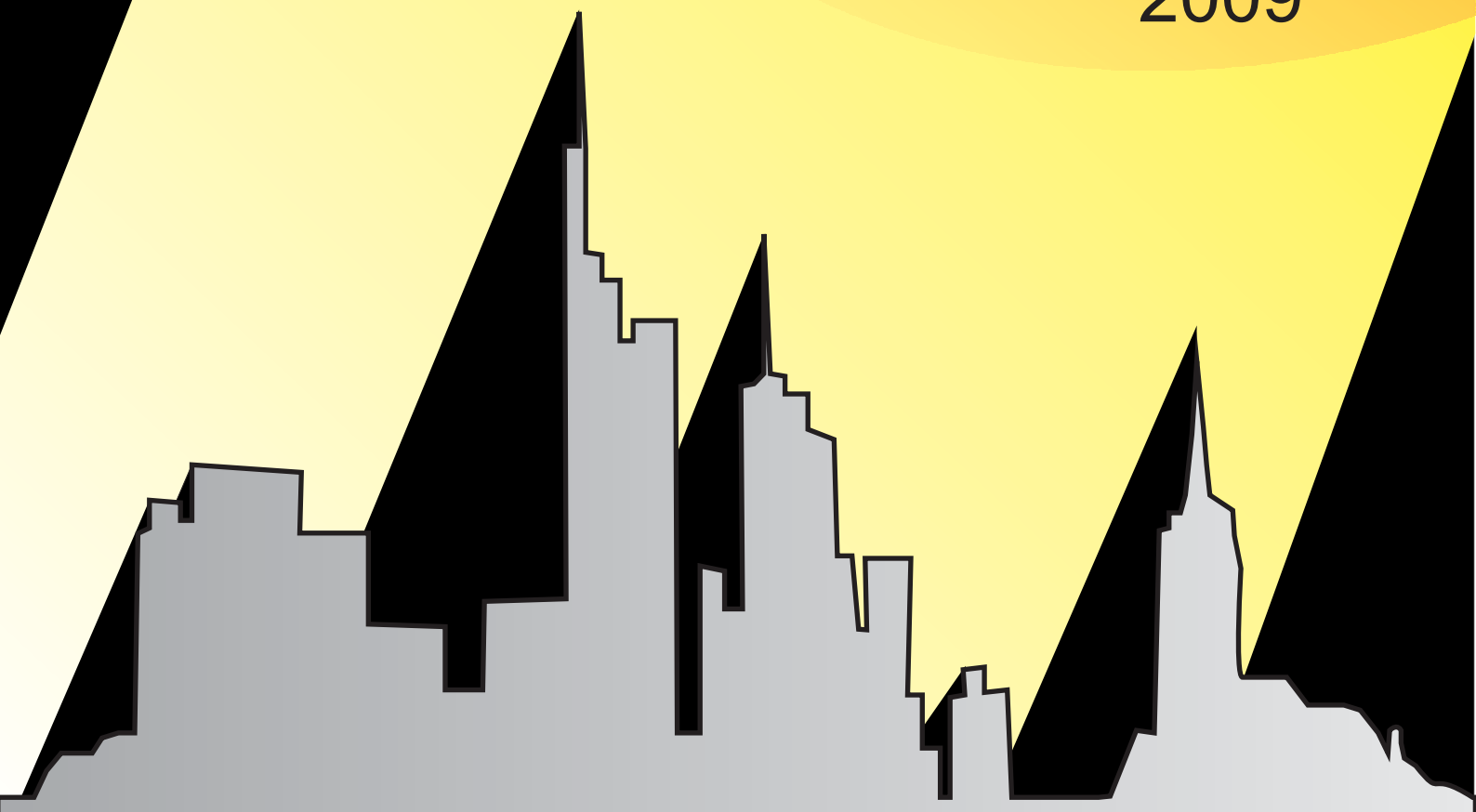
Universidade de São Paulo
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo

Doutorado
Rafael Silva Brandão

Orientadora
Marcia Peinado Alucci

2009



As Interações Espaciais Urbanas e o Clima

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

RAFAEL SILVA BRANDÃO

AS INTERAÇÕES ESPACIAIS URBANA E O CLIMA

Incorporação de análises térmicas e energéticas no planejamento urbano

Tese apresentada ao curso de Doutorado da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Arquitetura e Urbanismo

Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura e do Urbanismo

ORIENTADORA: MARCIA PEINADO ALUCCI

PROCESSO FAPESP: 2005/02.568-8

São Paulo
13 de Fevereiro de 2009

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

E-MAIL: rafael.brandao@superig.com.br

Colaboração no projeto gráfico da capa: Bruna Luz

Brandão, Rafael Silva
As Interações Espaciais Urbanas e o Clima: incorporação das análises térmicas e energéticas no planejamento urbano / Rafael Silva Brandão. -- São Paulo, 2009.
350 p : il.

Tese (Doutorado – Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura) – FAUUSP.
Orientadora: Marcia Peinado Alucci

1.Microclima urbano 2.Planejamento urbano 3.Conforto ambiental e eficiência energética 4.Simulação computacional I.Título

A meus pais, grandes companheiros na minha caminhada
Vocês não só me deram asas, mas foram muitas vezes o vento que as sustentou no ar.

Agradecimentos

À Profa. Dra. Marcia Peinado Alucci, pelas orientações e direcionamentos, além da grande confiança em mim depositada.

Aos demais professores do Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética (LABAUT) da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAUUSP), Anésia Frota, Joana Gonçalves, Roberta Kronka, Denise Duarte e Fernando Cremonesi, pela colaboração e pelas oportunidades oferecidas.

Aos colegas do LABAUT, em especial aos grandes amigos que fiz lá e espero carregar para toda a vida. Correndo o risco de me esquecer de pessoas importantes, não posso deixar de citar nominalmente Alessandra Prata Shimomura, Anna Christina Mianna, Bruna Luz, Leonardo Monteiro, Norberto Moura, Anarrita Buoro, Jörg Spangenberg, Mônica Marcondes, José Ovídio Ramos, Carlos Eduardo Baeyer e muitos outros menos assíduos, mas que em muito contribuíram durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos BDSP Partnership, especialmente a Klaus Bode e Allan Harries, que tão atenciosamente me receberam e me orientaram durante o meu estágio em Londres.

Ao meu irmão, Tiago Silva Brandão, que me ofereceu guarida durante este mesmo período, sem cuja ajuda esta etapa fundamental do trabalho não teria sido possível. Agradeço também aos amigos que tornaram o inverno europeu um pouco menos frio.

Aos professores Köen Steemers, do Martin Center, University of Cambridge, Inglaterra; Jorge Saraiva e Eng. Fernando Marques da Silva, do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em Lisboa, Portugal; Ester Higueiras, da Universidade Politécnica de Madrid, na Espanha; Michael Bruse, do Geographisches Institut, Johhanes Gutenberg Universitat, em Mainz, Alemanha e ao estudante de doutorado Daniel Cóstola, da TU/ Eindhoven que tanto colaboraram com este trabalho durante visitas às respectivas instituições.

À Profa. Dra. Eleonora Sad de Assis, que me acompanha desde o começo da minha caminhada acadêmica e é uma das grandes responsáveis pela minha formação. Sua postura profissional e pessoal, além de sua produção acadêmica, continuam ainda hoje a ser um norte para mim.

Às arquitetas Simone Berigo Büttner e Bruna Luz pela colaboração nas medidas de campo.

Ao Prof. Dr. Marcelo Giacaglia, pela orientação nas questões referentes ao tratamento de base de dados e geoprocessamento.

A Gustavo Pessoa, amigo de todas as horas, que contribuiu, dentre inúmeras outras coisas mais sutis, com a revisão de texto final deste documento.

À minha grande família, sempre presente, pelo amor e apoio incondicional.

A todos os outros que colaboraram para o desenvolvimento desta pesquisa com idéias e apoio, mas que a minha curta e falha memória não me permitiu registrar.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento desta pesquisa.

“Em vão centenas de milhares de homens, amontoados num pequeno espaço, se esforçavam por disfigurar a terra em que viviam; em vão a cobriam de pedras para que nada pudesse germinar; em vão arrancavam as ervas tenras que pugnavam por irromper; em vão impregnavam o ar de fumaça de petróleo e de carvão; em vão escorraçavam os animais e os pássaros - porque até na cidade a Primavera era Primavera."

Ressurreição
Liev Tolstóy

"Marco Polo descreve uma ponte, pedra por pedra.
– Mas qual é a pedra que sustenta a ponte? —pergunta Kublai Khan.
– A ponte não é sustentada por esta ou aquela pedra — responde Marco —, mas pela curva do arco que estas formam.
Kublai Khan permanece em silêncio, refletindo. Depois acrescenta:
– Por que falar em pedras? Só o arco me interessa.
Polo responde:
– Sem pedras, o arco não existe."

As cidades invisíveis
Ítalo Calvino

Resumo

BRANDÃO, Rafael Silva. *As interações espaciais urbanas e o clima;* incorporação de análises térmicas e energéticas no planejamento urbano. 2009. 350 p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Tecnologia da Arquitetura). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

O presente trabalho tem por objeto o clima urbano, entendido como a ambiência térmica de uma área limitada, gerada pela interação entre a atmosfera e o ambiente construído de uma cidade, ou de parte dela, que afeta as condições de conforto térmico do pedestre e o consumo energético das edificações.

O objetivo geral deste trabalho é gerar uma metodologia de avaliação da ambiência térmica urbana cujos resultados se prestem a orientar decisões de projeto e gestão nas cidades brasileiras. Busca-se verificar a hipótese de que a ocupação urbana pode ser descrita somente através de variáveis que são frequentemente utilizadas na legislação urbana – taxa de ocupação, coeficiente de aproveitamento e recuos – e que estas variáveis são suficientes para que se determine a ambiência térmica de um determinado espaço urbano.

O método de trabalho se dividiu em duas etapas, uma dedutiva, na qual modelos de simulação do comportamento térmico urbano foram estudados e/ou desenvolvidos, e outra indutiva, na qual os modelos encontrados foram aplicados a um estudo de caso, com o objetivo de avaliar a relação entre os resultados ambientais e a ocupação da área. Neste processo, foram utilizados modelos analíticos, programas computacionais de simulação de fluidodinâmica e ferramentas de geoprocessamento.

Os resultados obtidos levaram a uma refutação da hipótese, considerando-se que outras variáveis devem ser incorporadas ao planejamento urbano e às legislações de uso e ocupação do solo, caso se queira determinar de forma adequada o impacto de uma área na ambiência térmica. Foram propostas equações de regressão que relacionam a ocupação urbana com variáveis meteorológicas locais. Apesar da aplicabilidade limitada, tais equações podem ser utilizadas para gerar recomendações gerais de planejamento. O processo desenvolvido para obter as equações pode ser utilizado na avaliação comparativa de áreas urbanas e, com a incorporação de critérios de qualidade e metas, pode ser transformado em um procedimento para avaliação de desempenho urbano.

Palavras chaves: Microclima urbano, Planejamento urbano, Conforto ambiental e eficiência energética, Simulação computacional

Abstract

BRANDÃO, Rafael Silva. *Urban spatial interactions and climate;* incorporating thermal and energetic analysis in urban planning*.* 350 p. Thesis (Doctoral). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

This paper deals with the urban climate, defined as the thermal environment of a limited area, generated by the interaction of the atmosphere and a city, which affects thermal comfort of pedestrians and energy consumption of buildings.

The main objective is to develop an assessment methodology for the urban thermal environment, the results of which can support design and planning decisions in Brazilian cities. The hypothesis is that usual planning variables – plot ratio, plan density index and setbacks – suffice as means to describe urban occupation and to determine its thermal environment.

The method consists in two phases: a deductive one, in which thermal simulation models were studied or developed, and a inductive one, in which the researched models were used to assess a study case. The assessment results were superposed with occupation parameters for the area, in order to determine correlations among environmental and occupation variables. During this process, the research included the use of analytical models, CFD simulation and GIS tools.

The results did not corroborate the hypothesis. This lead to the conclusion that other variables must be incorporated to urban planning, in order to determine the impact of occupation on thermal environment. Regression equations were developed, relating occupation parameters and thermal and energetic variables. Even though their applications are limited, they may be used as a "rule of thumb" method for early design stages. The method developed for the obtaining of the equations may be used for evaluating comparatively different occupation proposals. If performance criteria are determined, the method may be transformed into a urban thermal performance assessment method.

Keywords: Urban microclimate, Urban planning, Environment and energy, Computational simulation

Lista de Figuras

Figura 1.1: Cúpula de Buckminster Fuller sobre a cidade de Nova York 23
Figura 2.1: Planta para a regeneração urbana de Saline-Ostia, Antica 39
Figura 2.2: Planta para a Vila Solar, ParcBIT, Majorca 39
Figura 2.3: Diagramas conceituais para "Habitações simbióticas" e "Eco-renovação" em Tóquio 40
Figura 2.4: Estudos de transporte para o Bairro Solar 41
Figura 2.5: Maquete da proposta para Lu Zia Sul 41
Figura 2.6: Estudos de túnel de vento para Elephant and Castle 42
Figura 2.7: Estudos de insolação para Elephant and Castle 42
Figura 2.8: Camadas atmosféricas para Oke 49
Figura 2.9: Descrição do comportamento da camada limite atmosférica ao longo de um período de 24 horas 50
Figura 2.10: Esquemas para a UBC e a UBL baseado em Oke 53
Figura 2.11: Esquema de circulação de vento nos canyons urbanos para Oke 53
Figura 2.12: Exemplo de aplicação da metodologia do RUROS 55
Figura 2.13: Mapeamento climático de diagnóstico e intervenção para a cidade de Kassel 57
Figura 2.14: Dificuldade de parametrização dos modelos para cidades brasileiras 58
Figura 2.15: Mapa de temperatura aparente da superfície para São Paulo 60
Figura 2.16: Estudos climáticos para a cidade de Paracatu, MG 62
Figura 3.1: Correlação entre a ilha de calor noturna e a população de cidades na Europa e EUA 66
Figura 3.2: Comparação entre o modelo para DoE e os dados medidos em campo 67
Figura 3.3: A cidade como um sistema termodinâmico fechado 68
Figura 3.4: Definição das superfícies e volumes de controle para o sistema Terra-Atmosfera 68
Figura 3.5: Balanço energético da Terra 68
Figura 3.6: Volume de controle com dimensões dx, dy e dz e espaço cartesiano 70
Figura 3.7: Esquema das forças incidentes sobre o fluido 71
Figura 3.8: Formas da equação fundamental de conservação de massa 72
Figura 3.9: Movimento da Terra em torno do Sol 74
Figura 3.10: Movimento aparente do Sol no Equador e no Trópico de Capricórnio 74
Figura 3.11: Esquema para cálculo geométrico do comprimento da sombra 75
Figura 3.12: Esquema para cálculo de fator de forma 80
Figura 3.13: Situações de fator de visão 82
Figura 3.14: Esquema da Força de Coriolis 84
Figura 3.15: Impactos da estrutura urbana no vento (classes de rugosidade) 85
Figura 3.16: Elementos para cálculo da rugosidade 86
Figura 3.17: Gráfico indicando relação entre as variáveis morfológicas e as de rugosidade 86
Figura 3.18: Sensibilidade da rugosidade ao coeficientes cf_1 e ajuste a partir do coeficiente cf_2 87
Figura 3.19: Efeito da rugosidade no perfil do vento para atmosfera neutra 89
Figura 3.20: Definição da turbulência média 91
Figura 3.21: Hierarquia de modelos de turbulência 91
Figura 3.22: Perfis de temperatura potencial virtual e vento médios para condições diurnas e noturnas típicas 93
Figura 3.23: Perfis de vento e formato dos vórtices para as diferentes condições de estabilidade 94
Figura 3.24: Relação entre Ri, Φ e o tipo de convecção 95
Figura 3.25: Esquema para fluxos no canyon 96
Figura 3.26: Valores dos coeficientes para as superfícies de um canyon no sentido N-S em várias situações 103
Figura 3.27: Esquema de distribuição de temperaturas no solo (a) e nos edifícios (b) 105
Figura 3.28: Resultados do CTTC (PUSA e Temperatura) 108
Figura 3.29: Configuração da estrutura urbana no modelo vista de cima e em corte 109

Figura 3.30: Resultados do modelo 111
Figura 3.31: Estrutura dos programas UCLM 30 e UCLM 60 e o esquema elétrico equivalente 113
Figura 3.32: Resultados espaciais e temporais do modelo 113
Figura 3.33: Fluxo de dados no ENVI-met 114
Figura 3.34: Visão geral do modelo e dimensões de malha disponíveis 116
Figura 3.35: Modelagem de uma área no ENVI-met 117
Figura 3.36: Área modelada com três níveis de refinamento 118
Figura 3.37: Condições de contorno fechada, aberta e cíclica 119
Figura 3.38: Exemplo de resultado em ENVI-Met, corte e planta, respectivamente 122
Figura 3.39: Fluxo de informações e arquivos no CFX 5 123
Figura 3.40: Recomendação de objetos a serem modelados 124
Figura 3.41: Recomendações para confecção de modelos de simulação para áreas externas 125
Figura 3.42: Modelos tridimensionais para quadras com blocos perimetrais e com torres altas, respectivamente 125
Figura 3.43: Relação entre o número de elementos e o valor do parâmetro Cells in gap 127
Figura 3.44: Confecção automática de borda com prismas 128
Figura 3.45: Modelos tridimensionais para quadras com blocos perimetrais 128
Figura 3.46: Exemplo de parametrização do domínio 130
Figura 3.47: Exemplo de parametrização das condições de contorno de entradas e saídas 131
Figura 3.48: Exemplo de parametrização das condições de contorno para superfícies sólidas 132
Figura 3.49: Exemplo de expressões com variáveis 133
Figura 3.50: Exemplo de parametrização dos controles de solução da simulação 133
Figura 3.51: Exemplo de simulação com convergência pobre (10^{-3}) 134
Figura 3.52: Exemplo de resultados para simulação com o pátio com contornos e vetores 134
Figura 4.1: São Paulo, localização. Destacada a região metropolitana e, em preto, o município 139
Figura 4.2: Mapa de São Paulo sobre imagem de relevo 140
Figura 4.3: Evolução da mancha urbana de São Paulo por períodos 140
Figura 4.4: Ocupação vertical no centro de São Paulo e em bairro residencial 142
Figura 4.5: Número de lançamentos imobiliários em três bairros residenciais de São Paulo 142
Figura 4.6: Mapa de crescimento demográfico e de concentração de famílias com renda acima de 20 salários mínimos 143
Figura 4.7: Divisão político-administrativa do município São Paulo 143
Figura 4.8: Seleção das áreas de estudo 144
Figura 4.9: Mapa de declividades da Área 01 145
Figura 4.10: Vista do Parque do Iibirapuera com o bairro de Moema ao fundo, indicando as áreas de estudo 146
Figura 4.11: Vista da Av. Ibirapuera 146
Figura 4.12: Distribuição das massas de ar sobre o território nacional 150
Figura 4.13: Rosa dos ventos indicando a predominância para São Paulo e Natal, respectivamente. 151
Figura 4.14: Freqüência de ocorrência total e rosa dos ventos para Congonhas 152
Figura 4.15: Rosa dos ventos para Congonhas nos períodos da madrugada e da manhã 152
Figura 4.16: Rosa dos ventos para Congonhas nos períodos da tarde e da noite 153
Figura 4.17: Rosa dos ventos para Congonhas filtrados por valores de temperatura do ar 154
Figura 4.18: Informações contidas na base cadastral utilizada 155
Figura 4.19: Distribuição das fotos aéreas e área de sobreposição 155
Figura 4.20: Exemplo de quadra alterada entre 1997 e 2006 156
Figura 4.21: Ilustração do processo de vetorização e mapeamento 156
Figura 4.22: Vista geral da área levantada identificando as três áreas de estudo 157
Figura 4.23: Indicação do planejamento de levantamento de duas das áreas 158
Figura 4.24: Fotos de grande angular tiradas durante o levantamento de alturas 158
Figura 4.25: Correlação dos coeficientes de aproveitamento obtidos pelo levantamento e a partir de dados da Sempla 159
Figura 4.26: Expansão das áreas iniciais e configuração da área para estudo de caso 161

Figura 4.27: Mapeamento de alturas na área piloto 162
Figura 4.28: Mapeamento de uso do solo na Área-Piloto 162
Figura 4.29: Mapeamento de cores de fachada na Área Piloto 163
Figura 4.30: Localização final dos pontos de medição para 04/02/2007 166
Figura 4.31: Registro fotográfico da medição de 04 de Fevereiro de 2007 167
Figura 4.32: Fotos da condição de nebulosidade no dia da medida 168
Figura 4.33: Comparação entre as temperaturas medidas nas estações fixas para o dia 04 de Fevereiro de 2007 169
Figura 4.34: Comparação entre as temperaturas medidas no transecto para o dia 04 de Fevereiro de 2007 170
Figura 4.35: Correspondência entre os círculos cardinal e trigonométrico 171
Figura 4.36: Dados de direção do vento para o dia 04 de Fevereiro de 2007 171
Figura 4.37: Dados de velocidade do vento para o dia 04 de Fevereiro de 2007 172
Figura 4.38: Comparação entre as velocidades de vento para o dia 04 de Fevereiro de 2007 173
Figura 4.39: Foto da proteção solar projetada e do novo posicionamento do sensor de vento 174
Figura 4.40: Comparação dos dados de temperatura (05 de Setembro de 2007) 176
Figura 4.41: Dados de direção do vento para o dia 05 de setembro de 2007 177
Figura 4.42: Dados de velocidade do vento para o dia 05 de setembro de 2007 178
Figura 4.43: Comparação dos dados de velocidade do vento para o dia 05 de setembro de 2007 178
Figura 5.1: Diagramas Bioclimáticos de Olgyay e Givoni 183
Figura 5.2: Cálculo da distribuição de temperaturas no solo para diferentes timesteps 188
Figura 5.3: Cálculo da temperatura superficial para horários selecionados do 3° dia 189
Figura 5.4: Resultados para a temperatura do solo em diferentes profundidades após 5 e 15 dias 191
Figura 5.5: Resultados para a temperatura do solo em diferentes profundidades após 30 dias 191
Figura 5.6: Resultados para a temperatura do solo em diferentes profundidades após 30 dias com argila 192
Figura 5.7: Temperatura do solo, absorção de 0,35 192
Figura 5.8: Temperatura do solo, para areia seca e para o concreto, respectivamente 193
Figura 5.9: Resultados para as temperaturas para ambiente orientado a norte com 5 e 30 dias 194
Figura 5.10: Resultados para as temperaturas para ambiente orientado a norte, sem ventilação com WWR de 0,5 e 1,0, respectivamente 194
Figura 5.11: Resultados para as temperaturas para ambiente orientado a leste e a oeste, respectivamente 195
Figura 5.12: Numeração das partes na planilha 196
Figura 5.13: Divisão de áreas baseada na incidência de sol 197
Figura 5.14: Comparação do modelo com resultados das medidas 199
Figura 5.15: Fotos com grande angular durante medida de Setembro 199
Figura 5.16: Avaliação do modelo, caso base 200
Figura 5.17: Comportamento térmico para ruas orientadas N-S e NW-SE, respectivamente 200
Figura 5.18: Alteração da altura dos edifícios para 40m e 10m respectivamente 201
Figura 5.19: Comportamento térmico para ruas orientadas N-S e NW-SE, respectivamente 201
Figura 5.20: Demarcação de zonas passivas e exemplo Curvas LT 202
Figura 5.21: Identificação da zona passiva e estudo de consumo de energia para as cidades mencionadas 202
Figura 5.22: Distribuição das células de teste 204
Figura 5.23: Perspectiva do edifício exemplo com dados para inserção no Obstrução 1.0 204
Figura 5.24: Tela inicial do Obstrução 1.0 com indicação das variáveis envolvidas 205
Figura 5.25: Variação do consumo de energia com a obstrução para célula de 3 x 3x 3 m 206
Figura 5.26: Esquema de obstrução para edifícios de múltiplos pavimentos 208
Figura 5.27: Esquema para cálculo de consumo de energia 209
Figura 5.28: Estudo de consumo de energia para residência unifamiliar típica 210
Figura 5.29: Estudo de consumo de energia para edifício alto desobstruído 210
Figura 5.30: Estudo de consumo de energia para edifício alto entre edifícios da mesma altura 210
Figura 5.31: Estudo de insolação para a área (shadow range) 211
Figura 5.32: Estudo de insolação para a área (horas de sol) 212
Figura 5.33: Estudo de insolação para a área, norte girado a 45° 212

Figura 5.34: Evolução da modelagem da Área 01 214
Figura 5.35: Modelo da área simulada 214
Figura 5.36: Arquivo de configuração 215
Figura 5.37: Resultados preliminares ENVI-met – Temperatura (6h, 15h e 21h) 216
Figura 5.38: Resultados preliminares ENVI-met – Vento 217
Figura 5.39: Revisão do modelo da área simulada 218
Figura 5.40: Resultados segunda rodada ENVI-met – Temperatura (6h , 15h e 21h) 219
Figura 5.41: Temperatura do ar para o ponto de medição (modelos com e sem vegetação) 220
Figura 5.42: Modelo para geração da malha 222
Figura 5.43: Convergência da simulação para a Área 01 223
Figura 5.44: Resultados CFX – Planta e corte na rua Canário 223
Figura 5.45: Vista da nova malha, respectivamente com elemento mínimo de 4m e de 2m 224
Figura 5.46: Convergência para simulações com malhas de 4m e de 2m, respectivamente 224
Figura 5.47: Comparação de resultados de simulações com malhas de 4m e de 2m, respectivamente 225
Figura 5.48: Vista de topo do modelo, com campo de velocidades indicado na forma de contornos e vetores 225
Figura 5.49: Perfis de velocidade ao longo do modelo em perspectiva 226
Figura 5.50: Gráficos dos perfis de velocidade ao longo do modelo 227
Figura 5.51: Modelo octogonal para simulação do vento 228
Figura 5.52: Aspecto da malha próxima ao ponto de medida 228
Figura 5.53: Campo de vento, vista de topo, direção SE 229
Figura 5.54: Streamline a partir da Av. Ibirapuera, direção SE 229
Figura 5.55: Perfis de vento em pontos selecionados, direção SE 230
Figura 5.56: Campo de vento, vista de topo, direção Sul 230
Figura 5.57: Velocidades do vento para as 8 direções cardinais 231
Figura 5.58: Túnel de vento do IPT e modelo utilizado 232
Figura 5.59: Aspecto da malha próxima ao ponto de medida 232
Figura 5.60: Comparação dos perfis obtidos no modelo de CFD e em túnel de vento para orientação SE 233
Figura 5.61: Modelos utilizados para os testes 234
Figura 5.62: Resultado de simulação com 1.000.000 e 5.000.000 de "histories" 237
Figura 5.63: Simulação de radiação alterando-se a emissividade de uma superfície 239
Figura 5.64: Sombreamento da área feito no Ecotect e estudo de radiação feito no CFX para as 09h e 15 h 241
Figura 5.65: Alteração na divisão de partes do modelo 242
Figura 5.66: Convergência para a simulação em regime permanente 242
Figura 5.67: Temperaturas na simulação permanente (00h) 243
Figura 5.68: Convergência para a simulação em regime transiente 244
Figura 5.69: Temperatura superficial para os horários das 7h e das 15h 245
Figura 5.70: Temperaturas em corte passando pela rua Rouxinol (15 h) 245
Figura 5.71: Resultado das simulações para vento e temperatura às 7h e 15h (hora legal) 246
Figura 6.1: Padrões de ocupação para a legislação de 1972 em São Paulo 250
Figura 6.2: Densidades de ocupação para São Paulo 251
Figura 6.3: Relações entre a forma urbana e os parâmetros de planejamento 254
Figura 6.4: Malhas auxiliares, com exclusão da área interna ao edifício 255
Figura 6.5: Mapeamento do ângulo de obstrução das fachadas 256
Figura 6.6: Mapeamento do coeficiente de aproveitamento 257
Figura 6.7: Mapeamento da taxa de ocupação 257
Figura 6.8: Mapeamento dos recuos médios 258
Figura 6.9: Estratégias para cálculo da área de silhueta 259
Figura 6.10: Rotação de coordenadas 259
Figura 6.11: Gráfico com valores de z_d e z_0 calculados para a área de estudo 260
Figura 6.12: Mapeamento do plano de deslocamento (z_d) 261
Figura 6.13: Mapeamento da rugosidade (z_0) 261
Figura 6.14: Mapeamento do ângulo de obstrução médio 262

Figura 6.15: Mapeamento do Índice de Compacidade das quadras 264
Figura 6.16: Gráfico com resultados do desvio padrão por quadra 265
Figura 6.17: Mapeamento do Desvio padrão percentual das alturas 266
Figura 6.18: Resultado do Ecotec importado para o MapInfo e simulação original 267
Figura 6.19: Resultado do Ecotec importado para o MapInfo 267
Figura 6.20: Resultado da simulação de vento SE importado para o MapInfo e simulação original 268
Figura 6.21: Resultado da simulação de vento SE importado para o MapInfo 269
Figura 6.22: Mapeamento do Índice de Compacidade das quadras 269
Figura 6.23: Mapeamento da diferença de amplitude térmica média por quadra 270
Figura 6.24: Mapeamento da diferença de temperatura máxima por quadra 271
Figura 6.25: Mapeamento da diferença de temperatura média por quadra 271
Figura 6.26: Mapeamento do consumo energético médio por quadra 272
Figura 6.27: Correlação entre CA e TO e a insolação 275
Figura 6.28: Correlação entre CA e TO e vento 276
Figura 6.29: Perfil de velocidade do vento ao longo de uma linha paralela à sua direção 277
Figura 6.30: Correlação entre as variações de obstrução e de velocidade ao longo da linha (vento SE) 278
Figura 6.31: Correlação entre CA e TO e diferença na amplitude térmica 280
Figura 6.32: Correlação entre CA e TO e consumo de energia 283

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Quadro-resumo da atuação dos diversos agentes na questão ambiental brasileiras 29
Tabela 2.2: Consumo de eletricidade por setores segundo o Balanço Energético Nacional..... 44
Tabela 2.3: Usos finais da energia nas edificações (1990)..... 45
Tabela 2.4: Escalas de tratamento no clima urbano 47
Tabela 2.5: Características dos modelos de simulação..... 55
Tabela 2.6: Resultado das simulações para as três cidades nos horários das 6h e 16h 56
Tabela 2.7: Camadas utilizadas no mapeamento climático para a cidade de Hong Kong 57
Tabela 3.1: Grau de Confinamento..... 67
Tabela 3.2 - Valores de emissividade para diferentes tipos de cobertura de terreno 78
Tabela 3.3: Valores de rugosidade para deferentes superfícies urbanas 89
Tabela 3.4: Propriedades térmicas dos materiais urbanos mais comuns..... 100
Tabela 3.5: Profundidades de estabilidade diária da temperatura do solo em metros..... 101
Tabela 3.6: Parâmetros de simulação no ENVI-met Configuration Editor..... 118
Tabela 3.7: Parâmetros de ambientais no ENVI-met Configuration Editor 120
Tabela 3.8: Parâmetros de características da área no ENVI-met Configuration Editor..... 121
Tabela 3.9: Módulos do CFX com as respectivas atividades..... 123
Tabela 3.10: Número de elementos na malha para variação dos parâmetros de geração..... 126
Tabela 3.11: Aspecto final da malha para variação nos parâmetros de geração 127
Tabela 4.1: Quadro resumo da história de Moema..... 147
Tabela 4.2: Estações meteorológicas na cidade de São Paulo..... 149
Tabela 4.3: Dados das estações Ibirapuera e Congonhas para o dia da medição (04 de Fevereiro de 2007)..... 168
Tabela 4.4: Dados das estações Ibirapuera e Congonhas para o dia da medição (05 de Setembro de 2007) 175
Tabela 4.5: Dados das medidos no ponto fixo (05 de Setembro de 2007)..... 176
Tabela 4.6: Radiação global, direta e difusa para os dias de medida 179
Tabela 4.7: Radiação global em plano vertical orientado para o fevereiro..... 180
Tabela 4.8: Radiação global em plano vertical orientado para o setembro..... 180
Tabela 5.1: Sensação térmica associada a valores de TEP 183
Tabela 5.2: Ocorrência de horários em conforto para diferentes valores de I_{cl}..... 184
Tabela 5.3: Ocorrência de horários em conforto para I_{cl} iterativo..... 185
Tabela 5.4: Desconforto por calor devido a variações na temperatura média e na amplitude térmica 186
Tabela 5.5: Variação da temperatura superficial para diferentes timesteps 187
Tabela 5.6: Temperaturas iniciais para edificações..... 195
Tabela 5.7: Obstruções consideradas no estudo exploratório..... 205
Tabela 5.8: Consumo de energia para diversas obstruções (Iluminação)..... 206
Tabela 5.9: Consumo de energia para diversas obstruções (Resfriamento)..... 207
Tabela 5.10: Consumo de energia para diversas obstruções (Aquecimento)..... 207
Tabela 5.11: Opções para variáveis de simulação..... 215
Tabela 5.12: Opções para variáveis de simulação..... 222
Tabela 6.1: Hipótese inicial de correlação entre parâmetros de ocupação e variáveis ambientais 273
Tabela 6.2: Limites das variáveis no universo estudado..... 273
Tabela 6.3: Matriz de correlação entre as variáveis independentes 274
Tabela 6.4: Fatores de correlação e determinação com insolação para cada variável independente..... 275
Tabela 6.5: Fatores de correlação e determinação com vento para cada variável independente 276
Tabela 6.6: Fatores de correlação e determinação com variação de vento para cada variável independente (total) 278

Tabela 6.7: Fatores de correlação e determinação com variação de vento para cada variável independente (só simuladas)..... 278
Tabela 6.8: Fatores de correlação e determinação com a amplitude térmica para cada variável independente. 281
Tabela 6.9: Fatores de correlação e determinação com a diferença em Tmax para cada variável independente 281
Tabela 6.10: Fatores de correlação e determinação com a diferença em Tmed para cada variável independente 282
Tabela 6.11: Fatores de correlação e determinação com o consumo de energia para cada variável independente 283
Tabela 6.12: Consumo de energia (kWh/m²ano) e aumento da temperatura (°C)..... 284
Tabela 6.13: Variação dos valores em relação à variação máxima para consumo de energia e diferença na temperatura máxima..... 285

