

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA

FLÁVIA CRISTINA OSAKU MINELLA

**DESENHO URBANO CLIMATICAMENTE ORIENTADO:**  
A INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO NO AMBIENTE TÉRMICO EXTERNO

TESE

CURITIBA

2014

FLÁVIA CRISTINA OSAKU MINELLA

**DESENHO URBANO CLIMATICAMENTE ORIENTADO:  
A INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO NO AMBIENTE TÉRMICO EXTERNO**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Doutora em Tecnologia” - Área de Concentração: Tecnologia e Desenvolvimento.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Krüger

CURITIBA

2014

---

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

M664d Minella, Flávia Cristina Osaku  
Desenho urbano climaticamente orientado: a influência da vegetação no ambiente térmico externo / Flávia Cristina Osaku Minella. — 2014.  
224 f.: il.; 30 cm

Orientador: Eduardo Krüger.  
Tese (Doutorado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.  
Programa de Pós-graduação em Tecnologia, Curitiba, 2014.  
Bibliografia: f. 206-224.

1. Cobertura vegetal. 2. Desenho urbano. 3. Conforto térmico. 4. Índice. 5. Tecnologia – Teses. I. Krüger, Eduardo, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Tecnologia. III. Título.

CDD (22. ed.) 600

## TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Tese N° 19

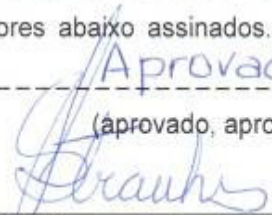
**Desenho Urbano Climaticamente Orientado: A influência da vegetação no ambiente  
térmico externo**


por


**Flávia Cristina Osaku Minella**

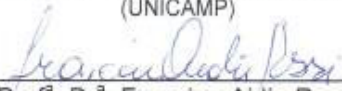
Esta tese foi apresentada às \_\_\_\_\_ 10h00 \_\_\_\_\_ do dia  
**01 de agosto de 2014** como requisito parcial para a obtenção do título de DOUTORA EM  
TECNOLOGIA, Área de Concentração – Tecnologia e Sociedade, Linha de Pesquisa –  
Tecnologia e Desenvolvimento, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná. A candidata foi argüida pela Banca Examinadora composta  
pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o  
trabalho \_\_\_\_\_ Aprovado \_\_\_\_\_.


(aprovado, aprovado com restrições, ou reprovado)

  
\_\_\_\_\_  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Faimara do Rocio Strauhs  
(UTFPR)


  
\_\_\_\_\_  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Lucila Chebel Labaki  
(UNICAMP)

  
\_\_\_\_\_  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Léa Cristina Lucas de Souza  
(UFSCAR)

  
\_\_\_\_\_  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Francine Aidie Rossi  
(UFPR)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Eduardo Leite Krüger  
(UTFPR)  
Orientador

Visto da coordenação:

  
\_\_\_\_\_  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Faimara do Rocio Strauhs  
Coordenadora do PPGTE

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Faimara do Rocio Strauhs  
Coordenadora do PPGTE  
UTFPR - Campus Curitiba

Para Clarice e Nelson, por tudo.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Professor Dr. Eduardo Krüger pela confiança e pelos ensinamentos.

Aos Professores Ph.D. Stéphane Goyette e Alexandre Hedjazi pelo estágio doutoral. À Universidade de Genebra pela compra das estações meteorológicas utilizadas em Genebra e Paris. Ao Eric Pampaloni pela ajuda com os equipamentos.

À Susan Honjo e seu pai, Nelson, pelo valioso auxílio nas medições em campo.

Ao Francisco Rasia, por ceder o modelo da Sete de Setembro. À Cintia Tamura e à Clara Fritoli, pela disposição em ajudar.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudo.

As Prefeituras de São Paulo, Genebra e Paris por cederem o material necessário para a modelagem. Ao Atelier Parisien d'Urbanisme por autorizar as medições em campo.

Ao Programa de Pós Graduação em Tecnologia (PPGTE/UTFPR).

Aos familiares e amigos que contribuíram de alguma forma para a realização desta pesquisa.

Em especial ao Marcos, pelo tempo, pela paciência, pelo carinho e pela Maria Fernanda.

## RESUMO

MINELLA, Flávia O. **Desenho urbano climaticamente orientado**: a influência da vegetação no ambiente térmico externo. 2014. 224f. Tese (Doutorado em Tecnologia) – Programa de Pós Graduação em Tecnologia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

A vegetação pode produzir efeitos positivos mensuráveis no campo térmico dos recintos urbanos. Diante das inadequações térmicas verificadas nos espaços citadinos, existe a necessidade de projetos e planos urbanos que considerem a utilização da vegetação como elemento estratégico para a criação de condições de conforto térmico em espaços abertos. Nesse sentido, a pesquisa assume relevância ao propor um índice que identifique a quantidade de cobertura vegetal necessária para reduzir a temperatura do ar em ambientes urbanos. O índice foi desenvolvido para a cidade de Curitiba, especialmente para a Avenida Sete de Setembro e a Avenida Linha Verde. Adicionalmente, são apresentados estudos pilotos para as cidades de Genebra, Paris e São Paulo. De caráter experimental, a pesquisa utiliza medições em campo para coleta de dados microclimáticos e simulação computacional com o modelo ENVI-met, o qual viabilizou a comparação entre cenários atuais e cenários alternativos. Todas as simulações foram realizadas considerando situações de verão. Os índices Temperatura Fisiológica Equivalente (PET) e Universal Thermal Climate Index (UTCI) foram utilizados para avaliar os níveis de estresse térmico na escala do pedestre. De forma geral, observou-se que a inserção de áreas arborizadas (especialmente sob copa densa) poderia reduzir o potencial de aquecimento das áreas urbanas no período diurno, com mudanças substanciais nas categorias de estresse térmico. A máxima redução na temperatura do ar conseguida foi de 2,5°C, verificada nos estudos piloto de São Paulo e Paris. Na Sete de Setembro a redução máxima de temperatura do ar foi de 1,2°C e na Linha Verde foi de 1,5°C. Verificou-se que os fatores que contribuem para reduções na temperatura ambiente são a forma de distribuição das árvores e a densidade da copa (fator relacionado à qualidade da sombra). O índice proposto (proporção entre cobertura vegetal e a área construída) pode explicar a redução média de Ta em 83,1%. A partir da aplicação do mesmo, pode-se concluir que a redução de 1°C na temperatura do ar deve ser esperada para um aumento de 49% de cobertura vegetal. Em cidades com ocorrência de ondas de calor, a vantagem de um plano de arborização é o custo relativamente baixo de implantação se considerar o benefício na redução das categorias de estresse térmico. A importância do índice (e da metodologia proposta para seu desenvolvimento) reside na possibilidade da sua aplicação no desenho urbano climaticamente orientado.

**Palavras-chave:** Índice. Cobertura Vegetal. Desenho urbano. Conforto térmico externo. ENVI-met.

## ABSTRACT

MINELLA, Flávia O. **Climate Responsive Urban Design: The Influence Of Vegetation In External Thermal Environment.** 2014. 224f. Tese (Doutorado em Tecnologia) – Programa de Pós Graduação em Tecnologia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

Vegetation can produce measurable positive effects on the thermal field of urban spaces. In view of thermal inadequacies in outdoor spaces, there is a need for projects and urban plans which consider the use of vegetation as strategic element for the creation of thermal comfort conditions in open spaces. In this sense, the relevance of this study is the proposition of an index which estimates the amount of vegetation fraction needed to reduce the air temperature in urban environments. The index was developed for the city of Curitiba, specifically for its central arteries such as Avenida Sete de Setembro and Avenida Linha Verde. Additionally, pilot studies for the cities of Geneva, Paris and São Paulo are presented. The experimental research uses field measurements for collecting microclimatic data and computer simulations with the ENVI-met model, which allowed the comparison of current and alternative scenarios. All simulations were carried out for summer conditions. The thermal comfort indices Physiological Equivalent Temperature (PET) and Universal Thermal Climate Index (UTCI) were used to assess levels of thermal stress at the pedestrian level. In general, it was observed that the insertion of green areas (particularly under dense canopy) could reduce the daytime heating in urban areas, with substantial changes in heat stress categories. The maximum reduction of air temperature was 2.5°C, observed in the pilot studies in São Paulo and Paris. In the Sete de Setembro the maximum reduction of air temperature was 1.2°C and in the Linha Verde it was 1.5°C. It was found that contributing factors to ambient temperature reductions are the distribution of trees and the canopy density (related to the shadow quality). The proposed index (ratio between the increase of vegetated over built-up area) may explain the reduction of mean air temperature by 83.1%. From its application, it can be concluded that a 1°C reduction in air temperature should be expected for an increase of 49% in vegetated fraction. In cities impacted by heat waves, the advantage of greenery insertion is the relatively low investment with considerable benefits in changes of heat stress categories. In cities impacted by heat waves, the advantage of greenery insertion is the relatively low investment with considerable benefits in changes of heat stress categories. The importance of the index (and the proposed methodology behind it) lies in the possibility of its application in climate-responsive urban design.

**Keywords:** Index. Vegetation Cover. Urban Design. Outdoor thermal comfort. ENVI-met.



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – SISTEMA TRINÁRIO DE VIAS EM CURITIBA.....	30
FIGURA 2 – PREVISÃO DA LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE METRÔ.....	33
FIGURA 3 – IMAGEM ILUSTRATIVA DO METRÔ DE CURITIBA .....	35
FIGURA 4 – (A) PERSPECTIVA GERAL DO PROJETO BR-CIDADE E (B) VISTA PARCIAL DO COMPARTIMENTO DA BR-116 CONTENDO AS INTERVENÇÕES REALIZADAS PELO PROJETO BR-CIDADE .....	38
FIGURA 5 – ILUSTRAÇÃO DO SISTEMA DE TRANSPORTE DE ALTA CAPACIDADE .....	39
FIGURA 6 – ILUSTRAÇÃO DA AVENIDA PROPOSTA COM O PARQUE LINEAR.....	40
FIGURA 7 – TRECHOS DE IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO LINHA VERDE .....	42
FIGURA 8 – TRECHO 1 DA LINHA VERDE FINALIZADO.....	42
FIGURA 9 – LINHA VERDE: (A) CENÁRIO ATUAL; (B) PREVISÃO DE CENÁRIO FUTURO .....	44
FIGURA 10 – ESTRUTURA TÍPICA DA CAMADA LIMITE.....	48
FIGURA 11 – ESQUEMA DA APROXIMAÇÃO VOLUMÉTRICA DO BALANÇO DE ENERGIA .....	52
FIGURA 12 – FLUXO DE VENTOS EM CÂNIONS URBANOS.....	63
FIGURA 13 – AJUSTES DO FLUXO DO AR SOBRE SUPERFÍCIES DE DIFERENTES TIPOS .....	72
FIGURA 14 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ESTRUTURA GERAL DO ENVI-MET .....	75
FIGURA 15 – ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS UTILIZADAS EM: (A) SÃO PAULO E CURITIBA; (B) GENEVRA E PARIS .....	89
FIGURA 16 – OPÇÕES DE GRADES VERTICAIS DO MODELO ENVI-MET .....	98
FIGURA 17 – FLUXOGRAMA PARA SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS .....	102
FIGURA 18 – LOCALIZAÇÃO DA REGIÃO FORMADA POR PRAILLE – ACACIAS – VERNETS.....	105
FIGURA 19 – ÁREA DE ESTUDO: (A) ANTES E (B) DEPOIS DA IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO SOVALP .....	108
FIGURA 20 – VISTA DO SETOR DE NEGÓCIOS A PARTIR DA RUA EXTERNA E DA RUA INTERNA.....	109
FIGURA 21 – SETOR HABITACIONAL E COMPLEXO ESCOLAR.....	109

FIGURA 22 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MONITORAMENTO G1 E G6 .....	110
FIGURA 23 – (A) LIMITE DA ÁREA DE ESTUDO INICIAL NO PERÍMETRO PAV – (B) IMAGEM DE SATÉLITE DA ÁREA DE ESTUDO INICIAL – (C) ÁREA MODELADA E RECORTE CONSIDERADO PARA ANÁLISE.....	113
FIGURA 24 – (A) LIMITE DA ÁREA DE ESTUDO INICIAL NO PERÍMETRO PAV COM A SOBREPOSIÇÃO DO PROJETO SOVALP – (B) PROJETO SOVALP – (C) ÁREA MODELADA DO PROJETO SOVALP E RECORTE CONSIDERADO PARA ANÁLISE .....	113
FIGURA 25 – PARÂMETROS UTILIZADOS NA CONFECÇÃO DO MODELO DE GENEBRA.....	114
FIGURA 26 – GENEBRA: LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS .....	116
FIGURA 27 – GENEBRA: CONFIGURAÇÃO DOS CENÁRIOS SIMULADOS .....	118
FIGURA 28 – GENEBRA, TA ÀS 16H00: (A) CONDIÇÕES ORIGINAIS; (B) CENÁRIO 1; (C) CENÁRIO 2 E (D) CENÁRIO 3.....	125
FIGURA 29 – PROPOSTA DA EQUIPE DE RICHARD ROGERS PARA O GRAND PARIS (O PERÍMETRO MARCADO EM VERMELHO CORRESPONDE À ÁREA DE INTERESSE).....	129
FIGURA 30 – ZAC PAJOL: (A) ANTES E (B) DEPOIS .....	130
FIGURA 31 – JARDINS D’EOLE.....	131
FIGURA 32 – LOCALIZAÇÃO DO PONTO P0 .....	132
FIGURA 33 – LOCALIZAÇÃO DO PONTO P1 .....	132
FIGURA 34 – LOCALIZAÇÃO DO PONTO P2 .....	132
FIGURA 35 – PARIS: CARTA SOLAR SOBREPOSTA ÀS IMAGENS OLHO DE PEIXE E VALOR DO FVC PARA CADA PONTO.....	134
FIGURA 36 – PARÂMETROS UTILIZADOS NA CONFECÇÃO DO MODELO DE PARIS .....	135
FIGURA 37 – PARIS: ÁREA DE ESTUDO .....	136
FIGURA 38 – PARIS: MODELO BASE FINALIZADO .....	137
FIGURA 39 – (A) ZAC PAJOL, (B) JARDINS D’EOLE.....	142
FIGURA 40 – PARIS: (A) CENÁRIO 1, (B) CENÁRIO 2 .....	142
FIGURA 41 – PARIS, TA ÀS 19H00: (A) CENÁRIO ORIGINAL, (B) CENÁRIO 1, (C) CENÁRIO 2.....	147
FIGURA 42 – MAPA DA TEMPERATURA APARENTE DA SUPERFÍCIE, CENA DE 03/09/1999 ÀS 9H57 (BASE SATÉLITE LANDSAT 7 ETM+).....	151
FIGURA 43 – SÃO PAULO: MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO.....	153

FIGURA 44 – FRAÇÃO URBANA SELECIONADA NO BAIRRO BELÉM .....	153
FIGURA 45 – FRAÇÃO URBANA SELECIONADA NO BAIRRO JARDIM PAULISTA .....	154
FIGURA 46 – FRAÇÕES DE ESTUDO: (1) BELÉM; (2) JARDIM PAULISTA .....	154
FIGURA 47 – PARÂMETROS UTILIZADOS NA CONFECÇÃO DO MODELO DO BELÉM .....	156
FIGURA 48 – MODELO-BASE DA FRAÇÃO URBANA DO BAIRRO BELÉM .....	157
FIGURA 49 – CENÁRIO B - BELÉM.....	161
FIGURA 50 – BELÉM: CENÁRIO A, ÀS 15H00.....	165
FIGURA 51 – BELÉM: CENÁRIO B, ÀS 15H00.....	165
FIGURA 52 – SÃO PAULO: IMAGENS OLHO DE PEIXE DOS PONTOS .....	167
FIGURA 53 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO EM CURITIBA.....	169
FIGURA 54 – LOCAL DE MEDIÇÃO NO SETOR ESTRUTURAL SETE DE SETEMBRO (PONTO SS1).....	170
FIGURA 55 – LOCAL DE MEDIÇÃO NA AVENIDA LINHA VERDE (PONTO LV1).....	171
FIGURA 56 – PARÂMETROS UTILIZADOS NA CONFECÇÃO DO MODELO DA SETE DE SETEMBRO.....	173
FIGURA 57 – SETE DE SETEMBRO: MODELO FINALIZADO NO ENVI- MET .....	174
FIGURA 58 – PARÂMETROS UTILIZADOS NA CONFECÇÃO DO MODELO DA LINHA VERDE .....	175
FIGURA 59 – LINHA VERDE: MODELO FINALIZADO NO ENVI-MET .....	176
FIGURA 60 – FOTO OLHO DE PEIXE E TRAÇADO SOLAR PARA: (A) SETE DE SETEMBRO E (B) LINHA VERDE .....	181
FIGURA 61 – SETE DE SETEMBRO: CENÁRIO PROPOSTO - B .....	184
FIGURA 62 – SETE DE SETEMBRO: CENÁRIO A, ÀS 15H00.....	187
FIGURA 63 – SETE DE SETEMBRO: CENÁRIO ATUAL B, ÀS 15H00 .....	187
FIGURA 64 – LINHA VERDE: CENÁRIO PROPOSTO - B.....	189
FIGURA 65 – LINHA VERDE: CENÁRIO A, ÀS 15H00 .....	192
FIGURA 66 – LINHA VERDE: CENÁRIO B, ÀS 15H00 .....	193

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – GENEVRA: DADOS MEDIDOS VS PREDITOS DE TA PARA: (A) PONTO G1 E (B) PONTO G6.....	116
GRÁFICO 2 – COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS SIMULADAS PARA O DIA 01/08/2011, PONTO P2.....	138
GRÁFICO 3 – PARIS: DADOS MEDIDOS VS PREDITOS DE TA PARA: (A) PONTO P1, (B) PONTO P2.....	140
GRÁFICO 4 – BELÉM: COMPARAÇÃO ENTRE A TA MEDIDA E SIMULADA PARA O DIA 22/02/2011.....	159
GRÁFICO 5 – SETE DE SETEMBRO: COMPARAÇÃO ENTRE A TA MEDIDA E SIMULADA PARA O DIA 10/03/2011.....	178
GRÁFICO 6 – LINHA VERDE: COMPARAÇÃO ENTRE A TA MEDIDA E SIMULADA PARA O DIA 07/03/2011.....	179
GRÁFICO 7 – ÍNDICE COBERTURA VEGETAL POR ÁREA CONSTRUÍDA EM TERMOS DE REDUÇÃO MÉDIA DE TA.....	197
GRÁFICO 8 – COBERTURA VEGETAL NECESSÁRIA PARA A REDUÇÃO DA TA MÉDIA EM 1 °C.....	198

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CARREGAMENTOS NOS SISTEMAS DE METRÔ .....	33
TABELA 2 – PARÂMETROS CONSTRUTIVOS DEFINIDOS PARA OS DIFERENTES SETORES DA OUC-LV. ....	44
TABELA 3 – FATOR DE INFLUÊNCIA DAS ESCALAS HORIZONTAIS .....	49
TABELA 4 – SUPERFÍCIES TÍPICAS DE ÁREA URBANA E ALBEDO CORRESPONDENTE .....	55
TABELA 5 – COMPARAÇÕES DE PARÂMETROS CLIMÁTICOS ENTRE AMBIENTES CIDADINO E RURAL .....	57
TABELA 6 – CLASSIFICAÇÕES DE Z0 .....	65
TABELA 7 – FAIXA DE PRECISÃO DOS INSTRUMENTOS SEGUNDO A NORMA ISO 7726 (1998).....	92
TABELA 8 – ALTURA MÉDIA DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO, EM METROS .....	93
TABELA 9 – DATAS E PONTOS DE MEDIÇÃO.....	94
TABELA 10 – CONFORTO TÉRMICO E CATEGORIA DE ESTRESSE TÉRMICO PARA PET E UTCI.....	97
TABELA 11 – PREVISÃO DA DISTRIBUIÇÃO DAS ÁREAS CONFORME OS DIFERENTES SETORES.....	108
TABELA 12 – GENEBRA: MÉDIAS HORÁRIAS DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS OBTIDAS EM CAMPO NO DIA 11/08/2011.....	111
TABELA 13 – GENEBRA: CONFIGURAÇÃO INICIAL DO MODELO.....	115
TABELA 14 – GENEBRA: VALORES MÉDIOS MEDIDOS E PREDITOS.....	117
TABELA 15 – GENEBRA: RESULTADO DOS TESTES ESTATÍSTICOS.....	117
TABELA 16 – DESCRIÇÃO PARA CADA PONTO CONSIDERANDO OS DIFERENTES CENÁRIOS .....	119
TABELA 17 – GENEBRA: CENÁRIO ORIGINAL.....	120
TABELA 18 – GENEBRA: CENÁRIO 1 E DIFERENÇAS EM RELAÇÃO AO CENÁRIO ORIGINAL .....	121
TABELA 19 – GENEBRA: CENÁRIO 2 E DIFERENÇAS EM RELAÇÃO AO CENÁRIO ORIGINAL .....	122
TABELA 20 – GENEBRA: CENÁRIO 3 E DIFERENÇAS EM RELAÇÃO AO CENÁRIO ORIGINAL .....	123
TABELA 21 – PARIS: MÉDIAS HORÁRIAS DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS OBTIDAS EM CAMPO NO DIA 31/07/2011.....	133
TABELA 22 – PARIS: MÉDIAS HORÁRIAS DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS OBTIDAS EM CAMPO NO DIA 01/08/2011.....	134

TABELA 23 – PARIS: CONFIGURAÇÃO INICIAL DO MODELO .....	139
TABELA 24 – PARIS: VALORES MÉDIOS MEDIDOS E PREDITOS.....	141
TABELA 25 – PARIS: RESULTADO DOS TESTES ESTATÍSTICOS.....	141
TABELA 26 – PARIS: DESCRIÇÃO PARA CADA PONTO CONSIDERANDO OS DIFERENTES CENÁRIOS.....	143
TABELA 27 – PARIS: CENÁRIO ORIGINAL.....	144
TABELA 28 – PARIS: CENÁRIO 1 E DIFERENÇAS EM RELAÇÃO AO CENÁRIO ORIGINAL .....	145
TABELA 29 – CENÁRIO 2 E DIFERENÇAS EM RELAÇÃO ORIGINAL .....	146
TABELA 30 – DADOS DOS BAIROS JARDIM PAULISTA E BELÉM .....	152
TABELA 31 – SÃO PAULO: MÉDIAS HORÁRIAS DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS OBTIDAS EM CAMPO NO DIA 22/02/2011.....	155
TABELA 32 – CONFIGURAÇÃO INICIAL DO MODELO - BELÉM.....	159
TABELA 33 – RESUMO ESTATÍSTICO DO MODELO BELÉM, CONSIDERANDO A TA MEDIDA E PREDITA COMO REFERÊNCIA .....	160
TABELA 34 – BELÉM: VALORES MÉDIOS MEDIDOS E PREDITOS .....	161
TABELA 35 – BELÉM: PROJEÇÃO HORIZONTAL EM M <sup>2</sup> .....	162
TABELA 36 – BELÉM: CENÁRIO A.....	163
TABELA 37 – BELÉM: CENÁRIO B E DIFERENÇAS EM RELAÇÃO AO CENÁRIO A.....	163
TABELA 38 – COMPARAÇÃO ENTRE A TA DOS CENÁRIOS A E B - BELÉM .....	164
TABELA 39 – ÍNDICES DE CONFORTO TÉRMICO PET E UTCI E FVC DOS PONTOS NO BELÉM E NO JARDIM PAULISTA.....	166
TABELA 40 – DADOS MEDIDOS NO DIA 10/03/2012 NA SETE DE SETEMBRO .....	172
TABELA 41 – DADOS MEDIDOS NO DIA 07/03/2012 NA LINHA VERDE .....	172
TABELA 42 – DADOS DE UMIDADE ESPECÍFICA PARA CURITIBA NOS MESES DE MARÇO DE 2011 E 2013 .....	177
TABELA 43 – CONFIGURAÇÃO DO MODELO DA LINHA VERDE E SETE DE SETEMBRO – DIA MEDIDO.....	178
TABELA 44 – RESUMO ESTATÍSTICO DO MODELO DA LINHA VERDE E SETE DE SETEMBRO, CONSIDERANDO A TA MEDIDA E PREDITA COMO REFERÊNCIA .....	179
TABELA 45 – COMPARAÇÃO HORÁRIA ENTRE OS VALORES DE TRM MEDIDA E PREDITA NA SETE DE SETEMBRO .....	180
TABELA 46 – VALORES MÉDIOS MEDIDOS E PREDITOS: SETE DE SETEMBRO E LINHA VERDE .....	180

TABELA 47 – DADOS DE UMIDADE ESPECÍFICA PARA CURITIBA NOS MESES DE JANEIRO DE 2011 E 2013 .....	183
TABELA 48 – CONFIGURAÇÃO DO MODELO DA LINHA VERDE E SETE DE SETEMBRO – DIA TÍPICO DE PROJETO .....	183
TABELA 49 – SETE DE SETEMBRO: PROJEÇÃO HORIZONTAL EM M <sup>2</sup> .....	184
TABELA 50 – SETE DE SETEMBRO: CENÁRIO A.....	185
TABELA 51 – SETE DE SETEMBRO: CENÁRIO B E DIFERENÇAS EM RELAÇÃO AO CENÁRIO A.....	186
TABELA 52 – SETE DE SETEMBRO: COMPARAÇÃO ENTRE A TA DOS CENÁRIOS A E B.....	186
TABELA 53 – LINHA VERDE: PROJEÇÃO HORIZONTAL EM M <sup>2</sup> .....	189
TABELA 54 – LINHA VERDE: CENÁRIO A .....	190
TABELA 55 – LINHA VERDE: CENÁRIO B E DIFERENÇAS EM RELAÇÃO AO CENÁRIO A.....	191
TABELA 56 – LINHA VERDE: COMPARAÇÃO ENTRE A TA DOS CENÁRIOS A E B.....	192
TABELA 57 – CÁLCULO DOS RECORTES NA SETE DE SETEMBRO.....	195
TABELA 58 – CÁLCULO DOS RECORTES NA LINHA VERDE .....	195
TABELA 59 – RELAÇÃO ENTRE O ÍNDICE COBERTURA VEGETAL / DENSIDADE CONSTRUÍDA E A REDUÇÃO MÉDIA DE TA.....	196

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – INTERVENÇÕES PROPOSTAS NO PROJETO LINHA VERDE .....	41
QUADRO 2 – INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO UTILIZADOS EM SÃO PAULO E CURITIBA .....	90
QUADRO 3 – INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO UTILIZADOS EM GENEBRA E PARIS .....	91



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AL	–	Atmosfera Livre
CLA	–	Camada Limite Atmosférica
CLC	–	Camada Limite Convectiva
CLE	–	Camada Limite Estável
CLP	–	Camada Limite Planetária
CLS	–	Camada Limite Superficial
CR	–	Camada Residual
EIA	–	Estudo de Impacto Ambiental
FVC	–	Fator de Visão do Céu
IBGE	–	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	–	Instituto Nacional de Meteorologia
IPPUC	–	Instituto de Planejamento Urbano de Curitiba
ISO	–	International Organization for Standardization
LAD	–	Leaf Area Density
OUC-LV	–	Operação Urbana Consorciada Linha Verde
PET	–	Physiological Equivalent Temperature
PMC	–	Prefeitura Municipal de Curitiba
RAD	–	Root Area Density
RMC	–	Região Metropolitana de Curitiba
UHI	–	Urban Heat Island
UME	–	Excesso de Umidade Urbana
UTCI	–	Universal Thermal Climate Index

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Conceito	Unidade
$I_g$	– Radiação Solar Global Incidente	$W/m^2$
K	– Graus kelvin	K
$Q^*$	– a radiação líquida obtida para todos os comprimentos de onda	$W/m^2$
$Q_E$	– fluxo de calor latente	$W/m^2$
$Q_G$	– condução para ou a partir do solo subjacente	$W/m^2$
$Q_H$	– fluxo de calor sensível	$W/m^2$
$T_a$	– Temperatura do ar	$^{\circ}C$
$T_g$	– Temperatura de globo	$^{\circ}C$
$T_{rm}$	– Temperatura radiante média	$^{\circ}C$
$T_s$	– Temperatura de superfície	$^{\circ}C$
UR	– Umidade relativa	%
$v$	– Velocidade do ar	m/s
$V_a$	– Velocidade do ar ao nível do globo	m/s
W	– Taxa de trabalho mecânico realizado	$W/m^2$
W	– Taxa de trabalho mecânico realizado	$W/m^2$
$\Delta T_{u-r}$	– Intensidade da ilha de calor	$^{\circ}C$
$z_0$	– Comprimento de rugosidade	

## LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1	– EQUAÇÃO DO BALANÇO DE RADIAÇÃO.....	51
EQUAÇÃO 2	– EQUAÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA DO VOLUME DE AR CONTIDO NO INTERIOR DE UM CÂNION.....	53
EQUAÇÃO 3	– EQUAÇÃO DA INTENSIDADE DA ILHA DE CALOR RELACIONADA AO TAMANHO DA CIDADE OU À SUA POPULAÇÃO.....	59
EQUAÇÃO 4	– EQUAÇÃO DA INTENSIDADE DA ILHA DE CALOR RELACIONADA À RELAÇÃO H/W.....	59
EQUAÇÃO 5	– EQUAÇÃO DA INTENSIDADE DA ILHA DE CALOR RELACIONADA AO FVC.....	59
EQUAÇÃO 6	– EQUAÇÃO DO FLUXO DE AR NO INTERIOR DE UM CÂNION URBANO.....	64
EQUAÇÃO 7	– EQUAÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA DE UM SISTEMA SOLO-PLANTA-AR.....	68
EQUAÇÃO 8	– EQUAÇÃO DA TRM PELA FÓRMULA PARA CONVECÇÃO FORÇADA.....	92
EQUAÇÃO 9	– EQUAÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO À ALTURA Z	96
EQUAÇÃO 10	– EQUAÇÃO DO ERRO MÉDIO QUADRÁTICO.....	103
EQUAÇÃO 11	– EQUAÇÃO DO ÍNDICE DE CONCORDÂNCIA DE WILLMOTT .....	103
EQUAÇÃO 12	– EQUAÇÃO DO ÍNDICE COBERTURA VEGETAL POR DENSIDADE CONSTRUÍDA EM TERMOS DE REDUÇÃO DA TEMPERATURA DO AR.....	196

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>26</b>
2.1	Planejamento urbano de Curitiba .....	26
2.1.1	Metrô curitibano.....	32
2.1.2	Avenida Linha Verde .....	36
2.1.2.1	Principais projetos de intervenção para o compartimento urbano da antiga Rodovia Federal BR-116.....	37
2.1.2.2	Projeto Linha Verde.....	40
2.1.3	Caracterização climática de Curitiba .....	45
2.2	ASPECTOS CLIMÁTICOS DO AMBIENTE URBANO .....	45
2.2.1	Escalas meteorológicas.....	47
2.2.2	Balço de energia.....	50
2.2.3	Campo térmico urbano .....	55
2.2.4	Fluxo de ar em ambientes urbanos .....	62
2.2.5	Vegetação .....	67
2.3	SIMULAÇÃO DE CLIMA URBANO COM O MODELO ENVI-MET.....	74
2.3.1	Modelo atmosférico e de superfície.....	76
2.3.2	Modelo de vegetação e solo.....	77
2.3.3	Revisão de estudos .....	79
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>88</b>
3.1	OBTENÇÃO DAS VARIÁVEIS MICROCLIMÁTICAS.....	89
3.1.1	Instrumentos de medição das variáveis microclimáticas .....	89
3.1.2	Períodos de medição.....	94
3.2	ÍNDICES DE CONFORTO TÉRMICO UTILIZADOS .....	95
3.3	PROCEDIMENTOS PARA SIMULAÇÕES MICROCLIMÁTICAS.....	97
3.3.1	Modelagem da área de estudo.....	98
3.3.2	Configuração dos dados de entrada.....	99
3.3.3	Dados de saída .....	101
3.3.4	Validação dos resultados e testes estatísticos aplicados .....	102
<b>4</b>	<b>ESTUDOS PILOTO: APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS....</b>	<b>104</b>
4.1	Genebra e o projeto “Société Simple de Valorisation de Terrains à Genève - La Praille” (SOVALP).....	104
4.1.1	Genebra: pontos receptores.....	110
4.1.2	Genebra: análise das variáveis climáticas monitoradas .....	111
4.1.3	Genebra: modelagem (edição de área).....	111
4.1.4	Genebra: ajustes do modelo ENVI-met.....	114
4.1.5	Genebra: cenários hipotéticos .....	117
4.1.6	Genebra: estratégias de melhoria do ambiente térmico .....	119
4.1.7	Genebra: conclusão parcial .....	126
4.2	Paris e os projetos de reestruturação urbana Grand Paris, Zac Pajol e Jardins d’Eole.....	127

4.2.1	Paris: pontos receptores.....	131
4.2.2	Paris: análise das variáveis climáticas monitoradas.....	133
4.2.3	Paris: modelagem (edição de área).....	134
4.2.4	Paris: ajustes do modelo ENVI-met.....	137
4.2.5	Paris: cenários hipotéticos.....	141
4.2.6	Paris: estratégias de melhoria do ambiente térmico.....	143
4.2.7	Paris: conclusão parcial.....	148
4.3	São Paulo e as frações urbanas de Belém e Jardim Paulista .....	149
4.3.1	São Paulo: pontos receptores .....	152
4.3.2	São Paulo: análise das variáveis climáticas monitoradas.....	154
4.3.3	São Paulo: modelagem (edição de área) .....	155
4.3.4	São Paulo: ajustes do modelo ENVI-met.....	158
4.3.5	São Paulo: cenários hipotéticos .....	161
4.3.6	São Paulo: estratégias de melhoria do ambiente térmico.....	162
4.3.7	São Paulo: conclusão parcial .....	167
<b>5</b>	<b>CURITIBA: APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>169</b>
5.1	Curitiba: pontos receptores.....	169
5.2	Curitiba: análise das variáveis climáticas monitoradas na Sete de Setembro e na Linha Verde .....	171
5.3	Curitiba: modelagem (edição de área).....	172
5.3.1	Sete de Setembro.....	172
5.3.2	Linha Verde .....	174
5.4	Curitiba: ajustes do modelo ENVI-met.....	176
5.5	Sete de Setembro: cenário proposto .....	184
5.6	Sete de Setembro: estratégia de melhoria do ambiente térmico .....	185
5.7	Sete de Setembro: conclusão parcial .....	188
5.8	Linha Verde: cenário proposto.....	188
5.9	Linha Verde: estratégia de melhoria do ambiente térmico.....	190
5.10	Linha Verde: conclusão parcial.....	193
<b>6</b>	<b>PROPOSIÇÃO DO ÍNDICE .....</b>	<b>194</b>
<b>7</b>	<b>DISCUSSÃO.....</b>	<b>199</b>
<b>8</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>203</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>206</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Diante das inadequações térmicas verificadas nos recintos urbanos e dos fenômenos de expansão e de adensamento das cidades, a readequação dos espaços abertos torna-se emergencial, sendo a vegetação um elemento estratégico para alcançar ambientes com menor estresse térmico ao nível do pedestre, especialmente no período diurno e em situação de verão. Nesse sentido, a pesquisa<sup>1</sup> assume relevância ao propor um índice que contribua para uma análise da inserção de áreas verdes, forma urbana (densidade construída) *versus* melhoria no ambiente térmico externo.

O nível de urbanização mundial está previsto para aumentar de 52% em 2011 para 67% em 2050, correspondendo a um aumento de 2,6 bilhões de pessoas; isto é, em 2050, provavelmente apenas a população urbana mundial será do mesmo tamanho que a população total mundial contabilizada no ano de 2002 (NAÇÕES UNIDAS, 2012).

Historicamente, o rápido processo de urbanização teve início nas regiões mais desenvolvidas<sup>2</sup>. No entanto, a dinâmica do aumento populacional mundial demonstra que o crescimento futuro deve ser absorvido especialmente nas áreas urbanas das regiões menos desenvolvidas (NAÇÕES UNIDAS, 2012), sendo importante considerar a forma de distribuição espacial da população sobre o território. Especial atenção deve ser dada a questão do adensamento urbano, pois mais de 50% da população mundial estão distribuídos em menos de 3% da superfície terrestre, sendo que grande parte do contingente populacional é pobre e especialmente vulnerável à variabilidade climática e aos fenômenos climáticos extremos (GRIMMOND *et al.*, 2010).

Um fenômeno climático com significativo impacto à saúde pública é a onda de calor, ou canícula. Na Europa, a onda de calor ocorrida em agosto de 2003 resultou em um aumento de temperatura de até 6°C em algumas regiões, sendo

---

<sup>1</sup> A pesquisa dá continuidade a alguns estudos que vêm sendo realizados na Linha de Tecnologia e Desenvolvimento do Programa de Pós Graduação em Tecnologia (PPGTE) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), de forma a proporcionar aprofundamento aos temas correlatos (BARBOSA, 2008; LIMA, 2005; MINELLA, 2009; RASIA, 2011; ROSSI, 2004; ROSSI, 2012; SUGA, 2005; TAMURA, 2010).

<sup>2</sup> O mundo é dividido pelas Nações Unidas (2012) em regiões desenvolvidas (Europa, América do Norte, Austrália/ Nova Zelândia e Japão) e em desenvolvimento (África, Ásia, América Latina e Oceania).

relatada a morte de pelo menos 35.000 pessoas (ENDLICHER *et al.*, 2008). Na França, entre 4 a 18 de agosto, foi constatada a morte de quase 15.000 pessoas, equivalente a um aumento de 60% da mortalidade esperada para aquele período; de forma direta, os fatores atribuídos a essas mortes foram: insolação, desidratação e hipertemia (POUMADÈRE *et al.*, 2005). Na Suíça, a taxa de mortalidade para o período aumentou em 7%, com mais de 1.000 mortes (VAUTARD *et al.*, 2007).

A velocidade e a escala de crescimento populacional geram pressão sob a infraestrutura existente e, conseqüentemente, desafios aos governantes quanto ao desenvolvimento sustentável. Dessa forma, as ações no espaço urbano devem ser planejadas de modo a garantir a qualidade de vida das populações atuais e futuras, incluindo a redução dos impactos negativos das ações antrópicas no meio natural.

Uma das conseqüências da ação humana no meio natural é o que Oke (1987) chama de “modificação climática inadvertida”, uma vez que o processo de urbanização “produz alterações radicais na natureza da superfície e nas propriedades atmosféricas de um dado local” (OKE, 1987, p. 272, tradução nossa), contribuindo para a formação de um clima típico, o clima urbano. A morfologia da cidade, os materiais que compõem as superfícies urbanas (como concreto e asfalto), e a supressão da vegetação nativa estão associados às alterações microclimáticas, especialmente às tendências de aquecimento, seja no período diurno ou noturno; fator que ocasionalmente leva à inadequações térmicas nos espaços abertos.

Sob a ótica ambiental, uma das principais adversidades reside no fato das cidades estarem relacionadas indiretamente com a concentração dos gases de efeito estufa, devido à queima de combustíveis fósseis para aquecimento e refrigeração, ao processamento industrial e ao transporte de pessoas e bens. Acredita-se que mais de 70% das emissões de dióxido de carbono de origem antropogênica sejam advindas das áreas urbanas, sendo as cidades ricas dos países desenvolvidos as principais fontes emissoras (GRIMMOND *et al.*, 2010; MILLS, 2007).

O planejamento urbano diz respeito à organização espacial e à configuração da malha urbana; de forma que espaços sem um planejamento prévio (e adequado) podem acarretar em: problemas de mobilidade, disparidades entre bairros com maior e menor infraestrutura, segregação espacial, entre outros. Quando o desenho urbano não é bioclimaticamente orientado, o desconforto térmico pode atingir não apenas o interior das edificações (ocasionando gastos de energia),

mas também os espaços exteriores. Assim, a preocupação dos governantes e urbanistas com o crescimento exponencial da população nas grandes cidades deveria se estender à qualidade térmica dos espaços citadinos, contribuindo para maior vivência nas ruas, praças e parques e não somente nos espaços enclausurados.

Algumas consequências do fenômeno da urbanização são reguladas pela lei, como a poluição sonora, a poluição visual e a qualidade do ar. À margem de uma legislação urbana específica, com dispositivos legais direcionados à promoção de conforto térmico em espaços abertos, a temática da qualidade térmica de tais espaços dificilmente ultrapassa o campo científico.

Alta densidade populacional pode ser benéfica para minimizar o efeito antrópico sobre os ecossistemas locais, uma vez que demanda menor custo *per capita* no fornecimento de serviços básicos e infraestrutura. No entanto, a paisagem típica gerada pela profusão e concentração de edifícios de grande altura provoca alterações nos fluxos aerodinâmicos e nos balanços energético, hídrico e térmico do ambiente urbano, as quais são traduzidas em mudanças microclimáticas.

O desenho das ruas tem fundamental importância para o urbanismo bioclimático, uma vez que as ruas são os espaços de articulação entre as edificações e a camada intra-urbana. Sendo a interface entre as escalas urbana e arquitetônica, o desenho da rua afeta tanto o microclima externo influenciando no conforto térmico de espaços abertos, como no microclima interno das edificações, possuindo relação direta com o nível de energia consumida (ALI-TOUDERT; MAYER, 2006). Para o desenvolvimento de um planejamento urbano responsável, nota-se a necessidade do estabelecimento de diretrizes de desenho urbano climaticamente orientado, com base em dados quantitativos, mensurados, possíveis de serem aplicados na prática do planejamento urbano.

A vegetação, como parte do projeto urbano, tem sua importância reconhecida nas alterações microclimáticas (DACANAL; LABAKI; SILVA, 2010). Desta forma, a presente pesquisa busca responder a pergunta: como áreas verdes podem contribuir para um desenho urbano climatologicamente orientado?

A hipótese é de que áreas verdes podem ser utilizadas para a obtenção de condições microclimáticas mais favoráveis no ambiente urbano em situação de verão e em um período diurno específico.



O objetivo da pesquisa é a proposição de um índice que identifique a quantidade de cobertura vegetal necessária para reduzir a temperatura do ar em espaços abertos. O índice foi desenvolvido para a cidade de Curitiba, com os seguintes locais de interesse:

- Avenida Sete de Setembro, em razão do projeto para transformação de uma via exclusiva para circulação de ônibus em uma via pedonal e arborizada.
- Avenida Linha Verde, em razão do processo de transformação da rodovia em avenida urbana, o qual envolveu redefinição do uso do solo e inserção de áreas verdes.

São apresentados, também, estudos piloto desenvolvidos para as seguintes cidades:

- Genebra, Suíça: área incluída no projeto Sociétés Simple de Valorisation de Terrains à Genève - La Praille (SOVALP), o qual visa à reestruturação urbana de uma antiga área industrial.
- Paris, França: região no entorno da estação ferroviária Gare de l'Est com potencial para remodelação urbana.
- São Paulo: fração urbana dos bairros Belém e Jardim Paulista, com simulação computacional na localidade com indicação de inadequação térmica.

A escolha das cidades de Genebra e Paris surgiu do estágio doutoral realizado na primeira cidade. A partir disso, foram escolhidas áreas cujos planos urbanísticos pudessem promover alterações no ambiente térmico local de forma mais significativa. Além disso, em tais cidades, fenômenos como ondas de calor são comuns durante o verão, havendo necessidades de pesquisas que abordem estratégias de melhoria do ambiente térmico externo.

O estudo na cidade de São Paulo não trata de um plano urbano específico, mas possibilita verificar se a partir da estratégia adotada no cenário proposto simulado no local com maior indicação de inadequação térmica, seria possível chegar às condições do ambiente térmico da região com menor grau de estresse térmico.

Os objetivos específicos são:

- (a) analisar as condições microclimáticas locais, considerando cada área de estudo;
- (b) analisar os efeitos da vegetação urbana nos índices de conforto térmico estimados em localidades selecionadas;
- (c) analisar a influência do efeito da inclusão de áreas vegetadas para a determinação das condições ambientais (microclimáticas) externas, considerando cenários alternativos de simulação, e, por fim;
- (d) averiguar a acuidade do modelo ENVI-met quanto à predição de fatores microclimáticos.

O modelo de simulação computacional microclimática ENVI-met (termo derivado de *Environmental Meteorology*) (BRUSE, 2012), desenvolvido com o intuito de analisar, em escala reduzida, as interações entre desenho urbano e microclima, foi selecionado para a simulação de cenários urbanos hipotéticos, permitindo que os objetivos propostos na pesquisa fossem cumpridos. A experiência adquirida com o modelo de simulação computacional utilizado nos estudos de caso deu suporte para o desenvolvimento dos estudos em Curitiba.

Os índices de conforto térmico Temperatura Fisiológica Equivalente (PET) e Universal Thermal Climate Index (UTCI) foram utilizados para representar os níveis de conforto térmico.

A tese foi estruturada em oito capítulos.

No Capítulo 1 são abordadas a justificativa e a relevância da pesquisa, o problema de pesquisa, o objetivo geral, bem como os objetivos específicos.

O Capítulo 2 contempla as referências bibliográficas que serviram de base para a pesquisa, o qual está dividido em quatro seções. A primeira seção trata da trajetória do planejamento urbano em Curitiba e dos planos urbanos que levaram à atual configuração das avenidas Sete de Setembro e Linha Verde. Adicionalmente, apresenta-se uma breve caracterização climática de Curitiba. Na segunda seção são descritos os princípios físicos envolvidos no clima de cidades. Na terceira seção é apresentado o modelo ENVI-met, bem como uma compilação de alguns estudos nacionais e internacionais que utilizaram tal modelo para a simulação do clima urbano.

O Capítulo 3 é referente à metodologia aplicada, contendo a descrição da etapa de coleta de dados de campo para obtenção das variáveis microclimáticas, a apresentação dos índices de conforto térmico utilizados para avaliar as condições de conforto e os procedimentos gerais aplicados nas simulações microclimáticas, incluindo os testes estatísticos utilizados para validação dos resultados.

No Capítulo 4, são apresentados os estudos piloto para as cidades de Genebra, Paris e São Paulo, incluindo resultados e análises.

No Capítulo 5, os resultados da pesquisa para Curitiba são auferidos.

No Capítulo 6 é apresentado o índice que quantifica a cobertura vegetal necessária para reduzir a temperatura do ar em espaços abertos.

No Capítulo 7, apresenta-se uma discussão geral, abarcando os estudos desenvolvidos para Curitiba e para as cidades dos estudos piloto.

No Capítulo 8, apresentam-se as considerações finais. Essa seção trata da acuidade do modelo ENVI-met, da avaliação dos índices de conforto térmico PET e UTCI, das limitações da pesquisa e das sugestões para futuras pesquisas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica no qual está embasada a presente pesquisa é constituída de três seções.

A seção 2.1, refere-se à trajetória do planejamento urbano de Curitiba, com maior atenção aos planos que levaram à atual configuração da Avenida Sete de Setembro e da Avenida Linha Verde, ambas áreas de interesse da pesquisa. Apresenta-se, também, a proposta para a implementação do primeiro metrô do Estado, uma vez que estão previstas alterações na conformação da paisagem urbana na Avenida Sete de Setembro. Essa seção ainda contém uma breve caracterização climática da cidade de Curitiba.

Na seção 2.2, é realizada uma revisão de conceitos relevantes para o entendimento da formação do ambiente térmico externo. Nessa seção delimita-se a escala de interesse e descrevem-se o balanço de energia da superfície; as condições térmicas e o fluxo de ar em ambientes urbanos; além do efeito da vegetação.

Na seção 2.3, é apresentado o modelo ENVI-met, modelo de simulação microclimática utilizado na presente pesquisa, incluindo-se uma compilação de estudos que utilizaram tal ferramenta.

### 2.1 PLANEJAMENTO URBANO DE CURITIBA

Curitiba está situada na região sul do Brasil e abrange uma área de 435,036 km<sup>2</sup>. Para o ano de 2013, a população estimada foi de 1.848.946 habitantes (IBGE, 2014), distribuída por 75 bairros, sendo a cidade mais populosa do sul do Brasil e a oitava em nível nacional. Curitiba é, também, o polo econômico mais importante do Paraná e a capital do Estado.

A cidade e mais 28 municípios conurbados compreendem a Região Metropolitana de Curitiba (RMC), a qual faz divisa ao Norte com o Estado de São Paulo, e ao Sul, com o Estado de Santa Catarina.

A configuração urbana atual da cidade é resultado, sobretudo, da intrínseca relação entre o planejamento urbano e a administração pública. No período de 1910 a 1940, as ações urbanísticas em Curitiba tiveram um progressivo

aprimoramento técnico, propiciando o início das iniciativas formais de planejamento entre os anos de 1941 a 1943, com a elaboração do Plano Diretor de Urbanização de Curitiba ou Plano Agache<sup>3</sup>.

O Plano Agache setorizava a cidade em zonas funcionais e previa uma configuração radiocêntrica para a cidade, no qual o sistema viário ordenado pelo Plano de Avenidas<sup>4</sup> fazia as ligações entre as diferentes áreas especializadas. O sistema de circulação estava baseado em quatro vias perimetrais, cortadas por vias diametrais e radiais (INSTITUTO..., 2004). Aliado ao conceito de *Zoning*, ou zoneamento, outros planos compunham o Plano Agache, sendo estes: o Código de Edificações (implantado em 1953), que adequava os edifícios às soluções sanitárias estabelecendo, por exemplo, a obrigatoriedade dos recuos prediais e o Plano Massa que permitia a execução de galerias cobertas. Neste período, as questões ambientais eram tratadas “sob a ótica funcionalista da cidade-jardim” (INSTITUTO..., 2004, p. 50), sendo apresentadas diretrizes mais restritas comparadas aquelas de maior dimensão nos anos seguintes.

Em 1960, o Brasil observava um período de crescimento econômico, elevando sobremaneira o número de veículos nos grandes centros urbanos. Além disso, Curitiba lidava também com o aumento populacional. Conforme dados do IBGE (2010), em 1940 a população curitibana era de 140 mil habitantes, já em 1960 a população contabilizava mais de 360 mil habitantes. Neste contexto, o Plano foi parcialmente implantado, pois não considerava a expansão da cidade exigida pelo crescimento populacional, com vias de circulação mais largas na área central e propostas de adensamento e verticalizações definidas (INSTITUTO..., 2004). Outro fator negativo era a saturação do tráfego na parte central em decorrência da configuração radial do Plano Agache.

Os ideários da Carta de Atenas influenciaram de maneira decisiva tanto o Plano Agache, que propunha a setorização da cidade nas quatro grandes funções da Carta, quanto a iniciativa seguinte, o Plano Preliminar de Urbanismo (PPU) ou Plano Serete (entregue em junho de 1965), que “redimensionava tais funções e

---

<sup>3</sup> O contexto histórico da implantação do Plano Diretor de Urbanização de Curitiba coincide com o período do pós-guerra, quando o perfil econômico do país se volta para os investimentos na indústria e o desenvolvimento de projetos em áreas urbanas se torna favorável, em virtude do crescimento populacional com origem nos fluxos migratórios do campo para a cidade.

<sup>4</sup> Ainda durante o desenvolvimento do plano de urbanização, foi aprovado o Plano de Avenidas da Cidade pelo decreto-lei n° 23, que posteriormente integrou o Plano Diretor.

propunha, em sua versão original, o conceito de cidade-jardim, proposto no planejamento progressista de Le Corbusier” (DANNI-OLIVEIRA, 2003, p. 156).

As principais diretrizes do Plano Serete eram: uso e ocupação do solo diferenciada; configuração linear de expansão; criação de eixos estruturais; hierarquização do sistema viário; descongestionamento da área central; estabelecimento de limites físico-territoriais; policentrismo; disponibilização de serviços coletivos e criação de uma identidade à paisagem urbana (CAMPOS, 2005; ZAMBERLAN, 2006).

O Plano Diretor pactua com as diretrizes do PPU e é sancionado em 1966 (Lei 2.828 - CURITIBA, 1966). Mas as diretrizes fixadas no PPU só são implementadas no início dos anos 1970.

Com a intenção de garantir a expansão linear da cidade, além de descongestionar a área central, foram criados os eixos estruturais, um ao Norte e outro ao Sul, criando-se alternativas de deslocamentos independentes da área central. De forma a disciplinar o trânsito e diminuir os problemas de mobilidade, as vias do sistema viário foram hierarquizadas. No centro tradicional, é criado um Anel de Tráfego Lento e, adicionalmente, o zoneamento aplicado limitava o crescimento nessa área. Os projetos do sistema viário e do transporte de massa estavam integrados com as normativas de Uso e Ocupação do Solo formando um tripé organizacional (INSTITUTO..., 2004).

O Plano Diretor de 1966 passa pela primeira revisão em 1969, com a definição de novas zonas residenciais, comerciais, industriais e especiais, além do disciplinamento dos usos nas zonas de expansão. Os Setores Estruturais passam a ser descritos pelas zonas especiais e embora a proposta inicial estimulasse o adensamento nos eixos estruturais, havia uma limitação quanto às normas de ocupação do solo. Conforme o Artigo 37 da Seção II – Do zoneamento do Plano Diretor (CURITIBA, 1966), nos setores estruturais permitia-se a construção de até três torres de habitação coletiva em lotes com área de no mínimo 2000 m<sup>2</sup>; devendo as torres atender os seguintes requisitos: ter obrigatoriamente 63 m de altura, não ocupar mais de um terço do lote, ter recuo mínimo de 10 m do alinhamento predial, distar uma torre da outra em pelo menos 30 m, podendo o Instituto de Planejamento Urbano de Curitiba (IPPUC) aumentar a distância em função dos critérios de insolação. Cada torre deveria ter no mínimo 1000 m<sup>2</sup> de garagem e as áreas remanescentes deveriam ser ajardinadas.

Danni-Oliveira (2000) observa que essa tipologia poderia ter tido efeitos benéficos sobre a qualidade climática local, favorecendo a insolação dos edifícios, as condições de iluminação natural, as trocas de calor e umidade, a ventilação dos pavimentos construídos, a dispersão de poluentes e a desobstrução das vistas. Porém, “os rearranjos a que o Plano Serete foi submetido ao longo dos seus 25 anos de implementação foram conceitualmente pautados nas ideias de formas-tipo e de geometria do urbanismo progressista manifestados na estruturação e nas edificações das Vias Estruturais”, atendendo à pressão das forças político-econômicas locais e abandonando a ideia das torres-jardins (DANNI-OLIVEIRA, 2000, p. 105). Pressões que, na segunda metade da década de 1970, se manifestaram na adoção do Plano Massa, o qual priorizava o máximo adensamento ao longo dos eixos estruturais sem maiores considerações sobre a preservação da qualidade ambiental (MINELLA; RASIA; KRÜGER, 2010).

Nessa época a ocupação do território se dava majoritariamente nas direções nordeste e sudoeste. A partir da revisão da Lei de Zoneamento em 1972 (Lei 4.199 - CURITIBA, 1972) foi priorizada a implantação dos eixos estruturais; dando início as operações dos ônibus expressos. A partir dessa revisão, os eixos estruturais passam a receber maiores investimentos de infraestrutura justificados pelo adensamento. Conforme o IPPUC (INSTITUTO..., 2004, p. 38),

A partir de então, o papel atribuído ao Zoneamento e Uso do Solo, como um mecanismo para orientar a expansão urbana, sofre substancial mudança. De um simples instrumento disciplinador passa a ser utilizado como instrumento de efeito multiplicador, que catalisa e promove o desenvolvimento local.

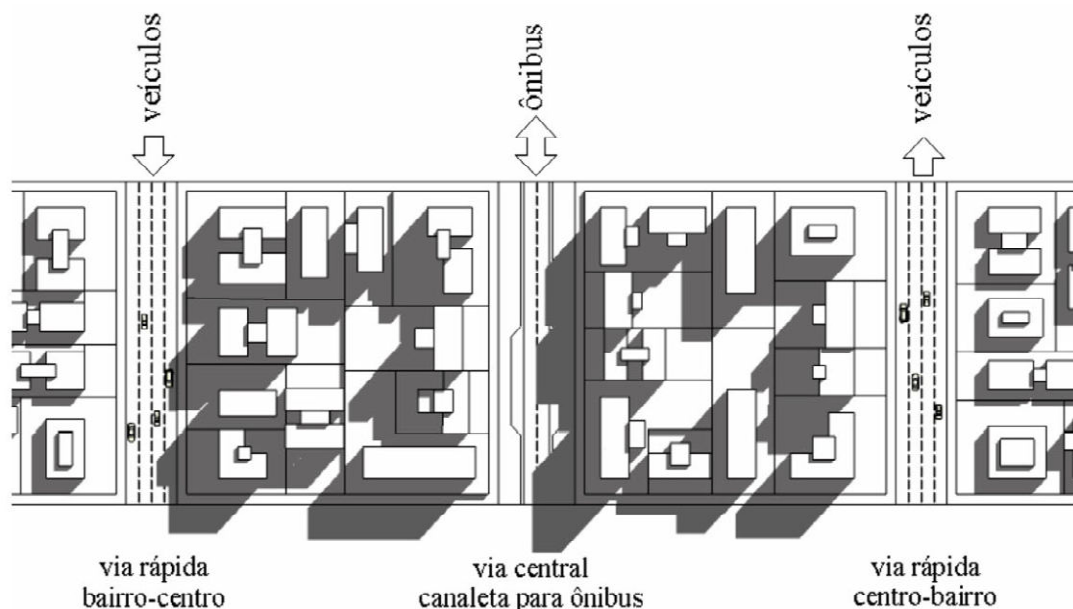
A proposta linear acabou integrando vários centros, criando um policentrismo. O adensamento linear nos eixos estruturais em direção aos bairros contribuiu para a expansão, também, das atividades terciárias nos mesmos.

No que tange as ações ambientais, foi priorizada a criação de uma rede espacial de áreas verdes localizada nos fundos dos vales. O objetivo era “resolver os problemas de saneamento básico, das constantes cheias dos rios e perturbações no centro da cidade” (ZAMBERLAN, 2006, p. 87). Esta rede dá origem aos parques urbanos, proporcionando áreas de lazer à população.

A Lei de Zoneamento do Uso do Solo é revista novamente em 1975 (Lei 5.234 - CURITIBA, 1975), a qual vigora até o ano de 2000. O ajuste nessa lei teve

por objetivo “oferecer alguma estabilidade ao mercado imobiliário e comprometê-lo de vez ao formato jurídico do Plano Diretor” (INSTITUTO..., 2004, p. 40). A partir dessa lei, a ocupação e o adensamento das áreas periféricas são limitados; em contrapartida, nas áreas adjacentes aos Setores Estruturais são liberadas áreas residenciais de média densidade, bem como áreas de comércio e de prestação de serviço, aproveitando a infraestrutura existente e a possibilidade do Sistema de Transporte Coletivo absorver parte do incremento por mobilidade.

Para que o transporte público cumprisse seu papel de indutor do crescimento e absorvesse a demanda necessária, foi desenvolvido um sistema trinário de vias, inovador para a época. Nestes eixos estruturais, o transporte coletivo, mais especificamente a linha expressa, é privilegiado por um corredor central exclusivo. Essa via central é ladeada por duas vias de tráfego lento que atendem as atividades lindeiras, contendo uma pista de estacionamento e uma ou duas pistas de rolagem. Paralelamente, existem as vias rápidas, uma para deslocamento bairro-centro, e outra no sentido oposto, com três ou mais pistas de rolagem. Todo este conjunto forma o sistema trinário (Figura 1) (INSTITUTO..., 2004).



**Figura 1 – Sistema trinário de vias em Curitiba**

Fonte: Campos (2005, p. 52)



Conforme Zamberlan (2006) os eixos Norte-Sul, Leste-Oeste e Boqueirão são estruturados segundo dois tripés: no primeiro são utilizados como instrumentos o uso do solo, o sistema viário e o transporte público; no segundo são criadas as bases para maior desenvolvimento social e econômico e garantia da conservação ambiental.

O Plano Massa foi instituído pelo decreto 408/76 (CURITIBA, 1976, citado por INSTITUTO..., 2004), vindo ser um elemento definidor da paisagem urbana dos eixos estruturais. Nesses, as edificações são caracterizadas por torres construídas sobre embasamento comercial ou de serviço de dois pavimentos, cuja altura máxima deve ser de 10 m. O segundo pavimento deve se projetar sobre o alinhamento predial, enquanto o recuo mínimo de 4 m limita o pavimento térreo, constituindo, assim, em toda a extensão da testada do lote, uma galeria longitudinal coberta com pé-direito mínimo de 3,50 m. O embasamento deve estar de acordo com o decreto 190 do Plano Massa, o qual permite a projeção deste sobre toda a área do terreno, além de não ser considerado no cálculo do potencial construtivo. Para a projeção da torre em relação ao lote, é considerado o limite de, no máximo, a metade da área do lote. Para os recuos laterais da torre é aplicado, inicialmente, um valor mínimo de 2,50 m. A torre pode ser de uso residencial, comercial ou de serviço.

Em Curitiba, a legislação segue o padrão chamado de *floor ratio area*, no qual o potencial construtivo depende da área do lote multiplicada pelo coeficiente de aproveitamento, que para os Setores Estruturais é de 4 (quatro). Não há limite de altura para as edificações nas estruturais, reforçando a tendência destes eixos de configurarem cânions urbanos.

O Plano Diretor é revisto, resultando na Lei 9.800/00 (CURITIBA, 2000). Os Setores Especiais são subdivididos de acordo com sua destinação prévia, destacando-se como uma das novidades o Setor Especial do Eixo de Adensamento. Como uma das principais alterações, cita-se, também, a criação de um eixo de desenvolvimento metropolitano.

Nos Setores Especiais dos Eixos de Adensamento, a verticalização é incentivada com o aproveitamento da infraestrutura existente, sendo liberada a construção de edifícios com até 10 pavimentos, por meio do incentivo do Solo Criado

e da Transferência do Potencial Construtivo<sup>5</sup>. Quanto ao uso, as edificações podem ser residenciais, comerciais e de serviços.

É também criado o eixo de desenvolvimento metropolitano na BR-116, com a transformação de um trecho da rodovia federal em via urbana, visando facilitar as ligações intra-urbanas, havendo uma importante alteração dos parâmetros de uso e ocupação do solo. O zoneamento da BR-116 passa de Setor Especial de Serviços para Setor Estrutural BR-116. Inserido no contexto de planejamento regional, o eixo metropolitano da BR-116 foi implantado como sexto eixo estrutural. Esse eixo foi posteriormente denominado de Avenida Linha Verde, sendo local de interesse para a presente pesquisa, juntamente com a proposta para a implantação do primeiro metrô de Curitiba, apresentado a seguir.

### 2.1.1 Metrô curitibano

Em Curitiba, paralelamente ao processo de desenvolvimento e consolidação do sistema de transporte urbano, a Prefeitura apresentou propostas de modais sobre trilhos, de forma a complementar a Rede Integrada de Transporte (RIT). Desde a circulação do último bonde em 1952, o projeto denominado Linha Azul – Santa Cândida/CIC Sul do Sistema de Metrô de Curitiba no eixo Norte/Sul é o oitavo projeto a reconsiderar o transporte de passageiros sobre trilhos (CURITIBA/ INSTITUTO..., 2010).

Considerando toda a RIT, os eixos Norte e Sul são os que possuem maior carregamento, com circulação diária de 372.000 passageiros (CURITIBA/ INSTITUTO..., 2010). Para efeitos de comparação, em São Paulo, considerando o total de passageiros para as duas operadoras pelo número de linhas, o carregamento resulta em pouco mais de 312.000 passageiros por dia (Tabela 1).

---

<sup>5</sup> A Transferência do Potencial Construtivo, bem como o Solo Criado são instrumentos de política urbana voltados para a preservação de áreas de interesse público. A lei do Solo Criado foi implantada em 1982 com a Lei 6.337 (CURITIBA, 1982), possibilitando a transferência de potencial construtivo de edificações de valor histórico, cultural e/ou arquitetônico para outras partes da cidade, com a condição de que o patrimônio seja mantido e preservado. A nova lei amplia este conceito para a área ambiental, e passa a incluir a região metropolitana.

Tabela 1 – Carregamentos nos sistemas de metrô

Posição	Operadora	Nº de Linhas	Passageiros / Dia útil
1	METRÔ (SP)	4	1.795.813
2	CPTM (SP)	6	1.326.214
3	METRÔ (RJ)	2	467.586
4	SUPERVIA (RJ)	6	357.823

Fonte: URBS (2007, citado em CURITIBA/INSTITUTO..., 2010)

Desse modo, desde 2005, visando aumentar a capacidade de transporte público do eixo Norte/Sul, estudos para a implantação do primeiro metrô do Estado do Paraná vêm sendo desenvolvidos. A construção da Linha Azul está proposta em duas etapas (Figura 2).



Figura 2 – Previsão da localização das estações de metrô

Fonte: Castro (2014)

A primeira etapa ligará o sul da cidade, Bairro CIC, até o Terminal do Cabral, incluindo 14 estações distribuídas em uma extensão de 17,6 km. A previsão é que este sistema suporte uma demanda diária de até 350.000 passageiros (CURITIBA/ INSTITUTO..., 2010). O prazo para a conclusão desse trecho é o ano de

2019. Na segunda etapa, pretende-se que o traçado do metrô continue até o Terminal do Santa Cândida, completando 22 km de extensão e totalizando 16 estações. Com a conclusão das duas etapas, em 2050 poderia ser esperada uma demanda de 600 mil passageiros/dia (CURITIBA/ INSTITUTO..., 2010).

