figura 47: Gráficos de dispersão entre H/W e PET, por período e situação de inverno e verão

Figura 48: Gráficos de dispersão entre CV e PET, por período e situação de inverno e verão

5.4 MODELOS DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

Modelos de regressão linear múltipla foram utilizadas para verificar de maneira significativa as relações entre as variáveis explicativas (H/W e CV) e o nível de estresse térmico no nível do pedestre, calculado pelo índice PET.

Como o PET apresentou um comportamento distinto em relação ao período para o qual foi simulado, os modelos foram propostos separadamente conforme padrão semelhante de comportamento. Assim, foram propostos modelos separados para os dados diurnos (12h e 15h) e noturnos (21h e 0h). Como o período diurno apresentou resultados mais críticos em relação ao PET, o modelo também foi ajustado separadamente para o período diurno nos cânions com orientação L-O (C1 e C3) e nos cânions com orientação N-S (C2 e C3).

Do ponto de vista estatístico o comportamento do PET para os horários das 9h e 18h não foi explicado adequadamente pela metodologia proposta, portanto os dados obtidos nesses horários não foram considerados na construção do modelo.

Técnicas de superfície de resposta foram utilizadas para verificar a influência de H/W e CV no PET; os resultados foram expressos através de gráficos de contorno. É importante ressaltar que a superfície de resposta foi construída com base nos resultados do modelo de regressão, que modela a média do PET, considerando dados para situação de verão e para situação de inverno. Assim, os valores do PET são médios para as estações e horários analisados.

5.4.1 Período diurno

A Tabela 34 apresenta os resultados da análise de covariância do modelo de regressão linear ajustado para os dados diurnos (12h e 15h). Observa-se pelo resultado do teste F que há evidências amostrais suficientes de que os efeitos principais das variáveis horário, estação, cânion, H/W e CV são significativos para a explicação da variação do PET, assim como os efeitos da interação de Cânion com CV e de H/W com CV. Para as variáveis qualitativas (horário, estação e cânion), conclui-se pelo teste F que há indícios de diferenças significativas entre seus respectivos níveis, com relação ao PET.

Tabela 34: Análise de covariância do modelo de regressão – dados diurnos

Variável	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Horário	1	180,9	180,9	7,19	0,008
Estação	1	6575	6575	261,30	< 0,001
Cânion	3	1053	350,9	13,95	< 0,001
HW	1	1022	1022	40,64	< 0,001
CV	1	538,8	538,8	21,42	< 0,001
HW^2	1	67,8	67,8	2,69	0,103
CV^2	1	90,4	90,4	3,59	0,060
Cânion:HW	3	102,6	34,2	1,36	0,258
Cânion:CV	3	232,7	77,6	3,08	0,030
HW:CV	1	132,5	132,5	5,27	0,023
Cânion:HW:CV	3	0,8	0,3	0,01	0,999
Resíduos	124	3119,0	25,2		

GL: graus de liberdade; SQ: soma de quadrado; QM: quadrado médio.

Como houve diferenças significativas entre os níveis em relação ao PET, pode-se avaliar a magnitude da diferença das médias do PET entre seus níveis, utilizando um teste de comparações múltiplas, o teste de *Tukey* apresentado na Tabela 35. Nota-se na tabela que, em média, o PET é 2,24 unidades maior no horário das 15 horas em relação às 12 horas, sendo tal diferença significativa (valor p de 0,008). Também se observa uma diferença significativa do PET entre as estações consideradas; o PET no verão é, em média, 13,51 unidades maior do que no inverno (valor p < 0,001). Não há evidências amostrais de diferenças significativas no PET médio entre os cânions, o que pode ser devido à presença de interação com a CV.

Tabela 35: Resultados do teste de *Tukey* para comparação entre as médias de PET dos níveis das variáveis horário, estação e cânion, para os dados diurnos.

Variável	Categoria	Diferença	EP	Valor T	Valor p
Horário	15h - 12h	2,24	0,84	2,68	0,008
Estação	Verão - Inverno	13,51	0,84	16,17	< 0,001
Cânion	C2 - C1	1,65	3,35	0,49	0,961
	C3 - C1	-0,59	3,82	-0,15	0,999
	C4 - C1	2,95	3,60	0,82	0,845
	C3 - C2	-2,24	3,80	-0,59	0,935
	C4 - C2	1,30	3,58	0,36	0,983
	C4 - C3	3,54	3,71	0,95	0,775

EP: erro padrão.

Considerando todos os termos do modelo de regressão ajustado, foi construída a superfície de resposta do PET conforme a variação conjunta de CV e H/W. A Figura 49 mostra o gráfico de contorno que expressa a superfície de resposta para a variável PET, de acordo com H/W e CV, para os dados diurnos. Observa-se na figura que maiores valores de H/W e CV tendem a diminuir o PET, e que os menores valores do índice de conforto térmico são observados para o H/W em torno de 1,7 e CV em torno de 0,95. Em cânions mais rasos e com menor CV pequenos incrementos de um dos fatores resultam na redução de 1°C na escala PET. Observa-se, por exemplo, que para essa redução, em cânions com H/W de 0,5, é necessário o aumento da cobertura verde de 0,2 para 0,3 (aumento de 0,1 de CV), já em cânions com H/W de 1,5, é necessário que esse aumento seja de 0,2 para 0,4 (um aumento de 0,2 de CV); porém a média do PET na segunda situação é mais baixa que na primeira.

Figura 49: Gráfico de superfície de resposta para a variável PET, de acordo com H/W e CV, para os dados diurnos

5.4.2 Período noturno

Considerando os dados noturnos (21 e 0h), a Tabela 36 mostra a análise de covariância do modelo de regressão ajustada para esses dados. Observa-se que há evidências amostrais suficientes de que os efeitos principais das variáveis horário, estação, cânion, H/W e CV são significativos para a explicação da variação do PET, assim como o termo de segundo grau do CV e os efeitos da interação de Cânion com H/W, Cânion com CV e de H/W com CV.

Tabela 36: Análise de covariância do modelo de regressão – dados noturnos

Variável	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Horário	1	46,35	46,35	394,80	< 0,001
Estação	1	5507	5507	46900,00	< 0,001
Cânion	3	65,67	21,89	186,40	< 0,001
HW	1	17,23	17,23	146,70	< 0,001
CV	1	23,63	23,63	201,20	< 0,001
HW^2	1	0,1	0,1	0,63	0,430
CV^2	1	1,0	1,0	8,46	0,004
Cânion:HW	3	1,2	0,4	3,50	0,018
Cânion:CV	3	1,6	0,5	4,61	0,004
HW:CV	1	0,7	0,7	5,58	0,020
Cânion:HW:CV	3	0,5	0,2	1,31	0,274
Resíduos	124	14,6	0,1		

GL: graus de liberdade; SQ: soma de quadrado; QM: quadrado médio.

Da mesma forma que para os dados diurnos, utilizou-se o teste de *Tukey* de comparações múltiplas para avaliar a magnitude da diferença das médias do PET entre os níveis das variáveis categóricas. Pela Tabela 37, que mostra os resultados do teste de *Tukey*, observa-se que há evidências amostrais de diferença significativa do PET médio entre os horários (valor $p < 0,001$); o PET é 1,14 unidades maior, em média, às 21h em relação às 0h. A diferença entre as estações também se mostrou significativa (valor $p < 0,001$), uma vez que o PET no verão é, em média, 12,37 unidades maior do que no inverno. Diferenças significativas do PET médio também foram observadas entre os cânions C2 e C1 (PET médio 0,90 unidades maiores no C2), C4 e C1 (PET médio 1,26 unidades maior no C4), C3 e C2 (PET médio 1,24 unidades menor no C3) e C4 e C3 (PET médio 1,60 unidades maior no C4), todas com valores $p < 0,001$.

Tabela 37: Resultados do teste de *Tukey* para comparação entre as médias de PET dos níveis das variáveis horário, estação e cânion, para os dados noturnos

Variável	Categoria	Diferença	EP	Valor T	Valor p
Horário	21h - 0h	1,14	0,06	19,87	< 0,001
Estação	Verão - Inverno	12,37	0,06	216,60	< 0,001
Cânion	C2 - C1	0,90	0,23	3,92	0,001
	C3 - C1	-0,34	0,26	-1,31	0,560
	C4 - C1	1,26	0,25	5,13	< 0,001
	C3 - C2	-1,24	0,26	-4,78	< 0,001
	C4 - C2	0,36	0,24	1,49	0,446
	C4 - C3	1,60	0,25	6,33	< 0,001

EP: erro padrão.

A Figura 50 mostra o gráfico de superfície de resposta do PET, de acordo com H/W e CV em conjunto, para os dados noturnos, considerando o modelo de regressão ajustado. No gráfico, nota-se que o PET tende a diminuir à medida que o H/W aumenta, porém tende a sofrer pequeno acréscimo com o aumento de CV. O aumento do PET em relação ao CV é mais expressivo para valores de CV de 0 a 0,6, aproximadamente. Os maiores valores do PET noturno são observados para H/W em torno de 0,2 e CV em torno de 0,95.

Figura 50: Gráfico de superfície de resposta para a variável PET, de acordo com H/W e CV, para os dados noturnos

5.4.3 Período diurno – cânions com orientação L-O

A Tabela 38 mostra a análise de covariância do modelo de regressão ajustado aos dados diurnos (12h e 15h), para os cânions com orientação L-O, ou seja, a partir dos dados dos cenários com origem em C1(LO) e C3(LO). Observa-se pelo resultado do teste F que há evidências amostrais suficientes de que os efeitos principais das variáveis estação, cânion e H/W são significativos para a explicação da variação do PET, assim como o termo de segundo grau do H/W e o efeito da interação de H/W com CV.

Para as variáveis categóricas (estação e cânion), conclui-se pelo teste F que há indícios de diferenças significativas entre seus respectivos níveis em relação ao PET. Assim, pode-se avaliar a magnitude da diferença das médias do PET entre seus níveis, utilizando um teste de comparações múltiplas.

Tabela 38: Análise de covariância do modelo de regressão – dados diurnos para os cânions com orientação L-O

Variável	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Horário	1	50,5	50,5	2,94	0,092
Estação	1	3153,5	3153,5	183,38	< 0,001
Cânion	1	364,1	364,1	21,17	< 0,001
HW	1	748,7	748,7	43,54	< 0,001
CV	1	48,4	48,4	2,82	0,098
HW^2	1	187,0	187,0	10,87	0,002
CV^2	1	1,5	1,5	0,09	0,768
Cânion:HW	1	1,0	1,0	0,06	0,812
Cânion:CV	1	7,8	7,8	0,45	0,503
HW:CV	1	102,6	102,6	5,97	0,018
Cânion:HW:CV	1	0,1	0,1	0,01	0,932
Resíduos	60	1031,8	17,2		

GL: graus de liberdade; SQ: soma de quadrado; QM: quadrado médio.