Lista de Símbolos

Grandeza	Símbolo	Unidade
Absortância monocromática direcional	α_λ	**(-)**
Altura	H	**m**
Altura angular	ξ	**°**
Altura angular	ξ	**°**
Altura da medida de referência	z_{ref}	**m**
Amplitude térmica diária	Ampl	**°C**
Ângulo de incidência da radiação direta	i_R	**°**
Ângulo de obstrução no ponto médio	Obst	**°**
Ângulo horário do sol	ω	**°**
Ângulo zenital	ξ'	**°**
Área	A	**m²**
Área arborizada	ARV	**(-)**
Área de piso parcialmente sombreada	$PSA_{(t)}$	**(-)**
Arrasto provocado pela vegetação	S_i	**s/m**
Azimute	γ	**°**
Calor específico	c_p	**J/(kg °C)**
Calor latente de evaporação	c_{lat}	**J/kg**
Capacidade térmica volumétrica	C_p	**J / (m³ °C)**
Carga de calor antropogênico	Qa	**W/m²**
Carga de calor latente	Q_E*	**W/m²**
Carga líquida de radiação	Q_R*	**W/m²**
Carga líquida de radiação	Q_R*	**W/m²**
Carga térmica armazenada	Q_a*	**W/m²**
Carga térmica sensível turbulenta	Q_H	**W/m²**
Cluster Thermal Time Constant	CTTC	**h**
Coeficiente de aproveitamento	CA	**(-)**
Coeficiente de arrasto	C_D	**(-)**
Coeficiente de arrasto com um elemento de rugosidade	c_R	**(-)**
Coeficiente de arrasto sem elemento de rugosidade	c_s	**(-)**
Coeficiente de convecção	h_c	**W/(m²°C)**
Coeficiente de convecção do interno	h_{ci}	**W/(m² °C)**
Coeficiente de transferência de calor por convecção	C_H	**m²**
Coeficiente de transmissão de calor do vidro	U	**W/(m² °C)**
Coeficiente de troca radioativa	h_r	**W/(m² °C)**
Coeficiente para amplitude térmica	ModAmpl	**(-)**
Coeficiente para temperatura média	ModTméd	**(-)**
Coeficiente total de transferência de calor na superfície	h	**W/(m² °C)**
Coeficientes empíricos para cálculo de rugosidade	cf	**(-)**
Coeficientes para cálculo de armazenamento de calor urbano	a_1, a_2 e a_3	**(-)**
Coeficientes para cálculo de velocidade do vento no *canyon*	k', β',γ', y'	
Comprimento de Monin-Obukhov	L_{mo}	**m**
Comprimento de onda		**µm**
Comprimento de uma parte no modelo de *canyon*	P3i	**m**
Comprimento ou Largura	L	**m**
Condutividade térmica	k	**W/(m °C)**
Constante de Stefan-Boltzman	σ	**W/m² K**
Constante de Von Karman	k	**m**
Constante solar	I_{sc}	**W/m²**
Consumo de energia	CE	**kWh**
Consumo de energia	CE	**kWh/(m² ano)**
Coordenadas espaciais	x, y, z	**m**
Declinação do sol	δ	**°**
Densidade	ρ	**kg/m³**
Densidade de elementos em planta	λ_P	**(-)**
Densidade de elementos no plano perpendicular ao vento	λ_F	**(-)**
Deslocamento do plano de rugosidade	z_d	**m**
Desvio padrão das alturas	DpH	**m**
Difusidade de momento	v	**m²/s**
Difusidade térmica	κ	**m²/s**
Emissão de infravermelho próximo	NIR	**(-)**

Grandeza	Símbolo	Unidade
Emissão de luz visível identificadavia satélite	Vis	**(-)**
Emissão radiativa	E	**W/m²**
Emissividade	ε	**-**
Emitância monocromática direcional	ε_λ	**(-)**
Environmental Lapse Rate	ELR	**m/s**
Espessura total	e_T	**m**
Fator de Forma	F_{ij}	**(-)**
Fator solar do vidro	FS	**(-)**
Fator visão do céu	$F_{céu}$	**(-)**
Força	F	**N**
Função da estabilidade	Φ_x	**(-)**
Grau de confinamento	DoE	**(-)**
Gravidade	g	**m/s²**
Inclinação do plano com o horizonte	β	**°**
Índice de Compacidade	Ic	**(-)**
Índice de Limpidez	k_t	**(-)**
Índice de nebulosidade	NI	
Intensidade da ilha de calor	ΔT_{r-u}	**°C**
Intervalo de tempo	Δt	**s**
Isolamento da roupa	I_{cl}	**clo**
Latitude	ϕ	**°**
Microescala de Kolmogorov para Turbulência	η	**(-)**
Normalized Differencial Vegetation Index	NVDI	**(-)**
Número de andares expostos no cálculo de consumo de energia	N_{CE}	**(-)**
Número de Biot	Bi	**(-)**
Número de Biot para adiação	BiR	**(-)**
Número de edifícios	NEd	**(-)**
Número de elementos do grid que interceptam a fachada	n_{grid}	**(-)**
Número de Fourier	Fo	**(-)**
Número de Nusselt	Nu	**(-)**
Número de Prandtl	Pr	**(-)**
Número de Reynolds	Re	**(-)**
Número de Richardson	Ri	**(-)**
Número de Stanton	St	**(-)**
Parâmetro de clima urbano	I	**(-)**
Parâmetro de Coriolis	f	**1/s**
Percentual de desvio padrão das alturas em relação à altura média	DpH%	**(-)**
Período de interesse	P	**S**
População da área urbana	Pop	**hab**
Profundidade de amortecimento	D	**m**
Radiação difusa	I_d	**W/m²**
Radiação direta	I_D	**W/m²**
Radiação global	I_G	**W/m²**
Radiação no topo da atmosfera	I_o	**W/m²**
Radiação solar normal	I_N	**W/m**
Razão área superficial volume	$R_{A/V}$	**1/m**
Razão entre área de vidro e área total da parede	WWR	**(-)**
Recuos médios	RM	**m**
Refletância hemisférica angular monocromática	ρ_λ	**(-)**
Rugosidade aerodinâmica	z_0	**m**
Superfície de água	AS	**(-)**
Taxa de lapso adiabático seco	Γ	**K/m**
Taxa de ocupação	TO	**(-)**
Taxa metabólica	M	**met**
Temperatura	T	**°C***
Temperatura de fundo de céu	$T_{céu}$	**°C ou K**
Temperatura de ponto de orvalho	T_{po}	**°C**
Temperatura equivalente percebida	TEP	**°C**
Temperatura média das últimas 24 horas	T_{med24h}	**°C**
Temperatura média mensal	T_{mm}	**°C**
Temperatura potencial	θ	**°C**
Temperatura potencial de referência	θ_{ref}	**m/s²**
Temperatura potencial virtual	θ_v	**°C**

Grandeza	Símbolo	Unidade
Temperatura radiante média	T_{rm}	**°C**
Tensão de cisalhamento	τ	**N/m²**
Umidade absoluta	q	**kg/kg**
Umidade relativa	UR	**%**
Velocidade de Fricção	u*	**m/s**
Velocidade do vento	u	**m/s**
Velocidade do vento de referência	u_{ref}	**m/s**
Velocidade do vento no eixo x	u	**m/s**
Velocidade do vento no eixo y	v	**m/s**
Velocidade do vento no eixo z	w	**m/s**
Velocidade resultante do fluido	*V*	**m/s**
Viscosidade do fluido	μ	**kg/(s m)**
Volume	V	**m³**

Subscritos	
Canyon	C
Céu	céu
Edifício	Edif
Fachada	F
Nó	m, n
Solar	s
Solo	g
Superfície	sup, i, j

Unidade	Símbolo
Graus centígrados	°C
Kelvin	K
Joule	J
Metro	m
Watt	W
Radianos	rad
Metro quadrado	m²
Grau	°

Sumário

1. Introdução 23

1.1. Objeto e hipótese 23

1.2. Objetivos 25

1.3. Estrutura do trabalho 26

2. Planejamento urbano e clima 27

2.1. A questão ambiental e a cidade 27

2.2. Desenvolvimento do planejamento urbano ambiental 33

2.3. Planejamento e clima urbano 43

2.3.1. A inserção das questões climáticas na avaliação do ambiente urbano 43

2.3.2. Abordagem: a questão das escalas no clima urbano 46

2.3.3. Contribuições da análise climática para o planejamento 52

3. Modelos de clima urbano 65

3.1. Classificação 65

3.1.1. Modelos empíricos 65

3.1.2. Modelos de balanço de energia 67

3.1.3. Modelos fluidodinâmicos 69

3.1.3.1. Campo de velocidades 70

3.1.3.2. Equações fundamentais da mecânica dos fluidos 70

3.2. Modelos analíticos 73

3.2.1. Parâmetros de radiação 73

3.2.1.1. Posição do sol 74

3.2.1.2. A radiação solar incidente e suas parcelas 76

3.2.1.3. Radiação incidente em superfícies verticais orientadas 77

3.2.1.4. Propriedades radiativas dos materiais 77

3.2.1.5. Temperatura de fundo de céu 79

3.2.1.6. Fatores de forma 80

3.2.2. Parâmetros de convecção 83

3.2.2.1. Fenômenos que originam o vento 83

3.2.2.2. Rugosidade 84

3.2.2.3. Perfil de vento para camada limite neutra 89

3.2.2.4. Turbulência 90

3.2.2.5. Estabilidade 92

3.2.2.6. Velocidades dentro do canyon 96

3.2.2.7. Trocas de calor por convecção 97

3.2.3. Parâmetros de armazenamento de calor 99

3.2.3.1. Soluções analíticas 99
3.2.3.2. Método de diferenças finitas 103
3.2.4. Balanço: exemplos 107
3.2.4.1. Cluster Thermal Time Constant – CTTC 107
3.2.4.2. Urban Canopy Layer Model 108
3.2.4.3. UCLM 30 e UCLM 60 111
3.3. Modelos computacionais 114
3.3.1. Envi-met 114
3.3.1.1. Estrutura 114
3.3.1.2. Análise dos termos ou etapas 117
3.3.1.3. Exemplo de resultados 121
3.3.2. Aplicativos de CFD (CFX) 122
3.3.2.1. Estrutura 122
3.3.2.2. Confecção do modelo 124
3.3.2.3. Determinação da malha 125
3.3.2.4. Domínio 129
3.3.2.5. Condição limite de entrada e saída 130
3.3.2.6. Condição limite das superfícies sólidas 131
3.3.2.7. Expressões com variáveis 132
3.3.2.8. Controle de solução 133
3.3.2.9. Exemplos de resultados obtidos 133
3.4. Avaliação dos modelos 134
4. Estudo de Caso 139
4.1. A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e a capital 139
4.2. Definição da área de estudo 144
4.2.1. Delimitação 144
4.2.2. Histórico 147
4.3. Contextualização Climática 148
4.3.1. Classificação climática do município 148
4.3.2. Regime de ventos 149
4.4. Levantamento 154
4.4.1. Desenho da área 154
4.4.1.1. Procedimento 154
4.4.1.2. Resultados da vetorização 157
4.4.2. Levantamento em campo 157
4.4.3. Apresentação de resultados 159
4.5. Medidas de campo 163
4.5.1. Planejamento 163

4.5.2. Medição de Fevereiro 165
4.5.3. Medição de Setembro 174
5. Simulações 181
5.1. Modelos analíticos desenvolvidos 181
5.1.1. Estudos com índices de conforto 181
5.1.2. Aplicação do modelo de diferenças finitas 187
5.1.3. Canyon urbano 195
5.1.4. Consumo de energia 201
5.1.4.1. LT Urban 201
5.1.4.2. PRECIs 203
5.1.4.3. Obstrução 1.0 204
5.2. Modelos computacionais utilizados 211
5.2.1. Insolação (Ecotect) 211
5.2.1.1. Modelagem da área 211
5.2.1.2. Resultados 212
5.2.2. ENVI-Met 213
5.2.2.1. Modelagem da área 213
5.2.2.2. Parâmetros de entrada 214
5.2.2.3. Primeiro grupo de simulações 215
5.2.2.4. Segundo grupo de simulações 218
5.2.3. CFX: Simulação aerodinâmica 222
5.2.3.1. Modelagem da área 222
5.2.3.2. Primeiro grupo de simulações 223
5.2.3.3. Segundo grupo de simulações 224
5.2.3.4. Simulação com modelo octogonal 227
5.2.3.5. Comparação com resultados de túnel de vento 232
5.2.4. CFX – Simulação térmica 234
5.2.4.1. Modelo 234
5.2.4.2. Aplicação 241
5.3. Avaliação geral dos procedimentos e resultados 247
6. Clima e ocupação 249
6.1. Ferramentas de planejamento urbano no Brasil 249
6.2. Variáveis de ocupação 254
6.2.1. Dados das fachadas 255
6.2.2. Parâmetros básicos 256
6.2.3. Parâmetros avançados 258
6.2.3.1. Rugosidade 259
6.2.3.2. Obstrução média 262

6.2.3.3. Índice de compacidade 262
6.2.3.4. Variação de alturas 265
6.3. Simulações 266
6.3.1. Insolação 266
6.3.2. Vento CFD 268
6.3.3. Temperatura- Modelo Analítica 270
6.3.4. Consumo de energia 272
6.3.5. Equações de regressão 272
6.3.5.1. Insolação 275
6.3.5.2. Ventilação 276
6.3.5.3. Temperatura 280
6.3.5.4. Consumo de energia 283
6.4. Avaliação dos resultados 284
7. Considerações Finais 287
7.1. Verificação da hipótese e dos objetivos 287
7.2. Contribuições e limites 287
7.3. Desenvolvimentos futuros 289
7.4. Considerações sobre a interdisciplinaridade 290
Referências 293
ANEXOS

Introdução 1

1.1. Objeto e hipótese

O impacto das atividades antrópicas no comportamento atmosférico vem sendo constantemente revisitado na mídia e na agenda política internacional. A ação humana, supostamente, afeta o clima em várias as escalas, com resultados freqüentemente negativos. Roaf (2004) apresenta uma extensa discussão, em tom bastante alarmista, acerca dos impactos desta alteração. A autora cita como exemplos: aumento da ocorrência de episódios climáticos violentos (enchentes, tornados, ondas de calor, etc.); risco de derretimento das calotas polares, com elevação no nível dos oceanos; aumento no consumo energético para condicionamento de edifícios; dentre outros.

Em um plano global, parece haver consenso, de que políticas públicas precisam ser adotadas no sentido de reverter essa influência. No entanto, quando se trata da questão sob a ótica da arquitetura e do urbanismo, verifica-se que este tema ainda carece de desenvolvimento para que permita a apropriação dos seus conceitos na prática projetual e de planejamento cotidianas.

À primeira vista, ao se buscar uma estratégia de abordagem para o clima urbano, pode ser tentador se deixar guiar por propostas como a de Buckminster Fuller para a cidade de Nova York, em 1968 (BFI, 2005). Maravilhado pelas possibilidades estruturais da geodésica e pelos avanços tecnológicos, ele projetou uma estrutura geodésica transparente sobre Manhattan que criaria um ambiente completamente controlado (Figura 1.1).

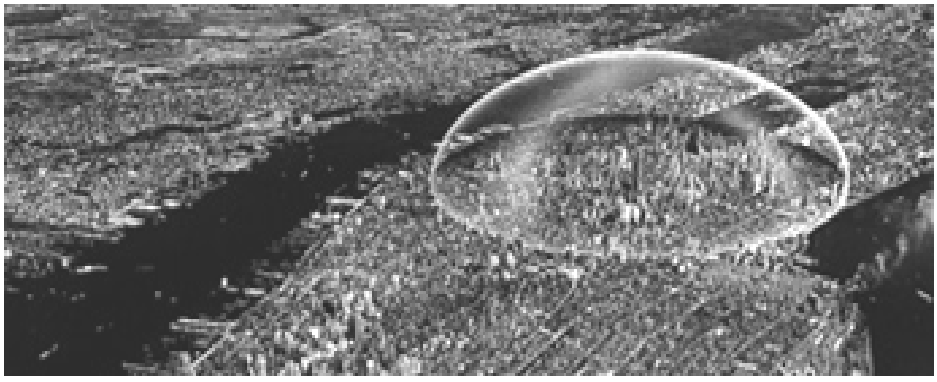


Figura 1.1: Cúpula de Buckminster Fuller sobre a cidade de Nova York

Fonte: BFI,2005

A idéia de controlar o comportamento térmico dos ambientes havia ganhado força com a disseminação de aparelhos de ar condicionado. Se era possível adequar o clima ao conforto humano no interior dos edifícios, por que não tentar controlar o clima externo também? Em um período de energia barata e ilimitada, o desenvolvimento tecnológico parecia ser a solução para todo e qualquer problema da humanidade.

Nos mais de quarenta anos que separam este período do atual, esta visão tecnológica extremista perdeu força e a interação com os recurso naturais passou a ser premissa nas intervenções espaciais. A partir daí, várias tentativas no sentido de incorporar a questão climática, e ambiental foram realizadas, em um escopo mais amplo; no processo de planejamento e projeto tanto do edifício, quanto da cidade.

A complexidade envolvida no estudo desta questão fez com que a interdisciplinaridade se tornasse uma necessidade. Inserido em uma linha de pesquisa da Arquitetura e Urbanismo, este trabalho aborda a questão por uma ótica propositiva que é própria do arquiteto. Por isso, busca-se aqui fornecer insumos para a intervenção espacial, gerando ambientes com maior qualidade para seus ocupantes.

O objeto desta pesquisa é o clima urbano, entendido como a ambiência térmica de uma área limitada, gerada pela interação entre a atmosfera e o ambiente construído de uma cidade, ou de parte dela, que afeta as condições de conforto térmico do pedestre e o consumo energético das edificações.

Estas edificações, que compõem as cidades, interceptam e transformam a energia térmica e cinética do ambiente, modificando as condições ambientais do seu entorno. Isso gera situações microclimáticas específicas nos diferentes recintos urbanos e altera a condição da atmosfera superior até onde segue a sua área de influência. Ao mesmo tempo em que são agentes de transformação da ambiência térmica, elas também sofrem seus efeitos, a partir de alterações na sua condição interna que podem afastá-la ou aproximá-la da zona de conforto térmico humano.

As alterações no ambiente térmico interno e externo podem ser determinadas através da aplicação de princípios físicos de termodinâmica para áreas de controle limitadas. A escolha e parametrização destes modelos, a seleção das variáveis e as formas de análise dos resultados constituem o foco deste trabalho.

Vários estudos, que serão apresentados no decorrer deste trabalho, comprovaram a existência de uma relação entre a ocupação urbana e o clima. **Partiu-se da hipótese de que a ocupação urbana pode ser descrita somente através das variáveis que são mais frequentemente utilizadas no planejamento urbano – taxa de ocupação, coeficiente de aproveitamento e recuos – e que estas variáveis são suficientes para que se determine a ambiência térmica de um determinado espaço urbano.**

Uma vez conhecida esta relação, acreditava-se que ela poderia ser generalizada para situações similares, permitindo ao planejador

controlar, orientar ou estimular os arranjos espaciais urbanos, de modo a aproximar as condições ambientais dos recintos daquelas desejadas, sob ponto de vista térmico e energético.

Pretende-se, ainda, revisar a abordagem urbanística do planejamento climático, com o objetivo de construir ferramentas e métodos para que se possa efetivamente incorporar a questão nos processos de projeto e gestão das cidades.

Observa-se que, apesar de haver literatura disponível para estudo da questão climática urbana, a parametrização dos modelos para realidade urbana e climática nacional permanece pouco explorada. A caracterização do comportamento térmico e energético diurno de áreas com ocupação heterogênea, típicas das grandes cidades brasileiras – baseada em uma combinação de modelagem analítica, simulações computacionais, ferramentas de geoprocessamento e verificações empíricas – constitui o ineditismo deste trabalho.

1.2. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é gerar uma metodologia de avaliação da ambiência térmica urbana cujos resultados se prestem a orientar decisões de projeto e gestão nas cidades brasileiras. Buscou-se sempre utilizar variáveis e ferramentas familiares ao planejador urbano, quando possível, ou trabalhar com as variáveis de modo a produzir resultados passiveis de incorporação às legislações urbanas, à gestão administrativa municipal ou ao processo de desenho urbano e arquitetônico.

Para isso, devem ser cumpridos os seguintes objetivos específicos:

- Estabelecer um marco teórico para a compatibilização do estudo do clima com a prática de planejamento urbano;
- Levantar, classificar e descrever os modelos de análise de clima urbano, com principal enfoque naqueles que utilizam os princípios da termodinâmica para analisar os fenômenos;
- Elencar as variáveis do ambiente construído que impactam o clima urbano, bem como a participação de cada uma na alteração deste;
- Desenvolver um método para aplicação dos modelos em áreas urbanas heterogêneas;
- Aplicar o método a uma área piloto, validando os modelos utilizados a partir da comparação dos resultados da sua aplicação com medições de campo;
- Comparar os resultados obtidos na avaliação da ambiência térmica com os parâmetros de ocupação locais, buscando extrair generalizações.

1.3. Estrutura do trabalho

A tese está estruturada em 7 capítulos, sendo o primeiro esta introdução.

O capítulo 2 apresenta uma revisão de algumas teorias de planejamento urbano, destacando a maneira como elas enxergam a questão ambiental, dentro da qual se incluiria a questão climática. Algumas aplicações de planejamento e suas potencialidades são também discutidas.

No capítulo 3 são discutidos os modelos para avaliação do clima urbano. As variáveis envolvidas são levantadas e sua parametrização apresentada

No capítulo 4 é apresentada a área de estudo, sua contextualização geográfica, histórica e climática e o levantamento de dados realizado, incluindo características da ocupação urbana e medições de variáveis ambientais em campo.

No capítulo 5, os modelos estudados são aplicados na área de estudo, verificando o seu comportamento térmico e energético. Os parâmetros utilizados e os limites de aplicação são estudados a partir de um caso concreto, comparando-se os resultados com as medições realizadas.

No capítulo 6, são estabelecidas relações entre os resultados das simulações e os parâmetros de ocupação da área de estudo. Buscou-se verificar a possibilidade de generalização das informações e apropriação nas práticas de planejamento urbano.

No capítulo 7, são apresentadas as considerações finais, a verificação da hipótese e discussão de possíveis estudos futuros.

Planejamento urbano e clima

2

As cidades estiveram sempre inseridas no meio-ambiente. Cresceram, modificando este ambiente de forma predatória ou harmônica. Nos últimos anos, as cidades foram inseridas na discussão ambiental, tendo crescido a participação da sua população no total mundial[1].

Este capítulo busca levantar um histórico das abordagens científicas ambientais e urbanas de modo a estabelecer paralelos, cruzamentos e potencialidades de integração. O objetivo é construir um marco teórico que sirva de base para propostas de aplicação futura de critérios climáticos no planejamento urbano.

1 Só no Brasil, segundo dados do IBGE (BRASIL, 2007), a participação urbana na população passou de 30% do total em 1940 para 81% em 2000

2.1. A questão ambiental e a cidade

A questão ambiental vem sendo cada vez mais abordada em todos os ramos da atividade humana. Na construção civil e no planejamento urbano, esta incorporação está sendo abrigada, hoje, sob a marca de urbanismo ou construção "verde" ou "sustentável". Observando a grande variedade de soluções arquitetônicas e urbanísticas atuais que se apresentam no discurso sob este rótulo, é possível questionar a existência de um conceito único que oriente todas as propostas. Na verdade, apesar da diversidade de soluções, e até mesmo de conceitos, há vários pontos em comum que definiriam um paradigma deste tipo de urbanismo. Aqui, vale tomar emprestada a diferenciação de Kunh entre regra e paradigma que, embora construída para a pesquisa científica, se aplica ao projeto e ao planejamento.

> *[...] introduzi a noção de paradigmas compartilhados ao invés das noções de regras, pressupostos e pontos de vistas compartilhados, como sendo a fonte da coerência para as tradições da pesquisa normal. As regras, segundo minha sugestão, derivam dos paradigmas, mas os paradigmas podem dirigir a pesquisa mesmo na ausência de regras. (KUNH, 1994, p. 66)*

Para entender estes paradigmas, no entanto, é fundamental uma compreensão da evolução do processo de planejamento e sua relação com as variáveis relativas aos fenômenos climáticos e energéticos, sendo este o objetivo deste capítulo.

Embora as preocupações ambientais remontem ao século XIX, o movimento ambiental, como é conhecido hoje, teve suas origens nos

Estados Unidos da década de 60. Grupos isolados defendiam a preservação ambiental, em uma reação à destruição causada pela sociedade industrial. Apesar de ter sido considerado ingênuo e do enfoque excessivamente preservacionista, o movimento ganhou força da década seguinte, se disseminando pelos demais países industrializados e chegando à América Latina, Europa Oriental, União Soviética e Leste da Ásia na década de 80 (VIOLA, 1991).

Em 1970, o movimento ambiental perde seus contornos ingênuos a partir da formação do Clube de Roma que, ao emitir o relatório Os Limites do Crescimento, recuperou a lógica malthusiana de necessidade de contenção do crescimento econômico e populacional em níveis extremos para que se evitasse uma degradação ambiental ainda maior (MEADOWS, 1971)[2].

2 MEADOWS, Donella et al. *The limits of growth*. Washington: Potomac, 1971 *apud* SIMMONS, 2000

Um contraponto menos radical foi estabelecido na Conferência de Estocolmo de 1972, onde foi proposto um controle gradual dos crescimentos econômico e populacional, e não sua total interrupção como proposto Clube de Roma.

O Brasil participou da conferência com uma postura oposta à dominante, pois, envoltos com o Milagre Econômico, os representantes brasileiros defendiam uma industrialização intensa do país, sem grandes preocupações ambientais. Para isso, contavam com a grande disponibilidade de recursos naturais e com a capacidade do ambiente, ainda relativamente pouco explorado, de absorver os eventuais impactos (VIOLA, 1991).

É importante observar o caráter unilateral das recomendações feitas por ambos os grupos, jogando o peso da conservação do ambiente para os países menos desenvolvidos, detentores da maior parte do patrimônio ambiental, para que os industrializados pudessem manter seus níveis de produção.

O Brasil iniciou-se timidamente na questão ambiental ainda na década de 70, quando foram criadas instituições não governamentais preocupadas com a questão e, mais tarde, as agências ambientais governamentais com o objetivo de apagar a imagem negativa deixada pela delegação brasileira na Conferência de Estocolmo.

De 1971 a 85, estes foram os dois principais agentes da questão ambiental, agindo basicamente com enfoque na preservação ambiental, combatendo a poluição industrial e a destruição de belezas paisagísticas por empreendimentos humanos e preservando algumas amostras de ecossistemas. Houve uma importação acrítica do modelo internacional, que deixou de fora questões importantes na realidade brasileira, como o controle populacional e o saneamento básico, que já haviam sido resolvidas nos países industrializados.

Entre 1985 e 91 a disseminação da preocupação com o ambiente transformou o movimento ambiental em multi-setorial, com várias entidades e grupos envolvidos. A Tabela 2.1 mostra a visão de Viola (1991) da atuação de cada setor envolvido nos períodos de 1971-1985 e 1986-1991.

AGENTES	ATUAÇÃO 1971-1985	1986-1991
ONGs e Grupos ambientais	• Denuncia e conscientização; • Apropriação acrítica do modelo internacional, deixando de fora controle populacional e saneamento básico; • Influência limitada na formulação de políticas ambientais; • Tidas como ingênuas e tecnicamente incompetentes pelo governo.	• Surgem novas organizações com perfil profissional e outras, amadoras, se profissionalizam; • Buscam alternativas viáveis para a recuperação do ambiente; • Influência nas agências estatais e na Constituição de 88; • Desde 88, adotam a visão do desenvolvimento sustentável.
Agências Governamentais	• Socialização dos custos orienta sistema de licenciamento ambiental e controle de poluição; • Tidas como pouco severas e lentas pelas ONGs; • Trabalham com hipótese de disponibilidade infinita de recursos no Brasil.	• Assumem função normativa e avaliadora • Disseminam a problemática ambiental no governo; • Promovem interação entre agências e comunidade científica e entre as próprias agências; • IBAMA traz a questão do uso conservacionista de recursos.
Grupos Sócio-ambientais	-	• Atuam em causas sociais com impacto ambiental como seringueiros, sem terra, etc;
Instituições científicas	-	• Abordam a questão de forma interdisciplinar; • Proporcionam embasamento científico pras propostas elaboradas.
Mercado consumidor	-	• Surge a conscientização e passam a exigir atitudes ambientalmente corretas dos produtores.
Empreendedores	-	• Interessados nas oportunidades empresariais da proteção ambiental; • Financiam as ONGs profissionais.
Agências internacionais	-	• Devem reger questões que ultrapassam as fronteiras nacionais.

Tabela 2.1: Quadro-resumo da atuação dos diversos agentes na questão ambiental brasileiras

Fonte: Baseado em Viola (1991)

O marco definitivo da questão ambiental no Brasil é a realização da Conferência das Nações Unidas Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (UNCED) em 1992 no Rio de Janeiro. A conferência teve repercussão internacional e consolidou a visão do desenvolvimento sustentável como a base para a elaboração de políticas relacionadas ao meio-ambiente. Embora isso sugira a ilusão de um consenso nos meios científicos e políticos, o desenvolvimento sustentável ainda é um conceito exageradamente amplo e dificilmente aplicável de maneira direta. No relatório *Nosso Futuro Comum,* foi apontada a necessidade de "um novo tipo de desenvolvimento capaz de manter o progresso humano não apenas em alguns lugares por alguns anos, mas em todo o planeta até um futuro longínquo" (ONU, 1988, p. 4). O desenvolvimento sustentável seria, deste modo, aquele que permite o atendimento das necessidades presentes sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem suas próprias necessidades. Costa afirma que o consenso gerado em torno do termo, na verdade, é muito mais resultado de sua generalidade e imprecisão do que da sua consistência (COSTA, 2000). As diversas definições que a sustentabilidade ganhou desde a sua popularização merecem maiores discussões.

Bartelmus (1994) mostra que o conceito de sustentabilidade nasceu na própria ciência ecológica, significando o comportamento prudente de um predador que evitava caçar acima da sua necessidade e da capacidade de recuperação da população de presas, tendo sido rapidamente apropriado pelo discurso econômico como a conduta de manter equilibrada a receita e a despesa em um determinado período de tempo. O autor, porém, chama a atenção para o fato de que o termo atingiu uma grande variedade de significados, diferindo de acordo com as perguntas básicas: de que, para quem, onde e quando.

Para Costa (2000) o desenvolvimento sustentável é uma tradução do projeto de modernidade capitalista ocidental, que necessita da conservação da natureza para o processo de acumulação de capital no momento atual. O debate da sustentabilidade, na visão da autora, está mais relacionado à manutenção de uma determinada ordem social do que propriamente à preservação da natureza.

Apesar da identificação feita entre o projeto capitalista pós-moderno e desenvolvimento sustentável, o discurso da sustentabilidade pode abrigar diversas práticas e posturas ideológicas, o que vem contribuindo para o enfraquecimento do conceito através de definições exageradamente amplas e da utilização exaustiva do termo nos meios científicos e na mídia. A indefinição do conceito está ligada principalmente a uma necessidade política de apropriação, por parte de grupos de interesse, como definidor de práticas futuras ou diferencial na atração de recursos, como mostra Acselrad (1999, p.80):

> *Por um lado, se a sustentabilidade é vista como algo bom, desejável, consensual, a definição que prevalecer vai construir autoridade para que se discriminem, em seu nome, as boas práticas das ruins. Abre-se, portanto, uma luta simbólica pelo reconhecimento da autoridade para falar em sustentabilidade.*

Contudo, no tratamento do urbano, a noção de sustentabilidade foi desconsiderada por quase 30 anos. Incapazes de lidar com a questão das aglomerações de população, os ambientalistas passaram a negar a sua existência, tratando a cidade como uma estrutura danosa ao meio-ambiente e excluindo da abordagem um processo social importante para o entendimento do problema ambiental (COSTA, 2000). A explicação para a oposição ferrenha está, segundo Steiberger (2001, p. 1339), na origem histórica diametralmente oposta das dos dois fenômenos.

> *Há uma hostilidade do movimento ambientalista para com a existência de cidades e para entendê-la é preciso retornar à origem das preocupações urbana e ambiental. A urbana surgiu com a generalização do capitalismo ocidental urbano-industrial e a consolidação de um projeto de modernidade. A ambiental surgiu das reações às características negativas da organização territorial associada a esse projeto.*

Aos poucos, porém, a resistência dos ambientalistas em relação às cidades foi cedendo, indicando mudanças no conceito de ambiente de uma visão preservacionista tradicional para uma que tratava de problemas urbanos e sociais como o abastecimento, abrindo caminho para uma nova ótica de abordagem integrada. Sob este prisma, é defendida uma visão holística, tomando como base o ponto de vista dos diversos atores envolvidos e adotando práticas de gestão e de intermediação de conflitos, ao invés das práticas tradicionais de planejamento (PACHECO et al., 2000).

Outra abordagem interessante divide o discurso do desenvolvimento sustentável em diversas matrizes: da eficiência, da eqüidade, da escala, da ética e a da auto-suficiência (ACSELRAD, 1999). A primeira e a terceira estão relacionadas a uma racionalidade econômica, buscando ou otimizar ou conter os processos e assim viabilizar a continuidade dos mesmos e da sociedade. A segunda e a quarta, na verdade, tratam de uma mudança de paradigma, pois se interessam por uma justiça inviável no sistema capitalista. É questionável se seriam realmente discursos de sustentabilidade, tendo em comum com os demais somente a necessidade de continuidade da vida humana e tentando alterar os demais aspectos da vida social. A última contém um forte viés ideológico, pregando a desvinculação das economias nacionais com os fluxos do mercado mundial.

Bartelmus (1994, p. 64), por sua vez, apresenta uma divisão própria, que pode ser tomada como complementar à anterior, afirmando que "no que se refere à disponibilidade de bens relevantes para o bem-estar humano, três categorias de sustentabilidade podem ser estabelecidas de acordo com a fonte dos bens: econômica, ecológica e social." O autor ainda separa a sustentabilidade em mais dois tipos: a do capital humano e a do capital natural. A visão é obviamente voltada para a questão econômica, o que pode ser percebido pela própria terminologia. Ela se aproxima bastante do discurso tecnocêntrico, no qual os mercados e a tecnologia são o ponto de partida para a elaboração do planejamento urbano e onde o bem-estar humano, e não o ambiente, deve ser o foco de preocupação (TATE & MULEGETTA, 1998). O meio natural, nesta linha, é visto como uma fonte de recursos a ser preservada, ou mais ainda, capitalizada:

> *Os sistemas naturais disponibilizam recursos sem custo monetário como água, oxigênio, fluxos de nutrientes, capacidade de assimilação de dejetos e outros bens menos tangíveis. [...] Enquanto estes bens e serviços não são escassos eles não afetam a sustentabilidade da produção e do crescimento econômico, ou o bem-estar humano (BARTELMUS, loc cit).*

Bartelmus (1994) mostra também que é importante diferenciar dois conceitos constantemente confundidos: a sustentabilidade e a otimização. Esta última está relacionada somente à produtividade do processo, à capacidade de realizá-lo com o menor consumo de capitais e recursos possível, mas não diz nada da capacidade de continuidade do processo. Há práticas que podem estar perfeitamente otimizadas e não serem sustentáveis e vice versa. Qualquer prática, por exemplo,

que envolva o uso de recursos naturais não renováveis, tem sustentabilidade limitada sob este ponto de vista, mesmo que esteja totalmente otimizada e eficiente.