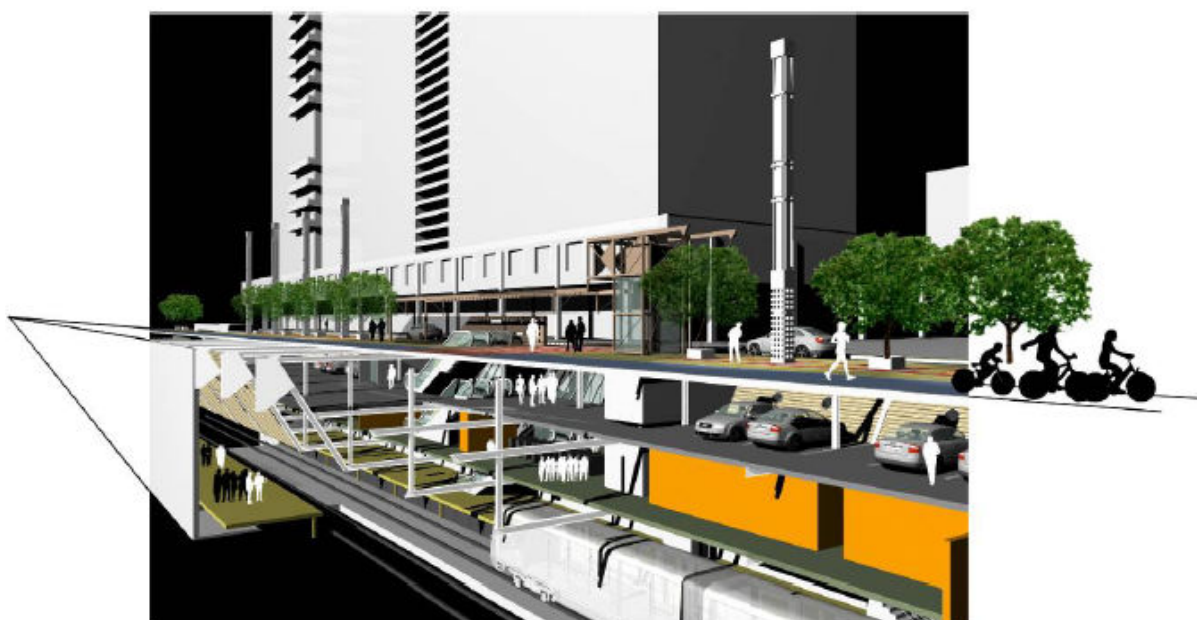
Em 2013, a Prefeitura lançou um Procedimento de Manifestação de Interesse por meio do Chamamento Público nº 01/2013 para readequar o projeto original desenvolvido pelo Consórcio Novomodal, corrigindo prazos e orçamentos. Dentre os estudos apresentados o escolhido foi o do grupo Triunfo Participações e Investimentos S.A. (TPI). Uma das vantagens contidas no estudo do grupo TPI foi aumentar o trecho anteriormente proposto em 3,4 km, correspondente a um aumento de 20%; proporcionando benefícios aos usuários ao manter a mesma tarifa/km e economicidade.

Além da vantagem de atender a crescente demanda, proporcionando um aumento da capacidade de transporte público e favorecendo a mobilidade urbana, a implementação do sistema de metrô promove o desenvolvimento da cidade. Curitiba possui a vantagem do aproveitamento de vias destinadas ao uso exclusivo de ônibus para a construção do metrô, o que evitará desapropriações, e de um sistema viário hierarquizado. Serão utilizados sistemas construtivos distintos: os sistemas Cut and Cover e New Austrian Method (NATM) - túnel de baixa e alta profundidade, elevado e ainda a tecnologia *Shield* do tipo EPB; este último a ser utilizado de forma majoritária pela proposta da TPI. Os dois primeiros sistemas deverão ser utilizados na construção das estações (CURITIBA, 2013). O sistema elevado, com extensão de 2,2 km, será implantado unicamente no primeiro trecho a partir do CIC, na Estação CIC – SUL, local no qual está previsto um terminal de integração, com o objetivo de aliviar a demanda dos Terminais Pinheirinho e Capão Raso. A tecnologia *Shield* deverá ser empregada em todo trecho subterrâneo, correspondente a uma extensão de aproximadamente 15 km (CURITIBA, 2014).

Por oferecer redução no tempo de viagem, o metrô deverá atrair novos passageiros, retirando do sistema viário um número considerável de automóveis. Este dado é de suma importância, uma vez que Curitiba possui um carro para cada 1,7 habitantes, sendo considerada a cidade mais motorizada do país (CURITIBA/ INSTITUTO..., 2010).

O sistema de metrô será integrado aos ônibus da Rede de Transporte, com a vantagem da tarifa única. O projeto busca, também, integrar outros modais, oferecendo estacionamento para veículos e bicicletas.

Com a liberação das canaletas exclusivas ao tráfego dos ônibus biarticulados, prevê-se a requalificação urbana destas para uma via pedonal, com ciclovia, equipamentos de lazer, quiosques comerciais, bilheterias, áreas de convivência e arborização (Figura 3). Sobre as canaletas, irá se configurar um maciço corredor verde, que somado à configuração peculiar dos Setores Estruturais, poderá ter efeito benéfico sobre as condições microclimáticas da região em situações de verão.



**Figura 3 – Imagem ilustrativa do metrô de Curitiba**

**Fonte: Curitiba/ IPPUC (2010)**

O metrô irá atingir, de forma direta, a dinâmica socioeconômica de vinte bairros da cidade com média densidade populacional, entre 40 e 100 hab/ha (CURITIBA/ INSTITUTO..., 2010). Nos setores centrais, que se estende do Portão (ao Sul) até o Cabral (ao Norte), há trechos cujas densidades variam de 80 a 100 hab/ha, até acima de 100 hab/ha. Próximo às extremidades do eixo estruturante, a densidade varia entre 20 a 60 hab/ha, até menos de 20 hab/ha. Esta discrepância também está relacionada à verticalidade das edificações, que acaba sendo muito

mais expressiva na região central; indicando “a existência, ainda hoje, de um potencial de adensamento e de verticalização ao longo do eixo” (CURITIBA/ INSTITUTO..., 2010, p. 329). A implantação do metrô pode incentivar a exploração do potencial construtivo ao longo do eixo, com otimização da infraestrutura.

O Estudo de Impacto Ambiental (EIA) em atendimento à Resolução CONAMA 001, de 23 de janeiro de 1986, Artigo 2, foi apresentado em 2010 (CURITIBA/ INSTITUTO..., 2010) e contém a análise dos potenciais impactos gerados pela implementação do sistema de metrô. Segundo consta no documento, o desenvolvimento da cidade de Curitiba alterou as condições físicas e biológicas da região, com rios retificados e canalizados, de modo que está prevista uma alteração de um único fragmento florestal no terreno a ser utilizado como pátio (CURITIBA/ INSTITUTO..., 2010).

No EIA foi calculada a quantidade de emissões possível de mitigação devido à implantação da Linha Azul do Metrô de Curitiba. Para a estimativa foram calculados os números de linhas de ônibus que deixarão de circular, como também foram consideradas as linhas que terão sua quilometragem reduzida. Consideraram-se, também, dados meteorológicos e de qualidade do ar, fatores médios de emissão dos ônibus a diesel, inventário de emissões veiculares e um modelo matemático tridimensional da qualidade do ar - Weather Research and Forecasting Atmospheric Chemistry. O sistema de metrô ao utilizar energia elétrica de origem hídrica se torna um meio de transporte mais limpo comparado aos ônibus que utilizam combustível nos motores de combustão interna; mesmo que, para movimentação dos carros, haja emissão de particulados, a quantidade no metrô é menor em relação aos ônibus (CURITIBA/ INSTITUTO..., 2010). Estima-se, também, uma redução de até 3 dB(A) nos níveis sonoros produzidos pelo tráfego atual, baseando-se em uma projeção com total supressão de veículos pesados nas canaletas e em uma redução de 10 a 20% no fluxo de veículos leves (CURITIBA/ INSTITUTO..., 2010).

### 2.1.2 Avenida Linha Verde

As informações reunidas nesta seção foram retiradas, em sua maioria, do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e do Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), desenvolvidos pelo Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba

(IPPUC) e pela Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas (FIPE). A premissa de tais documentos (o primeiro dividido em quatro volumes e o segundo em volume único), apresentados em audiência pública em 01/03/2012, era o licenciamento do instrumento Operação Urbana Consorciada Linha Verde (OUC-LV), visando à Licença Ambiental Prévia (LAP), cuja viabilidade foi aprovada em 12/03/2012.

Esta seção tem início com a contextualização das ações que levaram a criação da Linha Verde, inaugurada no ano de 2009.

#### 2.1.2.1 Principais projetos de intervenção para o compartimento urbano da antiga Rodovia Federal BR-116

A antiga Rodovia Federal BR-116, atual Linha Verde, liga o Sul do Brasil as Regiões Sudeste e Norte do país. A configuração da malha viária permite ligação da antiga BR-116 com Rodovias Federais, como a BR-376 (acesso ao Litoral Sul brasileiro); a BR-277 (acesso à Região Oeste do Paraná e à Região Leste/ Porto de Paranaguá) e a BR-476 (acesso ao Município de União da Vitória).

Na época da construção da BR-116, na segunda metade da década de 1950, o eixo viário estava inserido a leste e distante do espaço urbano do município de Curitiba. O Plano Diretor de Curitiba de 1966 estabeleceu os Eixos Estruturais no sentido nordeste-sudeste. No entanto, a valorização econômica desses eixos de adensamento, aliada à falta de controle em locais com restrição à ocupação, levaram a população de menor renda a buscar alternativas de habitação em locais com pouca infraestrutura e de menor valor comercial, surgindo bairros a Leste da rodovia (IPPUC/FIPE, 2012a). Em razão da consolidação da ocupação urbana desses locais, a partir de políticas de saneamento, e do processo de expansão urbana, a antiga BR-116 deixou de ser o marco limítrofe da cidade e veio a se tornar uma barreira física, pois seccionava a cidade em duas partes.

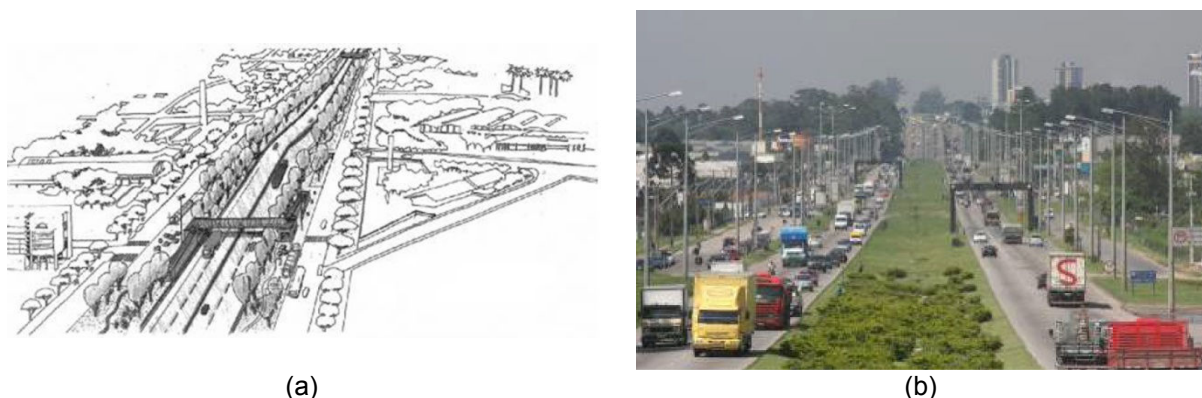
Com a intensificação do aumento populacional nas décadas de 1970 e 1980 e do tráfego intenso de veículos, a segurança dos pedestres estava comprometida de maneira que o desenvolvimento de projetos estava voltado, fundamentalmente, à integração entre os dois lados da rodovia.

Até o ano de 2002, as decisões sobre as intervenções na antiga BR-116 lidavam com conflitos de competências, uma vez que a rodovia era gerenciada pelo

Governo Federal e administrada pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). Dessa maneira, nas décadas de 1980 e 1990 os projetos desenvolvidos pela Prefeitura Municipal de Curitiba (PMC) eram voltados à amenização dos impactos do eixo viário no tecido urbano, mas com abrangência limitada. Nesse período, destaca-se o projeto BR-Vida, desenvolvido no ano de 1992.

Visando ao desvio de parte do tráfego da BR-116, especialmente o de carga, a implantação do Contorno Leste estava sendo executada pelo DNER em 1996, havendo expectativa da liberação do eixo rodoviário no trecho urbano do município de Curitiba, possibilitando a adequação da inserção do compartimento no tecido urbanizado. Desta maneira, no mesmo ano, foi desenvolvido o projeto BR-Cidade, como um aprimoramento das ações previstas no projeto BR-Vida, indo além das questões viárias, e abarcando as mudanças no zoneamento urbano. Contudo, além do custo para implementação, a vinculação desse projeto à conclusão da obra do contorno rodoviário impediu a realização da maior parte das intervenções propostas.

Com previsão de término entre os anos de 1997 e 1998, os Contornos Rodoviários Leste e Sul só foram concluídos em 2002. Mesmo devendo ser preservada a função de rodovia, o projeto BR-Cidade (Figura 4) possibilitou a mudança na tipologia de uso e ocupação de solo da região, por meio da revisão da Lei 5.234/75 (CURITIBA, 1975) mediante a Lei 9.800/2000 (CURITIBA, 2000).



**Figura 4 – (a) perspectiva geral do Projeto BR-Cidade e (b) vista parcial do compartimento da BR-116 contendo as intervenções realizadas pelo Projeto BR-Cidade**

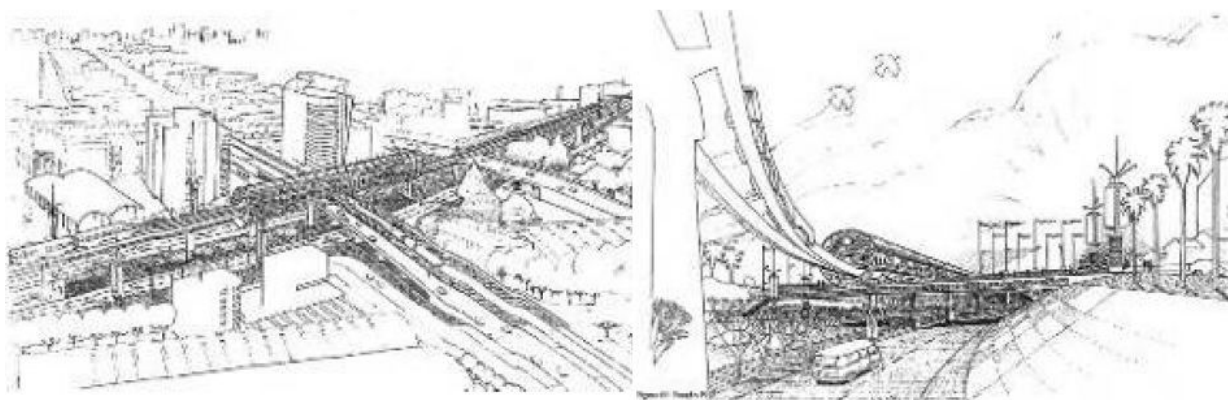
Fonte: IPPUC/FIPE (2012a, Cap. I, p. 24 e p. 26)



O perfil do Eixo da BR-116, assim como das áreas adjacentes, foi alterado, e a vocação como “elemento de integração metropolitana” (IPPUC/FIPE, 2012, p. 119) foi valorizada. A transformação incluiu a criação do Setor Especial da BR-116, que compreendia lotes à margem da rodovia com profundidade de até 100 m. Nessa faixa, o coeficiente de aproveitamento igual a 1 e a altura limitada a 6 pavimentos poderiam ser majorados em coeficiente 3 e altura até 12 pavimentos, por meio da outorga onerosa de potencial construtivo adicional. No entorno desse perímetro, foi definida a Zona de Transição da BR-116, correspondente a uma faixa de aproximadamente 150 m. O coeficiente de aproveitamento era igual a 1 e a altura limitada a 4 pavimentos, podendo atingir coeficiente de 1,8 e até 6 pavimentos.

De forma a estimular a verticalização, foram criados os Polos nas primeiras quadras situadas “junto às interseções da rodovia com os binários de tráfego” (IPPUC/FIPE, 2012b, p. 118). Nessa área foram permitidos usos habitacionais, comunitários 1 e 2 e comércio e serviço setorial, com coeficiente igual a 1 e altura livre; parâmetros que podem ser majorados até coeficiente 3, mediante outorga onerosa de potencial construtivo.

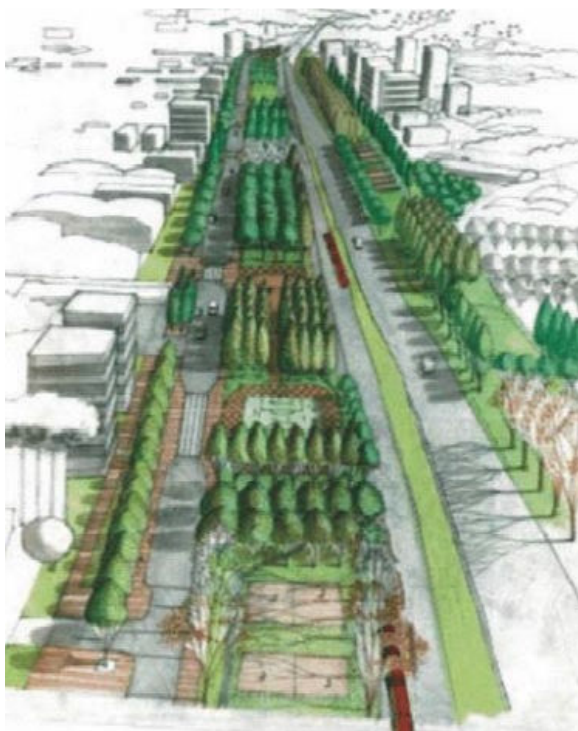
Outro projeto que considerou a configuração da BR-116 como importante via urbana para deslocamentos metropolitanos e locais foi o Sistema de Transporte de Alta Capacidade, desenvolvido em 1999, com o objetivo de integração metropolitana por meio da implementação de um eixo de desenvolvimento (IPPUC/FIPE, 2012a), ver Figura 5. Nessa época, havia perspectiva de conclusão das obras do contorno rodoviário e de um financiamento do Japan Bank for International Cooperation (JBIC).



**Figura 5 – Ilustração do Sistema de Transporte de Alta Capacidade**

**Fonte: CURITIBA (1999 citado por IPPUC/FIPEa, 2012, p. 29)**

Na prática, “o projeto contemplava a implementação de uma nova Avenida na BR-116 juntamente com um sistema de transporte de alta velocidade implantado em uma estrutura elevada sobre o canteiro central [...], viabilizado pelo modal *monorail*” (CURITIBA, 1999 citado por IPPUC/FIPEa, 2012, p. 29). A composição da nova avenida seria formada por vias para cada direção e canteiros (central e laterais), os quais constituiriam parque lineares (Figura 6).



**Figura 6 – Ilustração da avenida proposta com o parque linear**  
**Fonte: CURITIBA (1999 citado por IPPUC/FIPEa, 2012, p. 29)**

No entanto, após dois anos de negociação entre o Governo Federal e o JBIC, o projeto não pode ser viabilizado, fazendo com que a administração pública procurasse um financiamento junto ao Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), iniciando, então, o projeto Linha Verde.

#### 2.1.2.2 Projeto Linha Verde

As alterações no zoneamento urbano e na tipologia de uso e ocupação do solo foram definitivas para que a Linha Verde pudesse se constituir como eixo

indutor de crescimento e desenvolvimento da cidade, pois permite “incremento das atividades econômicas” e a “revitalização urbanística e ambiental” (IPPUC/FIPE, 2012a, Cap. I, p. 31).

O traçado da Linha Verde estende-se por 22 bairros em uma extensão de aproximadamente 22 km, atravessando o município de Norte (Bairro Atuba) a Sul (Bairros Capão Raso e Pinheirinho) (IPPUC/FIPE, 2012a). O traçado da Linha Verde permite ainda integração com outros dois eixos: o eixo estrutural Leste nas proximidades do Jardim Botânico e o eixo Boqueirão, na Avenida Marechal Floriano Peixoto (CURITIBA/ INSTITUTO..., 2010).

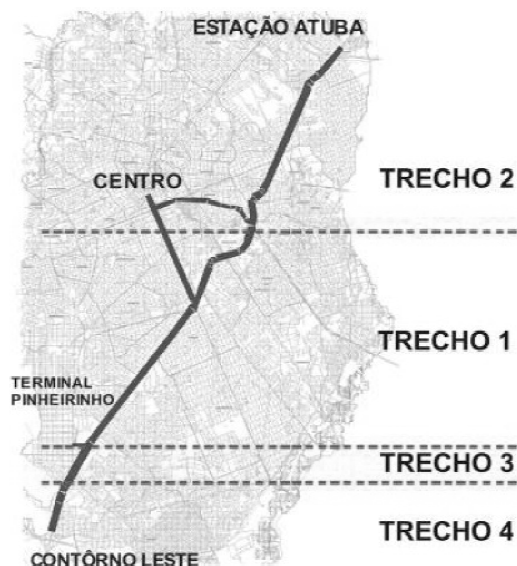
Algumas das intervenções físicas proposta para sistema viário, transporte, uso do solo, meio ambiente outros são descritas no Quadro 1.

<b>Projeto</b>	<b>Intervenções abarcadas no Projeto Linha Verde</b>
Sistema viário	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implantação do sistema trinário, o qual é composto por uma via central, para uso exclusivo do transporte coletivo, ladeado por vias marginais em cada sentido (com três faixas de circulação). Completa o sistema viário, duas vias locais com uma faixa de circulação e uma área de estacionamento.</li> <li>- Recuperação das vias centrais e marginais.</li> <li>- Trincheiras em cruzamentos considerados críticos.</li> <li>- Semaforização dos cruzamentos.</li> <li>- Passarela para travessia de pedestres e implantação de calçadas.</li> <li>- Construção de aproximadamente 22 km de ciclovias.</li> <li>- Sinalização horizontal, vertical, semaforizada e indicativa.</li> </ul>
Transporte	<ul style="list-style-type: none"> <li>- modal no sistema Bus Rapid Transit (BRT).</li> <li>- 32 estações tubo localizadas aproximadamente a cada 1km, para o atendimento de três linhas de transporte, divididas em cinco modelos distintos.</li> </ul>
Zoneamento e Uso do Solo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zona de serviços passa a ser zona de uso misto.</li> <li>- Possibilidade da utilização de instrumento de aquisição e/ou transferência de potencial construtivo para acréscimo de potencial construtivo.</li> </ul>
Meio Ambiente	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Parque Linear e tratamento paisagístico, com plantio de 5.200 árvores (22 tipos de espécies nativas).</li> <li>Recuperação de três parques urbanos ao longo do eixo.</li> <li>- Criação de rede de microclima-drenagem, contenção de cheias e preservação de fundos de vale.</li> <li>- Incentivos para aumentar a permeabilidade do solo.</li> <li>- Utilização de Biocombustível em ônibus do transporte coletivo.</li> <li>- Estações providas de mecanismos de coleta, armazenamento e reuso da água da chuva.</li> <li>- Incentivo ao uso da bicicleta com a implantação das ciclovias.</li> <li>- Saneamento (recuperação e ampliação das redes de coleta).</li> </ul>
Outros	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implantação de um sistema de iluminação Pública.</li> <li>- Sistema de monitoração (segurança pública).</li> <li>- Programa de habitação de interesse social.</li> </ul>

**Quadro 1 – Intervenções propostas no Projeto Linha Verde**

Fonte: Adaptado de IPPUC/FIPE (2012a)

Para a implementação das intervenções propostas, o eixo da Linha Verde foi dividida em quatro trechos (Figura 7).



**Figura 7 – Trechos de implementação do Projeto Linha Verde**

Fonte: IPPUC/FIPE (2012a, Cap. I, p. 38)

O primeiro trecho a receber a infraestrutura viária prevista nos planos de consolidação da Linha Verde foi o trecho do eixo sul, denominado Linha Verde Sul, compreendido desde a Rua João Rodrigues Pinheiro até o acesso da Universidade Federal do Paraná. Esse trecho foi concluído em 2009 (Figura 8) - dois anos após o início das obras. As obras na Linha Verde Norte, segundo trecho, tiveram início em 2011. Os trechos 3 e 4 referem-se ao prolongamento da Linha Verde Sul do Pinheirinho até o Contorno Sul.



**Figura 8 – Trecho 1 da Linha Verde finalizado**

Fonte: IPPUC/FIPE (2012a, Cap. I, p. 39)

Segundo consta em IPPUC/FIPE (2012a, Cap. I, p. 41),

A Operação Urbana Consorciada é um instrumento de legislação urbanística que excepciona a Lei de Zoneamento, Uso e Ocupação do Solo, sendo utilizada como estratégia para requalificar compartimentos urbanos das cidades, bem como para implantar e ampliar sua infraestrutura, por meio de intervenções em áreas onde haja interesse imobiliário com demanda acima dos limites estabelecidos pela legislação urbanística. Esse instrumento permite que os municípios outorguem, de forma onerosa, direitos urbanísticos adicionais a uma área urbana previamente delimitada.

Em 2011 a Operação Urbana Consorciada Linha Verde (OUC-LV) possuía 5,7 milhões de m<sup>2</sup> de área construída, resultando em um coeficiente de aproveitamento de 0,27, valor considerado baixo (IPPUC/FIPE, 2012b, Cap. IV, p. 125), revelando o potencial incremento na densidade construída e no crescimento demográfico dessa região.

Foram considerados incentivos para:

- Uso comercial nos Polos, de forma a constituir polos de investimentos e geração de empregos; e residencial ou misto no Setor Especial da Linha Verde.
- Implantação de áreas arborizadas, ajardinadas e permeáveis.
- Remembramento de lotes.

As zonas previstas foram:

- Polo da Linha Verde (POLO-LV)
- Setor Especial da Linha Verde (SE-LV)
- Zona de Transição da Linha Verde (ZT-LV)
- Zona Especial Desportiva (ZED)
- Zona Residencial 4 (ZR-4)
- Zona de Serviço 2 (ZS-2)
- Zona Industrial (ZI)

As principais medidas adotadas para dinamizar a ocupação, mediante outorga onerosa do direito de construção constam na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros construtivos definidos para os diferentes setores da OUC-LV.

Zona/ Setor de uso	Parâmetros Construtivos			
	Básico		Potencial adicional	
	Coeficiente	Altura	Coeficiente	Altura
POLO-LV	1,0	Livre	4,0	Livre
SE-LV	1,0	6	4,0	Livre
ZT-LV	1,0	4	2,5	8
ZED	0,5	4	2,5 (Habitação Transitória) e 1,0 (Comercial)	8
ZR-4	2,0	6	2,5	8

Fonte: IPPUC/FIPE (2012b, Cap. IV, p. 122)

Segundo IPPUC/FIPE (2012b, Cap. IV, p. 139),

O processo de expansão para essas áreas, especialmente por meio de novas edificações verticais, deverá ser estimulado por vários fatores. Dentre estes se destacam a saturação das áreas tradicionais e a implantação das melhorias urbanas previstas, em parte associadas aos investimentos em transportes, além dos preços da terra em melhores condições de concorrência, face ao elevado custo dos terrenos nas áreas mais consolidadas da cidade.

Para conclusão da OUC está previsto um período de 30 anos. A Figura 9 corresponde ao cenário atual e ao cenário possível a partir das novas diretrizes urbanas.



Figura 9 – Linha Verde: (a) cenário atual; (b) previsão de cenário futuro

Fonte: Curitiba (2013)

A conclusão da OUC-LV e a implantação do metrô propiciariam não apenas uma nova conformação da paisagem urbana, mas também ocasionaria impactos microclimáticos, sendo fundamental uma descrição do clima da cidade.

### 2.1.3 Caracterização climática de Curitiba

Conforme Danni-Oliveira (1999), os centros de ação atuantes na região Sul são: o Anticiclone Migratório Polar, o Anticiclone Subtropical do Atlântico, a Depressão do Chaco e a Zona de Convergência Intertropical. Tais centros de ação influenciam a formação das seguintes massas de ar: Tropical Atlântica (TA), Polar Atlântica (PA), Tropical Equatorial (Tc) e Equatorial Continental (Ec) (MONTEIRO, 1963).

Segundo Fill, Sugai e Hilu (1999), no período de outubro a março, a TA de baixa pressão pode provocar frentes quentes, gerando instabilidade e contribuindo com o aumento da umidade; já a PA, ao deslocar-se em direção ao Norte nos períodos de abril a setembro, pode provocar chuvas intensas e variações climáticas. No verão, a EC, quente e úmida, tem atuação predominante, podendo haver atuação, também, da Tc, quente e seca (MONTEIRO, 1963).

Curitiba encontra-se na região sul do Brasil (25°31' S, 49°11' W, 917 m acima do nível do mar), abaixo do Trópico de Capricórnio, no primeiro planalto paranaense. De acordo com a classificação de Köppen-Geiger, o clima de Curitiba é predominantemente mesotérmico com verões frescos (Cfb). Entre as médias mensais, a temperatura máxima é de 26°C e a mínima é de 7,4°C, sendo que ventos advindos do Leste são comuns durante o ano todo (GOULART; LAMBERTS; FIRMINO, 1998).

A localização geográfica pode influenciar o desenho da cidade e as condições do ambiente térmico urbano.

## 2.2 ASPECTOS CLIMÁTICOS DO AMBIENTE URBANO

A complexa morfologia da cidade e a não homogeneidade que notadamente caracteriza a superfície urbana resultam, comparativamente as condições climáticas encontradas em áreas rurais ou mais distantes dos centros

urbanos, em um clima local modificado, governado por processos físicos que atuam segundo uma gama de escalas espaciais. Os fenômenos atmosféricos são contínuos e inter-relacionados, como aqueles ocorridos nas escalas sinótica e regional que afetam os eventos ocorridos nas camadas mais baixas. Deste modo, poder-se-ia pressupor a categorização dos fenômenos atmosféricos em escalas espaciais “sempre arbitrárias e artificiais” (ANDRADE, 2005, p. 71), mas há de se considerar que tal divisão auxilia na diferenciação e interpretação dos processos físicos e químicos que ocorrem na atmosfera, além de permitir ao pesquisador a delimitação do objeto de estudo.

O clima da cidade envolve uma escala regional, sendo influenciado pela sua localização geográfica: latitude, continentalidade, abertura para eventos sinóticos, topografia, etc. No ambiente construído, localidades com uso do solo que se distinguem do entorno circundante geram microclimas diferenciados entre si, e mesmo as ruas podem oferecer diferentes experiências em uma escala espacial ainda mais reduzida; por exemplo, um indivíduo pode experimentar diferentes sensações térmicas estando exposto aos raios solares ou à sombra das edificações, dos elementos construídos e/ou das árvores. Conforme Grimmond *et al.* (2010), na escala da rua, seis principais aspectos devem ser considerados para a descrição das superfícies: (1) comprimento de rugosidade da superfície, o qual tem influência sobre o fluxo de vento; (2) fração de superfície impermeável, pois está relacionada à partição de energia entre trocas de calor e umidade; (3) fator de visão do céu local (FVC), o qual influencia o acesso solar e o resfriamento radiativo; (4) admitância térmica dos materiais e superfícies, característica relacionada à capacidade de modulação dos ciclos de aquecimento e resfriamento; (5) albedo ( $\alpha$ ), fator relacionado diretamente à absorção de calor da superfície; e, (6) fluxo de calor antropogênico, pois constitui uma fonte adicional de energia.

Esta seção tem início com a delimitação da escala de interesse. Em seguida são descritos o balanço de energia da superfície; as condições térmicas e o fluxo de ar em ambientes urbanos; além do efeito da vegetação. Toda esta seção é teórica, dedicada à revisão de literatura, e inclui uma abordagem de algumas das pesquisas mais relevantes da área.



### 2.2.1 Escalas meteorológicas

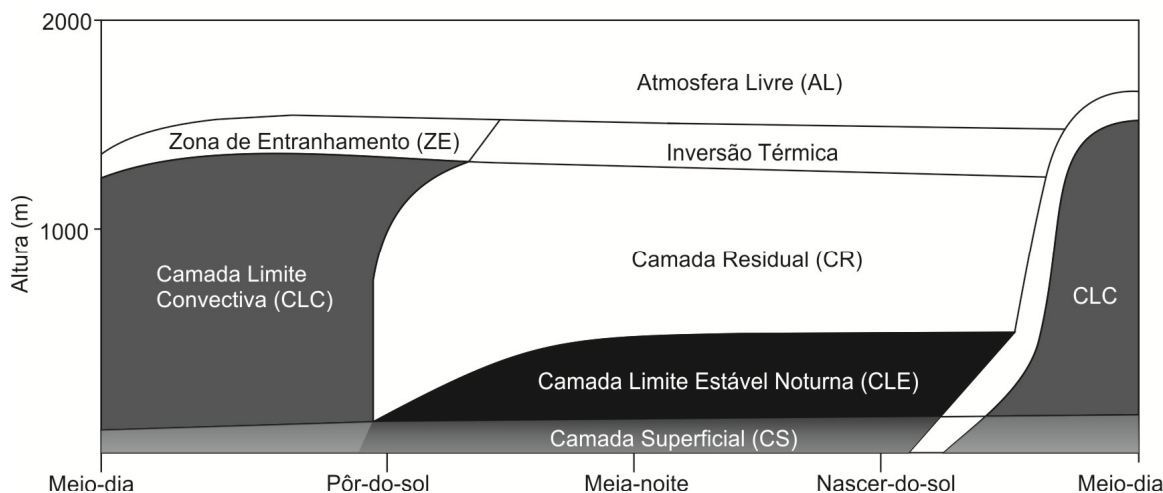
A troposfera corresponde à porção que se estende desde a superfície terrestre até uma altitude média de 10 km (OKE, 1987) ou 11 km (STULL, 1988), e é subdividida em outras duas camadas: a Atmosfera Livre (AL) e a Camada Limite Atmosférica (CLA), por vezes também chamada de Camada Limite Planetária (CLP) ou, simplesmente, camada limite. É na CLA que estão concentrados grande parte dos materiais particulados e das fontes emissoras de gases, sendo de interesse para o estudo dos fenômenos relacionados à dispersão de poluentes atmosféricos. Outras áreas de interesse podem ser citadas, como as engenharias e as ciências ambientais e a climatologia urbana.

A CLA, devido à proximidade com a superfície terrestre, responde à ação de forçantes superficiais (mecânicos e térmicos), como: “força friccional, evaporação, transpiração, transferência de calor, emissão de poluentes, e modificações no escoamento induzidos pela topografia” (STULL, 1988, p.2, tradução livre), influenciando de forma decisiva no comportamento da parte rasa da troposfera. A partição do balanço de energia à superfície, cuja rugosidade aerodinâmica é alterada em áreas urbanizadas, é exposta pelos fluxos de calor sensível e latente, os quais interagem com a camada limite por meio de processos turbulentos, afetando não apenas as propriedades termodinâmicas da superfície e o perfil médio de temperatura potencial; mas a dinâmica da camada limite e a determinação dos perfis verticais de vento (OKE, 1987; ROTH, 2000).

A altura da camada limite tem importância na determinação das constituintes atmosféricas, bem como nas previsões meteorológicas e para a alimentação de modelos de dispersão atmosférica (STRAWBRIDGE; SNYDER, 2004). Durante o dia, devido ao processo de transferência de calor por convecção das superfícies da terra para a atmosfera, a profundidade da camada limite pode se estender de 1 a 2 km acima da superfície terrestre (KAIMAL; FINNIGAN, 1994; OKE, 1987), porção na qual os escoamentos são dominados por movimentos turbulentos ocorridos em escala temporal de aproximadamente uma hora (STULL, 1988).

Segundo Stull (1988), a variação de temperatura e aquecimento da CLA provém, principalmente, da radiação de onda longa emitida pelo solo, sendo a variação da emissividade dessa superfície um dos fatores responsáveis pelos

fenômenos de transporte na CLA, como a turbulência. A camada limite ainda pode ser subdividida segundo a ocorrência de fenômenos distintos (Figura 10).



**Figura 10 – Estrutura típica da camada limite**

**Fonte: Adaptado de Stull (1988)**

De extrema importância, a camada de mistura ou camada limite convectiva (CLC) é caracterizada por uma intensa movimentação vertical das parcelas de ar, estando mais bem constituída em dias quentes e com poucas nuvens (STULL, 1988). No topo da camada de mistura está situada a zona de entranhamento, local no qual ocorre uma inversão do perfil de temperatura do ar. Tal processo pode ser descrito da seguinte forma (OKE, 1987; STULL, 1988): durante o amanhecer, próximo à superfície terrestre, surgem movimentos convectivos iniciados a partir do transporte turbulento, o qual depende das diferenças existentes entre as densidades das parcelas de ar; então, calor e energia são transportados para a base da camada de inversão. Nesse momento, ocorre, também, um processo de recirculação, com o ar da camada de inversão penetrando no interior da CLC. Próximo ao pôr do sol, tem início uma lenta inversão no perfil de temperatura, com o resfriamento do ar adjacente à superfície e a mistura progressiva deste em um movimento ascendente devido à turbulência, gerada pelo cisalhamento do vento. A inversão cresce até uma altura aproximada de 100 a 200 m, atingindo o ápice à meia noite (para latitudes médias) (STULL, 1988).

Abaixo da CLC está a camada limite superficial (CLS ou CS), caracterizada por pouca turbulência, e por isso, considerada estável. Ao longo do processo de transição entre os perfis verticais de temperatura, as variáveis ainda apresentam o perfil da camada de mistura em uma região acima da camada limite estável (CLE), formando a camada residual (CR), a qual é caracterizada pela presença de ondas de gravidade e intermitência da turbulência; nos períodos onde não há CR, o escoamento torna-se independente do atrito com a superfície (STULL, 1988).

Sobre áreas urbanizadas ou cobertura florestal, a CLS pode ser dividida em outras duas subcamadas: a inercial e a rugosa. Na subcamada rugosa, o fluxo se torna dependente da rugosidade de elementos individuais (ARNFIELD, 2003), do distanciamento entre tais elementos (OKE, 1988; ROTH, 2000) e da forma das edificações (OKE, 1987, RAFAILIDIS, 1997).

Na parte mais baixa da subcamada de rugosidade está a camada intra-urbana (ou Urban Canopy Layer, UCL), correspondendo, então, a camada estratificada a partir do solo até o nível (médio) das coberturas das edificações. Enquanto a CLA é governada pelos processos de mesoescala (entre a atmosfera e a cidade), a camada intra-urbana inclui os processos que ocorrem na microescala. Para Oke (1987, 2006), as escalas espaciais e temporais podem ser divididas segundo a Tabela 3.

**Tabela 3 – Fator de influência das escalas horizontais**

<b>Escala</b>	<b>Limite espacial</b>	<b>Limite temporal</b>	<b>Fator de influência</b>
Macroescala	$10^5$ até $10^8$ m	Anos	Região
Mesoescala	$10^4$ até $2 \times 10^5$ m	Semanas	Cidade
escala local	$10^2$ até $5 \times 10^4$ m	De algumas horas a alguns dias	Forma da paisagem, mas exclui os efeitos microclimáticos
Microescala	$10^{-2}$ até $10^3$ m	De pouco segundos a uma hora	Dimensões individuais dos elementos urbanos

**Fonte: Adaptado de Oke (1987, 2006)**

Na presente pesquisa especial atenção é dada aos processos ocorridos na microescala, cujo limite temporal é mais restrito (duração da ordem de poucos segundos até uma hora) e influenciado, principalmente, pela dimensão individual dos elementos urbanos. Para o planejamento das cidades sob o aspecto bioclimático é

fundamental, pois, o entendimento dos processos ocorridos na camada intra-urbana e do balanço energético envolvido.

### 2.2.2 Balanço de energia

No Sistema Terra-Atmosfera, a energia é continuamente transformada segundo diferentes formas (radiante, térmica, cinética e potencial) e modos de transporte (condução, convecção e radiação), sendo a partição da energia em função das propriedades físicas de tal sistema (OKE, 1987).

Para a climatologia importa, principalmente, os comprimentos de onda que variam de 0,1 até 100  $\mu\text{m}$ , correspondente a uma pequena porção do espectro eletromagnético<sup>6</sup>. A atmosfera é semitransparente à radiação de onda curta (faixa de 0,15 até 3  $\mu\text{m}$ ), mas em geral, absorve relativamente bem a radiação de onda longa (faixa de 3 até 100  $\mu\text{m}$ ). Conforme Oke (1987), as nuvens são o principal fator de influência para o saldo de radiação líquida, considerando que estas agem de forma similar a corpos negros<sup>7</sup>, absorvendo e emitindo radiação de forma eficiente, sendo que as nuvens baixas e relativamente quentes (Stratus) exercem maior influência no balanço de radiação da superfície do que as nuvens altas e frias (Altus ou Cirrus).

Na superfície terrestre, as radiações solares de onda curta e onda longa apresentam pouca variabilidade espacial, já que são governadas por processos de larga escala atmosférica, ou por relações geométricas entre a Terra e o Sol (OKE, 1987).

A passagem da radiação de onda curta até a camada intra-urbana é afetada, também, pela poluição atmosférica, sendo o grau de atenuação dependente da natureza e da quantidade de poluentes. Segundo Oke (1987), em cidades altamente industrializadas a radiação incidente pode ser reduzida em 10 a 20%, já em cidades na qual os veículos automotivos são as principais fontes e a poluição fotoquímica é dominante, a radiação incidente pode sofrer uma redução de 2 a 10%. Em dias com alto nível de poluição atmosférica, e em períodos de baixa elevação solar, a redução da radiação incidente pode exceder a 30% (OKE, 1987).

---

<sup>6</sup> A porção visível do espectro corresponde a 0,36 até 0,75  $\mu\text{m}$ .

<sup>7</sup> O meio ou substância que a dada temperatura emite a máxima quantidade possível de radiação por unidade de área de superfície em uma unidade de tempo é chamada de corpo negro (OKE, 1987).

Adicionalmente, ocorrem alterações na composição espectral e direcional da radiação de onda curta. Poluentes tendem a filtrar os comprimentos de onda mais curtos; na porção ultravioleta do espectro é comum a perda de 40 a 90% (OKE, 1987), influenciando no processo de fotossíntese das plantas e contribuindo para riscos à saúde humana.

Conforme a definição de Oke (1987), superfície ativa é o local de ocorrência das atividades climáticas que envolvem as trocas e conversão de energia e massa em um sistema, remetendo à Primeira Lei da Termodinâmica (conservação de energia), segundo a qual nenhuma energia pode ser criada ou destruída, apenas continuamente transformada de uma forma para outra. Para qualquer superfície o balanço de radiação pode ser definido segundo a Equação 1 (OKE, 1987, p. 23).

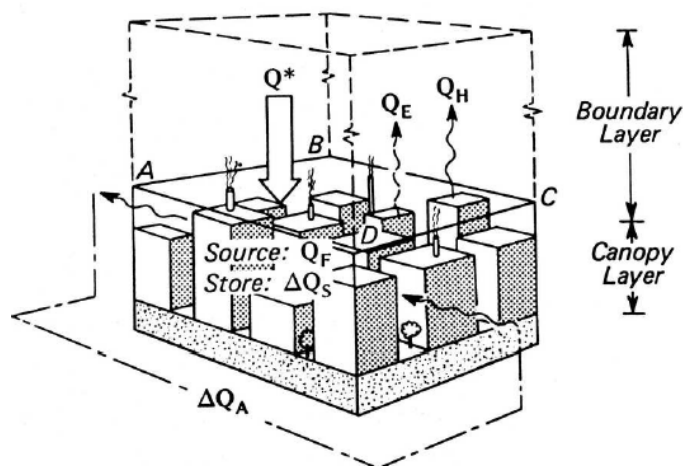
$$Q^* = Q_H + Q_E + Q_G \quad \text{Equação 1}$$

Onde  $Q^*$  é a radiação líquida obtida para todos os comprimentos de onda,  $Q_H$  é o fluxo de calor sensível,  $Q_E$  é o fluxo de calor latente e  $Q_G$  é a condução para ou a partir do solo subjacente. Todas as variáveis são dadas em  $W/m^2$ .

A partição do excesso ou déficit radiativo entre os termos da Equação 1 é influenciada pela natureza da superfície e a relativa habilidade da atmosfera e do solo em transportar calor (OKE, 1987). Devido à complexidade da morfologia urbana, tal equação não se aplica de forma realista para todos os pontos da superfície, sendo necessárias aproximações. No interior de um cânion urbano, a natureza tridimensional da camada urbana pode ser simplificada pelo volume cânion-ar, possibilitando a inclusão das interações entre as superfícies urbanas horizontais e verticais (paredes das edificações e solo subjacente) com o ar intermitente (GRIMMOND; CLEUGH; OKE, 1991).

Devido às diversas características que configuram o espaço urbano, é impossível haver um cânion urbano representativo, admitindo-se, em geral, modelos com altura uniforme e profundidade infinita. Em cânions assimétricos, isto é, cânions compostos por edificações de altura variada, considera-se a média das alturas das edificações (JOHANSSON, 2006).

Usualmente, considera-se o balanço de energia por meio de um plano horizontal (ABCD) logo acima do nível da cobertura das edificações (Figura 11).



**Figura 11 – Esquema da aproximação volumétrica do balanço de energia**  
 Fonte: Oke (1987)

O arranjo (ou configuração geométrica) das cidades e a orientação das ruas, a qual influencia o ângulo de incidência solar e o fluxo de ar no interior dos cânions, geram microclimas diferenciados nos espaços citadinos; adicionam-se ainda as contribuições das características construtivas e outras particularidades, como a presença ou não de vegetação e os valores de albedo das superfícies horizontais e verticais.

Segundo Oke (1987), no volume contido no interior do cânion é necessário acrescentar o termo de armazenamento de calor (ou estoque de calor,  $\Delta Q_S$ ) devido à energia absorvida ou liberada por este volume, considerando-se que pelo menos um dos termos da equação não estaria em balanço. Quando o fluxo de energia advindo é maior do que o liberado (não importando a direção do fluxo), a quantidade de temperatura por unidade de energia armazenada depende das propriedades térmicas dos materiais contidos no volume. Este caso ilustra a situação do fluxo convergente; já o fluxo divergente ocorre quando há perda de energia em um volume (ou camada em se tratando de superfícies horizontalmente uniformes) (OKE, 1987).

O consumo de energia nas edificações, indústrias, transportes, entre outras atividades, contribui para emissão de dióxido de carbono e calor antrópico, podendo o fluxo de calor antropogênico ( $Q_F$ ) ser incorporado na equação do balanço

de energia. Tal termo depende da densidade populacional nas regiões urbanas e da energia média consumida individualmente por cada habitante, que por sua vez, depende das condições climáticas locais e de questões econômicas, além de fatores culturais. O fluxo de calor antropogênico pode ser estimado pelo método do inventário ou pelo método do resíduo, ou ainda pela combinação desses métodos (FERREIRA, 2010). Em razão da dificuldade na obtenção de dados urbanos com a resolução necessária e requerida para a estimativa de  $Q_F$ , é comum o termo ser representado por um valor constante no espaço-tempo (ARNFIELD, 2003). O impacto da emissão de energia antropogênica depende da escala de análise. Para a maioria das cidades o valor de  $Q_F$  é próximo de  $10 \text{ W/m}^2$ ; mas pode ultrapassar  $1.000 \text{ W/m}^2$  para uma única quadra ou edifício (ICHINOSE; SIMOHDOZONO; HANAOKI, 1999).

Os fluxos horizontais convergentes ou divergentes também podem contribuir para o aquecimento ou resfriamento, sendo necessário incluir um termo de variação do fluxo de calor advectado ( $\Delta Q_A$ ) à equação do balanço energético de superfície. Desta forma, o balanço de energia do volume de ar contido no interior de um cânion pode ser descrito conforme Equação 2 (OKE, 1987); todas as variáveis são dadas em  $\text{W/m}^2$ .

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad \text{Equação 2}$$

Para o equilíbrio entre os termos da Equação 2 é necessário que o *input* advindo da radiação solar e do calor antropogênico esteja em consonância com a liberação do calor sensível e latente, de forma imediata, ou liberado após ser estocado nas superfícies urbanas (JOHANSSON, 2006).

O componente de advecção depende da velocidade do vento e da rugosidade das superfícies urbanas, podendo ser ignorado para localidades com uso do solo e forma urbana mais uniforme.

O balanço energético em recintos urbanos é positivo em relação às regiões rurais circundantes, fator que explica parcialmente a existência das ilhas de calor (fenômeno explorado mais adiante); e inclui todos os processos de energia envolvidos na formação do clima urbano, compreendendo a variação diurna dos diferentes fluxos energéticos. Conforme Johansson (2006), o valor positivo da

radiação líquida obtida para todos os comprimentos de onda ( $Q^*$ ) resulta da perda de radiação de onda longa ser menor que a radiação solar absorvida, ocorrendo inversão térmica no período noturno; o aumento de calor sensível ( $Q_H$ ) está relacionado com o aumento do processo de convecção e da diferença de temperatura entre o ar e as superfícies; enquanto o aumento do fluxo de calor latente ( $Q_E$ ) está relacionado com aumento da turbulência e da diferença de umidade entre a superfície e o ar.

Para Oke (1987), uma das principais dificuldades em obter o balanço de energia está atrelada à dificuldade no cálculo do fluxo de calor armazenado, termo relacionado à admitância térmica das superfícies ativas. Para o autor, o esquema de medição ideal deveria considerar o monitoramento de  $\Delta Q_S$  em todos os arranjos da superfície urbana e convertê-los em um único termo representativo, mas devido à extrema heterogeneidade do meio urbano, esse esquema torna-se impraticável. Segundo Grimmond *et al.* (2010), duas abordagens têm sido empregadas: (1) a primeira considera a estimativa de  $\Delta Q_S$  como um cálculo residual do balanço de energia, (2) na segunda abordagem são utilizadas amostras de temperatura de todas as superfícies e a equação de condução de calor. Ressalta-se que os materiais típicos utilizados no meio urbano apresentam menor capacidade térmica e albedo e maior condutividade de calor do que os encontrados no meio rural.

Segundo Oke (1987), no interior de um cânion urbano a reflexão da radiação de onda curta depende do albedo de superfícies individuais e no seu arranjo geométrico (a geometria urbana influencia na diminuição do albedo em comparação com uma superfície horizontal); resultando em um albedo médio de aproximadamente 15% (variação entre 10 a 27%) para cidades de latitude média e sem neve. Em cidades de baixa latitude, o albedo tende a ser maior do que em cidades de latitude média, já que os materiais e pinturas utilizadas em áreas urbanas são escolhidos para aumentar a reflexão, e a forma urbana é preparada de modo a reduzir a penetração do sol nos cânions urbanos. Considerando superfícies urbanas de modo geral, o albedo pode variar aproximadamente entre 90% para a cor branca até 2% para a cor preta (Tabela 4).



**Tabela 4 – Superfícies típicas de área urbana e albedo correspondente**

<b>Superfície</b>	<b>Albedo (%)</b>
Asfalto	5 - 20
Parede de concreto	10 - 35
Cobertura metálica	10 - 16
Janela de vidro	8 - 52
Pintura cor branca	50 - 90
Pintura cores vermelha, marrom e verde	20 - 35
Pintura cor preta	2 - 15

**Fonte: Adaptado de Oke (1987)**

Segundo estudos (ARNFIELD, 2003; OKE, 1974), em algumas situações, a radiação líquida sofre pouca variação no meio urbano em comparação à área rural, em virtude do decréscimo de radiação solar global ser parcialmente compensado pela redução do albedo na malha urbana, resultando em menor radiação solar refletida para a atmosfera. As parcelas de radiação de onda longa emitida pela atmosfera e a emitida pela superfície aumentam em função do aumento da emissividade atmosférica e da temperatura de superfície, respectivamente.

Grimmond, Souch e Hubble (1996), por meio de observações em campo em duas localidades com diferentes coberturas vegetais na cidade de Los Angeles, notaram que a combinação de albedos mais baixos bem como temperaturas de superfícies menores resultou na perda de radiação solar global e radiação de onda longa emitida pela superfície; o local com 30% de cobertura vegetal apresentou aumento de aproximadamente 19% de radiação líquida comparativamente ao local com cobertura vegetal correspondente a 10%. Já no período noturno, a radiação líquida não apresentou diferenças significativas.

Há certa dificuldade na interpretação do balanço radiativo devido à complexidade da morfologia urbana, mas a abordagem volumétrica facilita a avaliação dos processos físicos que regem o balanço energético e afetam o campo térmico urbano.

### 2.2.3 Campo térmico urbano

O balanço de radiação afeta, em grande parte, a distribuição da temperatura do ar na camada intra-urbana (SANTAMOURIS, 2001). As temperaturas mais amenas da abóbada celeste funcionam como um receptor para a radiação de

onda longa vinda da camada urbana e tornam possível o resfriamento desta (SOUZA; RODRIGUES; MENDES, 2003); de forma que a geometria urbana e quaisquer elementos que obstruam a visão do céu influenciam na formação do campo térmico urbano. Em ambientes construídos, durante o período noturno, a perda de calor é mais lenta que em áreas rurais, havendo mais ganho solar do que perda, sendo essa a causa geral da ilha de calor urbana (ICU) (CHAPMAN, 2007; CHAPMAN; THORNES; BRADLEY, 2001; MOIN; TSUTSUMI, 2004).

A ilha de calor urbana é o fenômeno de modificação climática mais óbvio da urbanização e na década de 80, já era considerado o fenômeno mais bem documentado (LANDSBERG, 1981; OKE, 1987). Na maioria das cidades, durante o verão, as condições climáticas tendem a ser instáveis no período diurno, mas levemente instáveis ou neutras no período noturno (GRIMMOND *et al.*, 2010); fator que contribui para o fenômeno da ilha de calor ser melhor observado nessa última situação, uma vez que, o cenário com ventos fracos e sem nuvens é a condição ideal na promoção da diferenciação microclimática.

A área de transição entre o meio rural e o urbano apresenta um significativo gradiente de temperatura, com uma diferença horizontal de aproximadamente 4°C/km (OKE, 1987). Da zona rural até alcançar a zona urbana, o ar mais aquecido mantém sua estabilidade, configurando um platô, sendo a uniformidade interrompida pelos distintos usos do solo que compõem as cidades. Muitas vezes, o gradiente de temperatura atinge seu ápice nas áreas mais adensadas e verticalizadas.

A ilha de calor urbana pode ter um alcance vertical (“altura”) de três a cinco vezes a altura média das edificações (GIVONI, 1998).

A intensidade da ilha de calor ( $\Delta T_{u-r}$ ) é definida pela diferença máxima de temperatura urbana e rural, e aumenta logo após o pôr do sol, atingindo seu ápice após três ou cinco horas, declinando lentamente ao final da noite (OKE, 1987). Segundo Givoni (1998), entre zonas urbanas e rurais são mais comuns diferenças de  $T_a$  entre 3 a 5°C, mas podem atingir até 8 a 10°C; já em centros altamente urbanizados e seu entorno, podem ser observadas modificações térmicas devido à urbanização de 1 a 2°C. Em locais com cânions urbanos profundos e estreitos, a  $\Delta T_{u-r}$  pode ser negativa ao meio dia, resultando em temperaturas mais baixas que o entorno circundante, efeito denominado de ilha de frescor ou “*cool islands*”. Esse

fenômeno, assim como a ilha de calor, ocorre preferencialmente em dias de sol, sem nebulosidade, e associado a ventos fracos (ERELL; WILLIAMSON, 2007).

A Tabela 5 corresponde às tendências dos valores médios dos parâmetros climáticos modificados pela urbanização. Tais informações foram elaboradas tendo em vista o clima temperado, podendo haver variações segundo as condições locais; pois, segundo Assis (2006, p. 22), o comportamento climático sofre influência das características urbanas de forma variada, de acordo com “as condições sinóticas, o tipo de entorno da cidade (sítio natural, rural ou industrial), as formas de relevo, a influência de massa d’água e o próprio tamanho da área urbanizada”.

**Tabela 5 – Comparações de parâmetros climáticos entre ambientes citadino e rural**

<b>Elementos</b>	<b>Observação</b>	<b>Comparação com ambiente rural</b>
Radiação	Global	15 a 20% menos
	Ultravioleta, inverno	30% menos
	Ultravioleta, verão	5% menos
	Duração de brilho do sol	5 a 15% menos
Precipitação	Total	5 a 10% mais
	Dias com menos de 5mm	10% mais
Temperatura	Média anual	0,5 a 1°C mais
	Mínima no inverno (média)	1 a 2°C mais
	Dias de mais calor	10% menos
Umidade Relativa	Média anual	6% menos
	Inverno	2% menos
	Verão	8% menos
Velocidade do Vento	Média anual	20 a 30% menos
	Rajadas máximas	10 a 20% menos
	Calmarias	5 a 20% mais

**Fonte: Adaptado de Landsberg (1970, citado por AYOADE, 2003)**

Oke (1987) sugere causas atribuídas à existência da ilha de calor urbana. Em situação de verão, durante o período diurno, o aumento do calor sensível armazenado em áreas urbanas pode ser decorrente, principalmente, do aumento da inércia térmica dos materiais construtivos, da absorção da radiação de onda curta, e do aumento do calor sensível armazenado em razão do aumento da área de superfície e das múltiplas reflexões decorrentes. Outro fator que pode contribuir é a combinação das fontes de calor antropogênico, a qual pode ser dominante no inverno, e a diminuição da evapotranspiração. Após o pôr do sol, ocorre a diminuição

do total do transporte turbulento de calor, mantendo a temperatura do ar no ambiente construído mais aquecida que na área rural adjacente. Deve-se considerar, também, a importância do aumento da radiação de onda longa emitida pela atmosfera devido a grande absorção e reemissão da poluição do ar (OKE, 1987). Em relação às fontes de calor, Givoni (1998) e Johansson (2006) acrescentam as de periodicidade sazonal, como os sistemas de aquecimento e resfriamento, que pelo processo de *feedback* devolvem o ar aquecido para a atmosfera.

Comparativamente ao gradiente de temperatura do ar, a diferença de umidade entre áreas urbana e rural é pequena, mas o padrão espacial é complexo. Para cidades de latitude média, sob condições estáveis de verão, há um consenso de que a camada intra-urbana é mais seca durante o dia, adquirindo umidade no período noturno (CHANDLER, 1967; HOLMER; ELIASSON, 1999; LEE, 1991), padrão evidenciado principalmente no período de verão. Tal processo é explicado por Oke (1987) da seguinte forma: durante o período diurno, o teor de umidade é mais alto na zona rural, o que pode ser devido ao fenômeno da evapotranspiração; após o pôr do sol, o ar resfria mais rapidamente, ocorrendo a saturação do ar, até que o vapor d'água que está em suspensão na camada de ar próxima à superfície, isto é, o excesso de umidade, condensa e forma orvalho. No ambiente urbano, durante o período noturno, o ponto de orvalho inferior à temperatura do ar viabiliza a contenção de vapor d'água na camada de ar atmosférico. Desta forma, enquanto em áreas urbanas há um *déficit* nos níveis de umidade no período diurno, a noite ocorre o fenômeno chamado de Excesso de Umidade Urbana - *Urban Moisture Excess* (UME) (HOLMER; ELIASSON, 1999).

No interior do volume cânion-ar fatores são combinados para manter o teor de umidade, como: a fraca evapotranspiração, o vapor antropogênico e a estagnação da camada de ar (OKE, 1987). O aumento da quantidade de vapor de água combinada com altos níveis de poluição do ar nas cidades pode promover, ainda, a formação de nuvens e, posteriormente, a precipitação sobre a cidade (ASSIS, 2000; OKE, 1987). Apoiados em revisão de estudos anteriores, Holmer e Eliasson (1999) citam que o aumento da umidade associado ao aumento de calor e poluição aumenta a incidência da radiação de onda longa em 20 a 40 W/m<sup>2</sup> e que o excesso de vapor d'água no ambiente urbano deve influenciar na formação da ilha de calor urbana, mas que esta relação não é clara.

Holmer e Eliasson (1999), em um estudo envolvendo análise de observações empíricas sobre a intensidade de ilha de calor em Göteborg, Suécia, constataram que a ilha de calor antecede a UME em 1 a 5 horas. Esse fato estaria relacionado, segundo Lee (1991), ao aumento de evaporação promovido pela UHI; considerando, então, que haveria uma correlação positiva entre tais parâmetros.

Na década de 1970, Oke (1973, citado por OKE, 1987) propôs que, para cidades norte americanas e europeias, a intensidade da ilha de calor podia estar relacionada ao tamanho da cidade ou à sua população (P), havendo uma proporção logarítmica entre  $\Delta T_{u-r}$  e P. Para cidades norte americanas, com a condição de céu claro a Equação 3 (OKE, 1987, p. 292) pode ser aplicada.

$$\Delta T_{u-r} \cong P^{1/4} / 4 \bar{u}^{1/2} \quad \text{Equação 3}$$

Onde  $\bar{u}$  é o vento regional a 10 m de altura.

Oke (1987) aponta a falta de dados para estabelecer tal correlação para cidades de baixa e alta latitude. Segundo o mesmo autor, o vento crítico no qual as diferenças de temperatura são eliminadas é na ordem de 9 m/s, 5 m/s e 2 m/s, para cidades com contingentes populacionais de um milhão, 100.000 e 10.000 habitantes, respectivamente. Oke reconhece que a utilização de P na representação da cidade pode não ser satisfatória para uma explicação dos fenômenos físicos, sendo mais viável a utilização da densidade urbana, que por sua vez pode ser expressa pela geometria urbana, dada pela relação entre a altura das edificações e a largura da via – relação H/W (Equação 4) ou pelo fator de visão do céu (Equação 5) (OKE, 1987, p. 293).

$$\Delta T_{u-r} = 7,54 + 3,97 \ln (H/W) \quad \text{Equação 4}$$

$$\Delta T_{u-r} = 15,27 - 13,88 FVC \quad \text{Equação 5}$$

Oke (1987) ressalta que as Equações 4 e 5 podem ser subestimadas em caso de haver intensa liberação de calor antropogênico.

A geometria urbana é conhecida por influenciar nos processos de retenção das radiações de onda longa e incidente e nos processos de transporte

turbulentos. Simulações conduzidas por Oke *et al.*<sup>8</sup> (1991, citados por CHAPMAN; THORNES; BRADLEY, 2001) mostraram que a geometria urbana, representada pelo fator de visão do céu, pode produzir uma  $\Delta T_{u-r}$  de 5 a 7°C. No entanto, embora haja um consenso de que a geometria urbana afete de alguma forma a temperatura do ar e a formação da ilha de calor, a relação entre FVC e esses parâmetros não é tão evidente quando demonstrada de forma estatística. Entre os estudos que corroboram com evidências do papel do fator de visão do céu para a formação do ambiente térmico, citam-se as pesquisas de Yamashita *et al.* (1986), Park<sup>9</sup> (1987, citado por SANTAMOURIS, 2001), Unger (2004) e Svensson (2004). Em contrapartida, outras pesquisas apresentaram dificuldades em obter uma correlação considerada significativa: Eliasson (1996), Upmanis e Chen (1999), Souza (2007) e Minella (2009).

Svensson (2004) sugere que os resultados contraditórios encontrados na literatura ocorram em razão dos diferentes métodos e procedimentos para a obtenção dos dados.

Grande parte dos estudos que envolvem o fator de visão do céu trata da influência desse indicador para as condições microclimáticas noturnas. No entanto, a geometria urbana ao exercer influência no ganho de radiação solar direta, contribui para a definição dos níveis de estresse térmico diurno (RIBEIRO; FIDELIS; CARVALHO, 2008); sendo do interesse do planejamento climaticamente orientado estudos que incorporem as análises diurnas.

Segundo Upmanis e Chen (1999), a correlação entre FVC e a temperatura de superfície ( $T_s$ ) é mais evidente do que com a temperatura do ar. O comportamento térmico de vários elementos urbanos (superfícies pavimentadas, estradas, paredes externas de edifícios, coberturas das edificações e diferentes tipos de vegetação) foram correlacionados com o fator de visão do céu por Chudnovsky, Ben-Dor e Saaroni (2004), considerando uma área de aproximadamente 0,7 km<sup>2</sup> em Tel-Aviv (31°47'0" N, 35°13'0" E), Israel. Embora as áreas com alto valor de FVC, como o parque e as superfícies mais expostas à radiação solar (estradas e as coberturas das edificações) tenham apresentado temperaturas de superfície mais

---

<sup>8</sup> OKE, Tim R. *et al.* Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night. Part 2: Diagnosis of causation. **Boundary- Layer Meteorology**, v. 56, p. 339-358, 1991.

<sup>9</sup> PARK, Hye-Sook. Variations in the urban heat island intensity affected by geographical environments. Tsukuba Univ., **Environ. Research Centre Papers**, v. 11, 79 p, 1987.

altas durante o dia; no período noturno, os valores de  $T_s$  destes elementos foram menores comparados às temperaturas de superfície de paredes externas de edificações e algumas seções de áreas vegetadas.

No interior dos cânions urbanos, devido ao aquecimento das fachadas das edificações e ao transporte vertical do ar, uma camada de ar (*air film*) é formada, sendo em geral mais aquecida do que a camada na parte central do cânion e próximo ao solo, onde a temperatura do ar é condicionada pelo “fluxo divergente por unidade de volume de ar”, incluindo o transporte horizontal (SANTAMOURIS, 2001, p. 74, tradução livre).

Conforme Ali-Toudert (2005) os pioneiros na pesquisa sobre evolução temporal e distribuição espacial da  $T_a$  em cânions urbanos foram Nakamura e Oke (1988). Em seu estudo, os autores encontraram pouca diferença (0,5 até 1°C) entre os valores de temperatura do ar entre a cobertura e o interior de um cânion com orientação E-W e H/W próximo de um, na cidade de Kyoto (36°00' N, 138°00' E), Japão; resultado atribuído, principalmente, às turbulências do ar na camada intra-urbana. Diferenças mais significativas (próximas a 3°C) entre a temperatura do ar no interior do cânion (a uma altura de 1,70 m) e no nível acima das coberturas, foram encontradas por Pearlmutter (1998). Consideraram-se dois cânions perpendiculares (E-W e N-S) com geometria compacta, regular e simétrica (relação H/W de 1:1) na cidade de Dimona (31°4' N, 35°1' E), Israel. Os resultados mostraram, ainda, que a amplitude térmica no interior do cânion foi menor que a registrada no nível acima das coberturas. Pearlmutter presume que a variação de  $T_a$  no interior do cânion esteja condicionada ao aquecimento das paredes adjacentes.

Oke (1988) considera que o fenômeno da ilha de calor pode ser benéfico em cidades de latitude média no período de inverno, uma vez que reduz a necessidade de aquecimento artificial, promovendo a conservação de energia. No entanto, o efeito da ilha de calor em situação de verão não pode ser ignorado tendo em vista fenômenos climáticos, como as ondas de calor, quando a temperatura ambiente proporciona alto nível de estresse térmico. O fundamental para localidades com indicações de inadequação térmica, é que o desenho urbano seja utilizado de maneira a favorecer maior conforto térmico aos espaços internos e externos às edificações.

O conforto térmico dos espaços abertos depende, também, das condições do fluxo de ar.

#### 2.2.4 Fluxo de ar em ambientes urbanos

Os estudos dos fluxos turbulentos na atmosfera urbana e da dinâmica dos ventos urbanos permitem o entendimento dos seguintes processos relacionados: as trocas de *momentum*, calor e massa entre a atmosfera e as superfícies urbanas; os efeitos nos balanços de energia e água; a dispersão de poluentes; e, as cargas de vento sobre as estruturas urbanas (ROTH, 2000).