A Tabela 39 mostra o teste de comparações múltiplas, o teste de *Tukey*, para comparação entre as médias do PET dos níveis das variáveis horário, estação e cânion, para os dados diurnos dos cânions com orientação L-O. Nota-se pela tabela que, em média, o PET é 13,24 unidades maior no verão em relação ao inverno, sendo tal diferença significativa (valor $p < 0,001$). Não há evidências amostrais de diferenças significativas no PET médio entre os cânions, o que pode ser resultado da presença de interação com outros fatores.

Tabela 39: Resultados do teste de *Tukey* para comparação entre as médias de PET dos níveis das variáveis horário, estação e cânion, para os dados diurnos em cânions com orientação L-O

Variável	Categoria	Diferença	EP	Valor T	Valor p
Estação	Verão - Inverno	13,24	0,98	13,54	< 0,001
Cânion	C3 – C1	0,51	3,26	0,16	0,876

EP: erro padrão.

A Figura 51 apresenta o gráfico de superfície de resposta do PET, de acordo com a variação conjunta de CV e H/W, considerando todos os termos do modelo de regressão ajustado. Observa-se no gráfico que valores altos de H/W tendem a diminuir o PET. Para valores mais baixos de H/W até próximo de 1,3, o PET é menor quando o CV é mais alto, porém para valores mais altos de H/W não há variação significativa do PET médio de acordo com o CV. Assim, os menores valores do índice de conforto térmico são observados para o H/W em torno de 2,0 com CV de 0,2 e 0,3.

Figura 51: Gráfico de superfície de resposta para a variável PET, de acordo com H/W e CV, para os dados diurnos dos cânions com orientação L-O

5.4.4 Período diurno – cânions com orientação N-S

A Tabela 40 apresenta os resultados da análise de covariância do modelo de regressão linear ajustado para os dados diurnos (12h e 15h) dos cânions com orientação N-S. Nela, observa-se pelo resultado do teste F que há evidências amostrais suficientes de que os efeitos principais das variáveis horário, estação, H/W e CV são significativos para a explicação da variação do PET. Para as variáveis categóricas (horário e estação), conclui-se pelo teste F que há indícios de diferenças significativas entre seus respectivos níveis em relação ao PET.

Tabela 40: Análise de covariância do modelo de regressão – dados diurnos para os cânions com orientação N-S

Variável	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Horário	1	142,0	142,0	4,25	0,044
Estação	1	3423,8	3423,8	102,42	< 0,001
Cânion	1	133,1	133,1	3,98	0,051
HW	1	293,2	293,2	8,77	0,004
CV	1	786,7	786,7	23,53	< 0,001
HW^2	1	5,0	5,0	0,15	0,701
CV^2	1	33,1	33,1	0,99	0,324
Cânion:HW	1	0,6	0,6	0,02	0,891
Cânion:CV	1	9,2	9,2	0,27	0,602
HW:CV	1	30,3	30,3	0,91	0,345
Cânion:HW:CV	1	0,1	0,1	0,00	0,951
Resíduos	60	2005,7	33,4		

GL: grau de liberdade; SQ: soma de quadrado; QM: quadrado médio.

A Tabela 41 mostra o teste de comparações múltiplas, *Tukey*, para comparação entre as médias do PET dos níveis das variáveis horário, estação e cânion, para os dados diurnos dos cânions com orientação N-S. Nota-se que, em média, o PET é 2,81 unidades maior no horário das 15 horas em relação às 12 horas, sendo tal diferença significativa (valor p de 0,044). Também se observa uma diferença significativa do PET entre as estações consideradas; o PET no verão é, em média, 13,79 unidades maior do que no inverno (valor p < 0,001).

Tabela 41: Resultados do teste de *Tukey* para comparação entre as médias de PET dos níveis das variáveis horário, estação e cânion, para os dados diurnos em cânions com orientação N-S

Variável	Categoria	Diferença	EP	Valor T	Valor p
Estação	Verão - Inverno	13,79	1,36	10,12	< 0,001
Horário	15h - 12h	2,81	1,36	2,06	0,044

EP: erro padrão.

A Figura 52 mostra o gráfico de contorno com a variação do PET de acordo com as variáveis H/W e CV conjuntamente, considerando o modelo de regressão ajustado. Nota-se que valores altos de H/W e CV tendem a diminuir o PET, e que os menores valores do índice de conforto térmico são observados para o H/W em torno de 1,75 e CV em torno de 0,7. Observa-se que em cânions com baixa cobertura verde, como em H/W de 0,7, o aumento de CV de 0,1 para 0,2 é suficiente para diminuir em média 2°C na escala PET, mas para obter a mesma redução, um cânion de mesma profundidade com CV de 0,4, precisa aumentar a cobertura verde para 0,65. Porém, na segunda situação os valores médios do PET são mais baixos.

Figura 52: Gráfico de superfície de resposta para a variável PET, de acordo com H/W e CV, para os dados diurnos dos cânions com orientação N-S

Através da comparação dos resultados diurnos nos cânions com orientação L-O e nos cânions com orientação N-S, observa-se que nos cânions N-S, principalmente em cenários com menor H/W, o PET é mais sensível ao aumento de CV que nos cânions L-O. Tomando como referência o exemplo anterior, para cânions N-S, H/W de 0,7 e CV de 0,1, em que o aumento para CV de 0,2 resulta no decréscimo em média de 2°C na escala PET, em cânions L-O, com a mesma

relação H/W e mesmo CV, o CV deve aumentar de 0,1 para 0,5 para obter a mesma redução do PET.

Por outro lado, em cânions L-O, o PET é mais afetado pela mudança de H/W do que em cânions N-S, essencialmente para valores mais baixos de H/W. Pode-se observar, por exemplo, em cânions L-O, com CV de 0,4, o aumento de H/W de 0,5 para 1,0 resulta na redução de aproximadamente 5°C em média na escala PET, já em cânions N-S, essa redução é de aproximadamente 3°C em média.

Por meio desses resultados e análises foi possível a proposição de recomendações relacionando a relação H/W e cobertura verde em cânions com origem L-O e com origem N-S, em favor de menores níveis de estresse térmico para o pedestre.

6 RECOMENDAÇÕES

Através dos resultados das simulações computacionais que relacionam os elementos da forma urbana, relação H/W e cobertura verde, com o nível de estresse térmico do pedestre, assim como das análises estatísticas realizadas na sequência, foi possível assinalar sugestões para o desenho urbano no tocante aos elementos dessa pesquisa. Assim, são apresentados nesse capítulo recomendações de cobertura verde relacionada à relação H/W de cânions urbanos para ruas e avenidas de Umuarama, PR.

As recomendações foram propostas para os cânions urbanos separados por orientação L-O e N-S, com rotação de 16 graus no sentido anti-horário em relação ao norte, orientações predominantes no traçado urbano do centro da cidade. É importante assinalar que as coberturas verdes recomendadas são baseadas nos resultados das simulações computacionais em que foram utilizadas espécies arbóreas de sibipirunas (*Caesalpinia pluviosa*) de 15 metros de altura e 12 metros de diâmetro de copa.

A proposição das recomendações foi feita a partir dos gráficos de superfície de resposta que relaciona valores de H/W e CV, visando a obtenção de valores médios do PET que representam menores níveis de estresse térmico ao pedestre. Para isso, foram empregadas as superfícies de resposta elaboradas a partir de dados das 12h e 15h, horários em que foram obtidos os valores mais altos do PET, que mais se distanciam da neutralidade térmica.

Para a proposição das recomendações preocupou-se em tornar sua aplicação no espaço urbano viável e prática, assim foram propostos intervalos da relação H/W e de CV compatíveis com o proposto pelo Plano Diretor Municipal e pelo Plano de Arborização Urbana. Dessa forma, os intervalos da relação H/W propostos levam em conta a variação do número de pavimentos, considerando cada pavimento com 3 metros de altura e ausência de recuo frontal dos edifícios. Para os intervalos de cobertura verde, além de ponderar a variação do PET médio em relação à H/W, se considerou as possibilidades de distribuição das espécies arbóreas nas ruas e avenidas e seu possível aumento ou redução através de pequenas intervenções.

Além disso, a elaboração das recomendações também se baseou em recomendações e apontamentos feitos por outras pesquisas e passíveis de aplicação nesse estudo de caso. Nesse sentido, mesmo que o nível de estresse térmico seja mais baixo em cenários com ausência de cobertura verde, as sugestões indicam um valor mais baixo de CV, porém não nulo. Como apresentado no capítulo de fundamentação teórica, além do impacto positivo no

microclima a presença de espécies arbóreas no espaço urbano proporciona outros benefícios, relacionados a melhoria da qualidade do ar e dispersão de poluentes; redução de erosões através da interceptação da água da chuva; bem-estar psicológico; enriquecimento da biodiversidade urbana, uma vez que abrigam uma infinidade de seres vivos; entre outros. A presença da vegetação arbórea, mesmo que mais baixa, também atua no controle da velocidade dos fluxos de ar.

Por outro lado, em alguns cenários os melhores valores do PET foram observados quando a CV foi próxima de 1, ou seja, de 100% de cobertura da via. Nesses casos, as recomendações são de aplicação de valores altos de CV, porém não máximo. Além de possibilitar o aquecimento solar passivo, quando necessário, um afastamento entre as espécies possibilita o resfriamento noturno e a diluição de poluentes veiculares com o ar acima da camada de dossel urbana.

Soma-se a esses apontamentos presentes em diferentes pesquisas, a indicação do lado da calçada a receber a vegetação arbórea, quando essa é restrita a apenas um lado: calçada sul em vias com orientação L-O, já que a calçada norte é sombreada pelos edifícios; e calçada leste em vias com orientação N-S, priorizando o sombreamento proporcionado pelas árvores no período da tarde na calçada leste ao mesmo tempo em que a calçada oeste é sombreada pelos edifícios, no período de maiores níveis de estresse térmico ao pedestre. Cabe ressaltar que essa composição, resultado de estudos apresentados na fundamentação teórica, já foi aplicada nos cenários de cânions urbanos, como apresentado no capítulo de materiais e métodos.