Tate & Mulegetta (1998) levam esta visão ao extremo, afirmando que a união entre tecnologia e liberdade de mercado seria capaz de levar a um desenvolvimento realmente sustentável. Como exemplo, os autores citam as melhorias ambientais, econômicas e sociais obtidas não só em países industrializados, mas também no anel do Pacífico. Acreditam ser possível atingir um nível ótimo de riqueza que corresponderia necessariamente a um nível ótimo ambiental, com conseqüente melhoria no nível de qualidade de vida geral.

Esta idéia, obviamente, sofre ataques das visões marxistas do ambiente, que acreditam na incapacidade do capitalismo de gerar um desenvolvimento homogêneo. Costa (2000, p. 62), por exemplo, coloca que "embora a justeza das intenções seja praticamente inquestionável, a análise (e as propostas) dificilmente resiste ao crivo de abordagens mais críticas do processo, que enfatizam a assimetria das relações de poder, ou a quase impossibilidade de uma solidariedade capitalista".

Em meio a estas várias disputas paradigmáticas e ideológicas, torna-se difícil inserir a questão urbana. Moreira afirma que o conceito de ambiente urbano é fragmentado, com definições complementares que passam desde a ecologia até a sociologia. O autor define este ambiente como "as relações dos homens com a natureza, em aglomerações de população e atividades humanas, constituídas pela apropriação e uso do espaço construído e dos recursos naturais" (MOREIRA, 1999, p. 108). Acselrad (1999), no intuito de identificar e classificar as idéias já correntes, dividiu as representações urbanas para o estudo do ambiente urbano em três grupos, cada qual com seu respectivo discurso de sustentabilidade: tecno-material, qualidade de vida e legitimação das políticas públicas.

A representação tecno-material apropria-se dos conceitos ecológicos e vê a cidade como uma continuidade material de fluxos e estoques. Está ligada à matriz da eficiência e ao ciclo de recursos-produção-rejeito, sendo necessária a sustentabilidade de todas as etapas deste ciclo. Parte do pressuposto que a degradação energética é inevitável e vê como única solução a otimização dos processos, confundindo, como já explicado, este conceito com o de sustentabilidade:

> *O conceito de ecossistema, aplicado aos assentamentos humanos, permite visualizar com clareza os principais fluxos energéticos, de alimentos, de materiais, de informação e de pessoas que se destinam aos assentamentos humanos e que dele se originam (RIBEIRO & MELLO, 1996, p. 65).*

A matriz discursiva da qualidade de vida, por sua vez, relaciona a cidade com o seu papel de proporcionar adequadamente os "componentes não mercantis da existência cotidiana [...] notadamente no que se refere às implicações sanitárias (ACSELRAD, 1999., p. 84)."

Ela evolui da representação tecno-material incorporando, além da eficiência ecoenergética, questões de identidade e significado.

Há ainda uma terceira matriz parte de um pressuposto diferente. Para os seus integrantes, "a base técnico-material da cidade é vista então como socialmente construída, no interior dos limites da elasticidade das técnicas e das vontades políticas. (ACSELRAD, 1999, p. 86)."

Ambos os conceitos apresentam duas vantagens. A primeira delas é que eles permitem a previsão e a estruturação de propostas com bases científicas, mais especificamente bases estatísticas e matemáticas, sem a incursão em grandes erros, sendo especialmente adequadas para dimensionamentos e índices de qualidade. A segunda é permitir que a sustentabilidade seja medida, ou pelo seu tempo previsto de viabilidade, ou através de instrumentos como as *Ecological Footprints*, ou Pegadas Ecológicas. Este conceito americano assume que as populações ocidentais normalmente necessitam de uma área maior do que a que efetivamente ocupam para garantir a suas existência, ou melhor, seu modo de vida (VALE & VALE, 1999).

Assim, gastos energéticos, por exemplo, são convertidos na área de represamento de água ou de extração de petróleo, permitindo avaliar a viabilidade futura do processo a partir da disponibilidade de áreas para estes fins.

No entanto, optar pela representação tecno-material significa estar atento para que as hipóteses formuladas não estejam incorretas, tomando como técnicos problemas que na verdade são políticos e que não podem ser resolvidos de outra forma. Outras limitações desta abordagem são permitir a apropriação do discurso técnico pelo capital, inviabilizar a implantação das propostas por desconhecimento da situação política ou dos aspectos sociais envolvidos.

É importante, deste modo, estabelecer um panorama histórico da apropriação do discurso ambiental pelos planejadores urbanos e verificar a maneira como estes princípios influenciaram a prática urbanística e o pensamento a respeito da cidade.

2.2. Desenvolvimento do planejamento urbano ambiental

Por mais que se discuta hoje a questão ambiental no planejamento urbano, a verdade é que essa problemática não é nova, nem o é a polêmica gerada na sua discussão. Aparentemente, toda vez que uma cidade atinge um determinado nível de desenvolvimento, a questão da sua (falta de) qualidade ambiental é necessariamente levantada. Invertendo o raciocínio dos itens anteriores, será tratada agora a visão de arquitetos e planejadores em relação à qualidade ambiental das cidades.

Já no século II d. C, quando Roma contava com uma população acima de 1 milhão de habitantes e passava por um período de expansão vertical, com a construção edifícios de 6 a 12 pavimentos, o imperador Ulpiano teria criado o *Heliocaminus*, o caminho do sol (LAMBERTS,

DUTRA & PEREIRA, 1997). O imperador Augusto limitaria, algum tempo depois, a altura dos edifícios de 35 para 21 metros. Mais tarde, Nero se preocuparia com a questão da insolação nas ruas, determinando a altura máxima das edificações como duas vezes a largura da via (SCHNEIDER, 1961).

Com a redução da população urbana ocorrida na idade média, alguns problemas ambientais, como o acesso ao sol, deixaram de ocorrer devido à extinção do seu principal fato gerador: a alta densidade urbana. O estudo da questão foi retomado com a preocupação sanitária nascida após a Revolução Industrial. Com o conseqüente aumento da população urbana, as condições ambientais das cidades voltaram a se deteriorar nos séculos XVII e XIX. O quadro de poluição, densidade excessiva e desigualdade social geraram diversas reações, dentre elas a proposta revolucionária marxista. Mumford (1998, p. 513) afirma que "talvez a maior contribuição dada pela cidade industrial tenha sido a reação que produziu contra os seus próprios maiores descaminhos; e, para começar, a arte do saneamento ou da higiene pública."

As primeiras reações foram as reformas urbanas do século XIX que, ainda que feitas principalmente com objetivos estéticos ou de controle social, levaram em conta novos requisitos de luz e ventilação. As avenidas largas foram instituídas, separando as edificações umas das outras, e restrições de altura e de ângulos redefiniram a configuração urbana de cidades como Paris, Londres, Nova York, Hong Kong e Buenos Aires. Estabeleceu-se aí uma forma urbana de edificações alinhadas com as ruas, de alturas definidas e áreas internas livres no centro da quadra[3].

3

(ANTOINE,1946; CROMPTON, 1955; NG, 2003 e DE SCHILLER, 2001.) A exceção para este padrão foi a cidade de Nova York, onde a forte especulação imobiliária e a malha viária estreita produziu ocupação total do lote com verticalização intensa.

Uma nova visão de cidade que começava a surgir, iniciada por Augusto Comte e desenvolvida pelos integrantes de Escola de Chicago. Segundo estes teóricos, a sociedade poderia ser entendida a partir de uma analogia com organismos vivos, sendo a cidade um dos elementos (ou órgãos) desta entidade (GOTTDIENER, 1993). Esta noção teve sua origem no crescimento das ciências biológicas no século XX e encontrou grande receptividade por parte dos urbanistas da época, desenvolvendo uma postura sanitarista de extinção de problemas ambientais – e sociais – como doenças do organismo urbano (GUNN & CORREIA, 1997).

No final do século XIX, Ebenezer Howard, em 1989, derivou daí a proposta para uma nova forma de expansão urbana, buscando a propriedade pública da terra e uma expansão polinucleada das cidades, diluindo os limites e, conseqüentemente, a dicotomia campo-cidade (HOWARD, 1946). O resultado seria uma ocupação de tamanho e densidade limitados, baseados em uma avaliação empírica e em parâmetros arquitetônicos da época. A expansão das cidades não ocorreria através do adensamento ou da expansão dos núcleos existentes[4], mas sim pela construção de outros núcleos semelhantes, mantendo o balanço entre o urbano e uma natureza domesticada. Gunn discute a apropriação destes paradigmas pelo poder dominante, mostrando como a proposta de reforma urbana serviu à contenção do

4

Na proposta de Howard, cada núcleo contava com uma população de aproximadamente 32.000 habitantes.

avanço comunista na Europa, discutindo a utilização do discurso de Howard na formação política do Partido Trabalhista na Inglaterra. O movimento das cidades jardins e sua visão reformista da ordem social seriam utilizados no pós-guerra britânico como contraponto ao marxismo revolucionário (GUNN, 1997).

A mesma reação à cidade industrial apareceu também de outra vertente. Le Corbusier (1997) apropriou-se de algumas questões já abordadas por Howard, principalmente no que se refere à qualidade ambiental, e tentou utilizar a sociedade industrial em benefício da cidade. Sua proposta, cristalizada na Carta de Atenas em 1943, propõe uma organização urbana totalmente funcional, com separação rígida de atividades e um resultado formal consistente: edificações isoladas, afastadas umas das outras para proporcionar ventilação e insolação adequadas, entremeadas por espaços verdes totalmente livres da circulação de automóveis. Para Lynch (1981, p 83), Corbusier apresentou na sua proposta uma outra visão urbana, que se aproxima mais da máquina do que do organismo vivo. Neste modelo, "uma cidade [...] é feita de partes pequenas, autônomas e indiferenciadas, ligadas a uma grande máquina que, em contraste, apresenta funções e movimentos claramente diferenciados."

Embora com sucessivas adaptações, estes dois paradigmas orientaram a maior parte da produção urbana e arquitetônica no pós-guerra europeu, expandindo sua influência ainda para alguns casos específicos nas Américas (MENNEH, 1997)[5]. Apesar de as propostas de Howard e Corbusier partirem de visões díspares de cidade, uma organicista e outra mecanicista, apresentavam vários pontos em comum, que originaram críticas semelhantes. Jacobs afirma que, apesar da resistência dos movimentos de cidades- jardins em relação à nova cidade moderna, a *Ville Radieuse* de Le Corbusier deriva exatamente do esquema conceitual proposto por Howard no início do século, tentando adaptá-lo a grandes aglomerações de população (JACOBS, 1973).

5

A autora apresenta ainda, no decorrer do trabalho, os impactos que ambas as teorias tiveram no traçado urbano da cidade de São Paulo, principalmente nos loteamentos da companhia City e no estabelecimento da torre isolada no lote como padrão de ocupação desejável na cidade.

Jacobs foi uma grande crítica de ambos os movimentos na década de 60. Choay (1997, p. 293) a descreve como sendo "uma partidária convencida do modo de existência autenticamente urbano, uma apologista da megalópole, em detrimento dos subúrbios e das cidadezinhas provincianas. Suas pesquisas, embora realizadas com espírito passional, repousam em uma informação sociológica profunda." Suas colocações tiveram grande influência no planejamento urbano posterior, combatendo aqueles que teriam sido os pilares do planejamento urbano durante os 50 anos anteriores (HALL, 1995). Jacobs enfatizou o fato de sua análise estar baseada na cidade real, com problemas reais, propondo avaliar a cidade como um grande laboratório onde as experiências passadas de êxitos e fracassos devam conduzir as políticas futuras. Ela propôs aceitar como características fundamentais para a vitalidade das cidades a sua diversidade, densidade e até mesmo a existência dos automóveis, criticando duramente os modelos anteriores (JACOBS, 1973). Acima de tudo, ela propôs uma revisão na forma de encarar a cidade, afirmando que a forma da cidade é ditada pelos seus processos internos, que podem,

uma vez entendidos e através dos instrumentos adequados, ser catalisados de maneira a produzir os resultados desejados, sempre através de um raciocínio indutivo. É também importante, no seu ponto de vista, romper com o apego romântico à natureza, que acaba por gerar uma estrutura suburbana ou semi-suburbana; abraçando uma visão de que a cidade, como produto da atividade humana, é parte legítima desta natureza (JACOBS, 1973). Sob este ponto de vista, seria uma atitude mais honesta tratar a natureza da cidade - que claramente **não** significa apenas os seus espaços verdes – como tal, impedindo expansões desnecessárias e indesejáveis que acabam por destruir exatamente aquilo que perseguem.

Há uma importante crítica ainda colocada por vários autores a respeito do autoritarismo derivado das posturas de Howard e Le Corbusier que, muitas vezes, focavam excessivamente na questão dos transportes e higiene e centravam no arquiteto, urbanista ou engenheiro o papel de médico ou salvador da área urbana sob intervenção (GUNN & CORREIA, 2001; JACOBS, 1973).

No início da próxima década, a arquitetura e o planejamento modernos sofreram a sua derrota final, com a queda dos edifícios Pruitt-Igoe em Saint Louis. Construído em 1955, estritamente dentro dos princípios modernos, o conjunto foi um fracasso social retumbante, que culminou com a sua implosão em 1972. Hall coloca que, ironicamente, este fato foi colocado no mundo inteiro como uma falha do "planejamento", enquanto, para ele, foi exatamente a falta de planejamento a causadora do fracasso (HALL, 1995).

Uma nova visão, por sua vez, ganhou impulso na década de 70, não só no urbanismo como em outras ciências: a Teoria Geral dos Sistemas. Ela é, na verdade, uma composição entre as visões orgânica e mecânica, criando uma nova visão, a "cibernética". A teoria, baseada nos conceitos de Von Bertalanffy, estabelece que os fenômenos mentais, sociológicos e culturais estão ligados aos físicos em uma coleção de eventos e objetos dinâmicos e inter-relacionados, sendo que cada um destes fenômenos apresenta similaridades com os demais, sem deixar de manter sua autonomia e leis específicas (GUNN, 1971).

Sua disseminação nos meios do planejamento urbano foi intensa. Martin e March (1972), por exemplo, afirmam categoricamente que a estrutura espacial da cidade é um sistema e que o planejamento do uso do solo, incluindo aí o zoneamento e a distribuição de densidades, depende do entendimento dos processos intrínsecos a ele. O procedimento metodológico gerado dentro desta teoria é de fácil aplicação, sendo preciso e reproduzível através da seqüência: estabelecimento de metas e objetivos, inventário, modelagem, previsão do estado futuro, avaliação e escolha, implantação, monitoramento e ajuste (HALL. 1995).

É importante notar que esta metodologia pressupõe uma atuação constante do planejador sobre o espaço urbano, novamente focalizando na visão da cidade como processo contínuo de construção do espaço. Um exemplo claro disso pode ser visto na comparação de

dois importantes planos para a metrópole de São Paulo no final da década de 60 e início de 70. Enquanto o Plano Urbanístico Básico[6] do município abordava a questão sob o ponto de vista conceitual, com sugestões de intervenções concretas, o PMDI[7] afirmava que seu sucesso dependia da implementação de um órgão de planejamento metropolitano e que, através do monitoramento e revisão constantes, seria garantida a eficácia das estratégias adotadas.

6 SÃO PAULO (Cidade), 1968

7 SÃO PAULO (Estado), 1972, p. XV

As principais contraposições a essa perspectiva e às anteriores vieram nas décadas seguintes das mais diferentes vertentes. Lynch (1995) critica a impropriedade da analogia biológica, baseando-se principalmente na questão dos limites indefinidos das cidades e na impossibilidade de se atingir um equilíbrio ótimo dinâmico urbano. Dentro dos Estados Unidos, começou a ser questionada a legitimidade dos planejadores sistêmicos, basicamente com três argumentos: desconfiança em relação ao planejamento do perito, que normalmente vem de baixo para cima; paranóia em relação ao uso da abordagem sistêmica para ocultar atividades políticas eticamente reprováveis e tumultos em várias cidades americanas que demonstraram a incapacidade da abordagem de efetivamente melhorar as condições vida nas cidades (HALL, 1995). O reducionismo e determinismo tecnológico sistêmicos também são duramente criticados, assim como a sua incapacidade de entender os conflitos e jogos de poder inerentes ao sistema capitalista e, conseqüentemente, ao espaço urbano (HALL, 1995; GOTTDIENER, 1993).

Como alternativa à visão sistêmica, surgiu com força nos anos 70 uma abordagem marxista da cidade, em que o espaço urbano é visto como o resultado espacial de uma série de processos relativos à acumulação de capital. Embora apresente uma visão complexa e abrangente do fenômeno urbano, esta linha recebe críticas pela grande dificuldade em transformar seus pressupostos teóricos em propostas efetivas de planejamento (HALL, 1995). Algumas afirmações marxistas, contudo, são úteis no direcionamento das práticas do urbanismo, tais como o incentivo à participação comunitária nas decisões de planejamento e uma tentativa de redução das desigualdades espaciais resultantes do desenvolvimento capitalista, principalmente na redução da degradação ambiental e social. Gottdiener, por exemplo, rompe com o conceito de unicidade de objetivos, tanto do capital quanto da força de trabalho e acredita ser possível, através do gerenciamento e intervenção nestes conflitos melhorar as condições de vida de comunidades desfavorecidas.

> *O momento atual é aquele em que o espaço absoluto de dominação política e econômica reina sobre o espaço social de vida cotidiana. [...] Assim , o pensamento sócio-espacial deve ser redirecionado de uma análise da economia para a transformação das relações sociais, o que requer um retorno à luta por uma vida comunitária equilibrada que desenvolva no espaço relações sociais transformadoras (GOTTDIENER, 1993, p. 290).*

A divisão entre o planejamento sistêmico e marxismo estrutural persistiu nos anos que se seguiram, mas a prática do planejamento foi

fortemente afetada pela mudança na situação econômica da década de 80. Hall (1995) afirma que o planejamento foi desacreditado nesta década devido à recessão econômica minou a vitalidade das cidades. Na tentativa de recuperar áreas que se degradavam pela desocupação de habitações e indústrias, os planejadores se converteram de limitadores a incentivadores do crescimento urbano, aliando-se à iniciativa privada. O objetivo era "alavancar" o capital privado com um mínimo de investimento público, promovendo a renovação necessária. Os marxistas estruturalistas mantiveram fortes críticas a este tipo de iniciativa, como mais uma apropriação do Estado para a reprodução do capital (GOTTDIENER, 1993; HALL, 1995). Porém, devido à redução dos fundos estatais, o modelo da parceria público-privada na produção da cidade foi mantida e incentivada até os dias de hoje.

Atualmente, as discussões acerca das direções do planejamento urbano têm se intensificado. Farnstein (2000, p.470) afirma que "a principal questão na teoria do planejamento é a análise da possibilidade de se obter uma melhor qualidade da vida humana no contexto da política econômica global capitalista". A autora aponta três linhas existentes buscando maneiras de responder a esta questão: o planejamento comunicativo, o novo urbanismo e a cidade justa. Para ela, cada modelo responde a um desequilíbrio gerado pelos modelos anteriores, ou pela falta de modelo vigente em várias cidades. Deste modo, o planejamento comunicativo ataca o planejamento feito de cima para baixo, por especialistas que advogam um interesse público unificado que pode ser atingido através do planejamento racional; o novo urbanismo responde à destruição espacial das comunidades pelas ocupações dirigidas exclusivamente pelos interesses do mercado imobiliário, e a cidade justa reage aos desequilíbrios espaciais e sociais gerados pelo modo de produção capitalista.

O primeiro modelo, o planejamento comunicativo, foca principalmente o papel do planejador como intermediário entre os diversos agentes urbanos. Buscando sua isenção total, ele deve buscar o consenso dos diversos setores envolvidos, chegando à melhor solução geral. Normalmente, isto é feito com a implantação de fóruns populares onde as decisões são tomadas. Farnstein (2005) afirma que, embora o princípio de que se devem ouvir todos os grupos envolvidos e que a opinião de nenhum deles em particular seja privilegiada seja uma importante regra de orientação, este método não resolve de maneira adequada com as deficiências inerentes dos sistemas democráticos, dentre eles: a dificuldade na representação dos interesses de grupos heterogêneos ou segregados, a possibilidade da imposição dos objetivos de grupos institucionalmente ou economicamente poderosos e a manutenção dos direitos das minorias.

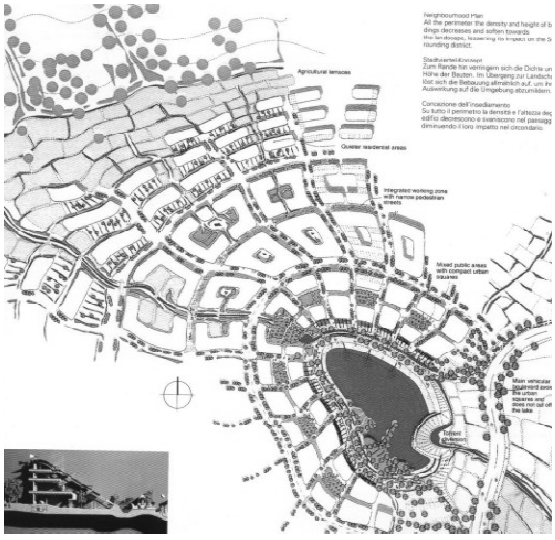
Nesta linha, Lynch (1981) coloca que talvez não seja possível uma grande teoria normativa do planejamento urbano e que aquelas que já foram propostas apresentaram poucos resultados práticos satisfatórios. O autor afirma que o planejamento urbano científico deve abandonar toda esta "bobagem" para se dedicar aos pequenos ganhos que conseguir. Como não há um "interesse público"

homogêneo, o papel do planejador seria esclarecer os conflitos através de informações, diagnósticos, previsões e avaliações (LYNCH, 1981).

As duas principais críticas a esta linha são a sua ingenuidade ao ignorar conflitos, assumindo que a razão e o compromisso necessariamente atingirão as melhores soluções e o seu foco excessivo no processo de planejamento, evitando discutir os objetivos deste planejamento. Os resultados, deste modo, são compostos por um conjunto de ações que não necessariamente foram coordenadas ou respondem a um objetivo claro.

A segunda linha apresentada por Farnstein (2000) é o autodenominado Novo Urbanismo, um movimento consistente, encabeçado por arquitetos e jornalistas. Os novos urbanistas apresentam sua carta de princípios, desencorajando o espalhamento urbano e a descentralização da cidade através de subúrbios padronizados e defendem a melhoria da paisagem e do meio ambiente, juntamente com a reconstrução do senso de comunidade (CONGRESS, 2001). Por ser um movimento encabeçado por arquitetos, foca principalmente a alteração da estrutura física da cidade, tornando-a mais adequada e mais agradável para os usos aos quais se destina. Apresentando um forte enfoque ambiental, uma das suas derivações é conhecida pela denominação de urbanismo verde, ecourbanismo ou similares. Estes trabalhos partem do pressuposto de que os ambientes urbanos atuais não são "sustentáveis" e que um novo paradigma de intervenção no espaço para remediar esta situação é urgente. O objetivo seria atingir um desenvolvimento que "mantém a qualidade de vida em geral, garantindo o acesso continuado aos recursos naturais e evitando danos ambientais duradouros (RUANO, 2000, p. 7-10)."

Herzog (1998) apresenta quatro projetos urbanos adequados para receber o selo de "verdes" ou "sustentáveis", cujos exemplos estão mostrados nas figuras abaixo.



Esquerda

Figura 2.1: Planta para a regeneração urbana de Saline-Ostia, Antica

Direita

Figura 2.2: Planta para a Vila Solar, ParcBIT, Majorca

Fonte: HERZOG, 1998

Os projetos apresentam em comum a limitação de população e área, inserção semi-urbana, busca por uma dissolução das fronteiras entre

cidade e campo, controle do fluxo de recursos, reciclagem e redução do uso de veículos automotores, principalmente individualizados, através da diversificação de usos e da utilização de transporte público.

A apresentação das propostas também segue um padrão semelhante, utilizando diagramas conceituais, normalmente abordando a relação homem-natureza sob um ponto de vista dos recursos naturais; seguido de esquemas mostrando os modelos e raciocínios que levaram ao resultado proposto (Figura 2.3).

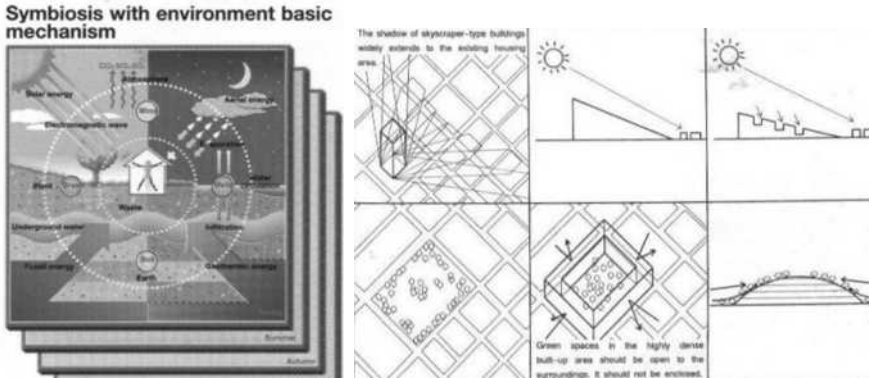


Figura 2.3: Diagramas conceituais para "Habitações simbióticas" e "Eco-renovação" em Tóquio

Fonte: RUANO,2000

Ruano (2000) adiciona 56 outros projetos aos citados por Herzog, denominando-os de Eco-urbanismo. Os critérios desta definição são bastante variados, indo desde a racionalização de recursos até a participação comunitária. São apresentados alguns projetos para áreas urbanas consolidadas, dentre elas propostas para áreas de Tóquio, Seattle e Bucaresti. A cidade brasileira de Curitiba merece menção na obra, devido à sua proposta de reestruturação baseada no transporte coletivo.

A principal crítica a essa corrente é a supervalorização do seu produto. Harvey (1997) acredita que os novos urbanistas repetem no seu processo os erros dos modelos que criticam. O principal deles é a crença em que a solução espacial pode lançar as fundações de uma nova ordem moral e estética. Para o autor, repete-se deste modo o erro modernista de privilegiar as relações espaciais sobre a análise social, incorrendo em distorções graves no resultado final. É emblemático, por exemplo, que a cidade de Seaside, Flórida, primeiro exemplo do Novo Urbanismo, tenha sido escolhida como uma cidade cenográfica com ambiente totalmente controlável no filme "O Show de Truman", no qual o protagonista tenta se libertar da exploração da sua vida por parte de uma corporação da mídia.

Embora os impactos sociais destas intervenções possam ser questionados, deve-se colocar que vários dos temas tratados pelos novos urbanistas são fundamentais no desenvolvimento das cidades contemporâneas. Ressalta-se, em particular, o tratamento dado à questão ambiental, que deu origem a outras linhas de projeto, que têm por o objetivo é aumentar de densidade em áreas providas de infra-estrutura e melhorar a eficiência na utilização de recursos naturais.

O resultado formal destes projetos é muito diverso daqueles apresentados pelos novos urbanistas, assim como também o são algumas soluções conceituais. No entanto, as novas linhas também partem da analogia orgânica, considerando a cidade como um organismo dotado de metabolismo próprio, caracterizado pelo seu nível de consumo de recursos e geração de dejetos – energia, água, resíduos sólidos, etc. (ROGERS, 1998, p. 31). Dois exemplos clássicos que seguem esta linha são as propostas de Norman Foster para o Bairro Solar em Ratisbona, Alemanha (Figura 2.4) e de Richard Rogers para o distrito de Lu Zia Sul, em Xangai, China (Figura 2.5). A idéia em ambos os casos foi criar espaços urbanos densos e com funções mistas, de modo a minimizar os deslocamentos, tornar o uso da infra-estrutura mais eficiente e aumentar as áreas verdes (ROGERS, 1998).

Ambas as propostas desenvolvem o parcelamento e a ocupação do espaço, deixando apenas o desenho da edificação para os arquitetos. Em ambos os projetos há um objetivo de promover um novo tipo de relação social e consciência ambiental, em uma tentativa de ir além de um simples aumento na eficiência da utilização de recursos.

Esquerda

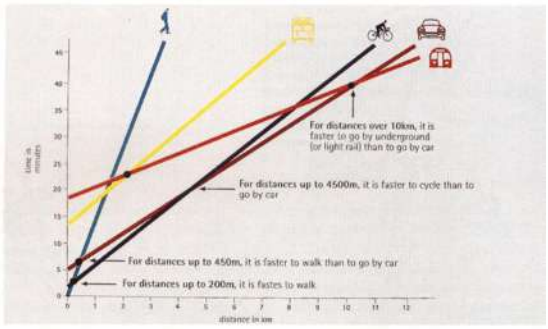
Figura 2.4: Estudos de transporte para o Bairro Solar

Fonte: HERZOG, 1998

Direita

Figura 2.5: Maquete da proposta para Lu Zia Sul

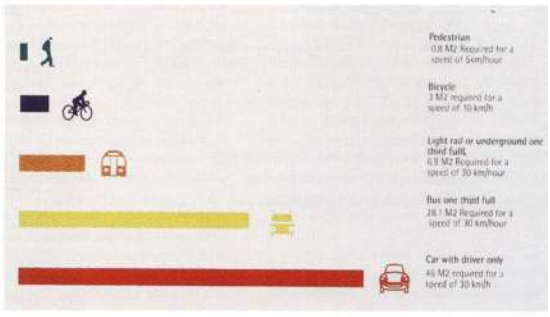
Fonte: ROGERS , 1998



Travel times for different modes of transport in urban areas, from door to door*

Wegzeiten im städtischen Raum für verschiedene Arten des Transports von Tür zu Tür

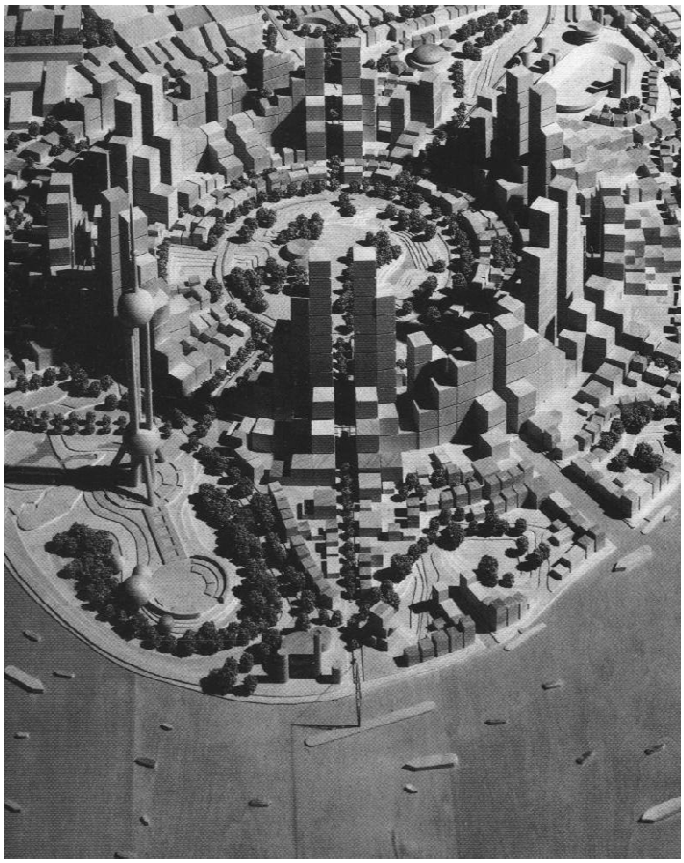
Fasce orarie di spostamento per differenti modalità di trasporto in aree urbane, da porta a porta



Space required by one person using different modes of transport at different speeds*

Vergleich des Platzbedarfs pro Person bei unterschiedlichen Verkehrsmitteln und verschiedener Geschwindigkeit

Spazio richiesto da una persona che usufruisce di differenti modalità di trasporto a differenti velocità



Outro exemplo de planejamento com aplicação destes princípios foi a proposta de renovação e desenvolvimento do distrito de Elephant and Castle, em Londres, realizado pelo escritório Foster and Partners. O objetivo do trabalho é recuperar uma área central da parte sul da cidade, melhorando sua qualidade espacial, ambiental e estética e recuperando as funções de centralidade do local (FOSTER AND PARTNERS, 2004). O projeto foi desenvolvido sob várias premissas do

novo urbanismo, buscando tornar a paisagem agradável, misturar usos e reduzir deslocamentos.

A principal diferença entre este projeto e os demais é a divulgação da análise ambiental que deu base às decisões de projeto. Estudos de túnel de vento foram utilizados para determinar a distribuição das edificações, evitando exposição dos pedestres a rajadas de vento indesejáveis e estabelecendo áreas prioritárias para a o plantio de árvores (Figura 2.6).

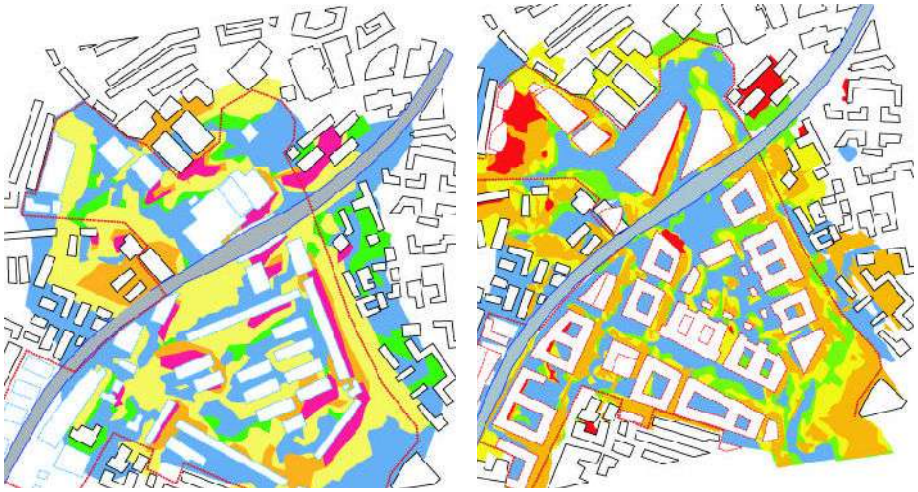


Figura 2.6: Estudos de túnel de vento para Elephant and Castle

Fonte: FOSTER & PARTNERS, 2004

A insolação dos blocos também foi estudada de maneira a minimizar o sombreamento nos períodos críticos do ano. Os blocos foram analisados tanto isoladamente quanto em conjunto (Figura 2.7). Observa-se que no documento os arquitetos muitas vezes optam pela qualidade estética (ou espacial, conforme afirmam) em detrimento do resultado da análise ambiental.