Para o planejamento urbano climaticamente orientado é necessário ter conhecimento sobre as condições do vento, e, mais importante, fazer uso dos efeitos positivos deste; uma vez que o fluxo de vento na camada intra-urbana influi na ventilação de edificações e na renovação do ar em ambientes urbanos, assim como na dispersão de poluentes e no conforto térmico de pedestres.

O fluxo de ar na camada intra-urbana está condicionado a dois fatores principais: a rugosidade e a porosidade. O primeiro está relacionado à densidade urbana, à relação H/W e à orientação das ruas. O segundo está relacionado ao modo como as edificações e obstáculos possibilitam a permeabilidade dos ventos.

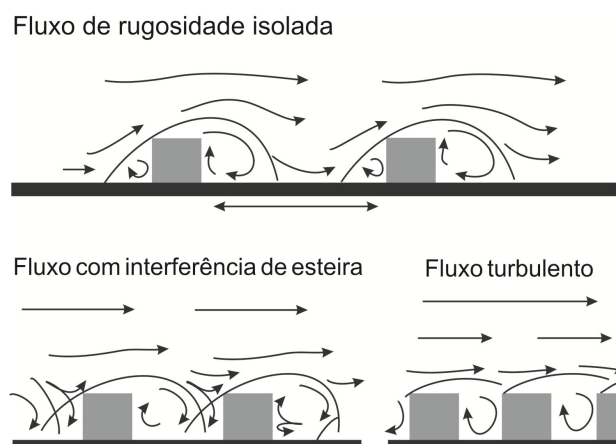
Segundo Johansson (2006), estudos baseados em medições e túnel de vento indicam uma redução média de 25 a 50% na velocidade horizontal do vento regional em decorrência da morfologia urbana. Fator que incide em menor potencial para uso de ventilação cruzada, uma vez que a pressão dos ventos nas fachadas dos edifícios diminui (GHIAUS *et al.*, 2006).

Os elementos urbanos estão sujeitos às forças da ação do vento, isto é, ao barlavento, que exerce uma força de pressão e ao sotavento, que exerce o movimento de sucção. A ação do vento em edificações isoladas em campo aberto é descrita em diversos estudos (COWAN; CASTRO; ROBINS, 1997; HOSKER, 1986; LI; STATHOPOULOS, 1997).

A geometria das edificações (representada pela razão entre o comprimento e a largura do cânion – L/W) e a disposição destas no ambiente urbano (representada pela relação H/W) possuem importância fundamental para a definição do padrão do fluxo de ar. Em cânions urbanos, quando a direção dominante do fluxo de ar é normal (isto é, aproximadamente 30 graus em relação ao eixo longitudinal da rua), três regimes de fluxos de ar são percebidos (Figura 12), considerando



edificações com alturas mais ou menos homogêneas, conforme a distinção feita por Hussain e Lee<sup>10</sup> (1980, citados por OKE, 1988).



**Figura 12 – Fluxo de ventos em cânions urbanos**

**Fonte: Adaptado de Oke (1987)**

Quando as edificações encontram-se espaçadas ( $H/W > 0,05$ ) não há interação entre os campos de vento, dando-se origem ao fluxo de rugosidade isolada (*isolated roughness flow*) (SANTAMOURIS, 2001). Conforme Oke (1987) e Santamouris (2001), em cânions com  $0,05 < H/W < 0,65$  o atrito entre o fluxo de ar principal e o topo das edificações, gera um vórtice a sotavento no interior do cânion, o qual é impulsionado por deflexão, gerada pela face da parede a barlavento da edificação seguinte; regime chamado de interferência de esteira (*wake interference flow*). Em cânions com maior densidade ( $H/W > 0,65$ ), 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 terceiro regime: fluxo turbulento (*skimming flow*).

No caso de haver uma edificação com altura superior considerável em relação àquela posicionada logo à frente, o padrão do fluxo é diferente em relação aos mencionados no parágrafo anterior. Conforme relatado por Alberts (1982) e Oke (1987), nessa situação, o fluxo de vento normal à edificação exerce pressão principalmente na zona central superior da parede a barlavento, criando um ponto de

<sup>10</sup> HUSSAIN, M.; LEE, B. E. **An Investigation of Wind Forces on Three-Dimensional Roughness Elements in a Simulated Atmospheric Boundary Layer Flow**. Part II: Flow over Large Arrays of Identical Roughness Elements and the Effect of Frontal and Side Aspect Ratio Variations. Report BS 56, Dept. Building Science. University of Sheffield, 1980.

estagnação (na altura próxima de 3/4 a partir da base da edificação). A partir daí, parte do fluxo passa por cima do topo da edificação; parte desce junto à parede a barlavento acarretando, na zona de cavidade, em um vórtice intenso próximo ao solo e parte é defletida pelas paredes laterais da edificação, dando origem a uma dupla zona de circulação em redemoinho a sotavento configurando uma “ferradura”. Oke (1987) observa que as três formas de divergência do ar a partir do ponto de estagnação potencializam a velocidade do vento.

Em situações de vento com direção oblíqua é observada a formação de um vórtice em espiral (NAKAMURA; OKE, 1988) ou um padrão em hélice (DABBERDT; LUDWIG; JOHNSON, 1973; WEDDING; LOMBARDI; CERMAK, 1977).

A circulação do fluxo de ar no interior de um cânion urbano ( $\bar{u}_{cânion}$ ) está condicionada ao fluxo de ar acima das coberturas das edificações ( $\bar{u}_{cobertura}$ ). Conforme Oke (1987), abaixo de certo limiar (para cânions com relação H/W próximo a 1, estima-se um limiar para  $\bar{u}_{cobertura}$  próximo de 1,5 a 2 m/s), o acoplamento entre os fluxos de ar de ambas as camadas deixa de existir (NAKAMURA; OKE, 1988). Para cânions cuja  $\bar{u}_{cobertura}$  seja acima de 5 m/s, Nakamura e Oke (1988, p. 2695) apresentam a seguinte relação linear (Equação 6):

$$\bar{u}_{cânion} = p \bar{u}_{cobertura} \quad \text{Equação 6}$$

Onde  $\bar{u}$  representa a velocidade do vento principal horizontal e  $p$  o fator de redução, o qual depende da geometria urbana e das alturas dos instrumentos de medição.

Segundo Nakamura e Oke (1988), o fator de redução seria da ordem 2/3 considerando o fluxo de ar acima do cânion. Para cânions simétricos com H/W≈1 e com  $\bar{u}_{cânion}$  e  $\bar{u}_{cobertura}$ , medidos respectivamente a 0,06 e 1,2 m de altura, respectivamente, o coeficiente  $p$  pode variar de 0,37 até 0,68, dependendo do quadrante. Em cânions urbanos com H/W muito baixo, o coeficiente desaparece, e proporcionalmente, o valor de  $p$  aumenta em cânions com maior H/W.

O comprimento de rugosidade ( $z_0$ ) é o elemento crítico na produção do mecanismo de turbulência na camada limite; um maior valor de  $z_0$  resulta em uma

turbulência mais intensa e maior é a influência friccional (OKE, 1988). Em cânions urbanos, o efeito de rugosidade máximo corresponde à transição entre os regimes fluxo de rugosidade isolada e fluxo turbulento, considerando cânions com limite de  $H/W \approx 0,65$  e densidade aproximada de 0,25; um cânion com esta característica configura também o limite máximo para uma dispersão satisfatória nos cânions urbanos (OKE, 1988).

Para a classificação de diferentes tipos de superfície, Ferreira, Ferreira e Assis (2010) compilaram os dados revisados de Davenport<sup>11</sup>, com dados de rugosidade de Spera<sup>12</sup> e do Atlas Europeu de Vento<sup>13</sup>, conforme pode ser visualizado na Tabela 6.

**Tabela 6 – Classificações de  $z_0$**

Tipo de Cobertura	$z_0$		
	Davenport	Spera	Atlas Europeu
Mar aberto ou corpos d'água	0,0002	0,0001 a 0,001	0,0001
Praias, áreas planas sem obstáculos, solo coberto por neve	0,005	0,0001 a 0,002	-
Pradarias, tundra e aeroportos	0,03	-	0,01
Áreas com plantas baixas e poucos obstáculos	0,10	0,002 a 0,30	0,03 a 0,10
Culturas agrícolas de altura variável e obstáculos dispersos	0,25	-	0,15 a 0,30
Áreas intensamente cultivadas com muitos obstáculos agrupados, separados por espaços abertos, ou áreas com edifícios baixos (subúrbios)	0,50	0,40	0,50
Áreas ocupadas por obstáculos regulares e de mesma altura (áreas florestadas, áreas urbanas densamente ocupadas com prédios com pouca variação altimétrica)	1,0	1,2	-
Centros de cidades com edifícios de diferentes alturas	$\geq 2,0$	3,0	1,0

**Fonte: Ferreira, Ferreira e Assis (2010)**

<sup>11</sup> DAVENPORT, A. G. Rationale for determining design wind velocities. J. Struct. Div. Am. Soc. Civ. Eng, v. 86, 1960, p. 39-68 apud WIERINGA, J.; DAVENPORT, A. G.; GRIMMOND, C. S. B. New revision of Davenport roughness classification. In: EUROPEAN & AFRICAN CONFERENCE ON WIND ENGINEERING, 3., 2001, Eindhoven. **Proceedings...** Eindhoven, 2001. p. 1–8.

<sup>12</sup> SPERA, David A. **Wind Turbine Technology**. New York: ASME Press, 1994. 393p.

<sup>13</sup> TROEN, I.; PETERSEN, E. L. **European Wind Atlas**. Roskilde: Riso National Laboratory, 1989.

Do ponto de vista do conforto térmico, Mascaró (1996, p. 44) cita que “a ação do vento é sentida pelas pessoas como força e como velocidade na medida em que aumenta a taxa de troca de calor com o exterior”. Conforme relato de Oke (1987), pesquisadores do Building Research Establishment (Grã-Bretanha) estabeleceram que a velocidade do vento a 5 m/s é sentida fisicamente pelos pedestres, sendo a de 10 m/s claramente desconfortável; com velocidade do vento a 15 m/s o controle do caminhar é afetado e a 20 m/s esta torna-se perigosa.

A ação do vento na camada limite pode ser caracterizada pelo emprego de três diferentes modelos: físicos, numéricos e estatísticos. Inicialmente, os modelos estatísticos foram utilizados para a modelagem urbana, principalmente em estudos comparativos, como os que lidam com ilhas de calor. Nesse método, a base de dados é gerada a partir de medições em campo, resultando inicialmente em um modelo paramétrico que, dependendo das condições, pode ser aplicado de forma geral. A base estatística serve, também, para a validação de modelos.

Os estudos em túneis de vento consideraram, primeiramente, modelos bidimensionais. Posteriormente, os túneis de vento passaram a ser utilizados para análise dos padrões do fluxo de ar em áreas de maior dimensão. Isso foi possível devido ao desenvolvimento de túneis mais complexos e maiores, já que é necessário incluir no modelo o perfil vertical da velocidade do vento regional. Cita-se como vantagem a possibilidade de simular diferentes parâmetros, por exemplo, diferentes arranjos e geometrias urbanas.

Os avanços na área da computação têm possibilitado o desenvolvimento e utilização de simulações numéricas. A desvantagem dos modelos numéricos é o tempo necessário para o processamento dos dados. No entanto, estudos (GADILHE; JANVIER; BARNAUD, 1993; HE; SONG, 1999) apontam diversas vantagens em relação aos modelos anteriores, como a análise integral do campo de estudo ao invés de um número limitado de pontos, bem como a facilidade em testar diferentes parâmetros. Em geral, os modelos numéricos são validados a partir da comparação com estudos realizados com modelos físicos.

Em ambientes urbanos nos quais é imprescindível a verticalização das edificações, Oke (1987) sugere que a torre do edifício esteja implantada sobre um

embasamento de um ou dois pavimentos<sup>14</sup>, evitando a potencialização da velocidade do vento no nível do pedestre e um maior desconforto térmico.

O fluxo de ar em determinada taxa é uma das condições para que áreas verdes auxiliem no incremento do conforto térmico em espaços abertos, conforme visto a seguir.

### 2.2.5 Vegetação

A modificação do meio natural devido à expansão das áreas urbanas exige quase sempre a retirada da vegetação para dar lugar aos espaços construídos, provocando alterações nas propriedades da superfície e, conseqüentemente, no balanço hidrológico local. A nova geometria resultante e o albedo podem levar a um aumento da provisão de radiação, de maneira que o balanço de energia também é afetado, e dependendo da dimensão da área atingida, o clima pode sofrer modificações no nível de micro, meso ou macroclima (OKE, 1987).

Parques urbanos, praças e bosques exercem diversas funções no espaço citadino, como: opção de lazer e recreação, esportiva, descanso e contemplação; de forma a serem percebidos ganhos econômicos, sociais e ambientais, especialmente em áreas densamente povoadas. Em razão das propriedades específicas convergentes em áreas verdes no meio urbano, são atribuídos diversos benefícios associados à arborização, como: redução do consumo de energia em edificações, auxílio na redução de enchentes quando utilizadas áreas permeáveis (gramadas), valorização de imóveis em propriedades arborizadas, favorecimento da utilização dos espaços públicos e efeito de filtro sonoro. A vegetação ainda tem impacto na qualidade do ar e no clima, estando relacionada à qualidade de vida urbana (LOIS; LABAKI, 2011).

A presença de árvores no ambiente urbano pode afetar o campo térmico individual de ruas e até mesmo produzir modificações na escala da cidade. Entre as propriedades comuns determinantes para a avaliação da contribuição das áreas vegetadas ao ambiente térmico urbano, citam-se: espécie, densidade da copa, dimensão da área vegetada, disposição das árvores nos espaços abertos (praças,

---

<sup>14</sup> Esta tipologia é comum na cidade de Curitiba devido à implantação do Plano Massa.

parques, estacionamentos) ou em ruas individuais, condição hídrica, umidade da atmosfera, propriedades do solo, fatores psicrométricos, efeitos da advecção, condições meteorológicas e climáticas (ERELL; PEARLMUTTER; WILLIAMSON, 2011; GIVONI, 1998; OKE, 1987). Em relação a esta última propriedade, cita-se que, em localidades com clima quente e seco a magnitude das diferenças de temperatura do ar entre áreas vegetadas e áreas sem sombreamento, pode ser mais significativa do que em regiões com outras condições climáticas (ERELL; PEARLMUTTER; WILLIAMSON, 2011).

Para a definição do sistema solo-planta-ar, Oke (1987) leva em conta um volume cuja altura se estende desde o topo das plantas até uma determinada profundidade do solo, no qual é desconsiderado o fluxo de calor vertical. O balanço de energia de um sistema solo-planta-ar é, então, definido segundo a Equação 7 (OKE, 1987, p. 110):

$$Q^* = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_P \quad \text{Equação 7}$$

onde  $\Delta Q_S$  é a taxa líquida de calor físico armazenado a partir da liberação ou absorção de calor pelos elementos do sistema e  $\Delta Q_P$  é a taxa líquida de energia bioquímica armazenada devido ao processo de fotossíntese. Todas as variáveis são dadas em  $W/m^2$ .

Em razão da “natureza do ambiente circundante”, pode ser necessário o acréscimo de um termo de advecção ( $\Delta Q_A$ ) na Equação 7, o qual é responsável pelo “ganho ou perda de energia líquida devido ao transporte horizontal de calor sensível e latente” (OKE, 1987, p. 110, tradução livre).

Conforme Oke (1987), a Equação 7 considera os fluxos verticais que atravessam o topo do volume, não os mecanismos e processos que ocorrem no seu interior. Assim, a condição hídrica das plantas, quando não restringida, permite a evapotranspiração (fenômeno que ocorre a partir da combinação da transpiração pelas folhas e a evaporação do solo).

A eficiência da planta em transformar energia radiante em energia química pela fotossíntese é baixa (de 1 a 2%), podendo ser desconsiderado o efeito térmico a partir desse fenômeno (GIVONI, 1998).

A absorção da radiação solar pelas folhas é consumida em maior parte pela evaporação, tendo como consequências o resfriamento das superfícies foliares, bem como do ar em contato com as mesmas e o aumento da umidade do ar (GIVONI, 1998). Conforme Jacobs (1994), a evaporação afeta tanto o clima local e regional, já que controla a quantidade de calor sensível e latente transferida para a atmosfera, como também afeta o clima em escala global, uma vez que o vapor d'água é um dos mais importantes gases causadores do efeito estufa. Além disso, a evaporação tem importância para o ciclo hidrológico e para a fisiologia das plantas.

Devido ao crescimento urbano, Kondoh e Nishiyama (2000) observaram com auxílio de imagens de satélite, que na área metropolitana de Tóquio (35°42' N, 139°46' E) o processo de evapotranspiração foi reduzido em aproximadamente 38% em um período de 23 anos (de 1972 até 1995). A evapotranspiração pode ser relacionada ao conforto térmico humano, uma vez que as condições de umidade do ar influenciam a capacidade da pele na evaporação do suor. Porém, Erell, Pearlmutter e Williamson (2011) ressaltam que, não é adequado atribuir exclusivamente ao fenômeno da evapotranspiração das plantas a redução da temperatura do ar no ambiente urbano, uma vez que, devido às ocorrências dos processos da fotossíntese principalmente no topo das copas das árvores e da transferência de vapor na camada acima das árvores, o fenômeno de resfriamento pela evapotranspiração teria pouco efeito ao nível do pedestre.

Considerando ainda que, no período diurno, o teor de umidade diminui na proximidade com o solo artificial e o fluxo de calor latente tende a subir em direção à abóbada celeste; o efeito da vegetação na redução da temperatura ambiente seria mais devido à redução da carga radiante em virtude do sombreamento gerado pelas copas das árvores do que pelo resfriamento do ar (ERELL; PEARLMUTTER; WILLIAMSON, 2011).

Devido ao comportamento seletivo na absorção de diferentes comprimentos de onda, a radiação solar pode ser interceptada pelas árvores entre 60 a 90%, para radiação visível e infravermelha, respectivamente, reduzindo a temperatura do ar e a temperatura superficial do solo (LABAKI *et al.*, 2011; OLGYAY, 1998). Sob agrupamentos de árvores de copa densa, a redução na temperatura do ar chega a ser até 4°C, comparadas as áreas com exposição direta à radiação solar (COHEN; POTCHTER; MATZARAKIS, 2012, MASCARÓ, 1996)

Deve-se considerar, também, que em geral, as árvores possuem baixo valor de albedo devido a dois fatores: a pigmentação escura das folhas e porque a luz solar é absorvida ao incidir na camada mais alta das copas das árvores, gerando múltiplas reflexões entre as folhas individuais (ERELL; PEARLMUTTER; WILLIAMSON, 2011). Segundo os mesmos autores, enquanto áreas gramadas podem refletir de 20 até 22% a luz solar, árvores refletem de 12 até 15%.

No período noturno, por não haver fotossíntese, os estômatos das plantas são fechados e não há resfriamento por transpiração, sendo os fatores de maior influência para a determinação do campo térmico das áreas vegetadas: a geometria radioativa e as propriedades térmica das superfícies.

A escolha da forma das árvores e espécie (fatores relacionados ao padrão de sombra gerada) deve estar associada às condições climáticas locais. As árvores decíduas são recomendadas em cidades de clima temperado ou com desconforto por frio, uma vez que a perda de folhagem coincide com o período de baixas temperaturas. Salienta-se que podem existir variações no comportamento (permeabilidade) entre as diferentes espécies de árvores decíduas, devendo ser realizada uma seleção para que se atinjam os efeitos microclimáticos desejados; além disso, devem ser utilizadas preferencialmente as espécies nativas.

Assim como árvores, as áreas gramadas possuem, em geral, baixa refletância quando comparadas com superfícies com maior valor de albedo. A tendência é de que, por meio da evapotranspiração, áreas gramadas transformem a energia absorvida em calor latente, havendo reduções do calor sensível da camada de ar adjacente, da temperatura de superfície (especialmente quando comparada às superfícies escuras ou secas) e da radiação de onda longa, à qual os pedestres estão sujeitos (OKE, 1987). Outra forma das áreas gramadas contribuírem com a redução de temperatura do ar é por meio da evaporação. Errell, Pearlmutter e Williamson (2011) citam que, em pequenas áreas gramadas, com a mistura dos fluxos de ar, o efeito de resfriamento se restringe à camada de ar próximo à superfície. Segundo os mesmos autores, a taxa de evapotranspiração de áreas gramadas de baixa altura varia, tipicamente, entre 70 a 80% da evaporação de superfícies líquidas.

Áreas verdes podem auxiliar no incremento do conforto térmico externo e na obtenção de níveis mais tangíveis de estresse térmico. Conforme Errell, Pearlmutter e Williamson (2011), para essa situação ser factível duas condições são



necessárias: (1) o ar não pode estar extremamente quente, isto é, com temperatura maior que 35°C, nem muito úmido e (2) o fluxo de ar deve ser mantido a uma determinada taxa. A partir de determinadas condições, na altura das copas das árvores ou abaixo delas, é criada uma resistência ao fluxo de ar, havendo redução da velocidade do vento. Essa constatação é determinante para a dissipação de calor pelo corpo humano por convecção e evaporação (*sweat evaporation*), influenciando diretamente no balanço de energia do pedestre. No inverno, dependendo da origem do fluxo de ar, a tendência é de que velocidades do vento mais baixas podem ser benéficas em dias com temperaturas baixas, mas não em regiões quentes, especialmente quando acompanhada de alta umidade (GIVONI, 1998).

O efeito da vegetação no ambiente urbano tem alcance limitado. A extensão das áreas vegetadas, como também os arranjos e disposições das árvores, estão relacionados à magnitude de tal efeito. Considerando questões como as inadequações térmicas, um dos efeitos mais importantes são as diferenças de temperatura intra-urbana entre agrupamentos arbóreos e seu entorno imediato. Mesmo no interior de parques existem diferenças de temperatura do ar, em decorrência da densidade da copa e do arranjo das árvores no espaço, fatores relacionados ao grau de exposição à radiação solar direta e ao fator de visão do céu. A temperatura do ar mais baixa em parques urbanos em relação ao entorno imediato gera as chamadas ilhas de frescor. Em decorrência do tamanho da área vegetada, o efeito da vegetação será provavelmente localizado, restringindo-se aos limites do parque.

Segundo Erell, Pearlmutter e Williamson (2011), não apenas o arranjo das vegetações influencia no alcance do efeito microclimático, mas, também, a velocidade e direção do vento; a magnitude pode declinar em uma taxa exponencial a partir da borda da área vegetada, ou pode o efeito de resfriamento ter o alcance interrompido abruptamente na borda a barlavento da área verde. Ainda segundo os autores, as contradições entre dados apresentados sobre o alcance dos efeitos podem estar relacionadas ao padrão espacial horizontal da temperatura do ar que muda constantemente com a velocidade e direção do vento.

O fluxo de ar próximo ao solo depende do tipo e densidade das árvores, bem como da sua disposição no ambiente urbano; fatores relacionados à rugosidade do terreno. Ao passar sobre superfícies de diferentes tipos, o fluxo de ar sofre ajustes, sendo a linha de descontinuidade chamada de "*leading edge*" (Figura 13). O

ajuste tem início na camada intra-urbana (*internal boundary layer*), apresentando difusão vertical, com alcance no sentido do fluxo de ar a partir da linha de descontinuidade. Acima da camada intra-urbana, as propriedades do ar são determinadas pelas influências dos fluxos acima e abaixo (OKE, 1987).

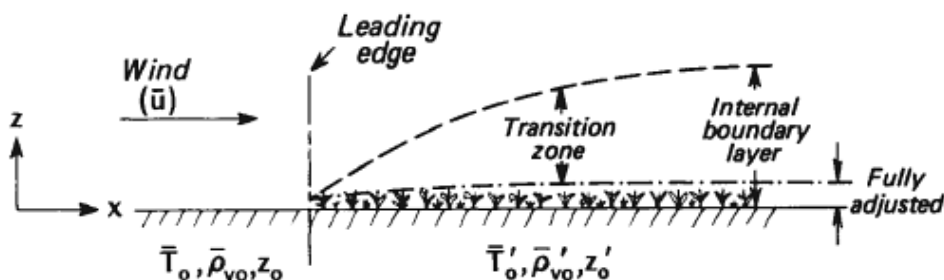


Figura 13 – Ajustes do fluxo do ar sobre superfícies de diferentes tipos

Fonte: Oke (1987, p. 160)

Segundo Oke (1987), na *leading edge*, no caso de uma condição hídrica das plantas sem restrição, a taxa de evaporação aumenta substancialmente comparada a uma taxa de equilíbrio acima de uma superfície extensa e saturada. A velocidade do vento, ao aumentar progressivamente a favor do vento, tem o teor de umidade aumentado até a obtenção do nível de equilíbrio. O esforço requerido para a estabilização do ajuste varia entre 100 a 300 m para cada aumento vertical de 1 m. O aumento da taxa de evaporação em superfícies vegetadas resulta em um aumento do fluxo de calor latente e em uma diminuição do fluxo de calor sensível para a atmosfera (OKE, 1987).

O resfriamento diurno do campo térmico de áreas vegetadas ocorre, preferencialmente, em locais com boa cobertura de sombreamento e com grama irrigada. A intensidade máxima ocorre no período da tarde ou início da noite. Parques urbanos secos ou com árvores esparsas apresentam altos valores de temperatura do ar durante o dia, em decorrência da exposição à radiação solar. No período noturno, devido à emissão de radiação de onda longa, pode haver menor temperatura nesses locais em comparação ao ambiente urbano circundante. O efeito Oasis, fenômeno de escala local, é resultado das diferenças do campo térmico entre áreas vegetadas e entorno construído (OKE, 1987).

Os métodos de avaliação dos efeitos da vegetação no clima podem envolver medições da temperatura do ar e/ou da temperatura de superfície, e análises de imagens aéreas infravermelhas, de modelos físicos e ainda, de simulação computacional.

De forma a analisar o efeito de áreas vegetadas em regiões áridas, Krüger, Pearlmutter e Berliner (2007) utilizaram um modelo físico reduzido da malha urbana, possibilitando, por meio de uma série de medições em um modelo reduzido de um arranjo urbano, a verificação do efeito da adição (parcial) de água no balanço energético de superfície. Para isso, painéis evaporativos, equivalentes a superfícies gramadas, foram adicionados ao modelo físico. A partir da variação da porcentagem de área gramada, os fluxos de calor latente ( $Q_E$ ) sofreram alterações expressivas, particularmente quando considerada a rugosidade do terreno.

Yang, Lau e Qian (2011) investigaram de forma empírica o efeito de diversos parâmetros do desenho urbano no microclima da cidade de Shanghai (31°12' N, 121°30' E). As variáveis microclimáticas de dez localidades com alta densidade no centro da cidade foram coletadas por meio de transectos móveis e estações fixas no período de verão de 2008 (julho e agosto). O sombreamento proveniente tanto das copas das árvores como das edificações mostrou ser o fator que mais influencia a ilha de calor.

Zhao *et al.* (2011) investigaram a relação entre os indicadores de planejamento urbano mais comumente utilizados na cidade de Beijing (39,8° N, 116,5° E), China, e os indicadores do clima urbano. A cidade possui um clima continental com verões quentes e úmidos. Para isso, selecionaram onze locais com diferentes morfologias urbanas ao longo do eixo central norte-sul da cidade. As temperaturas de superfície máximas e mínimas foram modeladas por meio de uma equação de balanço de energia da superfície (TSO; CHAN; HASHIN, 1990<sup>15</sup>, 1991<sup>16</sup>), sendo utilizados como valores de referência os dados médios diários de temperatura do ar para o período de 1999 até 2008, obtidos a partir da estação meteorológica de Beijing. Os resultados mostraram que a proporção de cobertura verde (*green cover ratio*) e a proporção H/W (*floor ratio área*) podem explicar de 94,5

---

<sup>15</sup> TSO, C.P.; CHAN, B.K.; HASHIM, M.A. An improvement to the basic energy balance model for urban thermal environment analysis. **Energy Build**, v. 14, p. 143–152, 1990.

<sup>16</sup> TSO, C.P.; CHAN, B.K.; HASHIM, M.A. Analytical solutions to the near-neutral atmospheric surface energy balance with and without heat storage for urban climatological studies. **J Appl Meteorol**, v. 30, p. 413–424, 1991.

– 98,6% a variação diária da temperatura de superfície máxima. A proporção de cobertura vegetal e o limite de altura das edificações (*building height limit*) podem explicar em 98,9 – 99,1% a temperatura de superfície mínima diária. A proporção de cobertura vegetal foi o indicador urbano mais significativo, já que sozinho pode explicar a  $T_s$  máx em 99,7% e a  $T_s$  mín em 99,1%. A diferença máxima de  $T_s$  encontrada entre o espaço com temperatura mais quente e mais fria foi de 6,5°C.

Para Armson, Stringer e Ennos (2012), o efeito de resfriamento provocado por áreas vegetadas pode ser mais bem avaliado por meio da medição das temperaturas de superfície. Os resultados para um estudo realizada em Manchester (53°26'38" N, 2°12'50" W), Reino Unido, mostraram que: a temperatura de superfície da grama quando sombreada pode ser de 4 a 6°C menor que a temperatura do ar; a temperatura de superfície do concreto, quando está sob o sombreamento de árvores, pode ser reduzida em até 19°C, e; o sombreamento das árvores pode reduzir a temperatura de globo em 5 a 7°C e a temperatura do ar em 1 a 2°C, dependendo da permeabilidade da espécie considerada (ARMSON; STRINGER; ENNOS, 2012).

Os efeitos da vegetação, bem como dos elementos da morfologia urbana podem ser avaliados no modelo de simulação computacional ENVI-met.

### 2.3 SIMULAÇÃO DE CLIMA URBANO COM O MODELO ENVI-MET

O modelo computacional ENVI-met foi desenvolvido por Bruse e Flerer (1998) da Universidade de Bochum, Alemanha, com base nas leis fundamentais da dinâmica dos fluidos e da termodinâmica, de modo a simular as interações microclimáticas no ambiente urbano nas três dimensões, com resolução padrão de 0,5 m até 10 m no espaço e de 10 segundos no tempo (BRUSE, 2012).

O programa serve, portanto, para prognosticar cenários urbanos, podendo ser aplicado na arquitetura, planejamento urbano e ambiental e climatologia. O modelo inclui a simulação do processo de trocas térmicas entre superfícies, o fluxo de ar entre as edificações e turbulências, bem como a dispersão de particulados, considerando um dia típico. ENVI-met é um *software* livre (disponível em <http://www.envi-met.com/>).

A Figura 14 representa esquematicamente a estrutura geral do ENVI-met. Como pode ser observado, além do modelo 3D, é utilizado um modelo 1D adicional nas bordas do modelo 3D.

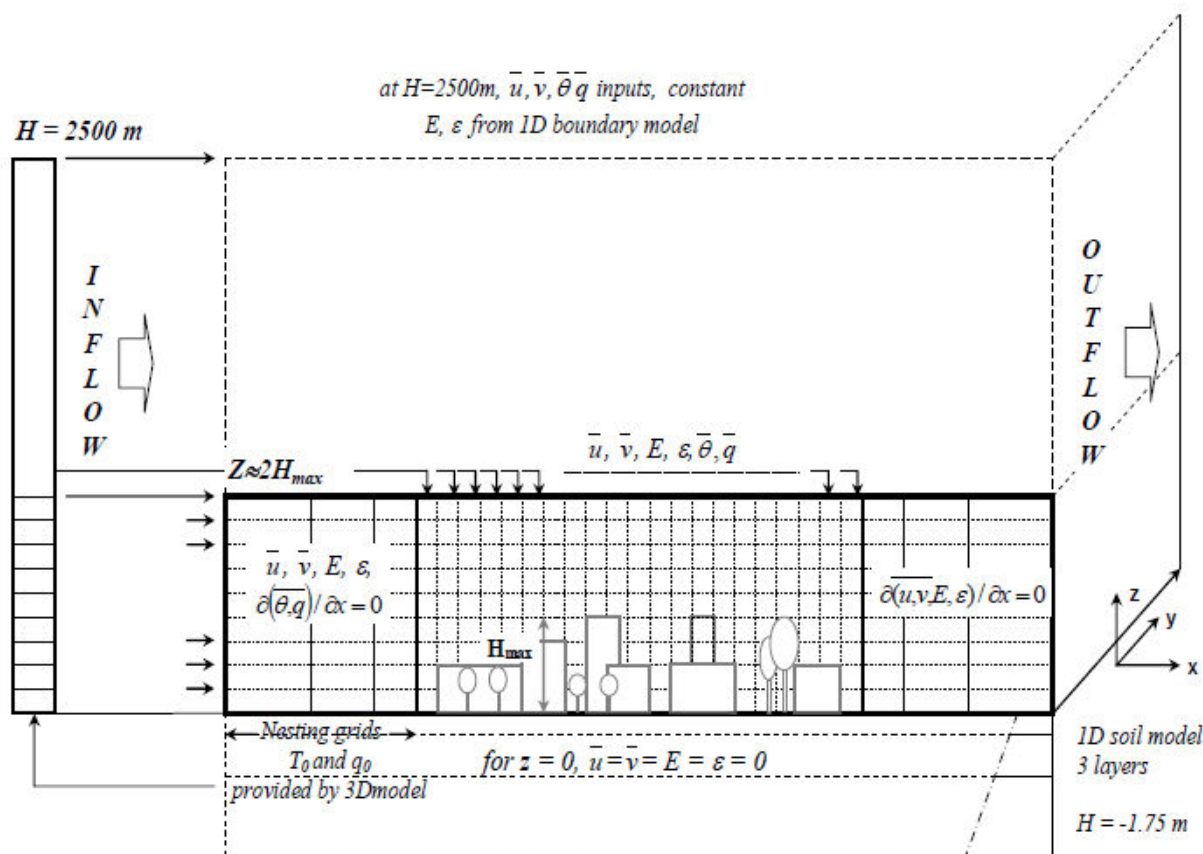


Figura 14 – Representação esquemática da estrutura geral do ENVI-met

Fonte: Ali-Toudert (2005, p. 60)

A função principal do modelo 1D é criar uma interface entre os processos que ocorrem no ambiente urbano simulado e os processos atmosféricos que ocorrem na camada limite, estendendo o topo do modelo 3D até uma altura de 2.500 m.

O modelo está baseado em modelos numéricos complexos descritos em: Bruse e Fleer (1998), Ali-Toudert (2005) e Bruse (2012). Apoiado em tais autores, esta seção contém a descrição geral dos modelos mais relevantes para a presente pesquisa, quais sejam: o modelo atmosférico de superfície e o modelo de vegetação e solo. No final do capítulo, apresentam-se revisões de estudos que realizaram simulações microclimáticas com auxílio do programa.

### 2.3.1 Modelo atmosférico e de superfície

Segundo Bruse (2012), para a simulação da evolução espaço-temporal dos fluxos turbulentos, o ENVI-met, como um modelo CFD (Computational Fluid Dynamics), utiliza as equações de Navier-Stokes na forma não hidrostática e incompreensível (BRUSE; FLEER, 1998; BRUSE, 2012). Paralelamente a este modelo tridimensional, entra em ação um modelo unidimensional para o cálculo de uma das componentes desta equação, a temperatura potencial a uma altura “z”, a qual deve ser representativa para as condições de mesoescala. São aplicadas também a aproximação de Boussinesq e a equação de continuidade para a conservação de massa e incluídos termos fontes locais que descrevem a perda da velocidade do vento devido à influência de elementos vegetais (BRUSE; FLEER, 1998; BRUSE, 2012).

O campo de vento previamente calculado é utilizado na equação combinada de advecção-difusão, utilizada para cálculo da distribuição da temperatura potencial e da umidade específica na atmosfera. Duas equações resultam da aplicação de termos fontes de calor e de vapor (providos pelo modelo de vegetação) à equação, de modo a incorporar o efeito da superfície do solo e da vegetação. Para o termo fonte de calor, considera-se também, a atuação das paredes das edificações (BRUSE, 2012).

Para o cálculo da turbulência atmosférica, é utilizado o modelo E- $\epsilon$  de ordem 1.5, no qual são adicionadas duas variáveis para a determinação dos coeficientes de troca: a energia turbulenta cinética “E” e sua dissipação “ $\epsilon$ ”. Os coeficientes de troca no ar são calculados pela relação de Prandtl-Kolmogorov (BRUSE; FLEER, 1998; BRUSE, 2012). Ressalta-se, porém, que para a camada de grade mais próxima da superfície, na qual ocorrem as interações microclimáticas ao nível do pedestre, os fluxos turbulentos não são calculados pelo modelo E- $\epsilon$ , mas por meio de formulações empíricas que consideram constantes os fluxos turbulentos de momento, calor e vapor na camada de superfície (ALI-TOUDERT, 2005). O número de Richardson Bulk é utilizado para representar a turbulência decorrente de cisalhamento vertical e a turbulência produzida termicamente, estando relacionada à natureza das trocas turbulentas e ao efeito da estabilidade atmosférica.

O balanço de energia das superfícies é calculado segundo a Equação 2, descrita na seção 2.3.2. Conforme Bruse (2012), o fluxo de radiação de onda longa

líquida depende da vegetação, do solo e dos edifícios do entorno, sendo que os fluxos de radiação de onda longa advindos das edificações dependem do fator de visão do céu a partir de uma determinada altura, da emissividade da superfície da parede, da constante de Stefan-Boltzmann e de uma temperatura de superfície média para todas as paredes. O fluxo de radiação de onda curta líquida depende do albedo e do ângulo de incidência do raio solar (lei do cosseno de Lambert) (BRUSE, 2012).

O fluxo de calor sensível a partir das paredes das edificações depende, também, do gradiente entre  $T_s$  e  $T_a$  na camada de grade mais próxima à superfície da parede (BRUSE, 2012). O fluxo de calor através da parede ou cobertura depende do gradiente de temperatura destas superfícies e da temperatura do ar interna (o qual é mantido constante a partir do valor de entrada), além do valor de transmitância (BRUSE, 2012). Em relação às fachadas, Ali-Toudert (2005) sugere que, no caso de céu claro, metade do calor originaria do solo e a outra metade do céu. No caso de céu obstruído, um terço do calor emitido viria do solo e dois terços das fachadas das edificações.

### 2.3.2 Modelo de vegetação e solo

Para a simulação dos fluxos advindos das camadas de vegetação para a atmosfera, a modelagem da resistência (ou condutância) dos estômatos é um dos fatores de maior importância (BRUSE, 2012). Deve-se levar em conta que o comportamento dos estômatos é influenciado por fatores relacionados à fisiologia da planta (temperatura da folha, turgidez da célula vegetal, hormônios, estágio de desenvolvimento das folhas, condições de crescimento) e a fatores ambientais ( $\text{CO}_2$ , luz, temperatura do ar e do solo, umidade do ar, taxa de umidade e concentração de ar no solo, poluição do ar e do solo) (JACOBS, 1994). Jacobs (1994) considera, ainda, que estes fatores podem ter influência diferenciada na sensibilização dos estômatos e avalia que o modelo proposto por Jarvis e Steward (denominado de modelos JS), em 1976, por considerar a condutância dos estômatos dimensionada a partir de seu valor máximo (ou mínima resistência), utilizando um conjunto de funções  $f(x)$ , no qual cada fator é tratado de forma independente, acaba por excluir as interações sinérgicas entre estímulos e a resposta dos estômatos para  $\text{CO}_2$ .

Bruse (2012) considera a mesma limitação na aplicabilidade do modelo apresentado por Deardorff, em 1978.

Alguns modelos climáticos tratam a copa da árvore como uma grande folha única ("*big leaf model*"), assumindo que a pressão de vapor dentro do estômato é igual à pressão de vapor saturado para uma temperatura de superfície média (JACOBS, 1994, p. 3), resultando, portanto, em uma resposta média desta grande folha para um microclima uniforme. Bruse (2012) ressalta que, para os climas com condições climáticas heterogêneas como aqueles encontrados em áreas urbanas, esta situação não retrata a realidade. Por estas razões, a partir da versão 3.0 do ENVI-met, Bruse (2012) passa a recomendar a substituição do modelo clássico de Deardorff para o cálculo da resistência dos estômatos pelo modelo A-gs, apresentado por Jacobs (1994), o qual, além de ser um modelo mais dinâmico por considerar a assimilação de CO<sub>2</sub> pelo processo de fotossíntese, é válido para diferentes condições ambientais. Jacobs (1994) faz uma diferenciação de escalas entre os termos resistência (rs) e condutância (gs). O primeiro estaria relacionado ao controle estomático ao nível da copa e o segundo ao nível da folha.

No modelo ENVI-met, a vegetação é representada esquematicamente por um bloco, sendo que o corpo da planta tanto para cima da superfície, como para baixo, é dividido em 10 partes equidistantes. A divisão do corpo da planta, acima da superfície, é constituída pela densidade de área foliar (*Leaf Area Density*, LAD), e, para baixo, pela densidade de área de raiz (*Root Area Density*, RAD).

No banco de dados de vegetação do ENVI-met estão disponíveis 27 plantas padrões que variam de acordo com os seguintes parâmetros: fixação de CO<sub>2</sub>; tipo de planta (variável relacionada ao diâmetro da folha e as propriedades aerodinâmicas); resistência mínima dos estômatos; albedo; altura da planta; profundidade total da raiz - em valores positivos; LAD em m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> para os 10 segmentos e RAD em m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> para os 10 segmentos (BRUSE, 2012). É possível modificar o valor de algum parâmetro, bem como acrescentar outra espécie de vegetação.

Ressalta-se que o cálculo do modelo de vegetação depende diretamente do modelo do solo, pois são necessárias informações a respeito do processo hidrológico no interior do solo, estando este relacionado ao processo de transpiração da vegetação.



O modelo do solo no ENVI-met considera os processos hidrológicos e termodinâmicos para cálculos de temperatura e umidade, contendo um perfil vertical dividido em 14 partes fixas com uma profundidade limite de -1,75 m (BRUSE, 2012). Adicionalmente, podem ser combinados diferentes tipos de solo ao longo das camadas do perfil vertical. Para cada combinação, são incluídos dados de comprimento de rugosidade, albedo e emissividade.

No banco de dados de solo, há 20 tipos que variam conforme suas características, sendo as principais: volume de água existente, potencial matricial de saturação, capacidade térmica volumétrica e condutividade térmica do material (BRUSE, 2012). Os tipos de solos dividem-se em solos naturais e artificiais. Para os solos artificiais (concreto, asfalto, granito e basalto), a condutividade térmica é calculada a partir de valores pré-estabelecidos descritos no arquivo base (*database*). Para os solos naturais, a condutividade térmica é calculada segundo o teor de água (BRUSE, 2012).

### 2.3.3 Revisão de estudos

Para a compilação das pesquisas brasileiras utilizou-se como critério os estudos provenientes de dissertações de mestrado e teses de doutorado, sendo encontrados cinco estudos de mestrado a partir de 2009 e um de doutorado publicado em 2011. Adicionalmente, apresentam-se resultados de teses realizadas fora do Brasil e algumas das pesquisas publicadas em periódicos internacionais.

Shinzato (2009) quantificou, por meio de coleta de dados em campo e simulações paramétricas realizadas no ENVI-met, a influência da vegetação no microclima considerando diferentes maneiras de distribuição de área vegetadas. A cidade de São Paulo (23°32'51" S, 46°38'10" W) foi eleita como local de estudo. As medições foram realizadas no Bairro Luz, área central da cidade, em um dia de dezembro de 2006 e outro em abril de 2007. Os horários de medição considerados foram: 7h, 10h, 13h, 16h e 19h. Para a simulação foram levados em conta os dados da medição ocorrida em dezembro, sendo que para o ajuste de dados simulados em relação aos medidos, observou-se um atraso no padrão de aquecimento e resfriamento dos valores de temperatura do ar. Foram consideradas três escalas de simulação. No cenário de pequena escala foi considerado apenas um cânion, sendo

avaliada a influência de áreas gramadas e de árvores com diferentes densidades foliares. No cenário de média escala, foi utilizada uma área composta por nove quadras, modelada conforme os parâmetros construtivos do Bairro Moema, mas utilizando-se dos dados coletados na região da Luz para a configuração das variáveis microclimáticas. Foram testadas cinco formas de distribuição da vegetação. O cenário que favoreceu temperaturas do ar mais baixas continha um parque com desenho linear, ocorrendo a canalização dos ventos e a diminuição do calor acumulado. O cenário real abrangido pela pesquisa consistiu em oito quadras, contendo duas praças pouco arborizadas. Nos espaços arborizados a diferença média de temperatura do ar entre os espaços arborizados e as ruas adjacentes foi de 1,5°C. O efeito amenizador da temperatura do ar mostrou ter influência apenas localmente. A temperatura superficial do solo em área sombreada por árvores de copa densa apresentou diferenças médias de até 23°C. A qualidade do sombreamento foi atribuída à densidade da copa.

Silva (2009) analisou o desempenho ambiental, considerando a arborização urbana de três vias públicas de Teresina (5°5'21" S, 42°48'6" W), cidade localizada no Estado do Piauí, região nordeste, contribuindo com diretrizes de desenho urbano para a produção de espaços públicos mais confortáveis termicamente. O clima da cidade, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger, é tropical sub-úmido. Foram escolhidas vias com tipologias diferentes acerca da morfologia urbana e da densidade e espacialização da vegetação na caixa viária. As medições seguiram os horários recomendados pela Organização Meteorológica Mundial (OMM): 9h, 15h e 21h, sendo realizadas em dois dias consecutivos e abrangendo estações secas (8 e 9 de outubro de 2007) e chuvosas (21 e 22 de março). No modelo ENVI-met foram simuladas as três áreas de estudo. Adicionalmente, foi incluída arborização e modificado o tipo de solo das calçadas na via que apresentou valores mais altos de temperatura do ar. Para isso, foram considerados os dados microclimáticos do mês de março. Não são apresentadas as diferenças entre os dados simulados e medidos. A respeito da ilha de calor, os locais densamente arborizados contribuíram negativamente para as trocas térmicas. Embora durante o dia, a vegetação tenha influenciado positivamente para um cenário de conforto térmico no período quente e seco, com diferenças entre áreas com arborização densa e áreas pouco arborizadas de até 5°C nas medições e de 3,1°C nas simulações.

Branco (2009) investigou o microclima da Superquadra 108, quadra modelo residencial implantada na Asa Sul do Plano Piloto de Brasília, local caracterizado por arborização intensa. O estudo teve caráter experimental; foram utilizadas coleta de dados microclimáticos *in loco* e simulação computacional. Brasília (15°48'0" S, 47°51'50" W) está localizada no Centro-Oeste brasileiro. O clima é Tropical de Altitude de acordo com a classificação de Köppen-Geiger. As medições de campo foram realizadas nos meses de setembro de 2008 e janeiro de 2009, em dois dias consecutivos, englobando dois períodos: seco e chuvoso. Os pontos na Superquadra foram escolhidos de acordo com a porcentagem de vegetação (18%, 37% e 42%), considerando um raio de influência de 50 m. Para a classificação da morfologia urbana de cada ponto, foi utilizada a relação W/H e considerado o impacto da radiação solar, sendo os espaços classificados em claustrofóbicos, de recolhimento ou expansivos, termos propostos por Bustos Romero (2001). Parece haver uma incompatibilidade da altura das edificações modeladas com a altura informada. Para a configuração dos dados de entrada no modelo ENVI-met, foram necessárias adaptações. Para o dado inicial de velocidade do vento foi considerada a média aritmética obtidas nas medições *in loco* a 1,5 m, não sendo citada a correção matemática desta variável para 10 m de altura. Outra variável que exigiu adaptação foi a umidade relativa do ar. No ajuste entre dados medidos e simulados foi considerada uma margem de erro de 15%. O resultado da calibração apontou para um gradiente de temperatura do ar acima de 4°C, sendo que os valores de temperatura do ar simulados foram, em geral, superestimados comparados aos dados medidos. A mesma consideração foi feita para a umidade relativa do ar. Os dados de vento não apresentaram correlação entre dados medidos e simulados. A arborização urbana mostrou ser importante, principalmente, no horário das 15h, quando as diferenças de Ta entre os pontos analisados foi maior.

Nakata (2010) avaliou o comportamento do pedestre no ambiente térmico urbano utilizando-se de medições de campo e aplicação de questionários em um bairro residencial de Bauru (latitude entre 21°30'S e 23°S, longitude entre 48°W e 50°W e altitude variando entre 490 a 615 m), cidade localizada no centro-oeste de São Paulo. Paralelamente, essa área foi simulada no modelo ENVI-met e o comportamento do pedestre avaliado na ferramenta BOTworld, o qual utiliza um sistema Multi-Agent (BRUSE, 2012). Esta ferramenta introduz personagens virtuais

com características físicas pré-determinadas no cenário urbano simulado no ENVI-met, possibilitando a análise da sensação térmica do personagem em diferentes configurações urbanas. Foi simulado, também, um cenário hipotético que considerou o cenário real, mas com aumento da altura das edificações. As medições foram realizadas nos períodos de inverno (julho a agosto de 2009) e verão (janeiro a fevereiro de 2010). Foi utilizando o Voto Médio Predito (PMV) para avaliação de conforto. A aplicação dos 128 questionários foi realizada em diferentes horários. Para a simulação no ENVI-met foram selecionados os dias considerados mais estáveis entre os dias de inverno e de verão. O tempo de iteração necessário para estabilização dos dados foi de dois dias (ou duas curvas) no inverno e de três dias (ou três curvas) no verão. Para a validação do modelo, foram identificados os horários de melhor aderência sendo apontados os valores das diferenças absolutas. A estratégia de verticalização mostrou ser eficaz em alguns períodos, principalmente quando associada ao efeito de ventilação natural. O uso de arborização é recomendado para os períodos não atingidos pelo sombreamento das edificações.

Carfan (2011) analisou o microclima e conforto térmico de três frações urbanas da cidade de Ourinhos ( $22^{\circ}58'44''S$ ,  $49^{\circ}52'14''W$ , altitude de 483 m), localizada no sudoeste do Estado de São Paulo. As áreas de estudo foram escolhidas de acordo com a dinâmica urbana e climática, sendo classificadas em: urbana densa, permeável e expansão urbana. Foram realizadas medições de campo nos dias 10/06/2009 e 15/02/2010 durante um ciclo completo de 24h, sendo apresentados apenas os dados coletados de temperatura do ar. O modelo ENVI-met serviu para simular esses cenários e mais outras três áreas 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 daquela área de NNO/SSE para L/O. A respeito dos dados de entrada, foram utilizados os dados coletados e não os da estação oficial, concluindo-se que estes seriam dados horários das 6h00, período no qual as simulações foram iniciadas. Não é citada no decorrer da pesquisa a existência de um tempo de iteração para estabilização do modelo. O ajuste do modelo foi realizado a partir da comparação com os valores de temperatura do ar, sendo aplicados testes de correlação e de regressão linear para verificar a consistência dos dados. Tanto na situação de inverno, como na situação de verão, o desempenho do modelo foi considerado satisfatório. No verão,

comparativamente a situação real, a adição de vegetação apresentou uma redução média de  $0,6^{\circ}\text{C}$  na temperatura do ar e a mudança na altura das edificações contribuiu com uma redução na  $T_a$  de  $0,4^{\circ}\text{C}$ . Os índices de conforto utilizados foram o Voto Médio Predito (PMV) e a Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas (PPD), sendo que as propostas não foram suficientes para atingir níveis de conforto térmico.

Ali-Toudert (2005) analisou a influência de variáveis de desenho urbano para o conforto térmico externo de Ghardaia na região do Mzab, Algeria ( $32,40^{\circ}\text{ N}$ ,  $3,80^{\circ}\text{ E}$ , altitude de 469 m acima do mar), cidade caracterizada por um clima quente e seco. Foi simulado um cânion urbano com 8 m de largura constante, sendo que as alturas das edificações variaram de acordo com as relações H/W: 0,5; 1; 2; 3 e 4. Para cada relação H/W foram consideradas as orientações E-W e N-S. Para a relação H/W=2 ainda foram consideradas as orientações intermediárias NE-SW e NW-SE. Adicionalmente, foram considerados cânions com configurações urbanas mais complexas: assimétricos e com alto valor de FVC, com galerias para diversas orientações; assimétrico com galeria e baixo valor de FVC, com vegetação, e, finalmente, com vegetação e parte das edificações em balanço. Considerou-se, também, a comparação entre os ventos perpendicular e paralelo e o conforto térmico nos períodos de verão e inverno.

As simulações paramétricas ocorreram para um dia típico de verão (1 de agosto de 2003), abrangendo um ciclo de 24 horas. Na configuração dos dados de entrada, foi considerado um vento perpendicular ao eixo da rua e velocidade constante de 5 m/s. Foi realizada uma comparação visual entre os dados de temperatura do ar e pressão de vapor medidos e simulados. Não foram apresentados dados estatísticos para a predição do erro, mas percebe-se que o período diurno apresentou maior correspondência entre os dados de  $T_a$ , pois após às 19h00, não foi possível simular a mesma amplitude térmica medida, superestimando essa variável.

Os resultados apontaram uma diferença máxima aproximada de  $3^{\circ}\text{C}$  às 15h00 entre os cânions mais profundo e mais raso, para as orientações principais. Em latitudes subtropicais, o ambiente térmico em cânions com H/W=0,5 é o que apresenta maior nível de estresse térmico devido à maior exposição à radiação solar, independentemente da orientação axial. Nesse sentido, a temperatura do ar apresentou ser mais sensível à proporção H/W do que a orientação da rua. A temperatura radiante média também mostrou ser influenciada pela geometria do

cânion, no entanto, o padrão desta variável no interior do cânion foi distinto do padrão uniforme apresentado pela Ta.

A orientação E-W apresentou maior desconforto térmico, mesmo em cânions profundos com  $H/W=4$ , sendo recomendável a inserção de vegetação. Recomenda-se localizar a arborização preferencialmente próxima à fachada sul ou no centro do cânion, dependendo do uso da rua e da proporção  $H/W$ . Foi estabelecida como configuração ideal o cânion com orientação N-S e relação  $H/W$  igual ou maior que 2. Para esta mesma proporção geométrica, as orientações intermediárias estudadas apresentaram ser uma alternativa eficiente, pois o efeito de sombreamento é mais eficiente, estando o cânion parcialmente sombreado na maior parte do tempo. A autora reforça que as orientações NE-SW e NW-SE, além de serem eficientes para a mitigação do estresse térmico no verão, permitem maior acesso solar que a orientação N-S no período de inverno. Na análise de cânions assimétricos com maior valor de FVC e orientação axial sul, o uso de galerias se mostrou eficiente para a redução do índice de conforto PET, facilitando, também, o resfriamento noturno. Resultado semelhante foi encontrado para o último caso de estudo, no qual a projeção das sombras das edificações sobre a rua é mantida na maior parte do dia. Conclui-se que o índice de conforto térmico utilizado pode ter sido superestimado pelo modelo, por não terem sido realizados ajustes nos fluxos de radiação. A comparação entre os ventos com incidências paralela e perpendicular mostrou que o primeiro contribui para uma redução do índice PET acima de  $12^{\circ}\text{C}$ . Assim, evidencia-se a dependência do conforto térmico externo na configuração do desenho urbano. Em regiões com climas extremos é essencial a aplicação de estratégias para minimizar o desconforto térmico.

Com o objetivo de quantificar o efeito da forma urbana e da vegetação no microclima, Fahmy e Sharples (2009) utilizaram o ENVI-met para simular um distrito virtual, com duas diferentes propostas de configurações, na cidade de Cairo, Egito ( $30^{\circ}7' \text{ N}$ ,  $31^{\circ}23' \text{ E}$ ). Esse distrito, projetado para uma população de média densidade, possui cânions paralelos e arranjos lineares de arborização urbana. Foram utilizados dados da estação oficial, dispondo de uma série longa de dados (30 anos). Foi selecionado o dia 26 de junho, cujas características representavam as condições de calor extremo daquela região. As condições de conforto térmico foram avaliadas por meio do índice PMV, o qual apresentou reduções mesmo nos pontos com baixa proporção de  $H/W$ . Os altos valores de PMV foram justificados pelas

condições climáticas críticas e pela possibilidade do modelo superestimar a radiação solar global no período da manhã.

Ng *et al.* (2012) realizaram um estudo em Tsuen Wan, Hong Kong (22°15' N, 114°10' E), China, cidade com clima subtropical úmido. A medição *in loco* foi realizada no dia 9 de maio de 2008 das 15h00 até às 16h00. Adicionalmente, foi realizada uma medição com uma estação fixa instalada a 90 m acima do solo para o período de maio a agosto, sendo selecionados 12 dias para análise. A simulação teve início às 6h00, sendo utilizados dados da estação oficial. A correlação entre os dados medidos e os simulados foi de 0,76. Posteriormente, realizou-se um estudo paramétrico na morfologia urbana de um bairro típico de Mong Kok, cuja área contém a mais alta densidade populacional do mundo com 130.000 habitantes por km<sup>2</sup>. No “Case H1” foram consideradas edificações com altura homogênea de 60 m; as proporções de H/W variaram de 2 a 6. De forma a comparar o efeito da forma urbana, foram consideradas edificações com altura de 40 m (“Case H2”), e com altura de 20 m (“Case H3”). No total, além das alturas das edificações foram feitas variações no tipo de vegetação e na proporção de cobertura vegetal, totalizando 33 casos de estudo. Os dados foram analisados às 15h00. Os resultados apontaram que o uso de telhado verde em edifícios altos não afeta a temperatura ao nível do pedestre, especulando-se que a vegetação no interior do cânion, local no qual estão concentradas as atividades humanas, pode ser uma estratégia mais eficiente. A inserção de árvores cobrindo 16% da área de estudo pode reduzir em 0,4°C a temperatura ambiente, enquanto uma cobertura vegetal de 56% a redução pode ser de 1,8°C, quando comparado ao caso base, apresentando mais benefícios do que a utilização de grama. O efeito de resfriamento de áreas verdes são potencializados em cânions com proporção H/W até 1, de forma que o cenário com edificações de 20 m de altura apresentou maior redução de temperatura do ar.

Chen e Wong (2006) investigaram, para a cidade de Singapura (1°22'0" N, 103°48'0" E), os efeitos térmicos de grandes áreas verdes no entorno urbano. As variáveis temperatura e umidade do ar foram coletadas em dois parques nos períodos de janeiro a fevereiro e junho a julho de 2003. Além disso, foi locada uma estação microclimática fixa no topo de um edifício de 4 pavimentos próximo a Clementi Woods (CWP), parque selecionado para simulação no ENVI-met. Utilizaram-se valores médios para as variáveis microclimáticas de entrada. No entanto, não é especificado se os valores médios se referem a uma média diária ou

a média do horário do início das simulações. Foram simuladas 40 horas e descartadas as primeiras 24 horas. Os resultados apontaram a existência de uma zona de baixa temperatura com maior intensidade na área do parque. A altura máxima dessa zona foi de 70 a 80 m. Considerando que o edifício mais alto possui 66 m de altura, o efeito de resfriamento provocado pelo parque atinge não somente o nível do pedestre, como também as partes mais altas das edificações. O efeito de resfriamento no entorno foi atribuído a três fatores: distancia em relação ao parque, direção do vento e disposição (layout) das edificações. A comparação entre os cenários atual com o parque e a retirada deste mostrou que a área vegetada pode reduzir a temperatura do ar entre 0,2 a 0,5°C. A condição térmica piora quando a área vegetada é substituída por edifícios e solo pavimentado.

Wong e Jusuf (2008) analisaram as modificações na temperatura do ar no campus da National University of Singapore (NUS) em decorrência da implantação do Plano Diretor denominado “NUS Master Plan 2005”, o qual introduz novas edificações ao campus (mais de 56% novas edificações) e, conseqüentemente, diminuição das áreas verdes (redução na taxa vegetada de 55% para 52%). Foram adotadas duas escalas no processo de simulação. Para a área como um todo foi levada em conta a configuração do campus segundo o Plano Diretor no primeiro cenário e o aumento da arborização no segundo cenário. Para um recorte específico foram consideradas quatro alternativas de cenários: o cenário original, a inserção de grama na cobertura, a inserção de árvores na cobertura e a inserção de árvores na cobertura e no solo. Em relação aos dados de entrada do ENVI-met foram utilizadas informações de um estudo anterior (CHEN; WONG, 2006). Um sistema de informação geográfica (SIG) foi utilizado para quantificar as áreas construídas, pavimentadas e vegetadas. Além disso, foram quantificadas a proporção de edificação antigas e novas em cada uma das 11 zonas do Plano Diretor. O resultado a partir do ENVI-met mostrou que, com a construção das novas edificações e conseqüente redução das áreas verdes, a temperatura do ar poderia aumentar cerca 1°C. A inserção de árvores mostra uma redução, mas os valores de  $T_a$  ainda continuariam altos; sendo mais significativo o efeito de resfriamento da arborização no período noturno. É reforçado pelos autores que o efeito positivo da arborização é potencializado quando a vegetação está implantada de forma distribuída, do que quando está concentrada em uma única área. O uso de telhado verde com grama auxilia no resfriamento noturno uma vez que a grama evita a entrada de calor pela



cobertura durante o dia. Este efeito é potencializado com o uso de árvores, que também projetariam sombra.

Spangenberg *et al.* (2008) compararam o microclima de um parque, uma esquina e um cânion urbano, localizados no centro de São Paulo (23°32'S, 46°37'W, altitude entre 720 e 850 m). A medição microclimática *in loco* foi realizada no dia 19 de dezembro de 2006, no período entre às 7h00 até às 19h00. O parque apresentou uma temperatura do ar até 2°C mais baixa que as outras duas configurações urbanas. Para esse mesmo dia, foi realizado um estudo paramétrico com quatro quadras, sendo considerados dois cenários, nos quais foram utilizadas árvores com diferentes densidades, sendo possível analisar a forma de atenuação da radiação solar nesses dois casos. Para a simulação, o tempo de iteração considerado foi de 48 horas. Após algumas adaptações nas variáveis climáticas de entrada, chegou-se a um coeficiente de determinação de 0,74 entre os dados medidos e simulados. Segundo os autores, possivelmente, a mudança na condição de céu durante a coleta de dados afetou o ajuste de dados. Os resultados apresentados referem-se a um ponto localizado na esquina, entre os cânions com orientação N-S e E-W. Na comparação entre o cenário sem vegetação e o cenário com árvores densas, as modificações foram: redução em até 1,1°C na temperatura do ar, redução da temperatura superficial em até 12°C, redução da Trm em até 24°C e redução no PET de 12°C.

### 3 METODOLOGIA

A pesquisa é classificada como experimental, apoiada em coleta de dados de campo e simulação computacional. O procedimento aplicado serviu para atingir o objetivo proposto, isto é, desenvolver um índice que identifique a quantidade de cobertura vegetal necessária para reduzir a temperatura do ar em espaços abertos. O índice foi desenvolvido para a cidade de Curitiba, com locais de interesse na Sete de Setembro e na Linha Verde.

Os estudos desenvolvidos em Genebra, Paris e São Paulo foram chamados de estudos piloto e serviram como suporte para o desenvolvimento do estudo em Curitiba.

Simulações computacionais com a ferramenta ENVI-met viabilizam a comparação entre cenários atuais e cenários alternativos. Todas as simulações foram realizadas considerando situações de verão, uma vez que em condições reais, poderiam ser utilizadas árvores decíduas, as quais teriam impacto, principalmente, no período de verão.

Esta seção está dividida em três partes, a saber:

1. Descrição da metodologia utilizada na campanha de coleta de dados.
2. Apresentação dos índices de conforto térmico utilizados: a Temperatura Fisiológica Equivalente (Physiological Equivalent Temperature - PET) e o Universal Thermal Climate Index (UTCI).
3. Descrição dos procedimentos gerais aplicados nas simulações. Apresentam-se, também, os testes estatísticos utilizados para validação dos resultados.

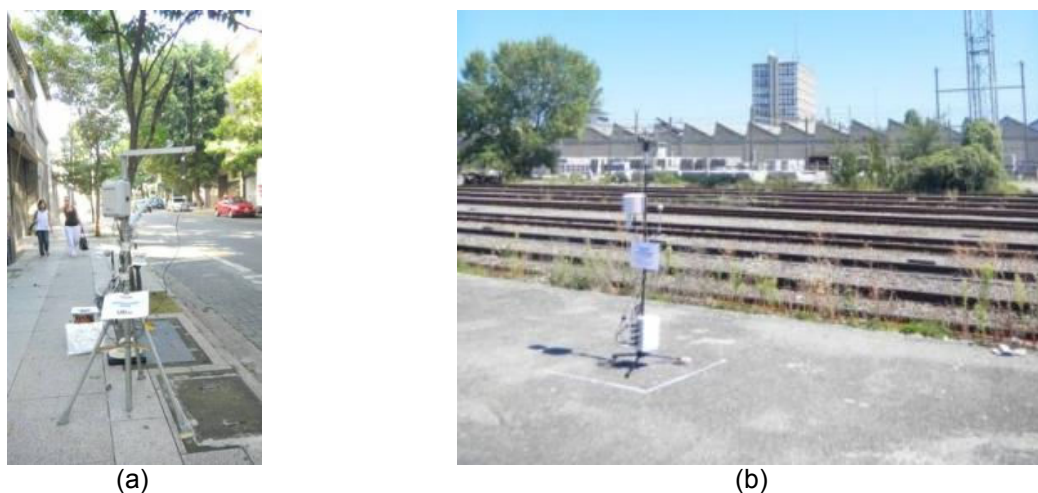
Na fase inicial da presente tese, o intuito era estabelecer um padrão de simulação que pudesse ser repetido para cada área de interesse. Contudo, ao longo do desenvolvimento de cada estudo foi percebido que cada localidade exigia parâmetros de modelagem diferentes entre si, devido às particularidades de cada lugar. Desta forma, são abordados na seção de metodologia apenas aspectos comuns a Curitiba e as cidades dos estudos piloto.

### 3.1 OBTENÇÃO DAS VARIÁVEIS MICROCLIMÁTICAS

As informações sobre os instrumentos de medição das variáveis microclimáticas e os períodos de medição para Curitiba e para as cidades dos estudos pilotos (Genebra, Paris e São Paulo) estão agrupadas nessa seção para evitar repetição de informações.

#### 3.1.1 Instrumentos de medição das variáveis microclimáticas

Nas campanhas de medição microclimáticas realizadas nas cidades de São Paulo e Curitiba foram utilizados os instrumentos adquiridos com auxílio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio da concessão do Projeto Universal 474358/2007-0, Universal 2007 Faixa B, para a pesquisa de Rossi (2012). As estações meteorológicas (Figura 15a) utilizadas foram da marca HOBO modelo H21-001.