Além dessas recomendações quanto a cobertura verde, também foram propostos limites máximos de relação H/W para cânions urbanos com orientação L-O e cânions urbanos com orientação N-S. Da mesma forma, os limites propostos foram baseados nos resultados do PET em função da interação de H/W com CV.

A Tabela 42 mostra as recomendações de cobertura verde para os intervalos apresentados de relação H/W em cânions urbanos com orientação L-O. Os intervalos de H/W e CV estão identificados no gráfico de superfície de resposta do PET. Nesses cânions, quanto maior a relação H/W, menor a cobertura verde para a obtenção de menores níveis de estresse térmico para o pedestre.

Para cânions urbanos com orientação L-O, recomenda-se o limite máximo da relação H/W igual a 1,7. Uma relação H/W superior a essa não representa redução significativa do nível de estresse térmico do pedestre, principalmente, quando associada a CV sugerida para essa relação, entre 0,30 e 0,55. Por outro lado, maiores valores de H/W resultam na redução do acesso de luz natural ao interior do cânion e fachadas de edifícios.

Esse valor ($H/W=1,7$) representa uma restrição no gabarito de altura apenas para as ruas, já que nas avenidas, a maior relação H/W , para o número máximo de pavimentos, é igual a 1,03. Considerando que o edifício esteja construído no alinhamento predial, ou seja, sem recuos, e rua com 16 metros de largura, é possível construir até 9 pavimentos, adotando-se o máximo coeficiente de aproveitamento (CA) permitido, de 2,5. Porém, existe a possibilidade da construção do número máximo de pavimentos (12), conforme o novo PDM, com mesmo CA, através do acréscimo de recuos frontais de 3 metros, por exemplo.

Na sequência, a Tabela 43, Tabela 44, Tabela 45, Tabela 46 e Tabela 47 apresentam sugestões de aplicação de CV em avenidas e ruas com orientação L-O com descrição do posicionamento das espécies arbóreas e ilustração esquemática. A ilustração mostra a sugestão de CV com o maior valor H/W do intervalo proposto.

Tabela 42: Recomendações de cobertura verde para diferentes intervalos de relação H/W em cânions urbanos com orientação L-O e delimitação dos intervalos no gráfico de contorno

Relação H/W	Cobertura Verde
< 0,39	0,70 - 0,85
0,39 - 0,85	0,65 - 0,80
0,86 - 1,30	0,45 - 0,70
1,30-1,70	0,30 - 0,55

Tabela 43: Sugestão de cobertura verde para relação H/W inferior a 0,39 para avenidas com orientação L-O de aproximadamente 35 metros de largura

Avenidas com canteiro central (35m largura) - orientação L-O		
Relação H/W	Pavimentos	CV sugerido
< 0,39	Até 4	0,72
Descrição		
Espécies arbóreas presente nos dois lados da calçada e no canteiro central.		
<u>Calçada:</u> 1 espécie por lote; distanciamento de plantio de 14 metros.		
<u>Canteiro:</u> espécies arbóreas com distanciamento de plantio de aproximadamente 11 metros.		
Representação esquemática		

Vista superior

Perspectiva

Tabela 44: Sugestão de cobertura verde para relação H/W de 0,39 a 1,03 para avenidas com orientação L-O de aproximadamente 35 metros de largura

Avenidas com canteiro central (35m largura) - orientação L-O		
Relação H/W	Pavimentos	CV sugerido
0,39 – 1,03	5 a 12	0,65
Descrição		
Espécies arbóreas presente nos dois lados da calçada e no canteiro central.		
<u>Calçada:</u> 1 espécie por lote; distanciamento de plantio de 14 metros.		
<u>Canteiro:</u> espécies arbóreas alternadas em relação ao alinhamento da calçada; distanciamento de plantio de 14 metros.		
Representação esquemática		

Vista superior

Perspectiva

Tabela 45: Sugestão de cobertura verde para relação H/W inferior a 0,39 para ruas com orientação L-O de aproximadamente 16 metros de largura

Ruas (16m largura) - orientação L-O		
Relação H/W	Pavimentos	CV sugerido
< 0,39	Até 2	0,80
Descrição		
Espécies arbóreas presente em mesmo número nos dois lados da calçada.		
Calçada: aproximadamente 1 espécie por lote; distanciamento de plantio de aproximadamente 15 metros. Plantio das espécies do lado sul alternado em relação ao lado norte.		
Representação esquemática		

Vista superior

Perspectiva

Tabela 46: Sugestão de cobertura verde para relação H/W de 0,39 a 1,30 para ruas com orientação L-O de aproximadamente 16 metros de largura

Ruas (16m largura) - orientação L-O		
Relação H/W	Pavimentos	CV sugerido
0,39 – 1,30	3 a 6	0,65
Descrição		
Espécies arbóreas presente em maior número no lado sul da calçada.		
<u>Calçada sul:</u> aproximadamente 1 espécie por lote; distanciamento de plantio de aproximadamente 15 metros.		
<u>Calçada norte:</u> aproximadamente 0,5 espécie por lote; distanciamento de plantio de aproximadamente 30 metros.		
Representação esquemática		

Vista superior

Perspectiva

Tabela 47: Sugestão de cobertura verde para relação H/W de 1,30 a 1,70 para ruas com orientação L-O de aproximadamente 16 metros de largura

Ruas (16m largura) - orientação L-O		
Relação H/W	Pavimentos	CV sugerido
1,31-1,70	7 a 9	0,45
Descrição		
Espécies arbóreas presente apenas no lado sul da calçada.		
Calçada sul: aproximadamente 1 espécie por lote; distanciamento de plantio de aproximadamente 15 metros.		
Representação esquemática		

Vista superior

Perspectiva

A Tabela 48 apresenta as recomendações de cobertura verde para os intervalos apresentados de relação H/W em cânions urbanos com orientação N-S. Os intervalos de H/W e CV estão identificados no gráfico de superfície de resposta do PET. De forma semelhante aos cânions urbanos com orientação L-O, nos cânions N-S, quanto maior a relação H/W, menores valores de CV são requeridos para alcançar menores níveis de estresse térmico para o pedestre.

Para cânions urbanos com orientação N-S, recomenda-se o limite máximo da relação H/W igual a 1,6. Nesses cânions urbanos, quando considerado o limite mínimo de CV proposto, de 0,40, um aumento na relação H/W não representa redução importante no nível de estresse térmico no nível do pedestre. Por outro lado, esse limite representa maior acesso de iluminação natural ao interior do cânion urbano.

Esse limite de H/W ($H/W=1,6$), da mesma forma como nos cânions com orientação L-O, caracteriza uma restrição no gabarito de altura apenas para as ruas, uma vez que nas avenidas, a maior relação H/W é igual a 1,03. Considerando que o edifício não possua recuo frontal, em uma rua com 20 metros de largura, é possível construir até 10 pavimentos, com a adoção do CA máximo permitido, de 2,5. Por outro lado, a adoção de recuos frontais de 1,50 metros possibilita a construção de 12 pavimentos.

Tabela 48: Recomendações de cobertura verde para diferentes intervalos de relação H/W em cânions urbanos com orientação N-S e delimitação dos intervalos no gráfico de contorno

Relação H/W		Cobertura Verde
< 1,06		0,65 - 0,70
1,06 - 1,36		0,45 - 0,70
1,37-1,60		0,40 - 0,65

Nessas vias com orientação N-S, cabe salientar que o valor máximo de CV utilizado nas simulações foi de 0,69, por essa razão as recomendações se limitam a esse valor. É possível que maiores valores de CV, próximos a 0,85, resultem em menores valores do PET, essencialmente em cânions mais rasos.

Na sequência, a Tabela 49, Tabela 50 e Tabela 51 apresentam sugestões de aplicação de CV em avenidas e ruas com orientação N-S, com descrição do posicionamento das espécies arbóreas e ilustração da proposta. A indicação dos pavimentos para a relação H/W considera a ausência de recuo frontal no lote e a representação esquemática ilustra a máxima relação H/W.

Tabela 49: Sugestão de cobertura verde para relação H/W inferior a 1,06 para avenidas com orientação N-S de aproximadamente 35 metros de largura

Avenidas com canteiro central (35m largura) - orientação N-S		
Relação H/W	Pavimentos	CV sugerido
< 1,06	Até 12	0,70
Descrição		
Espécies arbóreas presente nos dois lados da calçada e no canteiro central.		
<u>Calçada:</u> 1 espécie por lote; distanciamento de plantio de 14 metros.		
<u>Canteiro:</u> espécies arbóreas alternadas em relação ao alinhamento da calçada; distanciamento de plantio de aproximadamente 14 metros.		
Representação esquemática		

Vista superior

Perspectiva

Tabela 50: Sugestão de cobertura verde para relação H/W inferior a 1,06 para ruas com orientação N-S de aproximadamente 20 metros de largura

Ruas (20m largura) - orientação N-S		
Relação H/W	Pavimentos	CV sugerido
< 1,06	Até 7	0,70
Descrição		
Espécies arbóreas presente em mesmo número nos dois lados da calçada.		
Calçada: aproximadamente 1 espécie por lote; distanciamento de plantio de aproximadamente 14 metros. Plantio das espécies do lado leste alternado em relação ao lado oeste da calçada.		
Representação esquemática		

Vista superior

Perspectiva

Tabela 51: Sugestão de coberturas verdes para relação H/W de 1,06 a 1,60 para ruas com orientação N-S de aproximadamente 20 metros de largura

Ruas (20m largura) - orientação N-S		
Relação H/W	Pavimentos	CV sugerido
1,06 – 1,60	8-10	0,50
Descrição		
Espécies arbóreas presente em maior número no lado leste da calçada.		
<u>Calçada leste:</u> aproximadamente 1 espécie por lote; distanciamento de plantio de aproximadamente 14 metros.		
<u>Calçada oeste:</u> aproximadamente 0,5 espécie por lote; distanciamento de plantio de aproximadamente 28 metros.		
Representação esquemática		

Vista superior

Perspectiva

A aplicação dessas recomendações visa o conforto térmico do pedestre através da combinação dos parâmetros da forma urbana em estudo. Sua aplicação na cidade de estudo é possível uma vez que contempla os parâmetros de ocupação do solo propostos pelo novo plano diretor, em fase final de aprovação, em conjunto com propostas do plano de arborização do município, que, por se apresentar em fase de desenvolvimento, possui flexibilidade para adoção das recomendações aqui apresentadas.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa pesquisa verificou o nível de estresse térmico do pedestre em diferentes cenários de cânions urbanos na área central de Umuarama, Paraná, considerando as possíveis transformações na sua forma urbana previstas pelos planos municipais em fase de aprovação: Plano Diretor Municipal e Plano de Arborização Urbana.