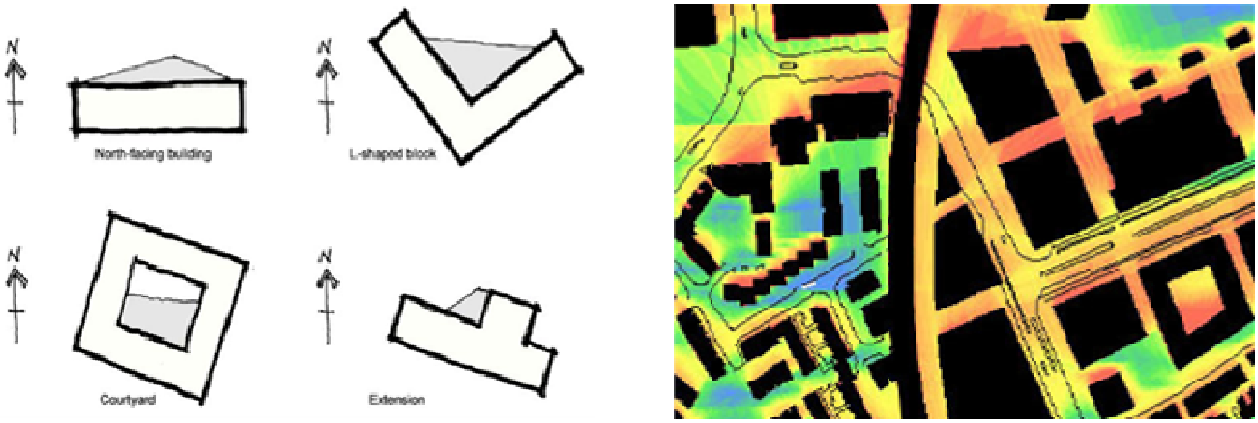


Figura 2.7: Estudos de insolação para Elephant and Castle

Fonte: FOSTER & PARTNERS, 2004

A proposta também defende utilização racional da energia e da água, além de uma disposição adequada de resíduos, embora não detalhe as políticas para atingir estes objetivos.

A alternativa oferecida por Farnstein (2000) a esta corrente é a chamada "Cidade Justa". Este modelo de planejamento aceita, discute e abraça os conflitos urbanos e busca uma mudança social progressiva através da concessão de poder aos excluídos, expandindo a concepção

neomarxista para incluir formas de dominação que não sejam exclusivamente econômicas. O objetivo neste caso é chegar a uma igualdade de resultados, em que todos sejam beneficiados da mesma forma. O sujeito é o foco (quem domina e quem se beneficia são as perguntas básicas) e o objetivo de se obter uma maior equidade entre os agentes urbanos pregar igualdade material (e financeira) até o ponto em que não haja recompensas para o esforço e o resultado. Embora a democracia seja desejável, é importante evitar a dominação da maioria ou de grupos de interesses poderosos, sendo preferível encontrar formas decisórias menos democráticas nesses casos. Farnstein (2005) enumera alguns princípios da cidade justa e exemplos de políticas públicas e espaços urbanos onde estes princípios foram aplicados, de maneira consciente ou não. O principal deles é a busca pela diversidade, não só espacial e funcional, mas também ética, econômica e social. Objetiva-se, assim, um ganho de consciência política que leve a um maior respeito pelo diferente e uma maior possibilidade de equilíbrio entre os diversos grupos sociais. Os autores que advogam esta linha não definem com precisão a quem deveria ser concedido o poder decisório para a definição das políticas que trariam a equidade, nem como garantir que esta autoridade se atenha aos princípios da cidade justa, uma vez alçada ao poder. Falta também uma definição do papel do planejamento na busca por estes objetivos.

Do ponto de vista da abordagem social e do método de implantação e concepção dos planos, as três linhas apresentam diferenças acentuadas, mas sob a ótica do resultado espacial, apenas o novo urbanismo apresenta diretrizes claras. Como o foco dos planejadores comunicativos e daqueles ligados ao conceito de Cidade Justa está no processo de planejamento ou no resultado social final, o espaço urbano resultante pode assumir uma grande diversidade de formas, sendo que a própria forma compacta proposta pelo novo urbanismo torna-se uma opção. Deste modo, ressalta-se que as políticas muitas vezes não são excludentes e sim complementares, podendo o planejamento urbano incorporar simultaneamente a participação democrática, a equidade de grupos étnicos e sociais e uma estrutura física ambientalmente correta.

2.3. Planejamento e clima urbano

2.3.1. *A inserção das questões climáticas na avaliação do ambiente urbano*

Analisados os discursos, é importante deixar clara a inserção da componente climática no contexto ambiental. Uma das primeiras perguntas a serem respondidas é o porquê da necessidade de se preocupar com o clima ao se pensar uma cidade ou um edifício. A primeira razão é a mais óbvia: o corpo humano funciona dentro de certas condições ambientais, com limites de temperatura, umidade, luz, qualidade do ar, etc[8]. Para um determinado conjunto destas variáveis deverá haver uma resposta biológica, com resultados psicológicos que podem ser de prazer, conforto, desconforto ou estresse. Estas condições afetariam a percepção que o indivíduo tem

8

Há extensa bibliografia discutindo quais seriam estes limites. Para se ter uma idéia, pode-se recorrer às normas ISO 7730:1994 e DE DEAR, BRAGER & COOPER, 2000 (conforto térmico) e NBR 5413:1991 e DIN 5034:1979 (conforto luminoso).

Níveis de conforto referentes a usuários do espaço urbano serão tratados no Capítulo 5.

do espaço à sua volta e, embora este efeito seja difícil de mensurar com precisão, a avaliação de desconforto consiste em um parâmetro objetivo para se medir a qualidade do espaço.

Ao discutir a possibilidade de se estabelecer um conjunto único de regras normativas para lidar com o espaço urbano, Lynch afirma, em relação ao impacto de fatores físicos e sociais na satisfação que o indivíduo sente em relação ao ambiente circundante, que:

> *Não é possível negar o papel crucial das relações sociais ou do caráter individual na obtenção de satisfação. Tampouco se pode negar o papel de algumas condições físicas extremas […] Mas à medida que se citam condições mais realistas – falta de sol, frio, espaços de habitação confinados, dificuldade de acesso, falta de vegetação ou água – a objeção à relevância (dos fatores físicos na obtenção da satisfação) acaba se dissolvendo sob os argumentos convincentes. (LYNCH, 1981, p. 99-100, tradução do autor).*

Além da influência direta do clima no usuário, efeitos secundários devem ser observados. A tecnologia atual permite adequar ambientes confinados a qualquer condição desejada, através de sistemas artificiais de iluminação e climatização. Isso, porém, demanda gasto energético, quando a edificação não atinge estas condições de maneira natural. Sol, luz, ventos e temperaturas externas tornam-se recursos preciosos, cujo acesso é intermediado pela cidade que circunda e à qual pertence o edifício (BRANDÃO, 2004).

Deste modo, estabelece-se uma interface entre a questão climática e eficiência energética, na busca pela qualidade ambiental (no caso descrita como conforto térmico e luminoso) de ambientes internos. Goldemberg demonstra que fatores econômicos interferem diretamente no consumo energético de um país. Na América Latina, no período de 1981 a 1991, houve um crescimento de 2,9% ao ano no consumo energético para sustentar um crescimento do PIB de apenas 1,8% ao ano, pois os países em desenvolvimento têm atraído as indústrias com maior demanda de energia (GOLDEMBERG, 2001). Ainda assim é importante ressaltar que o parque edificado brasileiro, distribuído entre os setores industrial, público, residencial e comercial, é responsável por 46% do consumo energético nacional, sendo que os dois últimos setores são os principais responsáveis pelos altos índices de crescimento do consumo (Tabela 2.2) [9].

Tabela 2.2: Consumo de eletricidade por setores segundo o Balanço Energético Nacional

Setor	Consumo (%)
Residencial	22,6
Comercial	14,2
Público	8,8

9 Elaboração do autor a partir de dados de BRASIL, 2008.

A Tabela 2.3 indica energia consumida no setor residencial e comercial separa pelo uso final. É possível observar que dos sistemas que mais consomem, dois estão relacionados ao condicionamento térmico e luminoso dos ambientes internos e um terceiro pode ter seu consumo reduzido com o uso de tecnologias solares.

Sistema	Uso final (%) [10, 11] Setor Residencial	Setores comercial e público
Iluminação	23	44
Ar condicionado	-	20
Refrigeração	32	17
Aquecimento de água	26	-
Outros	18	19

Tabela 2.3: Usos finais da energia nas edificações (1990)

10 GELLER, H. S.. *Efficient electricity use: a development strategy for Brazil*. American Council for an Energy-Efficient Economy. Washington, 1990,164 p. *apud* LAMBERTS, GHISI & PAPST, 2000.

11 O consumo do setor comercial e público foi levantado só para a cidade de São Paulo. O consumo de ar condicionado para edifícios residenciais está incluído na categoria outros. O consumo de água quente para edifícios comerciais e públicos está incluído na categoria outros.

No caso do consumo de ar condicionado, a configuração urbana apresenta um impacto duplo. O primeiro através do sombreamento das edificações no meio urbano, o que reduz a carga de condicionamento, mas prejudica a iluminação natural (BRANDÃO, 2004). O segundo é a alteração da temperatura do ar, afetando as trocas por condução e convecção entre os edifícios e o meio externo. Segundo estudos do *Heat Island Group* (2000) um acréscimo de 1 °C na temperatura máxima nas cidades do sul da Califórnia acarreta um aumento de 400 MW (3%) na energia gasta para o condicionamento. Devido à matriz energética baseada principalmente na produção por termoelétricas, isto aumenta significativamente a poluição do ar, gerando a mistura de umidade e poluição conhecida por *smog*.

A conservação energética é uma tendência mundial nascida com o choque do petróleo em 1974, que provocou um súbito aumento dos preços dos combustíveis fósseis. No Brasil, uma das principais medidas tomadas nesse sentido foi a criação, em 1985, do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL). Todavia, só depois de 1994, com a estabilização da moeda, os benefícios da conservação começaram a ficar claros. Dados do PROCEL no ano de 1995 mostraram que para cada real investido na conservação, 8,75 reais deixaram de ser gastos na geração de energia. Outros estudos do órgão apontam para um potencial de conservação de 11% até o ano de 2015.(LEITE, 1997)

As ações do PROCEL, no entanto, estão voltadas principalmente para o aumento na eficiência de equipamentos, havendo um menor número de ações no sentido de tornar melhores as próprias edificações. É possível, a partir de metodologias já desenvolvidas e ainda em estudo, reduzir o consumo energético do edifício com refrigeração, aquecimento e iluminação mantendo, ou mesmo melhorando, as condições de conforto (ALUCCI, 1992). Goldemberg (2001) afirma que, na Suíça, códigos de construção rigorosos reduziram o consumo das edificações para a metade do que era há 20 anos. O autor ainda reforça a importância de se investir na eficiência das novas edificações, especialmente nos países em desenvolvimento, onde ainda há um grande déficit habitacional.

A questão energética apresenta ainda um outro desdobramento climático: o chamado efeito estufa. Emissões de gases poluentes – dentre os quais o mais conhecido é o CO_2 – absorvem a radiação infravermelha emitida pela Terra, dificultando o seu resfriamento. Modelos e estudos feitos a partir de uma avaliação científica do Painel

Intergovernamental Sobre Mudança Climática (IPCC) indicam aumentos de 0,6°C na temperatura média global e que novos aumentos de até 4,5°C seriam possíveis, com aumento resultante de até 80 cm no nível dos oceanos.[12] Para controlar estas emissões foi homologado, em 1997, o Protocolo de Kyoto, em que os paises signatários comprometem-se a reduções significativas nas emissões de CO_2. Embora o protocolo tenha sido ratificado pela maioria dos signatários, países importantes como a Austrália e os Estados Unidos relutam em reduzir seus níveis de emissão de aos padrões estabelecidos pelo Protocolo, alegando prejuízos econômicos e ausência de comprovação científica da eficácia da medida.[13]

12 *Climate Change 1992*; the supplementary report to the IPCC Scientific Assessment, Cambridge, Cambridge University Press, 1992 *apud* GOLDEMBERG, 2001, p. 79.

13 AUSTRALIA, s.d - http://www.greenhouse.gov.au

No Brasil, a questão de emissões de carbono não é tão relevante, devido à matriz energética do país, onde atualmente mais de 90% da energia elétrica provém de usinas hidrelétricas. Este fato, contudo, não significa isenção total de problemas ambientais e econômicos. Um sistema energético sujeito à influência do regime de chuvas, juntamente com uma desestruturação do setor, levou a um racionamento durante quase todo o ano de 2000. O aproveitamento dos recursos hídricos ainda existentes é visto com reservas, exatamente devido aos impactos ambientais e sociais causados não só pelas represas, mas também pelos reservatórios, o que dificulta a expansão da oferta no ritmo necessário (LEITE, 1997). Tudo isso tem levado a uma tendência de aumento da participação de termoelétricas na matriz energética do país, que juntamente com as emissões feitas por veículos e as queimadas, tornam válidas as preocupações a respeito do tema.

Dentre os modelos de sustentabilidade urbana apresentados por Ascelrad (1999), é possível perceber claramente a afinidade deste discurso com a representação tecno-material da cidade e com a matriz da busca por uma maior eficiência de fluxos e recursos no meio urbano. O conceito de ambiente urbano mais próximo da abordagem do conforto é o de Moreira (1999). Para ele, o espaço construído é a natureza modificada pelo homem. Para tanto, o homem se apropria dos recursos naturais, modificando-os para atender às suas necessidades. Quando o espaço é construído por diversos indivíduos que passam a ocupá-lo, ele se torna um espaço urbano. Sob a perspectiva do conforto ambiental e da eficiência energéticas, o que se buscam são técnicas para tornar este espaço o mais adequado possível ao homem, com o menor esforço de adaptação possível, com os recursos disponíveis.

2.3.2. *Abordagem: a questão das escalas no clima urbano*

Uma das discussões mais importantes e menos consensuais no trabalho com o clima urbano são as escalas de abordagem. A definição deste conceito é fundamental na constituição dos limites do objeto e na apropriação e compatibilização entre as linguagens da análise climática e meteorológica e do planejamento urbano. São apresentadas aqui, basicamente, a visão geográfica das escalas em

clima urbano e a visão meteorológica, propondo uma compatibilização entre ambas e as escalas de intervenção urbana.

Os sistemas climáticos são compostos de uma grande quantidade e diversidade de subsistemas, cujo tratamento varia à medida que em que se altera sua abrangência espacial tanto horizontal quanto vertical.

Monteiro & Mendonça (2003) estabelecem para isso uma classificação hierárquica das escalas climáticas, na qual as escalas superiores são formadas pelo conjunto de subsistemas de escala imediatamente inferior. A configuração resultante de escala superior, por sua vez, influencia os subsistemas através de trocas nas superfícies limites (Tabela 2.4).

Tabela 2.4: Escalas de tratamento no clima urbano

Fonte: MONTEIRO & MENDONÇA,2003

Ordens de Grandeza	Unidades de Superfície	Escalas cartográficas de tratamento	Espaços climáticos	Espaços Urbanos	Estratégias de abordagem		
					Meios de observação	Fatores de organização	Técnicas de análise
II	Milhões de km	1:45.000.000 1:10.000.000	Zonal	-	Satélites Nefanálises	Latitude Centros de ação atmosférica	Caracteriz. geral comparativa
III	Milhões de km	1:5.000.000 1:2.000.000	Regional	-	Cartas sinóticas Sondagens aerológicas	Sistemas meteorológicos (circulação secundária	Redes transectos
IV	Centenas de km	1:1.000.000 1:500.000	Sub-Regional (fácies)	Metrópole Grande Área metropolitana	Rede meteorológica de superfície	Fatores geográficos	Mapeamento sistemático
V	Dezenas de km	1:250.000 1:100.000	Local	Área Metropolitana	Posto meteorológico Rede Complementar	Integração geológica Ação antrópica	Analise espacial
VI	Centenas de metros	1:50.000 1:25.000	Mesoclima	Cidade grande, bairro ou subúrbio de metrópole	Registros móveis (Episódios)	Urbanismo	
-	Dezenas de metros	1:10.000 1:5.000	Topoclima	Pequena cidade, fácies de bairro / subúrbio de cidade	Detalhe	Arquitetura	Especial
-	Metros	1:2.000	Microclima	Grande edificação, Habitação, Setor de Habitação	Baterias de instrumentos especiais	Habitação	

Observa-se que as escalas se diferenciam tanto na horizontal quanto na vertical. Monteiro & Mendonça (2003) apontam que, desde 1976, seu grupo defendia a existência de três níveis de impacto no cotidiano urbano resultantes do chamado Sistema Clima Urbano (SCU). O autor os classifica como canis de percepção deste sistema e são eles que relacionam o clima à escala humana. O primeiro deles, o do Conforto Térmico, será abordado por este trabalho. Os outros dois canais de percepção são o canal da Qualidade do Ar, que trata principalmente da

poluição, e o canal dos Meteoros de Impacto, que agrupa manifestações climáticas violentas que podem causar transtorno às populações das áreas que atingem.

Oke (1987) propõe quatro escalas de abordagem horizontal que se superpõem entre si: micro (de 10^{-2} a 10^{3} m), local (de 10^{2} a 5×10^{4} m), meso (de 10^{4} a 2×10^{5} m), macro (de 10^{5} a 10^{8} m).

Isto coloca a cidade entre a escala local e mesoclimática, se for considerada como um todo, e na escala microclimática ou local, se for trabalhada em partes aproximadamente do tamanho de bairros. Verticalmente, o autor utiliza o conceito de camadas limites superpostas que determinam a escala da superfície relevante nas trocas. Para isso o autor divide a atmosfera nas camadas (Figura 2.8):

- **Sub-superficial**:camada sob a superfície que recebe influência da atmosfera e das trocas térmicas acima dela. A penetração da onda térmica é pequena em relação à sua profundidade total, dificilmente ultrapassando 10m.
- **Camada limite laminar :** imediatamente sobre a superfície (não mais do que alguns milímetros), estende-se uma camada de ar que conta com um movimento laminar. Seu tamanho pode ser alterado, mas as propriedades do ar e do fluxo (velocidade, distância e viscosidade) eventualmente tornam o fluxo turbulento. Não há convecção na camada limite laminar, sendo toda a troca realizada por difusividade das moléculas.
- **Camada de rugosidade:** os elementos de rugosidade da superfície causam fluxos de ar complexo em seu entorno que dependem fortemente das suas características tridimensionais. Trocas de calor, massa e momento, bem como seus impactos climáticos, são de difícil previsão nesta camada, mas algumas características genéricas podem ser estabelecidas.
- **Camada de superfície turbulenta:** a camada turbulenta não tem uma definição espacial rígida, variando bastante com as condições diárias locais e com a composição da superfície. É nesta camada que ocorre o fenômeno de inversão térmica e é dentro desta camada que se localiza a camada limite urbana (UBL) com a qual muitas vezes se superpõe totalmente.
- **Camada exterior:** esta camada se estende até a camada limite planetária, acima da qual a atmosfera não sofre mais influência significativa da superfície e está sujeita apenas às forças de circulação geostróficas. Os efeitos de rugosidade são menos fortes nesta camada, havendo uma maior participação da convecção livre. A grande turbulência favorece a mistura do ar, fazendo com que as condições de temperatura sejam praticamente homogêneas em toda a sua extensão.

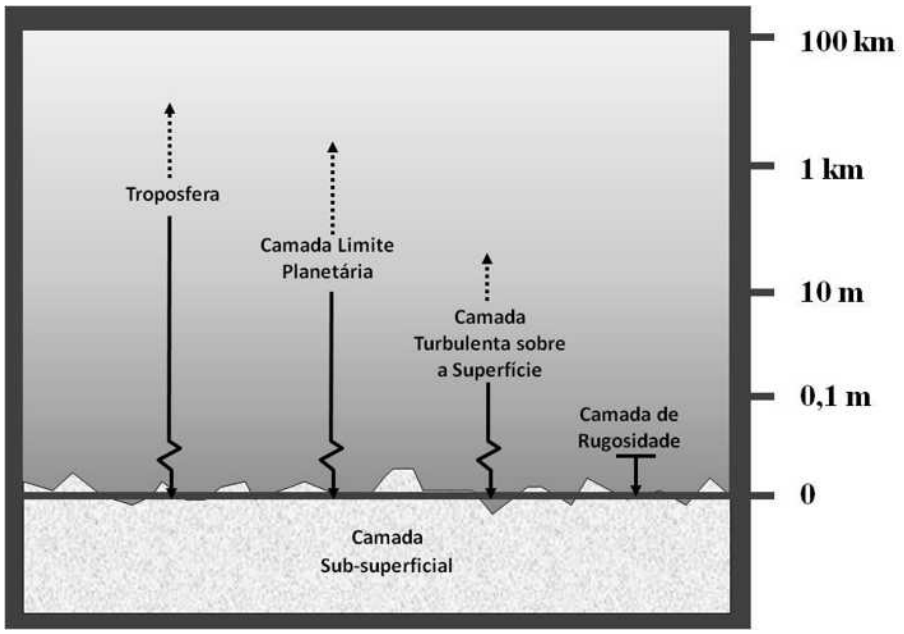


Figura 2.8: Camadas atmosféricas para Oke

Fonte: baseado em Oke (1987)

Para estudos de clima urbano, a camada de rugosidade coincide com a camada abaixo do nível das coberturas (UCL), dentro da qual as trocas são extremamente complexas. As condições térmicas nesta camada influenciam diretamente o conforto térmico do pedestre e o desempenho térmico e energético das edificações, sendo de fundamental importância para o arquiteto e urbanista.

Observa-se ainda que, embora os efeitos climáticos de grandes cidades possam se estender horizontalmente por uma área significativamente maior do que a ocupada por ela, deve-se sempre considerar que esta influência é percebida de maneira imediata pelos seres humanos (na camada abaixo do nível das coberturas). Ela se dá, na verdade, de forma indireta, através de alterações na camada limite urbanas que, em conjunto com as características superficiais locais, produzirão uma nova condição microclimática. Esta condição não é necessariamente igual à condição do centro urbano maior que a influencia.

Quanto maior a alteração da superfície do espaço urbano, tanto em termos de área quanto de intensidade, mais amplo será o seu impacto na atmosfera e maior o seu espalhamento. No entanto, vale ressaltar que, para arquitetos e urbanistas, o estudo do impacto da cidade no clima urbano só se justifica se puder ser verificado que o resultado final é perceptível para o usuário do espaço urbano.

Stull (1998) apresenta uma visão diferente das camadas atmosféricas, baseada mais na dinâmica temporal da atmosfera. A camada limite, para ele, é "a parte da troposfera que é diretamente influenciada pela presença da superfície da Terra, e responde a forças da superfície em uma escala de aproximadamente uma hora ou menos" (STULL, 1998, p.2).

Para o autor, cujo tratamento não se restringe à influência urbana na atmosfera, a camada limite é composta de três partes principais:

- **Camada de mistura:** uma camada altamente turbulenta e convectiva, causada principalmente pelo efeito do aquecimento da atmosfera pela superfície durante o dia, embora possa ser formada em regiões de vento forte. A forte turbulência faz com que a temperatura potencial[14] (temperatura corrigida para desconsiderar-se o efeito da pressão) seja praticamente constante exceto próximo à superfície. Uma faixa estável no topo da camada contém o domínio da turbulência e recebe a influência da atmosfera livre. Na base desta faixa ocorre a formação de nuvens que intensificam as diferenças de temperatura e os processos convectivos.
- **Camada estável (noturna):** a camada estável ocorre no período noturno quando a superfície se encontra mais fria do que a atmosfera. Com isso, o ar se torna estável e a turbulência é reduzida. O topo desta camada não é bem definido como no caso anterior, havendo uma mistura progressiva com as camadas superiores. O perfil de ventos pode ser complexo, com baixas velocidades próximas à superfície e altas velocidades, causadas por jatos noturnos, que se reduzem novamente com a altitude.
- **Camada residual:** após o por do sol, as termais ascendentes deixam de existir e a turbulência cai na camada de mistura. Com o resfriamento do solo há a formação da camada estável, mas parte das características térmicas da camada de mistura permanece nas partes mais altas da troposfera, formando uma camada residual. Esta camada normalmente apresenta estabilidade neutra e tem sua espessura reduzida com o aumento da camada estável

Abaixo um esquema do comportamento dinâmico destas camadas atmosféricas. Este tipo de classificação é tipicamente utilizado em estudos meteorológicos e é mais dinâmica que a proposta por Oke (1987).

14

A questão da temperatura potencial e da estabilidade é tratada no item 3.2.2.5.

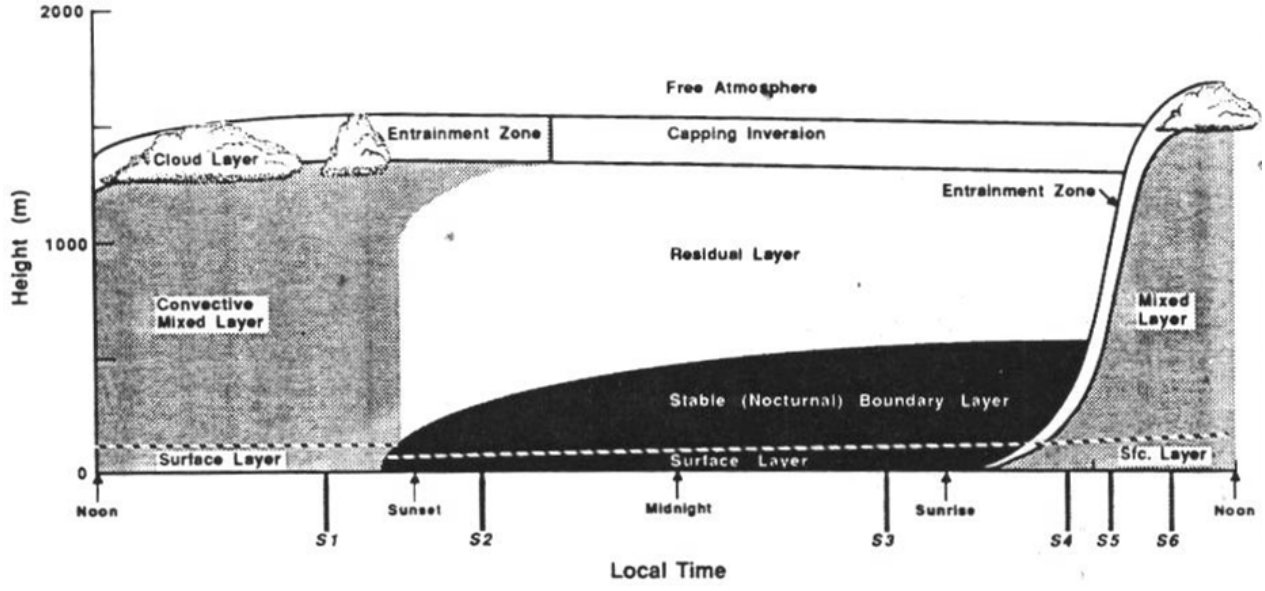


Figura 2.9: Descrição do comportamento da camada limite atmosférica ao longo de um período de 24 horas

Fonte: STULL, 1988

Do ponto de vista arquitetônico e urbanístico, Assis (2000) apresenta uma compilação completa da proposta de diversos autores em relação às escalas de abordagem no clima.

Para a arquitetura, propõem-se aqui três escalas de intervenção com impactos diferenciados nas condições climáticas, semelhantes às escalas de abordagens propostas em um trabalho mais recente de Oke (2004). Elas partem do impacto que cada intervenção causa no seu entorno.

- **Intervenções pontuais**: a primeira escala de intervenção lida com alterações de pequena extensão (10^1 a 10^3 m) e cujos elementos são de uma ordem de grandeza próxima à do usuário (10^0 a 10^1 m). Seus impactos espaciais são limitados ao seu entorno imediato e são claramente perceptíveis pelo usuário, que consegue identificar os elementos responsáveis por cada condição de exposição. Normalmente se referem ao desenho de espaços públicos ou a pequenas alterações em edificações existentes. Exemplos deste tipo de alteração são o plantio de árvores e jardins, a colocação de coberturas ou marquises, o tratamento de pisos e a instalação de fontes ou superfícies de água de tamanho reduzido. Esta configuração determina diretamente o conforto do usuário, definindo suas condições de exposição aos elementos meteorológicos (radiação, vento, temperaturas, umidade). Nesta escala existe a possibilidade de adaptação do usuário ao seu entorno imediato, seja através de pequenos deslocamentos, seja interagindo e modificando o entorno. Deste modo, a principal estratégia é promover uma maior diversidade de condições, dando ao usuário a possibilidade de escolha entre locais com exposição diferenciada.
- **Intervenções de micro-escala**: na segunda escala, as alterações são de extensão intermediária (10^2 a 10^4 m) e os elementos são da ordem de grandeza dos edifícios (10^1 a 10^2 m). Os impactos se estendem para além do entorno imediato do objeto e o usuário não mais consegue perceber sempre qual o elemento responsável pela geração de condições diferenciadas. As condições são definidas por relações de vizinhança imediata tais como gabaritos e recuos e normalmente são ligadas aos planos de massa e à configuração de edificações resultantes da legislação de uso e ocupação do solo. Nesta escala são definidas as condições climáticas médias dos denominados recintos urbanos, que afetam diretamente o desempenho dos edifícios e contribuem para o conforto ou desconforto do pedestre, uma vez que determinam as condições de contorno para as intervenções pontuais. Estas alterações têm impacto significativo no clima do entorno e não mais permitem a adaptação do usuário a elas, devido à sua maior extensão espacial. O objetivo nesta escala de intervenção é proporcionar condições locais amenas, potencializando o clima local e aproximando os valores médios das variáveis ambientais da condição de conforto. A maior

parte dos modelos apresentados neste trabalho trata desta escala.

- **Intervenções locais**: na terceira escala, as alterações têm extensão urbana (10^3 a 10^5 m) e os elementos locais são da ordem de grandeza de quadras (10^2 m) ou de distritos (10^3 m). Seu impacto se dá na camada limite urbana (UBL) e a superfície da cidade ou distrito pode ser tratada como placas horizontais às quais são atribuídas propriedades térmicas e de rugosidade. A influência das alterações nessa escala no ambiente do pedestre não é claramente perceptível, dado que ela ocorre indiretamente, através das interações entre a UCL e a UBL. As alterações locais dizem respeito à densidade e ao tipo de ocupação em uma área urbana, estabelecidas no zoneamento urbano ou no plano diretor. Nesta escala, começam a aparecer alterações climáticas que resultam de interações complexas, cujo resultado final torna-se difícil de ser previsto. Alterações na nebulosidade, regime de chuvas e circulação geral do vento podem afetar significativamente edifícios e usuários do espaço urbano, invalidando intervenções de escala inferior que houverem sido realizadas considerando-se outras condições de contorno. Como regra geral, deve-se ter por objetivo na escala local minimizar o impacto da cidade, evitando alterações climáticas significativas.

Observa-se que um conjunto de intervenções de menor escala pode produzir um impacto na escala superior. O impacto do plantio uma única árvore ou da troca de uma pequena área de piso tem influência em uma área muito restrita, mas à medida que este tipo de ação se multiplica, começa a afetar os recintos urbanos e eventualmente, a camada limite urbana. Do mesmo modo, as intervenções de maior escala configuram condições gerais de exposição, mas estas condições podem ser melhoradas através de intervenções de menor escala eficientes.

2.3.3. *Contribuições da análise climática para o planejamento*

A capacidade das cidades de alterar o clima local foi primeiramente identificada por Luke Howard em 1833 em seus estudos para a cidade de Londres.[15] No decorrer dos anos, diversos estudos comprovaram estas alterações e identificaram um fenômeno que ficou conhecido como "ilha de calor". Este fenômeno é definido por um aumento da temperatura à medida que se deixa a área rural adjacente à cidade e se caminha em direção ao centro adensado. Internacionalmente, alguns dos principais estudos a esse respeito foram realizados pelo Prof. Dr. Timothy R. Oke, da University of British Columbia no Canadá, nas décadas de 70 e 80. Suas pesquisas estabeleceram correlações entre este aumento de temperatura e a população da cidade, evoluindo pra a observação dos fluxos de calor. Oke (1982) inovou a abordagem da questão ao estabelecer correlações entre as variáveis de planejamento e o clima da cidade, tratando-a como um sistema

15 HOWARD, L. *The climate of London*, V I-III, London, 1833. *apud* OKE, 1982, p. 2.

termodinâmico fechado de entradas e saídas conhecidas que poderia, portanto, ser avaliado a partir de um cálculo de balanço energético.

Verificou-se que a ilha de calor é um fenômeno predominantemente noturno, sendo que a diferença entre rural e urbano pode inclusive se inverter durante o dia, com as maiores intensidades ocorrendo no início da noite, em condições de céu claro e pouco vento. Oke (1976) propõe a divisão do estudo do clima urbano em duas escalas: a *Urban Boundary Layer* (UBL – Camada limite urbana) e a *Urban Canopy Layer* (UCL – camada sob a linha de topo dos prédios) propondo diferentes estratégias de abordagem e diretrizes de planejamento urbano (Figura 2.10).

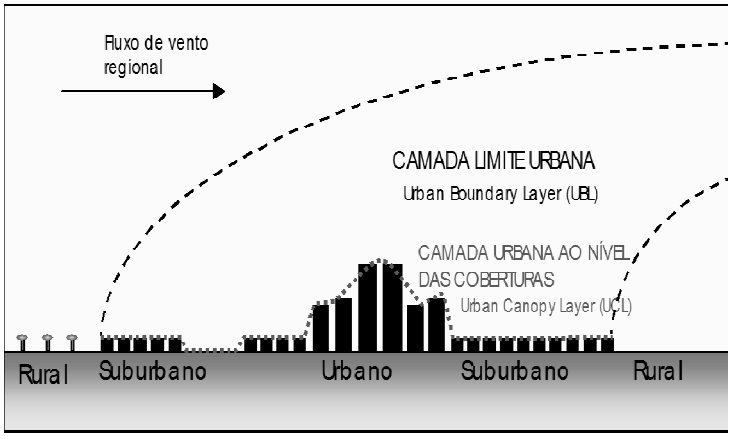
Em um de seus trabalhos mais próximos do planejamento, Oke (1988) enumera as principais inter-relações entre o clima e a cidade como: aquecimento urbano, proteção contra ventos, dispersão de poluentes e acesso ao sol. Tomando como unidade o "*canyon urbano*" entendido como a composição formada por uma rua margeada por séries de edifícios, Oke discute as relações dimensionais entre os edifícios e os efeitos no clima.