**Figura 15 – Estações meteorológicas utilizadas em: (a) São Paulo e Curitiba; (b) Genebra e Paris**

**Fonte: Autoria própria (2014)**

Cada estação estava equipada com os seguintes instrumentos (Quadro 2): sensor de temperatura e umidade (S-THB-M002); piranômetro de silício (S-LIB-M003) e sensor de direção e velocidade do vento (S-WCA-M003).

Imagem ilustrativa	Descrição do instrumento
	<p>Sensor de temperatura do ar e umidade (S-THB-M002)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Intervalo de medição: -40°C a +75°C (Ta) e 0 a 100% (UR)</li> <li>- Precisão: 0,2°C (Ta) e ± 2,5% (UR)</li> </ul>
	<p>Piranômetro de silício (S-LIB-M003)</p> <p>Mede a radiação solar considerando-se a faixa espectral de 300 a 1100 nm.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Intervalo de medição: 0 a 1280 W/m<sup>2</sup></li> <li>- Precisão: ±10.0 W/m<sup>2</sup> ou ±5%.</li> </ul>
	<p>Sensor de direção e velocidade do vento (S-WCA-M003)</p> <p>Velocidade do ar</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Intervalo de medição: 0 a 44 m/s</li> <li>- Precisão: <ul style="list-style-type: none"> <li>± 0,5 m / s (± 1,1mph)</li> <li>±3% (17 a 30 m/s)</li> <li>±4% (30 a 47 m/s)</li> </ul> </li> </ul> <p>Direção do ar</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Intervalo de medição: 0 a 358°</li> <li>- Precisão: ± 0,5 m/s</li> </ul>
	<p>Sensor de temperatura 12-Bit (S-TMB-M002), para a temperatura de globo</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Intervalo de medição: -40°C a 100°C</li> <li>- Precisão: &lt; ±0,2°C (0°C a 50°C)</li> </ul>

**Quadro 2 – Instrumentos de medição utilizados em São Paulo e Curitiba**

Fonte: Adaptado de Microdaq (2009)

Os monitoramentos realizados *in loco* nas cidades de Genebra e Paris foram possíveis com apoio da Universidade de Genebra, a qual viabilizou a compra de duas estações meteorológicas (Figura 15b). Os *dataloggers* utilizados foram da marca Campbell (CR10X). Cada estação meteorológica estava equipada com os seguintes instrumentos (Quadro 3): sensor de temperatura e umidade do ar (HC2-

S3, Rotronic), piranômetro (SP Lite2, Kipp&Zonen) e sensor de direção e velocidade do vento (Windsonic Gill Instruments).

Imagem ilustrativa	Descrição do instrumento
	<p>Sensor de temperatura do ar e umidade (HC2-S3 ROTRONIC)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Intervalo de medição: -40°C a +60°C (Ta) e 0 a 100% (UR)</li> <li>- Precisão a 23°C: 0,1°C (Ta) e ± 0,8% (UR)</li> </ul>
	<p>Piranômetro (SP Lite2 Kipp&amp;Zonen)</p> <p>Mede a radiação solar considerando-se a faixa espectral de 400 a 1100 nm.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensibilidade: 60-100 mV / W/m<sup>2</sup></li> <li>- Tempo de resposta (95%): &lt;500 ns</li> <li>- Erro direcional (até 80° com 1000 W/m<sup>2</sup> feixe): &lt;10 W/m<sup>2</sup></li> <li>Resposta de temperatura: &lt;-0,15%/°C</li> <li>- Faixa de temperatura operacional: -30°C a +70°C</li> <li>- Irradiância solar máxima: 2000 W/m<sup>2</sup></li> </ul>
	<p>Sensor de direção e velocidade do vento (Gill WindSonic)</p> <p>Velocidade do ar</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Intervalo de medição: 0 a 60 m/s</li> <li>- Precisão: ± 2% (a 12m/s)</li> </ul> <p>Direção do ar</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Intervalo de medição: 0 a 359°</li> <li>- Precisão: ± 3° (20 m/s)</li> </ul>
	<p>Sensor de temperatura do ar (PT100 classe A - ROTRONIC), para a temperatura de globo</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Intervalo de medição: -50°C a 200°C</li> <li>- Precisão: &lt; ±0,2°C (a 23°C)</li> </ul>

### Quadro 3 – Instrumentos de medição utilizados em Genebra e Paris

Fonte: Adaptado de Rotronic (2013), Kipp&Zonen (2013) e Gill Instruments (2013)

Nos conjuntos de estações meteorológicas utilizaram-se, também, termômetros de globo (variável necessária ao cálculo da Trm), com Ø=2", pintados na cor RAL-7001/ cinza médio (THORSSON *et al.*, 2007).

As faixas de precisão de tais instrumentos (Tabela 7) satisfazem às recomendações da norma ISO 7726 (1998), que dispõe sobre os instrumentos para a medição de variáveis físicas.

**Tabela 7 – Faixa de precisão dos instrumentos segundo a norma ISO 7726 (1998)**

Variáveis	Faixa para conforto	Precisão para conforto	Faixa para estresse	Precisão para estresse
Temperatura do ar (Ta)	10 a 40°C	Desejada: ± 0,5°C Requerida: ± 0,2°C	-40 a 120°C	Desejada: ± 0,5°C (0 a 50°C) Requerida: ± 0,25°C (0 a 50°C)
Temperatura radiante média (Trm)	10 a 40°C	Desejada: ± 2°C Requerida: ± 0,2°C	-40 a 150°C	Desejada: ± 5 °C (0 a 50°C) Requerida: ± 5 °C (0 a 50°C)
Velocidade do ar (v)	0,05 a 1 m/s	Desejada: ± (0,05 + 0,05 v) m/s Requerida: ± (0,02 + 0,07 v) m/s	0,2 a 20 m/s	Desejada: ± (0,1 + 0,05 v) m/s Requerida: ± (0,05 + 0,05 v) m/s
Umidade absoluta (pa)	0,5 a 3,0 kPa	± 0,15 kPa  Tr - Ta  < 10°C	0,5 a 6,0 kPa	± 0,15 kPa  Tr - Ta  < 20°C

Fonte: Adaptado de ISO 7726 (1998)

Para todos os casos, a Trm (em °C) foi calculada pela fórmula para convecção forçada, definida pela mesma norma (Equação 8).

$$T_{rm} = [(T_g + 273)^4 + 2,5 \cdot 10^8 \cdot v^{0,6} (T_g - T_a)]^{1/4} - 273 \quad \text{Equação 8}$$

Onde v é a velocidade do ar ao nível do globo, em m/s; Ta é a temperatura do ar, em °C; Tg é a temperatura de globo, em °C.

As alturas dos instrumentos de medição utilizados em cada cidade constam na Tabela 8. Após a primeira campanha de medição ocorrida em São Paulo, foi percebido que, com um ajuste na altura dos instrumentos, mas ainda mantendo os padrões de alturas sugeridas pela WMO (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2008) e por Campbell (1997), era possível compactar cada conjunto de estação meteorológica, facilitando o transporte e

manuseio das mesmas<sup>17</sup>. Note-se que, a altura do piranômetro nas estações meteorológicas utilizadas em Genebra e Paris deve-se ao modelo do instrumento, que pode ser fixado ao sensor de direção e velocidade do vento empregado.

**Tabela 8 – Altura média dos instrumentos de medição, em metros**

<b>Instrumentos</b>	<b>São Paulo</b>	<b>Curitiba</b>	<b>Genebra</b>	<b>Paris</b>
Sensor de temperatura e umidade do ar	1,10	1,30	1,30	1,30
Piranômetro	1,50	1,30	1,90	1,90
Sensor de direção e velocidade do vento	2,10	1,90	1,90	1,90
Termômetros de globo de cobre	1,10	1,30	1,30	1,30

**Fonte: Aatoria própria (2014)**

Os dados microclimáticos foram coletados a cada 10 segundos e depois compostos os minutos.

As fotos olho de peixe foram obtidas com lente Sigma Fisheye 8 mm F-35 acoplada à câmera Nikon D80, sendo posteriormente editadas em programa de tratamento de imagens, conforme descrito em Minella (2009). O conjunto foi posicionado de forma a corresponder à altura do sensor de temperatura e umidade do ar, isto é, para a cidade de São Paulo foi considerada a altura de 1,10 m e para as demais cidades foi considerada a altura de 1,30 m em relação ao nível do solo.

O cálculo estimado do fator de visão do céu (FVC) foi realizado no modelo Rayman (MATZARAKIS; RUTZ; MAYER, 2007). Este mesmo modelo serviu para traçar a carta solar nas localidades de estudo em Curitiba (Sete de Setembro e Linha Verde) e Paris. A carta solar sobreposta à foto olho de peixe indica o período de incidência solar no ponto, durante um ciclo diário.

<sup>17</sup> Segundo Rossi (2012), o peso aproximado de cada estação HOBO modelo H21-001 montada é de 22 kg.

### 3.1.2 Períodos de medição

Para as três cidades dos estudos piloto e para Curitiba, os monitoramentos em campo foram realizados no período de verão. A Tabela 9 apresenta as campanhas de medição realizadas em cada localidade, considerando o período de medição.

**Tabela 9 – Datas e pontos de medição**

Cidade	Data de medição	Período de medição	Total de horas	Ponto(s) monitorado(s)
Genebra	11/08/2011	13h – 17h	4	G1 e G6
	30/07/2011	13h – 19h	7	P0 e P1
Paris	31/07/2011	13h – 19h	7	P0 e P1
	01/08/2011	13h – 19h	7	P1 e P2
São Paulo	22/02/2011	9h – 15h	6	Belém (B1) e Jd Paulista
	23/02/2011	7h – 14h	7	Belém (B1) e Jd Paulista
Curitiba	10/03/2012	9h – 15h	6	Sete de Setembro (SS1)
	11/03/2012	9h – 15h	6	Sete de Setembro (SS1)
	06/03/2012	9h – 15h	6	Linha Verde (LV1)
	07/03/2012	9h – 15h	6	Linha Verde (LV1)

**Fonte: Autoria própria (2014)**

Em Genebra, a coleta simultânea de dados em dois pontos localizados na área do projeto SOVALP ocorreu no dia 11/08/2011, no verão, no período das 13h – 17h.

Em Paris, a campanha de coleta de dados em campo das variáveis microclimáticas ocorreu em três dias (30/07/2011, 31/07/2011 e 01/08/2011), no entorno da estação ferroviária de Gare de l'Est. As medições ocorreram sempre simultaneamente em dois pontos, sendo os pares de medições compostos conforme Tabela 9. O período de medição abrangeu 6 horas de monitoramento (13h – 19h).

Em São Paulo, mais especificamente nas frações urbanas de Belém e Jardim Paulista, os monitoramentos em campo nos dois pontos selecionados ocorreram simultaneamente. As duas estações meteorológicas empregadas seguiram o mesmo critério de posicionamento: no passeio, junto à fachada voltada para o oeste e o mais próximo possível da guia, de maneira a evitar a influência da radiação advinda das paredes das edificações. O período de medição no dia 22/02/2011 abrangeu 6 horas de monitoramento (9h – 15h). No dia 23/02/2011 o período de medição foi de 7 horas (7h – 14h).



Em Curitiba, as medições foram realizadas em dois dias em cada ponto, sempre no período das 9h00 até 15h00. O ponto na Sete de Setembro foi monitorado nos dias 10/03/2012 e 11/03/2012. O ponto na Linha Verde foi monitorado no dia 06/03/2012 e 07/03/2012.

### 3.2 ÍNDICES DE CONFORTO TÉRMICO UTILIZADOS

Na análise do nível de estresse térmico, foram utilizados dois índices de conforto térmico<sup>18</sup>: a Temperatura Fisiológica Equivalente (Physiological Equivalent Temperature - PET) e o Universal Thermal Climate Index (UTCI).

O índice Temperatura Fisiológica Equivalente (Physiological Equivalent Temperature - PET) foi desenvolvido por Höpfe em 1984 e está fundamentado no modelo Munich Energy-balance Model for Individuals (MEMI). De acordo com Höpfe (1999), o PET pode ser definido como a temperatura fisiológica equivalente, considerando um determinado ambiente (interno ou externo) à temperatura do ar de um ambiente interno de referência, no qual o balanço térmico humano está em equilíbrio com a temperatura da pele e do centro do corpo iguais àquelas das condições em avaliação. Os dados climáticos do ambiente de referência e os dados individuais são estabelecidos da seguinte forma: 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% a uma temperatura do ar de 20°C); metabolismo de 80 W (atividade leve) e vestimenta de 0,9 clo.

Para o cálculo do PET, são consideradas as seguintes variáveis climáticas:  $T_a$ ,  $T_{rm}$ , UR e  $v$ . E as seguintes variáveis individuais: taxa metabólica, eficiência mecânica, isolamento da vestimenta e atividade.

O cálculo do índice de conforto térmico PET foi realizado por intermédio do modelo de domínio público RayMan Pro. As informações pessoais foram baseadas nos dados de um homem padrão segundo a norma ISO 8996 (2004), sendo consideradas as seguintes características: idade 30 anos, altura 1,75 m e

---

<sup>18</sup> Diversos estudos relacionados ao impacto do desenho urbano no microclima utilizaram o PET (COHEN; POTCHTER; MATZARAKIS, 2002; GULYÁS; UNGER; MATZARAKIS, 2006; JOHANSSON, 2006; SVENSSON; ELIASSON, 2002). O índice UTCI, por ter sido desenvolvido mais recentemente, consta em um menor número de estudos (BRÖDE et al., 2012; BRÖDE; KRÜGER; FIALA, 2012).

peso 70 kg. A taxa metabólica utilizada foi de 110 W<sup>19</sup> e o valor de isolamento térmico das roupas considerado foi de 0,5 clo<sup>20</sup> (condição de verão).

O Universal Thermal Climate Index (UTCI) foi desenvolvido por Jendritzky *et al.* (2009), de forma a ser aplicável em qualquer clima e escala espacial. O UTCI permite a avaliação das condições de conforto térmico em espaços abertos, considerando a interação da temperatura ambiente, da velocidade do vento, da umidade do ar e dos fluxos radiantes de onda longa e onda curta; tal avaliação deve estar baseada na resposta fisiológica do corpo humano, obtida por meio de um modelo de conforto termo-fisiológico denominado 'UTCI-Fiala'.

Assim como o PET, o UTCI segue o conceito da temperatura equivalente e apresenta para o ambiente de referência as seguintes definições: 50% de umidade relativa (com pressão de vapor não excedendo 20 hPa); temperatura do ar (Ta) igual à temperatura radiante média (Trm); e velocidade do vento de 0,5 m/s a 10 m de altura.

A taxa metabólica é assumida como constante e igual a 150 W/m<sup>2</sup> ou 2,6 met (pessoa caminhando a 4 km/h em terreno plano), e o grau de isolamento térmico da vestimenta é atribuído a partir da Ta com base em observações empíricas em estudos de campo europeus (INTERNATIONAL..., 2001).

O cálculo do UTCI foi realizado *on line* (<http://www.utci.org/utcineu/utcineu.php>), sendo requisitadas as seguintes variáveis: v a 10 m de altura (m/s), Ta (°C), UR (%) e Trm - Ta (°C).

Para o cálculo da velocidade do vento à altura de 10 m foi utilizada a seguinte equação logarítmica (OKE, 2006):

$$u_1/u_{ref} = \ln(z_1/z_0)/\ln(z_{ref}/z_0) \quad \text{Equação 9}$$

Onde u<sub>1</sub> é a velocidade do vento a altura desejada, u<sub>ref</sub> é a velocidade do vento medido, z<sub>1</sub> é a altura desejada, z<sub>ref</sub> é a altura dos instrumentos de medição e z<sub>0</sub> é o coeficiente de rugosidade.

<sup>19</sup> O nível de atividade do corpo humano é definido pela taxa metabólica, sendo que o calor produzido pelo organismo varia de 100 a 1000 W (LAMBERTS; XAVIER, 2002).

<sup>20</sup> A medida "clo" (advinda do termo *clothing*) possibilita a quantificação do isolamento térmico e é estabelecida pela norma ISO 7730 (2005). Essa norma juntamente com a ISO 9920 (2007), fornecem o valor clo referente a cada peça do vestuário. Uma unidade clo equivale a 0,155 m<sup>2</sup> K/W e o isolamento térmico da vestimenta é dado pelo somatório de todas as peças.

O coeficiente de rugosidade adotado foi de 0,1, típico para áreas abertas com obstáculos ocasionais (WIERINGA *et al.*, 2001)

A Tabela 10 corresponde às categorias de estresse térmico para os dois índices considerados nesta pesquisa e está embasada nas informações de Mayer e Matzarakis (1998) e Bröde *et al.* (2011).

**Tabela 10 – Conforto térmico e categoria de estresse térmico para PET e UTCI**

PET	UTCI	Categorias de estresse térmico ao calor
18 a 23°C	9 a 26°C	Sem estresse térmico
23,1 a 29°C	26,1 a 32°C	Moderado estresse térmico
29,1 a 35°C	32,1 a 38°C	Forte estresse térmico
35,1 a 41°C	38,1 a 46°C	Muito forte estresse térmico
mais de 41,1°C	mais de 46,1°C	Extremo estresse térmico

**Fonte: Fundamentado em Matzarakis (1998) e Bröde *et al.* (2011)**

### 3.3 PROCEDIMENTOS PARA SIMULAÇÕES MICROCLIMÁTICAS

Para a modelagem e predição dos cenários futuros, foi utilizado o modelo de simulação microclimática ENVI-met, apresentado na seção 2.4.

O ENVI-met foi escolhido por reproduzir de forma dinâmica os processos microclimáticos que ocorrem no ambiente urbano, considerando um ciclo diário. O modelo inclui as interações entre modelos de fluxos turbulentos, atmosféricos, solo e vegetação. Outras vantagens são a interface simples e o grande número de dados de saída, além de o modelo ser de domínio público.

A versão utilizada neste estudo é o ENVI-met 3.1 Beta 5. Para a visualização dos dados em mapas térmicos, foi utilizada a extensão Leonardo 3 do ENVI-met. Basicamente, são requeridos dois arquivos para que o modelo simule o ambiente urbano: a área de interesse modelada e os dados de configuração iniciais.

De modo facilitar a leitura do presente material, apresenta-se nessa seção a descrição geral da aplicação prática do ENVI-met. Reservam-se a descrição da área de interesse modelada e os dados de configuração iniciais adotados em cada caso, ao capítulo referente à apresentação dos resultados, visando, unicamente, evitar uma demasiada fragmentação da leitura do texto.

### 3.3.1 Modelagem da área de estudo

O modelo ENVI-met permite modelar a área de estudo nas três dimensões espaciais. O modelo é organizado sobre uma grade, constituída por células ortogonais de mesmo tamanho. Inicialmente, faz-se necessário dimensionar a célula da grade nas direções horizontais x e y, sendo o valor mínimo de 1m x 1m, bem como na direção vertical z. Ressalta-se que, quanto menor o tamanho da grade, mais detalhes podem ser incluídos no modelo, apresentando melhor resolução. No entanto, o tamanho final do domínio será maior; o que pode acarretar em uma demanda maior de tempo para rodar cada teste e de um computador com melhor desempenho.

Para a configuração das grades verticais, são oferecidas as opções equidistantes ou telescópicas. Conforme pode ser observado na Figura 16, na opção equidistante as células de grades possuem o mesmo tamanho na direção vertical, sendo que a primeira célula (mais próxima da superfície) é subdividida em cinco partes iguais. Essa opção é indicada quando há interesse nos processos ocorridos nas diferentes camadas de altura. No caso de ser necessário incluir edificações de grande altura e de não ser objeto principal de análise os processos ocorridos nas partes mais altas do modelo, recomenda-se utilizar a opção telescópica.

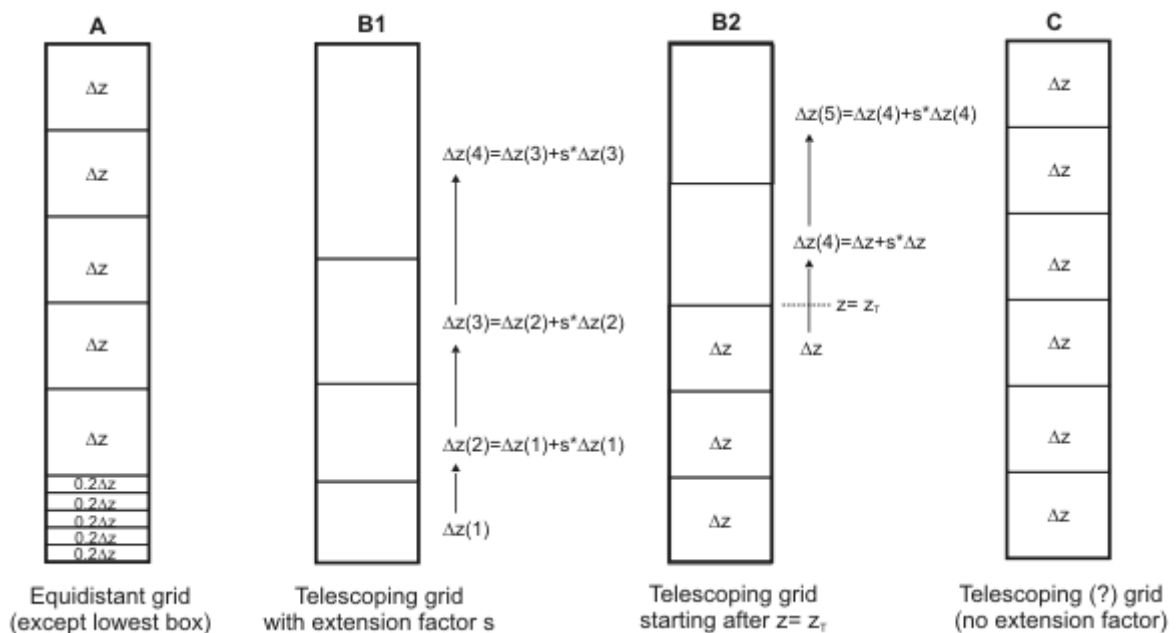


Figura 16 – Opções de grades verticais do modelo ENVI-met

Fonte: Bruse (2012)

Na opção telescópica deve ser definida a altura da célula de grade mais próxima do solo (não há subdivisão dessa célula como na opção equidistante). O passo seguinte é estabelecer se as outras células terão o mesmo tamanho (opção telescópica sem fator de expansão) ou fixar um valor em porcentagem para o fator de expansão, que pode iniciar logo a partir da célula de grade mais próxima do solo ou a partir de uma altura definida pelo usuário.

Na direção horizontal, mais especificamente na área que circunda o limite da área principal, pode ser acrescentada uma área de aninhamento, a qual consiste em um campo de transição bidimensional para os fluxos de vento e radiação solar, evitando, assim, instabilidades na borda da área principal. A quantidade de células da área de aninhamento é determinada pelo usuário, e o tamanho de cada célula aumenta conforme se distancia da borda do modelo principal.

O modelo final da grade será a soma da área principal e da área de aninhamento, sendo o tamanho máximo permitido de 250x250x30.

Para a área de aninhamento ainda é requisitado o tipo de solo. Entre 10 opções de solo, é possível escolher até duas opções, as quais serão dispostas de forma intercaladas. É também no arquivo de modelagem que devem ser definidas a posição geográfica e a rotação do norte em graus. A partir dessas definições, pode-se modelar a área de estudo.

A modelagem da fração urbana de interesse requer a projeção das edificações em planta, podendo ser utilizadas imagens aérea, imagens de satélites ou planta cadastral, devendo estas ser em formato “bmp”.

Para a inserção de vegetação, pode-se escolher entre as opções disponíveis no banco de dados do modelo ou estabelecer uma nova configuração. Para a vegetação arbórea, foram utilizadas opções pré-definidas no banco de dados. Para a superfície gramada, foi alterada a altura da grama existente no banco de dados do programa de 50 cm para 20 cm.

### 3.3.2 Configuração dos dados de entrada

O arquivo de configuração de simulação (*configuration file*) possui a extensão “.CF” e é dividido em configuração básica e configuração avançada. Os requisitos mínimos para a configuração do modelo, ou configuração básica, são

formados pelos seguintes itens: localização do modelo 3D (extensão “.IN”); criação de pasta onde serão armazenados os dados de saída (subpastas são criadas automaticamente a partir desta); definição do início da simulação (data e hora); total de horas simuladas; intervalo de tempo (em minutos) para salvar cada conjunto de dados de saída; velocidade do vento a 10 m de altura (em m/s); definição do comprimento de rugosidade da superfície (adimensional); direção do vento (em graus); temperatura potencial do ar (em K); umidade relativa do ar a 2 m de altura (em %) e umidade específica do ar a 2.500 m (em g/kg). Este último dado é proveniente de radiossondagem, permanece constante durante a simulação e pode ser obtido, por exemplo, no site da Universidade de Wyoming (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>).

Em relação às configurações avançadas, há a possibilidade de alterar parâmetros independentes entre si. Na presente pesquisa, foram mantidos os valores originais, alterando-se apenas os seguintes itens:

- LBC TYPES: refere-se às condições de cálculo para a borda do modelo.
- CLOUDS: refere-se aos dados de nuvens baixas, médias e altas.
- SOLAR ADJUST: refere-se ao ajuste do cálculo para a radiação de onda curta, variando a partir de 50% até 150% do valor padrão calculado pelo ENVI-met. Para a definição do valor mais adequado, pode-se utilizar a função de previsão de radiação.

A respeito do início da simulação, por se tratar de um modelo de simulação numérica, o mesmo exige um determinado tempo para estabilização dos dados, sendo recomendado que a simulação tenha início ao nascer do sol ou no período noturno (BRUSE, 2012).

Os dados climáticos das estações de referência em cada cidade servem como variáveis de entrada no modelo ENVI-met.

Para o estudo em Genebra foram utilizados dados da agência meteorológica MétéoSuisse ([www.meteosuisse.ch/](http://www.meteosuisse.ch/)), a qual presta um serviço de âmbito nacional desde 1863. Os dados da estação meteorológica localizada no aeroporto de Genebra foram disponibilizados por intermédio da Universidade de Genebra.

Em Paris, foram utilizados dados do observatório meteorológico de Montsouris, o qual abriga um dos bancos de dados climáticos mais antigos de Paris,

registrando continuamente parâmetros climáticos desde 1872. O observatório, cuja área é de 15 ha, está localizado no interior do Parc Montsouris, no 14° distrito e cerca de 7 km distante da estação ferroviária de Gare de l'Est. É possível encontrar dados do observatório meteorológico de Montsouris na plataforma *online* (disponível em: <http://www.infoclimat.fr/stations-meteo/?s=07156>).

Para os estudos em São Paulo e em Curitiba, utilizaram-se dados obtidos na plataforma disponível *online* pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, disponível em: <http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/automaticas.php>). O INMET oferece os valores máximos e mínimos das variáveis climáticas; médias entre esses extremos foram extraídas para a comparação com os dados coletados em campo. Para São Paulo foram considerados dados da estação automática de Mirante de Santana, localizada na região norte da cidade. Para Curitiba, foram considerados dados coletados no centro politécnico da Universidade Federal do Paraná, na região leste da cidade.

### 3.3.3 Dados de saída

O modelo oferece 50 dados de saída, entre variáveis climáticas (fluxo de ar, velocidade e direção do vento, temperatura e umidade do ar, temperatura radiante média, radiação solar direta, difusa e refletida, umidade específica), dados de vegetação (temperatura das folhas, resistência dos estômatos, condição hídrica), índices de conforto térmico (PMV e PPD), indicador da morfologia urbana (fator de visão do céu) e dados de poluentes (concentração de particulados). São dois os formatos dos dados de saída: (1) EDI e (2) EDT. Estes podem ser extraídos com o *XTract-Tool* ou em planilhas de cálculo, como no programa Excel, ou ainda, visualizados graficamente na extensão do modelo ENVI-met, chamada Leonardo.

Ressalta-se que, para cálculo dos índices de conforto térmico PET e UTCI (não contemplados na versão ENVI-met 3.1 Beta 5), utilizaram-se os seguintes dados de saída: temperatura e umidade do ar, velocidade do vento e temperatura radiante média.

### 3.3.4 Validação dos resultados e testes estatísticos aplicados

A validação do cenário atual de cada localidade exigiu uma série de testes de calibração, de maneira que os dados simulados estivessem ajustados da melhor maneira possível aos dados microclimáticos medidos *in loco*. A Figura 17 representa o esquema de trabalho na etapa de ajuste dados medidos e preditos no ENVI-met.

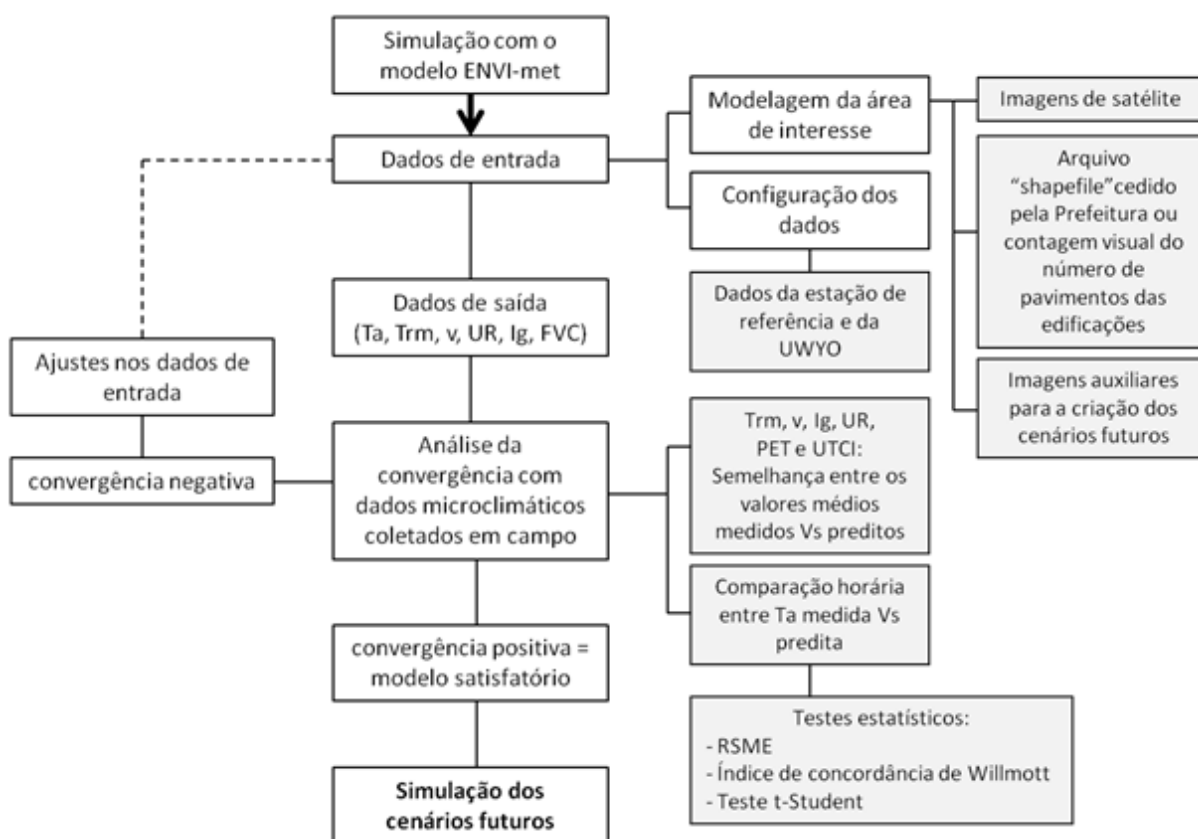


Figura 17 – Fluxograma para simulações computacionais

Fonte: Autoria própria (2014)

Recomenda-se utilizar dados da estação oficial para “alimentar” o modelo. No entanto, devido às complexidades inerentes à modelagem do clima urbano, adaptações são necessárias. Cada teste de ajuste exigiu um tempo de simulação de 24 horas até 1 semana. Para cada localidade foram gerados mais de 60 testes, combinando diversas variáveis de entrada possíveis.



A temperatura do ar foi escolhida como variável climática de referência para a comparação entre dados medidos e simulados. No entanto, para as outras variáveis climáticas, procurou-se semelhança na obtenção de valores médios. Nesse sentido, as medições microclimáticas *in loco* servem de referência para os testes de convergência.

Testes estatísticos apontaram a curva com temperatura do ar mais fidedigna à temperatura do ar obtida nos monitoramentos, sendo aplicados os seguintes testes: o erro médio quadrático (Root Mean Squared Error, RMSE), o índice de concordância de Willmott (Willmott index of agreement) e o teste t-Student.

O RMSE (Equação 10) e o índice de concordância de Willmott (d) (Equação 11) indicam a exatidão do método, isto é, o afastamento entre os valores preditos e os medidos. No RMSE o valor ideal é o mais próximo de zero. O índice de concordância de Willmott varia de zero a 1, sendo esta última a concordância ideal.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}} \quad \text{Equação 10}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i - x_i| + |x_i - x_i|)^2} \quad \text{Equação 11}$$

Onde  $y_i$  é a temperatura predita,  $x_i$  é a temperatura medida e  $n$  é o número de observações.

O teste t-Student é utilizado quando se pretende comparar duas médias, sendo adotado um nível de significância de 0,05 (5%).

## 4 ESTUDOS PILOTO: APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nessa seção são apresentados os estudos piloto realizados para as cidades de Genebra, Paris e São Paulo.

Cada estudo tem início com uma contextualização no qual a área de estudo está inserida, incluindo uma descrição climática resumida.

Considerando que os instrumentos para coleta de dados em campo e os períodos de monitoramento foram expostos na metodologia, essa seção contém os resultados das campanhas de medição com a apresentação das variáveis climáticas coletadas em cada local de estudo. A caracterização microclimática de determinada localidade depende de uma série longa de medições. No entanto, a análise das variáveis microclimáticas em um período específico, embora não sirva para configurar o microclima de uma região, auxilia na compreensão do campo térmico desta.

Em seguida, é apresentado o resultado da modelagem (edição de área). Mesmo que as variáveis climáticas requisitadas pelo modelo sejam relativas aos dados oficiais da estação meteorológica de referência, são necessários, na maioria das vezes, ajustes ou adaptações no modelo computacional de forma a aperfeiçoar o resultado final do processo de simulação.

Apresentam-se, também, os cenários hipotéticos e as estratégias de melhoria do ambiente térmico adotadas para cada cidade. No final de cada estudo, está contida uma breve conclusão. Os resultados de todos os estudos são discutidos posteriormente.

Devido à complexidade inerente à simulação do microclima urbano, uma vez que diversas variáveis compreendem a sua formação, a capacidade de reprodução da situação real no ambiente de simulação será sempre limitada em algum aspecto. Nesse sentido, os resultados aqui auferidos devem ser entendidos como indicadores de tendências.

### 4.1 GENEBRA E O PROJETO “SOCIÉTÉ SIMPLE DE VALORISATION DE TERRAINS À GENÈVE - LA PRAILLE” (SOVALP)

A cidade de Genebra está localizada na parte oeste da Suíça (46°12' N, 6°9' E, 391 m acima do mar) na região banhada pelo Lago Léman e na fronteira com

a França. O clima local é considerado Cfb, segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, sendo caracterizado por invernos frios (média mínima de  $-1^{\circ}\text{C}$ ) e verões relativamente quentes (média máxima de  $24^{\circ}\text{C}$ ), sem estações secas; a média anual de temperatura é de  $10^{\circ}\text{C}$  e a média anual de horas de sol é acima de 1.500 h (CLIMATEDATA.EU., 2013).

O perímetro de Praille – Acacias – Vernets (Figura 18) está situado cerca de 2 km do centro de Genebra e é delimitado por dois recursos naturais: ao norte, pelo rio Arve, e ao oeste e ao sul, pelas montanhas glaciais (Alpes suíços). A leste, o perímetro é limitado pelo bairro histórico de Carouge.



**Figura 18 – Localização da região formada por Praille – Acacias – Vernets**

**Fonte: Adaptado do Google Earth (2012)**

Em Genebra, devido à política de desenvolvimento das últimas décadas, foram poucos os incentivos para novas construções, acarretando em um significativo

*déficit* habitacional<sup>21</sup>. Genebra é considerada a segunda cidade mais populosa da Suíça; em 2009, a cidade contava com 457.600 habitantes e segundo o Office Cantonal de la Statistique - OCSTAT (OFFICE..., 2010), já possuía a menor taxa de habitações disponíveis do país, equivalente a 0,2%, quando a oferta satisfatória seria de pelo menos 2%. Desta forma, a alternativa para parte da população é morar nas aglomerações urbanas localizadas na fronteira franco-suíça, deslocando-se diariamente para trabalhar na metrópole suíça. Dois fatos comprovam esta afirmação: (1) o crescimento urbano nas cidades fronteiriças e (2) o registro quantitativo de pessoas (cerca de meio milhão) e veículos (cerca de 350.000) que atravessam a fronteira diariamente (WEIDMANN, 2012).

Visando ao desenvolvimento urbano de forma ordenada e planejada, está em curso o projeto Praille – Acacias – Vernets (PAV). De acordo com informações da Republic et Canton de Genève (2012), tal ação proporcionará a reestruturação urbana desses distritos, os quais pertencem a três comunas: Lancy (39%), Carouge (33%) e Genebra (28%), incluindo a construção de 2.500 habitações ao ano.

Segundo levantamento do OCSTAT, de 1989 a 2009 (período de 20 anos), o incremento médio anual do parque habitacional era de 1.700 habitações (OFFICE..., 2010); as novas construções corresponderiam, então, a um acréscimo de 47% ao ano. Esse aumento representaria, também, um crescimento bastante superior às 1.018 novas habitações ofertadas em 2011, período no qual houve um decréscimo de 35% no crescimento habitacional em relação ao ano anterior (OFFICE..., 2012).

Abrangendo uma área de 230 ha, o PAV ainda engloba outros dois projetos em curso: Cornavin – Eaux-Vives – Annemasse (CEVA) e Société Simple de Valorisation de Terrains à Genève - La Praille (SOVALP). O estudo para a cidade de Genebra foca nos aspectos microclimáticos deste último.

Conforme a Republic et Canton de Genève (2008), o projeto SOVALP tem como objetivo revitalizar a área no entorno da estação ferroviária de Praille e está embasado em duas principais metas: (1) mobilidade e (2) desenvolvimento urbano. A mobilidade será assegurada pela nova ligação ferroviária, por meio de uma Rede Expressa Regional (RER) entre Cornavin – Eaux-Vives – Annemasse. Este plano de

---

<sup>21</sup> Como exemplos de normativas que contribuíram para o *déficit* habitacional, citam-se: a proteção às áreas agrícolas, destinando-se grande parcela de terra para tal atividade e as rígidas normas urbanísticas e de inquilinato (WEIDMANN, 2012).

mobilidade está diretamente relacionado com a política de desenvolvimento integral do município, pois além de servir mais de 750.000 habitantes, irá valorizar indiretamente as áreas próximas às regiões de Lancy – Pont-Rouge, Genève – Eaux-Vives e Chêne-Bourg (REPUBLIC..., 2008).

Originalmente, o entorno da estação ferroviária de Praille era caracterizado por um parque industrial estrategicamente implantado. No entanto, nos últimos anos, devido à proximidade com o centro de Genebra, a identidade da região foi ganhando novas feições com a implementação gradual de atividades terciárias, de novas vias e da estação de trem elétrico de Lancy – Pont-Rouge. O projeto SOVALP está inserido no município de Grand-Lancy, junto à estação ferroviária de Praille, cuja área é de aproximadamente 97.000 m<sup>2</sup> e de propriedade da Rede Ferroviária Federal (Chemins de fer fédéraux, CFF) (REPUBLIC..., 2008). O projeto foi desenvolvido pelo escritório Strata Architecture, sendo resultado de um concurso público realizado em 2005 e de estudos paralelos, envolvendo arquitetos, engenheiros civis, especialistas em acústica e mobilidade, além de especialista do mercado imobiliário.

Conforme a Republic et Canton de Genève (2008), o projeto busca:

- em nível regional: fortalecer a mobilidade por transporte público, possibilitando, inclusive, a combinação de diferentes tipos de modais, como: trem (RER), ônibus elétrico e ônibus;
- em nível municipal: criar uma rede de espaços públicos não motorizados e que tenham ligação com a estação Lancy – Pont-Rouge, e;
- em nível local: favorecer às componentes naturais locais no ambiente construído.

Os diferentes setores (negócios, habitação e equipamentos públicos) estão divididos tanto espacialmente como visualmente, criando-se espaços com identidade própria, ligadas por uma rede de espaços públicos de diferentes escalas, cujo centro é a estação de Lancy – Pont-Rouge. A setorização dos espaços está distribuída conforme Tabela 11.

**Tabela 11 – Previsão da distribuição das áreas conforme os diferentes setores**

Área	Setor
122.000 m <sup>2</sup>	atividades terciárias
57.000 m <sup>2</sup>	habitações (cerca de 550 unidades)
5.000 m <sup>2</sup>	equipamentos públicos diversos
119.000 m <sup>2</sup>	área de negócios

Fonte: Republic et Canton de Genève (2008)

A Figura 19 apresenta o local de estudo: a área de negócios corresponde aos edifícios na cor amarela, o edifício em vermelho será de uso misto; enquanto os edifícios, em azul, correspondem às habitações, e em verde, a câmara municipal e escola.

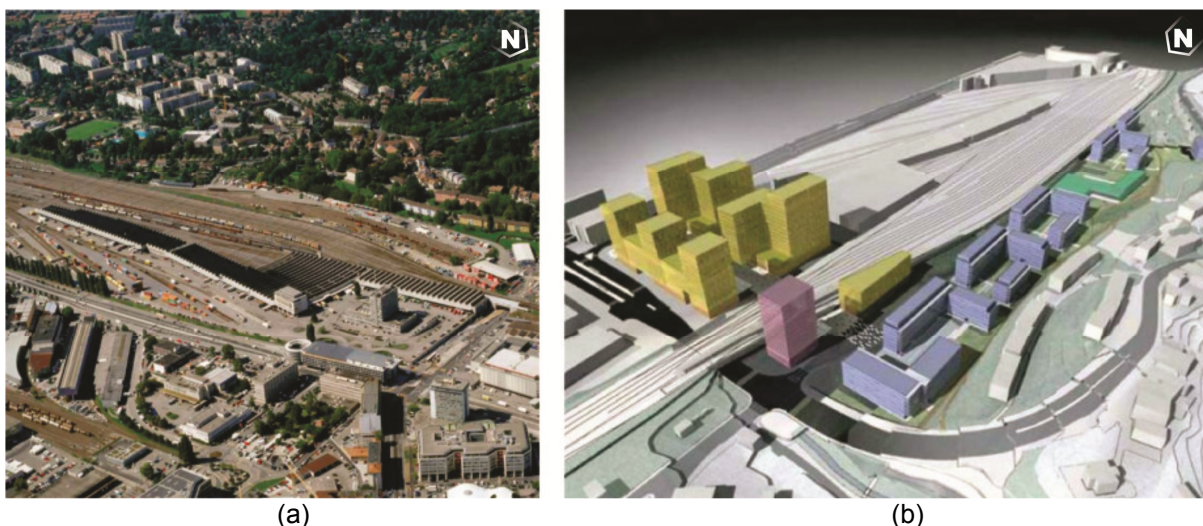


Figura 19 – área de estudo: (a) antes e (b) depois da implementação do projeto SOVALP

Fonte: Republic et Canton de Genève (2008)

A área de negócios (Figura 20) será uma extensão da zona comercial existente, com edifícios de 7 a 16 pavimentos. Para esta atribuição serão destinados 119.000 m<sup>2</sup>, o que significa cerca de 4.600 novos postos de trabalho. Para atender aos usuários destes espaços estão previstos restaurantes, lojas, áreas de recreação, hotel, equipamentos públicos, favorecendo, assim, espaços de socialização e entretenimento.



**Figura 20 – Vista do setor de negócios a partir da rua externa e da rua interna**

**Fonte: Republic et Canton de Genève (2008)**

Espaços públicos que ligam as edificações ao transporte público e privado, como a praça e o parque, estarão destinados apenas ao transporte não motorizado. Ao longo da encosta de Lancy estará localizado o setor habitacional, cuja área útil será de 57.000 m<sup>2</sup>, correspondente a 550 unidades habitacionais agrupadas em edifícios de 21 a 27 pavimentos. Entre os edifícios haverá áreas comuns e espaços arborizados. Junto ao setor habitacional estará localizado o complexo escolar e a câmara municipal (Figura 21). De forma a atender a potencial demanda e independência do local, serão implementados outros equipamentos urbanos, como creche e moradia estudantil.



**Figura 21 – Setor habitacional e complexo escolar**

**Fonte: Republic et Canton de Genève (2008)**

Vale ressaltar que a implementação de um centro urbano no entorno da estação de Lancy-Pont-Rouge e a manutenção do frete ferroviário exigiram alguns cuidados específicos referentes, por exemplo, a proteção contra ruídos e acidentes, além de medidas de proteção relativas à construção e à organização do espaço.

#### 4.1.1 Genebra: pontos receptores

Dois pontos inseridos na área do projeto SOVALP foram escolhidos para a coleta de dados microclimáticos relevantes: o ponto G1, localizado em uma área de estacionamento; e o ponto G6, localizado próximo às linhas férreas (Figura 22) ambos em terrenos com pouca obstrução do céu. Tais pontos foram escolhidos considerando a posição dos mesmos no contexto dos cenários futuros.



Figura 22 – Localização dos pontos de monitoramento G1 e G6

Fonte: Google Earth (2012) e Autoria própria (2014)



#### 4.1.2 Genebra: análise das variáveis climáticas monitoradas

O resultado das médias horárias das variáveis climáticas medidas para os dois pontos (G1 e G6) constam na Tabela 12. A velocidade ( $v$ ) e direção (Dir) do vento nos pontos foram semelhantes, com média de 1,1 m/s e sentido sul. Os valores de temperatura do ar ( $T_a$ ) e temperatura radiante média ( $T_{rm}$ ) foram um pouco mais altos no ponto G6 (28,5°C e 51,8°C, respectivamente) do que no ponto G1 (28,2°C e 50,6°C, respectivamente).

**Tabela 12 – Genebra: médias horárias das variáveis climáticas obtidas em campo no dia 11/08/2011**

Ponto	Hora	Ig (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>a</sub> (°C)	UR (%)	v (m/s)	Dir (°)	T <sub>rm</sub> (°C)
<b>G1</b>	14h00	808	27,1	32	0,9	194	51,0
	15h00	717	28,1	29	1,1	186	50,0
	16h00	607	28,8	22	1,3	171	51,3
	17h00	487	29,0	21	1,2	173	50,3
	<b>Média</b>	<b>655</b>	<b>28,2</b>	<b>26</b>	<b>1,1</b>	<b>181</b>	<b>50,6</b>
<b>G6</b>	14h00	825	27,2	31	1,1	169	52,4
	15h00	756	28,6	27	1,2	173	51,9
	16h00	650	29,1	30	1,1	175	52,4
	17h00	497	29,3	34	1,1	186	50,7
	<b>Média</b>	<b>682</b>	<b>28,5</b>	<b>31</b>	<b>1,1</b>	<b>176</b>	<b>51,8</b>

Fonte: Autoria própria (2014)

#### 4.1.3 Genebra: modelagem (edição de área)

Para a modelagem da área de estudo conforme a situação atual foram utilizados dados de altura das edificações cedidos pela Prefeitura de Genebra e imagens de satélite do programa Google Earth para minorar eventuais dúvidas. Para a modelagem do cenário futuro, foram acrescentadas edificações e vegetação baseadas nas imagens ilustrativas do projeto SOVALP<sup>22</sup> (REPUBLIC..., 2008).

No modelo inicial, a área considerada corresponde a aproximadamente 380 m × 715 m. A dimensão da grade estabelecida foi de 5×5, resultando em um

<sup>22</sup>É importante reiterar que nesse estudo foi considerado o estudo volumétrico apresentado em Republic et Canton de Genève (2008), e não o projeto arquitetônico laureado em concurso público datado de 2012 (disponível em: [http://www.ge.ch/dcti/presse/2012-02-28\\_conf.pdf](http://www.ge.ch/dcti/presse/2012-02-28_conf.pdf)) e, portanto, após o início do desenvolvimento da presente pesquisa.

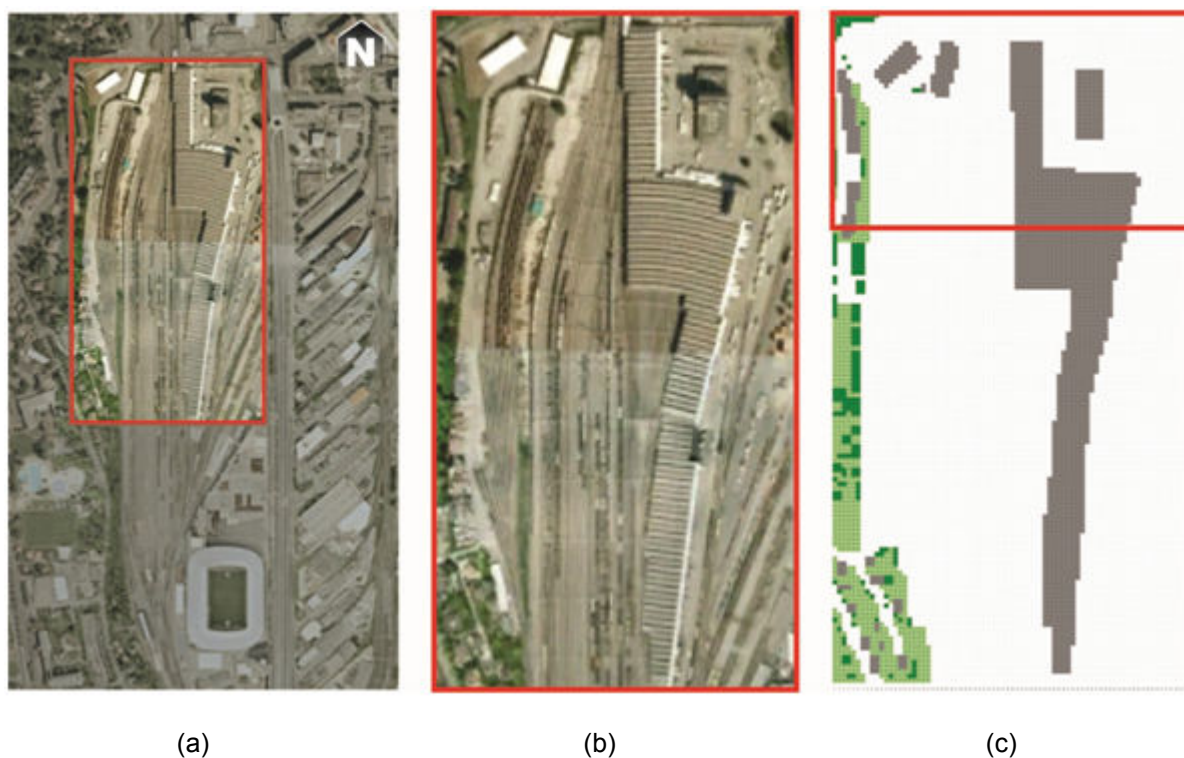
modelo de 76 grades no eixo x e de 143 grades no eixo y. Para a altura z, consideraram-se grades de 3 m. Para a borda do modelo utilizaram-se 3 grades. Neste modelo, o prédio de maior altura é de 12 m, sendo de 7 m a média das alturas das edificações. Para a geração das grades verticais foi considerado o fator telescópico com fator de aumento de 10% a partir de 51 m do solo.

Foi estabelecido o solo em concreto, tanto para o modelo como para a borda do modelo. Em relação à vegetação, foram inseridas áreas gramadas com 20 cm de altura, baseada na configuração de “*grass 50 cm aver. dense*” (sigla xx, LAD para cada segmento: 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300), e as árvores existentes foram consideradas como árvores de copa estreita de 15 m de altura “*tree, light 15 m*” (sigla l1, LAD pra cada segmento: 0,040 0,060 0,070 0,110 0,130 0,150 0,140 0,130 0,100 0,000).

Uma característica bastante distinta deste modelo é o grande número de grades vazias, isto é, espaços vazios em decorrência da própria morfologia do entorno da estação ferroviária. Nos testes iniciais com este modelo, notou-se que, em decorrência dessa característica particular, após o primeiro ciclo de horas simuladas havia uma perda significativa da capacidade do modelo em variar os valores de temperatura de ar no período considerado (diferença entre valor máximo e valor mínimo), havendo, portanto, redução da amplitude térmica diária.

De forma a diminuir este efeito, a área inicial modelada foi reduzida, mantendo-se a dimensão no eixo x e considerando-se o recorte de 230 m no eixo y, conforme a Figura 23 (condições atuais) e a Figura 24 (Projeto SOVALP). Tal recorte foi estabelecido por englobar os dois pontos de monitoramento.

Os parâmetros utilizados no modelo podem ser conferidos na Figura 25.



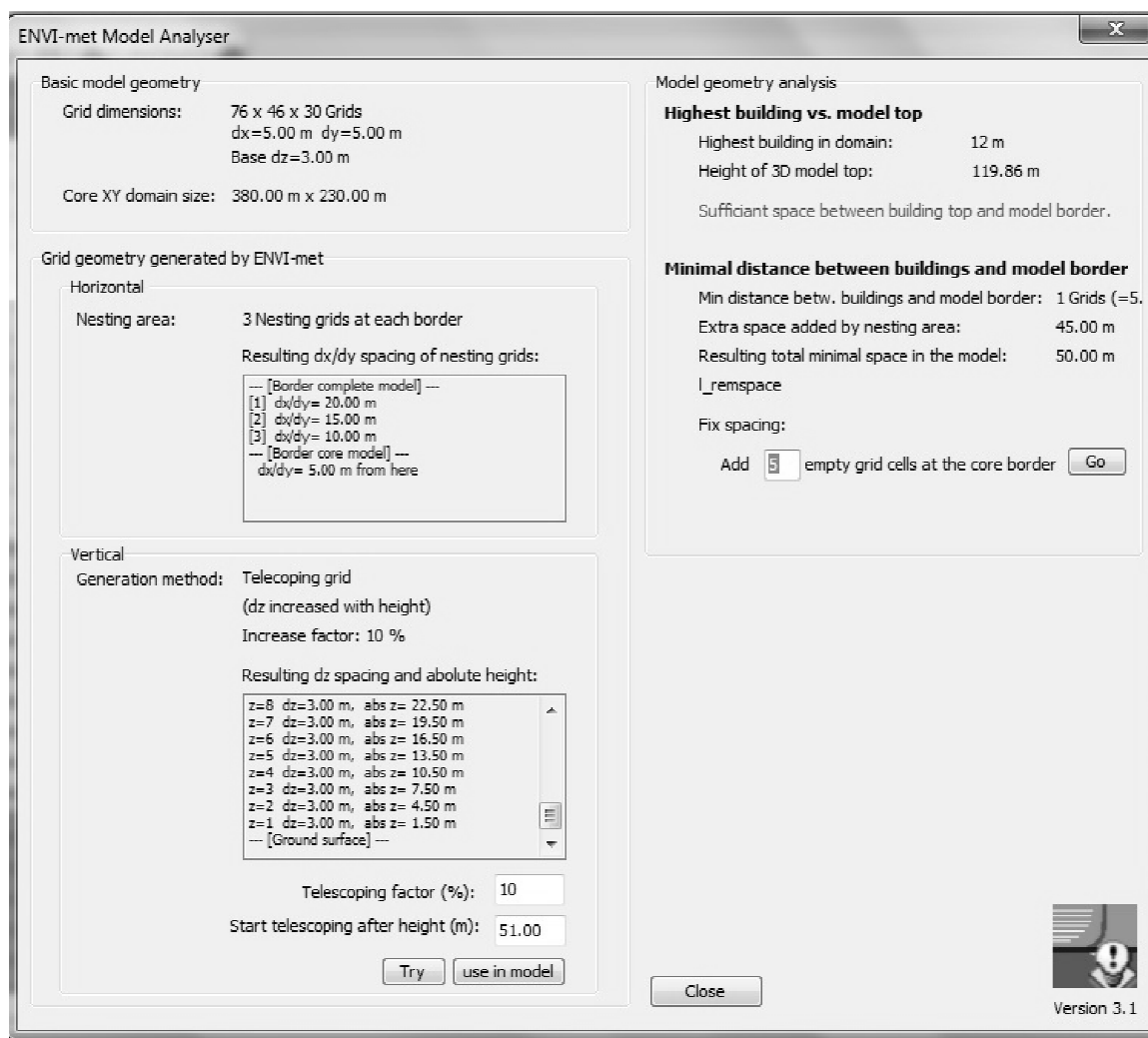
(a) (b) (c)  
 Figura 23 – (a) limite da área de estudo inicial no perímetro PAV – (b) imagem de satélite da área de estudo inicial – (c) área modelada e recorte considerado para análise

Fonte: Autoria própria (2014)



(a) (b) (c)  
 Figura 24 – (a) limite da área de estudo inicial no perímetro PAV com a sobreposição do projeto SOVALP – (b) projeto SOVALP – (c) área modelada do projeto SOVALP e recorte considerado para análise

Fonte: Autoria própria (2014)



**Figura 25 – Parâmetros utilizados na confecção do modelo de Genebra**

**Fonte: Autoria própria (2014)**

#### 4.1.4 Genebra: ajustes do modelo ENVI-met

Nos testes iniciais verificou-se que para a obtenção de um padrão de curva simulada semelhante ao padrão de curva de temperatura do ar medida, era necessário iniciar a simulação em um horário próximo ao início do período de comparação de dados, neste caso, às 13h00. Ressalta-se que estas não são as condições ideais, mas considerando as particularidades da configuração urbana local e os resultados satisfatórios dos testes estatísticos aplicados (apresentados adiante), foi decidido considerar o primeiro ciclo de horas simuladas. Os dados de entrada para a configuração do modelo constam na Tabela 13.

**Tabela 13 – Genebra: configuração inicial do modelo**

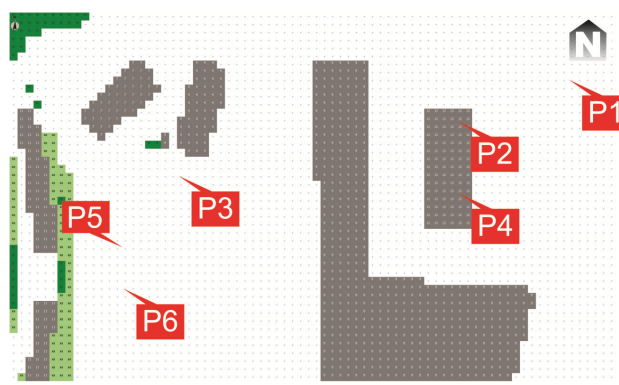
Área de estudo	Genebra	Configuração
Data	11/08/2011	Dia medido
Início da simulação	13:00:00	Horário necessário para amplitude da curva
Velocidade do vento (m/s)	1,3	Valor estipulado (medição em campo)
Direção do vento (graus)	227	Média diária
Comprimento de rugosidade	0,1	Valor estipulado
Temperatura do ar (K)	302	Valor estipulado (medição em campo)
Umidade Especifica a 2500 m (g/kg)	5	Valor registrado às 12Z
Umidade Relativa do ar (%)	61	Média diária

**Fonte: Autoria própria (2014)**

Em relação aos dados de velocidade do vento e temperatura do ar, verificou-se que a partir dos valores de entrada, os dados simulados no período de análise pouco se alteravam, decidindo-se por utilizar um valor de entrada próximo aos valores médios obtidos nos pontos G1 e G6 durante as coletas de dados *in loco*. Para a direção do vento e umidade relativa do ar foram utilizados valores médios diários. O dado de umidade específica a 2.500 m de altura foi obtido no *site* referente a sondagens atmosféricas da Universidade de Wyoming.

Como forma de reduzir os valores simulados de Trm, foi adotada fração de nuvens baixas equivalentes a uma oitava, bem como ajuste solar de 0,6. A decisão por utilizar nuvens baixas é por que estas influenciam no saldo de radiação líquida e, conseqüentemente, no balanço de radiação. Para as outras variáveis de entrada foram mantidas as configurações originais.

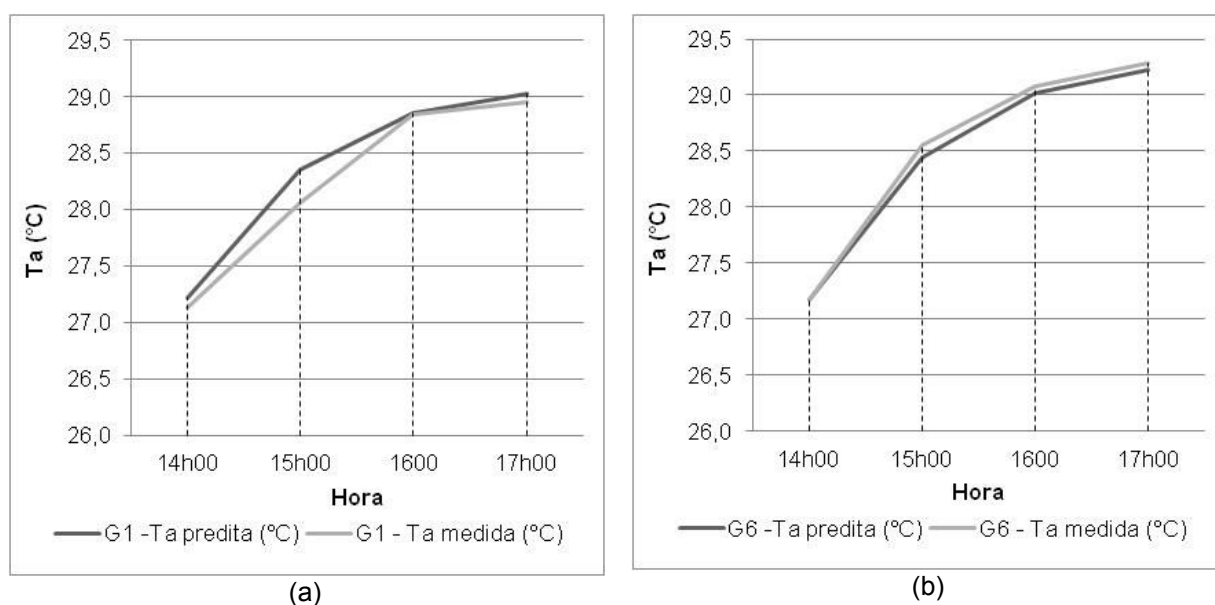
Além dos dois pontos de monitoramento (receptores) G1 e G6, para efeito de comparação das diferentes configurações urbanas do projeto SOVALP, foram locados mais quatro receptores (G2, G3, G4, G5), ver Figura 26. O ponto G2 e ponto G4 estão originalmente no local onde está implantado um edifício. Tais pontos foram escolhidos considerando as diferentes situações urbanas propostas nos cenários hipotéticos.



**Figura 26 – Genebra: localização dos pontos**

Fonte: Autoria própria (2014)

O modelo foi ajustado a partir dos dados horários de temperatura do ar. O Gráfico 1 apresenta a similaridade entre os valores de  $T_a$  predita e medida para os pontos G1 e G6, sendo possível verificar o padrão de cada curva.



**Gráfico 1 – Genebra: dados medidos VS preditos de  $T_a$  para: (a) ponto G1 e (b) ponto G6**

Fonte: Autoria própria (2014)

Em relação às variáveis climáticas velocidade e direção do vento, radiação solar global e temperatura radiante média, procurou-se obter valores

médios próximos àqueles medidos, assim como para os índices de conforto térmico PET e UTCI (Tabela 14).

O índice PET médio medido e o predito apresentaram correspondência na categoria de muito forte estresse térmico e o índice UTCI médio predito e o medido na categoria de forte estresse térmico ao calor, tanto no ponto G1 como no ponto G6.

**Tabela 14 – Genebra: valores médios medidos e preditos**

Ponto	Média	Ta (°C)	Trm (°C)	Ig (W/m <sup>2</sup> )	UR (%)	v (m/s)	PET (°C)	UTCI (°C)
<b>G1</b>	medida	28,2	50,6	655	26	1,1	36,2	32,3
	predita	28,4	53,6	547	47	1,3	37,7	33,8
<b>G6</b>	medida	28,3	51,8	682	31	1,1	37,2	33,0
	predita	28,5	53,6	547	47	1,2	38,0	34,2

Fonte: Aatoria própria (2014)

Os resultados estatísticos apontam para uma correlação significativa nos três testes estatísticos aplicados, especialmente em relação ao ponto G6, situação na qual o teste de Willmott atinge a concordância perfeita. Os resultados do teste t-Student mostram que não há diferenças significativas em ambas as séries para um intervalo de 95% de confiança (Tabela 15).

**Tabela 15 – Genebra: resultado dos testes estatísticos**

Ponto	G1	G6
Erro médio (medida-predita)	-0,12	-0,17
Desvio padrão da Ta medida	0,84	0,95
Desvio padrão da Ta simulada	0,82	0,92
Erro médio absoluto	0,12	0,06
RMSE	0,16	0,07
Índice de concordância de Willmott	0,99	1,00
Teste t-Student	0,15	0,12

Fonte: Aatoria própria (2014)

#### 4.1.5 Genebra: cenários hipotéticos

Foram propostos três cenários hipotéticos:

- no cenário 1, foram inseridas as modificações previstas na síntese do projeto SOVALP (REPUBLIC..., 2008), sendo inseridas árvores de copa estreita de 15 m de altura (sigla I1, LAD: 0,040 0,060 0,070 0,110 0,130 0,150 0,140 0,130 0,100 0,000);
- no cenário 2, foram adicionadas ao cenário 1 mais superfícies gramadas com 20 cm de altura, baseadas na configuração de “*grass 50 cm aver. dense*” (sigla xx, LAD para cada segmento: 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300), e realizada uma mudança na implantação das árvores na praça do setor comercial;
- no cenário 3, foram consideradas árvores densas de 15 m de altura (sigla T2, LAD para cada segmento: 0,000 0,000 2,180 2,180 2,180 2,180 2,180 2,180 1,720 0,000) em substituição as árvores de copa estreita dos cenários 1 e 2 e realizada uma mudança na implantação das árvores na praça do setor comercial.

Na Figura 27 a cor cinza corresponde à área construída, a cor verde clara à área gramada e a cor verde escuro à área arborizada.