As análises foram realizadas, principalmente, através de modelagem microclimática computacional com o programa Envi-MET. Os resultados dessa pesquisa demonstraram que diferentes combinações dos parâmetros da forma urbana, especificamente, da geometria do cânion urbano e arborização presente no seu interior, resultam em tendências diversas de estresse térmico para o pedestre.

Além disso, a compreensão desse comportamento demonstrou que novas configurações da forma urbana são compatíveis com a qualidade ambiental dos espaços abertos desde que aplicadas estratégias do desenho urbano climaticamente orientado. Ao final, com base nos resultados, foram traçadas recomendações relacionadas a geometria e cobertura verde das vias urbanas a favor do conforto térmico dos usuários desses espaços.

A seguir são apresentados os principais resultados dessa pesquisa, considerações sobre uso da ferramenta computacional e sugestões para trabalhos futuros.

7.1 PRINCIPAIS RESULTADOS

Os resultados obtidos nas simulações e cálculo do PET demonstraram que a geometria do cânion e a presença de arborização nos cenários de cânions urbanos exercem influência significativa nas variáveis microclimáticas e consequentemente no nível de estresse térmico do pedestre. Essa influência ocorreu principalmente em função das alterações na temperatura radiante média e velocidade do ar no interior dos cânions urbanos.

No período diurno, tanto para situação de verão quanto para situação de inverno, os maiores valores do PET foram observados nos cenários de cânions com menor relação H/W e ausência de arborização e os menores valores foram observados, principalmente, em cânions mais profundos e com arborização.

As diferenças mais significativas do PET foram observadas no período de verão, às 12h e 15h, afetadas essencialmente pela Trm, tanto em função da relação H/W (H/W) quanto da cobertura verde (CV). Quanto à relação H/W, em cânions urbanos com orientação L-O, a maior redução do PET foi de 15,6 °C, com o aumento de H/W de 0,17 para 2,25, em cenários sem arborização. Já em cânions com orientação N-S, essa redução foi de 13,5 °C, com o aumento de H/W de 0,17 para 1,8. Já a redução do PET em função do aumento de CV foi mais percebida nos cânions rasos; em cânions com orientação L-O ($H/W=0,17$) observou-se uma redução de 8,8°C na escala PET de um cenário sem arborização para outro com CV de 0,65; em cânions com orientação N-S ($H/W=0,60$), essa redução foi de 9,4 °C, com incremento semelhante de arborização.

No período noturno, observou-se pequena influência de H/W e CV no PET. Tanto em situação de inverno quanto de verão, o PET foi menor em cenários de cânions mais profundos; a maior diferença observada foi uma redução de 1,6 °C na escala PET, em situação de verão, entre um cenário de cânion L-O com H/W de 0,37 para outro com H/W de 2,25. Quando comparados cenários com mesma relação H/W, o PET foi menor em cenários com menor CV, uma vez que a arborização atenuou a velocidade do ar e, conseqüentemente, influenciou o aumento do PET; nesse caso a maior diferença foi de 1,8 °C, observada em situação de inverno, em um cânion com orientação N-S, relação H/W de 0,30, entre um cenário sem arborização e um cenário com CV igual a 0,69.

Em relação a orientação do cânion urbano, notou-se que, em média, menores níveis de estresse térmico em cânions urbanos com orientação L-O foram obtidos com o aumento de H/W; já em cânions urbanos com orientação N-S, com o aumento de CV. Para situação de verão em cânions urbanos com orientação L-O, o PET médio obtido no cenário com maior relação H/W e maior CV foi 6,7 °C menor do que no cenário com menor H/W e ausência de CV. Já nos cenários com orientação N-S, essa diferença foi de 5,9 °C.

Observou-se que nos cenários com maior CV a amplitude do PET foi menor durante as horas estudadas, enquanto que nos cenários sem cobertura arbórea foi registrada a maior amplitude do PET. Em cenários com cânions mais profundos o sombreamento promovido pela arborização foi mascarado pelo sombreamento dos edifícios. Além disso, nesses cenários de cânions com maior relação H/W, apesar do pequeno aumento da temperatura radiante média no período noturno em situação de inverno, não foi constatado o fenômeno de aquecimento noturno; tampouco essa variação foi importante para o incremento do PET. É

importante ressaltar que esse resultado é relacionado ao limite da maior relação H/W analisada ($H/W=2,25$), portanto não é descartada a possibilidade da ocorrência de aquecimento noturno em cânions mais profundos não integrantes dessa pesquisa.

Em situação de verão, observou-se que houve um afastamento maior dos valores do PET em relação ao valor médio de neutralidade térmica ($22\text{ }^{\circ}\text{C}$). Para situação de verão, esse distanciamento nos horários de maior movimento de pedestres (9h, 12h, 15h e 18h) foi de $13,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e para situação de inverno, de $-3,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Assim, tem-se que o período do verão, notadamente o diurno, representou maiores tendências de estresse térmico aos pedestres nos diversos cenários de cânions urbanos; a maior ocorrência de estresse térmico foi ao calor.

A análise das correlações permitiu a verificação da medida da relação entre duas variáveis. Verificou-se a correlação negativa entre a relação H/W e a temperatura radiante média; entre a relação H/W e a velocidade do ar em cânions com orientação N-S; entre a cobertura verde e a temperatura radiante média; e entre a cobertura verde e a velocidade do ar. Também foi confirmado através da correlação, que o índice PET tende a diminuir à medida que aumenta a relação H/W e/ou a cobertura verde.

É importante salientar que a aplicação das correlações nessa pesquisa teve limitações e algumas correlações não puderam ser verificadas. Nos resultados das simulações, cada variável pode ter sofrido influência de mais de um parâmetro, não apenas de H/W ou CV, mas ter sido consequência da interação dos dois; essa análise não possibilitou essas verificações uma vez que permite a verificação da relação apenas entre duas variáveis, sem controle sobre as demais.

Os modelos de regressão linear múltipla propostos foram importantes para verificar de maneira significativa as relações entre as variáveis explicativas, H/W e CV, e o nível de estresse térmico do pedestre. Da mesma forma, a utilização da técnica estatística de superfície de resposta e a construção dos gráficos de contorno foi muito relevante para a conclusão da pesquisa. Essa técnica, possibilitou avaliar a sensibilidade da variável resposta, o PET, a mudanças em H/W e CV e, através dos gráficos de contorno, visualizar melhores níveis do PET.

Com a aplicação da superfície de resposta, observou-se que para período diurno, maiores valores de H/W e CV tendem a diminuir o PET, e que os menores valores do índice de conforto térmico são observados para H/W próximo de 1,7 e CV próximo de 0,95. Para o período noturno, o PET tende a diminuir à medida que o H/W aumenta, e a sofrer pequeno acréscimo

com o aumento de CV. Os menores valores do PET noturno ocorrem para H/W próximo de 2,2 e CV entre 0 e 0,1.

Os resultados da superfície de resposta, modeladas para o período diurno para cânions com orientação L-O e orientação N-S, mostraram diferenças na resposta do índice PET em relação aos parâmetros de desenho urbano. Nos cânions urbanos com orientação N-S, principalmente em cenários com menor relação H/W, o PET é mais sensível ao aumento de CV do que nos cânions urbanos com orientação L-O. Em cânions urbanos com orientação L-O, para valores mais altos de H/W, principalmente acima de 1,3, não há variação significativa do PET médio de acordo com CV. Nesses cânions, o PET é mais afetado pela mudança de H/W que em cânions N-S, essencialmente para valores mais baixos de H/W.

Ao final, através dos resultados das simulações computacionais e das análises estatísticas realizadas na sequência, foi possível assinalar sugestões para o desenho urbano no que se refere aos elementos dessa pesquisa. Para cânions urbanos com orientação L-O, recomenda-se limite inferior de CV de 0,30 para vias com relação H/W superior a 1,30; e superior de 0,85 para relação H/W inferior a 0,39. Recomenda-se, também, que esses cânions tenham uma relação H/W de no máximo 1,7. Já para cânions urbanos com orientação N-S, recomenda-se um limite inferior de CV de 0,40 para vias com relação H/W maior que 1,36; e limite superior de 0,70 para vias com relação HW menor que 1,06. Sugere-se também, para esses cânions, um limite superior de H/W igual a 1,6.

7.2 APLICAÇÃO DO MODELO ENVI-MET

A utilização de ferramentas computacionais de simulação microclimática é de grande importância para estudos de conforto térmico não apenas em áreas abertas existentes, mas também para a simulação de diferentes possibilidades de desenho urbano. Nessa pesquisa a utilização do modelo de simulação microclimática Envi-MET se mostrou eficiente para o cumprimento dos objetivos propostos.

As aplicações de testes estatísticos para verificar a concordância entre dados observados no local e dados simulados reforçaram a validade da ferramenta ENVI-met como um modelo de predição microclimática para áreas urbanas. Os valores de temperatura do ar e temperatura radiante média observados e simulados seguiram a mesma tendência nos diversos horários de estudo; os valores de umidade relativa do ar seguiram a mesma tendência no período

diurno; já os valores de velocidade do ar sofreram variações significativas. O modelo subestimou a temperatura do ar em média 2°C para situação de inverno e também subestimou a temperatura radiante média, especialmente no período do verão, em média em 11°C. Os resultados da análise de correspondência dos dados corroboram com outras pesquisas que apontam a temperatura do ar como variável mais indicada para ser usada como referência para ajuste dos dados.

Algumas limitações da ferramenta ENVI-met estão relacionadas ao tempo de processamento do modelo. Entre elas, a necessidade de recorte da área modelada e adoção de células de grade de maiores dimensões, que somadas a modelagem ortogonal, simplificam a forma urbana. Além disso, como as pesquisas utilizando esse modelo são recentes, não existem critérios definidos para ajuste dos dados medidos e simulados. Esses fatores, associados a dificuldade de controle das inúmeras interações do ambiente térmico urbano, dificultam a obtenção de um cenário modelado idêntico ao real.

Contudo, os resultados provenientes das simulações foram validados e também eficazes para a compreensão do comportamento microclimático no nível do pedestre em cânions urbanos com diferentes configurações. Ressalta-se a importância da consulta a outras pesquisas que utilizaram o modelo com apontamentos e sugestões a respeito das diversas configurações; a preocupação com a configuração dos dados de entrada e modelagem dos cenários; e ajuste do modelo através da verificação da correspondência de dados de variáveis observados no local com um cenário simulado semelhante ao real. Por fim, conclui-se que seu uso pode contribuir com um desenho urbano sensível às condições climáticas em favor do conforto térmico em espaços abertos.