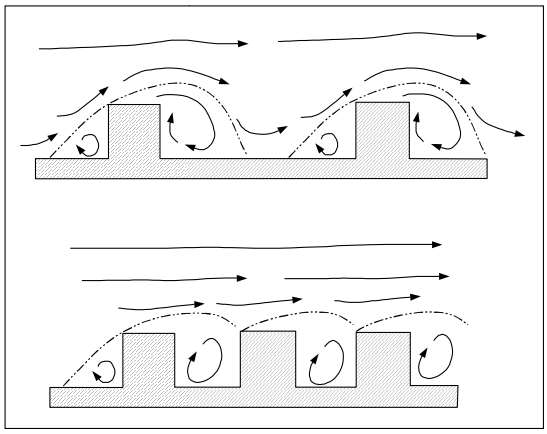
Esquerda

Figura 2.10: Esquemas para a UBC e a UBL baseado em Oke

Direita

Figura 2.11: Esquema de circulação de vento nos *canyons* urbanos para Oke





A relação geométrica entre as edificações é um fator decisivo na interação do espaço construído com o clima para Oke, especialmente a razão altura/largura do *canyon*. Supondo-se uma seqüência de edifícios sem afastamentos laterais, isto determinaria o fluxo de ventilação entre os prédios, permitindo um resfriamento do ambiente e dos usuários, além de permitir a dispersão de poluentes. Além disso, essa razão configura um fator obstrução que impede as trocas térmicas por onda longa para o fundo de céu, alterando a taxa de resfriamento da massa urbana e se tornando um dos principais causadores da ilha de calor. Esta relação tem ainda grande impacto na incidência de sol nas edificações e no meio urbano, podendo ser fundamental na possibilidade de utilização da energia solar térmica e fotovoltaica e viabilizar ou comprometer estratégias de climatização natural.

A questão do acesso ao sol levou, a partir dos estudos de Ralph Knowles, ao desenvolvimento do conceito de "envelope solar", como sendo o maior volume que uma edificação pode ocupar sem jogar sombras indesejáveis nos seus vizinhos (KNOWLES & BERRY, 1980).

Estudos recentes para a realidade brasileira apontaram um grande potencial de economia de energia caso certos ângulos de obstrução máximos sejam respeitados (BRANDÃO, 2004).

Derivados dos estudos de Oke, vários outros trabalhos foram feitos na mesma linha, inclusive alguns voltados especificamente para as áreas de arquitetura e de planejamento urbano. Givoni, por exemplo, apresenta vários modelos de análise simplificados para o clima urbano, além de descrever diretrizes de projetos para vários tipos climáticos (GIVONI, 1998).

A vegetação torna-se também elemento essencial na caracterização atmosférica de uma área, na medida em que substitui trocas sensíveis (radiação, convecção e condução) por trocas úmidas (evapotranspiração), permitindo-se obter reduções significativas na temperatura do ar (GIVONI, 1998).

Recentemente, o projeto *Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces* (RUROS) trouxe várias contribuições metodológicas na análise e projeto de espaços abertos urbanos (NIKOLOPOULOU, 2004). A partir de um modelo digital 3D é produzido um DEM (*Digital Elevation Model),* utilizado em simulações ambientais das quais são extraídos resultados.

O fator de céu é calculado a partir dos ângulos formados entre os pontos do modelo e as arestas das edificações. Eles dão uma medida da obstrução causada pelos edifícios nos espaços públicos e indicam potenciais formações de ilha de calor noturna. A insolação também é calculada no modelo, através do desenho de sombras horárias para quatro dias do ano, um em cada estação. O resultado é um mapa com o número de horas de insolação para cada ponto do mapa. A ventilação apresenta um estudo mais complexo, ainda que simplificado se comparado às simulações de CFD. O modelo é colocado em um túnel de vento virtual onde são simuladas doze direções de vento, indicando áreas com maior e menor permeabilidade. Os resultados são compostos de acordo com a freqüência de ocorrência de cada direção para o clima local. Embora simplificados, os procedimentos dão idéias claras das condições microclimáticas da área de estudo, possibilitando intervenções com o objetivo de modificar suas condições.

A partir do estabelecimento de valores limites para cada uma das variáveis, são gerados mapas cromáticos em RGB com valores de 1 ou 0, indicando a presença ou ausência de visão do céu, sol e vento. Os desenhos resultantes são sobrepostos através de uma técnica semelhante ao GIS, gerando uma imagem única. Sobre essa imagem, a proporção de cada área é calculada devendo ser comparado então com um perfil recomendado para cada tipo de clima. Por exemplo, em climas frios, deve-se priorizar a existência de áreas ensolaradas com pouca incidência de vento, enquanto em climas tropicais recomenda-se um sombreamento das áreas públicas e uma maximização da permeabilidade aos ventos. Um exemplo da aplicação do método é mostrado na Figura 2.12.

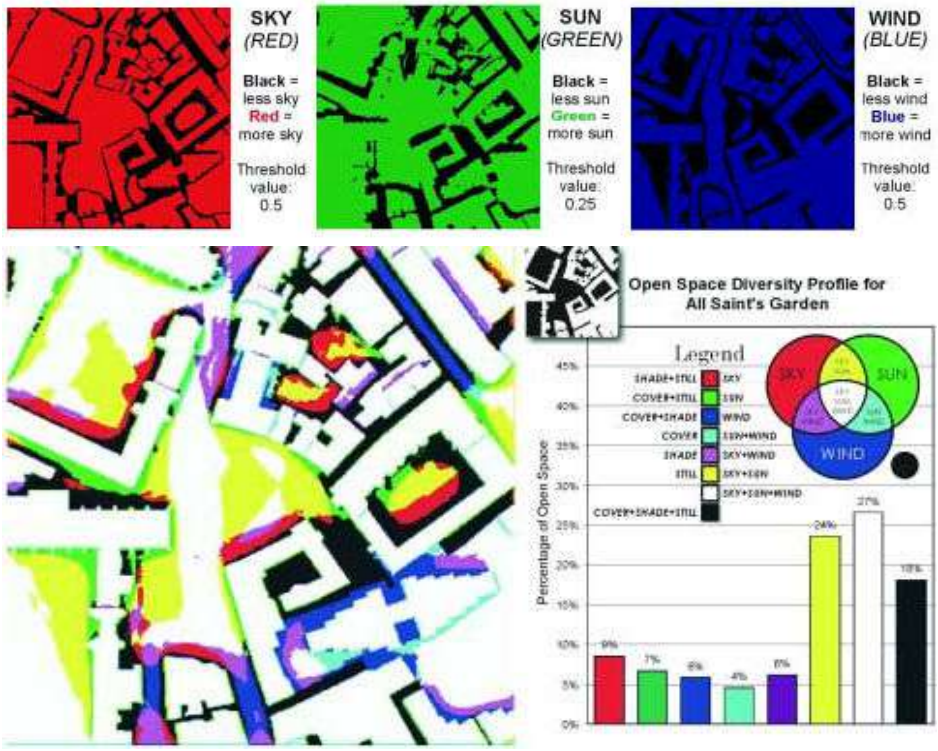


Figura 2.12: Exemplo de aplicação da metodologia do RUROS

Fonte: NIKOPOULOS, 2000

O Lawrence Berkeley Laboratory, nos Estados Unidos, tem atacado outra frente de pesquisa na mitigação das alterações climáticas urbanas. Pomerantz et al. (2000) afirmam que o aumento do albedo (refletância) dos materiais de revestimento urbano em 0,1 ocasionam reduções na temperatura superficial de até 4°C. a substituição dos materiais urbanos, principalmente pisos e pavimentos, com o objetivo de minimizar o aquecimento dos recintos urbanos.

Taha, Chang & Akibari (2000) estudam o efeito da alteração dos materiais de revestimento urbano para três cidades: Salt Lake City (SLC), em Utah, Sacramento(SAC), na Califórnia, Baton Rouge (BR), na Louisiana; todas elas integrantes do UHIPP. As três cidades apresentam condições climáticas diversas, com latitudes, altitudes e continentalidade diferentes. O estudo foi realizado através de simulações computacionais alimentadas por informações de satélite. A Tabela 2.5 indica as características dos domínios de simulação.

Tabela 2.5: Características dos modelos de simulação

Fonte: TAHA, CHANG & AKIBARI, 2000

Região	Variação de altitude no domínio (m)	Variação de albedo no domínio	Variação do albedo urbano	Variação da vegetação	Variação na vegetação urbana	Área do domínio com vegetação > 0,4	Média de umidade do solo no domínio
SLC	1265-3197	0,05-0,45	0,14-0,18	0,00-0,55	0,15-0,20	20%	0,12
BR	0-90	0,06-0,18	0,16-0,17	0,00-0,60	0,20-0,25	65%	0,40
SAC	0-2736	0,08-0,22	0,14-0,16	0,00-0,60	0,10-0,20	80%	0,25

Para mitigação do efeito de ilha de calor, foi proposta a alteração da refletância das superfícies e o aumento da superfície vegetada. No estudo, cada tipo de superfície teve seu albedo aumentado por um valor específico, correspondente a um máximo a ser atingido

considerando a troca de materiais e um eventual escurecimento devido ao envelhecimento natural. No caso da cobertura vegetal, foi admitido que alguns tipos de uso ganhariam um determinado número de árvores padronizadas, que cobririam uma área de 50m² (um raio de aproximadamente 4m para a copa).

Foram avaliados os impactos na redução de temperatura, qualidade do ar e concentração de ozônio. A Tabela 2.6 apresenta os resultados para primeiro fator.

Tabela 2.6: Resultado das simulações para as três cidades nos horários das 6h e 16h

Fonte: TAHA, CHANG & AKIBARI, 2000

Região		0600 LST	1600LST
Salt Lake City	Temperatura caso base	293 K	305 K
	Mudança da temperatura devido a estratégias de redução de ilha de calor	-1 K	-2 K
Baton Rouge	Temperatura caso base	293 K	307 K
	Mudança da temperatura devido a estratégias de redução de ilha de calor	0 K	-0,75 K
Sacramento	Temperatura caso base	300 K	311 K
	Mudança da temperatura devido a estratégias de redução de ilha de calor	-1 K	-1,2 K

Foram obtidas reduções em até dois graus na temperatura do ar, além dos benefícios na qualidade do ar e na redução da concentração de ozônio. O estudo indica que a alteração das características das superfícies pode compensar os efeitos de ilha de calor gerados pela cidade. Os autores afirmam ainda que o potencial de redução nas temperaturas pode ser ainda mais expressivo em cidades onde uma maior área disponível para a implantação das estratégias de mitigação.

Um relatório posterior (CAMBRIDGE, 2005) mostra uma expansão do programa para as cidades citadas além de Phoenix, Santo Antonio e Washington, D.C., dentre outras. Este trabalho indica políticas públicas a serem adotadas para o incentivo e gestão das iniciativas mitigadoras. Embora os programas apresentem bons resultados e possibilidades de implantação, observa-se que eles não tratam da forma urbana, propondo apenas a troca de materiais e o aumento da superfície vegetada.

Katschner (1997) apresenta ainda outra abordagem da climatologia urbana, trabalhando com mapeamentos conceituais e análises qualitativas, confirmadas por medições de campo. Sua proposta utiliza basicamente um esquema de matriz de pesos e é acessível a planejadores das mais diversas formações. Em um trabalho posterior, Katzchner (2007) apresenta uma revisão dos métodos abordados anteriormente, com enfoque na utilização do geoprocessamento para a criação de mapas urbanos que proporcionem informações de diagnóstico e orientem diretrizes de planejamento.

O mapeamento climático é construído a partir de camadas onde as informações geográficas relacionadas à produção e à mitigação da ilha de calor são associadas a uma matriz de pesos que indica a sua influência na alteração da temperatura local.

No caso, pode-se trabalhar com imagens *raster* ou com áreas vetorizadas homogêneas, às quais são atribuídos os pesos. As camadas utilizadas em um estudo para a cidade de Hong Kong são apresentadas na Tabela 2.7.

Critério físico	Dados de entrada baseados no critério
(I) Ilha de Calor Urbana	Layer 1 – Mapa de uso e ocupação do solo
	Layer 2 – Mapa de cobertura de solo (áreas construídas)
	Layer 3 – Mapa do volume construído
	Layer 4 – Mapa de topografia
(II) Potenciais de Mitigação das Ilhas de Calor	Layer 5 – Mapa da brisa marítima
	Layer 5 – Mapas da cobertura de terra (espaços abertos)
(III) Potenciais dinâmicos	Layer 7 – Mapa de ventilação
	Layer 8 – Mapa das áreas verdes
	Layer 9 – Mapa de declividades
	Layer 10 – Mapa do caminho dos ventos

Tabela 2.7: Camadas utilizadas no mapeamento climático para a cidade de Hong Kong

Fonte: KATZCHNER, 2007

No caso apresentado, o primeiro grupo de fatores causa um aumento na diferença de temperatura urbana em relação à temperatura do espaço rural, representando potencial para aumento da ilha de calor. No segundo e no terceiro grupo são apresentados fatores potenciais de redução desta diferença, principalmente referentes à ventilação e à existência de áreas verdes. Enquanto o grupo II apresenta potenciais naturais permanentes, o segundo depende da forma de ocupação da cidade e da dinâmica climática local, podendo representar maiores ou menores impactos variando ao longo do tempo.

As informações são então sobrepostas e os pesos adicionados para cada uma das áreas. O resultado é a composição de dois mapas distintos: o primeiro é o mapa de diagnóstico, que indica as diferentes condições climáticas da cidade e o segundo, um mapeamento das posturas de planejamento a serem adotadas pela administração municipal, tais como preservação dos canais de vento, manutenção ou criação de áreas verdes e áreas com potencial para abrigar crescimento ou adensamento urbano (Figura 2.13).

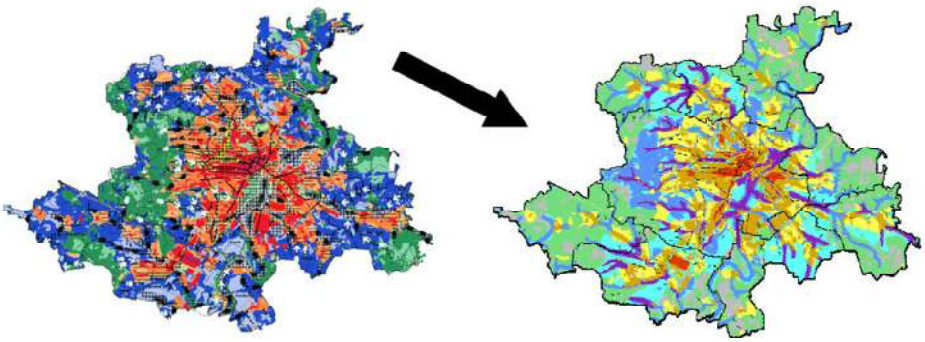


Figura 2.13: Mapeamento climático de diagnóstico e intervenção para a cidade de Kassel

Fonte: KATZCHNER, 2007

A metodologia chegou a ser aplicada em estudos no Brasil, mas foram encontradas dificuldades em adaptá-la à heterogeneidade tanto do sítio natural quanto da estrutura urbana das cidades brasileiras.[16] Esse problema se torna um dos mais comuns na análise climática no país, pois, ao invés de uma distribuição uniforme de densidades, caminhando do centro para a periferia, muitas cidades apresentam grandes variações na ocupação e heterogeneidade na ocupação do espaço. Com isso, o *canyon* urbano deixa de existir e a parametrização dos modelos climáticos torna-se muito mais difícil. Além disso, a dificuldade em se obter dados sobre as cidades brasileiras na resolução necessária para a elaboração de um mapeamento climático é muito maior que a existente na Europa ou nos Estados Unidos. (Figura 2.14)

16 Mendonça &Assis (2001) aplicaram o método na cidade de Belo Horizonte, apresentando a necessidade de criação de novas categorias de ocupação urbana e de declividade, devido às condições urbanas e topográficas diferenciadas da cidade.

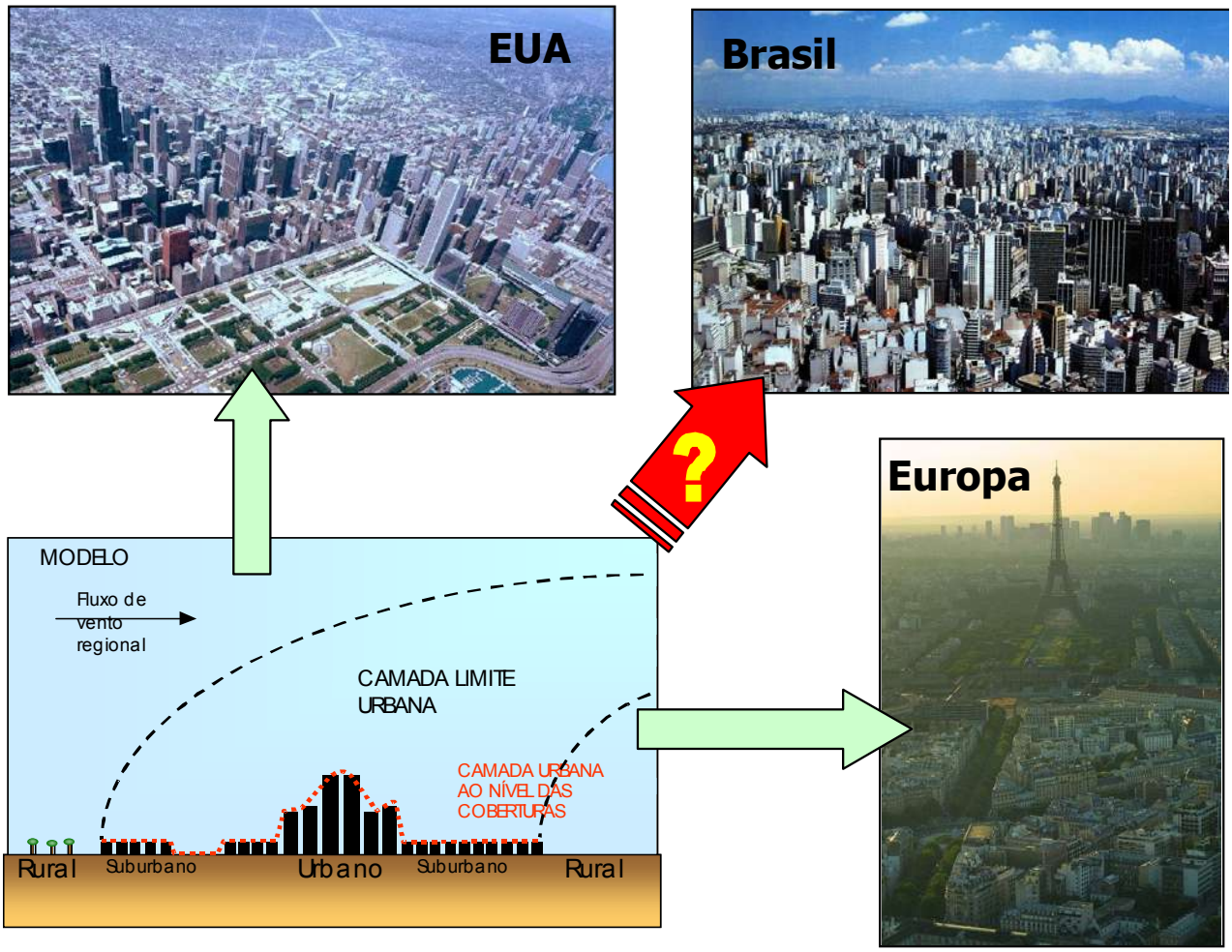


Figura 2.14: Dificuldade de parametrização dos modelos para cidades brasileiras

No Brasil, os estudos de clima urbano tomaram impulso através do professor Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro, que propôs uma abordagem sistêmica do clima urbano através de um modelo descritivo predominantemente verbal. Monteiro parte de uma proposta sistêmica para a elaboração de um modelo de clima urbano alicerçado principalmente na descrição verbal dos fenômenos. Buscava incluir sempre a perspectiva humana dos impactos climáticos e a questão temporal e rítmica do clima. A perspectiva sistêmica era fundamental para uma renovação da abordagem geográfica, superando as

dicotomias entre físico e humano e entre as visões 'tradicional' e 'quantitativa' (ASSIS, 2000).

Em seu livro publicado em 2003, ele resgatou suas teorias propostas em 1975 e apresentou diversos trabalhos subseqüentes. Nesta publicação, foram expostas também duas de suas principais contribuições teóricas (MONTEIRO & MENDONÇA, 2003). A primeira delas é a proposta da criação do sistema clima urbano e seus três sub-sistemas: o termo-físico, ligado às questões de conforto térmico; o físico-químico, relacionado à qualidade do ar, e o hidrometeórico, que contém as questões relativas à pluviosidade e principalmente aos episódios de enchentes. A segunda contribuição é em relação à questão das escalas no tratamento do clima, definindo nomenclaturas para os espaços climáticos e estratégias de abordagem. A ação do arquiteto e do planejador urbano, deste modo, teria influência nos espaços microclimáticos (adjacentes aos edifícios), topoclimáticos (pequenas cidades e fácies de bairros) e mesoclimáticos (grandes bairros ou cidades grandes). Ambas as questões foram discutidas no item anterior.

Da proposta conceitual de Monteiro derivaram vários estudos, dentre eles a tese de Fruehauf, que propõe um algoritmo para cálculo da temperatura do ar através de fotos de satélite, utilizando a banda termal (FRUEHAUF, 1984). Também foram seus seguidores que inseriram a questão no planejamento urbano municipal brasileiro. Na gestão de Mário Covas, na década de 80, a proposta para o novo plano diretor introduziu a questão ambiental no planejamento da cidade, tratando inclusive da ventilação e sua relação com a dispersão de poluentes. A cidade foi dividida em compartimentos, baseados em características físicas de relevo, exposição aos ventos, ocupação e vegetação, estabelecendo diretrizes gerais de controle do uso do solo, criação ou proteção de áreas verdes e prioridades de intervenção.[17]

17

SÃO PAULO (Cidade), 1985, Mapa D5 – Diagnóstico – Qualidade Ambiental:Qualidade do Ar

Recentemente, foi feito um zoneamento climático pra o município de São Paulo que foi incorporado em um trabalho ambiental mais amplo, o Atlas Ambiental do Município de São Paulo (SÃO PAULO (Cidade), 2002). Este trabalho já agregou diagnósticos climáticos empíricos a avaliações a respeito do uso do solo. Mais tarde, Tarifa e Azevedo apresentaram uma publicação reunindo este e outros estudos para o município de São Paulo, abordando os diversos ângulos da questão climática.[18]

A abordagem de Tarifa, embora mereça crédito pelo seu pioneirismo e por ser uma das principais referências a respeito do clima de São Paulo, apresenta algumas imprecisões. O autor baseia grande parte da sua análise em um estudo que converteu imagens de satélite para dois dias distintos (03/09/1999 e 30/04/2000) em dados de temperatura superficial (SÃO PAULO (Cidade), 2002). Ambas as fotos foram tiradas aproximadamente às 10 horas da manhã, o que significa que são representativas somente destes horários, excluindo o período noturno, no qual a ilha de calor se manifesta com maior intensidade (Figura 2.15).

18

TARIFA & AZEVEDO, 2001. Embora a versão referenciada do *Atlas*... tenha sido produzida em 2002, o trabalho climático já havia sido apresentado na versão anterior de 2000.

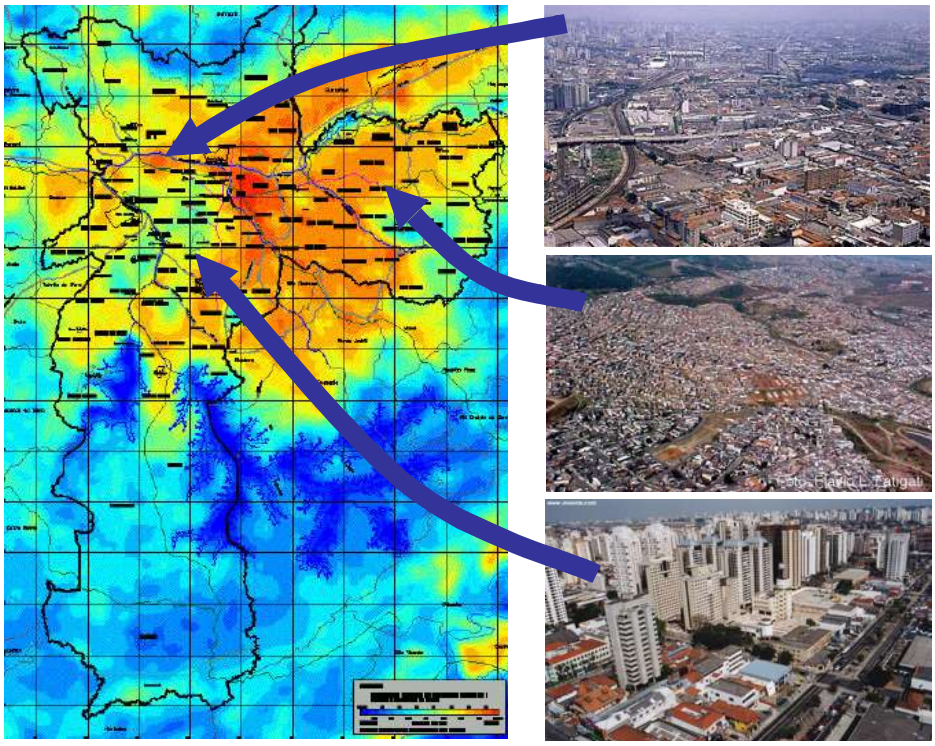


Figura 2.15: Mapa de temperatura aparente da superfície para São Paulo

Fontes::

Mapa: SÃO PAULO (Cidade),2002

Fotos: Barra Funda: http://veja.abril.com.br/idade/exclusivo/vejasp/450_anos/textos/bairros/barra_funda.jpg, Zona Leste: SÃO PAULO (Cidade), 2002; Moema: www.moema.com

Feitas essas considerações, pode-se fazer uma análise do mapa comparando com alguns padrões de ocupação. Observa-se que, ao contrário do que afirma o Atlas[19], a área periférica onde se localiza a maior parte da ocupação favelizada não apresenta as piores condições de temperatura no horário estudado. Áreas próximas à região das represas, apesar das precárias condições ambientais e de implantação, apresentam temperaturas próximas às das melhores regiões da cidade.

Ao tentar sobrepor a análise social à geográfica, acabou-se por comprometer ideologicamente a última, que se tornou imprecisa. As favelas realmente apresentam problemas ambientais sérios, mas sob o ponto de vista térmico, a área crítica aparece como sendo a antiga região industrial da cidade, localizada ao longo da linha férrea e nos vales dos rios Tietê e Tamanduateí. A ausência de verde e uma ocupação homogênea com materiais inadequados podem ser apontadas como algumas das causas deste comportamento. As áreas adensadas, por sua vez, apresentaram um desempenho surpreendentemente bom. Deve-se observar que, nesse período do dia e nessa época do ano, o sombreamento causado pelas edificações nas ruas e espaços adjacentes é significativo, reduzindo as temperaturas superficiais durante o dia. Nos meses de verão, com temperaturas mais altas e incidência solar mais perpendicular, esta situação pode se alterar negativamente e o efeito da densidade construtiva pode aparecer melhor. Além disso, não foi avaliada a questão do resfriamento noturno e da ilha de calor, onde as áreas adensadas podem também apresentar comportamento indesejável.

É importante observar, ainda, que a abordagem geográfica no Brasil tem sido voltada para a descrição dos fenômenos, apresentando

19 SÃO PAULO, 2002, p. 112

dificuldades para apresentar propostas concretas de planejamento e, mais ainda, de quantificar os comportamentos climáticos e a influência urbana sobre eles.

Na área da arquitetura e urbanismo propriamente ditos, alguns trabalhos também vêm sendo desenvolvidos. Destacam-se aqui os estudos feitos por Assis e Duarte, que buscam estabelecer uma correlação entre as formas urbanas e as condições térmicas resultantes, utilizando ferramentas que são próprias à linguagem do arquiteto e planejador. Assis (2000) trabalha principalmente com a questão dos recuos, estudando as trocas radiativas e o fenômeno de sobre aquecimento noturno, bem como dando os primeiros passos na busca por parâmetros de acesso ao sol. Duarte (2000), por sua vez, tenta estabelecer, a partir de estudos empíricos, correlações entre as variáveis da legislação (coeficiente de aproveitamento, taxa de ocupação, etc.) e a temperatura do ar no Centro-Oeste brasileiro. Os dois trabalhos apresentam apenas o impulso inicial, tratando basicamente da questão das trocas sensíveis e evitando a avaliação de alguns termos complexos do balanço energético, como a ventilação e as trocas latentes. Ainda assim, são iniciativas importantes no sentido de estabelecer uma apropriação efetiva dos estudos climáticos no processo de construção das cidades.

Outra abordagem inovadora neste sentido foi o estudo para o Código de Obras da cidade de Mogi das Cruzes, realizado pelo Núcleo de Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (NUTAU).[20] Algumas inovações, principalmente relativas à determinação dos recuos e do acesso ao sol, foram apresentadas e efetivamente incorporadas no projeto enviado à câmara dos vereadores. Para isso, foi necessário demonstrar que a garantia das condições de insolação não implicava redução significativa nas densidades construtivas dos terrenos. Outro ponto forte deste estudo foi a proposição de um código por desempenho, e não normativo como é corrente no país. Enquanto no último são dadas dimensões e restrições para edificações e ambientes, no primeiro, são oferecidos parâmetros de qualidade a serem atingidos e ferramentas para avaliá-los ficando a solução final a cargo do projetista. Isso permite que muitas vezes se encontrem novas e eficientes propostas que não poderiam ter sido pensadas pelos idealizadores do código, gerando espaços muitas vezes melhores do que o requerido ou esperado. A proposta, no entanto, encontrou resistência da administração pública que temia pela adaptação dos projetistas e técnicos locais às complexidades das novas regras.

Com intenção semelhante, Assis et al (2007) apresentam propostas para planos diretores de municípios mineiros, tendo como base a análise das condições climáticas e a adoção de códigos de obras semi-normativos, que permitem ao projetista descumprir as recomendações desde que seja comprovado o desempenho da edificação. O trabalho ainda está em fase de implantação, devendo a avaliação da sua eficácia aguardar resultados futuros. Ainda assim, acredita-se que o caminho da liberdade criativa parametrizada possa render vários e bons frutos.

20

O autor esteve envolvido na elaboração do estudo. Alguns pontos relativos à questão do acesso ao sol e a conceitos gerais do código podem ser vistos em Brandão (2004)

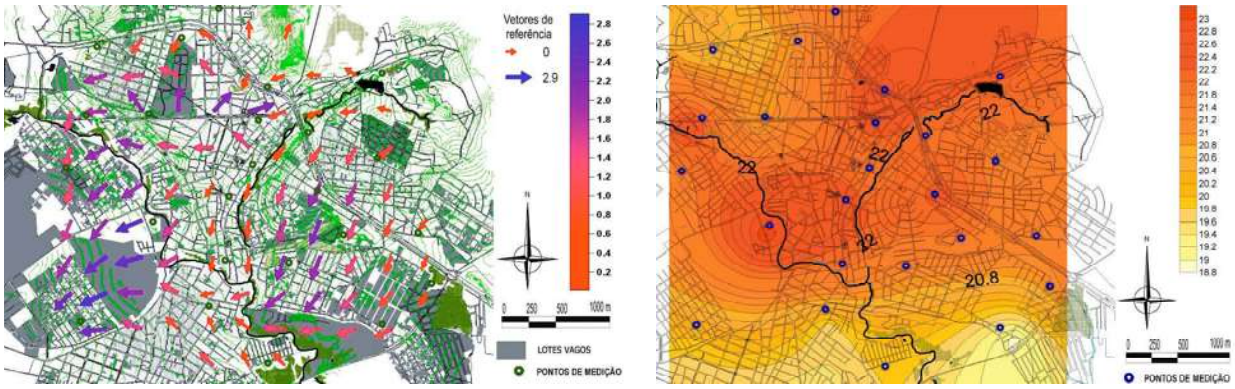


Figura 2.16: Estudos climáticos para a cidade de Paracatu, MG

Fonte: ASSIS et al., 2007

Deste modo, percebe-se que o estudo do clima urbano esteve vinculado a um entendimento sistêmico da cidade, principalmente da sua estrutura espacial física. Os projetos arquitetônicos e urbanos gerados sob esta perspectiva adotam uma representação tecno-material da cidade, descrevendo-a na forma de fluxos de recursos e dejetos, cujo processamento no interior do organismo urbano deve ser tornado mais eficiente. Partindo desses pressupostos, a eficiência da cidade seria alavanca de um processo de melhoria social e conscientização ambiental, em busca do equilíbrio dinâmico almejado pela teoria organicista almeja. Sob esta ótica, esse estado seria "sustentável", ou seja, passível de ser mantido de forma permanente.

Todavia, muitas vezes esta postura incorre em erros já criticados na abordagem orgânica e sistêmica da década de 70. Embora parta de uma análise do contexto local, esta abordagem estabelece pouca relação com a atividade política e econômica pré-existente, permitindo por vezes um planejamento autoritário e tecnocrata que carece de integração com as práticas sócio-culturais locais. Ao tentar estabelecer um padrão de vida "ambientalmente correto" aos seus ocupantes, estes projetos assumem uma mentalidade que não pode ser construída de cima para baixo.

Assim sendo, a eficácia de muitas medidas tomadas acaba perdendo força devido a traços culturais. A solução não está apenas em prover transporte público eficiente, mas também combater a valorização cultural do automóvel. Edifícios energeticamente eficientes serão muito melhor aproveitados se os usuários aceitarem a idéia de que as condições internas devem variar com as externas e não serem fixadas em um padrão arbitrário estabelecido para pessoas aclimatadas a outras condições. Pouco adianta estabelecer propostas inovadoras de padrões formais urbanos se o poder municipal é controlado por interesses econômicos que não se beneficiariam destas mudanças. Não é possível propor novas formas de legislação se não há capacitação dos profissionais de projeto e dos técnicos do poder público encarregados de analisar e aprovar as propostas.

As administrações municipais têm em suas mãos uma importante ferramenta na configuração dos espaços urbanos: a legislação, que permite um controle significativo da forma da cidade. É importante garantir que ela reflita as necessidades dos usuários e habitantes e não de agentes da especulação e do mercado imobiliário. A legislação

urbanística, sob essa perspectiva, pode ser um importante elemento estruturador de novas condições ambientais para a cidade. Não se está afirmando aqui que ela deva ser orientada para produzir uma determinada forma, clima ou ambiente urbano, mas sim que a condição resultante de qualquer proposta sócio-política elaborada nunca deixe de passar por uma avaliação do impacto ambiental causado. É possível também que, na ausência de um modelo formal resultante da estratégia de planejamento, a questão climática seja um norteador de princípios para a forma física da cidade.