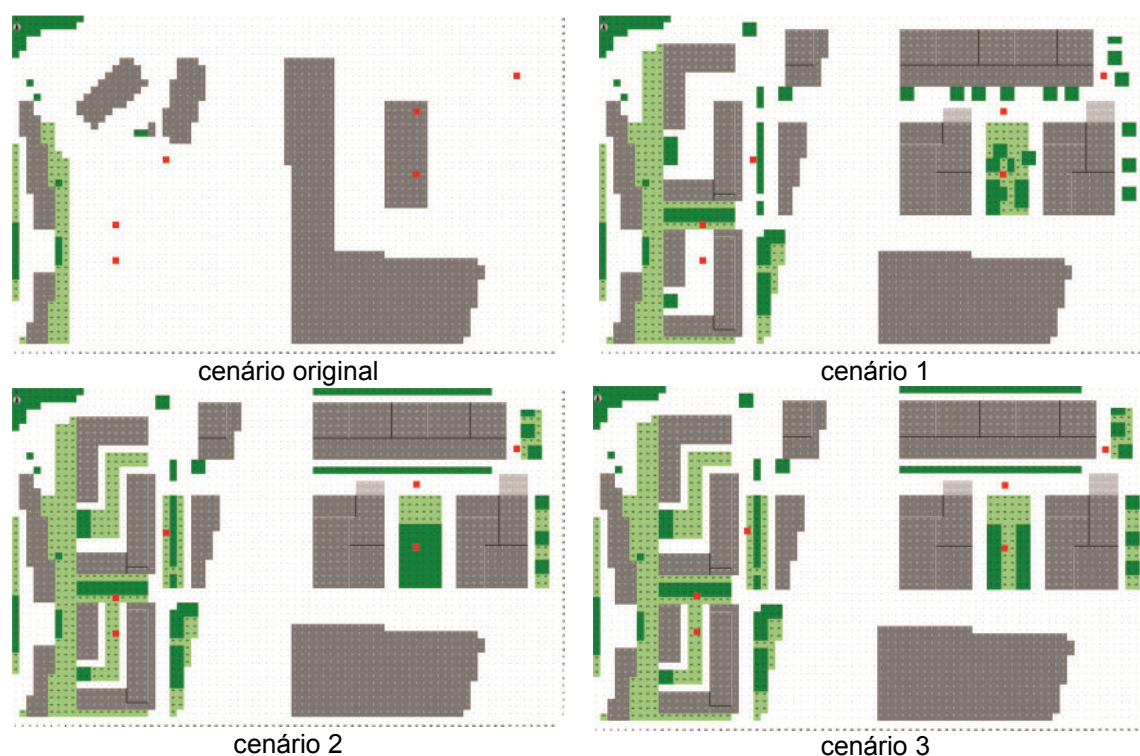


Figura 27 – Genebra: configuração dos cenários simulados

Fonte: Autoria própria (2014)



A Tabela 16 contém a descrição geral dos pontos monitorados e simulados. O valor de FVC foi obtido a partir do ENVI-met e todas as árvores inseridas no modelo possuem 15 m de altura.

**Tabela 16 – Descrição para cada ponto considerando os diferentes cenários**

Ponto/cenário	FVC	Descrição geral
<b>G1</b>		
Situação atual	0,99	Área aberta
Cenário 1	0,61	Edificações com alturas variadas+ árvores leves
Cenário 2	0,63	Edificações com alturas variadas+ árvores leves + grama
Cenário 3	0,46	Edificações com alturas variadas+ árvores de copa densa + grama
<b>G2</b>		
Situação atual	x	Posicionado em local onde há um edifício
Cenário 1	0,57	Edifício no lado N e uma praça no lado S + árvores leves e dispersas
Cenário 2	0,55	Edifício no lado N e uma praça no lado S + árvores leves e linearmente posicionadas
Cenário 3	0,44	Edifício no lado N e uma praça no lado S + árvores de copa densa e linearmente posicionadas
<b>G3</b>		
Situação atual	0,94	Área aberta
Cenário 1	0,41	Edifícios nos lados L e O + árvores leves no eixo central
Cenário 2	0,32	Edifícios nos lados L e O + árvores leves no eixo central + grama
Cenário 3	0,23	Edifícios nos lados L e O + árvores de copa densa no eixo central + grama
<b>G4</b>		
Situação atual	x	Posicionado em local onde há um edifício
Cenário 1	0,38	No interior da praça com árvores leves dispersas
Cenário 2	0,21	No interior da praça com árvores leves concentradas
Cenário 3	0,24	No interior da praça com árvores de copa densa ao longo de dois eixos
<b>G5</b>		
Situação atual	0,96	Área aberta
Cenário 1	0,37	Edifícios nos lados N, L e O + árvores leves + grama
Cenário 2	0,37	Edifícios nos lados N, L e O + árvores leves + aumento de área gramada
Cenário 3	0,29	Edifícios nos lados N, L e O + árvores de copa densa + aumento de área gramada
<b>G6</b>		
Situação atual	0,97	Área aberta
Cenário 1	0,41	Edifícios nos lados N, L e O + árvores leves + grama
Cenário 2	0,33	Edifícios nos lados N, L e O + árvores leves + aumento de área gramada
Cenário 3	0,32	Edifícios nos lados N, L e O + árvores de copa densa + aumento de área gramada

**Fonte: Autoria própria (2014)**

#### 4.1.6 Genebra: estratégias de melhoria do ambiente térmico

Na Tabela 17 constam os dados dos pontos G1, G3, G5 e G6, todos localizados em local aberto, com alto valor de FVC. A Ta média entre os pontos foi de 28,4°C no ponto G1 e de 28,5°C nos demais pontos. Na categorização do índice

PET os pontos estariam em muito forte estresse térmico ao calor, enquanto para o índice UTCI, os pontos estariam em forte estresse térmico.

Os dados de G2 e G4 não aparecem, pois no cenário original, existe uma edificação localizada onde estão tais pontos.

**Tabela 17 – Genebra: cenário original**

<b>Hora</b>	<b>G1 (FVC 0,98) Ta (°C)</b>	<b>G3 (FVC 0,94) Ta (°C)</b>	<b>G5 (FVC 0,96) Ta (°C)</b>	<b>G6 (FVC 0,97) Ta (°C)</b>
14h00	27,2	27,2	27,2	27,2
15h00	28,4	28,4	28,4	28,4
16h00	28,9	29	29	29
17h00	29	29,2	29,2	29,2
<b>média</b>	<b>28,4</b>	<b>28,5</b>	<b>28,5</b>	<b>28,5</b>
PET (°C)	37,7	38	38	38
categoria de estresse térmico ao calor	Muito Forte	Muito Forte	Muito Forte	Muito Forte
UTCI (°C)	33,8	34,2	34,2	34,2
categoria de estresse térmico ao calor	Forte	Forte	Forte	Forte

**Fonte: Autoria própria (2014)**

A Tabela 18 apresenta os dados do cenário 1 e as diferenças em relação ao cenário original. Originalmente, o ponto G1 está localizado em espaço com fator de visão do céu (FVC) igual a 0,98. No projeto SOVALP está prevista a construção de edifícios de diferentes alturas no lado oeste e a inserção de árvores no lado oposto (cenário 1, FVC= 0,63). Nesse caso, haveria uma redução média de 0,7°C na temperatura do ar naquele ponto, porém as categorias de estresse térmico são mantidas em muito forte e forte estresse térmico ao calor, para os índices PET e UTCI.

A configuração inicial do ponto G3 (FVC= 0,94), a partir do projeto SOVALP, passaria a ser caracterizada por um cânion urbano com árvores inseridas no eixo central. Nesta situação (cenário 1), considerando árvores de copa estreita de 15 m de altura, a redução média na Ta seria de 0,8°C. A classificação da categoria de estresse do índice PET passaria de muito forte estresse ao calor para moderado estresse ao calor. Em relação ao UTCI, a mudança nas categorias de estresse foi

menos sensível comparativamente ao PET, passando de forte estresse ao calor para moderado estresse ao calor.

O ponto G5 foi alocado entre três conjuntos de edifícios (originalmente está localizado em uma área aberta com FVC=0,96), conforme Tabela 16. No cenário 1 (FVC=0,37) foi proposto um conjunto de árvores posicionadas linearmente com área gramada em volta, havendo uma redução média de 0,8°C na temperatura do ar. Assim como no ponto G3, as categorias de estresse térmico no período analisado apresentariam uma mudança positiva logo no cenário 1; as mudanças (médias) de categoria do PET e do UTCI passariam de muito forte estresse ao calor e forte estresse ao calor, respectivamente, para moderado estresse ao calor.

O ponto G6, originalmente em espaço aberto (FVC=0,97), passa a ser influenciado pela configuração de três edifícios, sendo um deles disposto em formato de “L”, um conjunto de árvores no lado oeste e outro ao norte. A redução média de temperatura do ar no cenário 1 (FVC=0,41) seria de 0,8°C. A nova categoria de estresse térmico ao calor seria em moderado tanto na escala PET como na escala UTCI.

**Tabela 18 – Genebra: cenário 1 e diferenças em relação ao cenário original**

Hora	G1 (FVC 0,63)		G3 (FVC 0,41)		G5 (FVC 0,37)		G6 (FVC 0,41)		G2 (FVC 0,57)		G4 (FVC 0,38)	
	Ta	Dif	Ta	Dif	Ta	Dif	Ta	Dif	Ta		Ta	
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	
14h00	26,4	0,8	26,2	1	26,2	1	26,3	0,9	26,4		26,4	
15h00	27,7	0,7	27,7	0,7	27,7	0,7	27,8	0,6	27,7		27,8	
16h00	28,3	0,6	28,3	0,7	28,3	0,7	28,4	0,6	28,3		28,4	
17h00	28,4	0,6	28,5	0,7	28,5	0,7	28,6	0,6	28,5		28,6	
<b>média</b>	<b>27,7</b>	<b>0,7</b>	<b>27,7</b>	<b>0,8</b>	<b>27,7</b>	<b>0,8</b>	<b>27,7</b>	<b>0,8</b>	<b>27,7</b>		<b>27,8</b>	
PET (°C)	37,4	0,3	24,6	13,4	27,2	10,8	28,2	9,8	28,7		26,4	
categoria de estresse térmico ao calor	Muito Forte		Moderado		Moderado		Moderado		Moderado		Moderado	
UTCI (°C)	33,5	0,3	26,7	7,5	28	6,2	28,7	5,5	28,9		27,8	
categoria de estresse térmico ao calor	Forte		Moderado		Moderado		Moderado		Moderado		Moderado	

**Fonte: Autoria própria (2014)**

Os pontos G2 e G4 são analisados de forma diferente, pois não há como analisar a situação entre cenário original e cenário modificado, uma vez que atualmente existe um edifício no lugar onde está proposta uma rua de pedestres para o setor de negócios (ponto G2), bem como uma praça arborizada (ponto G4).

O ponto G2 é caracterizado por edifícios ao norte e pela praça ao sul. No cenário 1 (FVC=0,57) foram propostos agrupamentos arbóreos ao longo da rua de pedestres. O ponto G4 no projeto SOVALP está localizado no interior de uma praça. No cenário 1 (FVC=0,38), foram distribuídas árvores leves de 15 m de altura de forma aleatória (tendo como referencia as imagens ilustrativas do projeto SOVALP). Ambos os pontos encontram-se em moderado estresse térmico ao calor.

No ponto G1 (FVC=0,61) do cenário 2 (Tabela 19) foram consideradas as características gerais do cenário 1, mas com a adição de área gramada. O efeito combinado da arborização mais superfície gramada promove mudanças não significativas na temperatura do ar (quando comparado ao cenário 1); entretanto são observadas reduções no PET (1,1°C) e no UTCI (0,5°C).

**Tabela 19 – Genebra: cenário 2 e diferenças em relação ao cenário original**

Hora	G1 (FVC 0,61)		G3 (FVC 0,32)		G5 (FVC 0,37)		G6 (FVC 0,33)		G2 (FVC 0,55)	G4 (FVC 0,21)
	Ta	Dif	Ta	Dif	Ta	Dif	Ta	Dif	Ta	Ta
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
14h00	26,4	0,8	26,1	1,1	26,1	1,1	26,1	1,1	26,3	26,5
15h00	27,8	0,6	27,5	0,9	27,5	0,9	27,6	0,8	27,7	27,8
16h00	28,3	0,6	28,1	0,9	28,1	0,9	28,2	0,8	28,3	28,4
17h00	28,5	0,5	28,3	0,9	28,3	0,9	28,4	0,8	28,4	28,5
<b>média</b>	<b>27,7</b>	<b>0,7</b>	<b>27,5</b>	<b>1</b>	<b>27,5</b>	<b>1</b>	<b>27,5</b>	<b>1</b>	<b>27,7</b>	<b>27,8</b>
PET (°C)	36,6	1,1	24,6	13,4	27,1	10,9	26,6	11,4	28,7	26,4
categoria de estresse térmico ao calor	Muito forte		Moderado		Moderado		Moderado		Moderado	Moderado
UTCI (°C)	33,3	0,5	26,6	7,6	28	6,2	27,9	6,3	28,9	27,8
categoria de estresse térmico ao calor	Forte		Moderado		Moderado		Moderado		Moderado	Moderado

**Fonte: Autoria própria (2014)**

Nos pontos G3 (FVC=0,32), G5 (FVC=0,37) e G6 (FVC= 0,33) a adição de área gramada reduziria em 1,0°C a temperatura do ar. Pode-se afirmar, também,

que a adição de superfície gramada contribui com uma redução adicional de 0,2°C na Ta média quando comparada com reduções na Ta no cenário 1. No ponto G2 (FVC=0,55), as árvores foram dispostas linearmente, mas não houve diferença na Ta média em relação ao cenário 1. No ponto G4 (FVC=0,21), os espaços da praça foram preenchidos pelo mesmo tipo de árvore. Nota-se que, embora o número de árvores tenha sido maior, o valor médio de temperatura do ar permanece o mesmo (27,8°C), assim como os valores médios de PET (26,4°C) e de UTCI (27,8°C).

Para a configuração do cenário 3 (Tabela 20), levou-se em conta o cenário 2, mas substituindo-se as árvores com 15 m de altura e copa estreita por árvores de mesmo altura, porém com copa densa (T2). Nesse último cenário, no ponto G1 houve uma redução de 1,4°C na temperatura do ar em relação às condições iniciais (situação atual). Apesar de haver uma redução de 1,2°C no PET e de 0,8°C no UTCI, ainda assim não haveria alteração na categoria de estresse térmico.

**Tabela 20 – Genebra: cenário 3 e diferenças em relação ao cenário original**

Hora	G1 (FVC 0,46)		G3 (FVC 0,23)		G5 (FVC 0,29)		G6 (FVC 0,32)		G2 (FVC 0,44)		G4 (FVC 0,24)	
	Ta	Dif	Ta	Dif	Ta	Dif	Ta	Dif	Ta		Ta	
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	
14h00	25,7	1,5	25,1	2,1	25,5	1,7	25,7	1,5	25,7		25,7	
15h00	27	1,4	26,3	2,1	26,8	1,6	27,1	1,3	26,9		26,9	
16h00	27,5	1,4	26,8	2,2	27,3	1,7	27,6	1,4	27,3		27,4	
17h00	27,6	1,4	27	2,2	27,5	1,7	27,8	1,4	27,5		27,5	
<b>média</b>	<b>27</b>	<b>1,4</b>	<b>26,3</b>	<b>2,2</b>	<b>26,8</b>	<b>1,7</b>	<b>27</b>	<b>1,5</b>	<b>26,8</b>		<b>26,8</b>	
PET (°C)	36,5	1,2	24,2	13,8	27	11	26,5	11,5	28,6		27,5	
categoria de estresse térmico ao calor	Muito forte		Moderado		Moderado		Moderado		Moderado		Moderado	
UTCI (°C)	33	0,8	26,4	7,8	27,7	6,5	27,6	6,6	28,6		26,5	
categoria de estresse térmico ao calor	Forte		Moderado		Moderado		Moderado		Moderado		Moderado	

**Fonte: Autoria própria (2014)**

Em relação à situação atual, as reduções na Ta média nos pontos G3 (FVC=0,23), G5 (FVC=0,29) e G6 (FVC=0,32) foram: 2,2°C, 1,7°C e 1,5°C, respectivamente.

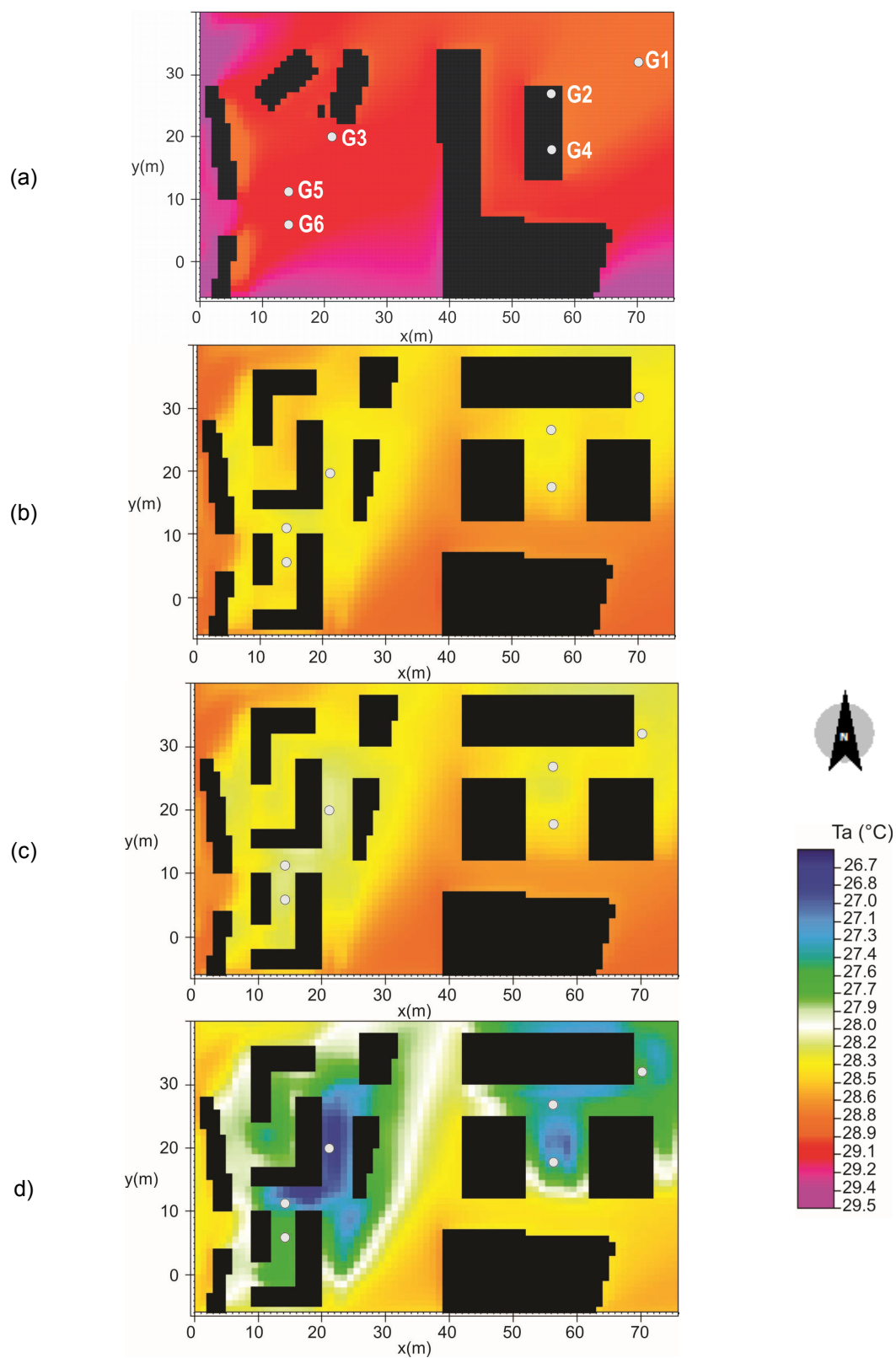
No ponto G2 (FVC=0,44) foi mantida a disposição linear das árvores, mas substituindo aquelas do cenário anterior por árvores de copa densa. Nesse caso, considerando os índices PET e UTCI, não houve alterações nos níveis de conforto térmico para os três cenários propostos, variando na faixa de estresse moderado ao calor. Já em relação a Ta tais mudanças podem ser mais evidentes, com diferença de 0,9°C no cenário 3 comparado ao cenário 1.

No ponto G4 (FVC=0,24) foram propostos dois conjuntos de árvores de copa densa de 15 m de altura com área gramada no espaço que os divide, havendo uma redução de 0,9°C na Ta em relação aos cenários anteriores. Isso ocorre em virtude da redução significativa de radiação solar incidente às 14h00 e às 15h00.

Para uma análise da distribuição da Ta (Figura 28) na área de estudo, foram selecionados os dados de temperatura do ar às 16h00 por haver uma significativa proximidade entre o dado medido e o simulado em ambos os pontos (G1 e G6) na etapa de ajuste/calibração de dados. A vegetação foi suprimida para uma melhor visualização do ambiente térmico externo.

No cenário original (Figura 28a), a temperatura do ar média para toda a área de estudo era de 28,5°C. No cenário 1 houve uma redução média de 0,6°C. Com a inserção de área gramada a redução média de temperatura do ar foi de 0,7°C, demonstrando que, para a área como um todo, a inserção de área gramada reduz de forma sutil a temperatura do ar, conforme visualizado na comparação entre a Figura 28b e Figura 28c.

No cenário 3, ao substituir as árvores leves de 15m de altura por árvores de mesma altura, mas de copa densa, a redução média na temperatura do ar foi de 1,2°C; havendo uma alteração de todo o campo térmico da área selecionada (Figura 28d). No último cenário, às 16h00, a temperatura do ar mais baixa foi de 26,6°C (correspondente à cor azul escuro), com uma redução média de 2,4°C na Ta, comparativamente ao cenário original. Essa redução ocorre próximo aos pontos G5 e G1. Nesse mesmo horário, na região mais aquecida da área simulada (correspondente à cor violeta na parte superior à esquerda) registrou uma redução na Ta de 29,5°C para 28,5°C.



**Figura 28 – Genebra, Ta às 16h00: (a) condições originais; (b) cenário 1; (c) cenário 2 e (d) cenário 3**

**Fonte: Autoria própria (2014)**

#### 4.1.7 Genebra: conclusão parcial

As duas grandes premissas do projeto SOVALP são: (1) melhorar o funcionamento da interface para o transporte público multimodal e (2) a transformação urbana de uma área subutilizada. Nesse estudo de caso, analisou-se o impacto da transformação urbana sob o ponto de vista microclimático com o uso do modelo de simulação computacional ENVI-met.

O entorno da estação de Praille, no período de verão, encontra-se atualmente em desconforto térmico, atingindo a faixa de muito forte estresse ao calor; situação que decorre da falta de sombreamento local.

Com exceção do ponto G1, para todos os outros pontos a categoria (média) de estresse térmico mais próxima da neutralidade conseguida (considerando ambos os índices) foi em moderado estresse ao calor, obtida logo no cenário 1, com a utilização de árvores de copa estreita. Tal fato está relacionado com o fator de visão do céu, que nos pontos G3, G5 e G6 diminuiu mais de 53% em relação a situação original, enquanto que no ponto G1 a diminuição corresponde a 35%.

A preferência por árvores de maior densidade no cenário 3, revelou que comparativamente as árvores de copa estreita, as árvores de copa densa influenciaram para diferenças na  $T_a$  média de até  $1,2^{\circ}\text{C}$  (diferença entre o cenário 2 e o cenário 3 no ponto G3).

A partir dos diferentes cenários propostos e utilizando-se de vegetação, às 16h00, pode-se chegar a níveis mais próximos da neutralidade térmica, com reduções de  $1,2^{\circ}\text{C}$  no campo térmico da área de estudo. Em pontos específicos foi possível chegar a reduções de até  $2,4^{\circ}\text{C}$ .

Considerando os possíveis cenários futuros a partir da síntese do projeto SOVALP de 2008 (REPUBLIC..., 2008), ressalta-se a importância da inserção de vegetação para obter níveis mais satisfatórios de conforto térmico, com redução de até duas categorias de estresse térmico, considerando o índice PET e de uma categoria, considerando o índice UTCI.



## 4.2 PARIS E OS PROJETOS DE REESTRUTURAÇÃO URBANA GRAND PARIS, ZAC PAJOL E JARDINS D'EOLE

Paris (48°52' N, 2°20'58" E, 50 m de altitude) está localizada ao norte da França, e é a capital administrativa desta. A cidade possui uma área urbana de 2.845 km<sup>2</sup> e uma população estimada de 10.975 habitantes (DEMOGRAPHIA WORLD URBAN AREAS, 2014). Três cursos d'água cortam a cidade: o Rio Sena, o Bièvre e o canal Saint-Martin. O clima é considerado como Cfb (oceânico de transição) conforme a classificação de Köppen-Geiger, com temperatura média de 18°C no verão e de 6°C no inverno.

No projeto "Étude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Echelle de l'Agglomération parisienne" (EPICEA), realizado em conjunto entre a prefeitura de Paris, a Meteo-France e o Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), foram analisadas as tendências de aquecimento para a cidade de Paris para o ano de 2100, por meio de um sistema de modelagem da superfície com resolução espacial de 1 km. A tendência de aquecimento, contradizendo os resultados esperados, mostrou-se ser menos significativa na área urbana do que na zona rural, devido à secura do solo natural desta última; havendo uma redução das ilhas de calor superiores a 2°C. No entanto, percebeu-se um aumento nos valores diários de temperatura do ar (Ta), especialmente nas áreas mais urbanizadas. No inverno, a Ta poderá aumentar de 2,0 até 2,4°C e no verão de 3,5 a 5°C, valores correspondentes às mínimas e máximas diárias (METEO-FRANCE /DIRIC /BEC, 2011). Estudos como esse, reforçam a necessidade de orientar climaticamente o desenho urbano.

Com o objetivo de reduzir as emissões de gases do efeito estufa e melhorar a administração dos seus recursos, foi criado pelo governo um plano climático para a cidade, com versões atualizadas desde 2007. Entre as metas a serem alcançadas até 2020, citam-se: a redução do consumo de energia em 25% e o aumento do consumo de energia renovável em 25% (PARIS, 2012).

A presente pesquisa está relacionada à três intervenções urbanas em uma região específica que incidem ou poderiam incidir sobre o plano climático da cidade. A primeira delas apresentada é denominada de Grand Paris, a qual se resume em um conjunto de propostas elaboradas para servirem de referência para uma Paris do século XXI.

Segundo o Ministère de la Culture et de la Communication (2009), tal iniciativa foi anunciada em 2007 pelo presidente Nicolas Sarkozy, sendo lançada oficialmente em 2008 por meio de uma consulta pública. O objetivo era a criação de um instrumento de pesquisa realizado coletivamente por grupos multidisciplinares visando atender diferentes temas, mas que convergissem para dois enfoques: "a metrópole do século XXI pós-Quito" e "o diagnóstico prospectivo da aglomeração Paris" (MINISTÈRE..., 2009).

Para a realização das propostas, foram convidados 10 escritórios de arquitetura, comandados por: Jean Nouvel, Christian de Portzamparc, Antoine Grumbach, Roland Castro, Yves Lion, Djamel Klouche, Richard Rogers, Bernardo Secchi, Paola Vigano, Finn Geipel, Giulia Andi e Maas Winy. As propostas foram apresentadas em um seminário realizado em 2009. Os temas abordados pelas equipes foram além da arquitetura como forma, incluindo questões como: transporte e mobilidade urbana, áreas verdes, habitação, rios e cursos d'água, equipamentos e instalações públicas, economia, emprego, entre outros.

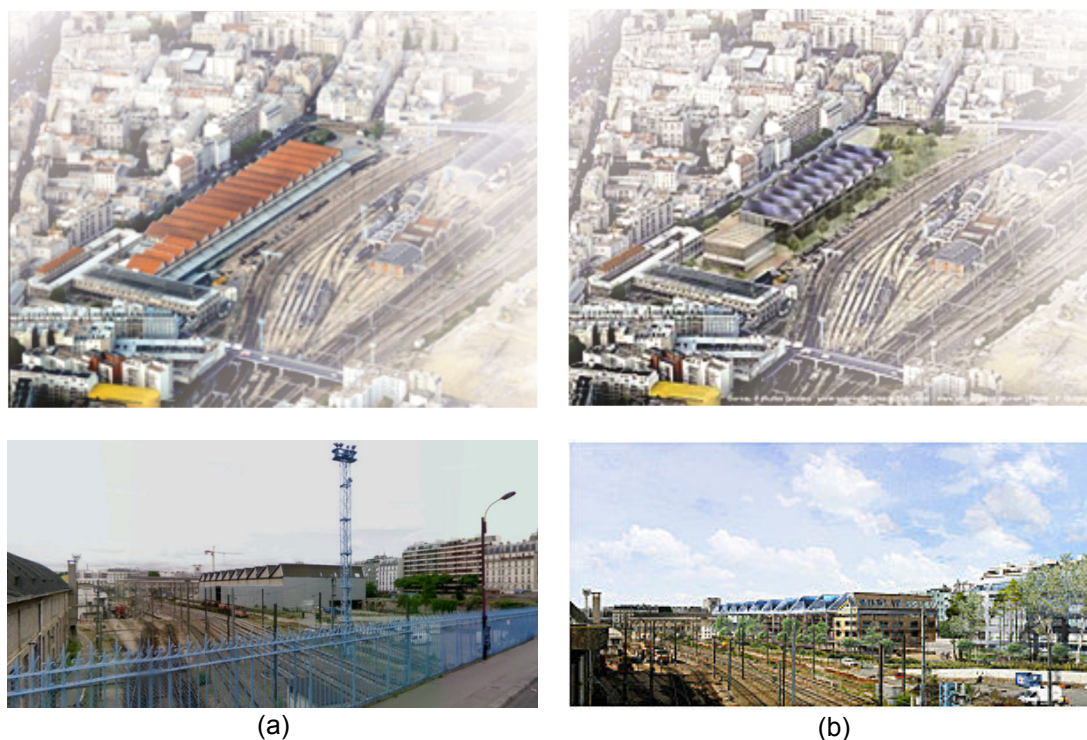
Destaca-se, na presente pesquisa, a proposição da equipe liderada pelo arquiteto Richard Rogers, o qual idealizou a união das temáticas de transporte, mobilidade urbana e áreas verdes (LE GRAND PARI, 2012). Para o transporte de massas foi proposta a construção de um sistema de metrô subterrâneo em substituição às linhas férreas, sugerindo a mudança nas linhas de Gare Du Nord e Gare de l'Est. Sobre a superfície destas, seriam criadas áreas verdes, possibilitando, inclusive, uma melhor integração dos espaços urbanos, além de auxiliar na formação de um ambiente térmico mais favorável em períodos com temperaturas mais altas. Nesta região ainda foram identificados vazios urbanos e terrenos subutilizados (em amarelo na Figura 29) para serem utilizados de forma estratégica.



**Figura 29 – Proposta da equipe de Richard Rogers para o Grand Paris (o perímetro marcado em vermelho corresponde à área de interesse)**

**Fonte: Adaptado de Le Grand Paris (2012)**

Enquanto o Grand Paris envolveu um conjunto de propostas visando soluções urbanas em larga escala, o ZAC Pajol, localizado no 18º distrito, foi planejado para ser um dos principais eco-bairros de Paris (Figura 30). O objetivo era suprir a demanda por espaços verdes e equipamentos públicos dos habitantes daquela região, além de incidir sobre a eficiência energética e energia renovável, estando incluído no plano climático da cidade. As obras tiveram início em 2007, sendo inauguradas no final de 2013 (PARIS / SOCIÉTÉ..., 2012). O orçamento estimado foi de € 63 milhões. Esta operação pretendia proporcionar novos usos aos dois edifícios existentes e possibilitar a construção de outros dois edifícios.



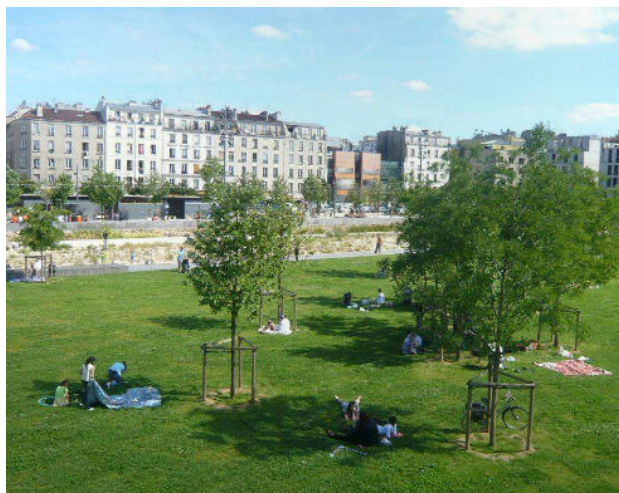
**Figura 30 – ZAC Pajol: (a) antes e (b) depois**

**Fonte: Adaptado de Paris / Société d'economie mixte de la ville (2012) e Jourda Architects (2012)**

Conforme Paris / Société d'economie mixte de la ville (2012), o edifício existente de dois pavimentos abriga uma escola para 500 alunos e a previsão é de atender outros 600 alunos. O projeto ainda englobou a reestruturação de outro edifício existente (Halle Pajol), cujo programa inclui albergue da juventude para 330 pessoas, biblioteca com 30.000 livros, lojas e 3.000 m<sup>2</sup> de jardim coberto. O complexo abriga dois novos edifícios: o centro esportivo (inaugurado em 2012) e um edifício com 5.000 m<sup>2</sup>, voltado para negócios e chamado Green One. As edificações foram projetadas para apresentarem níveis excelentes de desempenho energético, com a utilização de mais de 3.800 m<sup>2</sup> de painéis solares fotovoltaicos e 220 m<sup>2</sup> de painéis solares térmicos. Foi previsto uma economia de 30 toneladas de emissões de CO<sub>2</sub>. O complexo estará implantado em torno de uma grande praça pública, para a qual está destinado quase 1 ha de áreas verdes.

Próximo ao ZAC Pajol, encontra-se o Jardins d'Eole (Figura 31), localizado no 18° distrito, junto aos trilhos da estação de Gare de l'Est. Este local é resultado da transformação de um espaço degradado em um parque urbano com 4

ha. A transformação teve início com debates públicos em 1997, evidenciando a força da participação pública. As obras tiveram início em 2005, sendo finalizadas em 2007.



**Figura 31 – Jardins d’Eole**

**Fonte: Beaumont (2008)**

As propostas para a região (10° e 18° distritos) advindas dos três planos urbanísticos de diferentes escalas e níveis de consolidação (Grand Paris, ZAC Pajol e Jardins d’Eole), poderiam ter impacto não apenas na dinâmica local, mas também no microclima, sendo local de interesse para o presente estudo.

#### 4.2.1 Paris: pontos receptores

Em Paris, para a definição exata de cada local, procurou-se escolher pontos com características urbanas distintas, estabelecendo-se as seguintes localidades:

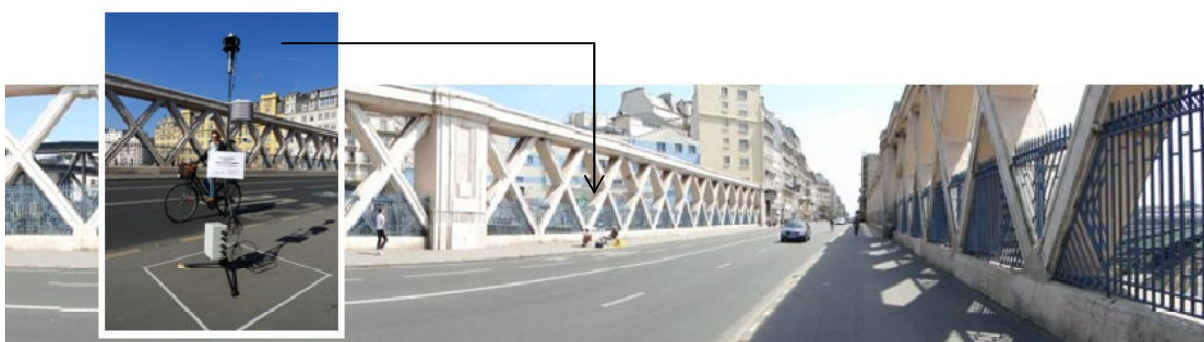
- Ponto P0: localizado no interior do Jardim de Villemin, parque situado junto ao Canal Saint-Martin e próximo a estação de Gare de l’Est (Figura 32). Esse local foi escolhido por ser um parque com arborização já consolidada, servindo de referência para áreas vegetadas no contexto local. Saliencia-se que a estação meteorológica foi posicionada próxima a algumas árvores, e não sob a copa destas.



**Figura 32 – Localização do ponto P0**

**Fonte: Autoria própria (2014)**

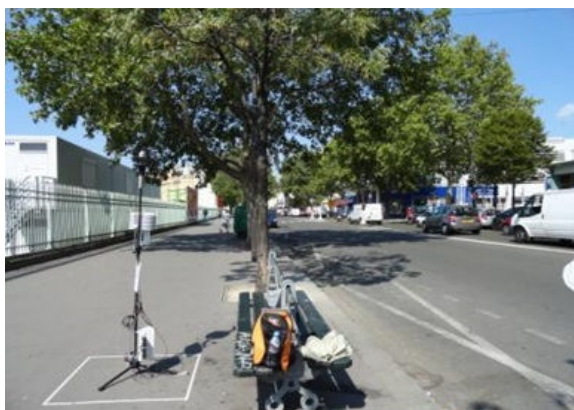
- Ponto P1: localizado na Rue La Fayette, ponte que passa transversalmente sobre os trilhos da estação ferroviária (Figura 33). Esse ponto foi escolhido para que fosse possível a consideração de dados climáticos em uma posição central aos trilhos de trem e em uma cota mais alta.



**Figura 33 – Localização do ponto P1**

**Fonte: Autoria própria (2014)**

- Ponto P2: localizado na Rue du Château Landon, ao lado da estação ferroviária, no nível dos trilhos desta (Figura 34).



**Figura 34 – Localização do ponto P2**

**Fonte: Autoria própria (2014)**

#### 4.2.2 Paris: análise das variáveis climáticas monitoradas

Os pontos P0 (localizado no interior do Jardim de Villemin) e P1 (localizado na ponte Rue La Fayette) foram medidos simultaneamente nos dias 30/07/2011 e 31/07/2011. Para uma análise comparativa entre os pontos optou-se por expor os dados do segundo dia de medição. Apresentam-se também as variáveis climáticas obtidas no dia 01/08/2011, quando foram monitorados os pontos P1 e P2 (localizado na Rue do Château Landon, ao lado das linhas férreas). Nessas datas houve predominância de céu claro em todo o período de medição.

No dia 31/07/2011 (Tabela 21), o ponto P0, por estar situado no interior de um parque, com área sombreada após às 15h00, apresentou valores médios de temperatura do ar ( $T_a$ ) e radiação solar global ( $I_g$ ) mais baixos do que no ponto P1, local que permaneceu exposto à radiação solar direta até às 17h30. Após este período, notou-se que a própria estrutura da ponte sombreava o ponto de monitoramento. No ponto P1 a velocidade do vento ( $v$ ) foi ligeiramente menor do que no ponto P0.

**Tabela 21 – Paris: médias horárias das variáveis climáticas obtidas em campo no dia 31/07/2011**

Data/ Hora	P0				P1			
	Ta (°C)	UR (%)	Ig (W/m <sup>2</sup> )	v (m/s)	Ta (°C)	UR (%)	Ig (W/m <sup>2</sup> )	v (m/s)
14h00	24,1	41	809	0,8	23,7	38	817	0,6
15h00	24,9	38	776	0,8	25,3	35	778	0,6
16h00	24,5	37	213	0,8	26,0	32	661	0,6
17h00	24,4	38	57	0,7	26,1	33	406	0,6
18h00	24,0	39	39	0,6	25,4	35	55	0,5
19h00	23,9	40	29	0,6	25,1	36	38	0,5
<b>Média</b>	<b>24,3</b>	<b>39</b>	<b>320</b>	<b>0,7</b>	<b>25,3</b>	<b>35</b>	<b>459</b>	<b>0,5</b>

Fonte: Autoria própria (2014)

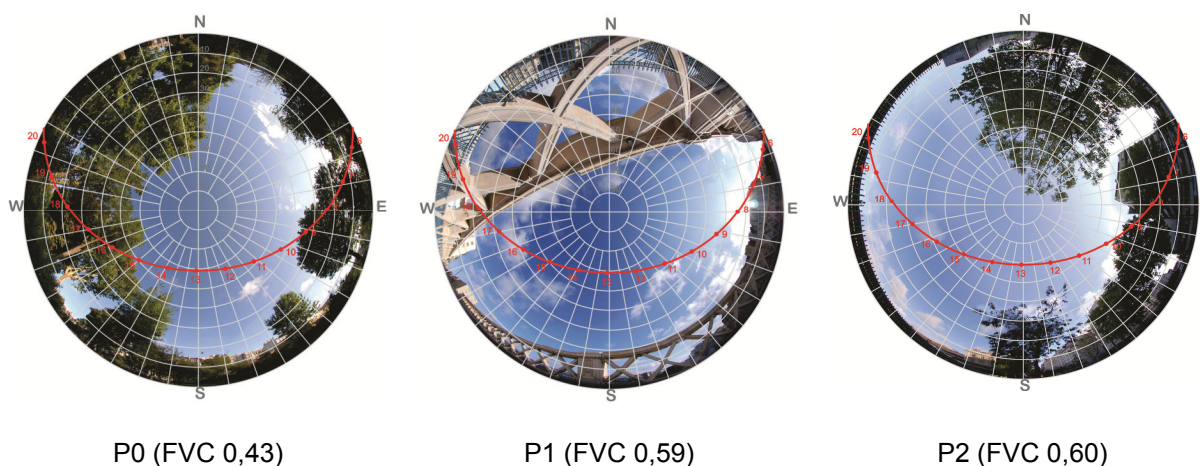
No dia 01/08/2011 (Tabela 22), a velocidade do vento se manteve constante em 0,6 m/s no ponto P1, enquanto no ponto P2, situado na rua paralela à linha férrea, a  $v$  média foi de 1,0 m/s. A umidade relativa média nestes dois pontos foi de 33%. A temperatura do ar e a radiação solar incidente, embora tenham sido mais altas no ponto P2, apresentaram pouca diferença média.

**Tabela 22 – Paris: médias horárias das variáveis climáticas obtidas em campo no dia 01/08/2011**

Data/ Hora	P1				P2			
	Ta (°C)	UR (%)	Ig (W/m <sup>2</sup> )	v (m/s)	Ta (°C)	UR (%)	Ig (W/m <sup>2</sup> )	v (m/s)
14h00	27,7	34	829	0,6	27,6	34	819	0,9
15h00	28,5	33	769	0,6	28,3	34	759	1,0
16h00	28,9	32	665	0,6	28,9	32	654	1,0
17h00	28,9	33	495	0,6	29,0	32	521	0,9
18h00	28,1	34	150	0,6	28,9	33	346	1,1
19h00	27,6	34	37	0,6	28,6	32	211	1,0
<b>Média</b>	<b>28,3</b>	<b>33</b>	<b>491</b>	<b>0,6</b>	<b>28,6</b>	<b>33</b>	<b>552</b>	<b>1,0</b>

Fonte: Autoria própria (2014)

A Figura 35 corresponde às cartas solares sobrepostas às imagens olho de peixe. Nota-se que os pontos P1 e P2 apresentam valores de FVC próximos, porém, o ponto P2 permanece exposto à radiação solar durante todo período de medição. Já o ponto P0 apresenta maior obstrução à radiação solar, com sombreamento a partir das 15h00. O valor de FVC deste ponto é de 0,43.



**Figura 35 – Paris: carta solar sobreposta às imagens olho de peixe e valor do FVC para cada ponto**

Fonte: Autoria própria (2014)

#### 4.2.3 Paris: modelagem (edição de área)

Para a modelagem, foi utilizado um mapa de arruamento, contendo a implantação das edificações e alturas destas (arquivo cedido pela Prefeitura de



Paris), bem como imagens de satélite do programa Google Earth. O modelo testado compreende um perímetro de 2,1 km no eixo x e de 0,52 km no eixo y, correspondente a uma área de 1,092 km<sup>2</sup>. O tamanho da grade utilizada foi de 10 m para os eixos x e y e de 1 m para o eixo z. Para a geração da grade vertical foi utilizado o método telescópico com fator de aumento de 20% a partir de 13 m de altura (Figura 36).

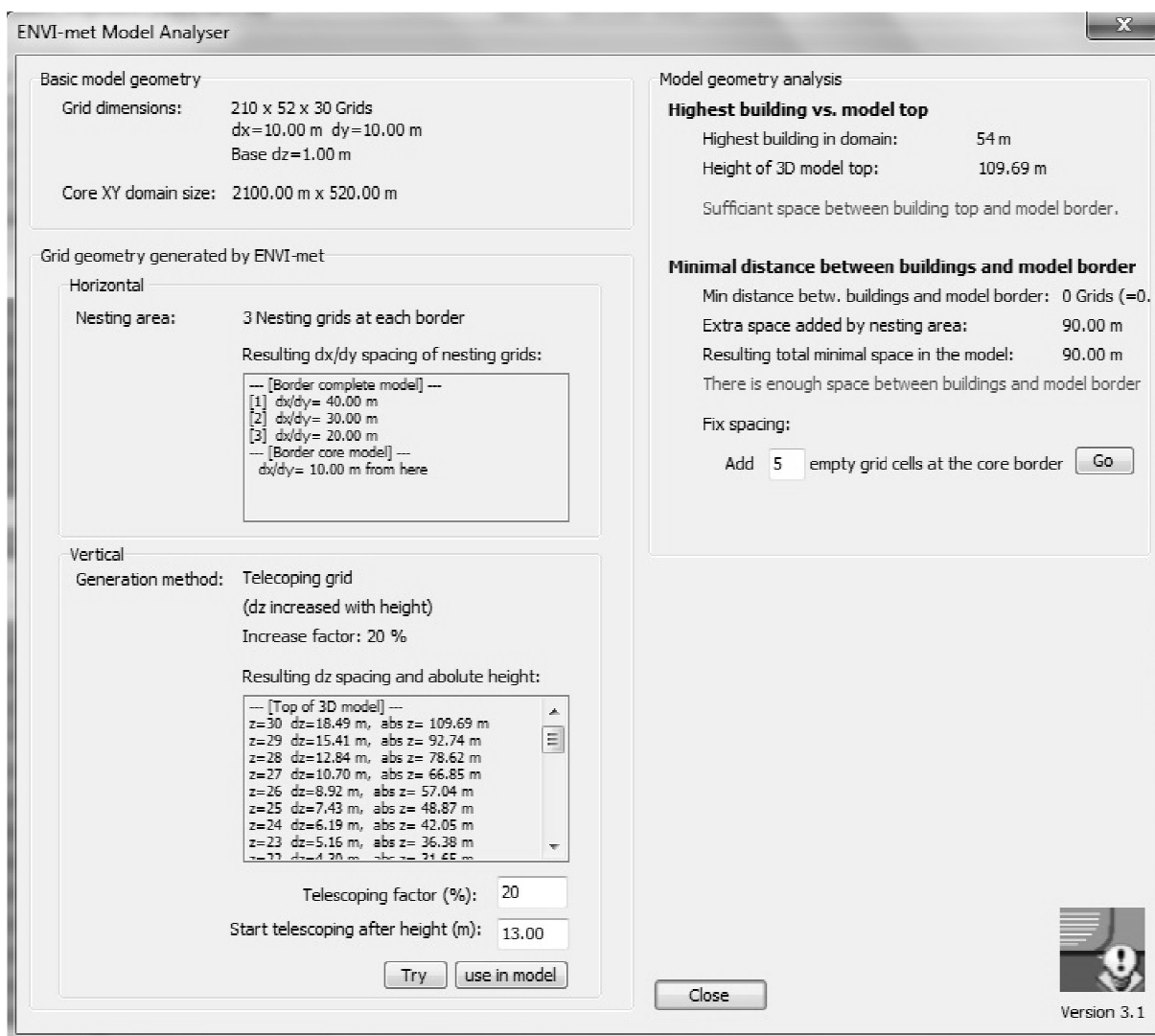


Figura 36 – Parâmetros utilizados na confecção do modelo de Paris

Fonte: Autoria própria (2014)

Para este caso especificamente, o tamanho da grade deve-se, sobretudo, à abrangência da área de interesse. Pelo fato das ruas parisienses se caracterizarem, em geral, por cânions urbanos contendo edifícios com pouca diferença de altura entre si, o tamanho da grade não afetou o ajuste entre dados

medidos e calibrados (conforme etapa apresentada adiante). Devido ainda à dimensão limite imposta pelo modelo, não foi possível incluir na modelagem a região onde está localizado o Jardim de Villemin (ponto P0); servindo os dados coletados em campo neste ponto como referência para os dados simulados em áreas vegetadas.

Na área de aninhamento, o teste com 3 grades mostrou ser satisfatório quanto à amplitude da temperatura do ar (considerando o primeiro dia de iteração). Para esta área, os tipos de solo utilizados foram concreto e solo lamoso.

Uma das restrições da versão do modelo de simulação utilizado (ENVI-met 3.1 Beta 5) é a impossibilidade da modelagem da topografia. Os trilhos da estação de Gare de l'Est dividem a área de interesse em duas partes: uma situada ao nível destes e outra situada em uma cota mais alta. Desta forma, a alternativa foi considerar uma plataforma de 10 m de altura formada pela mesma massa que compõem as edificações e acrescentar as alturas das edificações reais sob este bloco. Na análise do campo térmico do perímetro seleccionado para o estudo, porém, essa parte é desconsiderada (ver mancha em amarelo na Figura 37).



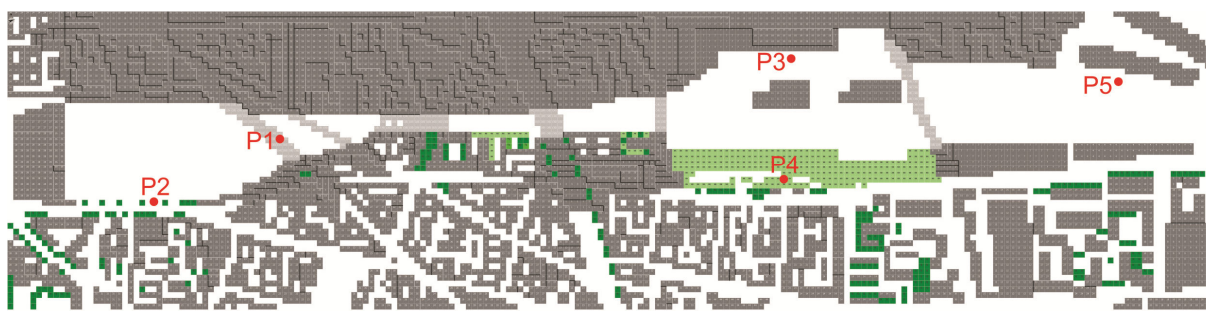
**Figura 37 – Paris: área de estudo**

Fonte: Google Earth (2012)

Levando em conta todo o perímetro modelado, encontra-se maior densidade urbana nas áreas mais próximas à estação ferroviária, enquanto que, em algumas áreas mais distantes desta, são observadas áreas subutilizadas e vazios urbanos. Observa-se que, em grande parte das quadras modeladas, a média das alturas das edificações varia entre 23 a 27 m de altura.

A Figura 38 corresponde ao modelo base finalizado. A cor cinza corresponde às áreas construídas. Para a configuração das vegetações existentes

no cenário original, foram escolhidas: “tree, light 15m” (sigla I1 - LAD: 0,040 0,060 0,070 0,110 0,130 0,150 0,140 0,130 0,100 0,000), na cor verde escuro, e grama com 20 cm de altura (LAD: 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300), na cor verde claro, configurada a partir da grama existente no banco de dados do programa (“grass 50 cm aver. dense”).



**Figura 38 – Paris: modelo base finalizado**

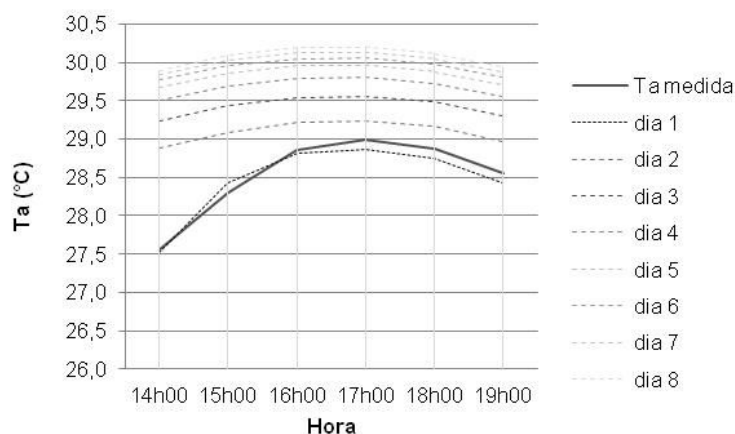
**Fonte: Autoria própria (2014)**

Para uma análise mais detalhada, foram estabelecidos cinco pontos de referência. Os pontos P1 e P2 foram alocados no mesmo lugar que as estações meteorológicas durante a campanha de coleta de dados. O ponto P3 foi posicionado junto ao local de implantação do projeto ZAC Pajol. O ponto P4 foi posicionado no interior do Jardins d’ Eole. Ressalta-se que, a estruturação desse parque urbano foi finalizada em 2007. Porém, pelo fato de parte das árvores plantadas no local não ter atingido seu crescimento completo até o ano de 2011, no cenário original foi considerada apenas área gramada. O ponto P5 foi posicionado junto às linhas férreas.

#### 4.2.4 Paris: ajustes do modelo ENVI-met

Para os ajustes entre dados medidos e simulados foi selecionado o dia 01/08/2011, quando ocorreu a medição simultânea no ponto P1, localizado na ponte Rue La Fayette e no ponto P2, localizado na Rue do Château Landon.

Foi percebido que, devido à morfologia local, não foi possível manter o padrão da curva de temperatura do ar simulada depois do primeiro dia simulado (Gráfico 2), afetando o tempo de iteração desejável.



**Gráfico 2 – Comparação entre as curvas simuladas para o dia 01/08/2011, ponto P2**

**Fonte: Autoria própria (2014)**

A mesma situação ocorreu no estudo para Genebra, cujo modelo foi modelado para uma grade de 5 x 5 nos eixos x e y e para um terreno com pouca variação topográfica. Tal fato leva a crer que a diminuição da amplitude da curva no período analisado decorra da morfologia particular decorrente das linhas de trem, e que resulta em um grande número de células de grade vazias.

A perda do padrão da curva foi percebida, também, quando as simulações eram iniciadas logo no início da manhã ou no período noturno. Assim, para a definição dos dados de entrada e para a análise dos dados são considerados os resultados das primeiras horas simuladas.

O modelo ENVI-met combina dados climáticos obtidos em várias alturas, e, portanto, exige a compilação de diferentes fontes para a obtenção dos mesmos. O dado de umidade específica a 2.500 m de altura (3 g/kg) foi obtido no *site* referente a sondagens atmosféricas da Universidade de Wyoming, sendo consideradas as informações referentes à Trappes, comuna localizada ao norte da França, a sudoeste de Paris e distante aproximadamente 30 km do centro da mesma. Os dados de umidade relativa a 2 m de altura (46%, média diária) foram retirados da estação oficial de referência (observatório meteorológico de Montsouris).

Para a configuração dos dados de entrada (Tabela 23), a utilização dos dados meteorológicos obtidos nos observatórios meteorológicos oficiais é a mais recomendável, no entanto, em alguns casos se faz necessária a adaptação dos mesmos para que haja melhor ajuste entre dados medidos e simulados. Já nos testes iniciais com o ENVI-met, a direção do vento de 270° (obtida na estação oficial)

resultou em uma curva de  $T_a$  diferente da medida, enquanto a direção do vento de  $180^\circ$  (direção mais próxima daquelas obtidas em campo) gerou um padrão semelhante ao medido.

**Tabela 23 – Paris: configuração inicial do modelo**

Área de estudo	Paris	Configuração
Data	01/08/2011	Dia medido
Início da simulação	13:00:00	Horário necessário para amplitude da curva
Velocidade do vento (m/s)	0,8	Média obtida entre os pontos P1 e P2
Direção do vento (graus)	180	Valor estipulado (medido em campo)
Comprimento de rugosidade	0,1	Valor estipulado
Temperatura do ar (K)	301,5	Média obtida entre os pontos P1 e P2
Umidade Especifica a 2500 m (g/kg)	3	Valor registrado às 12Z
Umidade Relativa do ar (%)	46	Média diária

**Fonte: Aatoria própria (2014)**

A velocidade do vento de 1,9 m/s, também obtida na estação oficial, apresentou bons resultados quando considerada a direção de  $270^\circ$ , mas para a direção de  $180^\circ$ , os valores simulados de velocidade do vento foram muito altos, optando-se pelo valor de 0,8 m/s, correspondente a  $v$  média obtida entre os pontos P1 e P2 no dia 01/08/2011. Para o dado inicial de temperatura do ar foi utilizada a média obtida entre os dois pontos monitorados (301,5 graus Kelvin), uma vez que o dado de temperatura do ar na estação de referência foi abaixo do valor necessário para uma correspondência significativa entre dados medidos e simulados.

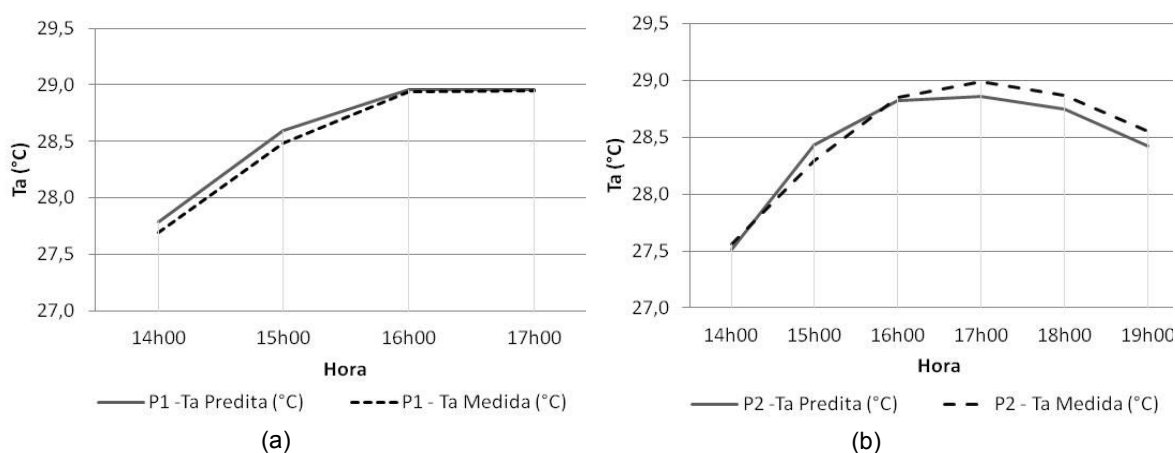
O valor de ajuste solar para ondas curtas (*Factor of shortwave adjustment*) foi de 0,8. O comprimento de rugosidade ( $z_0$ ) das superfícies adotado foi de 0,1 típico para áreas abertas com obstáculos ocasionais (WIERINGA *et al.*, 2001). Em relação aos limites do modelo, para temperatura e umidade, foi escolhida a opção *open LBC*. Para a energia cinética e taxa de dissipação (TKE) selecionou-se a opção *forced*.

A fração de nuvens para o dia considerado foi entre uma oitava e céu claro; condição ideal para medições microclimáticas. Optou-se pela fração de uma oitava para não potencializar a  $T_{rm}$ , já que os testes iniciais com o modelo revelaram a tendência de a variável ser superestimada.

Nos pré-testes realizados, os valores referentes às propriedades das edificações apresentaram ter menos influência nos dados de saída do que as variáveis acima citadas, sendo utilizados os valores originais do modelo.

Para a validação do modelo ENVI-met é necessário ajustar o modelo inicial para depois simulá-lo de acordo com o projeto futuro. Neste estudo, o modelo foi ajustado segundo a temperatura do ar.

De acordo com o Gráfico 3, nota-se a correspondência entre os valores de temperatura do ar medidos e preditos, sendo considerados satisfatórios os resultados para ambos os pontos, servindo estes dados como base para comparação dos cenários futuros. No Gráfico 3a, o horário das 18h00 e 19h00 não aparece, pois o ponto estava sob o sombreamento provocado pelo elemento estrutural da ponte, o qual não era possível de modelar segundo a configuração pré-estabelecida.



**Gráfico 3 – Paris: dados medidos VS preditos de Ta para: (a) ponto P1, (b) ponto P2**

**Fonte: Autoria própria (2014)**

Para as demais variáveis climáticas ( $T_{rm}$ ,  $I_g$ , UR e  $v$ ), como também para os índices de conforto térmico PET e UTCI, procurou-se obter valores médios próximos (Tabela 24).

No ponto P1, no período das 14h00 até às 17h00, o índice PET medido e o predito apresentaram correspondência na categoria de forte estresse térmico. Já o índice UTCI predito classificou o ponto P1 em uma categoria acima, isto é, o UTCI predito registrou forte estresse térmico e o medido moderado estresse térmico.

**Tabela 24 – Paris: valores médios medidos e preditos**

Ponto	Média	Ta (°C)	Trm (°C)	Ig (W/m <sup>2</sup> )	UR (%)	v (m/s)	PET (°C)	UTCI (°C)
P1	medida	28,5	42,1	689	33	0,6	33,7	31,0
	predita	28,6	44,8	640	57	1,2	33,9	33,0
P2	medida	28,5	45,8	552	33	1,0	34,5	31,4
	predita	28,5	54,8	544	54	0,8	40,3	35,5

Fonte: Autoria própria (2014)

No ponto P2, no período das 14h00 até às 19h00, devido a diferença de Trm medida e predita, a classificação da categoria dos índices PET e UTCI foi superestimada em uma categoria, ou seja, o PET medido foi em forte estresse térmico e o predito foi em muito forte estresse térmico, enquanto o UTCI medido foi em moderado estresse térmico e o predito foi em forte estresse térmico.

Os resultados estatísticos mostram uma correlação significativa nos três testes estatísticos aplicados, com valores próximos entre os pontos P1 e P2 para o teste RMSE e o índice de concordância de Willmott (Tabela 25).

**Tabela 25 – Paris: resultado dos testes estatísticos**

Ponto	P1	P2
Erro médio (medida-predita)	-0,06	0,05
Desvio padrão da Ta medida	0,59	0,53
Desvio padrão da Ta simulada	0,55	0,51
Erro médio absoluto	0,06	0,08
RMSE	0,07	0,08
Índice de concordância de Willmott	0,99	0,99
Teste t-Student	0,10	0,76

Fonte: Autoria própria (2014)

#### 4.2.5 Paris: cenários hipotéticos

Foram considerados dois cenários hipotéticos. No cenário 1 é considerada a consolidação do plano de arborização do Jardins d'Eole (Figura 39b) e as intervenções propostas no projeto ZAC Pajol (Figura 39a). No cenário 2 são consideradas as modificações do cenário 1, sendo acrescentadas as áreas verdes advindas da proposta do projeto da equipe liderada pelo arquiteto Richard Rogers para o Grand Paris. Ressalta-se que o cenário modelado é simplificado e serve para

mensurar de forma geral as alterações no ambiente térmico. Nos cenários 1 e 2, as árvores adicionadas são de copa densa de 15 m de altura sem folhagem na base (sigla T2, LAD: 0,000 0,000 2,180 2,180 2,180 2,180 2,180 2,180 1,720 0,000).



Figura 39 – (a) ZAC Pajol, (b) Jardins d'Eole  
Fonte: SEMAEST (2012), Beaumont (2008)

A Figura 40 corresponde aos cenários 1 e 2 finalizados. As áreas em verde claro representam áreas gramadas e em verde escuro as árvores de copa densa. A Tabela 26 contém, para todos os pontos, uma descrição das ações consideradas em cada cenário.

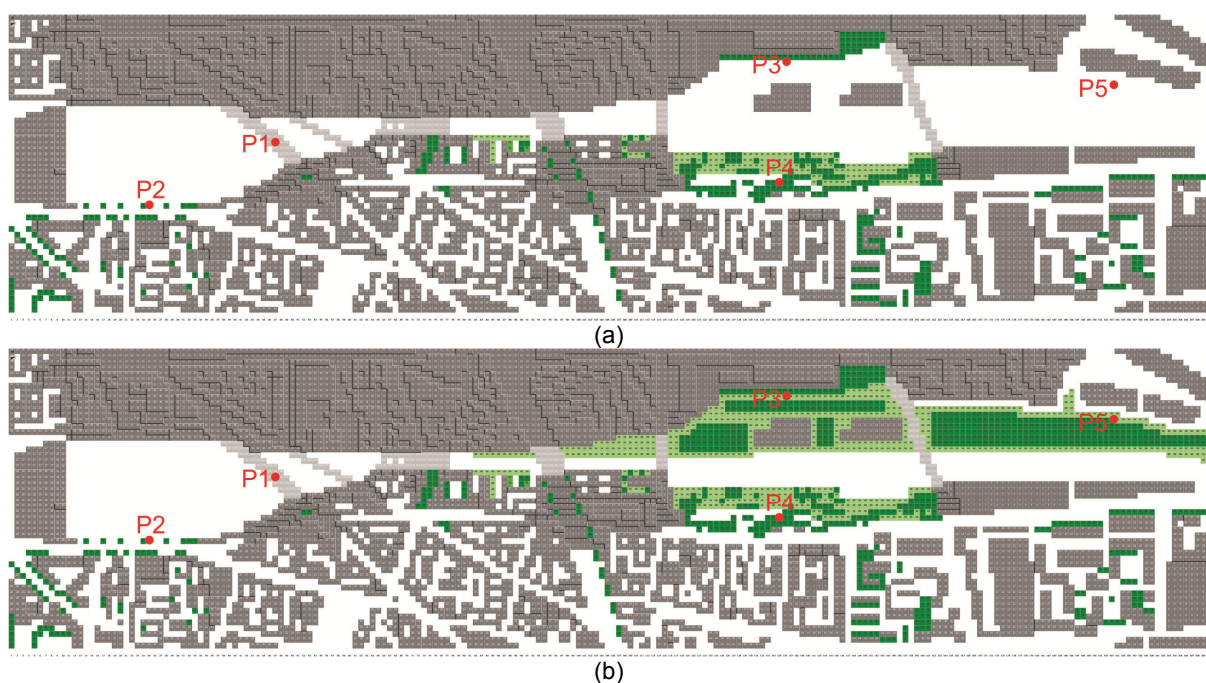


Figura 40 – Paris: (a) cenário 1, (b) cenário 2  
Fonte: Autoria própria (2014)



**Tabela 26 – Paris: descrição para cada ponto considerando os diferentes cenários**

<b>Ponto/cenário</b>	<b>FVC</b>	<b>Descrição geral</b>
<b>P1</b>		
Situação atual	0,82	Localizado na ponte Rue La Fayette
Cenário 1	0,82	Não há diferença em relação ao cenário atual, possíveis alterações no campo térmico decorrem das modificações no entorno
Cenário 2	0,82	Não há diferença em relação ao cenário atual, possíveis alterações no campo térmico decorrem das modificações no entorno
<b>P2</b>		
Situação atual	0,75	Localizado na Rue do Château Landon
Cenário 1	0,75	Não há diferença em relação ao cenário atual, possíveis alterações no campo térmico decorrem das modificações no entorno
Cenário 2	0,75	Não há diferença em relação ao cenário atual, possíveis alterações no campo térmico decorrem das modificações no entorno
<b>P3</b>		
Situação atual	0,87	Localizado junto ao ZAC Pajol
Cenário 1	0,60	Consideradas as intervenções propostas no projeto ZAC Pajol
Cenário 2	0,22	ZAC Pajol + áreas verdes do Grand Paris
<b>P4</b>		
Situação atual	0,62	Localizado no interior do Jardins d'Eole
Cenário 1	0,01	Consolidação do plano de arborização
Cenário 2	0,01	Não há diferença em relação ao cenário 1, possíveis alterações no campo térmico decorrem das modificações no entorno
<b>P5</b>		
Situação atual	0,93	Localizado junto às linhas férreas
Cenário 1	0,93	Não há diferença em relação ao cenário atual, possíveis alterações no campo térmico decorrem das modificações no entorno
Cenário 2	0,23	Inserção de áreas verdes do Grand Paris

**Fonte: Autoria própria (2014)**

#### 4.2.6 Paris: estratégias de melhoria do ambiente térmico

As tabelas contidas nesta seção apresentam valores de FVC obtidos no modelo ENVI-met. As diferenças de FVC correspondente a 0,23 no ponto P1 e de 0,15 no ponto P2, em comparação com o valor obtido pela foto olho de peixe, é resultado da simplificação da forma urbana (no ponto P1, por exemplo, não foi modelada a estrutura da ponte).