7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de ampliar a compreensão do comportamento do conforto térmico em espaços abertos e de otimizar as recomendações feitas nessa pesquisa, são feitas as seguintes sugestões:

- Analisar através de simulação microclimática como o aumento da densidade construída em toda a zona central da cidade, conforme proposto pelo novo Plano Diretor, irá influenciar o microclima urbano através de uma comparação com o cenário

existente e diferentes possibilidades de distribuição do coeficiente de aproveitamento no gabarito dos edifícios;

- Analisar através de simulação microclimática como as alterações previstas pelos novos planos municipais irão influenciar a disponibilidade de iluminação e ventilação naturais nos edifícios;
- Analisar através de simulação microclimática a utilização de diferentes espécies arbóreas na cobertura verde dos cânions urbanos a fim de possibilitar diferentes alternativas ao Plano de Arborização Urbana.

Enfim, ressalta-se a importância da realização de pesquisas com resultados que possam orientar a elaboração de instrumentos de planejamento e de desenho urbano fundamentados em parâmetros de desempenho ambiental para diferentes contextos climáticos e culturais. A incorporação desses resultados no desenho urbano contribui para a construção de cidades mais eficientes e confortáveis, premissas do urbanismo bioclimático e da cidade sustentável.

8 REFERÊNCIAS

- ABREU, L.V. **Contribuição das árvores para o bioclima térmico no desenho urbano em cidades tropicais: o caso de Campinas, SP**. 2012. 135p. Tese (Doutorado em Arquitetura, Tecnologia e Cidade), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.
- ABREU, L.V.; LABAKI, L.C. Conforto térmico propiciado por algumas espécies arbóreas: avaliação do raio de influência através de diferentes índices de conforto. **Ambiente Construído**, v.10, n.4, p.103-117, 2010.
- ACIU - Associação Comercial, Industrial e Agrícola de Umuarama. História. Disponível em: <<http://aciupr.com.br/historia-de-umuarama.php>>. Acesso em: mar. 2016.
- ACIOLY, C.; DAVIDSON, F. **Densidade urbana: um instrumento de planejamento e gestão urbana**. Rio de Janeiro: Ed. Mauad, 1998.
- ACSELRAD, H. **A duração das cidades: sustentabilidade e risco nas políticas urbanas**. Coleção espaços do desenvolvimento. Rio de Janeiro: Editora Lamparina, 2009.
- AKBARI H.; POMERANTZ, M.; TAHA, H. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. **Solar Energy**, v. 70, p. 295 – 310, 2001.
- ALI-TOUDERT, F.; MAYER, H. Effects of street design on outdoor thermal comfort. In: KISS, A., MEZÖSI, G., SÜMEGHY, Z. eds. **Landscape, Environment and Society. Studies in Honour of Professor Ilona Bárány-Kevei on the Occasion of Her Birthday**, p.45-55, 2006.
- ALI-TOUDERT, F.; MAYER, H. Thermal comfort in a east-west oriented street canyon in Freiburg (Germany) under hot summer conditions. **Theor. Appl. Climatol.**, v. 87, p.223-237, 2007.
- AMERICAN SOCIETY FOR HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE 55**: thermal environmental conditions for human occupancy. ASHRAE, Atlanta, GA, 2010.
- ANDREOU, E. The effect of urban layout, street geometry and orientation on shading conditions in urban canyons in the Mediterranean. **Renewable Energy**, v. 64, p. 587-596, 2014.
- ANDREOU, E. Thermal comfort in outdoor spaces and urban canyon microclimate. **Renewable Energy**, v. 55, p. 182-188, 2012.
- ARMSON, D.; STRINGER, P.; ENNOS, A. R. The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. **Urban Forestry & Urban Greening**, p. 245– 255, 2012.
- ARNFIELD, J. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **Int. J. Climatol.**, n. 23, p. 1–26, 2003.

- ASSIS, E.S. A abordagem do clima urbano e aplicações no planejamento da cidade: reflexões sobre uma trajetória. In: ENCAC - ELACAC 2005 - VIII ENCONTRO NACIONAL E IV ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2005, Maceió. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2005. v. 1. p. 92-101.
- ASSIS, E.S. Aplicações da climatologia urbana no planejamento da cidade: revisão dos estudos brasileiros. **Revista Rua**, v. 9, p.20-25, 2006.
- ASSIS, E. S. **Impactos da forma urbana na mudança climática: método para previsão do comportamento térmico e melhoria de desempenho do ambiente urbano**. 2000. 273p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho Térmico de Edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e 111 diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.
- BARBIRATO, G. M. BARBOSA, R. V. R.; TORRES, S. C. Articulação entre Clima Urbano e Planejamento das Cidades: Velho Consenso, Contínuo Desafio. In: 8º CONGRESO INTERNACIONAL CIUDAD Y TERRITORIO VIRTUAL, Rio de Janeiro, 10, 11 e 12 Outubro, 2012. **Anais...** Rio de Janeiro: UFRJ, 2012.
- BARBIRATO, G. M. **Aplicação de modelo de balanço de energia para análise do ambiente térmico urbano de Maceió - AL**. 1998. 173p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.
- BARBIRATO, G. M., SOUZA, L. C. L.; e TORRES, S. C. **Clima e Cidade: a abordagem climática como subsídio para estudos urbanos**. Maceió: Editora UFAL, 2007.
- BARBOSA, R. V. R. **Áreas verdes e qualidade térmica em ambientes urbanos: estudo em microclimas de Maceió (AL)**. 2005. 135p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- BIANCO, H. et al. The role of urban land in climate change. In: ROSENZWEIG, C. et. al. **Climate change and cities: First assessment report of the urban climate change research network**. New York: Cambridge University Press, 2011. P. 217-248.
- BIDERMAN, R. (OBSERVATÓRIO DO CLIMA). **Diretrizes para Formulação de Políticas Públicas em Mudanças Climáticas no Brasil**. Observatório do Clima: São Paulo, 2009.
- BLAZEJCZYK, K., EPSTEIN, Y., JENDRITZKY, G., STAIGER, H., TINZ, B. Comparison of UTCI to selected thermal indices. **Int. J. Biometeorol**, n. 56, p. 515–535, 2012.
- BRÖDE, P., KRÜGER, E.L., ROSSI, F.A., FAILA, D. Predicting urban outdoor thermal comfort by the Universal Thermal climate index UTCI – a case study in Brazil. **Int. J. Biometeorol**, n.56, p.471–480, 2012.

- BOURBIA, F.; AWBI, H. B. Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate. Part 2: Shading simulations. **Renewable Energy**, v.29, p.291–301, 2004.
- BOURBIA F, BOUCHERIBA F. Impact of street design on urban microclimate for semi arid climate (Constantine). **Renew Energy**, v.35, p. 343-357, 2010.
- BRAGA, R. Mudanças climáticas e planejamento urbano: uma análise do Estatuto da Cidade. In: VI ENCONTRO NACIONAL DA ANPPAS, 2012, Belém, PA. **Anais...** Belém, 2012.
- BRANDÃO, R.S. **As Interações Espaciais Urbanas e o Clima: incorporação das análises térmicas e energéticas no planejamento urbano**. 2009. 350p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- BRASIL. Ministério das Cidades. **Plano Diretor Participativo**: guia para implementação pelos municípios e cidadãos. Brasília: Câmara dos Deputados, 2001.
- BRUNDTLAND, G. 1987. **Our common future: The World Commission on Environment and Development**. Oxford: Oxford University Press, 1987.
- BRUSE, M. **ENVI-met website**. Disponível em: <<http://www.envi-met.com>>. Acesso em: fev., 2016.
- BRUSE, M.; FLEER, H. Simulating Surface-Plant-Air Interactions Inside Urban Environments with a Three Dimensional Numerical Model. **Environmental Software and Modelling**, v. 13, p. 373–384, 1998.
- BUENO-BARTHOLOMEI, C. L. **Influência da vegetação no conforto térmico urbano e no ambiente construído**. 2003. 255p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- BUENO-BARTHOLOMEI, C. L.; LABAKI, L. C. How much does the change of species of trees affect their solar radiation attenuation? In: Fifth International Conference on Urban Climate - ICUC-5, 2003, Lodz. **Proceedings...** Lodz: IAUC, 2003. v. 1. p. 267-270.
- BUSSAB, W. O.; Morettin, P. A. **Estatística Básica**. 7ª Edição. São Paulo: Saraiva, 2012.
- CAVALHEIRO, F. et al. Proposição de Terminologia para o Verde Urbano. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana (SBAU)**. Rio de Janeiro, Ano VII, n. 3, 1999.
- CARFAN, A. C. **Análise do conforto térmico em áreas abertas no município de Ourinhos-SP**. 2011. 168 p. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- CARVALHO, H. J. M.; CORBELL, O. D.; SILVA, F. A. G. Correlações entre atributos da morfologia urbana e variáveis climáticas em uma fração urbana da cidade de João Pessoa – PB. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., 2005, Maceió, **Anais...** Maceió: ANTAC, 2005.