Dentre as incumbências do planejador está avaliar e informar estes usuários e habitantes, ajudando a influir nos meios políticos em busca de uma melhor qualidade ambiental. Para isto, faz-se lícito o uso da abordagem sistêmica, principalmente no que se refere à análise da estrutura física da cidade, permitindo o diagnóstico e a previsão dos estados futuros do espaço construído. As propostas e a avaliação dos seus impactos devem ser feitas dentro de um âmbito mais geral e interdisciplinar, se possível incluindo a participação da comunidade através dos canais existentes.

Os estudos de clima urbano voltados para a arquitetura e o planejamento, dessa forma, podem se ocupar de traduzir a modelagem proposta por climatologistas, traduzindo as variáveis envolvidas em parâmetros geométricos relacionados à edificação e passíveis de constar nas legislações construtivas. Tomando o ser humano como referência, estes estudos poderão produzir novos métodos de análise e critérios de desempenho para as alterações urbanas, contribuindo para um planejamento urbano mais ambientalmente consciente.

Modelos de clima urbano

3

Devido à complexidade da atmosfera, da cidade e das interações entre ambos, a apreensão da realidade climática urbana como um todo se torna inviável. Para permitir o seu entendimento, normalmente são utilizados modelos, construções conceituais, físicas ou matemáticas através das quais são levantadas somente as características da realidade relevantes à resolução de um determinado problema. Os modelos que podem ser utilizados para o conhecimento, a análise, a previsão e o planejamento em estudos urbanos (ECHENIQUE,1975). A escolha adequada das variáveis, da forma de tratamento e da análise de resultados é fundamental na capacidade de um modelo de responder a uma determinada questão colocada. Neste capítulo, serão apresentados o tratamento dado às variáveis relacionadas ao clima urbano e a construção dos modelos utilizados.

3.1. Classificação

3.1.1. *Modelos empíricos*

Nos estágios iniciais do desenvolvimento da climatologia urbana, Oke (1984) afirma que uma grande quantidade de medições e levantamentos foi realizada sem que generalizações fossem obtidas, ou dados para o planejamento urbano fossem efetivamente levantados. O autor crítica duramente o caráter descritivo destes estudos iniciais pela sua falta de aplicação prática. Os primeiros modelos que tentaram superar isto foram elaborados a partir de bases confiáveis de dados empíricos, com o objetivo de correlacionar variáveis climáticas ou de planejamento urbano com as condições térmicas da cidade. Estes estudos são interessantes porque estão fundamentados em condições reais, mas sua validade se restringe à qualidade da base de dados que lhes deu origem. Isso pode torná-los inadequados para extrapolações e previsões de estados futuros.

Um dos modelos empíricos clássicos foi proposto por Oke (1973) que relaciona a intensidade da ilha de calor ($\mathbf{\Delta T_{r\text{-}u}}$) à população da área urbana (**Pop**) e à velocidade média do vento ($\overline{\boldsymbol{u}}$).

$$\Delta T_{r-u} = \frac{Pop^{0,27}}{4{,}04\ \bar{u}^{0,56}} \sim \frac{Pop^{1/4}}{4{,}04\ \bar{u}^{1/2}}$$

Equação 3.1

O modelo foi posteriormente criticado pelo próprio Oke (1976), por sua origem puramente empírica e sua falta de coerência dimensional. Ao comparar este modelo com um modelo advectivo (modelo que considera o transporte de calor horizontal), o autor encontrou uma melhor correlação do primeiro com os dados medidos, ao contrário do esperado.

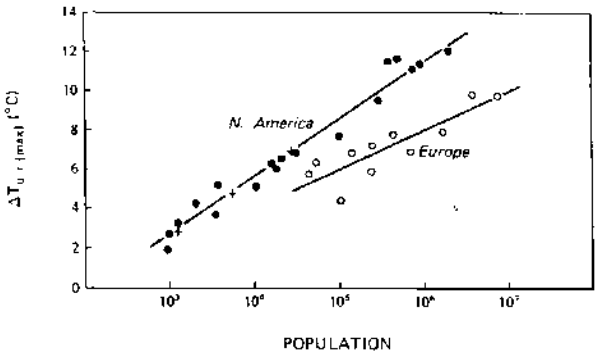


Figura 3.1: Correlação entre a ilha de calor noturna e a população de cidades na Europa e EUA

Fonte: OKE, 1987

Isso originou a proposta de dividir o estudo do balanço energético da cidade em duas escalas, a Camada Limite Urbana (UBL) e a Camada Abaixo das Coberturas (UCL).

Outra abordagem foi proposta por Bornstein (1984)[21] que correlacionou o fenômeno com variáveis meteorológicas: nebulosidade (**NI**), velocidade do vento (**u**), temperatura (**T**) e umidade absoluta (**q**).

Equação 3.2

$$\Delta T_{r-u\,(máx)} = 2{,}8 - 0{,}1\,NI - 0{,}38\,u - 0{,}02\,T + 0{,}03\,q$$

21 BORNSTEIN, R.D. Urban climate models: Nature, Limitations and applications. In: URBAN CLIMATE AND ITS APPLICATIONS WITH SPECIAL REGARD TO TROPICAL AREAS, Mexico City, 1984. *Proceedings of Technical Conference*...Geneva: WMO, 1984. p. 237-276. *apud* Givonni, 1998

Observa-se, no entanto, que esta proposta tem pouca utilidade para o planejamento urbano, uma vez que não aborda as variáveis ligadas aos edifícios e à estrutura urbana.

Oke (1981) elabora um novo modelo para a ilha de calor noturna, já relacionado à questão dos fluxos por radiação de onda longa para o fundo de céu. Os coeficientes que relacionam as variáveis de razão de aspecto do *canyon* (**H/L$_c$**) ou fator de visão de céu (**F$_{céu}$**) com o aumento da temperatura ainda são baseadas em estudos empíricos.

Equação 3.4

$$\Delta T_{r-u\,(máx)} = 7{,}45 + ln\left(\frac{H}{L_c}\right)$$

Equação 3.3

$$\Delta T_{r-u\,(máx)} = 15{,}27 + 13{,}88\,F_{céu}$$

Mais recentemente, Duarte (2000) propôs, através de uma regressão linear, um modelo para verificação das condições térmicas da cidade de Cuiabá. O parâmetro de clima urbano **I** para a cidade, dependente de: taxa de ocupação (**TO**), coeficiente de aproveitamento (**CA**), superfície de água (**SA**) e área arborizada (**ARV**).

Equação 3.5

$$I = \frac{TO \cdot CA}{SA \cdot ARV}$$

A autora afirma que o resultado de **I** deveria ser inferior a 2 para se evitar o sobreaquecimento da área urbana.

Steemers (2002) apresenta outro modelo que cria uma variável denominada Grau de Confinamento (Degree of Enclosure – **DoE**), dado pela somatória da área total de projeção horizontal pela área aberta.

$$DoE = \sum \left(\frac{A_{total}}{A_{aberta}} \right)$$

Equação 3.6

Para algumas estruturas típicas, o **DoE** pode ser encontrado na Tabela 3.1.

Tipo de espaço	Diagrama da planta	DoE Grau de confinamento
Pórtico		6,0
Arcada		3,0
Varanda		2,0
Área coberta		1,5
Aberto		1,0

Tabela 3.1: Grau de Confinamento

Fonte: STEEMERS, 2002

O estudo encontrou ainda uma forte correlação empírica entre o grau de confinamento e a variação de temperatura nos ambientes. A partir de uma regressão logarítmica foi encontrada a seguinte expressão:

$$Ampl = 17{,}3\ DoE^{-0{,}48}$$

Equação 3.7

Os estudos de validação deste modelo encontraram uma alta concordância com os resultados modelados (ver Figura 3.2).

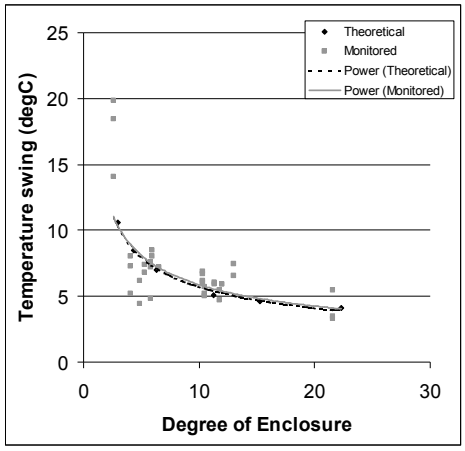


Figura 3.2: Comparação entre o modelo para DoE e os dados medidos em campo

Fonte: STEEMERS, 2002

3.1.2. *Modelos de balanço de energia*

Uma alternativa à abordagem indutiva dos modelos empíricos é a modelagem do clima urbano a partir dos seus fluxos de calor. A formulação matemática deriva da física de transferência de calor,

partindo do pressuposto de que o meio urbano é um sistema atmosférico fechado, onde toda a energia que entra deve sair.

Figura 3.3: A cidade como um sistema termodinâmico fechado

Para se efetuarem os cálculos é necessário definir um volume de controle, limitado por superfícies. Os processos de entrada e saída de energia no sistema são sempre feitos através das superfícies e os processos de armazenamento e geração através dos volumes (INCROPERA & DEWITT, 2003). Para o sistema Terra-Atmosfera, os volumes de controle e superfícies são mostrados na Figura 3.4.

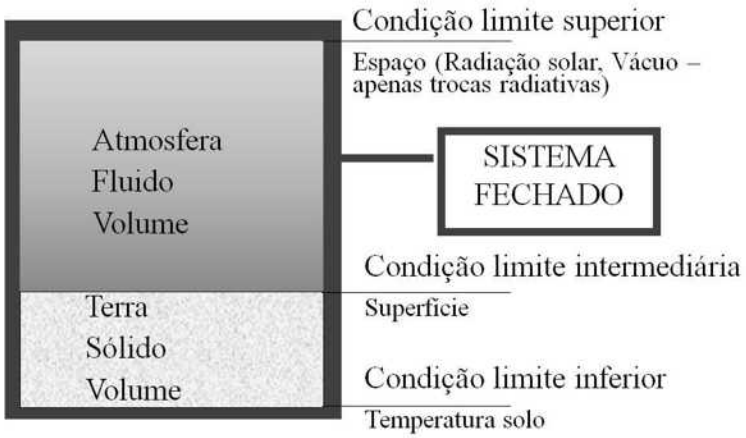


Figura 3.4: Definição das superfícies e volumes de controle para o sistema Terra-Atmosfera

O resultado das trocas entre os volumes e superfícies acima definem as temperaturas do ar, do solo e das superfícies. No caso do sistema Terra-Atmosfera, toda a entrada de energia provém da radiação solar e as perdas ocorrem na forma de radiação de onda curta refletida ou de radiação de onda longa emitida. O balanço energético da Terra é dado na Figura 3.5.

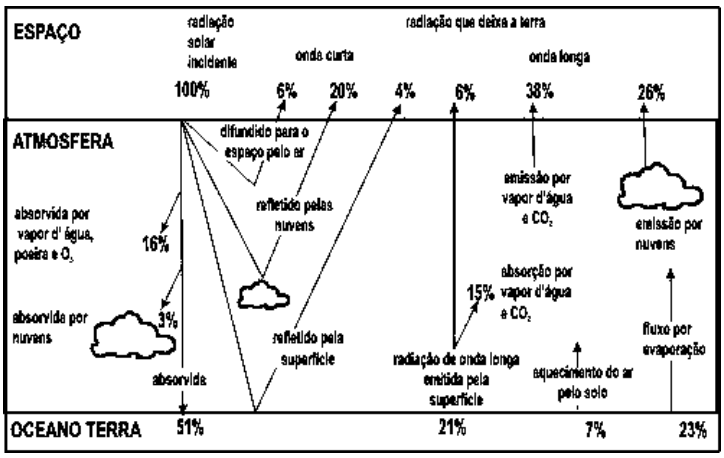


Figura 3.5: Balanço energético da Terra

Fonte: Traduzido de Oke (1987)

Este balanço, porém, não ocorre de maneira uniforme por toda a Terra, sendo alterado pela exposição à radiação solar e pelas características da atmosfera, do solo e das superfícies. A ocupação urbana tende a diminuir significativamente as trocas latentes no balanço, devido à redução das superfícies evaporativas. Além disso, é comum que sejam aumentados tanto a absorção quanto o armazenamento de calor, já que as superfícies urbanas contam com cores mais escuras, materiais densos e uma configuração geométrica que dificulta a perda por onda longa para a atmosfera.

As primeiras tentativas de modelar esta alteração antropogênica tratavam a superfície urbana como uma placa homogênea trocando calor com a atmosfera. Myrup (1969) apresenta um modelo de balanço simplificado com o qual ele realiza estudos exploratórios de sensitividade. O modelo é unidimensional e trabalha com regime permanente.

Após Oke (1976), tornou-se claro que a superfície urbana era muito complexa para ser tratada como uma superfície homogênea com propriedades termofísicas conhecidas. Ficou claro também que o armazenamento de calor é um processo significativo no entendimento do comportamento climático da cidade. Os parâmetros que compõem os diversos modelos serão avaliados a seguir e alguns exemplos serão apresentados no item 3.2.4.

3.1.3. *Modelos fluidodinâmicos*

A rigor, os modelos fluidodinâmicos não deveriam constar em uma categoria separada, uma vez que tratam também do balanço de energia e massa na atmosfera. Podem, deste modo, ser tratados como uma subdivisão dos modelos de balanço citados acima; mas para fins deste trabalho, foram classificados separadamente para que se pudesse tratar das suas peculiaridades. A principal diferença entre estes modelos e os citados no item anterior está no tratamento do comportamento do fluído atmosférico.

Enquanto os demais modelos tratam a atmosfera como um volume fechado e homogêneo (ou com poucas subdivisões), neste caso a atmosfera (domínio fluido) é discretizada, ou seja, dividida em vários volumes de controle menores, para os quais são realizados cálculos do balanço de massa, energia e momento individualmente. Os efeitos da convecção não são mais simplesmente parametrizados e os fluxos de massa e calor são tratados também ao longo do volume de ar propriamente dito e não somente na superfície.

Dentre a literatura consultada, Bornstein (1975) sugere um modelo fluidodinâmico, calculando os fluxos de momento, massa e calor em um plano perpendicular à superfície urbana. O modelo trabalha com regime permanente, ignorando o armazenamento de calor por parte do solo e dos edifícios e trata a cidade como uma placa emissora de calor de rugosidade constante. O modelo é matematicamente complexo e fornece temperaturas e velocidades para alturas até 1400 m na atmosfera, mas tem pouca precisão na área próxima aos elementos de rugosidade. Mais recentemente, Mochida et al (1997)

utilizaram modelos de CFD para estudos de mesoclima na cidade de Tóquio. Takashi et al (2004) realizaram simulações térmicas para a cidade de Kyoto. Ambos os trabalhos tratam principalmente das alterações provocadas na camada limite, não avaliando os efeitos na camada abaixo do nível das coberturas.

Como normalmente a quantidade e complexidade dos cálculos envolvidos demandam recursos computacionais potentes, estes modelos são normalmente conhecidos pela designação de Fluidodinâmica Computacional, ou CFD (vindo do inglês, *Computational Fluid Dynamics*). Para entendê-los, é preciso antes definir alguns conceitos.

3.1.3.1. Campo de velocidades

Como o estudo parte de uma discretização do volume do fluido, a velocidade não é mais um parâmetro único e constante, devendo ser encarada como uma grandeza vetorial que varia no espaço e no tempo (CÓSTOLA, 2006). Deste modo, as componentes "u,v,w" (as velocidades nos eixos x,y,z) devem ser definidas para cada ponto x,y,z da região de interesse, o que constitui o campo de velocidade, em cada instante t. Cóstola (2006) lembra que o campo de velocidades é fortemente influenciado pelas configurações das fronteiras sólidas.

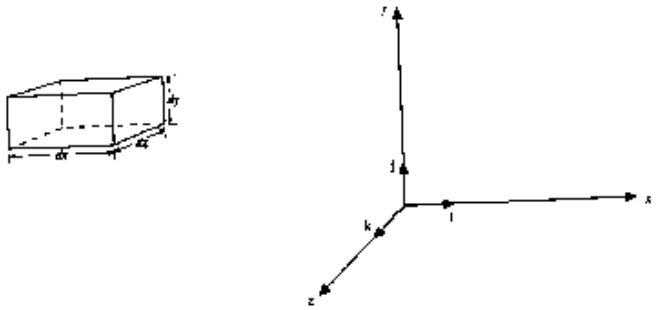


Figura 3.6: Volume de controle com dimensões *d*x, *d*y e *dz* e espaço cartesiano

Fonte: CÓSTOLA, 2006

3.1.3.2. Equações fundamentais da mecânica dos fluidos

Anderson (1995) descreve de maneira bastante didática a dedução das equações fundamentais dos fluidos. Não é escopo deste trabalho deduzi-las, mas a abordagem conceitual é útil a todos aqueles interessados em tratar da questão.

As equações são baseadas em três princípios físicos básicos:

- **A massa é conservada**, logo, caso a massa do sistema seja constante, a entrada de massa deve ser igual à saída. Caso ela não seja constante, a diferença entre a entrada e a saída deve ser igual à variação de massa no sistema. A equação deduzida deste princípio é chamada equação de continuidade e é função da densidade do fluido (**ρ**), da sua velocidade (*V*) e do volume (**V**) ao longo do tempo (***t***) e do espaço (**x**, **y**, **z**).
- **A razão entre a força aplicada em um corpo e a sua aceleração é constante.** Esta é a segunda lei de Newton e a constante de proporcionalidade é denominada massa. Estas forças podem ser exercidas diretamente sobre a massa

volumétrica do fluido ou através das suas superfícies e estão detalhadas na Figura 3.7. As equações deduzidas deste princípio são chamadas equações de momento e são função da densidade do fluido (**ρ**), da velocidade (*V*), da viscosidade (forças internas de atrito do fluido - **μ**) e da força exercida (***f***) ao longo do tempo (***t***) e do espaço (**x**, **y**, **z**).

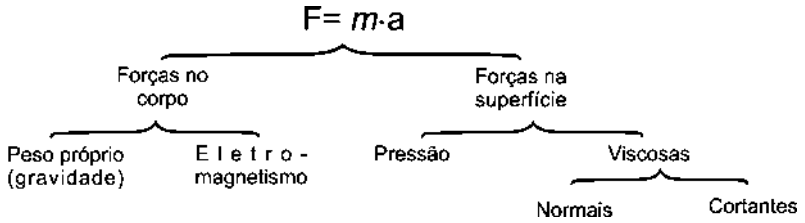


Figura 3.7: Esquema das forças incidentes sobre o fluido

Fonte: Baseado em Anderson Jr. (1995)

- **A energia é conservada.** Esta é a primeira lei da termodinâmica e significa que a taxa de variação de energia dentro de um elemento fluido é igual ao fluxo líquido de calor no elemento mais o trabalho realizado sobre o elemento devido às forças no corpo e nas superfícies. O princípio é o mesmo apresentado na Figura 3.3. A equação deduzida deste princípio é chamada equação de continuidade e é função da densidade do fluido (**ρ**), da sua velocidade (*V*), da temperatura (**T**), das forças tensões normais e de cisalhamento (**τ**) e da força exercida (***f***) ao longo do tempo (***t***) e do espaço (**x**, **y**, **z**).

A forma da equação depende da maneira como se analisa o comportamento do fluido. Caso se observe um elemento infinitesimal, as equações serão deduzidas na sua forma derivativa. No caso de se considerar um volume de controle finito, a dedução será na sua forma integral. Anderson (1995) observa que as equações em formato integral permitem descontinuidades no interior do volume, enquanto a forma derivativa assume que as propriedades do fluido são diferenciáveis e, por isso, contínuas. Por isso, o autor afirma que as equações na sua forma integral são "mais fundamentais" que as equações derivativas, embora estas últimas sejam a forma mais usada para a apresentação das equações na literatura.

O fluido pode ser analisado observando-se sua vazão através de um elemento (infinitesimal ou volume finito) fixo no espaço. Neste caso, com o volume de controle estacionário, as equações são obtidas no formato conservativo. Caso se avalie uma porção de fluido de massa fixa que se movimenta no espaço, tem-se a forma não-conservativa da equação. Matematicamente, pode-se perceber se a equação está na forma não conservativa pela presença da derivada substancial (notação **Dρ/D*t***) que indica a variação da densidade de um dado elemento do fluido enquanto ele se move pelo espaço. Na derivada parcial simples (notação **∂ρ/∂*t***), se avalia variação da densidade em um ponto fixo, devido a variações do campo de velocidades.

Tomando-se o exemplo da equação de continuidade, a Figura 3.8 apresenta as formas possíveis de abordagem com as equações resultantes.

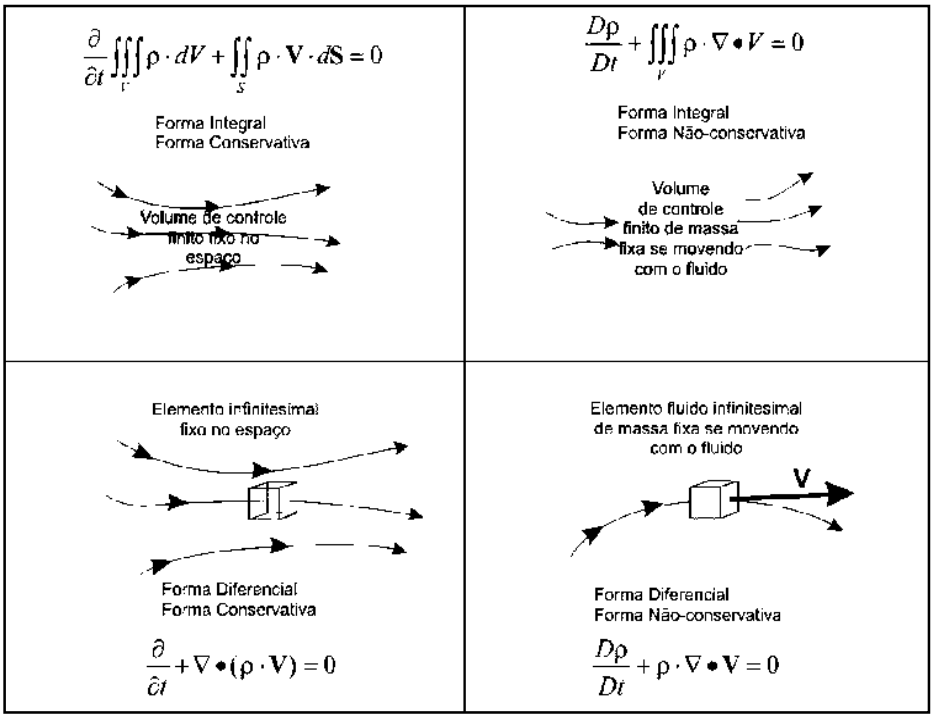


Figura 3.8: Formas da equação fundamental de conservação de massa

Fonte: ANDERSON JR,.1995

Observa-se que as equações podem ser reorganizadas entre as diferentes formas, dependendo da necessidade do cálculo específico. As equações para fluidos viscosos são conhecidas como as equações de Navier-Strokes e são apresentadas a seguir, na sua forma conservativa:

Equação de continuidade:

Equação 3.8

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \bullet (\rho \cdot V) = 0$$

Equação de momento:

Equação 3.11

componente em x:

$$\frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial t} + \nabla \bullet (\mathbf{V} \cdot \rho \cdot u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \rho \cdot \boldsymbol{f_x}$$

Equação 3.10

componente em y:

$$\frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial t} + \nabla \bullet (V \cdot \rho \cdot v) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \rho \cdot f_y$$

Equação 3.9

componente em z:

$$\frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial t} + \nabla \bullet (V \cdot \rho \cdot w) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho \cdot f_z$$

Equação de energia:

Equação 3.12

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\rho \cdot \left(e + \frac{V^2}{2}\right)\right] + \nabla \bullet \left[\rho \cdot \left(e + \frac{V^2}{2}\right) \cdot V\right] = \rho \cdot \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x}\left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial z}\right)$$

$$-\frac{\partial(u \cdot p)}{\partial x} - \frac{\partial(v \cdot p)}{\partial y} - \frac{\partial(w \cdot p)}{\partial z} + \frac{\partial(u \cdot \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(v \cdot \tau_{xy})}{\partial y} + \frac{\partial(w \cdot \tau_{xz})}{\partial z}$$

$$+\frac{\partial(u \cdot \tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(v \cdot \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(w \cdot \tau_{yz})}{\partial z} + \frac{\partial(u \cdot \tau_{zx})}{\partial x} + \frac{\partial(v \cdot \tau_{zy})}{\partial y} + \frac{\partial(w \cdot \tau_{zz})}{\partial z}$$

$$+ \rho \cdot \boldsymbol{F} \bullet \mathbf{V}$$

Cóstola (2006) afirma que a resolução analítica exata destas equações não é conhecida para a maioria das situações, sendo necessário encontrar soluções através de relações algébricas aproximadas em métodos como o de diferenças finitas. O fluído é divido em pequenas porções cuja interação obedece as equações acima. Na técnica denominada DNS, as porções são suficientemente pequenas para representar a continuidade do escoamento, mas a técnica exige uma capacidade computacional tão grande que acaba inviabilizada. Deste modo, o espaço é discretizado através da elaboração de uma malha de pontos ou volumes, conforme havia sido citado na introdução deste item.

Cóstola (2006) coloca que a opção por malhas espaçadas tem como conseqüência a não reprodução dos efeitos de turbulência, devido à supressão de interações importantes entre as massas fluidas. Por isso, a turbulência deve ser modelada separadamente e adicionada ao escoamento médio.

Anderson (1995) observa ainda que a simplificação algébrica, através da transformação por séries de Taylor, induz a erros nas simulações. As séries de Taylor são um recurso matemático para se aproximar qualquer curva de um polinômio de grau **n**. Aproximações de primeira ordem ignoram todos os termos em com expoente maior que um, levando a um alto grau de imprecisão. Cost (2004) recomenda a utilização de modelos de segunda ordem para resultados academicamente confiáveis.

Para uma apresentação de alguns modelos de turbulência, ver item 3.2.2.4.

3.2. Modelos analíticos

3.2.1. *Parâmetros de radiação*

As trocas radiativas ocorrem por meio de emissões eletromagnéticas em um ou mais comprimentos de onda, independentemente de meios de propagação. A radiação térmica emitida por um corpo é função da sua temperatura e das propriedades radiativas da sua superfície. Estes fatores determinam a intensidade do fluxo radiante e a sua característica espectral, definida como a proporção de emissão em cada comprimento de onda. Para efeito de estudo, o espectro é dividido em duas partes principais: ondas curtas (até 2.000 nm) e ondas longas (normalmente considerado entre 2.000 e 10.000 nm, embora possa haver emissões acima desta faixa). A emissão de um corpo em função da sua temperatura absoluta em (**T**) em K é dada por:

$$E = \sigma \cdot T^4$$

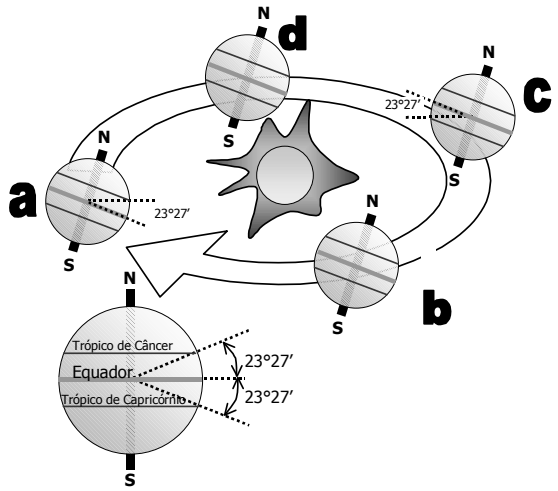
Equação 3.13

Onde **σ** a constante de Stefan-Boltzman, que vale 5,67 x10^{-8} W/m²·K.

Como a principal fonte de energia da atmosfera terrestre é o Sol, torna-se necessário determinar as características da radiação proveniente dele.

3.2.1.1. Posição do sol

O movimento aparente do Sol é função dos movimentos de translação e rotação da Terra e da defasagem entre os eixos destes dois movimentos de 23° 27′. O resultado desta configuração é uma variação do ângulo de incidência do sol no equador ao longo do ano, que resulta nos solstícios e equinócios e que definem as estações do ano (Figura 3.9).



Posição "a" - 22/06
solstício de verão no hemisfério norte
solstício de inverno no hemisfério sul

Posição "b" e "d" - 21/03 e 24/09
equinócios

Posição "c" - 22/12
solstício de inverno no hemisfério norte
solstício de verão no hemisfério sul

Figura 3.9: Movimento da Terra em torno do Sol

Fonte: baseado em Lamberts, Pereira & Dutra (1997)

No equinócio, os raios incidem perpendicularmente sobre os meridianos no equador e vão se inclinando na medida em que se afasta dele. Essa inclinação é dada pela latitude do local (**ϕ**). No decorrer do ano, o ângulo de incidência do sol em relação ao meridiano sofre uma variação de 46°54′.

Este ângulo formado entre o zênite e o sol ao meio-dia em um determinado momento do ano é denominado declinação do sol (**δ)** e é calculado em graus pela equação adaptada do IES (1998):

Equação 3.14

$$\delta = 23{,}4511 \cdot \operatorname{sen}\left[\frac{360 \cdot (n - 81)}{368}\right]$$

Onde **n** é o dia *juliano*[22], sendo 01/01 = 1 e 31/12 = 365.

A Figura 3.10 indica o movimento aparente do Sol nas latitudes 0° e 23° 27′ Sul. Os arcos leste-oeste indicam o caminho diário e os arcos norte-sul dividem os dias em horas.

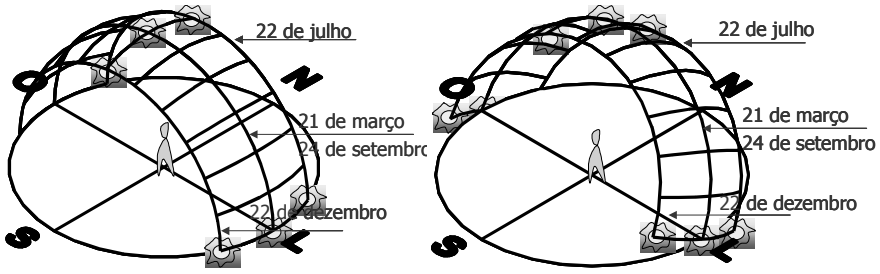


Figura 3.10: Movimento aparente do Sol no Equador e no Trópico de Capricórnio

Fonte: baseado em Lamberts, Pereira & Dutra (1997)

A posição do sol em um dado momento é calculada pelas equações (CIE, 1990):

22 Embora vigore atualmente o calendário Gregoriano, e não o Juliano, toda a literatura consultada traz a notação "*Julian day*" optando-se por adotar esta notação neste trabalho.

$$\xi'_s = \cos^{-1}(\operatorname{sen}\phi \cdot \operatorname{sen}\delta + \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega)$$ **Equação 3.15**

$$\gamma_s = \cos^{-1}\left(\frac{\cos\phi \cdot \operatorname{sen}\delta + \operatorname{sen}\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega}{\operatorname{sen}\xi_s}\right)$$ **Equação 3.16**

Onde:

ξ'_s e. **γ_s** são respectivamente a o ângulo zenital do sol e o azimute solar (°);

δ é a declinação do sol, dada pela Equação 3.14;

ϕ é a latitude do local e

ω é o ângulo horário do sol em graus para o período em questão.

O ângulo solar é igual a 0° ao meio dia e aumenta 15° a cada hora, sendo negativo para a manhã e positivo para a tarde, podendo ser calculado em graus pela equação abaixo, onde **t** é o horário a ser calculado:

$$\omega = 15 \cdot (t - 12)$$ **Equação 3.17**

A Equação 3.17 fornece valores de azimute iguais para as horas simétricas em relação ao meio-dia solar (11h-13h, 10h-14h, 9h-15h, etc.), já que elas apresentam a mesma altura solar. Os valores obtidos pela equação, desse modo, só se aplicam para o período da tarde (12h-19h). Para o cálculo do período a manhã deve-se subtrair o valor calculado de 360° para se achar o azimute real.

O comprimento da sombra (**L_{sombra}**) pode ser determinado em função do ângulo de altura e do azimute solares, respectivamente **ξ_s** e. **γ_s**. Além destes fatores, deve-se ainda considerar a importância da orientação da fachada (**γ_f**).

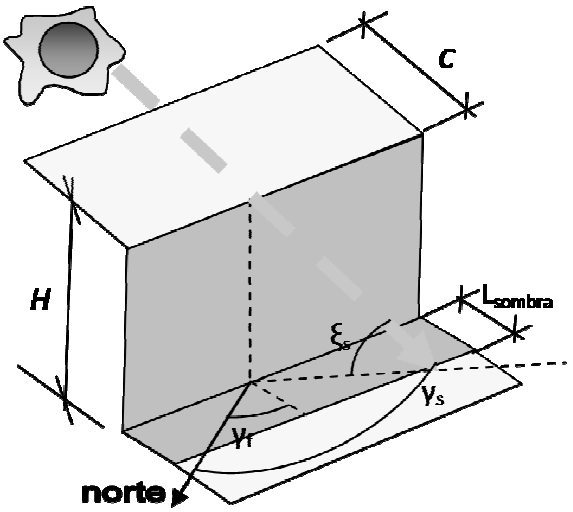


Figura 3.11: Esquema para cálculo geométrico do comprimento da sombra

Assumindo-se edifícios contínuos e paralelos da mesma altura o comprimento da sombra em uma direção perpendicular à fachada.

$$L_{sombra} = \cos\frac{(\gamma_f - \gamma_s) \cdot H_{ed}}{\text{t}\,\xi_s}$$ **Equação 3.18**

Caso $\mathbf{L_{sombra}}$ seja maior que a largura do *canyon* ($\mathbf{L_c}$), a sombra se projetará sobre a parede do edifício voltado para o sol. A altura desta projeção ($\mathbf{H_{sombra}}$)é dada por:

Equação 3.19

$$H_{sombra} = \cos\frac{(\gamma_f - \gamma_s)\cdot(H_{ed} - L_C)}{\text{t}\text{n}\,\xi_s}$$

3.2.1.2. A radiação solar incidente e suas parcelas

A radiação solar incidente em um plano horizontal pode provir diretamente do sol ou ser difundida ao atravessar a atmosfera. Estas parcelas são chamadas respectivamente de radiação direta ($\mathbf{I_D}$) e difusa ($\mathbf{I_d}$), sendo que a soma delas é denominada radiação global ($\mathbf{I_g}$). Neste trabalho, serão utilizados dados horários medidos em estações metrológicas, mas modelos para cálculo da radiação solar horária a partir da nebulosidade, do número de horas de sol e do total diário de radiação são apresentados em Brandão (2004).