A situação atual nos cinco pontos de referência (Tabela 27) aponta para uma temperatura do ar média, para o período de análise, variando entre 28,1°C no ponto localizado no Jardins d'Eole (P4), até 28,6°C no ponto situado sobre linhas

férreas (P5) e com maior valor de FVC (0,93). Em todos os pontos a Ta mínima ocorreu às 14h00 (no ponto P4 foi de 27,0°C) e a Ta máxima ocorreu às 17h00 (no ponto P5 foi de 29,0°C). No entanto, embora a análise da Ta seja importante na compreensão da formação do campo térmico, esta não é capaz de prever o nível de conforto local, conforme pode ser observado na análise dos índices PET e UTCI.

**Tabela 27 – Paris: cenário original**

Hora	P1 (FVC 0,82) Ta (°C)	P2 (FVC 0,75) Ta (°C)	P3 (FVC 0,87) Ta (°C)	P4 (FVC 0,62) Ta (°C)	P5 (FVC 0,93) Ta (°C)
14h00	27,7	27,4	27,5	27,0	27,4
15h00	28,5	28,3	28,4	28,1	28,5
16h00	28,9	28,8	28,8	28,5	29,0
17h00	28,9	28,8	28,9	28,5	29,0
18h00	x	28,7	28,7	28,4	28,9
19h00	x	28,4	28,4	28,1	28,6
<b>média</b>	<b>28,5</b>	<b>28,4</b>	<b>28,5</b>	<b>28,1</b>	<b>28,6</b>
PET (°C)	33,9	40,3	35,9	34,9	39,0
categoria de estresse térmico ao calor	Forte	Muito forte	Muito forte	Forte	Muito forte
UTCI (°C)	33,0	35,5	32,9	32,5	34,9
categoria de estresse térmico ao calor	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte

**Fonte: Autoria própria (2014)**

O ponto P2, embora não tenha apresentado o maior valor de Ta média entre os cinco pontos de referência, foi o que apresentou maior valor médio de PET e UTCI. O ponto com menor valor de PET foi o P1 e com menor valor de UTCI foi o P4. Para o período de análise, os pontos P2, P3 e P5 foram classificados, segundo o índice PET, na faixa de muito forte estresse ao calor. Os outros pontos (P1 e P4) foram considerados em forte estresse ao calor. O UTCI apresentou categorias de estresse térmico menos sensíveis às variáveis microclimáticas, pois classificou todos os pontos na faixa de forte estresse ao calor.

O cenário 1 considera a consolidação do plano de arborização do Jardins d'Eole (no ponto P4), bem como a implementação do projeto ZAC Pajol (no ponto P3). Conforme pode ser visualizado na Tabela 28, os impactos microclimáticos decorrentes destas mudanças são, efetivamente, localizados. O ponto P4, ao receber sombra e, conseqüentemente, proteção à radiação solar incidente, registra

uma diminuição de  $T_a$  média de  $1,0^{\circ}\text{C}$ . Esse valor coincide com a diferença média de  $T_a$  entre o ponto P0 (Jardim de Villemin) e o ponto P1, conforme foi constatado durante a medição em campo (Tabela 21). A redução máxima de  $1,7^{\circ}\text{C}$ , às 19h00, também coincide com a diferença máxima de  $T_a$  entre o ponto P0 e o ponto P1 ocorrida às 17h00. A situação de estresse térmico nesse ponto, considerando o UTCI e o PET, passa de forte estresse ao calor para moderado estresse ao calor.

**Tabela 28 – Paris: cenário 1 e diferenças em relação ao cenário original**

Hora	P1 (FVC 0,82)		P2 (FVC 0,75)		P3 (FVC 0,60)		P4 (FVC 0,01)		P5 (FVC 0,93)	
	Ta ( $^{\circ}\text{C}$ )	Dif ( $^{\circ}\text{C}$ )	Ta ( $^{\circ}\text{C}$ )	Dif ( $^{\circ}\text{C}$ )	Ta ( $^{\circ}\text{C}$ )	Dif ( $^{\circ}\text{C}$ )	Ta ( $^{\circ}\text{C}$ )	Dif ( $^{\circ}\text{C}$ )	Ta ( $^{\circ}\text{C}$ )	Dif ( $^{\circ}\text{C}$ )
14h00	27,6	-0,2	27,3	-0,2	27,0	-0,5	26,0	-1,1	27,2	-0,2
15h00	28,4	-0,1	28,2	-0,1	28,0	-0,4	27,5	-0,6	28,4	-0,1
16h00	28,8	-0,1	28,7	-0,1	28,5	-0,4	27,9	-0,6	28,9	-0,1
17h00	28,9	0,0	28,8	-0,1	28,4	-0,4	27,7	-0,8	28,9	-0,1
18h00	x	x	28,7	-0,1	28,2	-0,5	27,2	-1,2	28,7	-0,1
19h00	x	x	28,3	-0,1	27,8	-0,6	26,4	-1,7	28,3	-0,3
<b>média</b>	<b>28,4</b>	<b>-0,1</b>	<b>28,3</b>	<b>-0,1</b>	<b>28,0</b>	<b>-0,5</b>	<b>27,1</b>	<b>-1,0</b>	<b>28,4</b>	<b>-0,2</b>
PET ( $^{\circ}\text{C}$ )	33,8	-0,1	40,1	-0,1	28,1	-7,8	25,9	-9,0	38,9	-0,2
categoria de estresse térmico ao calor	Forte		Muito forte		Moderado		Moderado		Muito forte	
UTCI ( $^{\circ}\text{C}$ )	33,0	0,0	35,5	0,0	28,6	-4,3	26,8	-5,7	34,9	0,0
categoria de estresse térmico ao calor	Forte		Forte		Moderado		Moderado		Forte	

**Fonte: Autoria própria (2014)**

O ponto P3, localizado ao lado de um agrupamento arbóreo do ZAC Pajol, registra uma redução média de  $T_a$  de  $0,5^{\circ}\text{C}$ . Os índices PET e UTCI passam de muito forte estresse ao calor e forte estresse ao calor, respectivamente, para moderado estresse ao calor. Em relação ao estresse térmico, os outros pontos permanecem na mesma categoria original.

O cenário 2, além da configuração do cenário 1, incorpora (de forma genérica e simplificada) as áreas verdes do projeto Grand Paris para aquela região. Nesse caso, as reduções mais significativas de  $T_a$  em relação ao cenário original ocorrem nos pontos P3 e P5, com um valor médio de  $1,7^{\circ}\text{C}$  (Tabela 29). O ponto P5 situado sob um agrupamento arbóreo apresenta valores próximos de  $T_a$  ao ponto P3, o qual passa a se situar em um “corredor verde”. Note-se que a adição de um

agrupamento arbóreo do P3 contribui para uma redução de 1,2°C comparativamente ao cenário 1 (Ta média de 28,0 °C no cenário 1 e de 26,8°C no cenário 2).

Em relação ao cenário original, nos pontos P3 e P5, a maior redução de Ta ocorre às 19h00, com uma diminuição da temperatura ambiente de mais de 2,4°C. Os pontos P3, P4 e P5, que no cenário original variavam entre forte estresse ao calor e muito forte estresse ao calor, passam a categoria de moderado estresse ao calor. A redução de Ta nos pontos P1 e P2 é de apenas 0,3°C, a qual é incapaz de proporcionar alterações nas categorias de estresse térmico.

**Tabela 29 – Cenário 2 e diferenças em relação original**

Hora	P1 (FVC 0,82)		P2 (FVC 0,75)		P3 (FVC 0,22)		P4 (FVC 0,01)		P5 (FVC 0,23)	
	Ta (°C)	Dif (°C)	Ta (°C)	Dif (°C)	Ta (°C)	Dif (°C)	Ta (°C)	Dif (°C)	Ta (°C)	Dif (°C)
14h00	27,3	-0,4	26,9	-0,5	25,7	-1,8	25,7	-1,3	25,7	-1,8
15h00	28,2	-0,3	28,0	-0,3	27,1	-1,3	27,3	-0,8	27,2	-1,3
16h00	28,6	-0,3	28,4	-0,3	27,7	-1,2	27,8	-0,7	27,8	-1,2
17h00	28,7	-0,2	28,6	-0,2	27,4	-1,4	27,6	-0,9	27,5	-1,5
18h00	x	x	28,5	-0,3	26,8	-1,9	27,1	-1,3	26,9	-2,0
19h00	x	x	28,0	-0,4	26,1	-2,4	26,3	-1,8	26,1	-2,5
<b>média</b>	<b>28,2</b>	<b>-0,3</b>	<b>28,1</b>	<b>-0,3</b>	<b>26,8</b>	<b>-1,7</b>	<b>27,1</b>	<b>-1,0</b>	<b>26,9</b>	<b>-1,7</b>
PET (°C)	33,6	-0,2	39,9	-0,4	27,0	-8,9	25,9	-9,0	25,3	-13,7
categoria de estresse térmico ao calor	Forte		Muito forte		Moderado		Moderado		Moderado	
UTCI (°C)	33,2	0,2	35,6	0,1	28,1	-4,9	27,1	-5,4	27,4	-7,5
categoria de estresse térmico ao calor	Forte		Forte		Moderado		Moderado		Moderado	

**Fonte: Autoria própria (2014)**

De forma a mensurar a redução de temperatura do ar geral da área modelada, foi desconsiderada a área superior à esquerda, na qual os edifícios encontram-se assentados sobre uma “plataforma”. A Ta média no cenário original foi de 28,4°C. Nos cenários 1 e 2 as reduções médias de temperatura do ar foram de 0,2°C e 0,6°C, respectivamente.

A Figura 41 corresponde ao cenário original, 1 e 2 às 19h00, horário no qual as reduções foram mais significativas. Nessas imagens a vegetação foi suprimida para uma melhor visualização do campo térmico. No cenário original, no ponto P4, percebe-se o efeito sutil da área gramada.

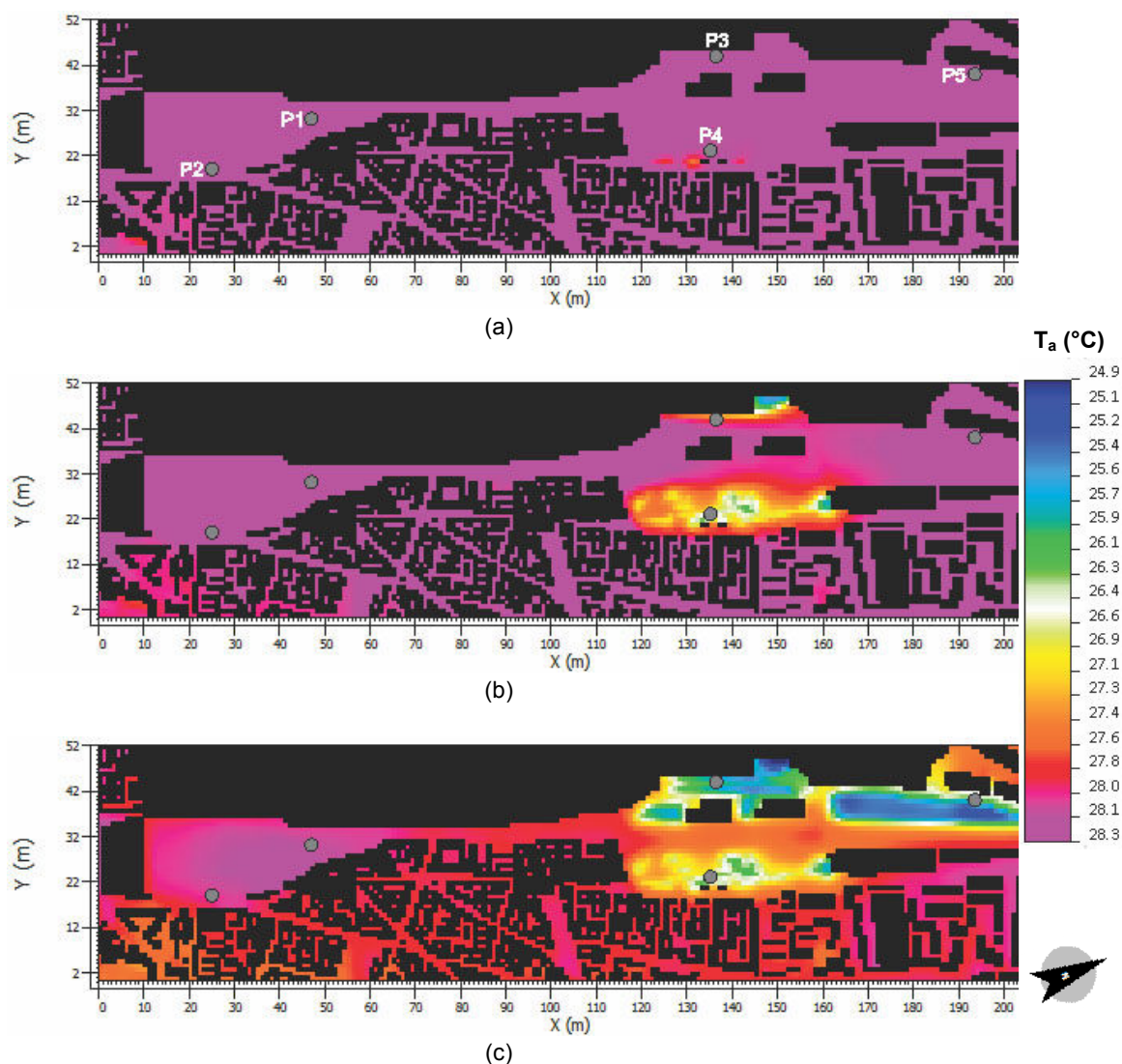


Figura 41 – Paris,  $T_a$  às 19h00: (a) cenário original, (b) cenário 1, (c) cenário 2

Fonte: Autoria própria (2014)

No cenário 1 houve um acréscimo de 3,3% de área arborizada para todo o perímetro modelado (com exceção da “plataforma” que foi desconsiderada), proporção suficiente para um efeito microclimático localizado das intervenções propostas.

No cenário 2, a inserção de 17,2% de área vegetada (9,8% de área arborizada e 7,5% de área gramada) para todo o perímetro modelado (com exceção da “plataforma” que foi desconsiderada) altera todo o campo térmico, com máxima redução de 1,1°C às 19h00.

#### 4.2.7 Paris: conclusão parcial

Frente aos problemas de planejamento urbano na maioria das cidades, ressalta-se a necessidade de debater sobre os problemas urbanos e principalmente a necessidade de investigar soluções. Nesse sentido, o conjunto de propostas denominado Grand Paris merece destaque. Em menor escala, o projeto ZAC Pajol tem o mérito de trazer o conceito de eco-bairro para uma área subutilizada, contribuindo para o aumento de consumo de energia renovável previsto no plano climático da cidade. O Jardins d' Eole acrescentou arborização a um espaço degradado, conferindo aos habitantes daquela região um espaço de lazer. Em comum, esses três projetos atingem o entorno das linhas férreas da Gare de l' Est, que por estar configurado como um espaço aberto e sem vegetação acaba gerando um campo térmico local com alto valor de temperatura do ar e de superfície.

Sabe-se que áreas verdes podem trazer benefícios diretos e indiretos às áreas urbanas (OKE, 1987; ERELL *et al.*, 2011). Nesta pesquisa, utilizando-se como estudos as intervenções na cidade de Paris acima citadas, foi possível a mensuração dos efeitos de áreas vegetadas no campo térmico do perímetro analisado. Embora os efeitos das intervenções consideradas tenham sido especialmente localizados, deve-se levar em conta que em períodos de ocorrência das ondas de calor, a diminuição média de  $0,6^{\circ}\text{C}$  na  $T_a$  no período da tarde ou de  $1,1^{\circ}\text{C}$  às 17h00, para um acréscimo de aproximadamente 17% de área vegetada no cenário 2, poderia auxiliar para a determinação de níveis mais aceitáveis de estresse térmico.

Foi detectado, também, que a arborização na rua contígua à estação ferroviária (ponto P2) não é capaz de manter níveis mais próximos aos de neutralidade térmica, sugerindo-se a complementação de áreas gramadas junto às calçadas ou ainda a utilização de árvores de copa densa além das árvores de copa estreitas já existentes. Salienta-se que o importante para os pedestres é que haja alternativas de áreas sombreadas ao longo do seu trajeto e que estas sejam de qualidade, fator relacionado à densidade da copa.

Na análise dos índices de conforto foi possível perceber que o índice PET possui uma tendência de classificar o ambiente térmico em uma categoria de estresse térmico acima do índice UTCI. No entanto, quando aplicadas as intervenções dos cenários 1 e 2, a classificação dos índices se equipaleou.

Masson *et al.* (2010) mensuraram, para a cidade de Paris, o efeito no ambiente térmico de diferentes estratégias considerando o contexto do Grand Paris. Foram utilizados diferentes modelos numéricos para simular as trocas de água e energia entre as superfícies e a atmosfera. A utilização de pintura branca e telhados verdes (*cool roofs*) nos subúrbios apontaram uma redução próxima de 1°C na Ta da cidade. Durante o período noturno, a estratégia que combinou reflorestamento e edificações com pintura com cores claras apresentou uma redução na Ta de 2 a 3°C nos subúrbios e de 1 a 2°C no centro histórico, mesmo que as intervenções tenham sido realizadas apenas nas áreas afastadas do centro. Os resultados encontrados em tal estudo podem estar relacionados à distribuição das intervenções ao longo da malha urbana. Em suma, a combinação de áreas verdes com diferentes estratégias pode ser uma medida eficiente para que os ambientes urbanos sejam mais adequados sob o ponto de vista térmico.

#### 4.3 SÃO PAULO E AS FRAÇÕES URBANAS DE BELÉM E JARDIM PAULISTA

O município de São Paulo (23°37' S, 46°39' W, 802 m de altitude) é cortado pelo Trópico de Capricórnio e está localizado em média a 45 km da costa, no Planalto Atlântico, estando sujeito à influência das condições oceânicas (TARIFA; AZEVEDO, 2001). Segundo classificação climática de Köppen-Geiger, o clima da cidade de São Paulo é subtropical úmido (Cwa), caracterizado por verões chuvosos e invernos secos.

A Região Metropolitana de São Paulo é considerada a quarta maior aglomeração urbana do mundo, com aproximadamente 20 milhões de habitantes (NAÇÕES UNIDAS, 2011). Segundo dados do IBGE, mais da metade desse contingente populacional está concentrado apenas na capital (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2010).

No tocante ao processo histórico da cidade, observam-se, de um lado, as pressões advindas do crescimento populacional e, de outro, as propostas urbanísticas que objetivam conduzir, estruturar ou controlar a expansão urbana (SOMEKH; CAMPOS, 2002).

O século XX foi marcado por grandes transformações sociais e econômicas que resultaram em modificações na forma de utilização do espaço

urbano. A partir de 1964, a verticalização da cidade, antes concentrada na área central, se expandiu para os bairros pericentrais (ANTONUCCI, 2006) e quase simultaneamente, ocorria um intenso processo de ocupação urbana em direção às periferias devido ao grande fluxo migratório. Em 1972, criou-se pela primeira vez uma Lei Geral de Zoneamento (7.805 – SÃO PAULO, 1972) para a cidade, abrangendo todas as suas regiões (FELDMAN, 2005). Segundo Macedo (1988), no centro urbano, o modelo arquitetônico advindo do movimento moderno foi reforçado a partir dos parâmetros construtivos, com a consolidação de edificações de grande altura implantadas em lotes com pouco recuo em relação aos lotes vizinhos; tipologia de ocupação vertical reproduzida em muitas cidades brasileiras.

O crescimento desordenado e uma política ambiental ausente levaram a uma drástica redução da vegetação em São Paulo. Observa-se que a área urbana continua a se expandir de maneira indevida, atingindo áreas de proteção a manancial e afetando a qualidade ambiental. Segundo consta em São Paulo (2004), entre 1991 a 2000, a cidade reduziu 5,3 ha de áreas verdes devido à ocupação urbana, sendo que 56% desse total estão concentrados em 10 distritos da periferia, onde existe um alto crescimento populacional.

Sabe-se que a presença de vegetação no meio urbano afeta o microclima local. No estudo dedicado a cidade de São Paulo, o objetivo é, pois, avaliar o impacto da inserção de vegetação em uma região com maior indicação de inadequação térmica e compará-la com uma região com menor grau de estresse térmico. Dessa forma, a escolha inicial das áreas de estudo foi baseada no mapa de temperatura aparente da superfície ( $T_s$ ), elaborado a partir de imagem de satélite Landsat (Figura 42).

As áreas consideradas críticas do ponto de vista térmico estão localizadas na antiga região industrial da cidade. Observa-se que a ausência de espaços verdes e arborização urbana aliada a uma ocupação homogênea podem ser citadas como causas desse comportamento (SÃO PAULO, 2002).

De acordo com dados de São Paulo (2002), a ocorrência de  $T_s$  mais amena encontra-se em bairros onde predominam uma ocupação residencial horizontal com arborização intralote e viária, e junto aos corpos d'água; podendo algumas zonas frias ser decorrentes da projeção das sombras dos edifícios nas áreas com padrão de ocupação vertical em conjunto com outras variáveis, como



uma melhor circulação do ar (ventos canalizados que contribuem para a dispersão do calor acumulado).

A fim de analisar duas regiões com campos térmicos distintos foram selecionadas frações urbanas no bairro Belém (Subprefeitura da Mooca, zona Leste), o qual se enquadra na primeira descrição, e no bairro Jardim Paulista (Subprefeitura de Pinheiros, zona Oeste), bairro com Ts mais favorável. Conforme observado na Figura 42, em setembro de 1999, às 9h57, enquanto no bairro Belém a Ts média situava-se entre 31,5 – 32°C; no Jardim Paulista a Ts média situava-se entre 27 – 27,5°C.

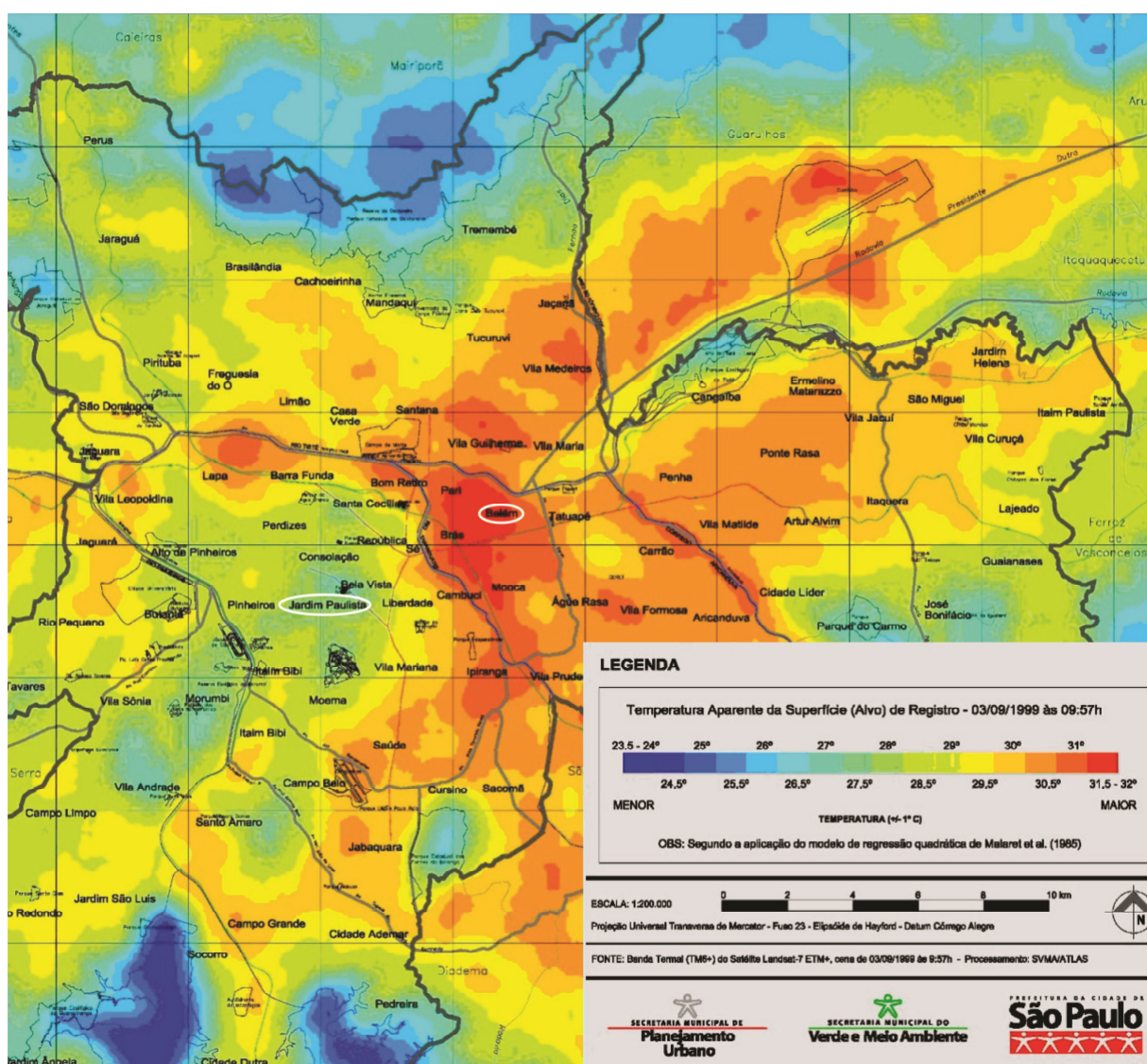


Figura 42 – Mapa da temperatura aparente da superfície, cena de 03/09/1999 às 9h57 (base satélite Landsat 7 ETM+)

Fonte: Adaptado de São Paulo (2002)

A Tabela 30 contém dados estatísticos das duas regiões.

**Tabela 30 – Dados dos bairros Jardim Paulista e Belém**

Bairro	Cobertura Vegetal (km <sup>2</sup> ) (2006)*	População (2000)**	População (2010)**	Densidade Demográfica (hab/km <sup>2</sup> )**	Área (km <sup>2</sup> )**	Área Construída (km <sup>2</sup> ) (2006)*
Jardim Paulista	0,91	83.844	88.692	14,54	6,1	12,9
Belém	0,42	39.712	45.057	7,51	6	4,0

Fonte: Adaptado de DIPRO (DEPARTAMENTO DE ESTATÍSTICA E PRODUÇÃO DE INFORMAÇÃO, 2010\*) e São Paulo (2013\*\*)

O Jardim Paulista possui um perfil tanto residencial como comercial e uma densidade demográfica de aproximadamente 14,5 hab/km<sup>2</sup>; enquanto o Belém abriga, principalmente, fábricas e residências, possuindo uma densidade demográfica de aproximadamente 7,5 hab/km<sup>2</sup> (SÃO PAULO, 2013). O Jardim Paulista está localizado em uma das regiões mais altas da cidade, com cotas variando entre 745 a 750 m acima do nível do mar. No Belém, as cotas variam entre 724 a 730 m (DEPARTAMENTO DE ESTATÍSTICA E PRODUÇÃO DE INFORMAÇÃO, 2010).

#### 4.3.1 São Paulo: pontos receptores

As frações urbanas monitoradas em São Paulo estão localizadas no Belém e no Jardim Paulista (Figura 43). Importantes vias margeiam ambas as frações selecionadas em cada região, no Belém (Figura 44), as Avenidas Celso Garcia e João Boemer; e, no Jardim Paulista (Figura 45), a Avenida Rebouças e a Rua Oscar Freire.

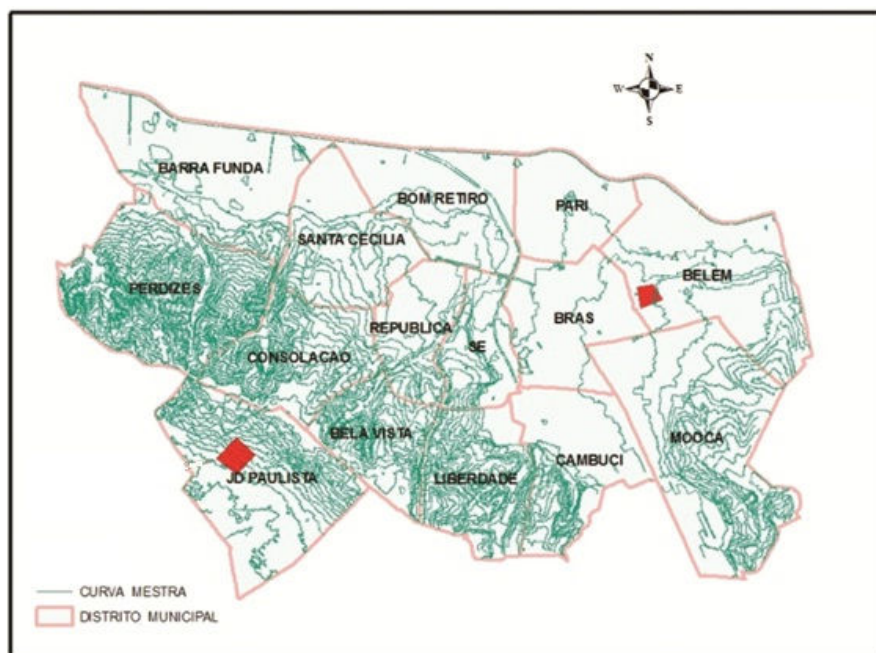


Figura 43 – São Paulo: mapa de localização das áreas de estudo

Fonte: Adaptado de Departamento de Estatística e Produção de Informação (2010)



Figura 44 – Fração urbana selecionada no Bairro Belém

Fonte: Autoria própria (2014)



**Figura 45 – Fração urbana selecionada no Bairro Jardim Paulista**

**Fonte: Autoria própria (2014)**

Os pontos de estudo nessas frações urbanas foram dispostos em locais com uma tipologia de edificação similar, composta de prédios de 2 pavimentos (Figura 46).



**Figura 46 – Frações de estudo: (1) Belém; (2) Jardim Paulista**

**Fonte: Minella, Honjo e Krüger (2012)**

#### 4.3.2 São Paulo: análise das variáveis climáticas monitoradas

As medições em São Paulo ocorreram em situação de verão, nos dias 22/02/2011 e 23/02/2011 em um período diurno específico. Sabe-se que céu claro

(sem nuvens) é a condição ideal de medição. No entanto, no mês de fevereiro de 2011 em São Paulo não foi possível obter dias com essa condição desejável. Apresentam-se nesta seção os dados coletados no dia 22/02, quando a condição de céu era mais satisfatória (variação entre céu claro e parcialmente encoberto) do que a do dia seguinte (céu parcialmente encoberto).

A principal característica que diferencia as frações urbanas do Belém e do Jardim Paulista selecionadas para o estudo é a presença de vegetação arbórea no Jardim Paulista, que forma uma obstrução (parcial) à radiação solar.

O Belém, no período das 10h00 até às 15h00 registrou uma Ta média 2,0°C mais alta e uma Ig média 668 W/m<sup>2</sup> mais alta do que no Jardim Paulista (Tabela 31).

**Tabela 31 – São Paulo: médias horárias das variáveis climáticas obtidas em campo no dia 22/02/2011**

Data/Hora	Jardim Paulista				Belém			
	Ta (°C)	UR (%)	v (m/s)	Ig (W/m <sup>2</sup> )	Ta (°C)	UR (%)	v (m/s)	Ig (W/m <sup>2</sup> )
22/02/2011								
10h00	26,7	62	0,9	114	27,3	61	1,7	760
11h00	27,8	57	0,7	59	30,1	53	1,4	776
12h00	29,0	55	0,7	61	32,0	47	1,1	953
13h00	30,0	52	0,7	90	32,3	47	1,4	766
14h00	30,8	48	0,7	99	32,9	44	1,2	727
15h00	30,9	48	0,6	78	32,6	44	1,4	649
<b>Média</b>	<b>29,2</b>	<b>54</b>	<b>0,7</b>	<b>84</b>	<b>31,2</b>	<b>49</b>	<b>1,4</b>	<b>772</b>
Diferença Belém-Jardim Paulista					2,0	-5	0,7	668

Fonte: Autoria própria (2014)

No Jardim Paulista a presença de vegetação contribui para uma UR em média 5% mais alta que no Belém. A velocidade do vento foi mais alta no Belém, como esperado, com média de 1,4 m/s no período analisado, enquanto no Jardim Paulista a v média foi de 0,7 m/s.

#### 4.3.3 São Paulo: modelagem (edição de área)

A fração urbana do Bairro Belém, selecionada para o estudo, consiste em seis quadras da Rua Firminiano Pinto e outras cinco quadras seccionadas, que completam um perímetro de aproximadamente 366 m no eixo x e de 390 m no eixo

y, totalizando 142.740 m<sup>2</sup>. O tamanho da célula de grade utilizado foi de 6 m nos eixos x e y e de 1 m no eixo z. Ainda na parte de modelagem, é requisitada a escolha do número de grades para a área de transição em torno do modelo ou área de aninhamento; no caso, foram escolhidas 5 grades, como também o tipo de solo dessa área (asfalto e concreto).

Para a geração do modelo vertical foi escolhido o método telescópico com fator de aumento de 20% a partir de 15 m de altura do solo.

Considerando a fração selecionada, a edificação mais alta possui 37 m de altura, sendo que a maior parte das edificações varia entre dois a cinco pavimentos (6 a 15 m de altura). Os parâmetros estabelecidos para a configuração do modelo podem ser conferidos na Figura 47.

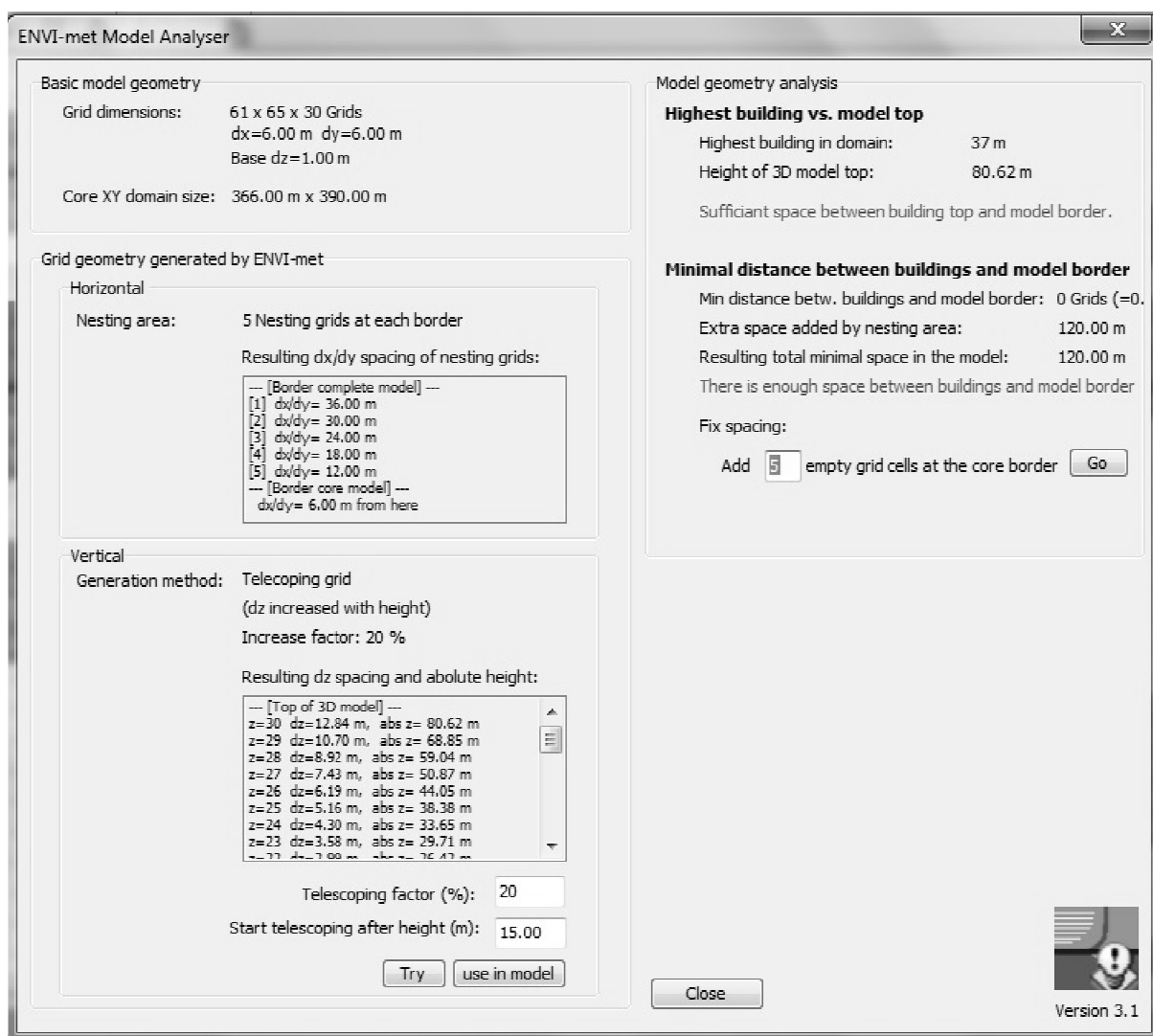


Figura 47 – Parâmetros utilizados na confecção do modelo do Belém

Fonte: Autoria própria (2014)

O modelo-base finalizado pode ser visualizado na Figura 48.



**Figura 48 – Modelo-base da fração urbana do bairro Belém**  
**Fonte: Autoria própria (2014)**

Entre a diversidade de vegetação disponível, foram escolhidos dois tipos de árvores para a região: árvores com copa densa de 10 m de altura sem folhagem na base (sigla T1, LAD para cada segmento: 0,000 0,000 2,180 2,180 2,180 2,180 2,180 2,180 1,720 0,000), na cor verde médio; e árvores com copa densa de 15 m de altura sem folhagem na base (sigla T2, LAD para cada segmento: 0,000 0,000 2,180 2,180 2,180 2,180 2,180 2,180 2,180 1,720 0,000), na cor verde escuro.

Para a representação da área de estudo foi utilizado um arquivo digital cedido pela Prefeitura Municipal de São Paulo com a planta das quadras contendo as implantações das edificações e suas respectivas alturas, combinado à imagem de satélite obtida no programa Google Earth.

O receptor B1 foi alocado na mesma quadra do ponto de coleta de dados. Para uma análise mais abrangente, também foram alocados o ponto B2 na quadra central, e o ponto B3, na quadra à esquerda. Ressalta-se que os pontos foram inseridos no centro da via e não nos passeios. Os tipos de solo utilizados na área modelada foram asfalto e concreto.

#### 4.3.4 São Paulo: ajustes do modelo ENVI-met

Para a simulação dos cenários hipotéticos foi selecionado o dia 22/02/2011. O modelo ENVI-met combina dados climáticos obtidos em várias alturas e, portanto, exige a utilização de diferentes fontes para a obtenção deles. O dado de umidade específica a 2.500 m de altura foi obtido no *site* referente a sondagens atmosféricas da Universidade de Wyoming. As demais variáveis climáticas requisitadas para a inicialização do processo de simulação foram obtidas a partir da estação meteorológica de referência (Mirante de Santana).

Já nos testes iniciais com o modelo da fração urbana do bairro Belém foi observada que a direção do vento de 68° (quadrante ENE, és-nordeste) tornava o tempo de simulação moroso. Após alguns testes realizados, foi percebida que a direção Norte (0°), permitia maior amplitude da curva simulada além da simulação transcorrer de forma mais dinâmica. Os dados de velocidade do vento (1,9 m/s) e umidade relativa do ar (68%) referem-se aos valores médios diários. A temperatura do ar registrada às 0h00 (293,5 graus Kelvin) mostrou-se ser um dado de entrada mais coerente do que a Ta média diária (297,6 graus Kelvin), já que a partir desse último valor a Ta predita era superestimada.

O comprimento de rugosidade ( $z_0$ ) das superfícies adotado foi de 0,1, típico para áreas abertas com obstáculos ocasionais (WIERINGA *et al.*, 2001). Em relação ao mecanismo de funcionamento da borda do modelo, para temperatura e umidade e para a energia cinética e taxa de dissipação (TKE), optou-se por aquela em que os dados do limite do modelo advêm do modelo unidimensional (*forced*).

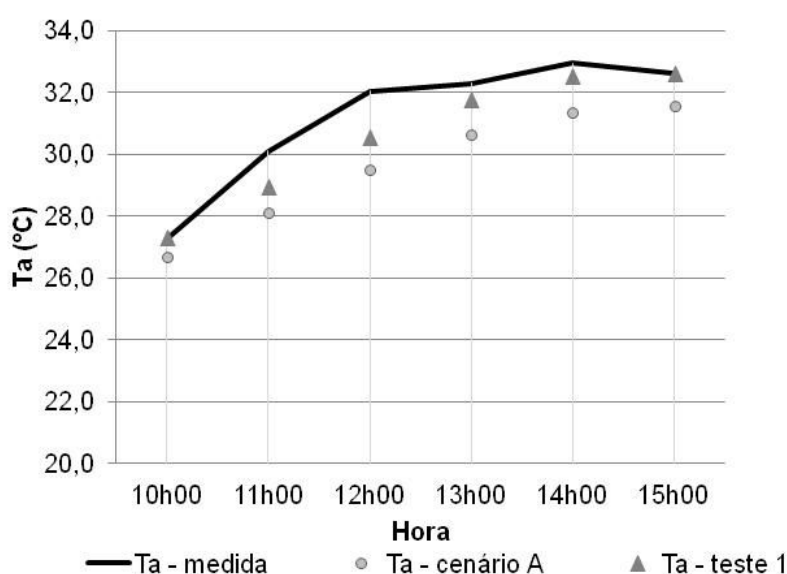
Nos pré-testes realizados, os valores referentes às propriedades das edificações mostraram ter menos influência nos dados de saída do que as variáveis acima citadas, sendo utilizados os valores originais do modelo. Foram realizadas diversas rodadas de testes visando um padrão de curva de Ta semelhante, e demais variáveis climáticas com valores médios próximos. A partir dos dados de configuração inicial da Tabela 32, chegou-se ao melhor padrão de curva de Ta, denominado de “teste 1” (Gráfico 4).



**Tabela 32 – Configuração inicial do modelo - Belém**

Área de estudo	Belém	Configuração
Data	22/02/2011	Dia medido
Início da simulação	00:00:00	Atmosfera neutra
Velocidade do vento (m/s)	1,9	Média diária
Direção do vento (graus)	0	Valor estipulado
Comprimento de rugosidade	0,1	Valor estipulado
Temperatura do ar (K)	293,5	Dado às 0h00
Umidade Especifica a 2500 m (g/kg)	7,29	Valor registrado às 0Z
Umidade Relativa do ar (%)	68	Média diária

Fonte: Autoria própria (2014)



**Gráfico 4 – Belém: Comparação entre a Ta medida e simulada para o dia 22/02/2011**

Fonte: Autoria própria (2014)

No “teste 1” foi utilizada fração de nuvens baixas correspondente a uma oitava e ajuste solar de 1,1. O tempo de iteração considerado foi de 33 horas. Embora o “teste 1” tenha apresentado maior semelhança estatística (Tabela 33), a Trm apresentou valores superestimados (Tabela 34), o que ocasionaria índices de conforto simulados muito diferentes dos verificados para a medição em campo.

Desta forma, para reduzir a entrada de radiação solar direta e “frear” o aumento de Trm, foi necessário aumentar a fração de nuvens baixas para duas oitavas (alterando o balanço de radiação) e diminuir o fator de ajuste solar para 0,9. O tempo de iteração foi de nove horas. Essa configuração final foi denominada de cenário A.

Para o cenário A, o teste t-Student mostrou diferença significativa entre os valores de temperatura do ar preditos e os valores medidos, pois a significância associada foi inferior a 0,05. Para esta configuração a estimativa de erro médio quadrático foi de 1,70, e o índice de concordância de Willmott foi de 0,84. Embora os resultados estatísticos tenham sido melhor para o “teste 1”, ainda assim foi priorizado o cenário A, pois a intenção é comparar não somente a Ta, mas os índices de conforto térmico entre o cenário atual e o hipotético, devendo haver certo equilíbrio entre as variáveis envolvidas no cálculo do PET e do UTCI.

**Tabela 33 – Resumo estatístico do modelo Belém, considerando a Ta medida e predita como referência**

Resumo Estatístico	Teste 1	Cenário A
erro médio (medida-predita)	0,59	1,58
desvio padrão da Ta medida	2,18	2,18
desvio padrão da Ta simulada	2,13	1,94
erro médio absoluto	0,60	1,58
RMSE	0,82	1,70
índice de concordância de Willmott	0,96	0,84
teste t-Student	0,07	0,00

**Fonte: Autoria própria (2014)**

Os valores médios medidos e preditos do ponto B1 (local de monitoramento) constam na Tabela 34, considerando as seguintes variáveis climáticas: Ig (W/m<sup>2</sup>), UR (%), v (m/s), Dir (°), Trm (°C), PET (°C) e UTCI (°C).

No cenário A (selecionado para o estudo), o PET médio para o período das 10h00 até às 15h00 ultrapassou em 0,2°C a categoria de muito forte estresse térmico, situação na qual está classificado o índice PET médio medido. Já no índice UTCI a média medida e a predita no cenário A encaixam-se na mesma categoria de forte estresse térmico.

No “teste 1” o PET predito ultrapassa em 6°C a categoria de muito forte estresse térmico, situação desejável. O UTCI predito estaria em muito forte estresse térmico, enquanto o requerido seria em forte estresse térmico ao calor.

Tabela 34 – Belém: valores médios medidos e preditos

Ponto	Média	Ta (°C)	Trm (°C)	Ig (W/m <sup>2</sup> )	UR (%)	v (m/s)	PET (°C)	UTCI (°C)
	medida	31,2	54,4	772	49	1,4	40,6	36,4
Belém	predita – cenário A (selecionado)	29,6	58,8	793	37	1,4	41,2	35,5
	predita – teste 1 (descartado)	30,6	68,9	1080	28	1,5	47,1	38,5

Fonte: Autoria própria (2014)

#### 4.3.5 São Paulo: cenários hipotéticos

Visando à melhoria do ambiente térmico, foi considerada a inserção de árvores de 15 m de altura com copa densa e sem folhas na base (sigla T2, LAD para cada segmento: 0,000 0,000 2,180 2,180 2,180 2,180 2,180 2,180 1,720 0,000) nos dois lados da rua, formando um corredor verde (Figura 49), sendo estabelecido o cenário hipotético (cenário B). Ressalta-se que a intenção é verificar o efeito positivo da inserção de vegetação, e não indicar uma espécie de árvore.



Figura 49 – Cenário B - Belém

Fonte: Autoria própria (2014)

A Tabela 35 contém um resumo das projeções horizontais (em m<sup>2</sup>) de interesse. No Belém o perímetro modelado possui 142.740 m<sup>2</sup>, enquanto a área de rua na qual são aplicadas as intervenções diretas possui 6.120 m<sup>2</sup>. A adição de superfície vegetada corresponde a uma área de 4.644 m<sup>2</sup>. A superfície construída ocupa 6.120 m<sup>2</sup> em projeção horizontal.

**Tabela 35 – Belém: projeção horizontal em m<sup>2</sup>**

<b>Belém (São Paulo)</b>	<b>projeção horizontal em m<sup>2</sup></b>
perímetro modelado	142740
superfície construída	88272
área de rua (intervenção direta)	6120
superfície vegetada	4644

**Fonte: Autoria própria (2014)**

#### 4.3.6 São Paulo: estratégias de melhoria do ambiente térmico

A estratégia de melhoria do ambiente térmico por meio do uso da arborização apresenta a vantagem do custo relativamente baixo e da possibilidade de ser aplicada na prática. Em comparação ao cenário original, sem modificação (Figura 48), nesta etapa é testado o cenário com arborização em ambos os lados da rua (Figura 49).

Na Tabela 36 observa-se que o ponto monitorado, B1, apresentou Ta média de 29,6°C, a mais alta entre os três pontos analisados. Este ponto registrou maior nível de estresse térmico para o índice PET, com extremo estresse ao calor.

Os pontos B2 e B3 apresentaram Ta média de 29,3 e 29,1°C, respectivamente. A categoria para o índice PET foi em muito forte estresse térmico ao calor. Já na avaliação do índice de conforto UTCI, os três pontos estariam em forte estresse térmico ao calor no cenário A.

Tabela 36 – Belém: cenário A

Hora	B1 (FVC 0,83) Ta (°C)	B2 (FVC 0,76) Ta (°C)	B3 (FVC 0,81) Ta (°C)
10h00	26,7	26,4	26,4
11h00	28,1	27,8	27,7
12h00	29,5	29,1	29,0
13h00	30,6	30,2	30,0
14h00	31,4	30,9	30,7
15h00	31,6	31,2	30,9
<b>média</b>	<b>29,6</b>	<b>29,3</b>	<b>29,1</b>
PET (°C)	41,2	40,8	40,7
categoria de estresse térmico ao calor	Extremo	Muito forte	Muito forte
UTCI (°C)	35,4	35,1	35,0
categoria de estresse térmico ao calor	Forte	Forte	Forte

Fonte: Autoria própria (2014)

A partir da introdução de árvores em ambos os lados da via (cenário B), as reduções médias de Ta foi de 1,3°C no ponto B1, de 1,1°C no ponto B2 e de 1,0°C no ponto B3 (Tabela 37). Observa-se que pelo fato dos pontos estarem localizados no centro da via, as menores reduções na Ta a partir do cenário B ocorrem às 12h00 e às 13h00 devido a uma redução pouco expressiva da Trm em decorrência da maior exposição dos pontos à radiação solar incidente. A máxima redução de Ta ocorre no ponto B1 às 15h00 com 1,8°C.

Tabela 37 – Belém: cenário B e diferenças em relação ao cenário A

Hora	B1 (FVC 0,30)		B2 (FVC 0,30)		B3 (FVC 0,30)	
	Ta (°C)	Dif (°C)	Ta (°C)	Dif (°C)	Ta (°C)	Dif (°C)
10h00	25,6	1,1	25,5	0,9	25,5	0,9
11h00	26,8	1,3	26,7	1,1	26,6	1,1
12h00	28,6	0,9	28,2	0,9	28,2	0,8
13h00	29,8	0,8	29,4	0,8	29,3	0,7
14h00	29,7	1,6	29,5	1,4	29,4	1,3
15h00	29,7	1,8	29,6	1,6	29,4	1,5
<b>média</b>	<b>28,4</b>	<b>1,3</b>	<b>28,1</b>	<b>1,1</b>	<b>28,1</b>	<b>1,0</b>
PET (°C)	33,3	7,9	32,4	8,4	32,7	8,0
categoria de estresse térmico ao calor	Forte		Forte		Forte	
UTCI (°C)	31,3	4,1	30,8	4,3	29,8	5,2
categoria de estresse térmico ao calor	Moderado		Moderado		Moderado	

Fonte: Autoria própria (2014)

A arborização da via possibilita que, na análise do índice de conforto PET, o ponto B1 passe de extremo estresse térmico para forte estresse térmico (redução de duas categorias de estresse térmico) e que os pontos B2 e B3 passem de muito forte para forte estresse térmico. Na categorização do índice UTCI, o cenário B viabiliza a transferência da categoria de forte para moderado estresse térmico ao calor.

No Bairro Belém, se considerar todo o perímetro modelado, a redução na Ta é pouco significativa, equivalente a 0,2°C (Tabela 38). Nessa situação o aumento de vegetação corresponde a 8,5%. O efeito localizado da inserção de vegetação é comprovado se considerada apenas a rua simulada. Proporcionalmente, o aumento de vegetação passa a corresponder a 75,9% e a Ta média para o período diurno analisado sofre uma redução média de 1,1°C.

**Tabela 38 – Comparação entre a Ta dos cenários A e B - Belém**

Hora	Ta (°C) - modelo completo			Ta (°C) - via		
	cenário A	cenário B	Dif.	cenário A	cenário B	Dif.
10h00	26,3	26,1	0,1	26,5	25,7	0,8
11h00	27,6	27,4	0,2	27,8	26,9	1,0
12h00	29,0	28,7	0,2	29,2	28,3	0,9
13h00	30,1	29,8	0,3	30,3	29,4	0,9
14h00	30,8	30,5	0,3	31,0	29,7	1,3
15h00	31,0	30,7	0,4	31,2	29,8	1,4
<b>Média</b>	<b>29,1</b>	<b>28,9</b>	<b>0,2</b>	<b>29,3</b>	<b>28,3</b>	<b>1,1</b>

Fonte: Autoria própria (2014)

A Figura 50 e a Figura 51 possibilitam a visualização da distribuição da Ta no perímetro modelado. As árvores não aparecem na imagem gráfica, para que seja possível uma melhor apreciação do campo térmico.

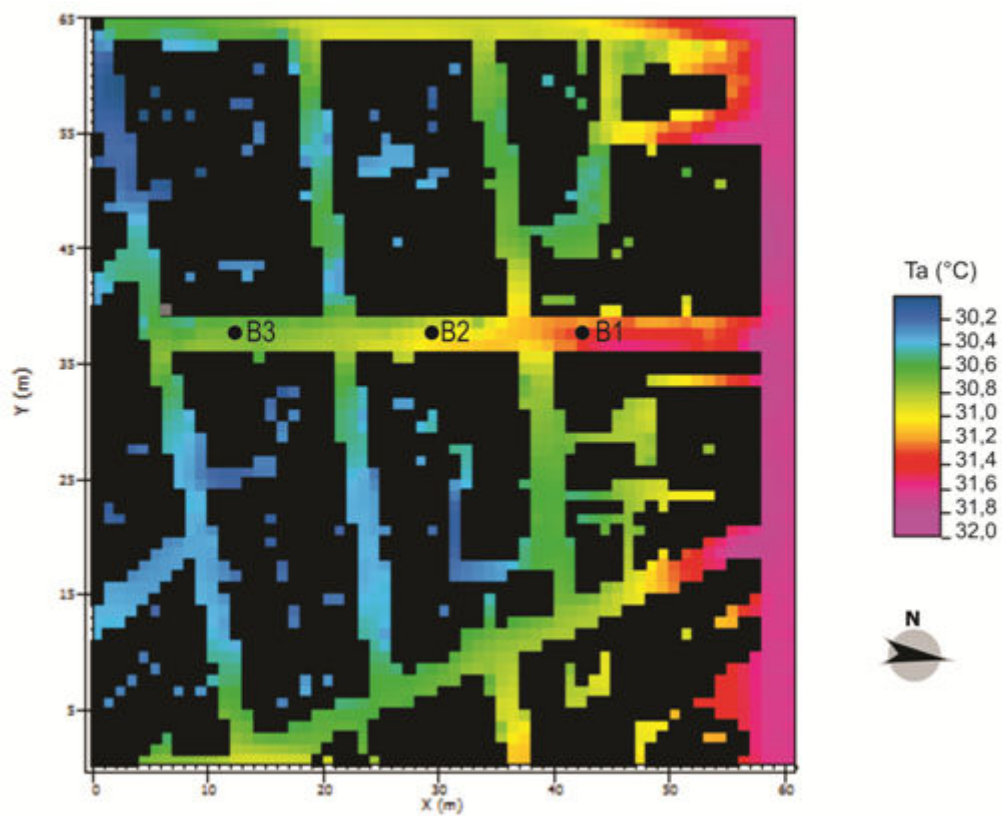


Figura 50 – Belém: cenário A, às 15h00

Fonte: Autoria própria (2014)

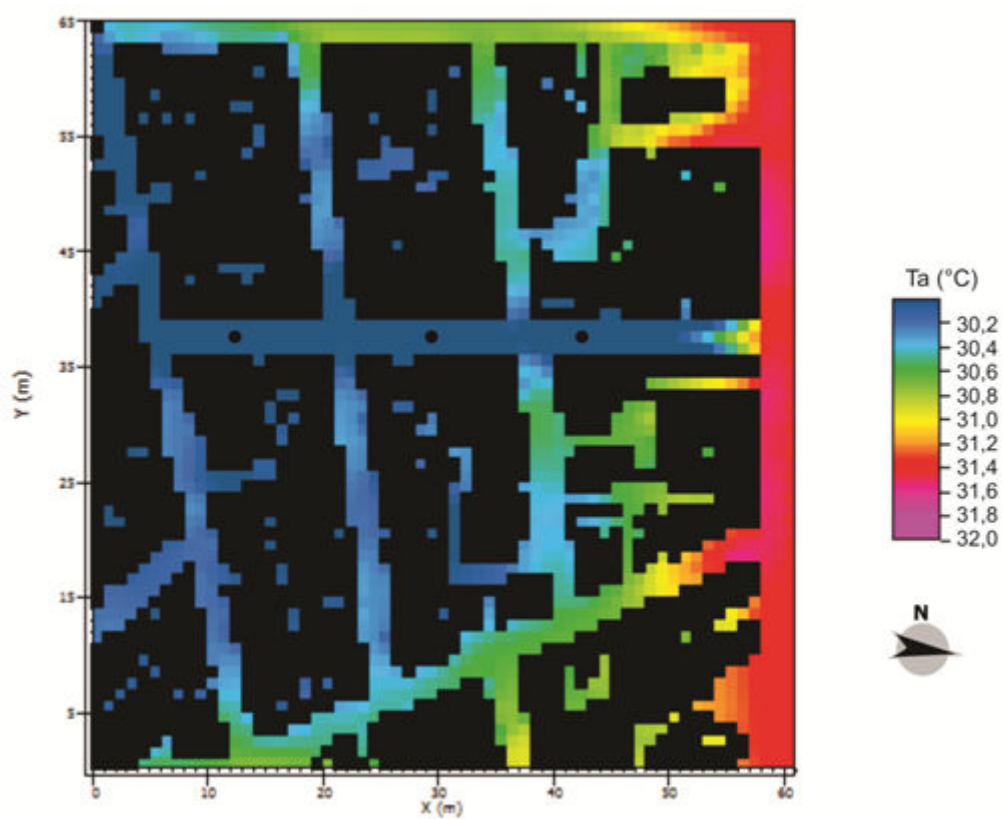


Figura 51 – Belém: cenário B, às 15h00

Fonte: Autoria própria (2014)

No cenário A, observa-se que o setor mais aquecido está ao norte, de forma que o ponto B1 apresenta Ta comparativamente mais alta que os outros dois pontos. Os valores de Ta na rua de estudo, às 15h00 nesse cenário, variaram entre 31,8°C (valor máximo) e 30,7°C (valor mínimo).

A inserção de vegetação no cenário B contribui para um resfriamento significativo na rua de estudo, mas as ruas adjacentes se beneficiam deste resfriamento, conforme observado na Figura 51. No cenário B, a Ta média na rua de estudo variou entre 31,6°C (valor máximo) e 29,1°C (valor mínimo). A redução média às 15h00 foi de 1,4°C, conforme visto na Tabela 38.

Na Tabela 39 constam as médias, considerando o período das 10h00 até às 15h00, dos índices de conforto térmico PET e UTCI simulados no ponto B1 no Belém e os valores médios calculados a partir das variáveis climáticas monitoradas no Jardim Paulista. Incluem-se, também, os valores de fator de visão do céu (FVC).

Os valores de FVC para o cenário A no Belém e no Jardim Paulista foram obtidos a partir de imagem tirada com lente olho de peixe (Figura 52) e calculados no modelo RayMan. Para o cenário B, o valor de FVC do ponto P1 foi obtido no modelo ENVI-met.

**Tabela 39 – Índices de conforto térmico PET e UTCI e FVC dos pontos no Belém e no Jardim Paulista**

22/02/2011	Belém – B1		Jd Paulista (dados medidos)
	cenário A (dados simulados)	cenário B (dados simulados)	
PET (°C) categoria de estresse térmico ao calor	40,6 Muito forte	33,3 Forte	29,1 Forte
UTCI (°C) categoria de estresse térmico ao calor	36,4 Forte	31,3 Moderado	30,0 Moderado
<b>FVC aproximado</b>	<b>0,8</b>	<b>0,3</b>	<b>0,2</b>

**Fonte: A autoria própria (2014)**





**Figura 52 – São Paulo: imagens olho de peixe dos pontos**

**Fonte: Aatoria própria (2014)**

A partir da inserção de arborização proposta no cenário B, que resulta em maior aproximação do valor de FVC do ponto monitorado no Jardim Paulista, observa-se que no ponto B1, levando em conta os índices PET e UTCI, seria possível chegar às mesmas categorias de estresse térmico que as registradas no Jardim Paulista, isto é, forte estresse térmico ao calor – considerando o índice PET, e moderado estresse térmico ao calor – considerando o índice UTCI.

#### 4.3.7 São Paulo: conclusão parcial

A análise dos resultados corroborou a premissa inicial de que a fração urbana do Belém apresentaria temperaturas mais altas que no Jardim Paulista devido às características urbanas dos bairros. Entre os fatores que influenciam para valores de temperatura do ar mais baixos no Jardim Paulista citam-se menor valor de fator de visão do céu e arborização significativa. Destaca-se este último fator, que além do aspecto psicológico atrelado a ambientes externos arborizados, torna a rua monitorada (Rua Oscar Freire) mais confortável termicamente, favorecendo seu uso por parte dos transeuntes no período diurno.

Na região do Belém, considerando o período monitorado, o ambiente térmico é prejudicado em decorrência de haver pouco sombreamento, acarretando valores altos de radiação solar incidente e de temperatura de superfície, e conseqüentemente, tornando o local propenso a situações de maior estresse térmico.

A estratégia de redução da temperatura ambiente por meio da arborização formando um corredor verde mostrou uma significativa melhora no ambiente térmico do ponto monitorado, com redução de até 1,8°C às 15h00. Para todo o trecho da rua, a redução média da Ta no período de análise foi de 1,1°C. Apesar das diferenças metodológicas, o mesmo valor (1,1°C) foi verificado na pesquisa realizada por Spangenberg *et al.* (2008) para a cidade de São Paulo. Em tal estudo, com base na medição microclimática realizada no centro da cidade, em um dia de verão, no período entre 7h00 e 19h00, foi realizado um estudo paramétrico (utilizando-se do modelo ENVI-met) com quatro quadras, sendo considerados dois cenários, nos quais foram utilizadas árvores com diferentes densidades, possibilitando, então, a análise da forma de atenuação da radiação solar nesses dois casos.

Na análise do impacto da vegetação para o trecho de rua em contraposição a todo o perímetro modelado, o efeito localizado da vegetação é evidenciado, mostrando que para regiões com tendências de aquecimento, como o bairro Belém, o ideal seria um plano de arborização de forma distribuída ao longo das vias urbanas, estendendo o benefício ao maior número de ruas possíveis.

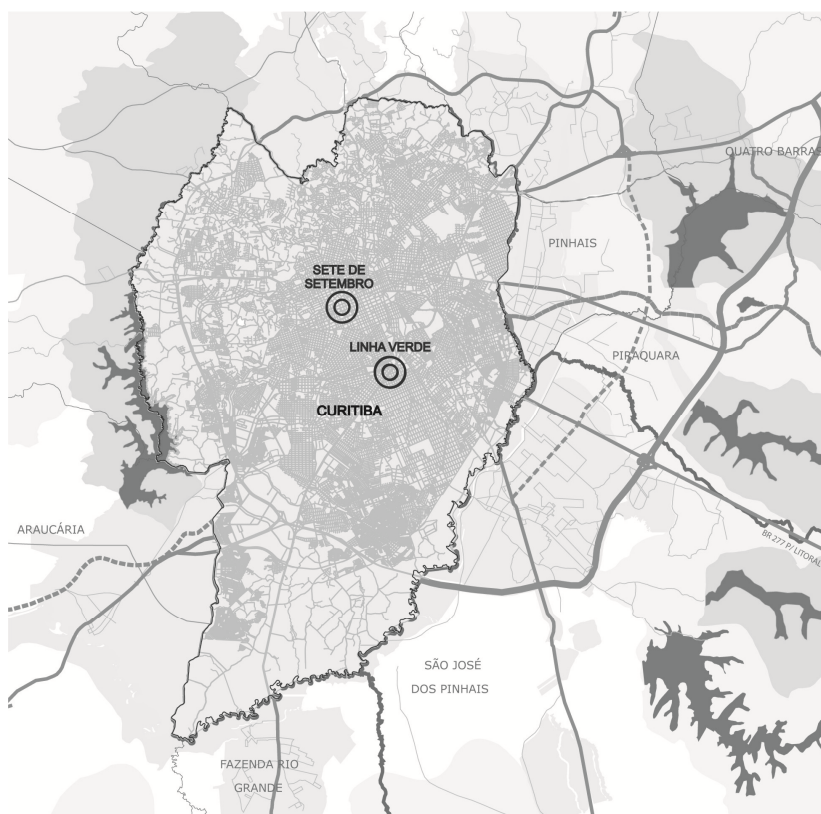
## 5 CURITIBA: APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Esta seção é dedicada a apresentação e análise dos resultados para Curitiba. Inicialmente, para as áreas de estudo na Sete de Setembro e na Linha Verde, apresentam-se uma descrição da localização dos pontos receptores e uma análise das variáveis climáticas monitoradas em campo. Posteriormente, para cada área de interesse são expostos os procedimentos referentes à modelagem (edição de área), os cenários hipotéticos e as análises das estratégias de melhoria do ambiente térmico adotadas. Ao final da seção, faz-se uma conclusão parcial.