- CHENG, V.; NG, E.; CHAN, C.; GIVONI, B. Outdoor thermal comfort study in a sub-tropical climate: a longitudinal study based in Hong Kong. **Int. J. Biometeorol**, n.56, p. 43–56, 2012.
- CHEN, L.; NG, E. Outdoor thermal comfort and outdoor activities: A review of research in the past decade. **Cities**, n.29, p.118-125, 2011.
- CHEN, Y. et al. Estimating the relationship between urban forms and energy consumption: a case study in the Pearl River Delta, 2005-2008. **Landscape and Urban Planning**, n. 112, p.100-117, 2013.
- CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE O MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO - CNUMAD. Biblioteca Digital da Câmara dos Deputados, 1995. Disponível em <<http://www.onu.org.br/rio20/img/2012/01/agenda21.pdf>>. Acesso em: ago. 2014.
- COSTA, A. D. L.; LABAKI, L.C.; ARAÚJO, V.M.D. Thermal comfort in open spaces: A study in the northeast of Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE “PASSIVE AND LOW COOLING FOR THE BUILT ENVIRONMENT”, 2005, Santorini (Greece). **Proceedings...** Santorini, 2005. p. 755-759.
- COSTA, H. S. M. Desenvolvimento urbano sustentável: uma contradição em termos? **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, São Paulo: ANPUR, n.2, p. 55-71, 2000.
- COUTTS, A.M. et al. Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments. **Theor Appl Climatol**, 2015. DOI 10.1007/s00704-015-1409-y.
- DEPESPINASSE, A.F.B. et al. Cenário da arborização nas maiores cidades do estado do Paraná. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, Piracicaba, v.6, n.3, p.149-171, 2001.
- DIMITROVA, B. et al. Trees and the microclimate of the urban canyon: a case study. In: 2nd ICAUD - International Conference in Architecture and Urban Design. **Proceedings...** Albania, 2014.
- DOBBERT, L. Y. et al. Avaliação da interferência da cobertura arbórea no desempenho térmico por meio de simulação computacional. In: XIII Encontro Nacional e IX Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...** Rio de Janeiro, 2015 (a).
- DOBBERT, L. Y. **Arborização na cidade de Campinas/SP – percepção e conforto**. Tese (Doutorado em Ciências), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2015 (b).
- DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA**. 2008. 160p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

- DORNELLES, K. A.; CARAM, R. M.; SICHIERI, E. P. Absortância solar e desempenho térmico de tintas frias para uso no envelope construtivo. In: XII Encontro Nacional e VIII Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído - ENCAC/ELACAC, 2013, Brasília, n 12, 2014, p. 55-64.
- DUARTE, D. H. S. **Padrões de Ocupação do Solo e Microclimas Urbanos na Região de Clima Tropical Continental**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- DUARTE, D. H. S. Variáveis urbanísticas e microclimas urbanos – Modelo empírico e proposta de um indicador. **Forum Patrimônio: amb. constr. e patr. sust.**, Belo Horizonte, v.3,n.2, 2010.
- DUARTE, D.H.S.; SERRA, G.G. Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima tropical continental brasileira: correlações e proposta de um indicador. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 3, n. 2, p. 7-20, 2003.
- EDWARDS, B. **Guia Básica de La Sostentabilidade**. Barcelona: Editorial Gustavo Gili SA, 2004.
- ELIASSON, I.; SVENSSON, M.K. Spatial air temperature variations and urban land use – a statistical approach. **Meteorological Applications**, n.10, p.135-149, 2003.
- ELIASSON, I. The use of climate knowledge in urban planning. **Landscape and Urban Planning**, v. 48, p.31-44, 2000.
- EMMANUEL, R.; ROSENLUND, H.; JOHANSSON, E. Urban shading—A design option for the tropics? A study in Colombo, Sri Lanka. **Int. J. Climatol.**, n.27, 1995–2004, 2007.
- ERELL, E. et al. Effect of high-albedo materials on pedestrian heat estresse in urban street canyons. **Urban Climate**, n.10, p 367-386, 2014.
- ERELL, E.; PEARLMUTTER, D.; WILLIAMSON, T. **Urban microclimate: designing the spaces between buildings**. Earthscan/James & James Science Publishers, London, 2011.
- ERELL, E.; WILLIAMSON, T. The spatial variability of air temperature in the urban canopy layer. In: PALENC CONFERENCE, 2 & AIVC CONFERENCE, 28., 2007. **Proceedings...** Ilha de Creta, Grécia: PALENC, 2007. p. 304-308.
- FERRAZ, A. C. P.; TORRES, I. G.E. **Transporte público urbano**. São Paulo: Rima, 2004.
- FAVRETTO, A. P. O.; CHVATAL, K. M. S. Contribuições para o conforto térmico urbano: caracterização de espécies arbóreas na cidade de São Carlos, SP. In: XI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2011, Búzios, RJ. **Anais...** 2011.
- FROTA, A. B; SCHIFFER, R. S. **Manual de Conforto Térmico**. 5ª. Ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.
- GARRIDO, R. Prefeitura lança Projeto Mais Sombra e estima plantar mais 2500 árvores até o final do ano. 2016. Disponível em: <<http://www.umuarama.pr.gov.br/noticias>>. Acesso em: fev. 2016.

- GARTLAND, L. **Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- GIVONI, B. **Man, climate and architecture**. London: Applied Science Publishers, 1976.
- GIVONI, B. **Urban design in different climates**. Geneva: WMO, December. 1998.
- GIORDANO, D. E.; KRÜGER, E. Potencial de redução da temperatura de superfície pelo aumento do albedo nas diversas regiões brasileiras. In: XII ENCONTRO NACIONAL E VIII LATINOAMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENCAC/ELACAC, 2013, Brasília. **Anais...** Paranoá, Brasília, n 11, 2014. p. 13-22.
- GOMES, P.S.; LAMBERTS, R. O estudo do clima urbano e a legislação urbanística: considerações a partir do caso Montes Claros, MG. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 73-91, 2009.
- GONÇALVES, J. C. S. **A sustentabilidade de edifícios altos: uma nova geração de edifícios altos e sua inserção urbana**. São Paulo, 2003. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Estruturas Ambientais Urbanas) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- GOOGLE EARTH. Versão 7.3.0. 2015. Disponível para download em: <<http://earth.google.com.br>>. Acesso em jan. 2016.
- HAVENITH, G., FIALA, D., BLAZEJCZYK, K., RICHARDS, M., BRÖDE, P., HOLMÉR, I., RINTAMAKI, H., BENSHABAT, Y., JENDRITZKY, G. The UTCI-clothing model. *Int. J. Biometeorol*, n. 56, p. 461–470, 2011.
- HIGUERAS GARCÍA, E. **Urbanismo Bioclimático**. Barcelona: Gustavo Gili, 2006.
- HIRAKATA, V.N.; CAMEY, S.A. Análise de concordância entre métodos de Bland-Altman. **Rev HCPA**, n.29, p.261-268, 2009.
- HIRASHIMA, S.Q.S. Calibração do índice de conforto térmico Temperatura Fisiológica Equivalente (PET) para espaços abertos do município de Belo Horizonte, MG. Belo Horizonte, 2010. 225f. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável). Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
- HOLDEN, E.; NORLAND, I.T. Three Challenges for the Compact City as a Sustainable Urban Form: Household Consumption of Energy and Transport in Eight Residential Areas in the Greater Oslo Region. **Urban Studies**, v. 42, n. 12, p.2145–2166, 2005.
- HÖPPE, P. The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *Int. J. Biometeorol*, n. 43, p. 71–75, 1999.
- HOVE, L. W. A. et al. Temporal spatial variability of urban heat island and thermal comfort within Rotterdam agglomeration. **Building and Environment**, n.83, p-91-103, 2015.

- HULSMeyer, A. F. **A cidade através dos seus sistemas de espaços livres: estrutura e configuração da paisagem urbana – um estudo de caso em Umuarama – PR.** São Paulo, 2014. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2014.
- IAPAR – Instituto Agrônômico do Paraná. **Cartas climáticas básicas do estado do Paraná.** Londrina, 1978.
- IAPAR – Instituto Agrônômico do Paraná. Disponível em <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=1070>>. Acesso em: abr. 2015.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico 2010. IBGE, 2011. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br>> Acesso em: fev. 2015.
- INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL – IPARDES. Perfil do município de Umuarama. Disponível em: <<http://www.ipardes.gov.br>>. Acesso em: ago.2015.
- IPCC, 2014: Summary for Policymakers. In: CLIMATE CHANGE 2014: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE. CONTRIBUTION OF WORKING GROUP III TO THE FIFTH ASSESSMENT REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/>>. Acesso em: jan.2015.
- IPC Marketing 2015. Índice de potencial de consumo 2015. Disponível em: <<http://www.ipcmarketing.com.br/>>. Acesso em: mar. 2016.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 7726:** ergonomics of the thermal environment: instruments of measuring physycal quantities. Switzerland, ISO, 1998.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 7730:** Ergonomics of the Thermal Environment: Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local termal comfort criteria. Switzerland: ISO, 2005.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 8996:**Ergonomics of the thermal environment: determination of metabolic rate. Switzerland, ISO, 2004.
- JACOBS, J. **Morte e vida nas grandes cidades.** São Paulo: Martins Fontes, 2010.
- JOHANSSON, E. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: a study in Fez, Morocco. **Build Environ**, v. 41, p. 1326-1338, 2006.
- JOHANSSON, E.; THORSSON, S.; EMMANUEL, R.; KRÜGER, E. Instruments and methods in outdoor termal comfort studies – The need for standardization. **Urban Climate**, n.10, p.346-366, 2014.

- KAKON, A.N.; MISHIMA, N.; KOJIMA, S. Simulation of the urban thermal comfort in a high density tropical city: Analysis of the proposed urban construction rules for Dhaka, Bangladesh. **Build Simul**, v.2,n.4, p. 291-305, 2009.
- KÁNTOR, N., UNGER, J., GULYÁS, Á. Subjective estimation of thermal environment in recreational urban spaces – part 2: international comparison. **Int. J. Biometeorol.**, n.56, p. 1089–1101, 2012.
- KÁNTOR, N., ÉGERHÁZI, L., UNGER, J. Subjective estimation of thermal environment in recreational urban spaces – part 1: investigations in Szeged, Hungary. **Int. J. Biometeorol.**, n. 56, p. 1075–1088, 2012.
- KATZSCHNER, L.; REINOLD, M.; LOURENCO, L. D. Urban climate in the context of a sustainable development. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. 5., 1999, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ANTAC, 1999. 1CD-ROM.
- KETTERER, C.; MATZARAKIS, A. Human-biometeorological assessment of heat stress reduction by replanning measures in Stuttgart, Germany. **Landscape and Urban Planning**, n.122, p. 78-88, 2014.
- KNEZ, I., THORSSON, S., ELIASSON, I., LINDBERG, F. Psychological mechanisms in outdoor place and weather assessment: towards a conceptual model. **Int. J. Biometeorol.**, n.53, p. 101–111, 2009.
- KONOPACKI, S.;AKBARI, H. Energy Savings of Heat-Island Reduction Strategies in Chicago and Houston: Including Updates for Baton Rouge, Sacramento, and Salt Lake City. [S.l.]: U.S. Department of Energy, 2012. Disponível em: <<http://www.osti.gov/bridge/purl.cover>>. Acesso em: dez. 2013.
- LABAKI, L. C. et al. Conforto térmico em espaços públicos de passagem: estudos em ruas de pedestres no estado de São Paulo. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 1, p. 167- 183, 2012.
- LABAKI, L. C. et al. Vegetação e conforto térmico em espaços urbanos abertos. **Fórum Patrimônio - Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável**, v. 4, n. 1, 2011.
- LAMAS, J. M. **Morfologia urbana e desenho da cidade**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1992.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3a ED. Rio de Janeiro: 2014.
- LANDSBERG, H.E. **The urban climate**. New York: Academic Press, 1997.
- LIMA, D.C.R. **Monitoramento e desempenho da vegetação no conforto térmico em espaços livres urbanos: o caso das praças de Maringá/PR**. 170 p. Maringá, 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá, 2009.