Para o cálculo das parcelas difusa e direta da radiação global incidente, Duffie & Beckman (1980) apresentam modelos. Como no caso da determinação dos valores horários a partir dos diários, não é um processo exato, visto que as correlações foram obtidas experimentalmente em outros países e podem não se aplicar bem à situação brasileira. As parcelas difusa e direta normalmente são dadas em função de um índice de limpidez (*clearness index*), que mede a relação entre a irradiância no plano horizontal medida ou calculada e a irradiância no topo da atmosfera no mesmo período. Ele pode ser horário ($\mathbf{k_t}$), diário ($\mathbf{K_t}$) ou mensal ($\overline{\mathbf{K}}_t$). Dos métodos pesquisados, normalmente os que trabalham com os índices horários são os que apresentam as menores divergências. Logo, para os fins deste trabalho:

Equação 3.20

$$k_t = \frac{I_g}{I_0}$$

Onde $\mathbf{I_G}$ é a radiação global incidente em plano horizontal, obtida através de medidas de campo ou estações meteorológicas, e $\mathbf{I_o}$ é a radiação média incidente em uma hora no topo da atmosfera sobre uma superfície horizontal em W/m², calculado a partir da equação adaptada de Duffie & Beckman (1980):

Equação 3.21

$$I_0 = \frac{12}{\pi}\cdot I_{sc}\cdot\left[1 + 0{,}333\cdot\cos\left(\frac{360\cdot n}{365}\right)\right]\cdot\left[\cos\phi\cdot\cos\delta\cdot(\operatorname{sen}\omega_2 - \operatorname{sen}\omega_1) + 2\pi\cdot\frac{\omega_2 - \omega_1}{360}\cdot\operatorname{sen}\phi\cdot\operatorname{sen}\delta\right]\cdot\frac{1}{3{,}6\cdot 10^9}$$

Onde:

$\mathbf{I_{sc}}$ é a constante solar (1367 W/m²);

$\boldsymbol{\delta}$ é a declinação do sol, dada pela Equação 3.14

$\boldsymbol{\phi}$ é a latitude do local e

ω_1 e **ω_2** são os ângulos horários final e inicial do período estudado (no caso uma hora) (°).

Uma vez calculado k_t, a irradiância difusa ($\mathbf{I_d}$) pode ser obtida a partir das equações de Orgill e Hollands, apresentadas por Duffie & Beckman (1980) em W/m2:

$$I_d = I_g \cdot (1{,}0 - 0{,}249\ k_t) \qquad para\ k_t < 0{,}35$$ **Equação 3.24**

$$I_d = I_g \cdot (1{,}557 - 1{,}84\ k_t) \qquad para\ 0{,}35 \leq k_t < 0{,}75$$ **Equação 3.22**

$$I_d = 0{,}177 \cdot I_g \qquad para\ k_t \geq 0{,}75$$ **Equação 3.23**

3.2.1.3. Radiação incidente em superfícies verticais orientadas

Para calcular a radiação incidente em planos com orientação diversa da horizontal, torna-se necessário primeiro converter a radiação direta horizontal ($\mathbf{I_D}$) em radiação normal ($\mathbf{I_N}$), definida como a radiação incidente em um plano perpendicular à direção dos raios. Esta variável é determinada pela seguinte equação, apresentada por Frota (2004):

$$I_N = \frac{I_D}{\operatorname{sen} \xi_s}$$ **Equação 3.25**

É possível ainda utilizar o cosseno do ângulo zenital solar, ao invés da altura solar, como foi utilizado aqui.

Para se avaliar o impacto da radiação nas superfícies verticais, deve-se calcular o ângulo de incidência da radiação direta (**i**), também apresentada por Frota (2004).

$$i_R = \operatorname{sen} \xi_s \cdot \cos \beta + \cos \xi_s \cdot \operatorname{sen} \beta \cdot \cos \gamma_s$$ **Equação 3.26**

Onde **β** é a inclinação do plano com o horizonte. Para planos verticais, a Equação 3.26 se resume a:

$$i_R = \cos \xi_s \cdot \cos \gamma_s$$ **Equação 3.27**

Para se determinar a radiação difusa incidente em um plano inclinado, assumindo-se uma distribuição uniforme da radiação no céu, tem-se que:

$$I_{d\beta} = I_d \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2}$$ **Equação 3.28**

Em caso de plano vertical, a razão entre a radiação incidente e a radiação difusa horizontal é de 0,5.

3.2.1.4. Propriedades radiativas dos materiais

Para determinação das características radiativas dos materiais, é necessário estabelecer os conceitos que definem estas propriedades. Duffie e Beckman (1980) definem as trocas radiativas em materiais opacos como um fenômeno superficial. Sendo assim, as propriedades aqui descritas se referem às superfícies dos materiais urbanos, não dependendo da sua constituição interna. A absortância monocromática

direcional ($\boldsymbol{\alpha_\lambda}$) é fração da radiação incidente no comprimento de onda **λ**, vinda da direção **μ, γ** (onde **μ** é o cosseno do ângulo polar e **γ** é o ângulo azimutal) que é absorvida pela superfície.

Análogo a este conceito, tem-se a emitância monocromática direcional ($\boldsymbol{\varepsilon_\lambda}$), definida como sendo a razão entre a intensidade monocromática emitida pela superfície em uma direção e aquela que seria emitida por um corpo negro a uma mesma temperatura. Para um determinado comprimento de onda, **α** é sempre igual a **ε**.

A refletância hemisférica angular monocromática ($\boldsymbol{\rho_\lambda}$) é definida como a razão entre a intensidade monocromática refletida na direção **μ, γ** e a energia monocromática vinda de todas as direções, dividida por π.

Em superfícies opacas, absortância e refletância são grandezas complementares em relação à unidade. Deste modo:

Equação 3.29

$$\alpha_\lambda(\mu,\gamma) = 1 - \rho_\lambda(\mu,\gamma)$$

Apesar de relacionadas dentro de um mesmo comprimento de onda, as propriedades radiativas de um material podem variar para bandas diferentes do espectro. Quando integradas em relação ao espectro solar, estas propriedades são denominadas como a absorção e a reflexão solar do material, ou albedo no jargão da climatologia. Para fins deste trabalho, o **albedo** se refere às propriedades radiativas do material relativas à porção do espectro de onda curta (do ultravioleta ao infravermelho próximo, com comprimentos de onda de até 2 microns).

Quando estas propriedades se referem a comprimentos de onda maiores no espectro térmico (acima de 2 microns), é definida a propriedade denominada **emissividade**. O comportamento espectral da radiação emitida por um corpo é função da sua temperatura, sendo a maior parte das superfícies urbanas emite em comprimentos de onda elevados devido às temperaturas relativamente baixas.

Borghi, Corbeta & De Biase (2000) apresentam algumas emissividades típicas para materiais urbanos (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 - Valores de emissividade para diferentes tipos de cobertura de terreno

Fonte: BORGHI, CORBETA & DE BIASE, 2000

Tipo de cobertura de solo	Emissividade
Edifícios residenciais	0,90
Áreas industriais	0,85
Áreas industriais recentes (altamente refletoras)	0,80
Vegetação	1,0094+1,047 ln (NVDI)
Água	0,90
Áreas rurais molhadas	0,95
Áreas rurais (terreno seco)	0,85

Observa-se que os valores de emissividade são bastante altos, próximos a 1. As superfícies vegetais apresentam sua emissividade

como função do *Normalized Differencial Vegetation Index* (NVDI). O NDVI é um índice utilizado para identificar a vegetação em fotos de satélite baseado nas propriedades de refletância das folhas, que tendem a refletir pouco na faixa do visível (devido à absorção da mesófila da folhas) e muito na faixa do infravermelho próximo (MEYONG et al, 2001).

$$NDVI = \frac{NIR - Vis}{NIR + Vis}$$ **Equação 3.30**

Onde **NIR** é a emissão de infravermelho próximo e **Vis** a emissão de luz visível identificadas na foto de satélite. O valor de NDVI está sempre entre -1 e +1, sendo que áreas não vegetadas apresentam valores próximos a zero e áreas cobertas com vegetação valores próximos à unidade.

3.2.1.5. Temperatura de fundo de céu

Em um ambiente urbano, além da emissão de radiação de onda curta, pela qual o Sol é o responsável, a abóbada celeste também está continuamente emitindo e absorvendo radiação de onda longa. Caso não houvesse atmosfera, a abóbada seria um corpo negro ideal a uma temperatura de 0 K (-273°C), continuamente absorvendo a energia irradiada da Terra, cujo balanço térmico se estabilizaria em temperaturas bem mais baixas. Devido à existência de atmosfera, contudo, a radiação é absorvida e reemitida pelos diversos gases componentes, tornando-se necessária a utilização do conceito de temperatura de fundo de céu. Esta temperatura é maior que o zero absoluto, mas ainda pode ficar vários graus abaixo da temperatura do ar, ou da temperatura superficial das edificações e das pavimentações. Desse modo, o céu torna-se uma importante fonte de resfriamento das superfícies. Duffie & Beckman (1980) apresentam duas equações para o cálculo da temperatura de fundo de céu.

$$T_{céu} = 0{,}0552 \cdot (T_{ar} + 273{,}15)^{1{,}5}$$ **Equação 3.31**

$$T_{céu} = (T_{ar} + 273{,}15) \cdot \left(0{,}8 + \frac{T_{ar} + 273{,}15}{250}\right)^{0{,}25}$$ **Equação 3.32**

Onde

$T_{céu}$ é a temperatura de fundo de céu dada em K;

T_{ar} é a temperatura instantânea do ar em °C e

T_{po} é a temperatura de ponto de orvalho em °C, calculada a partir da umidade relativa pela fórmula mostrada por Santamouris & Asimakopoulos (1996):

$$T_{po} = 234{,}175 \cdot \frac{\ln UR + \frac{17{,}08085 \cdot T_{ar}}{(234{,}175 + T_{ar})}}{17{,}08085 - \ln UR - \frac{17{,}08085 \cdot T_{ar}}{(234{,}175 + T_{ar})}}$$ **Equação 3.33**

Onde **UR** é a umidade relativa,sendo 1 igual a 100% e 0 igual a 0%.

Duffie & Beckman (1980) observam que os resultados da primeira e da segunda equação coincidem quando a umidade relativa está em torno de 25%. A segunda fórmula apresenta um grau de precisão maior do que a primeira, pois o vapor d'agua é um dos principais responsáveis pela absorção da radiação de onda longa. No entanto, a concentração desse vapor na forma de nuvens pode causar um aumento ainda maior nessa absorção, levando à formulação desenvolvida por Behrdal e Matin apresentada por Givoni (1994) e Santamouris & Asimakopoulos (1996), que leva em conta a cobertura de nuvens.

Nesse caso, Givoni (1994) propõe a utilização da temperatura de céu como sendo a temperatura do ar e atribui à abobada celeste uma emissividade menor que 1 ($\varepsilon_{céu}$), o que significa que ela não mais é considerada como um corpo negro. O valor dessa emissividade depende da temperatura de ponto de orvalho ($\mathbf{T_{po}}$) e do Índice de Nebulosidade (**NI** – valores entre 0 e 1). Em primeiro lugar, calcula-se a emissividade de um céu claro (ε_{cc})

Equação 3.34

$$\varepsilon_{cc} = 0{,}711 + 0{,}56 \cdot \frac{T_{po}}{100} + 0{,}73 \cdot \left(\frac{T_{po}}{100}\right)^2$$

Essa emissividade sofre uma variação diária em função da hora do dia (**t**).

Equação 3.35

$$\Delta\varepsilon = 0{,}013 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot t}{12}\right)$$

A emissividade do céu, considerando a nebulosidade, é dada pela equação abaixo.

Equação 3.36

$$\varepsilon_{céu} = (\varepsilon_{cc} + \Delta\varepsilon) \cdot (1 + 0{,}224\, NI - 0{,}0035\, NI^2 + 0{,}00028\ NI^3\ )$$

3.2.1.6. Fatores de forma

A radiação emitida por um corpo ou superfície é interceptada por outras. A fração da energia que deixa a superfície i e chega até a superfície j é conhecida definida como Fator de Forma (INCROPERA & DEWITT, 2003). As variáveis envolvidas são mostradas na Figura 3.12.

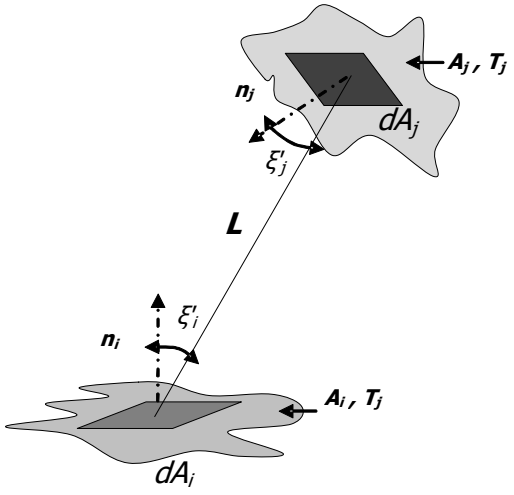


Figura 3.12: Esquema para cálculo de fator de forma

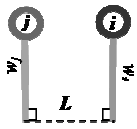
Fonte: baseado em Incropera & DeWitt (2003)

Deste modo, o fator de forma entre duas superfícies é dado por:

$$F_{i,j} = \frac{1}{A_i} \cdot \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \xi'_i \cdot \cos \xi'_j}{\pi \cdot L^2} \, dA_i \, dA_j$$

Equação 3.37

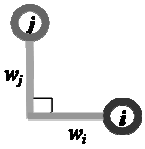
No caso de *canyons* urbanos de continuidade infinita no sentido longitudinal, podem-se utilizar as seguintes equações propostas por Incropera & DeWitt (2003):



$$w_i = w_j \,, \quad W_i = w_i / L$$

$$F_{ij} = \frac{(W_i + 1)^{1/2} - 1}{W_i}$$

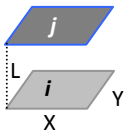
Equação 3.38



$$F_{ij} = \frac{1 + (w_j / w_j) - \left[1 + (w_j / w_j)^2\right]^{1/2}}{2}$$

Equação 3.39

No caso de superfícies finitas, os cálculos tornam-se mais complexos. Situações equivalentes às apresentadas acima, onde a placa tem um comprimento longitudinal limitado de Y, têm-se:

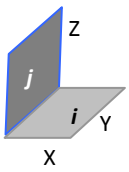


$$\overline{X} = X / L \,, \quad \overline{Y} = Y / L$$

$$F_{ij} = \frac{2}{\pi \cdot \overline{X} \cdot \overline{Y}} \cdot \left\{ \ln \left[\frac{(1 + \overline{X}^2) \cdot (1 + \overline{Y}^2)}{1 + \overline{X}^2 + \overline{Y}^2} \right]^{1/2} + \overline{X} \cdot (1 + \overline{Y}^2)^{1/2} \cdot \tan^{-1} \frac{\overline{X}}{(1 + \overline{Y}^2)^{1/2}} \right.$$

$$\left. + \overline{Y} \cdot (1 + \overline{X}^2)^{1/2} \cdot \tan^{-1} \frac{\overline{Y}}{(1 + \overline{X}^2)^{1/2}} - \overline{X} \cdot \tan^{-1} \overline{X} - \overline{Y} \cdot \tan^{-1} \overline{Y} \right\}$$

Equação 3.40



$$H = Z / X \,, \quad W = Y / X$$

$$F_{ij} = \frac{2}{\pi \cdot W} \cdot \left(W \cdot \tan^{-1} \frac{1}{W} + H \cdot \tan^{-1} \frac{1}{H} - (H^2 + W^2)^{1/2} \cdot \tan^{-1} \frac{1}{(H^2 + W^2)^{1/2}} \right.$$

$$+ \frac{1}{4} \cdot \ln \left\{ \frac{(1 + W^2) \cdot (1 + H^2)}{1 + W^2 + H^2} \cdot \left[\frac{W^2 \cdot (1 + W^2 + H^2)}{(1 + W^2) \cdot (W^2 + H^2)} \right]^{W^2} \right.$$

$$\left. \left. \times \left[\frac{H^2 \cdot (1 + H^2 + W^2)}{(1 + H^2) \cdot (H^2 + W^2)} \right]^{H^2} \right\} \right)$$

Equação 3.41

Estas equações, todavia, resolvem apenas casos específicos. Para outras situações mais complexas, são importantes duas propriedades do fator de forma: a reciprocidade e a aditividade.

A reciprocidade do fator de forma determina que o produto do fator de forma da área de uma superfície **i** e seu fator de forma em relação à superfície **j** é igual ao produto da área da superfície **j** pelo fator de forma de **j** em relação a **i**. Assim:

Equação 3.42

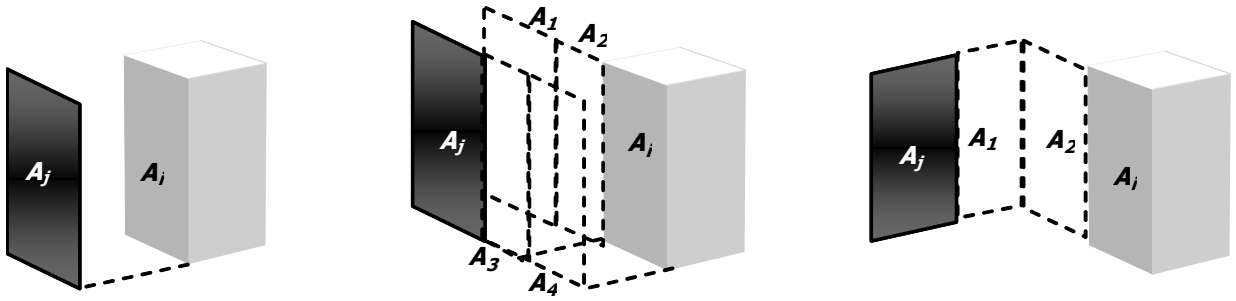
$$A_i \cdot F_{i,j} = A_j \cdot F_{j,i} \rightarrow F_{j,i} = \frac{A_i}{A_j} \cdot F_{i,j}$$

A aditividade, por sua vez, determina que o produto da área de uma superfície pelo seu fator de forma com uma superfície composta é igual à soma do produto do fator de forma desta superfície com cada parte individual pela sua área.

Equação 3.43

$$A_{mn} \cdot F_{(i,mn)} = A_m \cdot F_{i,m} + A_n \cdot F_{i,n}$$

A título de exemplo de aplicação, podem se considerar os três casos apresentados na figura, em que as superfícies $\mathbf{A_i}$ e $\mathbf{A_j}$ são iguais:



(a) *(b)* *(c)*

Figura 3.13: Situações de fator de visão

O caso (a) é resolvido diretamente pela Equação 3.40. No caso (b), é necessário calcular o novo fator de visão a partir de três premissas: a reciprocidade dos fatores, sua propriedade aditiva e a simetria dos edifícios e superfícies no modelo. A partir da propriedade aditiva, pode-se afirmar para o caso (b) que:

Equação 3.44

$$(A_i + A_1 + A_2) \cdot F_{(i12,j34)} = A_i \cdot F_{i,j} + A_i \cdot F_{i,3} + A_i \cdot F_{i,4} + A_1 \cdot F_{1,j} + A_1 \cdot F_{1,3} + A_1 \cdot F_{1,4} + A_2 \cdot F_{2,j} + A_2 \cdot F_{2,3} + A_2 \cdot F_{2,4}$$

Considerando-se os volumes simétricos e regulares, pode-se afirmar, pelo princípio de reciprocidade dos fatores, que:

$A_i = A_j = A_1 = A_4$ e $A_2 = A_3$

$F_{i,j} = F_{I,4}$; $F_{i,3} = F_{1,3} = F_{2,4} = F_{2,j}$ e $F_{i,4} = F_{1,j}$

Desse modo, reduzindo-se as variáveis a apenas $\mathbf{A_i}$, $\mathbf{A_2}$, $\mathbf{F_{i,j}}$, $\mathbf{F_{i,3}}$, $\mathbf{F_{i,4}}$ e $\mathbf{F_{2,3}}$ temos:

Equação 3.45

$$(2\,A_i + A_2) \cdot F_{(i12,j34)} = 2\,A_i \cdot F_{i,j} + 2 \cdot (A_i + A_2) \cdot F_{i,3} + 2\,A_i \cdot F_{i,4} + A_2 \cdot F_{2,3}$$

Os fatores $\mathbf{F_{(i,1,2)(j,3,4)}}$, $\mathbf{F_{i,4}}$ e $\mathbf{F_{2,3}}$ poderiam ser calculados pela Equação 3.40, mas ainda resta determinar o fator $\mathbf{F_{i,3}}$. Para isso, pode-se repetir o procedimento levando-se em conta somente as superfícies i, 2, 3 e 4.

Equação 3.46

$$(A_i + A_2) \cdot F_{(i2,34)} = A_i \cdot F_{i,3} + A_i \cdot F_{i,4} + A_2 \cdot F_{2,3} + A_2 \cdot F_{2,4}$$

Substituindo os termos equivalentes e isolando-se $\mathbf{F_{i,3}}$ obtém-se:

$$F_{i,3} = \frac{(A_i + A_2) \cdot F_{(i2,34)} - A_i \cdot F_{i,4} - A_2 \cdot F_{2,3}}{(A_i + A_2)}$$

Equação 3.47

Substituindo na Equação 3.45, resolvendo e isolando-se $\mathbf{F_{i,j}}$ obtém-se a Equação 3.48, onde todas as variáveis podem ser obtidas a partir da Equação 3.40:

$$F_{i,j} = \frac{(2\,A_i + A_2) \cdot F_{(i12,j34)} - (A_i + A_2) \cdot F_{i2,34}}{2\,A_i}$$

Equação 3.48

É possível ainda aplicar um procedimento análogo para o caso (c):

$$F_{i,j} = \frac{(A_i + A_2) \cdot F_{(i2,1j)} + A_2 \cdot F_{(1,2)}(A_i + A_2) \cdot F_{i2,1} - A_2 F_{2,j1}}{A_i}$$

Equação 3.49

A soma dos fatores de forma entre uma superfície deve ser sempre igual a 1, resultando no total da radiação emitida por aquela superfície. No caso urbano, uma vez encontrado o fator de forma de uma superfície com todas as outras (piso e/ou fachadas de edifícios) o fator de visão de céu pode ser calculado pela Equação 3.50.

$$F_{i,céu} = 1 - \sum_{j=1}^{n} FF_{ij}$$

Equação 3.50

3.2.2. *Parâmetros de convecção*

O termo **trocas convectivas** descreve tanto as trocas ocorridas entre uma superfície sólida e um fluido, quanto aquelas que ocorrem pelo transporte de calor e massa dentro de um fluido em movimento. Para análise, a convecção é normalmente separada em dois grupos: livre, quando é função de diferenças de temperatura entre a superfície e o fluido, e forçada, quando o movimento do fluido acontece devido a forças mecânicas externas (INCROPERA & DE WITT, 2003). No meio urbano, o principal elemento para a promoção de convecção forçada é o vento.

3.2.2.1. Fenômenos que originam o vento

Cóstola (2006, p.30) define vento como sendo "o nome genérico dado às grandes massas de ar que se movem da região de alta pressão para a região de baixa pressão". Estas diferenças podem ocorrer em escalas maiores (massas de ar, por exemplo) ou menores (efeitos de brisa marítima ou termais, por exemplo)

A principal origem dos ventos são o aquecimento desigual da superfície terrestre e o movimento de rotação da Terra (FROTA & SCHIFFER, 1995). Como a pressão é função direta da temperatura, as áreas mais aquecidas tornam-se regiões de baixa pressão ou depressões, chamadas ciclones, enquanto as áreas mais frias e tornam áreas de alta pressão ou pressão, chamadas anticiclones (CÓSTOLA, 2006)

Cóstola (2006) afirma ainda que outro importante fenômeno na percepção que se tem do movimento das massas de ar deve-se ao

fato das observações serem realizadas a partir da superfície terrestre, que está em movimento, causando uma aparente deflexão dos ventos no sentido contrário ao da rotação da Terra, o chamado Efeito Coriolis.

Devido a este efeito, a velocidade angular do vento nas camadas mais baixas está diretamente relacionada com a latitude (STRANGROOM, 2004). Nas camadas inferiores da atmosfera (abaixo de 300m), o vento é o resultado desta combinação de forças de pressão, das forças de Coriolis, das forças de atrito na superfície da Terra, das forças de impulsão térmica associadas a gradientes verticais de temperatura e das forças viscosas internas (SARAIVA, 1992)

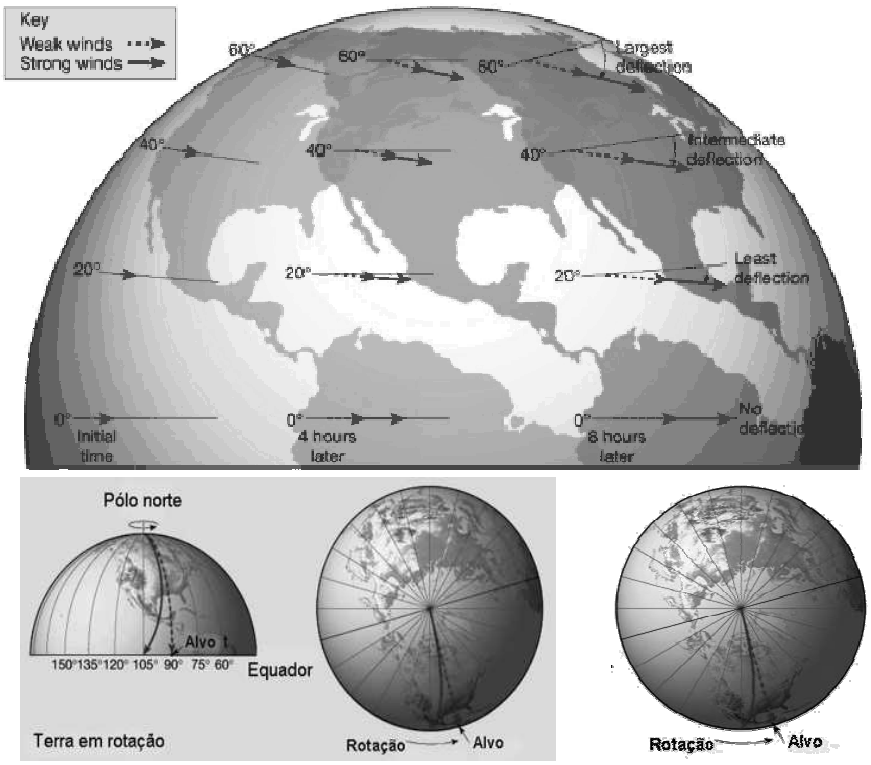


Figura 3.14: Esquema da Força de Coriolis

Fonte:SILVA, 2001

3.2.2.2. Rugosidade

O comportamento da atmosfera próximo à superfície é fortemente influenciado pela rugosidade desta. A rugosidade é uma medida do atrito que aquela superfície oferece ao fluido que se desloca sobre ele. A velocidade do fluido no ponto de contato com uma superfície rugosa é sempre zero, desenvolvendo um perfil logarítmico até se tornar constante na atmosfera livre. Quanto mais rugosa a superfície, maior será a distância na qual sua influência sobre o fluido será sentida, aumentando a camada limite.

A rugosidade está diretamente ligada com a área de blocagem proporcionada pelos obstáculos. Oke (2004) apresenta uma classificação das estruturas urbanas por classes de rugosidade e por grau de impacto no clima local.

Urban Climate Zone, UCZ [1]	Image	Rough-ness class[2]	Aspect ratio[3]	% Built (imper-meable)[4]
1. Intensely developed urban with detached close-set high-rise buildings with cladding, e.g. downtown towers		8	> 2	> 90
2. Intensely developed high density urban with 2 – 5 storey, attached or very close-set buildings often of brick or stone, e.g. old city core		7	1.2 – 2.5	> 85
3. Highly developed, medium density urban with row or detached but close-set houses, stores & apartments e.g. urban housing		7	0.5 – 1.5	70
4. Highly developed, low density urban with large low buildings & paved parking, e.g. shopping mall, warehouses		5	0.05 – 0.2	75 - 95
5. Medium development, low density suburban with 1 or 2 storey houses, e.g. suburban housing		6	0.2 – 0.5, up to >1 with tall trees	35 - 65
6. Mixed use with large buildings in open landscape, e.g. institutions such as hospital, university, airport		5	0.1 – 0.5, depends on trees	< 40
7. Semi-rural development with scattered houses in natural or agri-cultural area, e.g. farms, estates		4	> 0.05, depends on trees	< 10

Key to image symbols: buildings; vegetation; impervious ground; pervious ground

[1] A simplified set of classes that includes aspects of the scheme of Ellefsen (1990/91) plus physical measures relating to wind, thermal and moisture controls (columns at right).
[2] Effective terrain roughness according to the Davenport classification (Davenport *et al.*, 2000).
[3] Aspect ratio = z_H/W - related to flow regime types and thermal controls (solar shading and longwave screening).. Tall trees increase this measure significantly.
[4] Av. fraction of ground covered by built features (buildings, roads, paved and other impervious areas) the rest of the area is occupied by pervious cover. Permeability affects the ability to store moisture and hence the moisture status of the ground.

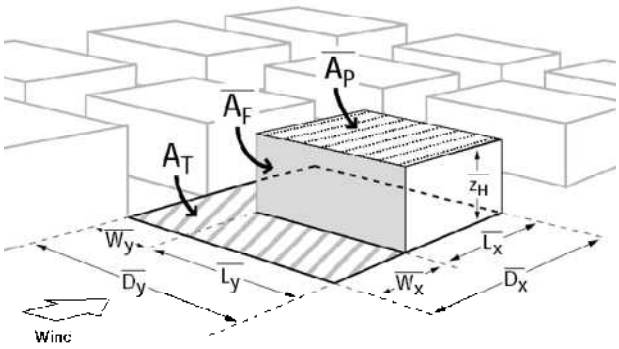
Figura 3.15: Impactos da estrutura urbana no vento (classes de rugosidade)

Fonte:OKE, 2004

Uma das maneiras mais comuns de medir a rugosidade é através da rugosidade aerodinâmica ($\mathbf{z_0}$), que é definida pela distância da superfície a partir da qual a velocidade média é igual a zero (STULL, 1998). Oke & Grimmond (1999) afirmam que, quando os elementos de rugosidade da superfície estão dispostos muito próximos uns dos outros, eles acabam elevando todo o perfil de velocidades em um valor conhecido como deslocamento do plano de rugosidade ($\mathbf{z_d}$).

Os autores colocam que os valores de $\mathbf{z_d}$ e $\mathbf{z_0}$ podem ser determinados a partir da extrapolação de um perfil de vento sobre a superfície (método micro meteorológico ou anemométrico) ou a partir da morfologia da superfície (métodos morfométricos ou geométricos). Neste último caso, normalmente os valores são determinados em função da altura média dos elementos de rugosidade ($\mathbf{z_H}$), da densidade de elementos em planta ($\boldsymbol{\lambda_P}$) e da densidade de elementos

no plano perpendicular ao vento ($\boldsymbol{\lambda_F}$). Há modelos que utilizam desde apenas uma das variáveis até uma combinação das três. A descrição dos elementos envolvidos é mostrada na Figura 3.16.



$$\lambda_P = \frac{\overline{A_P}}{\overline{A_T}} = \frac{\overline{L_x} \cdot \overline{L_y}}{\overline{D_x} \cdot \overline{D_y}}$$

$$\lambda_F = \frac{\overline{A_F}}{\overline{A_T}} = \frac{\overline{L_y} \cdot \overline{z_H}}{\overline{D_x} \cdot \overline{D_y}}$$

Figura 3.16: Elementos para cálculo da rugosidade

Fonte: GRIMMOND & OKE, 1999

A Figura 3.17 mostra a relação esperada entre os dois grupos de variáveis (morfológicas e aerodinâmicas).

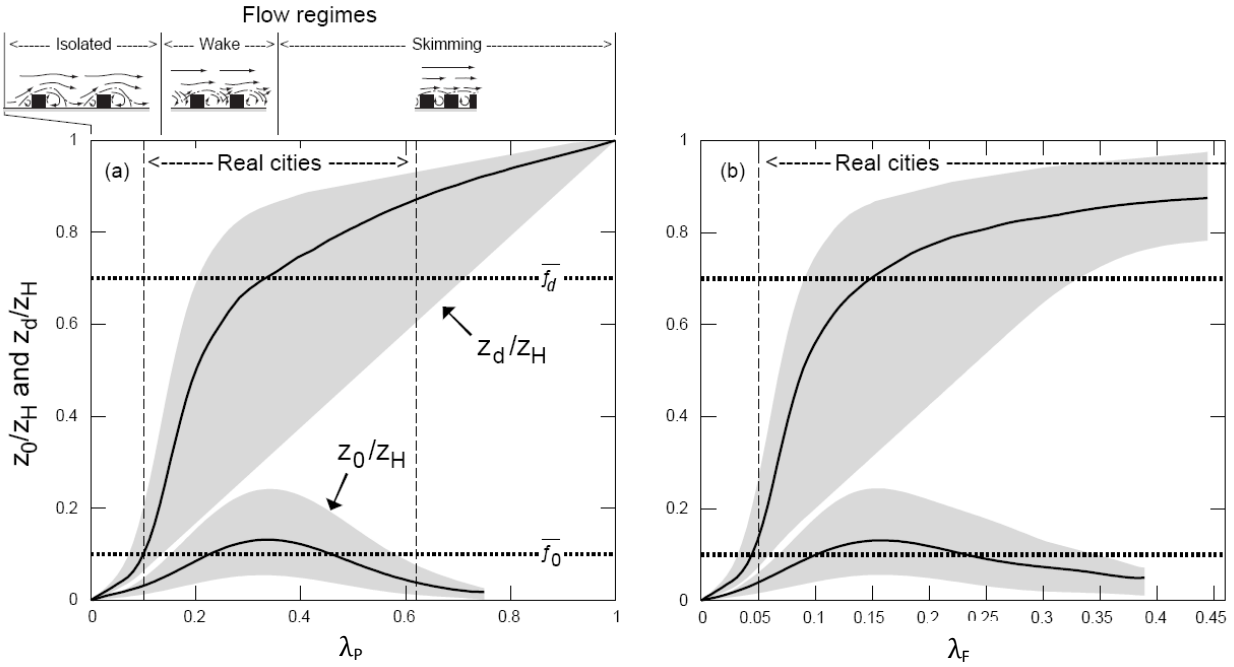


Figura 3.17: Gráfico indicando relação entre as variáveis morfológicas e as de rugosidade

Fonte: GRIMMOND & OKE, 1999

Observa-se que, a partir de uma determinada densidade de elementos (tanto em planta quanto no plano perpendicular ao vento), o valor da rugosidade aerodinâmica se reduz. Ela atinge seu ponto máximo quando o valor de $\boldsymbol{\lambda_P}$ está em torno de 0,35 e quando $\boldsymbol{\lambda_F}$ é de cerca de 0,15. Já o deslocamento do plano de rugosidade, o valor continua aumentando com a densidade, mas a intensidade deste crescimento também cai por volta destes mesmos valores.