Ressalta-se, novamente, a necessidade de entender os resultados como indicadores de tendências, considerando a limitação da reprodução da situação real em ambientes simulados.

### 5.1 CURITIBA: PONTOS RECEPTORES

Em Curitiba, foram considerados dois locais de medição (Figura 53), denominados de: Sete de Setembro e Linha Verde.



**Figura 53 – Localização dos pontos de medição em Curitiba**

**Fonte: Autoria própria (2014)**

Em ambos os locais, foram selecionados pontos representativos da morfologia urbana e ocupação do solo, isto é, locais consolidados e adensados.

O local de medição situado no Setor Estrutural da Avenida Sete de Setembro (Figura 54) é o mesmo da pesquisa de Rasia (2010), também reportado em Minella, Rasia e Krüger (2009).



**Figura 54 – Local de medição no Setor Estrutural Sete de Setembro (ponto SS1)**

**Fonte: Autoria própria (2014)**

O trecho que engloba a área de medição apresenta edificações construídas conforme tipologia do Plano Massa, apresentando afastamento lateral mínimo ou nenhum afastamento lateral. Possui azimute de  $67^\circ$  e deflexão de  $23^\circ$  em relação ao eixo Leste-Oeste. No sentido longitudinal, a área de estudo estende-se desde a Rua Silveira Peixoto até a Rua Desembargador Motta, e no sentido transversal, da Avenida do Batel à Avenida Iguaçu; englobando 26 quadras.

Na Linha Verde, os locais sujeitos à mudança da paisagem mais significativa a partir da mudança dos parâmetros de uso do solo são aqueles próximos às estações-tubo; uma vez que, além do plano de arborização urbana, são permitidas edificações de maior altura.

As cinco estações tubo ao longo da Linha Verde são: Estação Vila São Pedro; Estação Xaxim; Estação Santa Bernadethe; Estação Vila Fanny e Estação Marechal Floriano. Foi escolhido para a locação da estação meteorológica um ponto próximo a Estação Vila Fanny. Os motivos elencados para a escolha de tal ponto foram: área mais ou menos plana, grau de consolidação e segurança.

No recorte englobado nas simulações, mais precisamente na borda da Avenida, predominam edifícios de dois pavimentos de uso comercial; no restante, a

predominância é por edifícios térreos de uso habitacional. Ressalta-se ainda a existência de muitos terrenos vazios, característica ainda mais significativa em outros trechos ao longo da Linha Verde e entorno.

A estação meteorológica foi alocada na ciclovia do canteiro central da Linha Verde (Figura 55). A Linha Verde possui azimute de  $37^\circ$  e deflexão de  $53^\circ$  em relação ao eixo Leste-Oeste.



**Figura 55 – Local de medição na Avenida Linha Verde (ponto LV1)**

**Fonte: Autoria própria (2014)**

## 5.2 CURITIBA: ANÁLISE DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS MONITORADAS NA SETE DE SETEMBRO E NA LINHA VERDE

Para a seleção de um dia específico em cada ponto a ser utilizado na etapa de ajuste de dados medidos e preditos, foi utilizado o critério do dia com a condição do céu mais próxima do ideal (céu claro), sendo selecionado o dia 10/03/2012 na Sete de Setembro e o dia 07/03/2012 na Linha Verde.

Durante o verão, o ponto na Sete de Setembro (Tabela 40) fica exposto à radiação solar direta até às 11h00, momento a partir do qual está sujeito ao sombreamento provocado pelo ambiente construído do entorno. A I<sub>g</sub> média na Sete de Setembro foi de 410 W/m<sup>2</sup>. Nesse local, a T<sub>a</sub> média foi de 26,5°C, a T<sub>a</sub> mínima foi de 22,9°C no início da medição e a T<sub>a</sub> máxima foi de 28,8°C no término da mesma. Na Sete de Setembro, a velocidade do vento se manteve mais ou menos constante, com v média de 1,1 m/s. A direção do vento variou entre os quadrantes SE (sudestes) e SO (sudoeste).

**Tabela 40 – Dados medidos no dia 10/03/2012 na Sete de Setembro**

10/03/2012	Sete de Setembro				
Hora	Ta (°C)	UR (%)	v (m/s)	Ig (W/m <sup>2</sup> )	Trm (°C)
10h00	22,9	59	1,0	615	44,3
11h00	25,0	51	1,0	832	52,6
12h00	26,5	47	1,1	720	53,2
13h00	27,2	45	1,3	78	32,7
14h00	28,4	42	1,2	99	33,9
15h00	28,8	41	1,0	119	34,1
<b>Média</b>	<b>26,5</b>	<b>48</b>	<b>1,1</b>	<b>410</b>	<b>41,8</b>

Fonte: Autoria própria (2014)

O ponto de medição na Linha Verde (Tabela 41) fica exposto à radiação solar direta durante todo o período de medição, totalizando uma Ig média de 855 W/m<sup>2</sup>. Nesse local, a Ta média foi de 28,0°C. A Ta mínima foi de 24,0°C no início da medição, elevando-se para 31,4°C no término da mesma. A velocidade média do vento foi de 2,1m/s. A direção do vento permaneceu no quadrante SSO (sudeste).

**Tabela 41 – Dados medidos no dia 07/03/2012 na Linha Verde**

07/03/2012	Linha Verde				
Hora	Ta (°C)	UR (%)	v (m/s)	Ig (W/m <sup>2</sup> )	Trm (°C)
10h00	24,0	61	2,3	524	50,9
11h00	26,1	52	2,6	860	57,0
12h00	27,5	47	2,4	969	57,2
13h00	28,7	41	2,2	1004	58,1
14h00	30,4	31	1,8	949	59,4
15h00	31,4	26	1,4	822	58,4
<b>Média</b>	<b>28,0</b>	<b>43</b>	<b>2,1</b>	<b>855</b>	<b>56,8</b>

Fonte: Autoria própria (2014)

### 5.3 CURITIBA: MODELAGEM (EDIÇÃO DE ÁREA)

#### 5.3.1 Sete de Setembro

O modelo do cenário atual utilizado na Sete de Setembro foi confeccionado por Rasia (2010) para um estudo relacionado à qualidade do ar daquela região. No entanto, algumas modificações se fizeram necessárias, como o tamanho da grade z e a geração do método vertical aplicado.

Na presente pesquisa, foram mantidos os tamanhos das grades x e y (6m), mas considerou-se 3 m para a altura da grade z (Figura 56).

O fator telescópico de 20% foi aplicado a partir de 57 m de altura do solo. O número de grades na área de aninhamento utilizada foi de 5, sendo utilizado asfalto nesse setor.

A edificação mais alta do domínio apresenta 72 m.

Para as galerias advindas do Plano Massa foram mantidas grades com 3 m de altura e sobrelojas com 6m de altura

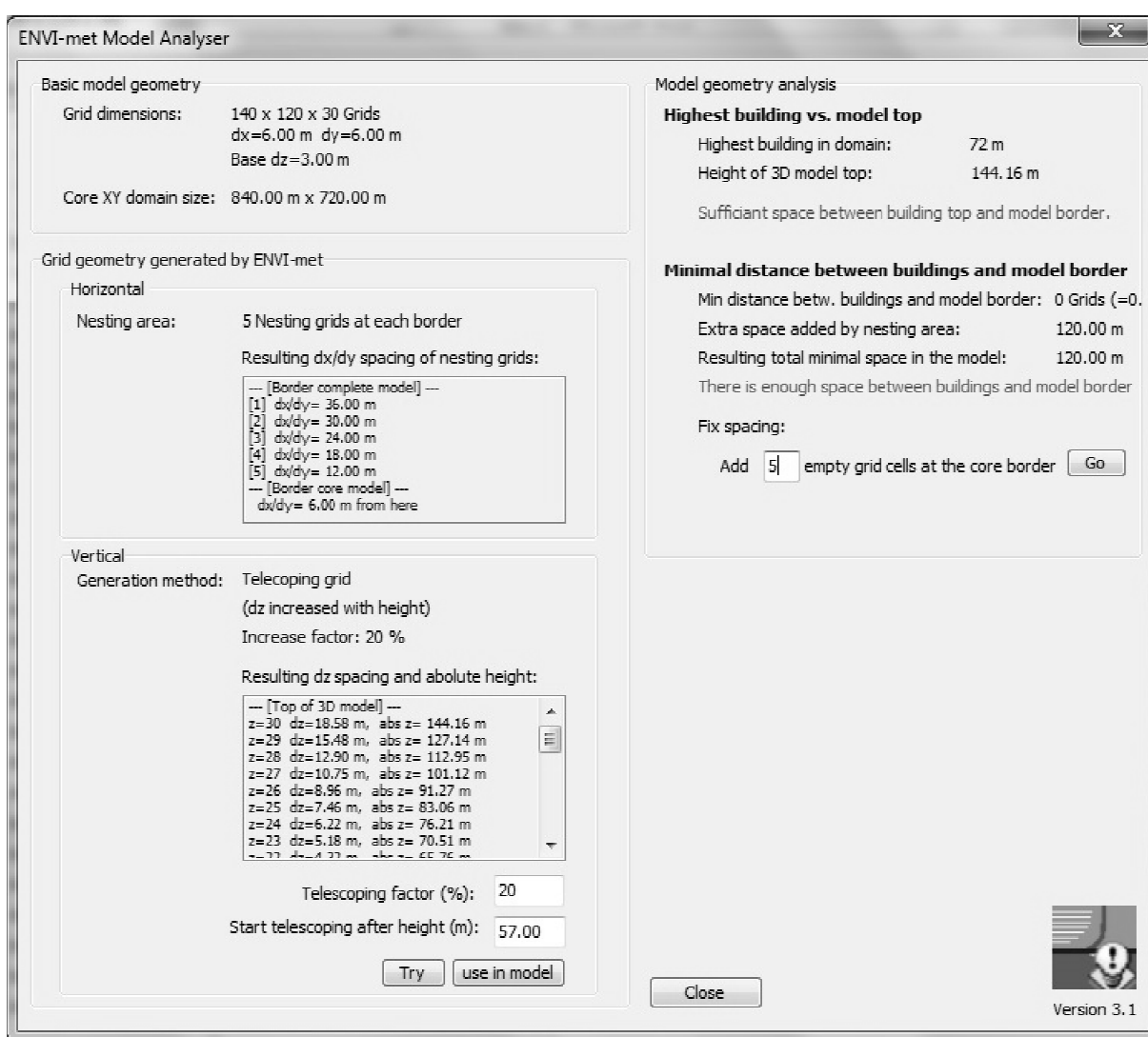
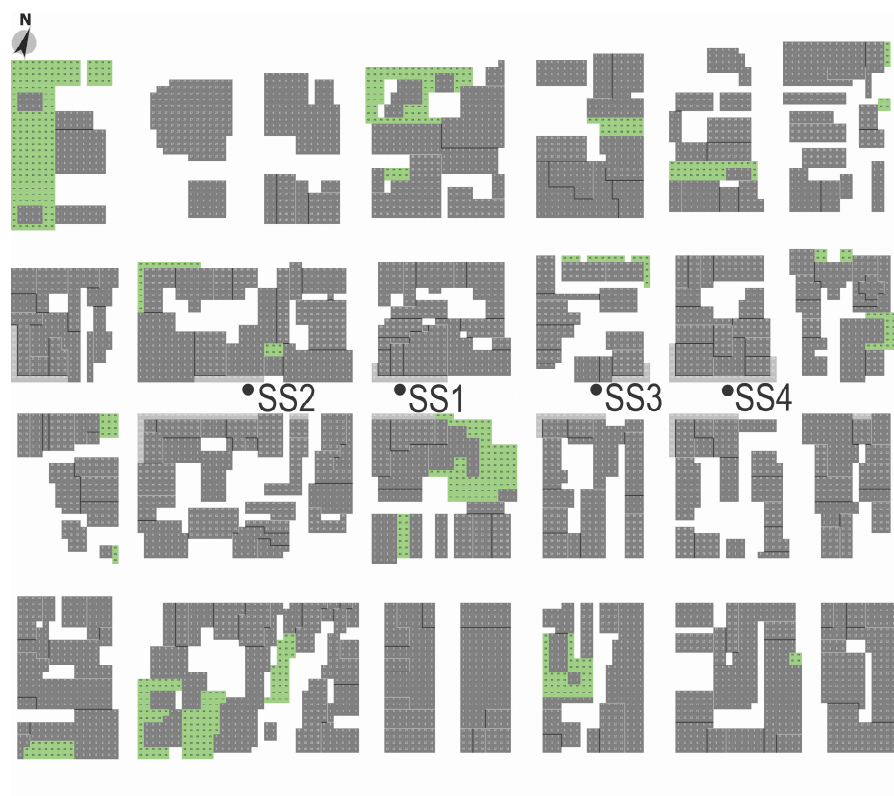


Figura 56 – Parâmetros utilizados na confecção do modelo da Sete de Setembro

Fonte: Autoria própria (2014)

O perímetro modelado corresponde a um domínio de 840 m x 720 m, totalizando uma área de 604.800 m<sup>2</sup>.

O modelo finalizado pode ser visualizado na Figura 57. O ponto SS1 corresponde ao ponto de monitoramento. Para uma análise mais ampla foram adicionados os pontos SS2, SS3 e SS4. Nas imagens, a cor cinza corresponde aos edifícios e a cor verde claro à superfície gramada (sigla xx, LAD para cada segmento: 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300).



**Figura 57 – Sete de Setembro: modelo finalizado no ENVI-met**

**Fonte: Autoria própria (2014)**

### 5.3.2 Linha Verde

Para a modelagem do cenário atual da Linha Verde foi utilizada planta cadastral cedida pela prefeitura de Curitiba projetada sobre imagem de satélite (GOOGLE EARTH, 2012). A altura das edificações foi realizada de maneira visual durante levantamento *in loco*, sendo estipulada uma altura de 3 m para cada pavimento e contado o número de pavimentos de cada edificação.

O recorte selecionado para o estudo compreende um perímetro de 576 m, tanto no eixo x, como no eixo y, perfazendo 331.776,0 m<sup>2</sup>. O tamanho (em m) de cada célula de grade utilizada foi de 6 x 6 x 3 m, nos eixos x, y e z, respectivamente.



O método selecionado para a geração das grades verticais foi o fator telescópico, com aumento de 20% a partir de 57 m de altura do solo. A edificação mais alta no domínio possui 10 m de altura (Figura 58). Para a área de aninhamento, 5 grades de célula se mostraram suficientes. Para simplificação do modelo, o tipo de solo escolhido foi asfalto, tanto para a área do modelo como para as bordas do modelo.

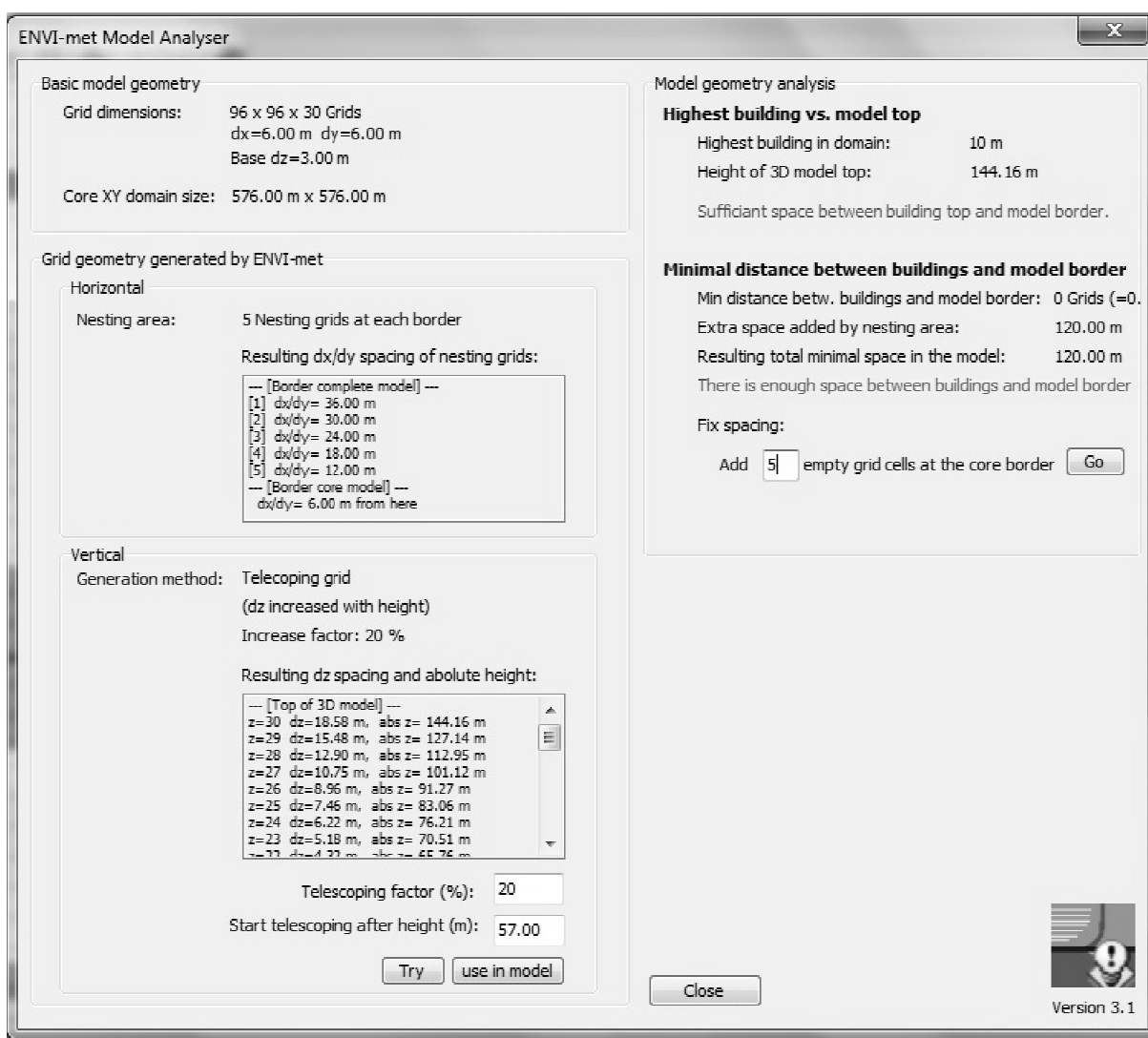


Figura 58 – Parâmetros utilizados na confecção do modelo da Linha Verde

Fonte: Autoria própria (2014)

Na Figura 59, note que o ponto LV1 corresponde ao local de medição das variáveis climáticas. O ponto LV2 foi acrescentado por ter uma configuração urbana distinta, mais próximo à estação tubo (elemento urbano que não foi possível incluir no modelo) e com árvores plantadas de forma linear e menos expressiva se comparada aos canteiros verdes. O ponto LV3 foi incluído por estar em um local no

qual as edificações próximas possuem menor recuo frontal quando comparada à situação do ponto LV1. Nessa Figura 59, a cor cinza corresponde às áreas construídas. Para as áreas vegetadas foram selecionadas árvores (em verde escuro) de 15 m de altura, sem folhas na base (sigla T2, LAD para cada segmento: 0,000 0,000 2,180 2,180 2,180 2,180 2,180 2,180 1,720 0,000), e superfícies gramadas (sigla xx, LAD para cada segmento: 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300), em verde claro.



**Figura 59 – Linha Verde: modelo finalizado no ENVI-met**  
**Fonte: Autoria própria (2014)**

#### 5.4 CURITIBA: AJUSTES DO MODELO ENVI-MET

Os estudos em Curitiba envolvem duas localidades distintas e medições em campo também em dias diferentes. Inicialmente, os primeiros testes com os modelos da Sete de Setembro e da Linha Verde foram realizados a partir dos valores médios diários de velocidade e direção do vento, como também, de

temperatura e de umidade relativa do ar. Em relação à umidade específica do ar a 2.500 m de altura, faz-se a ressalva de que no *site* de sondagens atmosféricas da Universidade de Wyoming, não constam dados relativos aos meses de janeiro até maio de 2012 para a cidade de Curitiba. Para contornar essa situação, foram considerados os dados correspondentes a 0Z do mês de março dos anos de 2011 e 2013, calculada uma média aritmética para o mês de março de cada ano e depois uma média final (Tabela 42).

**Tabela 42 – Dados de umidade específica para Curitiba nos meses de março de 2011 e 2013**

Data	Altura	Umidade Específica (g/kg)	Data	Altura	Umidade Específica (g/kg)
01/03/2011	2798	10,31	01/03/2013	2500	6,66
02/03/2011	2495	8,43	02/03/2013	2445	6,82
03/03/2011	2611	8,96	03/03/2013	2546	7,92
04/03/2011	2535	6,52	04/03/2013	2574	1,39
05/03/2011	2702	8,89	05/03/2013	2617	8,79
06/03/2011	2790	8,27	06/03/2013	2809	8,56
07/03/2011	2041	10,76	07/03/2013	2483	11,98
08/03/2011	2548	8,12	08/03/2013	2437	7,34
09/03/2011		sem registro	09/03/2013	2550	10,44
10/03/2011	2884	9,21	10/03/2013	2186	9,75
11/03/2011	2501	11,16	11/03/2013		sem registro
12/03/2011	2323	10,1	12/03/2013	2575	9,31
13/03/2011	2401	10,32	13/03/2013	2684	10,48
14/03/2011		sem registro	14/03/2013	2754	10,4
15/03/2011	2564	9	15/03/2013	2658	9,71
16/03/2011	2408	0,69	16/03/2013	2861	9,15
17/03/2011			17/03/2013	2461	11,16
18/03/2011	2602	10,92	18/03/2013	2756	8,55
19/03/2011	2494	10,7	19/03/2013	2565	8,25
20/03/2011		sem registro	20/03/2013	2497	8,91
21/03/2011		sem registro	21/03/2013	2288	10,12
22/03/2011	2385	8,3	22/03/2013	2532	7,91
23/03/2011	2502	10,76	23/03/2013	2512	9,03
24/03/2011	2000	11,83	24/03/2013	2137	9,57
25/03/2011			25/03/2013	2729	9,06
26/03/2011	3168	8,21	26/03/2013	2508	9,25
27/03/2011	2214	14,05	27/03/2013	2560	4,29
28/03/2011	2608	11,15	28/03/2013	2549	2,39
29/03/2011	2523	10,45	29/03/2013	2576	7,92
30/03/2011	2523	10,45	30/03/2013	2227	7,68
31/03/2011	2678	9,08	31/03/2013	2313	7,58
Média de cada ano	2532	9,47		2530	8,35
<b>Média entre os anos</b>	<b>8,91 (arredondado para 9 g/kg)</b>				

Fonte: Autoria própria (2014)

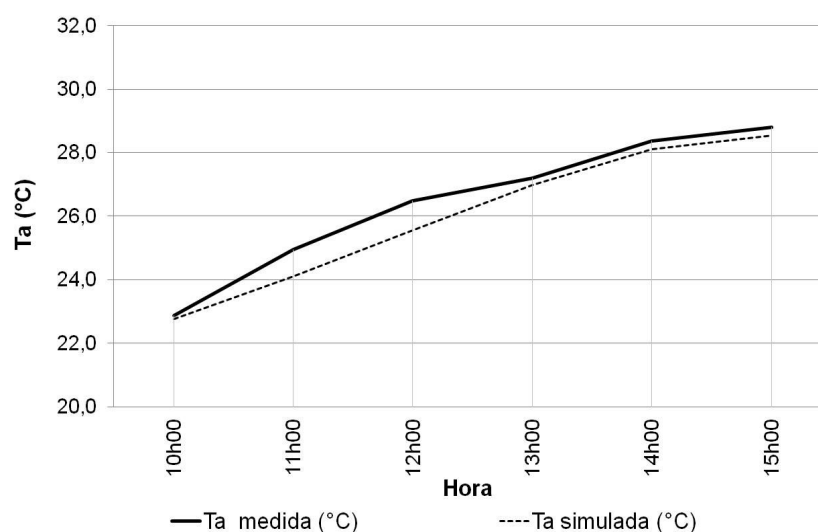
Nos testes iniciais, tanto na Sete de Setembro como na Linha Verde, os dados preditos apontaram valores de temperatura do ar no período analisado acima daqueles medidos; sendo necessário um valor de entrada de temperatura do ar mais baixo do que os valores médios diários. Optou-se, então, por utilizar o dado horário de temperatura do ar às 0h00; para as outras variáveis climáticas ficaram mantidas as médias diárias (Tabela 43).

**Tabela 43 – Configuração do modelo da Linha Verde e Sete de Setembro – dia medido**

Área de estudo	Sete de Setembro	Linha Verde	Configuração
Data	10/03/2012	07/03/2012	Dia medido
Início da simulação	00:00:00	00:00:00	Atmosfera neutra
Velocidade do vento (m/s)	1,7	2,2	Média diária
Direção do vento (graus)	110	68	Média diária
Comprimento de rugosidade	0,1	0,1	Valor estipulado
Temperatura do ar (K)	291	291,7	Dado às 0h00
Umidade Específica a 2500 m (g/kg)	9	9	Valor calculado
Umidade Relativa do ar (%)	64	64	Média diária

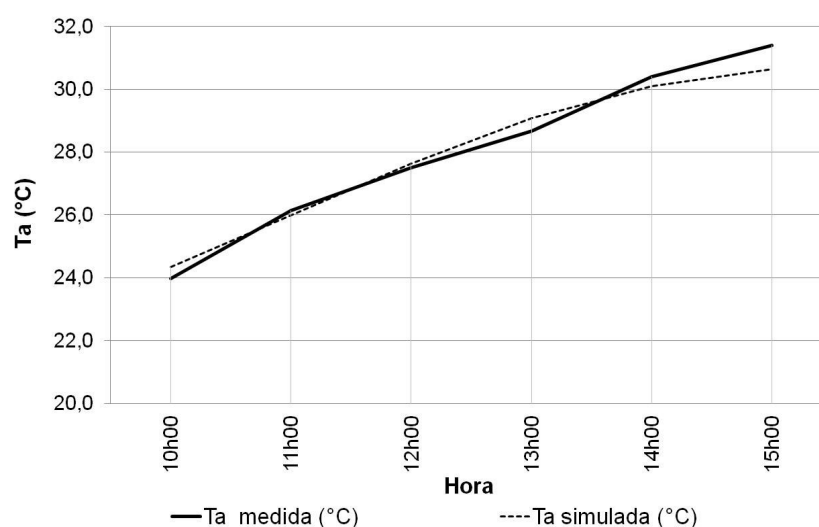
**Fonte: Autoria própria (2014)**

O fator de ajuste de onda curta utilizado foi de 1,2. Foi considerado céu claro, sem nuvens. Para as condições laterais do modelo utilizou-se a opção *forced*. Foram descartadas as 23 primeiras horas de simulação (ou 33 horas se considerado apenas o recorte analisado – período das 10h00 até às 15h00). Os resultados entre a Ta medida e predita para o período de análise podem ser observados no Gráfico 5 e no Gráfico 6.



**Gráfico 5 – Sete de Setembro: Comparação entre a Ta medida e simulada para o dia 10/03/2011**

**Fonte: Autoria própria (2014)**



**Gráfico 6 – Linha Verde: Comparação entre a Ta medida e simulada para o dia 07/03/2011**

**Fonte: Autoria própria (2014)**

Conforme resumo estatístico apresentado na Tabela 44, na Sete de Setembro, a estimativa de erro médio quadrático foi de 0,55, e o índice de concordância de Willmott foi de 0,98. No entanto, o teste t mostrou que há diferença significativa (valor  $p < 0,05$ ) entre os valores de temperatura do ar preditos e os valores medidos para aquela localidade. É provável que este fato decorra das diferenças de Ta medida e predita no horário das 11h00 e 12h00.

**Tabela 44 – Resumo estatístico do modelo da Linha Verde e Sete de Setembro, considerando a Ta medida e predita como referência**

Resumo Estatístico	Sete de Setembro	Linha Verde
erro médio (medida-predita)	0,44	0,05
desvio padrão da Ta medida	2,23	2,74
desvio padrão da Ta simulada	2,29	2,46
erro médio absoluto	0,44	0,35
RMSE	0,55	0,40
índice de concordância de Willmott	0,98	0,99
teste t-Student	0,03	0,78

**Fonte: Autoria própria (2014)**

Na Linha Verde, a estimativa de erro médio quadrático foi de 0,40, e o índice de concordância de Willmott foi de 0,99; valores considerados satisfatórios. O

teste t mostra que não há diferença significativa entre os valores de temperatura do ar preditos e os valores medidos para um intervalo de 95% de confiança.

Especificamente na Sete de Setembro ressalta-se que, principalmente nas duas primeiras horas de medição (10h00 e 11h00) a  $T_{rm}$  predita apresentou valores demasiadamente altos se comparados aos valores medidos (Tabela 45); fator que refletiria diretamente na determinação das diferenças entre os índices de conforto medidos e simulados. Desta forma, optou-se por considerar nos cenários simulados da Sete de Setembro apenas o recorte horário das 12h00 até às 15h00.

**Tabela 45 – Comparação horária entre os valores de  $T_{rm}$  medida e predita na Sete de Setembro**

Data	Hora	$T_{rm}$ medida (°C)	$T_{rm}$ predita (°C)	$T_{rm}$ predita - medida (°C)
10/03/2011	10h00	44,3	76,8	32,4
10/03/2011	11h00	52,6	75,6	23,0
10/03/2011	12h00	53,2	36,3	-16,8
10/03/2011	13h00	32,7	35,3	2,6
10/03/2011	14h00	33,9	35,2	1,3
10/03/2011	15h00	34,1	34,5	0,4

Fonte: Autoria própria (2014)

Na Tabela 46 constam os valores médios medidos e preditos dos pontos monitorados na Sete de Setembro (período das 12h00 até às 15h00) e na Linha Verde (período das 10h00 até às 15h00), considerando as seguintes variáveis climáticas:  $T_a$  (°C),  $T_{rm}$  (°C),  $I_g$  (W/m<sup>2</sup>), UR (%),  $v$  (m/s), PET (°C) e UTCI (°C).

**Tabela 46 – Valores médios medidos e preditos: Sete de Setembro e Linha Verde**

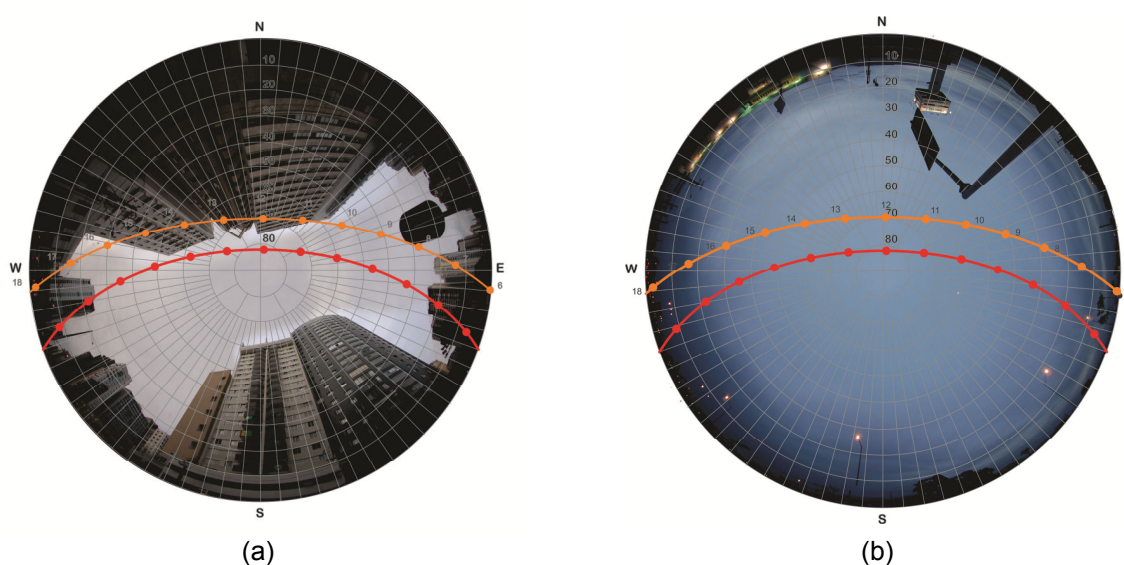
Ponto	Média	$T_a$ (°C)	$T_{rm}$ (°C)	$I_g$ (W/m <sup>2</sup> )	UR (%)	$v$ (m/s)	PET (°C)	UTCI (°C)
Sete de Setembro	medida	26,5	41,8	410	48	1,1	30,2	29,3
	predita	26,0	49,0	436	44	0,7	29,3	28,7
Linha Verde	medida	28,0	56,8	855	43	2,1	36,7	32,2
	predita	28,0	58,0	996	45	1,7	38,4	33,3

Fonte: Autoria própria (2014)

Na Sete de Setembro, a condição de conforto no período analisado tanto na situação medida como na predita foi em forte estresse térmico ao calor na escala PET e em moderado estresse térmico ao calor na escala UTCI.

Na Linha Verde, as situações medidas e previstas coincidiram na categoria de muito forte estresse térmico para o índice PET e na categoria de forte estresse térmico para o índice UTCI.

A Figura 60 corresponde à carta solar sobreposta a foto olho de peixe para a Sete de Setembro e para a Linha Verde. O traçado na cor laranja corresponde aos dias em que os pontos foram monitorados (dia 10/03/2012 na Sete de Setembro e dia 07/03/2012 na Linha Verde).



**Figura 60 – Foto olho de peixe e traçado solar para: (a) Sete de Setembro e (b) Linha Verde**  
**Fonte: Autoria própria (2014)**

Conforme pode ser observado, durante o período das 11h00 até às 18h00 do dia 10/03/2012, o ponto na Sete de Setembro estava sujeito ao sombreamento das edificações do entorno. Já em um dia típico de projeto (data 28/01) haveria menos sombreamento no cânion urbano da Sete de Setembro (ver traçado na cor vermelha na Figura 60), propiciando uma melhor avaliação das condições de conforto térmico local. Desta forma, especialmente para a cidade de Curitiba, optou-se em concentrar as simulações dos cenários futuros não para um dia específico, mas para um dia típico de projeto.

As características de um dia típico de projeto servem como referência para o desenvolvimento de projetos que respondam as exigências termo-

higrométricas, proporcionando uma melhor resposta quanto ao conforto térmico, seja no verão ou no inverno.

O dia típico lida com um dia teórico, sendo desenvolvido por Goulart, Lamberts e Firmino (1998) com base na metodologia desenvolvida por Sattler (1989)<sup>23</sup>.

Em primeiro lugar, para cada um dos dias do período de dados disponíveis, é calculada a temperatura média diária, as quais são ordenadas, em ordem crescente. São encontradas, então, o conjunto de dias de temperaturas médias mais elevadas, caracterizando, aproximadamente, 15% do número total de dias. [...] Depois de reordenadas as temperaturas médias correspondentes aos dias dos períodos definidos acima, são determinados os níveis de 1%; 2,5%; 5% e 10% tanto para os dias quentes, como para os dias frios. Portanto, o nível de 2,5%, relativo a dias quentes, por exemplo, caracteriza o dia cuja temperatura média é excedida somente por 2,5% do total de dias quentes. (GOULART, LAMBERTS, FIRMINO, 1998, p. 11).

Segundo Goulart, Lamberts e Firmino (1998) a declinação solar é o parâmetro para estabelecer a data de referência. Para a pesquisa foi selecionado o dia 28/01 como data de referência, dia típico de nível 1%.

Para o dia típico de projeto, foram utilizados para configuração dos dados de entrada do ENVI-met, os valores médios diários das variáveis climáticas (v, dir e UR). Para o valor de entrada de Ta foi considerado o dado registrado às 0h00, mantendo-se as mesmas configurações previamente estabelecidas.

Para a determinação do valor de umidade específica seguiu-se o mesmo critério na determinação da umidade específica do mês de março. Assim, considerou-se a média aritmética de umidade específica aproximadamente a 2.500 m de altura do mês de janeiro dos anos de 2011 e de 2013, e, posteriormente, foi realizada a média dos valores encontrados (Tabela 47).

Os dados de entrada estão reunidos na Tabela 48. O fator de ajuste solar para ondas curtas foi de 1,2. Para as condições laterais do modelo manteve-se a opção *forced*.

---

<sup>23</sup> Sattler, M. **Dias Climáticos Típicos para o Projeto Térmico de Edificações em Porto Alegre**. Porto Alegre: CIENTEC, 1989.



Tabela 47 – Dados de umidade específica para Curitiba nos meses de janeiro de 2011 e 2013

Data	Altura	Umidade Específica	Data	Altura	Umidade Específica
01/01/2011	2314	10,14	01/01/2013	2727	10,44
02/01/2011		sem registro	02/01/2013	2494	8,14
03/01/2011	2726	9,17	03/01/2013	2639	10,44
04/01/2011	2008	11,03	04/01/2013	2816	9,54
05/01/2011		sem registro	05/01/2013	2853	9,58
06/01/2011	2566	10,26	06/01/2013	3184	6,54
07/01/2011		sem registro	07/01/2013		sem registro
08/01/2011	3163	8,87	08/01/2013	2697	9,79
09/01/2011	2181	13,39	09/01/2013	2507	7,39
10/01/2011	1291	12,53	10/01/2013	3040	10,81
11/01/2011		sem registro	11/01/2013	2667	6,72
12/01/2011	2507	8,97	12/01/2013	2530	2,55
13/01/2011	2370	10,08	13/01/2013	2914	7,04
14/01/2011	2749	8,22	14/01/2013	2467	9,42
15/01/2011		sem registro	15/01/2013	2551	10,21
16/01/2011	2158	9,97	16/01/2013	2672	7,3
17/01/2011	2665	9,76	17/01/2013	2412	8,29
18/01/2011	3152	8,1	18/01/2013	2505	9,04
19/01/2011		sem registro	19/01/2013	2698	7,81
20/01/2011	2368	11,5	20/01/2013	2444	8,62
21/01/2011	2615	10,17	21/01/2013	2233	5,77
22/01/2011	2262	10,68	22/01/2013	2573	2,28
23/01/2011	2567	10,06	23/01/2013	2375	7,54
24/01/2011	2775	8,37	24/01/2013	2155	9,04
25/01/2011	2338	12,47	25/01/2013	2729	6,74
26/01/2011	2908	7,2	26/01/2013	2468	9,66
27/01/2011	2257	12,46	27/01/2013	2682	9,18
28/01/2011	2794	8,78	28/01/2013	2638	4,89
29/01/2011	2146	10,67	29/01/2013	2542	2,78
30/01/2011	2488	7,24	30/01/2013	2515	3,24
31/01/2011		sem registro	31/01/2013	2597	0,93
Média de cada ano	2474	10,00		2611	7,39
<b>Média entre os anos</b>	<b>8,70 (arredondado para 9)</b>				

Fonte: Autoria própria (2014)

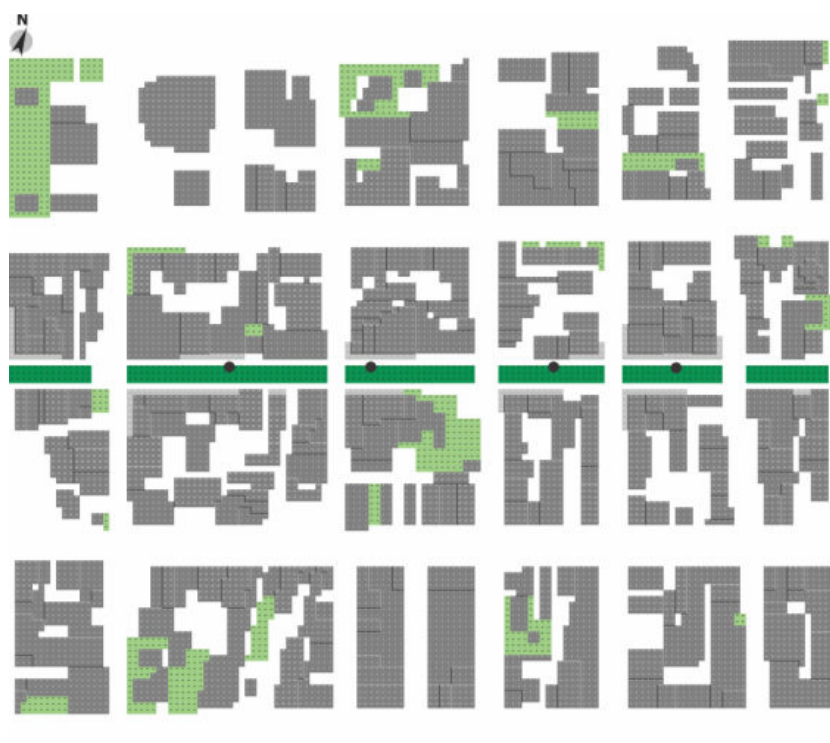
Tabela 48 – Configuração do modelo da Linha Verde e Sete de Setembro – dia típico de projeto

Área de estudo	Sete de Setembro e Linha Verde	Configuração
Data	28/01/2012	Dia típico de projeto nível 1%
Início da simulação	00:00:00	Atmosfera neutra
Velocidade do vento (m/s)	3,2	Média diária
Direção do vento (graus)	90	Média diária
Comprimento de rugosidade	0,1	Valor estipulado
Temperatura do ar (K)	293,6	Dado às 0h00
Umidade Específica a 2500 m (g/kg)	9	Valor calculado
Umidade Relativa do ar (%)	80	Média diária

Fonte: Autoria própria (2014)

## 5.5 SETE DE SETEMBRO: CENÁRIO PROPOSTO

A Figura 61 corresponde à modelagem do cenário B, situação proposta para melhoria do ambiente térmico. Em tal cenário foi considerada a possibilidade máxima da utilização de vegetação arbórea. Novamente, optou-se por utilizar árvores de 15 m de altura, sem folhagem na base (sigla T2, LAD para cada segmento: 0,000 0,000 2,180 2,180 2,180 2,180 2,180 2,180 1,720 0,000), representadas na cor verde escuro.



**Figura 61 – Sete de Setembro: cenário proposto - B**

**Fonte: Autoria própria (2014)**

Os dados da projeção horizontal do perímetro modelado (604.800 m<sup>2</sup>), superfície construída (235.008 m<sup>2</sup>), área de rua da Avenida Sete de Setembro (25.200 m<sup>2</sup>) e acréscimo de superfície vegetada (12.852 m<sup>2</sup>) constam na Tabela 49.

**Tabela 49 – Sete de Setembro: projeção horizontal em m<sup>2</sup>**

<b>Sete de Setembro (Curitiba)</b>	<b>projeção horizontal em m<sup>2</sup></b>
perímetro modelado	604.800
superfície construída	235.008
área de rua (intervenção direta)	25.200
superfície vegetada	12.852

**Fonte: Autoria própria (2014)**

## 5.6 SETE DE SETEMBRO: ESTRATÉGIA DE MELHORIA DO AMBIENTE TÉRMICO

A Tabela 50 contém dados de temperatura do ar ( $T_a$ ) e categoria de estresse térmico do cenário A (situação atual). Os valores de fator de visão do céu (FVC) foram fornecidos pelo modelo ENVI-met. O FVC do ponto SS1 (ponto no qual foi realizada a coleta de dados) obtido por meio de foto olho de peixe foi de 0,35. A diferença de 0,12 em relação ao FVC simulado deve-se à complexidade em modelar um cenário real.

No cenário A, considerando um período de análise das 12h00 até às 15h00, observa-se que a  $T_a$  média variou de 29,2°C no ponto SS2 até 31,1°C no ponto SS4.

Na situação atual para um dia típico de projeto, os pontos SS1, SS3 e SS4 estariam em extremo estresse térmico ao calor considerando o índice PET. Já o ponto SS2 estaria em muito forte estresse térmico ao calor. Na categorização do índice de conforto UTCI, os pontos SS1 e SS3 estariam em muito forte estresse térmico, enquanto o ponto SS2 e SS4 estariam em forte estresse térmico ao calor.

**Tabela 50 – Sete de Setembro: cenário A**

Hora	SS1 (FVC 0,47) $T_a$ (°C)	SS2 (FVC 0,49) $T_a$ (°C)	SS3 (FVC 0,55) $T_a$ (°C)	SS4 (FVC 0,55) $T_a$ (°C)
12h00	27,9	27,6	28,6	29,5
13h00	29,4	29,1	30,1	31,1
14h00	30,3	30,0	31,0	31,9
15h00	30,6	30,3	31,2	32,1
<b>média</b>	<b>29,5</b>	<b>29,2</b>	<b>30,2</b>	<b>31,1</b>
PET (°C)	48,3	38,3	47,9	45,7
categoria de estresse térmico ao calor	Extremo	Muito forte	Extremo	Extremo
UTCI (°C)	38,5	33,5	38,3	37,0
categoria de estresse térmico ao calor	Muito forte	Forte	Muito forte	Forte

**Fonte: Autoria própria (2014)**

A Tabela 51 apresenta os dados do cenário B e as diferenças em relação ao cenário A. Nota-se que o ponto SS2 apresentou a menor redução na  $T_a$  entre os pontos analisados, com 0,6°C. O ponto com redução mais significativa foi o SS4 com média de 1,1°C. Embora tenham ocorrido diferenças entre os índices de

conforto térmico PET e UTCI no cenário A, a partir da adição de área arborizada no cenário B, a melhora máxima obtida em todos os pontos e para ambos os índices foi em moderado estresse ao calor. Esse fato demonstra, também, que a inserção de vegetação produz efeitos mais significativos nas categorias de estresse térmico do índice PET do que nos níveis do índice UTCI.

**Tabela 51 – Sete de Setembro: cenário B e diferenças em relação ao cenário A**

Hora	SS1 (FVC 0,00)		SS2 (FVC 0,02)		SS3 (FVC 0,01)		SS4 (FVC 0,00)	
	Ta (°C)	Dif (°C)	Ta (°C)	Dif (°C)	Ta (°C)	Dif (°C)	Ta (°C)	Dif (°C)
12h00	27,5	0,5	27,2	0,4	28,0	0,6	28,6	0,9
13h00	28,8	0,6	28,6	0,5	29,4	0,7	30,1	1,0
14h00	29,5	0,8	29,4	0,6	30,1	0,8	30,8	1,1
15h00	29,7	0,9	29,5	0,8	30,3	0,9	30,8	1,2
<b>média</b>	<b>28,9</b>	<b>0,7</b>	<b>28,7</b>	<b>0,6</b>	<b>29,4</b>	<b>0,8</b>	<b>30,1</b>	<b>1,1</b>
PET (°C)	28,4	20,0	27,9	10,4	28,6	19,3	28,6	17,1
categoria de estresse térmico ao calor	Moderado		Moderado		Moderado		Moderado	
UTCI (°C)	28,6	9,9	28,2	5,3	28,8	9,5	28,9	8,1
categoria de estresse térmico ao calor	Moderado		Moderado		Moderado		Moderado	

Fonte: Autoria própria (2014)

Para todo o perímetro modelado, a partir do cenário proposto e com inserção de área arborizada correspondendo a 3,6%, a Ta sofreria uma redução pouco significativa (0,2°C). Se considerada apenas a via no qual as interferências foram aplicadas diretamente, correspondendo a 85,3% de área arborizada, a redução de Ta passa a ser de 0,6°C (Tabela 52).

**Tabela 52 – Sete de Setembro: comparação entre a Ta dos cenários A e B**

Hora	Ta (°C) - modelo completo		Ta (°C) - trecho da Avenida	
	cenário A	cenário B	cenário A	cenário B
12h00	28,7	28,5	28,4	27,9
13h00	30,2	30,0	29,9	29,4
14h00	31,1	30,8	30,8	30,1
15h00	31,3	31,0	31,0	30,2
<b>Média</b>	<b>30,3</b>	<b>30,1</b>	<b>30,0</b>	<b>29,4</b>
<b>Diferença</b>	<b>0,2</b>		<b>0,6</b>	

Fonte: Autoria própria (2014)

A Figura 62 e a Figura 63, possibilitam a visualização do cenário atual e do cenário proposto às 15h00, respectivamente.

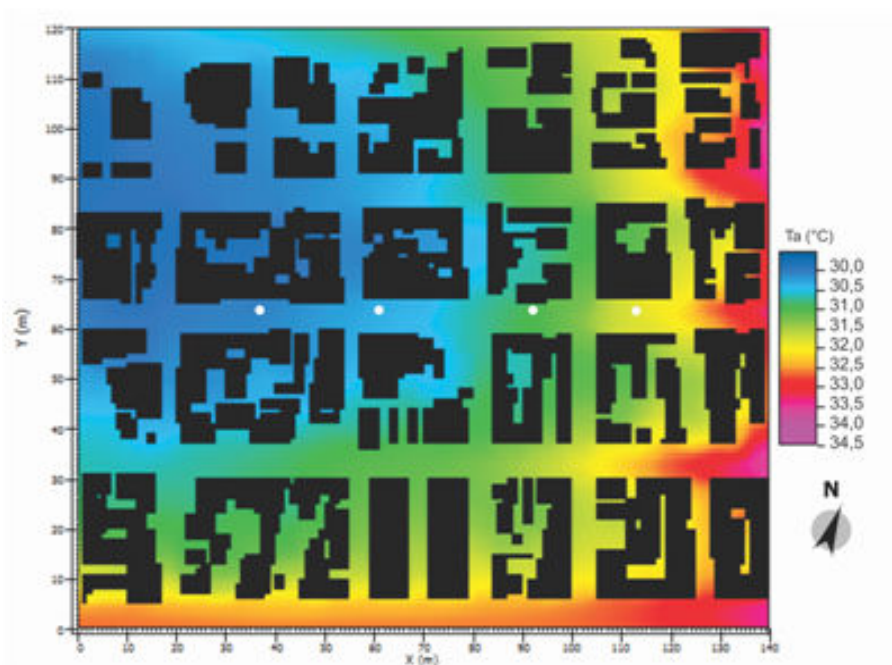


Figura 62 – Sete de Setembro: cenário A, às 15h00

Fonte: Autoria própria (2014)

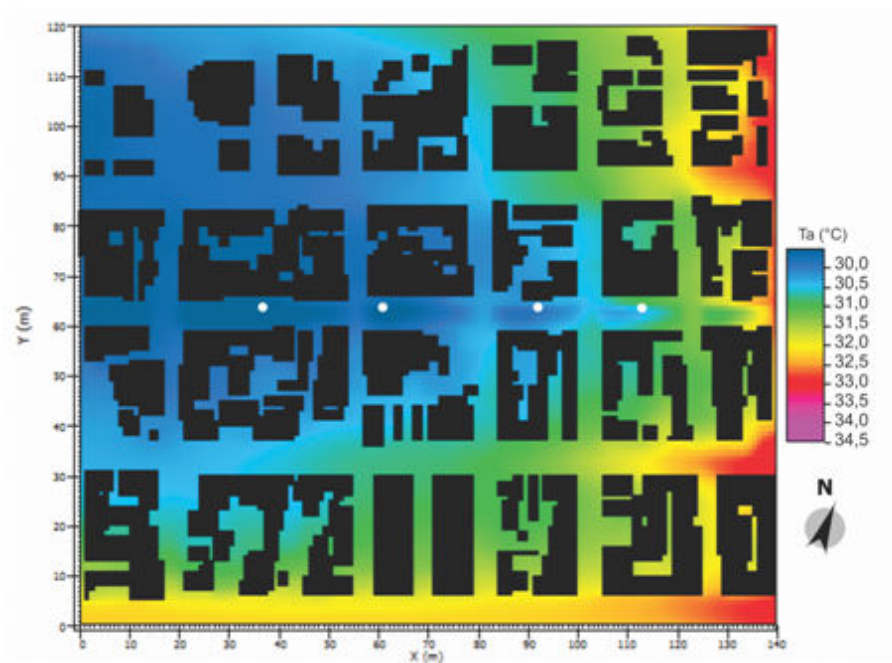


Figura 63 – Sete de Setembro: cenário atual B, às 15h00

Fonte: Autoria própria (2014)

As áreas verdes foram suprimidas das imagens para uma melhor visualização do ambiente térmico. Conforme pode ser observado, o setor mais aquecido está a leste e o menos aquecido a oeste. As áreas arborizadas do cenário B possibilitam resfriamento mais significativo da via, principalmente nos pontos SS3 e SS4. Às 15h00, apenas no recorte da Avenida Sete de Setembro, o cenário B apresentou uma  $T_a$   $0,8^{\circ}\text{C}$  inferior ao cenário A.

## 5.7 SETE DE SETEMBRO: CONCLUSÃO PARCIAL

É interessante notar que, mesmo com o sombreamento gerado pela verticalização das edificações do trecho da Avenida Sete de Setembro escolhido para a pesquisa, o ambiente é desconfortável termicamente em situação de verão. Para o transeunte caminhar sob as copas das árvores implantadas na parte central da via não traria o conforto térmico desejável, embora tal condição possa ser conseguida dependendo das condições climáticas do dia; tendo em vista que a categoria de estresse térmico é reduzida em duas, até três categorias de estresse térmico no período diurno.

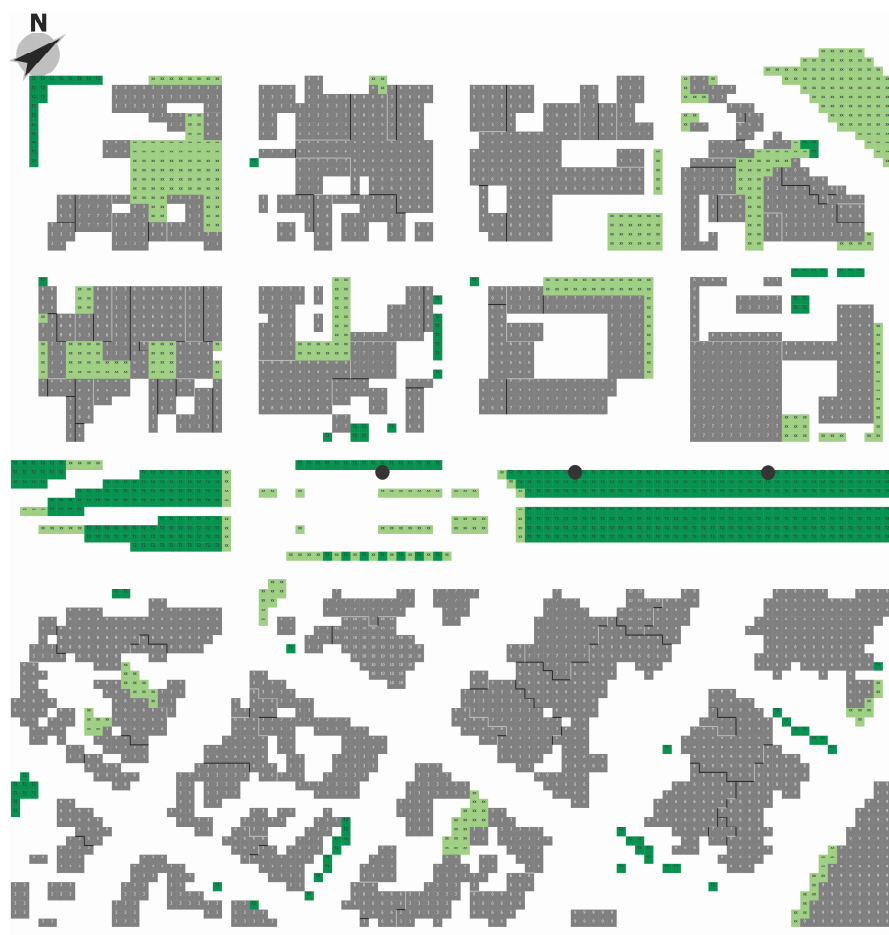
Para o pedestre ainda existe a vantagem das galerias (projeção das sobrelojas sobre o passeio) que proporcionam sombreamento, além de proteger das intempéries climáticas.

## 5.8 LINHA VERDE: CENÁRIO PROPOSTO

A Figura 64 corresponde ao cenário proposto (cenário B) para a Linha Verde. Ressalta-se que já no período de coleta de dados em campo, as mudas das árvores do canteiro central já estavam plantadas; mas por não terem atingido seu desenvolvimento completo, não foram incluídas no modelo do cenário A.

As áreas construídas estão representadas pela cor cinza, as superfícies gramadas (sigla xx, LAD para cada segmento: 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300) pela cor verde claro e as árvores de 15 m de altura, sem folhas na base (sigla T2, LAD para cada segmento: 0,000 0,000 2,180 2,180 2,180 2,180 2,180 2,180 2,180 1,720 0,000) pela cor verde escuro.

Note que o ponto LV1 e LV3 estão situados sob a copa das árvores, enquanto o ponto LV2 está situado no entorno das árvores inseridas no modelo.



**Figura 64 – Linha Verde: cenário proposto - B**

**Fonte: Autoria própria (2014)**

Na Tabela 53 podem ser observados os dados de projeção horizontal do perímetro modelado (331.776 m<sup>2</sup>), da superfície construída (68.724 m<sup>2</sup>), da área de rua – trecho da Linha Verde modelado (55.296 m<sup>2</sup>) e da adição de superfície vegetada (15.480 m<sup>2</sup>).

**Tabela 53 – Linha Verde: projeção horizontal em m<sup>2</sup>**

<b>Linha Verde (Curitiba)</b>	<b>projeção horizontal em m<sup>2</sup></b>
perímetro modelado	331.776
superfície construída	68.724
área de rua (intervenção direta)	55.296
superfície vegetada	15.480

**Fonte: Autoria própria (2014)**

## 5.9 LINHA VERDE: ESTRATÉGIA DE MELHORIA DO AMBIENTE TÉRMICO

A Tabela 54 corresponde aos dados de temperatura do ar ( $T_a$ ), categoria de estresse térmico e fator de visão do céu (FVC) do cenário A. Em relação ao FVC, o valor obtido por meio de foto olho de peixe no ponto LV1 foi de 0,91, correspondendo a uma diferença de 0,6 em relação ao fornecido pelo modelo ENVI-met. O período de análise compreende às 10h00 até às 15h00. A maior média de  $T_a$  encontra-se no ponto LV3, com 30°C. O ponto menos aquecido é o ponto LV1, com 29,4°C. A categoria de estresse térmico para ambos os pontos é em muito forte para o índice PET e em forte estresse térmico ao calor para o índice UTCI.

**Tabela 54 – Linha Verde: cenário A**

Hora	LV1 (FVC 0,97) $T_a$ (°C)	LV2 (FVC 0,97) $T_a$ (°C)	LV3 (FVC 0,97) $T_a$ (°C)
10h00	25,8	26,0	26,3
11h00	27,5	27,7	28,1
12h00	29,1	29,3	29,8
13h00	30,5	30,7	31,2
14h00	31,5	31,6	32,2
15h00	31,9	32,1	32,6
<b>média</b>	<b>29,4</b>	<b>29,6</b>	<b>30,0</b>
PET (°C)	38,5	45,6	39,4
categoria de estresse térmico ao calor	Muito forte	Extremo	Muito forte
UTCI (°C)	33,6	36,9	34,3
categoria de estresse térmico ao calor	Forte	Forte	Forte

**Fonte: Autoria própria (2014)**

O ponto LV2 apresentou uma  $T_a$  média intermediária entre os valores médios registrados nos pontos LV1 e LV3. No entanto, para o índice PET este ponto estaria em extremo estresse térmico ao calor no período de análise. Essa situação decorre do ponto LV2 apresentar maior valor de  $T_{rm}$ , uma vez que o mesmo encontra-se sobre superfície pavimentada; enquanto os outros dois pontos encontram-se sobre superfície originalmente gramada. Na avaliação do índice UTCI, o ponto LV2 encontra-se na mesma categoria de estresse térmico do que os outros pontos considerados.



A partir da inserção de arborização no cenário B, percebe-se que o ponto LV3, que possuía a maior  $T_a$  entre os três pontos, sofre maior redução na  $T_a$ , com média de  $1,2^\circ\text{C}$ . No ponto LV1 a  $T_a$  é reduzida em média  $0,9^\circ\text{C}$ . Nesses pontos, a categoria de muito forte estresse térmico passa para moderado estresse térmico ao calor, na avaliação dos índices PET e UTCI (Tabela 55).

**Tabela 55 – Linha Verde: cenário B e diferenças em relação ao cenário A**

Hora	LV1 (FVC 0,13)		LV2 (FVC 0,63)		LV3 (FVC 0,13)	
	Ta (°C)	Dif (°C)	Ta (°C)	Dif (°C)	Ta (°C)	Dif (°C)
10h00	25,1	0,7	25,7	0,3	25,4	0,9
11h00	26,7	0,8	27,3	0,4	27,0	1,1
12h00	28,3	0,8	28,9	0,4	28,8	1,0
13h00	29,6	0,9	30,3	0,4	30,1	1,1
14h00	30,4	1,1	31,1	0,6	30,8	1,4
15h00	30,7	1,2	31,4	0,6	31,1	1,5
<b>média</b>	<b>28,5</b>	<b>0,9</b>	<b>29,1</b>	<b>0,4</b>	<b>28,8</b>	<b>1,2</b>
PET (°C)	28,2	10,3	40,6	5,0	28,4	11,0
categoria de estresse térmico ao calor	Moderado		Muito forte		Moderado	
UTCI (°C)	28,4	5,2	34,7	2,2	28,8	5,6
categoria de estresse térmico ao calor	Moderado		Forte		Moderado	

**Fonte: Autoria própria (2014)**

No ponto LV2, a redução na  $T_a$  é menos significativa, pois o mesmo encontra-se ao lado das árvores inseridas na quadra onde está localizada a estação tubo. A redução média na  $T_a$  foi de  $0,4^\circ\text{C}$ . A redução média de  $5,0^\circ\text{C}$  no índice PET permite que o ponto passe de extremo para muito forte estresse térmico, porém a redução de  $2,2^\circ\text{C}$  no índice UTCI não é suficiente para uma melhora na condição de conforto, fazendo com que o ponto permaneça em forte estresse térmico.

Considerando toda a área modelada, observa-se uma redução de  $0,5^\circ\text{C}$  na  $T_a$  média a partir da introdução de 4,6% de área arborizada (Tabela 56). Levando em conta apenas o recorte do trecho da Avenida Linha Verde modelada, a  $T_a$  sofre uma redução média de  $0,6^\circ\text{C}$  a partir do cenário B, com a introdução de 27,5% de área arborizada.

Tabela 56 – Linha Verde: comparação entre a Ta dos cenários A e B

Hora	Ta (°C) - modelo completo		Ta (°C) - trecho da Avenida	
	cenário A	cenário B	cenário A	cenário B
10h00	26,3	26,0	26,1	25,7
11h00	28,1	27,7	27,9	27,4
12h00	29,8	29,3	29,5	29,0
13h00	31,2	30,7	30,9	30,3
14h00	32,1	31,6	31,9	31,2
15h00	32,5	31,9	32,3	31,5
<b>Média</b>	<b>30,0</b>	<b>29,5</b>	<b>29,8</b>	<b>29,2</b>
<b>Diferença</b>	<b>0,5</b>		<b>0,6</b>	

Fonte: Autoria própria (2014)

A Figura 65 e a Figura 66 correspondem a distribuição horizontal da Ta às 15h00, horário no qual houve redução mais significativa da Ta. A vegetação não consta em tais imagens para uma melhor visualização do campo térmico.

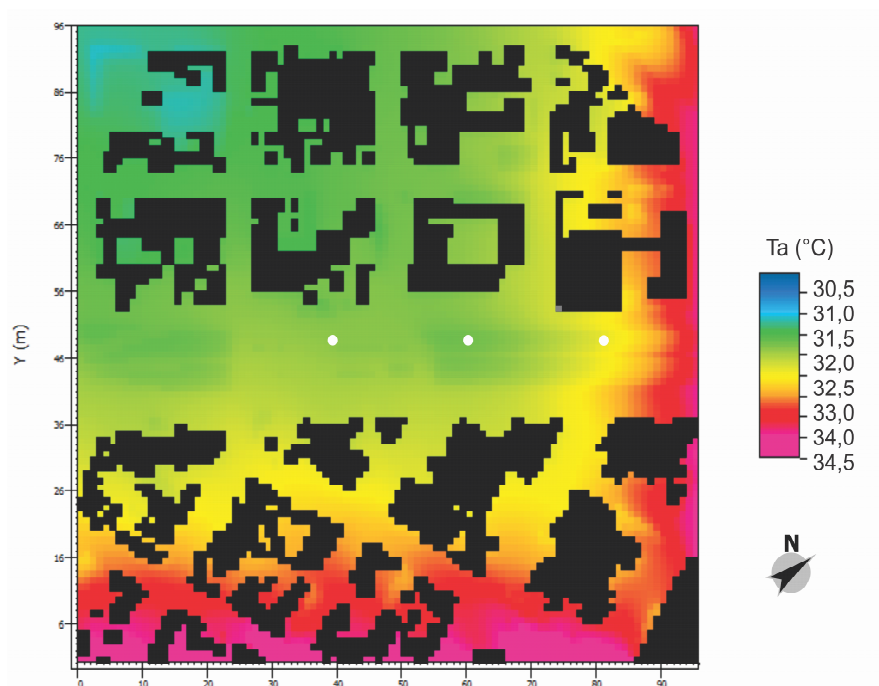
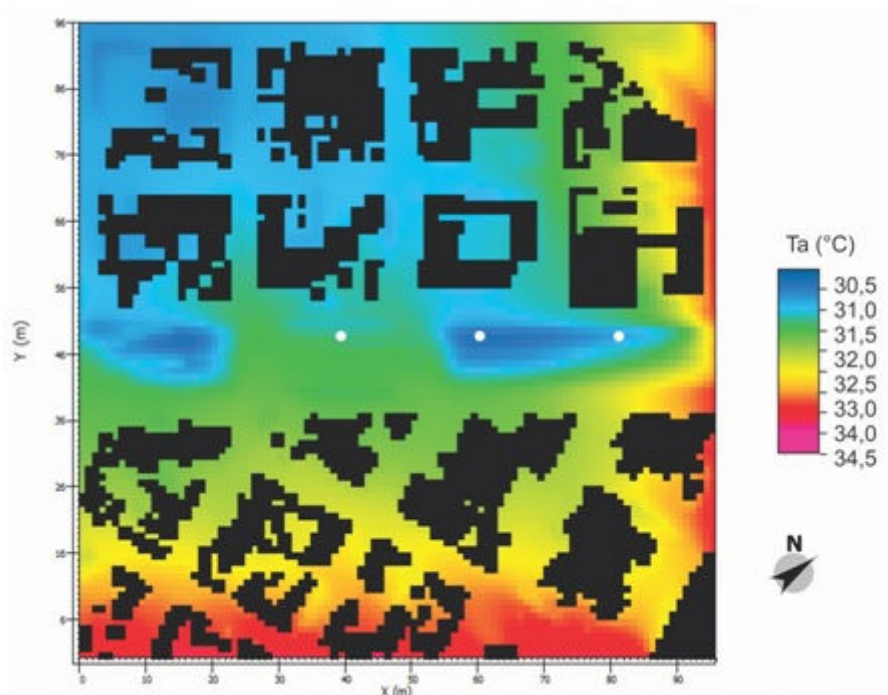


Figura 65 – Linha Verde: cenário A, às 15h00

Fonte: Autoria própria (2014)

No cenário A é possível observar maior aquecimento no setor leste e sul. No cenário B nota-se que as áreas arborizadas contribuem para um resfriamento da área como todo, mas principalmente nos canteiros, local de implantação da vegetação arbórea. Nesse horário, no cenário B, a  $T_a$  na via era  $0,8^\circ\text{C}$  menor que no cenário A.