- LINDBERG, F.; HOLMER, B.; THORSSON, S.; RAYNER, D. Characteristics of the mean radiant temperature in high latitude cities – implications for sensitive climate planning applications, **Int. J. Biometeorol**, 2013.
- LOMBARDO, M. A. **Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo: Hucitec, 1985.
- LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas do Brasil**, vol. 1, 4ª Ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2002.
- MACIEL, C.R. et al. Avaliação do impacto do uso de superfícies frias em espaços urbanos por meio do software ENVI-met. In: XIII Encontro Nacional e IX Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...** Rio de Janeiro, 2015.
- MAKROPOULOU, M.; GOSPODINI, A. Urban form and microclimatic conditions in urban open spaces at the densely built of a greek city. **Journal of Sustainable Development**, v. 9, n. 1, 2016.
- MARTINS, T. A. L.; 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, AL. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 213-233, 2013.
- MASCARÓ, L. **Ambiência urbana**. Porto Alegre, Editora +4, 2004.
- MASCARÓ, L. et al. **PREAMBE, Preservação do Meio Ambiente pelo uso racional de energia**, vol. 5. Porto Alegre: PROPAR UFRGS MCT FINEP, 2001.
- MASCARÓ, J.J. Densidades, ambiência e infra-estrutura urbana. **Arquitextos**, Texto Especial nº 102. São Paulo, Portal Vitruvius, outubro 2001. Disponível em: <<http://www.vitruvius.com.br/arquitextos/arq000/esp102.asp>>. Acesso em: fev. 2015.
- MASCARÓ, J. L. **Desenho urbano e custos de urbanização**. Porto Alegre: Luzzatto, 1989.
- MATZARAKIS, A.; MATUSCHEK, O. Sky View Factor as a parameter in applied climatology – Rapid estimation by the SkyHelios Model. **Meteorologische Zeitschrift**, n. 20, p.39-45, 2011.
- MATZARAKIS, A.; MAYER, H.; IZIOMON, M.G. Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. **Int J Biometeorol**, n.43, p.76-84, 1999.
- MATZARAKIS, A. RayMan and SkyHelios Model - Two Tools for Urban Climatology. Fachtagung des Ausschusses Umweltmeteorologie der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft. Leipzig, v.5, p1-6. Disponível em: <http://www.urbanclimate.net/matzarakis/papers/5_V_5_Matzarakis_RayMan_SkyHelios.pdf>. Acesso em: fev. 2017.
- MATZARAKIS, A.; RUTZ, F.; MAYER, H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the Rayman model. **Int. J. Biometeorol.**, n.54, p.131–139, 2010.

- MAVROGIANNI, A. et al. The comfort, energy and health implications of London's urban heat island. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 32, p. 35 – 52, 2011.
- MAYER, H.; HÖPPE, P. Thermal Comfort of Man in Different Urban environments. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 38, p. 43-49, 1987.
- MENEGUETTI, K.S. **De cidade jardim à cidade sustentável: potencialidades para uma estrutura ecológica urbana em Maringá -PR**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- MIANA, A. C. **Adensamento e forma urbana: inserção de parâmetros ambientais no processo de projeto**. 393 p. São Paulo, 2010. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- MILNER, J.; DAVIES, M.; WILKINSON, P. Urban energy, carbon management (low carbon cities) and co-benefits for human health. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 4, p. 398-404. 2012.
- MINELLA, F.C.O. **Desenho urbano climaticamente orientado: a influência da vegetação no ambiente externo**. Tese (Doutorado em Tecnologia), Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Universidade Tecnológica Federal de Paraná, Curitiba, 2014.
- MINELLA, F.C.O. et al. Conforto Térmico em Espaços Abertos: Resultados de um Estudo Piloto em Curitiba. (p. 218-227) In: X ENCONTRO NACIONAL E VI ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENCAC/ELACAC, 2009, Natal. **Anais...** Natal, 2009, p.218-227.
- MINELLA, F.O.; ROSSI, F.A. KRÜGUER, E.L. Análise do efeito diurno do fator de visão do céu em microclima e nos níveis de conforto térmico em ruas de pedestres em Curitiba. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n.1, p.123-143, 2011.
- MINELLA, F.O.; ROSSI, F.A. KRÜGUER, E.L. Influência do céu no conforto térmico em duas situações urbanas distintas. Conforto Térmico em Espaços Abertos: Resultados de um Estudo Piloto em Curitiba. In: X ENCONTRO NACIONAL E VI ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENCAC/ELACAC, 2009, Natal. **Anais...** Natal, 2009, p.218-227.
- MINISTÉRIO DAS CIDADES. Política Nacional de Mobilidade Urbana Sustentável. Cadernos MCidades nº 6, 2004.
- MONTEIRO, C. A. F. Teoria e clima urbano. In: MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. **Clima Urbano**. São Paulo: Contexto, p. 09-68, 2003.
- MONTEIRO, L. M.; ALUCCI, M. P. Conforto térmico em espaços abertos com diferentes abrangências microclimáticas - parte 2: proposição de calibração de modelos preditivos. In: IX ENCONTRO NACIONAL E V ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENCAC/ELACAC, 2007, Ouro Preto. **Anais...** Porto Alegre, 2007. p.1231-1240.

- MONTEIRO, L.M.; ALUCCI, M.P. Índices de conforto térmico em espaços urbanos abertos. **Forum Patrimônio: amb. constr. e patr. sust.**, v.4, n.1, 2010.
- MONTEIRO, L. M. **Modelos preditivos de conforto térmico: quantificação de relações entre variáveis microclimáticas e de sensação térmica para avaliação e projeto de espaços abertos**. 378p. Tese (Doutorado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G.C.; HUBELE, N.F. **Estatística Aplicada a Engenharia**. Rio de Janeiro: LTC, 2004.
- MOREIRA, H. M.; GIOMETTI, A. B. R. O Protocolo de Quioto e as Possibilidades de Inserção do Brasil no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo por meio de Projetos em Energia Limpa. **Contexto Internacional**, vol. 30, n 1, p.09-47, 2008.
- NAKAMURA, Y.; OKE, T. R. Wind, temperature and stability conditions in an eastwest oriented urban canyon. **Atmos Environ.**, v. 22, n. 12, p. 2691–2700, 1988.
- NAKAMURA-OSAKI, C.M.; SOUZA, L.C.L.; RODRIGUES, D.S. Uma ferramenta para cálculo da máxima intensidade da ilha de calor noturna. In: XIII Encontro Nacional e IX Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído - ENCAC/ELACAC, 2015, Campinas. **Anais...** Campinas, 2015.
- NIKOLOPOULOU, M. **Outdoor Comfort**. In: Steemers, K.; Steane, M. A. (eds.). *Environmental Diversity in Architecture*, Chapter 7, p.101-119, Spon Press: Oxford, 2004.
- NIKOLOPOULOU, M.; STEEMERS, K. Thermal Comfort and Psychological Adaptation as a Guide for Designing Urban Spaces. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 1, p. 95-101, 2003.
- NOGUEIRA, L.A.H. Uso racional: a fonte energética oculta. **Estudos Avançados**, v. 21, n.59, p. 91-105, 2007.
- OKE, T.R. **Boundary Layer climates**. 2 ed. London: New York Routledge, 2009.
- 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, 1981.
- OKE, T. R. et al. Simulation of surface urban heat islands under ‘ideal’ conditions at night. Part 2: Diagnosis of causation. **Boundary-Layer Meteorology**, vol. 56, p. 339–358, 1991.
- OKE, T.R. Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. **World Meteorological Organizations**: Report n.81, Instruments and observing methods. 2006. Disponível em: <<https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-81/IOM-81-UrbanMetObs.pdf>>. Acesso em: mar. 2016.
- OKE, T. R. Street design and urban canopy layer climate. **Energy and Buildings**, v. 11, p. 103–113, 1988.
- OLGYAY, V. **Design with climate**. Princeton: Princeton University, 1963.

- ONISHIA, A. et al. Evaluating the potential for urban heat-island mitigation by greening parking lots. **Urban Forestry & Urban Greening**, v.9, p. 323-332, 2010.
- PAGE, J. K. Climate considerations and energy conservation, in: BACH, W.; PANKRATH, J.; WILLIAMS, J. **Interactions of Energy and Climate**. Dordrecht: D. Reidel Publishing, p. 73-88, 1980.
- PEARLMUTTER, D. Street canyon geometry and microclimate: designing for urban comfort under arid conditions. In: Maldonado, E. and Yannas, S. (eds.). *Environmentally Friendly Cities*, PLEA 1998, Lisboa, Portugal. **Anais...** Lisboa, Portugal: PLEA, 1998. p. 163-166.
- PEARSON, K. Mathematical contributions to the theory of evolution. III. Regression, heredity, and panmixia. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**. Series A, containing papers of a mathematical or physical character, v. 187, p. 253-318, 1896.
- PERINI, K.; MAGLIOCCO, A. Effects of vegetation, urban density, building height and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. **Urban Forestry & Urban Greening**, v.13, n. 3. p. 495-506, 2014.
- PEZZUTO, C. C. **Avaliação do ambiente térmico nos espaços urbanos abertos. Estudo de caso em Campinas, SP**. 2007. 197p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- PLANO DIRETOR DE UMUARAMA. Atualização e revisão 2016. Disponível em: <<http://www.umuarama.pr.gov.br>>. Acesso em: mar. 2016.
- PLANO DIRETOR DE UMUARAMA. Lei Complementar nº124, de 22 dez. 2004. Institui o Plano Diretor Municipal e estabelece as Diretrizes e Proposições de Desenvolvimento no Município de Umuarama. Disponível em: <http://www.umuarama.pr.gov.br/arquivos_diversos/downloads/1>. Acesso em: out. 2014.
- PROVETE, D.B.; SILVA, F.R.; SOUZA, T.G. **Estatística aplicada à ecologia usando o R**. Apostila. Programa de Pós-Graduação Biologia Animal, Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto, 2011.
- R Development Core Team. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria, 2015. Disponível em: <<http://www.Rproject.org>>.
- REINHART, C. F.; MARDALJEVIC, J; ROGERS, Z. Dynamic Daylight performance metrics for sustainable building design. **The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America**, v.3, n.1, p.7-31, 2006.
- REGO, R. L. et al. Reconstruindo a forma urbana: uma análise do desenho das principais cidades da Companhia de Terras Norte do Paraná. **Acta Scientiarum**, v. 26, n. 2, p. 141-150, 2004.