**Figura 66 – Linha Verde: cenário B, às 15h00**

**Fonte: Autoria própria (2014)**

## 5.10 LINHA VERDE: CONCLUSÃO PARCIAL

Para um dia típico, considerando o período diurno, a inserção de árvores de copa densa nos canteiros, formando um parque linear, não é capaz de alcançar conforto térmico. No entanto, o importante é considerar que a categoria de estresse térmico pode ser reduzida em até duas categorias mais próximas da neutralidade térmica.

Diferente do efeito especialmente localizado da vegetação observado na Sete de Setembro, na Linha Verde a arborização nos canteiros centrais provocou maior impacto em todo perímetro modelado. Tal fato pode estar relacionado às diferenças na morfologia urbana.

## 6 PROPOSIÇÃO DO ÍNDICE

São percebidas tendências de aquecimentos das áreas urbanas, locais que muitas vezes já apresentam inadequações térmicas. Tal fato leva a constatação de que é preciso orientar climaticamente o desenho urbano, sendo a vegetação um elemento estratégico para diminuir o estresse térmico dos espaços abertos. Nesse sentido, gestores e urbanistas seriam beneficiados com um índice que possibilita identificar a área de cobertura vegetal (coeficiente de vegetação) necessária para amenizar a temperatura do ar ( $T_a$ ).

O índice que relaciona cobertura vegetal e áreas construídas em termos de redução da temperatura do ar foi desenvolvido com base nos resultados das simulações microclimáticas com o modelo ENVI-met, o qual fornece dados de  $T_a$  para cada célula de grade modelada. Ressalta-se que na presente pesquisa foram considerados dados simulados na altura do pedestre a 1,50 m de altura. O índice foi proposto considerando os dados da Sete de Setembro e da Linha Verde, ambas as localidades em Curitiba.

Inicialmente, foram estabelecidos recortes dentro de cada modelo. O número de recortes coincide com o número de pontos alocados em cada modelo e as nomenclaturas dos pontos serviram para identificar cada perímetro. Assim, na Sete de Setembro foram considerados quatro recortes e na Linha Verde três recortes, totalizando sete recortes - representados pelos retângulos na Figura 67.

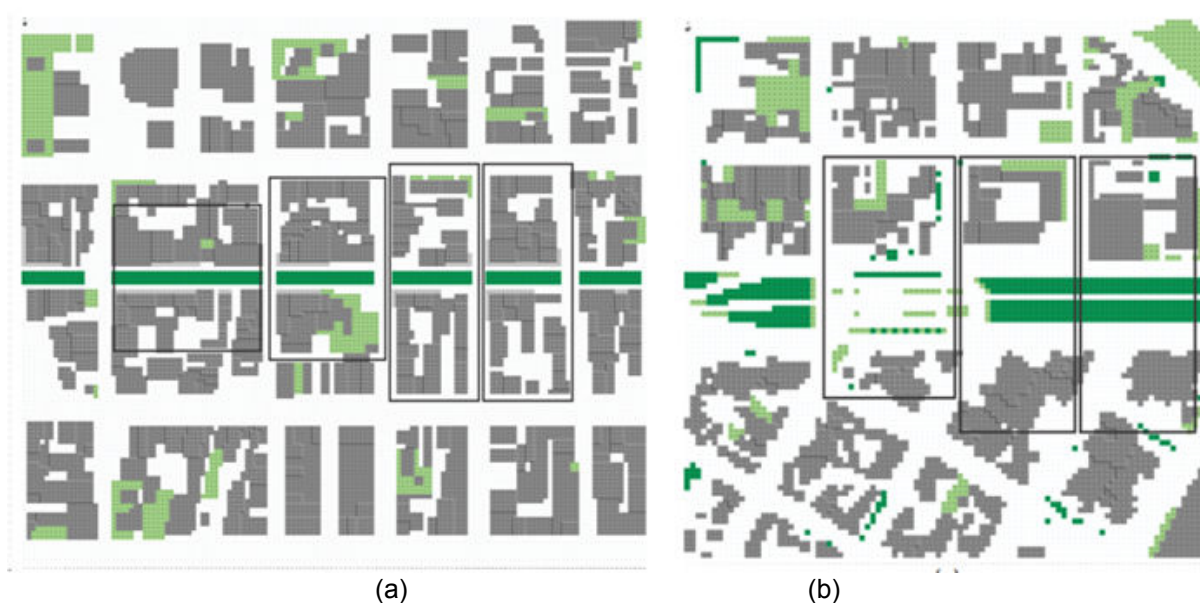


Figura 67 – Recorte para cada modelo: (a) Belém, (b) Sete de Setembro e (c) Linha Verde

Fonte: Autoria própria (2014)

Para o dimensionamento de cada recorte, procurou-se estipular uma área que tivesse um tamanho compatível com todos os recortes, concluindo-se que o tamanho ideal de cada recorte era próximo de 1,44 km<sup>2</sup> (Tabela 57 e Tabela 58).

**Tabela 57 – Cálculo dos recortes na Sete de Setembro**

Recorte	eixo	número de célula de grade	tamanho da célula de grade em m <sup>2</sup>	total	área do recorte em km <sup>2</sup>
SS1	x	27	36	972	1,43
	y	41	36	1476	
SS2	x	34	36	1224	1,45
	y	33	36	1188	
SS3	x	21	36	756	1,44
	y	53	36	1908	
SS4	x	21	36	756	1,44
	y	53	36	1908	

Fonte: Autoria própria (2014)

**Tabela 58 – Cálculo dos recortes na Linha Verde**

Recorte	eixo	número de célula de grade	tamanho da célula de grade em m <sup>2</sup>	total	área do recorte em km <sup>2</sup>
SS1	x	25	36	900	1,43
	y	44	36	1584	
SS2	x	22	36	792	1,43
	y	50	36	1800	
SS3	x	22	36	792	1,43
	y	50	36	1800	

Fonte: Autoria própria (2014)

Ressalta-se que as reduções na temperatura do ar (Ta) relacionadas ao índice desenvolvido se referem a Ta média em cada recorte, e não a Ta registrada no ponto receptor.

Para cada recorte, em cada localidade de estudo, foram considerados dados relativos à cobertura vegetal e à densidade construída.

O cálculo da cobertura vegetal (em m<sup>2</sup>) foi realizado com base na projeção horizontal das grades com árvores (a opção na pesquisa foi por utilizar copa densa, sem folhas na base e com 15 m de altura, sigla T2). Para isso, foi contado o número de grades correspondente às áreas verdes dentro de cada

recorte. Posteriormente, o número de grades foi multiplicado pela área de cada grade.

Para a quantificação da área construída foi contabilizado o número de grades, em projeção horizontal, considerando a altura de cada edificação dentro de cada recorte. O número de pavimentos foi considerado tendo como referência a altura de 3m para a altura de piso a piso. Obteve-se, assim, o somatório do total de área construída.

Os dois parâmetros resultaram no índice cobertura vegetal por área construída em termos de redução da temperatura do ar (Equação 12).

$$\frac{\text{cobertura vegetal}}{\text{área construída}} = \text{redução da Ta (}^{\circ}\text{C)} \quad \text{Equação 12}$$

O índice foi, então, relacionado à redução média de Ta em relação ao cenário original, tendo como referência, novamente, a área de cada recorte. Os resultados podem ser conferidos na Tabela 59.

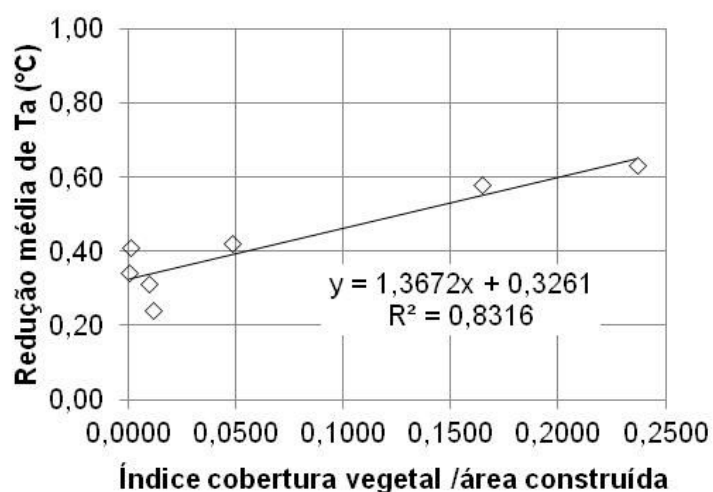
**Tabela 59 – Relação entre o índice cobertura vegetal / densidade construída e a redução média de Ta**

Perímetro	Cobertura Vegetal (m <sup>2</sup> )	Área Construída (m <sup>2</sup> )	Índice cobertura vegetal /área construída	Redução média de Ta (°C)
SS1	2376	196668	0,0121	0,24
SS2	3672	380016	0,0097	0,31
SS3	1944	2577456	0,0008	0,34
SS4	1836	1678500	0,0011	0,41
LV1	4140	25128	0,1648	0,58
LV2	828	17136	0,0483	0,42
LV3	5544	23436	0,2366	0,63

**Fonte: Aatoria própria (2014)**

Considerando as áreas de estudo em Curitiba (Sete de Setembro e Linha Verde), a proporção entre a cobertura vegetal e a área construída pode explicar a redução média de Ta em 83,1% (Gráfico 7). Conforme observado nos gráficos,

quanto mais alta for a proporção da cobertura vegetal pela área construída, maior tende a ser a redução média na Ta no período diurno, curva ascendente.



**Gráfico 7 – Índice cobertura vegetal por área construída em termos de redução média de Ta**

Fonte: Autoria própria (2014)

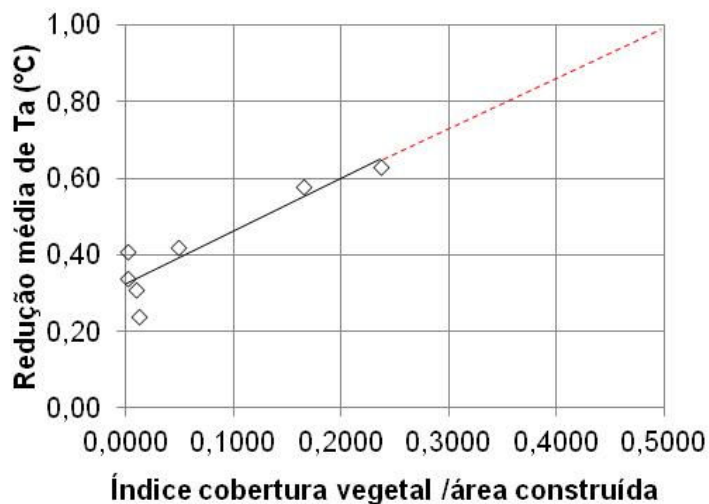
A partir da equação gerada para a redução média de Ta ( $y=1,3672x+0,3261$ ), foram mensuradas a cobertura vegetal necessária para reduzir a temperatura do ar em 1°C. Os resultados podem ser conferidos na Tabela 58.

**Tabela 58 – Relação entre o índice cobertura vegetal / densidade construída e a redução média de Ta**

Perímetro	Cobertura vegetal requerida (m <sup>2</sup> )	Aumento correspondente de cobertura vegetal
SS1	96939	0,49
SS2	187312	0,49
SS3	1270441	0,49
SS4	827341	0,49
LV1	12386	0,49
LV2	8446	0,49
LV3	11552	0,49

Fonte: Autoria própria (2014)

Os dados encontrados mostram que para reduzir em 1°C a temperatura do ar nos recortes selecionados, seria necessário aumentar a cobertura vegetal em 49%. No Gráfico 8, a linha tracejada mostra esta proporção.



**Gráfico 8 – Cobertura vegetal necessária para a redução da Ta média em 1 °C**

**Fonte: Autoria própria (2014)**

Deve-se considerar que o aumento requerido de cobertura vegetal está relacionado ao tamanho do perímetro estabelecido (cerca de 1,44 km<sup>2</sup>), pois o efeito da inserção de vegetal é localizado.

Os estudos em Curitiba (Sete de Setembro e Linha Verde) e os estudos piloto para Genebra, Paris e São Paulo são discutidos a seguir.



## 7 DISCUSSÃO

Os estudos desenvolvidos para as cidades de Curitiba, São Paulo, Paris e Genebra mostram que a inserção de áreas arborizadas poderia auxiliar na redução do potencial de aquecimento das áreas urbanas, mas não, necessariamente, a condições de conforto térmico seria alcançada, já que tal situação está atrelada às condições climáticas de cada dia. O importante é considerar que em muitos casos foram percebidas mudanças nas categorias de estresse térmico; em geral, em duas categorias considerando o índice Temperatura Fisiológica Equivalente (PET) e em uma categoria considerando o índice Universal Thermal Climate Index (UTCI). Vale ressaltar que, embora tenham ocorrido diferenças entre os índices PET e UTCI quanto à classificação do nível de estresse térmico dos pontos receptores das diferentes cidades analisadas considerando os cenários originais, as categorias de estresse térmico dos índices PET e UTCI, em geral, se equivaleram nos cenários modificados.

A máxima redução na temperatura do ar ( $T_a$ ), equivalente a  $2,5^\circ\text{C}$  (valor registrado às 15h00) foi verificada em duas situações distintas: (1) na fração urbana do Belém, mais especificamente no passeio da quadra oeste do ponto B1 e (2) sob os agrupamentos arbóreos de copa densa em Paris, os quais foram configurados como parques urbanos. Tal fato indica que a quantidade de árvores não é o fator determinante para que haja menor estresse térmico nos espaços abertos em situação de verão e no período diurno, mas sim a forma como as mesmas estão distribuídas na malha urbana. Corroborando essa afirmação, em Genebra, no ponto G4 (localizado na praça do setor comercial), o aumento de árvores no cenário 2 em relação ao cenário 1 não gerou impacto no campo térmico, de maneira que não houve alterações na temperatura do ar e nos índices de conforto térmico naquele ponto. Assim, a implementação de um plano de arborização ao longo de ruas e avenidas poderia ser mais benéfica para um ambiente térmico urbano com menor nível de estresse térmico do que a criação de praças ou parques concentrados em locais específicos.

Sabe-se que a abrangência dos efeitos da inserção da vegetação para a conformação do ambiente térmico é limitada. No Belém, por exemplo, a redução de  $T_a$  para cada recorte apresentou uma redução média na  $T_a$  equivalente a  $0,3^\circ\text{C}$ , enquanto tal redução se eleva para  $1,1^\circ\text{C}$  quando se considera somente a área de

rua; confirmando, mais uma vez, o efeito localizado da vegetação. Dividindo o perímetro modelado no Belém em seção leste e oeste (considerando que a rua está aproximadamente no sentido norte-sul), observou-se que a leste, em uma extensão de até 50 m a redução na  $T_a$  é em média de  $0,4^\circ\text{C}$ , reduzindo-se pela metade após esta distância. Já no setor oeste, a redução média de  $T_a$  de  $0,4^\circ\text{C}$  se restringe a uma faixa aproximada de 20 m, após essa distância a redução média de  $T_a$  se reduz a  $0,2^\circ\text{C}$ .

Na Linha Verde, dividindo o perímetro modelado em duas seções (noroeste e sudeste), tendo como eixo divisor a Avenida Linha Verde, nota-se que no setor noroeste, na faixa de aproximadamente 50 m, a redução média na  $T_a$  foi de  $0,7^\circ\text{C}$ , após esta faixa a redução média na  $T_a$  foi de  $0,6^\circ\text{C}$ . No setor sudeste a redução média a partir das intervenções na Avenida Linha Verde foi de  $0,5^\circ\text{C}$ .

Na Sete de Setembro, considerando a Avenida como eixo divisor, e denominando as duas seções como setor norte e setor sul, tem-se que em aproximadamente uma faixa de 24 m de extensão a partir da Avenida a redução média na  $T_a$  foi de  $0,5^\circ\text{C}$  e após esta faixa a redução média na  $T_a$  registrou  $0,3^\circ\text{C}$ .

Em Paris, os pontos situados na ponte e na rua paralela a linha férrea (e ao nível desta), embora estivessem distantes dos locais com interferência direta, ainda obtiveram reduções na  $T_a$  de até  $0,3^\circ\text{C}$ .

Desta forma, recomenda-se que a distribuição das árvores ao longo da malha urbana seja implantada de forma a oferecer opções de trajetos aos transeuntes.

Na Sete de Setembro o ponto no passeio com redução de  $T_a$  mais significativa ( $0,9^\circ\text{C}$ ) está situado sob a galeria do Plano Massa, próximo ao ponto SS4, na quadra ao norte. Em média, o corredor verde implantado sobre a canaleta de ônibus influenciou a redução da  $T_a$  nos passeios em  $0,5^\circ\text{C}$ . Na Linha Verde, a inserção de vegetação no canteiro central, afetaria a  $T_a$  nos passeios em  $0,6^\circ\text{C}$ , em média.

Para São Paulo, os resultados encontrados na comparação entre o ponto medido na fração urbana do Belém (local sem vegetação), e o ponto monitorado na fração urbana do Jardim Paulista (local influenciado pelo sombreamento das copas das árvores) apresentou uma diferença média de  $2,0^\circ\text{C}$  na temperatura do ar. Com base nos resultados das simulações, observou-se que a partir da inserção de arborização em ambos os lados da rua na fração urbana do Belém e

consequentemente maior aproximação dos valores de fator de visão do céu entre as frações, foi possível chegar ao mesmo nível de estresse térmico medido no Jardim Paulista.

A escolha de árvores com determinados padrões e valores de densidade de área foliar influencia na permeabilidade dos ventos, podendo afetar a sensação térmica dos transeuntes. Na presente pesquisa foi notado que a inserção de árvores com 15 m de altura, copa densa e sem folhagem na base, provoca uma redução de cerca de 50% na velocidade do vento. É importante considerar que menor importância foi dada ao ajuste de direção do vento entre dados medidos e preditos (comparativamente ao cuidado com a  $T_a$  e os índices de conforto). Mas considera-se que a direção do vento contribui para o padrão espacial horizontal da temperatura ambiente.

A densidade da copa está relacionada à qualidade da sombra. Considera-se, portanto, que outros tipos de árvore poderiam oferecer resultados diferentes, fato comprovado no estudo para a cidade de Genebra, quando foi verificado que árvores de mesma altura, mas com diferença na densidade da copa têm impactos distintos no microclima. Já áreas gramadas contribuem, em média, com uma redução de 0,2°C na temperatura ambiente.

Segundo Bowler *et al.* (2010), com base na revisão de 24 estudos que consideraram a observação de 125 parques urbanos, foi possível constatar que áreas vegetadas podem apresentar, em relação ao entorno imediato, uma redução média de 0,94°C na temperatura ambiente durante o dia. No perímetro de estudo na cidade de Paris, considerando a comparação entre os dados obtidos em campo entre o parque consolidado (Jardim de Villemin, P0 – ponto situado próximo a copa das árvores) e o entorno (P1), foi percebido uma diferença média de 1,0°C e uma redução máxima de até 1,7°C na temperatura do ar. No parque urbano simulado (Jardins d'Eole) foi possível obter o mesmo valor de redução máxima de  $T_a$  quando comparado o cenário sem árvores ao plano de arborização já consolidado.

A utilização de vegetação arbórea é mais eficiente que somente área gramada, pois proporciona sombreamento. Porém, considera-se que a combinação de diferentes estratégias poderia oferecer, durante o período diurno, um ambiente térmico externo mais aceitável. Assim, poderiam ser combinados à arborização, o uso de áreas gramadas, telhados verdes e a utilização de cores claras nas paredes das edificações.

A combinação de diferentes elementos torna-se uma estratégia importante para diminuir o nível de estresse térmico dos espaços abertos, uma vez que, a partir do índice proposto na presente pesquisa foi possível perceber que um acréscimo considerável de área verde (49%) seria necessário para uma redução de 1°C na temperatura do ar e nem sempre as condições locais permitem a inserção da quantidade de árvores necessárias, bem como a distribuição ideal das mesmas.

Em cidades com ocorrência de ondas de calor, a vantagem de um plano de arborização é o custo relativamente baixo de implantação se considerar o benefício na redução das categorias de estresse térmico e no impacto na saúde pública. A importância do índice desenvolvido, incluindo a metodologia proposta, reside na possibilidade de fornecer aos urbanistas, dados quantitativos de cobertura vegetal, auxiliando no desenho urbano climaticamente orientado.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta seção trata da acuidade do modelo ENVI-met, da avaliação dos índices de conforto térmico Temperatura Fisiológica Equivalente (PET) e Universal Thermal Climate Index (UTCI), das limitações da pesquisa e das sugestões para futuras pesquisas.

### - Acuidade do modelo ENVI-met

O modelo na versão ENVI-met 3.1 Beta 5, embora apresente algumas limitações previamente conhecidas, como: a modelagem ortogonal (que implica na simplificação da forma urbana), a padronização da temperatura interna das edificações a um valor constante e a desconsideração do efeito de inércia térmica da massa edificada, mostrou-se eficaz para o cumprimento dos objetivos propostos na pesquisa. O modelo tem sido empregado em diversos estudos, no entanto, são poucos os que utilizam testes estatísticos para a validação dos dados.

Uma das principais dificuldades em lidar com o modelo ENVI-met é estabelecer critérios para satisfazer o ajuste de dados medidos e simulados, pois como o ambiente térmico urbano lida com a influência da interação de diversos variáveis climáticas, não é possível obter um cenário simulado idêntico ao cenário real, monitorado. É necessário então, escolher qual variável utilizar como parâmetro de referência e tratar os resultados como indicadores de tendências.

A partir dos estudos desenvolvidos para as diferentes configurações urbanas em cidades distintas, observou-se que, embora a temperatura radiante média ( $T_{rm}$ ) seja a variável mais importante para a determinação dos índices de conforto, é difícil obter um padrão de curva simulada semelhante à medida em campo, pois a  $T_{rm}$  simulada tende a ser superestimada em relação a  $T_{rm}$  predita em campo. Nesse sentido, optou-se pela temperatura do ar ( $T_a$ ) como variável de referência (observação do padrão da curva medida e predita e aplicação dos testes estatísticos). Para as outras variáveis climáticas, recomenda-se utilizar valores médios simulados em comparação com valores médios medidos.

Para as configurações dos dados de entrada, devem ser utilizados valores médios diários das variáveis climáticas. No entanto, ao longo do processo de ajuste de dados entre cenário real e simulado, notou-se a necessidade de modificar alguns

parâmetros para que a correspondência entre tais cenários fosse mais próxima possível dos dados monitorados em campo.

Nas localidades simuladas em Genebra e Paris, o ajuste entre dados preditos e medidos apresentou resultados estatísticos satisfatórios considerando as ações necessárias para suprir as dificuldades encontradas, como o tempo de iteração e a criação de uma plataforma para criar uma topografia simplificada. Mesmo assim, o modelo ENVI-met, diante da complexidade de modelar o microclima urbano e o próprio ambiente urbano, mostrou ser útil para previsão de projetos futuros, propiciando dados quantitativos sobre a qualidade térmica das cidades, fato que deveria ser considerado no planejamento urbano.

- Avaliação dos índices de conforto térmico Temperatura Fisiológica Equivalente (PET) e Universal Thermal Climate Index (UTCI)

Em geral, o índice de conforto térmico PET superestima os valores do índice UTCI. Como resultado, o PET tende a classificar em uma categoria acima o estresse térmico de determinada localidade quando comparado ao UTCI. Detectou-se, também, que no UTCI as categorias de estresse térmico possuem uma faixa mais ampla do que o índice PET, o qual mostrou ser mais sensível as alterações na cobertura vegetal.

Vale ressaltar que as faixas de conforto de cada índice não estão ajustadas para cada localidade analisada. Considera-se que o fundamental nessa pesquisa foi perceber a possibilidade de mudanças de categorias de conforto térmico a partir de cenários urbanos alternativos.

- Limitações da pesquisa

Lidar com o ambiente urbano (espaços abertos) faz com o pesquisador se depare com diversas limitações. A primeira dificuldade encontrada na pesquisa foi em relação à obtenção dos dados microclimáticos coletados em campo. O ideal seria que tivessem sido obtidos dias considerando um ciclo completo de 24 horas, possibilitando uma análise aprofundada do comportamento do ambiente térmico urbano. Era desejável, também, um número maior de dias monitorados, possibilitando escolher dias com condições atmosféricas estáveis. No entanto, isso exigiria um número maior de pessoas disponíveis para auxiliar na vigilância dos equipamentos de medição. Além disso, em algumas localidades, como na estação

ferroviária de Praille (Genebra) ou no parque urbano em Paris, havia um horário restrito para a coleta de dados, pois tais locais fechavam ao público, não sendo liberada a permanência após determinado horário.

Em São Paulo, no Bairro Belém e no Jardim Paulista e em Curitiba, na Avenida Sete de Setembro e na Linha Verde, a questão da segurança foi o grande empecilho para um período mais abrangente de coleta de dados.

Outro fator a ser considerado seria um número maior de localidades para o desenvolvimento do índice proposto, o qual relaciona área verde e densidade construída em termos de redução na temperatura do ar.

#### - Sugestões para pesquisas futuras

Para a realização de futuras pesquisas, sugerem-se:

- especificamente para a Avenida Linha Verde, a simulação de cenários alternativos a partir das diretrizes urbanas para o compartimento urbano da OUC-LV, permitindo incluir a influência da forma urbana no microclima, além da inserção da vegetação;
- avaliar outros cenários alternativos para as localidades consideradas na pesquisa, possibilitando o desenvolvimento de um índice que não se restrinja à arborização, mas também às superfícies gramadas;
- investigar a partir dos cenários propostos nesta pesquisa, a influência do ambiente térmico externo para o interior das edificações;
- estimar os custos e economia proporcionada pela implantação de área vegetada, ou seja, expandir a análise para além dos benefícios ao campo térmico.

É importante reiterar que os resultados encontrados nesta pesquisa referem-se apenas a contextos climáticos particulares e a um período de medição/simulação específico. Mesmo assim, o presente estudo pode servir como base para situações climáticas semelhantes e abordagens futuras sobre o tema. Além disso, ressalta-se que a utilização de simulações computacionais, embora não seja uma prática comum nos órgãos e institutos de planejamento da cidade, poderia auxiliar nas decisões que envolvem a criação de planos urbanos, criando maior vínculo entre a climatologia e o urbanismo.

## REFERÊNCIAS

ALBERTS, W. Modeling the wind in the town-planning process. **Energy and Build.**, v. 4, p. 71–76, 1982.

ALI-TOUDERT, Fazia. **Dependence of Outdoor Thermal Comfort on Street Design in Hot and Dry Climate**. 2005. 206f. Tese (Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg) – Universität Freiburg, Freiburg, 2005. Disponível em: <[http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/2078/pdf/Diss\\_Freidok\\_Ali\\_Toudert\\_Fazia.pdf](http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/2078/pdf/Diss_Freidok_Ali_Toudert_Fazia.pdf)>. Acesso em: 01 ago. 2009.

ALI-TOUDERT, Fazia; MAYER, Helmut. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. **Building and Environment**, v. 41, n. 2, p. 94–108, 2006.

ANDRADE, Henrique. O Clima Urbano – Natureza, Escalas de Análises e Aplicabilidade. **Finisterra – Revista Portuguesa de Geografia**, Lisboa, v. XL, n. 80, p. 67–91, 2005. Disponível em: <[http://www.ceg.ul.pt/finisterra/numeros/2005-80/80\\_05.pdf](http://www.ceg.ul.pt/finisterra/numeros/2005-80/80_05.pdf)>. Acesso em: 05 ago. 2009.

ANTONUCCI, Denise. **Morfologia urbana e legislação urbanística**: estudo de setores de bairros na cidade de São Paulo. 2006. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

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**, v. 1, p. 245–255, 2012.

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

ASSIS, Eleonora S. A abordagem do clima urbano e aplicações no planejamento da cidade: reflexões sobre uma trajetória. In: ENCONTRO NACIONAL E IV ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8, 2005, Maceió. **Anais...**Maceió: ENCAC-ELACAC, 2005. p. 92-101.



ASSIS, Eleonora S. **Impactos da forma urbana na mudança climática: método para a previsão do comportamento térmico e melhoria de desempenho do ambiente urbano**. 2000. 273 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2000.

ASSIS, Eleonora S. Aplicações da climatologia urbana no planejamento da cidade: revisão dos estudos brasileiros. **Rua** (Revista de Urbanismo e Arquitetura), v. 1, n. 9, p. 20-25, 2006.

AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 9 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003.

BARBOSA, Milton. **Influência do paisagismo e tecnologia construtiva no clima e qualidade de espaços residenciais com exemplo na Vila Tecnológica de Curitiba**. 2008. 157 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Programa de Pós Graduação em Tecnologia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

BEAUMONT, Arnaud. **Les Jardins d'Éole: la réhabilitation d'un quartier par un jardin public?** 2008. Dissertação (Master em Magistère d'Urbanisme et d'Aménagement). Université Paris. Disponível em [http://issuu.com/arnaudbeaumont/docs/memoire\\_jardins\\_d\\_eole\\_a.beaumont](http://issuu.com/arnaudbeaumont/docs/memoire_jardins_d_eole_a.beaumont).

BOWLER, D.E.; BUYUNG-ALI, L. M.; KNIGHT, T. M.; PULLIN, A. S. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. **Landscape Urban Plann**, v. 97, p. 147–155, 2010.

BRANCO, Lorena M. B. C. **Microclimas urbanos no plano piloto de Brasília: o caso da superquadra 108 Sul**. 2009. 141 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

BRÖDE, P.; KRÜGER, E. L.; FIALA, D. UTCI in practical application to the assessment of urban outdoor thermal comfort. Paper accepted by **Geographia Polonica** (in press), 2012.

BRÖDE, P.; KRÜGER, E. L.; ROSSI, F.; FIALA, D. Predicting urban outdoor thermal comfort by the Universal Thermal Climate Index UTCI - a case study in Southern Brazil. . **Int J Biometeorol**, v.56, n. 3, p. 471-480, 2012.

BRÖDE, Peter; FIALA, D; BLAZEJCZYK, K; HOLMER, I; JENDRITZKY, G; KAMPMANN, B; TINZ, B; HAVENITH, G. Deriving the Operational Procedure for the Universal Thermal Climate Index UTCI. **Int J Biometeorol**, special issue UTCI, p.1-14, 2011.

BRUSE, Michael. **ENVI-met website**. Disponível em: <<http://www.envi-met.com>>. Acesso em: 21 jan. 2012.

BRUSE, Michael; 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.

BUSTOS ROMERO, Marta A. **Arquitetura Bioclimática do espaço público**. Brasília: Universidade de Brasília, 2001, 225 p.

CAMPBELL, S. **Application Note**: Weather Station Siting and Installation Tools. 1997.

CAMPOS, R. F. **Análise da influência da orientação da testada dos lotes na ocupação do Setor Estrutural de Curitiba**. 2005. 202f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. Disponível em: <[www.ppgcc.ufpr.br/dissertacoes/d0062.pdf](http://www.ppgcc.ufpr.br/dissertacoes/d0062.pdf)>. Acesso em: 03 mar. 2010.

CARFAN, Ana C. **Análise do conforto térmico em áreas abertas no município de Ourinhos-SP**. 2011. 168 f. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

CASTRO, Fernando. Prefeitura de Curitiba prevê início das obras do metrô para julho de 2014. **G1 PR**, Curitiba, jan. 2014. Disponível em: <<http://g1.globo.com/pr/parana/noticia/2014/01/prefeitura-de-curitiba-preve-inicio-das-obras-do-metro-para-julho-de-2014.html>>. Acesso em: 19 mar. 2014.

CHANDLER, Tony J. Night-time temperatures in relations to Leicester's urban form. **Meteorol. Mag.**, v. 96, p. 244–250, 1967.

CHAPMAN, Lee. Towards a tree-view factor. Why do urban climatologists dislike trees? **IAUC Newsletter**, v. 25, p. 4–6, 2007.

CHAPMAN, Lee; THORNES, John E.; BRADLEY, Andrew V. Rapid determination of canyon geometry parameters for use surface radiation budgets. **Theoretical Appl. Climatol.**, v. 69, n.1-2, p. 81-89, 2001.

CHEN, Y.; WONG, N. H. Thermal benefits of city parks. **Energy and Buildings**. 38, 105–120, 2006.

CHUDNOVSKY, A.; BEN-DOR, E.; SAARONI, H. Diurnal thermal behavior of selected urban objects using remote sensing measurements. **Energy and Buildings**, v. 36, n.11, p.1063-1074, 2004.

CLIMATEDATA.EU. **Climate Geneva - Switzerland**. Disponível em: <<http://www.climatedata.eu/climate.php?loc=szxx0013&lang=en>>. Acesso em: 28 mar. 2013.

COHEN, P.; POTCHTER, O.; MATZARAKIS, A. Daily and seasonal climatic conditions of green urban open spaces in the Mediterranean climate and their impact on human comfort. **Build Environ**, v. 51, p. 285-295, 2012.

COWAN, I. R.; CASTRO, I. P.; ROBINS, A. G. Numerical considerations for simulations of flow and dispersion around buildings. **J. Wind Eng. & Ind. Aerodynam**, 67/68, p. 535–545, 1997.

CURITIBA. Consulta pública do metrô termina com 5,9 mil acessos e 65 contribuições. **Agência de Notícias da Prefeitura de Curitiba**. Disponível em: <<http://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/consulta-publica-do-metro-termina-com-59-mil-acessos-e-65-contribuicoes/32041>>. Acesso em: 12 fev. 2014.

CURITIBA. Descrição técnica. **Agência de Notícias da Prefeitura de Curitiba**. Disponível em: <<http://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/descricao-tecnica/31757>>. Acesso em: 10 jan. 2014.

CURITIBA. **Lei ordinária nº 2.828, de 10 de agosto de 1966**. Institui o Plano Diretor de Curitiba e aprova as suas Diretrizes Básicas, para orientação e controle do desenvolvimento integrado do Município. Diário Oficial do Município. Curitiba, 1966.

CURITIBA. **Lei ordinária nº 4.199, de 08 de maio de 1972**. Dispõe sobre o zoneamento, uso e ocupação do solo no município de Curitiba, revoga as leis nº 4.199/72, 5.234/75, 5.263/75, 5.490/76, 6.204/81, 6.769/85, 7.068/87 e 7.622/91, e dá outras providências. Diário Oficial do Município. Curitiba, 1972.

CURITIBA. **Lei ordinária nº 5.234, de 10 de dezembro de 1975.** Modifica a Lei nº 4.199/1972 e dá outras providências. Diário Oficial do Município. Curitiba, 1975.

CURITIBA. **Lei ordinária nº 6.337, de 28 de setembro de 1982.** Institui incentivo construtivo para a preservação de imóveis de valor cultural, histórico ou arquitetônico. Diário Oficial do Município, Curitiba, 1982.

CURITIBA. **Lei ordinária nº 9.800, de 03 de janeiro de 2000.** Dispõe sobre o Zoneamento, Uso e Ocupação do Solo no Município de Curitiba e da providências. Diário Oficial do Município, Curitiba, 2000.

CURITIBA/ INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO URBANO DE CURITIBA (IPPUC). **Estudo de Impacto Ambiental da Linha Azul - Santa Cândida/CIC Sul do Sistema de Metrô de Curitiba no Eixo Norte/Sul da Rede Integrada de Transporte.** Volume I EIA da Linha Azul. 2010. Disponível em: <<http://www.curitiba.pr.gov.br/conteudo/consulta-eiarima-metro-curitibano-secretaria-municipal-do-meio-ambiente/467>>. Acesso em: 23 mar. 2013.

CURITIBA/ INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO URBANO DE CURITIBA (IPPUC). **Estudo de Impacto Ambiental da Operação Urbana Consorciada LINHA VERDE – OUC-LV.** 2012. Disponível em: <<http://www.curitiba.pr.gov.br/conteudo/cepac-eiarima/573>>. Acesso em: 23 mar. 2013.

DABBERDT, Walter F.; LUDWIG, F. L.; JOHNSON, Warren B. . Validation and applications of an urban diffusion model for vehicular pollutants. **Atmos Environ.**, v. 7, p. 603–618, 1973.

DANNI-OLIVEIRA, Inês Moresco. Aspectos Climáticos de Curitiba-PR: uma contribuição para o ensino médio. **RA'EGA O Espaço Geográfico em Análise**, Curitiba, n. 3, p. 229-253, 1999.

DANNI-OLIVEIRA, Inês. M. A Cidade de Curitiba e a Poluição do Ar: Implicações de seus atributos urbanos e geoecológicos na dispersão de poluentes em período de inverno. In: MONTEIRO, CARLOS. A. F.; MENDONÇA, F (Orgs). **Clima Urbano.** São Paulo: Contexto, 2003. 192 p.

DANNI-OLIVEIRA, Inês. M. Considerações Sobre a Poluição do Ar em Curitiba-PR Face a Seus Aspectos de Urbanização. **Revista Ra 'E Ga**, Curitiba, n. 4, p.101-110. 2000.

DEMOGRAPHIA WORLD URBAN AREAS. **Built-Up Urban Areas or World Agglomerations**. 10th Annual Edition. 2014. Disponível em: <[www.demographia.com/db-worldua.pdf](http://www.demographia.com/db-worldua.pdf)>. Acesso em: 30 out. 2014.

DEPARTAMENTO DE ESTATÍSTICA E PRODUÇÃO DE INFORMAÇÃO (DIPRO). **CD ROM**. DIPRO, 2011.

ELIASSON, Ingegärd. Urban Nocturnal Temperatures, Street Geometry and Land Use. **Atmos. Environ.**, v. 30, p. 379-392, 1996.

ENDLICHER, Wilfried (Org.) *et al.* Heat Waves, Urban Climate and Human Health. In: MARZLUFF, JOHN *et al.* **Urban ecology: an international perspective on the interaction between humans and nature**. Nova York: Springer, 2008. p. 269-278.

ERELL, E.; PEARLMUTTER, D.; WILLIAMSON, T. **Urban microclimate : designing the spaces between buildings**. Earthscan/James & James Science Publishers, London, 2011, 266p.

ERELL, Evyatar; WILLIAMSON, Terence. The spatial variability of air temperature in the urban canopy layer. In: 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, 2, 2007, Grécia. **Proceedings**...Grécia: PALENC, 2007. p. 304-306.

FAHMY, M.; SHARPLES, S. On the development of an urban passive thermal comfort system in Cairo, Egypt. **Build Environ**, v. 44, n. 9, p. 1907–1916, 2009.

FELDMAN, Sarah. **Planejamento e Zoneamento: São Paulo 1947/1972**. São Paulo: EdUSP, FAPEST, 2005.

FERREIRA, Daniele G.; FERREIRA, Clara M. O.; ASSIS, Eleonora. Classificação de Rugosidade em Tecido Urbano Parte I: fundamentação teórica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16., 2010, Belém. **Anais**... Belém, 2010. 5p. Disponível em: <[www.cbmet2010.com/anais/artigos/353\\_63490.pdf](http://www.cbmet2010.com/anais/artigos/353_63490.pdf)>. Acesso em: 21 mar. 2013.

FERREIRA, Maurício J. **Estudo do balanço de energia na superfície da cidade de São Paulo**. 2010. 149 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 2010.

FIALA, D; HAVENITH, G; BRÖDE, P; KAMPMANN, B; JENDRITZKY, G. UTCI-Fiala multi-node model. *Int J Biometeorol*, v. 56, n. 3, p. 429-41, 2012.

FILL, Heinz D; SUGAI, Martha R. V. B.; HILU, Andrey. Caracterização Climatológica da Região Metropolitana de Curitiba. **Engenharia e Construção**, Curitiba, n. 28, p. 17–21, 1999.

GADILHE, A.; JANVIER, L.; BARNAUD, G. Numerical and experimental modelling of the three-dimensional turbulent wind flow through an urban square. **J. Wind Eng. & Ind. Aerodynam**, 46 & 47, p. 755–763, 1993.

GHIAUS, Cristian *et al.* Urban environment influence on natural ventilation potential. **Building and Environment**, v. 41, n.4, p. 395–406, 2006.

GILL INSTRUMENTS. **Website**. Disponível em: <<http://www.gill.co.uk/products/anemometer/windsonic.htm>>. Acesso em: 29 mar. 2013

GIVONI, Baruch. **Climate Considerations in Building and Urban Design**. Nova York: Van Nostrand Reinold, 1998.

GIVONI, Baruch. Impact of Planted Areas on Urban Environmental Quality: A review. *Atmos. Environ. Part B. Urban Atmosphere*, v. 5B, n. 3, p. 289–299, 1991.

GIVONI, Baruch. **Man, Climate and Architecture**. Londres: Applied Science Publishers LTD, 1969.

GOOGLE Inc. **Google Earth**. Disponível em: <<http://earth.google.com/>>. Acesso em: 19 dez. 2012.

GOULART, S.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras**. Florianópolis: PROCEL/Núcleo de Pesquisa em Construção, UFSC, 1998.

GRIMMOND, C. Sue B. *et al.* Climate and More Sustainable Cities: Climate Information for Improved Planning and Management of Cities (Producers/Capabilities Perspective). **Procedia Environmental Sciences**, v. 1, p. 247–274, 2010. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878029610000174>>. Acesso em: 19 mar. 2013.

GRIMMOND, C. Sue B. *et al.* The International Urban Energy Balance Models Comparison Project: First Results from Phase 1. **J. Appl. Meteor. Climatol.**, v. 49, p. 1268–1292, 2010. Disponível em : <<http://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/2010JAMC2354.1>>. Acesso em: 19 mar. 2013.

GRIMMOND, C. Sue B.; CLEUGH, H. A.; OKE, T. R. An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes. **Atmospheric Environment**, v. 25B, n. 3, p. 11–326, 1991.

GRIMMOND, C. Sue B.; SOUCH, C.; HUBBLE, M. D. Influence of tree cover on summertime surface energy balance fluxes, San Gabriel Valley, Los Angeles. **Climate Research**, v. 6, n.1, p. 45-57, 1996.

GULYAS, A; UNGER, J.; MATZARAKIS., A. Assessment of the microclimatic and human comfort conditions in a complex urban environment: modelling and measurements. **Build Environ**, v. 41, p. 1713–1722, 2006.

HE, Jianming; SONG, Charles C.S. Evaluation of pedestrian winds in urban area by numerical approach. **J. Wind Eng. & Ind. Aerodynam**, v. 81, p. 295–309, 1999.

HOLMER, Björn; ELIASSON, Ingegärd. Urban-rural vapour pressure differences and their role in the development of urban heat islands. **Int. Journ. Climatol.**, v. 19, p. 989 – 1010, 1999.

HÖPPE, Peter. The Physiological Equivalent Temperature: a index for the biometeorological assessment of the thermal environment. **International Journal of Biometeorology**, n.43, p. 71–75, 1999.

HOSKER, R. P. Jr. Flow around isolated structures and building clusters: A review. **ASHRAE Trans.**, v. 91, Part 2B, 1986.

ICHINOSE, T.; SIMOHDOZONO, K. ; HANAKI, K. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. **Atmospheric Environment**, v. 33, p. 3897–3909, 1999.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Anuário Estatístico do Brasil 2010**. v. 70. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Anuário Estatístico do Brasil 2013**. v. 70. Rio de Janeiro: IBGE, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000**. Comunicação Social, 27 de março de 2002. Disponível em: <[www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/27032002pnsb.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/27032002pnsb.shtm)>. Acesso em: 23 mar. 2013.

INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO URBANO DE CURITIBA (IPPUC). **Análise de projetos e estudos existentes**. Documento Técnico. Curitiba: IPPUC, 2010.

INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO URBANO DE CURITIBA (IPPUC). **Plano Diretor de Curitiba 2004**. O planejamento urbano de Curitiba. Curitiba: IPPUC, 2004. Disponível em: <<http://www.ippuc.org.br/>>. Acesso em 04 jan. 2012.

INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO URBANO DE CURITIBA (IPPUC). **Website**. Disponível em: <<http://www.ippuc.org.br/mostrarpagina.php?pagina=31&%20idioma=1>>. Acesso em 04 de jan. de 2012.

INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO URBANO DE CURITIBA (IPPUC)/ FUNDAÇÃO INSTITUTO DE PESQUISAS ECONÔMICAS (FIPE) a. **Estudo de impacto ambiental da Operação Urbana Consorciada Linha Verde – EIA – OUCLV**. São Paulo, v. I, 2012. Disponível em: <<http://www.curitiba.pr.gov.br/conteudo/operacao-urbana-eia/560>>. Acesso em 04 jan. 2013.

INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO URBANO DE CURITIBA (IPPUC)/ FUNDAÇÃO INSTITUTO DE PESQUISAS ECONÔMICAS (FIPE) b. **Estudo de impacto ambiental da Operação Urbana Consorciada Linha Verde – EIA – OUCLV**. São Paulo, v. II, 2012. Disponível em: <<http://www.curitiba.pr.gov.br/conteudo/operacao-urbana-eia/560>>. Acesso em 04 jan. 2013.



INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 7726:** ergonomics of the thermal environment: instruments of measuring physical 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 thermal comfort criteria. Suíça: ISO, 2005.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 8996:** Ergonomics of the thermal environment: determination of metabolic rate. Switzerland, ISO, 2004.

INTERNATIONAL SOCIETY OF BIOMETEOROLOGY. **Commission 6 for the Development of a Universal Thermal Climate Index (UTCI).** Meeting Report, Freiburg, Germany, June 7-8, 2001. Freiburg: ISB Commission, 2001.

JACOBS, C. M. J. **Direct impact of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on regional transpiration.** 1994. 179 f. Ph.D. thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands, 1994.

JENDRITZKY G.; HAVENITH G.; WEIHS P.; BATCHVAROVA E. Towards a Universal Thermal Climate Index UTCI for assessing the thermal environment of the human being, **Final Report COST Action 730**, 2009.

JOHANSSON, Erik. **Urban design and outdoor thermal comfort in warm climates – studies in Fez and Colombo**, 2006. Thesis (PhD in architecture), Housing Development & Management, Lund University, Lund, Sweden, 2006.

JOURDA ARCHITECTS. **Website.** Disponível em: < <http://www.jourda-architectes.com/>>. Acesso em: 30 ago. 2012.

KAIMAL, J.C.; FINNIGAN, J.J. **Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement.** New York: Oxford: Oxford University Press, 1994. 289p.

KIPP & ZONEN. **Website.** Disponível em: <<http://www.kippzonen.com/?product/991/SP+Lite2.aspx>>. Acesso em: 29 mar. 2013

KNOWLES, Ralph L. The solar envelope: its meaning for energy and buildings. **Energy and buildings**, v. v 35, n. 1, p. 15–25, 2003.

KONDOH, A.; NISHIYAMA, J. Changes in hydrological cycle due to urbanization in the suburb of Tokyo Metropolitan area, Japan. **Advances in Space Research**, v.26, n.7, p.1173-1176, 2000.

KRÜGER, Eduardo L.; PEARLMUTTER, David; BERLINER, Pedro. Efeito da evapotranspiração em modelo reduzido de um arranjo urbano sob condições desérticas. In: IX Encontro Nacional e V Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2007, Ouro Preto. **Anais do IX ENCAC**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. v. 1. p. 1-10.

LABAKI, Lucila Chebel; SANTOS, Rozely F.; BUENO-BARTHOLOMEI, Carolina L.; ABREU, Loyde V. Vegetação e conforto térmico em espaços urbanos abertos. **Fórum Patrimônio**, Belo Horizonte, v. 4, n. 1, p. 23-42, 2011

LAMBERTS, Roberto; XAVIER, Antonio A. P. **Apostila didática: Conforto Térmico e Stress Térmico**. Florianópolis, 2002. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/arquivos/publicacoes/Apconf.pdf>>. Acesso em: 05 ago. 2009.

LANDSBERG, Helmut E. **The urban climate**. Nova York: Academic Press, 1981.

LE GRAND PARI. **Website**. 2012. Disponível em<<http://www.mon-grandparis.fr/>>. Acesso em: 21 mai. 2012.

LEE, D. O. Urban–rural humidity differences in London. **Int. J. Climatol.**, v. 11, p. 577–582, 1991.

LI, Y., STATHOPOULOS, T. Numerical evaluation of wind-induced dispersion of pollutants around a building. **J. Wind Eng. & Ind. Aerodynam**, 67&68: p. 757–766, 1997.

LIMA, Lucimeire P. **Clima e forma urbana: métodos de avaliação do efeito das condições climáticas locais nos graus de conforto térmico e no consumo de energia elétrica em edificações**. 2005. 153 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Programa de Pós Graduação em Tecnologia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

LOIS, E.; LABAKI, Lucila C. Conforto térmico em espaços externos: uma revisão. In: 6. ENCONTRO NACIONAL e 3. ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...** São Pedro, 2001.

MACEDO, Silvio S. São Paulo, paisagem e habitação verticalizada: os espaços livres como elementos de desenho urbano. 1988. 351 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.

MASCARÓ, Lucia. **Ambiência Urbana**. 1 ed. Porto Alegre: Sagra – DC Luzzatto, 1996.

MASSON, V; LION, Y; PETER, A; PIGEON, G; BUYCK, J; BRUN, E. Grand Paris: regional landscape change to adapt city to climate warming. **Clim. Change**, 2012.

MATZARAKIS, A.; RUTZ, F.; MAYER, H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model. **Int J Biometeorol**, v. 51, p. 323–334, 2007.

MAYER, Helmut; MATZARAKIS, Andreas. Human-biometeorological assessment of urban microclimates' thermal component. In: Int. Symposium on Monitoring and Management of Urban Heat Island. Fujisawa, Japan. **Proceedings...** 1998, p.155-168. 1998.

METEO-FRANCE/DIRIC/BEC. **Rapport sur le volet 1** : Evolution du climat urbain de Paris dans la perspective du changement climatique. Appel a projets 2007 de La Ville De Paris. Programme de recherche sur Paris, 2011. Disponível em: <<http://www.cnrm.meteo.fr/spip.php?article271&lang=fr>> Acesso em: 06 jun 2012.

MICRODAQ. **Website**. Disponível em: <<http://www.microdaq.com>>. Acesso em: 1 ago. 2009

MILLS, Gerald. Cities as agents of global change. **Int. J. Climatol.**, v. 27, p. 1849–1857, 2007.

MILLS, Gerald. Progress toward sustainable settlements: a role for urban climatology. **Theoretical and Applied Climatology**. Viena, v. 43, n. 84, p. 69–76, 2006.

MINELLA, Flavia C. O. **Avaliação da influência de aspectos da geometria urbana sobre os níveis de conforto térmico em ruas de pedestres de Curitiba**. 2009. 163f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Programa de Pós Graduação em Tecnologia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

MINELLA, Flavia C. O.; HONJO, Susan; KRÜGER, Eduardo L. Estratégias de melhoria do ambiente térmico diurno em situação de verão de uma fração urbana da cidade de São Paulo. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 4, p. 139–158, 2012.

MINELLA, Flavia C. O.; RASIA, Francisco; KRÜGER, Eduardo L. . Impactos microclimáticos da morfologia urbana: comparação preliminar entre dois modelos de urbanização em Curitiba. In: Entac 2010 - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2010, Canela RS. **Anais...** Porto Alegre RS: ANTAC, 2010. v. 1. p. 1-11, 2010.

MINISTÈRE DE LA CULTURE ET DE LA COMMUNICATION. **Le grand pari de l'agglomération parisienne : consultation internationale**. 2009. Disponível em: <<http://www.culture.gouv.fr/culture/actualites/communiq/albanel/artgpagglo.html>>. Acesso em: 3 nov. 2014

MOIN, Uddim M.; TSUTSUMI, Jun-ichiro. Rapid Estimation of Sky View Factor and Its Application to Human Environment. **Journal of the Human-Environment System**, v.7, n.2, p.83-87, 2004.

MONTEIRO, Carlos A. F. Clima. In: **Grande Região Sul**, Geografia do Brasil, v. IV, Tomo I. Rio de Janeiro: IBGE, 1963.

NAÇÕES UNIDAS. **World Urbanization Prospects: the 2011 revision**. New York: UN, 2012.

NAKAMURA, Y.; OKE, Tim R. Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. . **Atmos Environ.**, v. 22, n. 12, p. 2691–2700, 1988.

NAKATA, Camila M. **Comportamento do pedestre e ambiente térmico urbano**. 2010. 132 f. Dissertação (Mestrado em Design). Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2010.

NG, E.; LIANG, C.; WANG, Y. N.; YUAN, C. A study on the cooling effects of greening in high-density city: an experience from Hong Kong. **Build Environ.**, v. 47, p. 256–271, 2012.

OFFERLE, B. ; GRIMMOND, C.S.B. ; FORTUNIAK, K. Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central European city center. **International Journal of Climatology**, v. 25, p. 1405–1419, 2005.

OFFICE CANTONAL DE LA STATISTIQUE (OCSTAT). **Les logements inoccupés et les surfaces d'activités vacantes à Genève en 2010**. 2010. Disponível em: <<http://www.ge.ch/statistique/tel/publications/2010/resultats/dg-rs-2010-12.pdf>>. Acesso em: 21 jan 2012.

OFFICE CANTONAL DE LA STATISTIQUE (OCSTAT). Office cantonal de la statistique. **La construction dans le canton de Genève en 2011**. 2012. Disponível em: <[http://www.ge.ch/statistique/tel/compresse/2012/geneve\\_cp\\_2012\\_04.pdf](http://www.ge.ch/statistique/tel/compresse/2012/geneve_cp_2012_04.pdf)>. Acesso em: 21 jan 2012.

OKE, Tim R. **Boundary Layer Climates**. 2 ed. Londres: Routledge, 1987. 435p.

OKE, Tim R. **Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites**. Report N°. 81, WMO/TD-No. 1250. Geneva : World Meteorological Organization, 2006. Disponível em : <<http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-81/IOM-81-UrbanMetObs.pdf>>. Acesso em: 05 ago. 2009.

OKE, Tim R. **Review of Urban Climatology**. WMO Technical Note N° 134, WMO N° 383, p. 1968–1973. Geneva: World Meteorological Organization, 1974.

OKE, Tim R. Street design and urban canopy layer climate. **Energy and Buildings**, v. 11, p. 103–113, 1988.

OKE, Tim R. Towards a Prescription for the Greater Use of Climatic Principles in Settlement Planning. **Energy and Buildings**, v. 7, 1–10, 1984.

OLGYAY, Victor. **Arquitectura y clima**. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas. Barcelona, Editorial Gustavo Gili, 1998.

PARIS / SOCIÉTÉ D'ECONOMIE MIXTE DE LA VILLE. **Dossier de Presse. 2012**. ZAC Pajol – Paris 18eme. Disponível em: <[http://www.semaest.fr/sites/default/files/dossier\\_de\\_presse\\_zac\\_pajol\\_01.2012.pdf](http://www.semaest.fr/sites/default/files/dossier_de_presse_zac_pajol_01.2012.pdf)> . Acesso em: 30 ago. 2012.

PARIS. **Plan Climat de Paris**. 2012. Disponível em: <[http://www.paris.fr/pratique/energie-plan-climat/le-plan-climat-de-paris/le-plan-climat-de-paris/rub\\_8413\\_stand\\_69591\\_port\\_19609](http://www.paris.fr/pratique/energie-plan-climat/le-plan-climat-de-paris/le-plan-climat-de-paris/rub_8413_stand_69591_port_19609)>. Acesso em 30 ago. 2012.

PEARLMUTTER, David. 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, jun. 1998. **Anais...**Lisboa, Portugal: PLEA, 1998. p. 163-166.

POUMADÈRE, M; MAYS, C; LE MER, S; BLONG, R. The 2003 heat wave in France: dangerous climate change here and now. **Risk Analysis**, v. 25, n. 6, p. 1483–1494, 2005.

RAFAILIDIS, Stylianos. Influence of building areal density and roof shape on the wind characteristics above a town. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 85, p. 255–271, 1997.

RASIA, Francisco B. C. **Simulação e análise da dispersão de poluentes nas vias estruturais em Curitiba, Paraná**. 2011. 211 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Programa de Pós Graduação em Tecnologia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

REPUBLIC ET CANTON DE GENEVE. **Multimédia**. Disponível em: <[http://etat.geneve.ch/pav/a\\_votre\\_service-multimedia-11662.html](http://etat.geneve.ch/pav/a_votre_service-multimedia-11662.html)>. Acesso em: 21 jan 2012.

REPUBLIC ET CANTON DE GENEVE. **Synthèse du projet**. 2008. Disponível em: <[http://etat.geneve.ch/dt/SilverpeasWebFileServer/SOVALP\\_synthese.pdf?ComponentId=kmelia723&SourceFile=1226398090001.pdf&MimeType=application/pdf&Directory=Attachment/Images/](http://etat.geneve.ch/dt/SilverpeasWebFileServer/SOVALP_synthese.pdf?ComponentId=kmelia723&SourceFile=1226398090001.pdf&MimeType=application/pdf&Directory=Attachment/Images/)>. Acesso em: 21 jan 2012.

RIBEIRO, Carlos A. M.; FIDELIS, Cícero N.; CARVALHO, Homero J. M. Fator de visão do céu e ilhas de calor: geoprocessamento aplicado ao conforto urbano. In: III Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica – CONNEPI, 3, 2008, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: CONNEPI, 2008.s.n.p.

ROSSI, Francine A. **Análise da influência da ocupação do solo na variação da temperatura em diferentes localidades da cidade de Curitiba**. 2004. 135 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Programa de Pós Graduação em Tecnologia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2004. Disponível

em: <<http://www.ppgte.ct.utfpr.edu.br/dissertacoes/2004/rossi.pdf>> Acesso em 21 nov. 2008.

ROSSI, Francine 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.

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

ROTRONIC. **Website**. Disponível em: <<http://www.rotronic.com/hc2-s3.html>>. Acesso em: 29 mar. 2013

SANTAMOURIS, Matheos (Org) *et al.* **Energy and climate in the urban built environment**. Londres: James and James Science Publishers, 2001.

SÃO PAULO (CIDADE). **Dados Demográficos dos Distritos pertencentes as Subprefeituras**. Disponível em: <[http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/subprefeituras/subprefeituras/dados\\_demograficos/](http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/subprefeituras/subprefeituras/dados_demograficos/)>. Acesso em: 26 mar. 2013.

SÃO PAULO (CIDADE). Secretária Municipal de Planejamento (SEMPA). **Atlas Ambiental do Município de São Paulo**. Fase I: Diagnósticos e Bases para a Definição de Políticas Públicas para as Áreas Verdes no Município de São Paulo. Relatório Final. São Paulo: SVMA, SEMPLA, 2002.

SÃO PAULO. **Lei n ° 7.805, de 01 de Novembro de 1972**. Dispõe sobre o parcelamento, uso e ocupação do solo do Município, e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/habitacao/plantas\\_on\\_line/legislacao/index.php?p=5679](http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/habitacao/plantas_on_line/legislacao/index.php?p=5679)>. Acesso em: 01 de jan de 2011.

SHINZATO, Paula. **O impacto das vegetações no microclima urbano**. 2009. 173 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SILVA, Caio F. **Caminhos bioclimáticos: desempenho ambiental de vias públicas na cidade de Teresina – PL**. 2009. 62 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS. **Website**. 2012. Disponível em: <<http://www.societedugrandparis.fr/>>. Acesso em: 01 de jan de 2011.

SOMEKH, Nadia; CAMPOS, Candido Malta (orgs). **A cidade que não pode parar: planos urbanísticos no século XX**. São Paulo: Mackpesquisa, 2002, 192p.

SOUZA, Léa C. L. Thermal environment as a parameter for urban planning. **Energy Sustainable Development**, v. XI n.4, p. 44–53, 2007.

SOUZA, Léa C. L.; RODRIGUES, Daniel S.; MENDES, José F. G. Expandindo um SIG-D para aplicação em conforto ambiental em nível urbano. In: VII Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído e III Conferência Latino-Americana sobre Conforto e Desempenho Energético de Edificações, 8, 2003, Curitiba. **Anais**...Curitiba: ANTAC, 2003. p. 669-676.

SPANGENBERG, J.; SHINZATO, P.; JOHANSSON, E.; DUARTE, D. Simulation of the influence of vegetation on microclimate and thermal comfort in the city of São Paulo. **Rev. SBAU**, Piracicaba, v.3, n.2, p. 1 – 19, 2008.

STRAWBRIDGE, K.; SNYDER, B.J. Planetary boundary layer height determination during Pacific 2001 using the advantage of a scanning lidar instrument. **Atmos Environ.**, v. 38, n. 34, p. 586–5871, 2004.

STULL, Roland B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. Massachusetts: Kluwer Academic Norwell, 1988. 666p.

SUGA, Mauro. **Avaliação do potencial de aproveitamento de luz natural em cânions urbanos**: estudo realizado nos eixos estruturais de Curitiba. 2005. 211 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Programa de Pós Graduação em Tecnologia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2005. Disponível em: <<http://www.ppgte.ct.utfpr.edu.br/dissertacoes/2005/Suga.pdf>>. Acesso em 21 nov. 2008.

SVENSSON, M; ELIASSON, I. Diurnal air temperatures in built-up areas in relation to urban planning. **Landscape Urban Plann**, v. 61, p. 37-54, 2002.

SVENSSON, Marie K. Sky view factor analysis – implications for urban air temperature differences. **Meteorol. Appl.**, v. 11, p. 201–211, 2004.



TAMURA, Cíntia A. **Análise da influência dos parâmetros edifícios na obtenção de acesso solar nas zonas residenciais de Curitiba**. 2010. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Programa de Pós Graduação em Tecnologia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

TARIFA, J.; AZEVEDO, T. **Os climas na cidade de São Paulo: teoria e prática**. São Paulo: FFLCH-USP, 2001.

THORSSON, S. *et al.* Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. **International Journal of Climatology**. n.27, p.1983 - 1993, 2007.

UNGER, János. Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: review and new approach. **Clim Res**, v. 27, p. 253–264, 2004.

UPMANIS, Hillevi; CHEN, Deliang. Influence of geographical factors and meteorological variables on nocturnal urban – park temperature - differences – A case study of summer 1995 in Göteborg, Sweden. **Clim Res**, v. 13, p. 125-139, 1999.

VAUTARD, R; BEEKMANN, M; DESPLAT, J; HODZIC, A; MORE,L. S. Air quality in Europe during the summer of 2003 as a prototype of air quality in a warmer climate. **C. R. Geoscience**, v. 339, p. 747–763, 2007.

WEDDING, J.; LOMBARDI, D.; CERMAK, J. A wind-tunnel study of gaseous pollutants in city street canyons. **J. Air Poll. Control Assoc.**, v. 27, p. 557–566, 1977.

WEIDMANN, R. Vor dem grossen Umbau. **Espazium**. Disponível em: <<https://www.espazium.ch/tec21/article/vor-dem-grossen-umbau>>. Acesso em: 21 jan 2012.

WIERINGA J., DAVENPORT A. G., GRIMMOND C. S. B., OKE T. R. New revision of Davenport roughness classification. In: Third European & African Conference on Wind Engineering, Eindhoven, The Netherlands, July 2-6, 2001. **Proceedings** Edited by J.Wisse, K.Kleinman, C.Geurts, M.de Wit.

WONG, N. H.; JUSUF, S. K. GIS-based greenery evaluation on campus master plan. **Landscape Urban Plann.**, v. 84, p. 166–182, 2008.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **Guide to meteorological instruments and methods of observation**. No. 8. Geneva : World Meteorological Organization, 2008. Disponível em: <[http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/CIMO/CIMO\\_Guide-7th\\_Edition-2008.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/CIMO/CIMO_Guide-7th_Edition-2008.pdf)>. Acesso em: 29 mar. 2013.

YAMASHITA, S.; SEKINE, K.; SHODA, M.; YAMASHITA, K.; HARA, Y. On relationships between heat island and sky view factor in the cities of Tama river basin, Japan. **Atmos. Environ.**, v. 20, p. 681–686, 1986.

YANG, Feng; LAU, Stephen S. Y.; QIAN, Feng. Urban design to lower summertime outdoor temperatures: An empirical study on high-rise housing in Shanghai. **Building and Environment**, v. 46, p. 769–785, 2011.

ZAMBERLAN, Rosângela. **Planos e valores no espaço urbano de Curitiba**: setor estrutural norte-sul. 2006. 169f. Dissertação (Mestrado em Gestão Urbana) – Curso de Pós-Graduação em Gestão Urbana, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2006. Disponível em: <[http://www.biblioteca.pucpr.br/tede//tde\\_busca/arquivo.php?codArquivo=993](http://www.biblioteca.pucpr.br/tede//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=993)>. Acesso em: 04 jan. 2012.

ZHAO, Caijun; FU, Guobin; LIU, Xiaoming; FU, Fan. Urban planning indicators, morphology and climate indicators: A case study for a north-south transect of Beijing, China. **Building and Environment**, v. 46, p. 1174–1183, 2011.