- REGO, R. L.; MENEGUETTI, K. S. O território e a paisagem: a formação da rede de cidades do norte do Paraná e a construção da forma urbana. **Paisagem e Ambiente**, n. 25, p. 37-54, 2008.
- RIGATTI, D. Loteamentos, expansão e estrutura urbana. **Paisagem e ambiente: ensaios**, n.15, p.35-69. São Paulo: FAUUPS, 2002.
- ROMERO, M.A.B. **Arquitetura bioclimática do espaço público**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2007.
- ROMERO, M. A. B. **Princípios bioclimáticos para o desenho urbano**. São Paulo: Editora Projeto, 2001.
- ROMÉRO, M.A.; REIS, L.B. **Eficiência Energética em Edifícios**. São Paulo: Editora Manole, 2012.
- ROGERS, R.; GUMUCHDJIAN, P. (ed.). **Cidades para um Pequeno Planeta**. Barcelona: GUSTAVO GILI GG, 2001.
- ROGERS, R. **Towards an Urban Renaissance**. Final Report of the Urban Task Force. DETR - Department of the Environment, Transport and the Regions of London. London: E & FN SPON, 1999.
- RORIZ, V.; DORNELLES, K. A.; RORIZ, M. Fatores determinantes da absorção solar de superfícies opacas. In: IX ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO E V ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2007, Ouro Preto. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2007.
- ROSANELI, A.F. **Cidades novas da fronteira do café: história e morfologia urbana das cidades fundadas por companhias imobiliárias no norte do Paraná**. 2009. 268f. Tese. (Doutorado em História e Fundamentos da Arquitetura e Urbanismo), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- ROSSETI, K.A.C. **Efeitos do uso de telhados vegetados em ilhas de calor urbanas com simulação pelo software ENVI-met**. 2013. 253f. Tese. (Doutorado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2013.
- ROSSI, F.A.; KRÜGUER, E.; NIKOLOPOULOU, M. A influência da configuração urbana no microclima e na sensação térmica em ruas de pedestre de Curitiba, Paraná. In: XI Encontro Nacional e VII Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído - ENCAC/ELACAC, 2011, Búzios. **Anais...** Búzios: ANTAC, 2011.
- ROSSI, F. A. **Proposição de metodologia e de modelo preditivo para avaliação da sensação térmica em espaços abertos em Curitiba**. 2012. 188 f. Tese (Doutorado em Tecnologia) – Programa de Pós-graduação em Tecnologia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.
- RUEDA, S. Plan especial de indicadores de Sostenibilidad de la Actividad Urbanística de Sevilla. Barcelona, 2006. Disponível em: <<http://www.bcnecologia.net>>. Acesso em: fev. 2015.

- SAILOR, D. J.; FAN, H. Modeling the diurnal variability of effective albedo for cities. **Atmospheric Environment**, v.36, p.713-725, 2002.
- SAILOR, D. J. Simulated urban climated response to modifications in surface albedo and vegetative cover. **Journal of applied meteorology**, v.34, p.1694-1704, 1995.
- SALAT, S. Morfologia urbana e impacto energético (Palestra). In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL: INICIATIVAS URBANAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E REDUÇÃO DE EMISSÕES, 2009, Brasília, DF. **Anais...** Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010.
- SANDRI, F. Plano de arborização. 2016. Disponível em: <<http://adema-ong.blogspot.com.br/p/arborizacao-urbana.html>>. Acesso em: fev. 2016.
- SANTAMOURIS, M. et al. **Energy and Climate in the Urban Built Environment**. London: Earthscan, James & James, 2001.
- SANTAMOURIS, M. TSANGRASSOULIS, A.; KLITSIKAS, N. Energy and Environmental Quality In The Urban Built Environment. In: WORLD RENEWABLE ENERGY CONGRESS VI, WREC 2000. **Elsevier Science**, p.69-74, 2000.
- SCHMID, A. L. **A idéia de conforto**. Reflexões sobre o ambiente construído. Curitiba, Pacto Ambiental, 2005.
- SCHIMITZ, L.K. **Reestruturação urbana e conforto térmico em Curitiba/PR: diagnóstico, modelagem e cenários**. Tese (Doutorado) – Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Paraná, 2014.
- SPAGNOLO, J.; DE DEAR, R. A Field Study of Thermal Comfort in Outdoor and Semi-Outdoor Environments in Subtropical Sydney, Australia. **Building and Environment**, v. 38, p. 721-738, 2003.
- SETO K.C., S. et al. Human Settlements, Infrastructure and Spatial Planning. In: CLIMATE CHANGE 2014: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE. CONTRIBUTION OF WORKING GROUP III TO THE FIFTH ASSESSMENT REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/>>. Acesso em: jan.2015.
- SHASHUA-BAR, L.; HOFFMAN, M. E. Quantitative evaluation of passive cooling of the UCL microclimate in hot regions in summer, case study: urban streets and courtyards with trees. **Building and Environment**, vol. 39, p. 1087-1099, 2004.
- SHASHUA-BAR, L.; HOFFMAN, M.E. 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 and Buildings**, v.31, p.221-235, 2000.

- SHINZATO, P.; DUARTE, D. Microclimate Effect of Vegetation for Different Leaf Area Index – LAI. In: 28th Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture, 2012, Lima, Perú. PLEA, 2012. Disponível em: <<http://plea-arch.org/ARCHIVE/2012/files/T12-20120130-0022.pdf>>. Acesso em: set.2016.
- SHISHEGAR, N. Street design and urban microclimate: analyzing the effects of street geometry and orientation on airflow and solar access in urban canyons. **Journal of Clean Energy Technologies**, v.1, n. 1, p. 52-56, 2013.
- SILVA, C.F. **O contexto térmico das cavidades urbanas: contexto climático do Distrito Federal**. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- SILVEIRA, A. L. R. C. **Parâmetros bioclimáticos para avaliação de conjuntos habitacionais na região tropical subúmida do Brasil**. 2007. 312p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.
- SOUZA, L. C. L. S. Relações entre ilhas de calor, geometria urbana e consumo de energia elétrica. Fórum Patrimônio: Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável. Belo Horizonte, v.4, n.1, 2010.
- STEWART, I.D.; OKE, T.R. Local Climate Zones for urban temperature studies. **Bull. American Meteorological Society**, n.93, p. 1879, 1900, 2012.
- SVENSSON, M.K. Sky view factor analysis – implications for urban air temperature differences. **Meteorol. Appl.**, v. 11, p. 201–211, 2004.
- SYNNEFA, A.; SANTAMOURIS, M.; LIVADA, I. A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment. **Solar Energy**, v.80, n.8, p. 968-981, 2006.
- TALEGHANI, M. et al. Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. **Building and Environment**, v. 83, p.65-78, 2015.
- TORRES, S.C. et al. Bioclimatologia e sustentabilidade urbana: suas interfaces conceituais e as implicações no processo de planejamento urbano. In: ANAIS ENCONTROS NACIONAIS DA ANPUR, 15., 2013, Recife. **Anais eletrônicos...** Recife: Anpur, 2013. Disponível em: <<http://unuhospedagem.com.br/revista/rbeur/index.php/anais/article/view/4397>>. Acesso em: out. 2014.
- UMUARAMA ILUSTRADO. Maioria de cortes de árvores é desnecessário e negado. Umuarama, 2015.
- UMUARAMA 60 anos. Prefeitura de Umuarama, 2015. Vídeo. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=sAO7sUd4BDE>>. Acesso em: mai. 2016.
- UN DESA. **World Urbanization Prospects: The 2011 Revision**. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York, 2012.

- VDI 3787. Part 2, Environmental Meteorology – Methods for the Human Biometeorological Evaluation of Climate and Air Quality for Urban and Regional Planning at Regional Level; Part I: Climate. Beuth Verlag, Berlin, 2008.
- VILLAÇA, F. Dilemas do Plano Diretor. In: CEPAM. **O município no século XXI: cenários e perspectivas**. São Paulo: Fundação Prefeito Faria Lima – Cepam, 1999. p. 237 – 247.
- VITRUVIO, M. L. **Los Diez Libros de Arquitectura**. Barcelona: Iberia, 1997.
- VOOGT, J.A. Urban Heat Islands: Hotter Cities, 2004. Disponível em: <actionbioscience.org>. Acesso em mar. 2016.
- WANIA, A.; BRUSE, M.; BLOND, N.; WEBER, C. Analysing the influence of diferente street vegetation on traffic-induced particle dispersion usin microscale simulation. **Journal of Environmental Management**, v.94, p.91-101, 2012.
- WONG, N.H.; CHEN, Y. **Tropical Urban Heat Islands: Climate, Buildings and Greenery**. New York: Taylor & Francis, 2009 apud YANG, F.; LAU, S.S.Y.; QIAN, F. Thermal comfort effects of urban design strategies in hight-rise urban environments in a sub-tropical climate. **Architectural Science Review**, n. 54, p. 285-304, 2011.
- WONG, N. H. et al. Comparison of STEVE and ENVI-met as temperature prediction models for Singapore context. **Int. J. Sustainable Build. Technol. Urban Dev.**, v.3, n.3, p. 197–209, 2012.
- WONG, N. H. et al. Environmental study of the impact of greenery in an institutional campus in the tropics. **Building and Environment**, n.42, p.2949-2970, 2007.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Climate and Urban Development. Geneva: WMO,n. 844, 1996. Disponível em: <http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/documents/cclxii_report.pdf>. Acesso em: out. 2015
- WWF. Living Planet Report. Species and spaces, people and places. 2014. Disponível em: <http://ba04e385e36eed47f9c-abbcd57a2a90674a4bcb7fab6c6198d0.r88.cf1.rackcdn.com/Living_Planet_Report_2014.pdf>. Acesso em: mar. 2015.
- YANG, F.; LAU, S.S.Y.; QIAN, F. Thermal comfort effects of urban design strategies in hight-rise urban environments in a sub-tropical climate. **Architectural Science Review**, v. 54, p. 285-304, 2011.
- YANG, J.; WANG, Z.; KALOUSH, K.E. Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a ‘silver bullet’ for mitigating urban heat island? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 830–843, 2015.
- YE, H. et al. A sustainable urban form: the challenges of compactness from the viewpoint of energy consumption and carbon emission. **Energy and Buildings**, v. 93, p.90-98, 2015.

YUAN, C.; CHEN, L. Mitigating urban heat island effects in high-density cities based on sky view factor and urban morphological understanding: a study of Hong Kong. **Architectural Science Review**, v. 54, p. 305-315, 2011. DOI: 10.1080/00038628.2011.613644