Estes valores teóricos foram comparados por Oke & Grimmond (1999) com resultados de diversos métodos para determinação morfométrica da rugosidade. Como uma primeira aproximação, os autores apresentam coeficientes que múltiplicama a altura média, obtendo-se assim os valores de $\boldsymbol{z_d}$ (coeficiente de 0,70) e de $\boldsymbol{z_0}$ (coeficiente de 0,1).

Métodos mais complexos consideram também os fatores de densidade. Um método bastante popular, tendo sido inclusive pioneiro, é o proposto por Lettau (1969) que utiliza como parâmetro a densidade frontal.

$$z_0 = 0{,}5\ \lambda_F \cdot \overline{z_H}$$ **Equação 3.51**

O trabalho de Lettau não faz qualquer referência ao deslocamento do plano de rugosidade e discute-se a sua aplicação para densidades superiores a 0,30 (OKE & GRIMMOND, 1999).

MacDonald, Griffiths & Hall (1998) buscam cobrir as lacunas na aplicação do modelo de Lettau, a partir da avaliação da aplicação de alguns modelos e calibragem dos resultados contra experimentos de túnel de vento com fileiras de cubos alinhados e alternados.

Os autores propuseram um método que aproxima a curva de variação de $\mathbf{z_0}$ da curva teórica proposta na Figura 3.17 e uma parametrização para $\mathbf{z_d}$.

$$\frac{z_d}{\overline{z_H}} = 1 + cf_1{}^{-\lambda_P} \cdot (1 - \ \lambda_P \cdot \overline{z_H})$$ **Equação 3.52**

$$\frac{z_o}{\overline{z_H}} = \left(1 - \frac{z_d}{\overline{z_H}}\right) \cdot \exp\left\{-\left[0{,}5 \cdot cf_2 \cdot \frac{C_D}{k^2} \cdot \left(1 - \frac{z_d}{\overline{z_H}}\right) \cdot \lambda_F\right]^{0{,}5}\right\}$$ **Equação 3.53**

Onde $\mathbf{cf_1}$ e $\mathbf{cf_2}$ são coeficientes padronizados, $\mathbf{C_D}$ é o coeficiente de arrasto e k a constante de Von Karman, com valor de 0,41. MacDonald, Griffiths & Hall (1998) discutem as determinações dos três primeiros parâmetros e a sensibilidade do resultado ao valor de cada um deles.

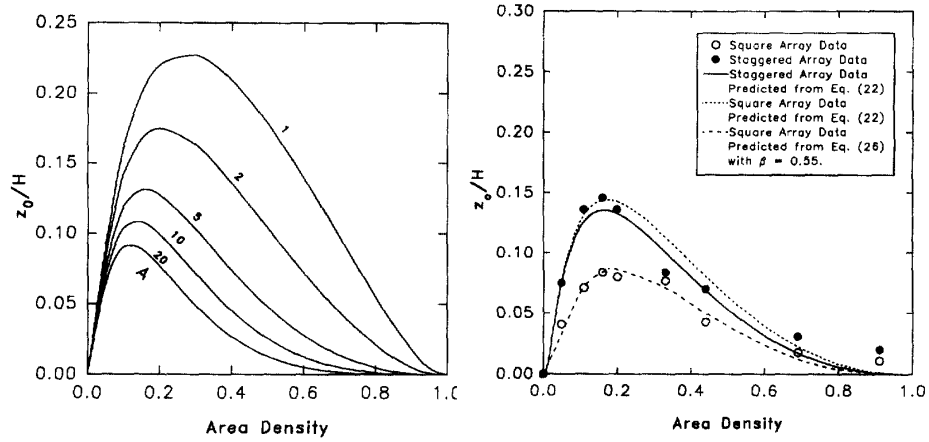


Figura 3.18: Sensibilidade da rugosidade ao coeficientes cf_1 e ajuste a partir do coeficiente cf_2

Fonte: MACDONALD, GRIFFITHS & HALL, 1998

No caso do coeficiente $\mathbf{cf_1}$, o melhor ajuste para os cubos alinhados foi com $\mathbf{cf_1}$ =4,43 e para cubos alternados, com $\mathbf{cf_1}$ = 3,39. Embora Oke & Grimmond (1999) adotem o primeiro valor na sua avaliação comparativa, o último parece mais adequado para o tipo de ocupação urbana brasileira. O valor de $\mathbf{cf_2}$, considerado como sendo 1,0 inicialmente, apresentou bom ajuste com a curva do experimento com cubos alternados, mas teve que ser ajustada para 0,55 para corresponder aos resultados do experimento com cubos alinhados. O

coeficiente $\mathbf{C_D}$ tem valor de 1,20, baseado na velocidade média incidente na face de um cubo. MacDonald, Griffiths & Hall (1998) afirmam que este coeficiente é pouco dependente das características geométricas de arranjos de cubos, mas pode sofrer alterações no caso de outras formas.

Um terceiro método foi desenvolvido por Raupach (1994) citado por Bottema & Mestayer (1998)[23]. O trabalho original não foi encontrado, mas é citado tanto por Oke & Grimmond (1999) quanto por Bottema & Mestayer (1998). Em ambos, porém, a equação para zd apresenta problemas. No trabalho em Oke & Grimmond (1999) a equação resulta sempre um número maior do que 1, o que é impossível. Em Bottema & Mestayer (1998) a equação resulta valores de $\mathbf{z_d}$ muito baixos, mas que se tornam razoáveis se multiplicados pela altura média. A versão apresentada aqui é a de Bottema &Mestayer (1998) corrigida.

23 RAUPACH, M.R. Simplified expressions for vegetation roughness lenght and zero-plane displacement as a function of canopy heitgh and area index. *Boundary Layer Meteorology*, 71, p. 211-216.

Equação 3.54

$$z_d = 1 - \frac{1 - \exp(-\sqrt{15\,\lambda_F})}{\sqrt{15\,\lambda_F}}$$

Equação 3.55

$$z_o = (\overline{z_H} - z_d) \cdot \exp\left(-k \cdot \frac{U}{u*} + \Psi_{\mathrm{RSL}}\right)$$

Onde $\mathbf{\Psi_{RSL}}$ é a um termo de correção que é função de influência da subcamada de rugosidade, cujo valor é de cerca de 0,193. **U** é a velocidade média do vento no topo e **u*** é a velocidade de fricção, que será discutida em detalhe no item 3.2.2.3.

Bottema & Mestayer (1998) afirmam que a equação só é válida para baixas densidades onde o valor de **U/u*** pode ser aproximado por:

Equação 3.56

$$\frac{U}{u*} = \sqrt{c_S + c_R \cdot \lambda_F}$$

Em que $\mathbf{c_S}$ e $\mathbf{c_R}$são os coeficientes de arrasto para a superfície à altura $\mathbf{z_H}$ sem os elementos de rugosidade e de um elemento de rugosidade isolado na superfície, respectivamente.

O valor recomendado para o primeiro coeficiente é de 0,003 e para o segundo 0,3. Bottema & Mestayer (1998) demonstram que para valores altos de $\mathbf{\lambda_F}$ não há solução para a Equação 3.55, devendo ser estabelecido um limite máximo para U/u*. Este valor deveria variar entre 0,3, para obstáculos próximos, e 1,0 para obstáculos separados.

A aplicação destes métodos será discutida no Capítulo 6.

Utilizando métodos anemométricos, Grimmond et al (1998) fornecem valores obtidos experimentalmente em cidades americanas e européias (Tabela 3.3). A questão a respeito da sua extrapolação para as condições urbanas brasileiras ainda permanece passível de discussão.

Forma da superfície urbana	$\overline{z_H}$ (m)	$\overline{z_d}$ (m)	$\overline{z_0}$ (m)
Baixa altura e densidade Residencial com casas de 1 ou 2 pavimentos, jardins e pequenas árvores. Mistura de casas e comércio local. Galpões, indústria leve, poucas árvores	5 - 8	2 – 4	0.3 – 0.8
Média altura e densidade Residencial com casas grandes ou pouco espaçadas, semi destacadas ou em fileira, com 2 e 3 pavimentos, árvores altas. Edifícios de apartamentos com menos de 5 pavimentos e entorno livre. Mistura de casas com comércio local, indústria leve, igrejas ou escolas	7 – 14	3.5 – 8	0.7 – 1.5
Altos e de alta densidade Residencial pouco espaçado. Edifícios enfileirados e em bloco com menos de 6 pavimentos ou grandes equipamentos – indústrias, universidades, etc. Centro de cidade	11 – 20	7 – 15	0.8 – 1.5
Edifícios altos Núcleo urbano ou nó suburbano com edifícios de múltiplos pavimentos com entorno urbano densos. Grandes complexos institucionais.	>20	>12	>2.0

Tabela 3.3: Valores de rugosidade para deferentes superfícies urbanas

Fonte: GRIMMOND et al, 1998

3.2.2.3. Perfil de vento para camada limite neutra

Acima da camada de rugosidade da superfície, o vento desenvolve um perfil logarítimico. A variação de velocidade com altura é menor quanto maior for a rugosidade, até chegar ao ponto em que a influência da superfície deixa de ser sentida. A altura na qual a velocidade é 95% da velocidade do fluxo não perturbado é definida como a camada limite aerodinâmica desta superfície.

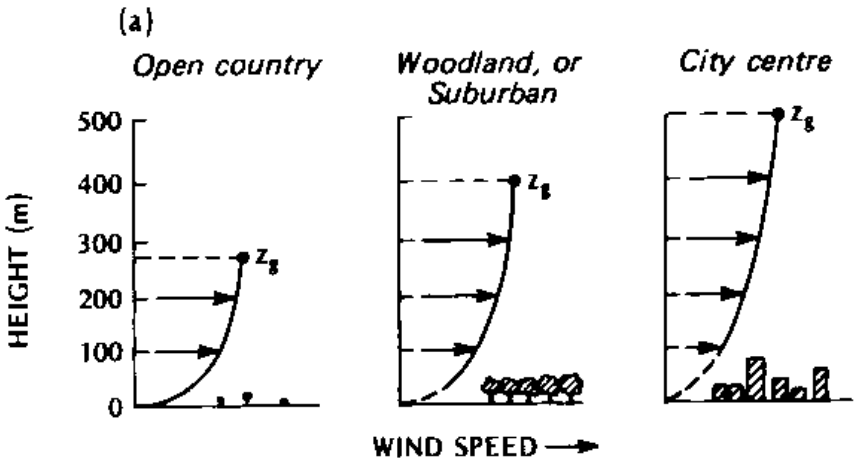


Figura 3.19: Efeito da rugosidade no perfil do vento para atmosfera neutra

Fonte: OKE, 1987

Modelos para encontrar o formato deste perfil podem ser encontradas em Oke (1986), Stull (1988) e Santamouris & Asimakopoulos (1997). Em condições de atmosfera neutra[24], a distribuição de velocidades de acordo com a altura pode ser determinada a partir do conhecimento de algumas variáveis:

24

Outras condições de atmosfera serão discutidas no próximo item.

- **A velocidade do vento de referência (u_{ref})**: normalmente toma-se a velocidade medida na estação meteorológica mais próxima;
- **A altura da medida de referência (z_{ref})**: para estações meteorológicas padrão as medidas são tomadas a 10 metros de altura, mas pode-se utilizar alturas diferentes para outros tipos de dados. Uma sugestão dada no curso foi converter a velocidade a 10 m em uma velocidade a 150 m de altura para depois definir o perfil logarítimico, evitando assim erros devido às camadas internas à rugosidade;
- **Rugosidade (z_0):** a rugosidade das superfícies é descrita na forma de um comprimento de rugosidade, definido como a altura em que a velocidade do vento é igual a zero. A definição da rugosidade a partir de um perfil de velocidades é direta, mas a determinação a partir da observação dos elementos é mais complexa. Conforme colocado, este parâmetro pode ser calculado tanto a partir das características geométricas dos elementos de rugosidade quanto a partir de perfis medidos em situações similares. Este parâmetro é um dos indicativos da possibilidade de se estabelecerem equivalências entre formas complexas e padrões simplificados, mantendo as propriedades que definem seu impacto nos fenômenos físicos estudados;
- **A velocidade de fricção (u_*):** é função da tensão de Reynolds, uma medida da força cortante nas moléculas de ar resultante do movimento dos turbilhões e das rajadas de vento. A magnitude desta tensão junto ao solo indica as características do perfil de velocidades, que pode então ser definido a partir da relação logarítmica indicada na Equação 3.57.

Equação 3.57

$$u_* = k \cdot \frac{u_{ref}}{\ln\left(\frac{z_{u_{ref}} - z_{ref}}{z_0}\right)}$$

Onde **k** é a constante de Von Karman que tem o valor de 0,41 para maior parte dos casos.

O mesmo procedimento é então utilizado no sentido inverso para determinar as velocidades médias para as diferentes alturas.

Equação 3.58

$$\bar{u} = \frac{u_*}{k} \cdot \ln\left(\frac{z - z_{ref}}{z_0}\right)$$

3.2.2.4. Turbulência

A turbulência é uma das variáveis mais complexas no tratamento da fluidodinâmica. Stull (1998) afirma que a turbulência pode ser entendida como parcelas de ar de variados tamanhos, formando vórtices de movimento aleatório que se sobrepõem uns sobre os outros e sobre o vento médio. O tamanho dos vórtices pode ser determinado através da análise estatística dos dados de vento,

verificando-se a variância da velocidade ao longo de um ciclo. A turbulência média é dada pela média da distância entre o vento instantâneo e o vento médio daquele período (Figura 3.20).

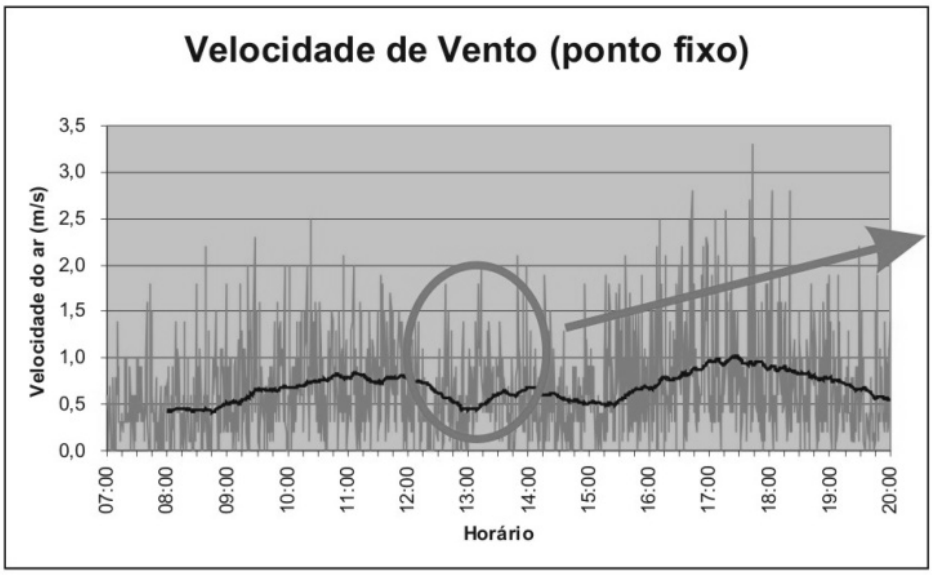


Figura 3.20: Definição da turbulência média

Fonte:Baseado em Stull (1988), dados da medida

Como já discutido no item 3.1.3.2, excetuando-se o método DNS para a solução das equações fundamentais, todos os demais modelos que usam malhas espaçadas utilizam a parametrização da turbulência, sobrepondo seus efeitos aos do vento médio. Cóstola (2006) apresenta um esquema com os modelos de turbulência mais conhecidos (Figura 3.21), recomendando a utilização de modelos de hierarquia superior sempre que possível.

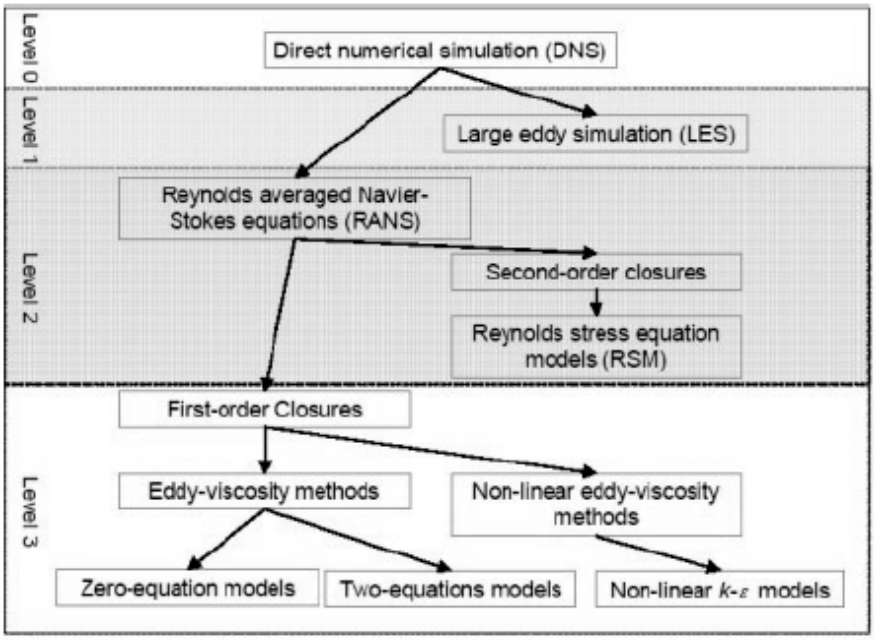


Figura 3.21: Hierarquia de modelos de turbulência

Fonte: CÓSTOLA , 2006

A opção seguinte ao DNS seria então, o Large Eddy Simulation (LES) ainda não é factível dada grande a capacidade de processamento necessária. Contudo, a fidelidade das simulações com a dados

coletados experimentalmente é descrita como sendo superior àquelas dos demais modelos de turbulência. (CFX, 2003, COST, 2004)

Os demais modelos de turbulência utilizam aplicação da média de Reynolds às equações de Navier-Stokes, e são chamados de modelos RANS. O modelo padrão da indústria do CFD é o modelo *K-ε*, que utiliza duas equações para prever a turbulência, considerando-a isotrópica. CFX (2003) considera que o modelo apresenta uma boa relação entre precisão e robustez matemática, mas não se aplica a algumas condições tais como fluxos com descolamento da camada limite, fluxos com mudanças súbitas na tensão e flúidos em rotação. Embora Cóstola (2005) e Cost (2004) recomendem a utilização do modelo RNG *k-ε* , CFX (2003) afirma que ele não apresenta grandes ganhos sobre o modelo *k-ε* padrão.

Um tratamento mais sofisticado envolve seis equações adicionais para descrever a turbulência, denominados modelos de fechamento de segunda ordem. Cost (2004) recomenda a utilização destes modelos para simulações de edificações e seu entorno, pois a turbulência é tratada separadamente em cada direção. O RSM - Reynolds Stress Model – é recomendado para a análise de escoamentos envolvendo anisotropia da turbulência e efeitos de empuxo (térmicos). A parametrização deste modelo ainda demanda estudos mais aprofundados.

3.2.2.5. Estabilidade

Considerando-se uma parcela fluida que se move verticalmente de forma adiabática pela atmosfera, observa-se que ocorre uma redução na pressão atmosférica à medida que esta parcela alcança altitudes maiores, devido à redução da coluna de ar sobre ela. Como não há trocas com o entorno, as variações de volume resultantes da queda de pressão advêm da energia interna da parcela, causando redução na sua temperatura. Para o ar seco (insaturado), esta taxa de mudança da temperatura é constante, assumindo o valor de $9{,}8 \times 10^{-3}$°C/m, valor denominado *taxa de lapso adiabático seco* (**Γ**) (OKE, 1987).

Dado um determinado perfil de temperaturas medido, é possível determinar a taxa de lapso ambiental (*Enviromental Lapse Rate* – **ELR**), ou seja, a taxa real de variação da temperatura com a altitude.

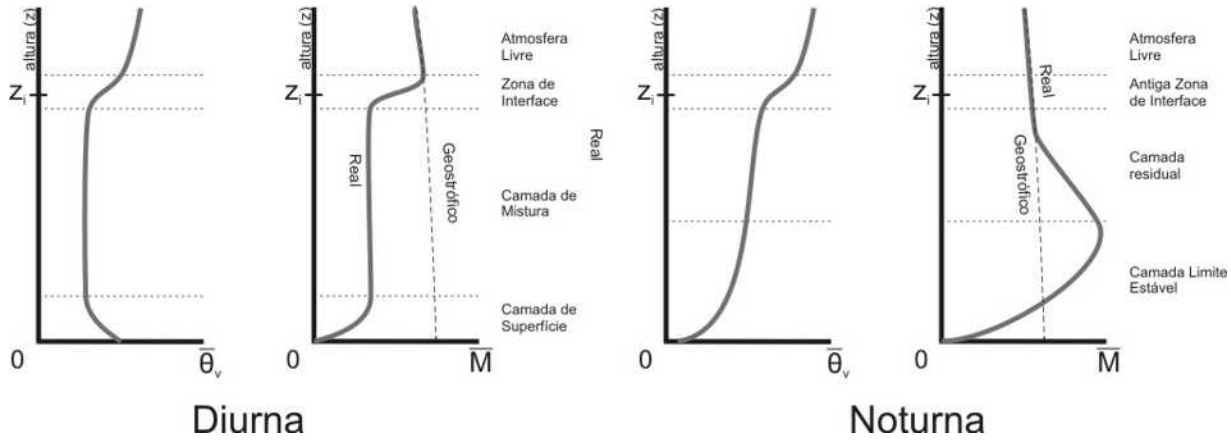
A estabilidade atmosférica é definida pela tendência de movimento vertical das partículas na atmosfera. Se **ELR** for maior do que **Γ**, a parcela estará mais quente que o ar à sua volta e conseqüentemente menos densa. Deste modo, as forças de empuxo sobrepujarão o peso próprio da parcela, que continuará em ascensão. Nesta situação, diz-se que a atmosfera está **INSTÁVEL**, pois há uma tendência de movimento vertical contínuo das parcelas. Caso **ELR** seja menor do que **Γ**, a parcela estará mais fria que o ar a sua volta, logo, mais densa e com tendência de movimento descendente. A parcela tenderá a descer até a posição original, quando se tornará mais quente que o ar ao seu redor. A parcela ficará oscilando ao redor de um ponto de equilíbrio, delineando uma condição atmosférica **ESTÁVEL**. Quando **ELR** é igual à **Γ**, fazendo com que a partícula tenha a mesma

densidade do entorno e apresente um equilíbrio entre forças gravitacionais e de empuxo. Neste caso a atmosfera se encontra em estado **NEUTRO**. (OKE, 1987)

Oke (1987) apresenta ainda o conceito de temperatura potencial (**θ**), que é obtida através da correção da temperatura real para se eliminarem as diferenças devidas à variação da pressão atmosférica. Na prática, trata-se de subtrair o lapso adiabático do lapso ambiental, tornando a leitura da estabilidade mais direta. Em curvas de temperatura potencial, a inclinação positiva indica condição estável, a negativa, instável e linhas verticais atmosfera neutra. Stull (1988) introduz a temperatura potencial virtual ($\boldsymbol{\theta_v}$), que elimina também diferenças na umidade do ar.

As condições de estabilidade tendem a variar ao longo do dia seguindo um padrão definido. Durante dias com grande incidência de radiação solar, o solo é aquecido e transfere seu calor para o ar adjacente que tende a subir, causando instabilidade atmosférica nas camadas inferiores. Já a condição estável é típica do período noturno, com céu claro e poucos ventos. Condições neutras são encontradas em dias nublados e com vento, pois as nuvens causam uma homogeneização do perfil vertical de temperaturas, enquanto os ventos distribuem a energia horizontalmente.

Os perfis de temperatura e vento típicos para as condições diurnas e noturnas podem ser encontrados na .



As condições de estabilidade da atmosfera podem ser determinadas a partir de um perfil vertical de temperaturas, que influirá diretamente nos perfis de ventilação e nas condições limite da atmosfera, bem como no formato dos vórtices de turbulência.

A camada limite pode ser classificada como estável, neutra ou, no caso de condições instáveis, convectiva. Na Figura 3.23 pode-se observar que os vórtices encontram-se alongados verticalmente para condições instáveis e horizontalmente para estáveis, alterando a condição da camada limite.

Figura 3.22: Perfis de temperatura potencial virtual e vento médios para condições diurnas e noturnas típicas

Fonte: STULL ,1998

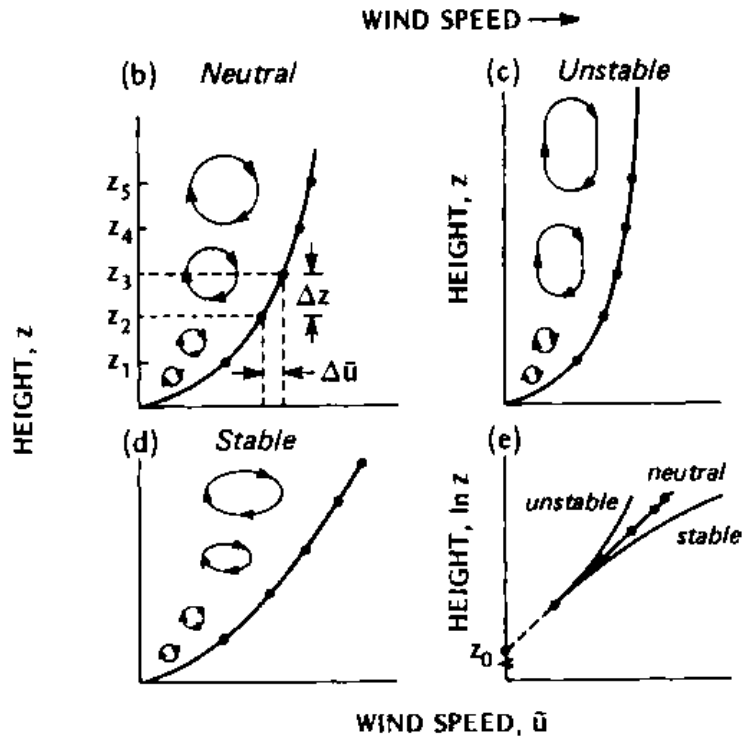


Figura 3.23: Perfis de vento e formato dos vórtices para as diferentes condições de estabilidade

Fonte: OKE,1987

Os perfis de temperatura e vento podem ser obtidos através de radiossondagens, cuja definição e fontes de dados estão apresentadas no ANEXO A2.

A condição de estabilidade pode ser determinada através do número de Richardson (**Ri**), um parâmetro adimensional definido pela razão entre as forças de convecção livre (induzido por forças de empuxo causadas pela diferença de pressão e de temperatura no fluido) e mecânica (causada por fatores externos, tais como o movimento global dos ventos). A equação é apresentada por Oke (1987):

Equação 3.59

$$Ri = \frac{g}{\bar{T}} \cdot \frac{\left(\Delta \bar{T}/_{\Delta z}\right)}{\left(\Delta \bar{u}/_{\Delta z}\right)}$$

Onde $\boldsymbol{g}$ é a aceleração da gravidade, $\overline{\mathbf{T}}$ a temperatura média, $\boldsymbol{\Delta}\overline{\mathbf{T}}$ a diferença de temperatura média, $\boldsymbol{\Delta}\overline{\mathbf{u}}$ é a diferença de velocidade média e $\boldsymbol{\Delta z}$ a diferença de altura. O número de Richardson determina uma função de estabilidade o tipo de convecção. Para Borghi, Corbetta e DeBiase (2000), as funções de estabilidade $\boldsymbol{\Phi_x}$ seguem a seguinte equação:

Equação 3.60

$$\Phi_x = \begin{cases} \dfrac{1}{(1+4{,}7\,Ri)^2} & Ri \geq 0 \\ 1 - 9{,}4 \cdot \dfrac{Ri}{1 + 69{,}56 \cdot C_{Dx} \cdot {}^{z_x}/_{z_{0x}} \cdot |Ri|} & Ri < 0 \end{cases}$$

Onde $\mathbf{C_{Dx}}$ é o coeficiente de arrasto em $\mathbf{x}$ e $\mathbf{z_x}$ e $\mathbf{z_{0x}}$ são respectivamente a altura de $\mathbf{x}$ e sua rugosidade. A relação entre as duas variáveis pode ser encontrada no gráfico da Figura 3.24.

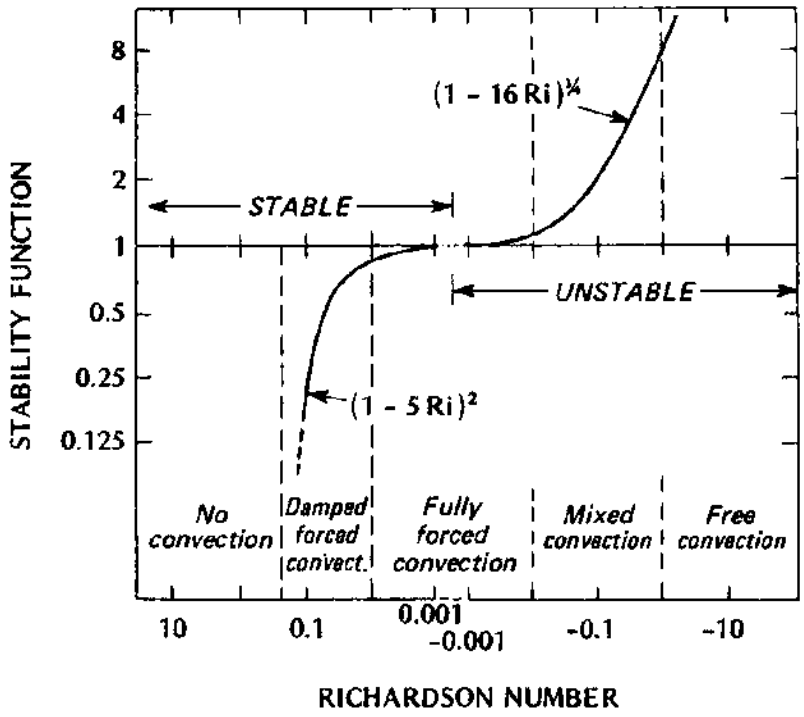


Figura 3.24: Relação entre Ri, Φ e o tipo de convecção

Fonte: OKE,1987

A principal dificuldade em relação à condição de estabilidade é a obtenção dos dados necessários para determiná-la.

Stull (1988) apresenta correções para o perfil de velocidades de camada neutra. As correções são baseadas no comprimento de Monin-Obukhov (**L_{mo}**), definido como:

$$L_{mo} = -\frac{u_*}{k_a \cdot \frac{g}{\theta_0} \cdot \overline{w' \cdot \theta'}}$$

Equação 3.61

Onde a **θ_0** é a temperatura potencial no estado de referência, que se pode considerar igual a média do local; $\overline{w'}$ é a variância da velocidade no eixo w (vertical), sendo uma medida de turbulência, e $\overline{\theta'}$ é a variação da temperatura potencial medida na mesma freqüência que $\overline{w'}$. Os demais termos foram definidos anteriormente. Segundo Cóstola (2006), o último termo torna a mensuração dos fatores para cálculo **L_{mo}** complexa. Caso isto seja, possível, o perfil de velocidades para camada limite estável passa a seguir a equação:

$$\bar{u} = \frac{u_*}{k} \cdot \ln\left(\frac{z - z_{ref}}{z_0}\right) + u_* \cdot \frac{4{,}7}{k_a} \cdot \frac{z - z_0}{L}$$

Equação 3.62

Para camada limite convectiva, a equação passa a ser:

$$\bar{u} = \frac{u_*}{k} \cdot \ln\left[\frac{(-1+\eta)\cdot(1+\eta_0)}{(1+\eta)\cdot(-1+\eta_0)}\right] + 2\ \tan^{-1}(\eta - \eta_0)$$

Equação 3.63

Onde:

Equação 3.64

$$\eta = \left(1 - 15 \cdot \frac{z}{L}\right)^{1/4}$$

Equação 3.65

$$\eta_0 = \left(1 - 15 \cdot \frac{z_o}{L}\right)^{1/4}$$

3.2.2.6. Velocidades dentro do canyon

Mills (1997) apresenta um método para a determinação das velocidades dentro do *canyon*, dividindo-se os fluxos entre descendente e transversal. O primeiro causa um movimento de ar ao longo do *canyon* que se superpõe a um vórtice causado pelo segundo.

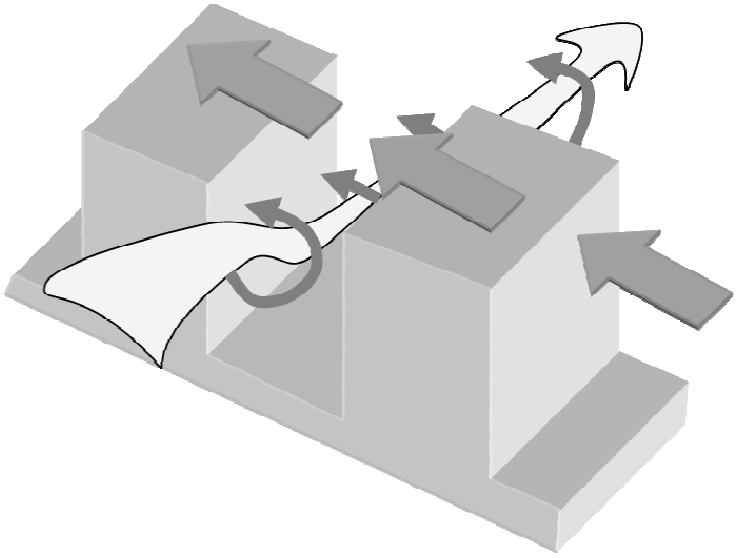


Figura 3.25: Esquema para fluxos no *canyon*

As componentes horizontais (***u***) e verticais(***w***) são dadas por:

Equação 3.66

$$u_{x,z} = u_H \cdot (1 - \beta')^{-1} \cdot \left[\gamma' \cdot (1 + k'y') - \frac{\beta' \cdot (1 - k' \cdot y')}{\gamma'}\right] \cdot \mathrm{sen}(k' \cdot \mathrm{x})$$

Equação 3.67

$$w_{x,z} = -u_H \cdot k' \cdot y' \cdot (1 - \beta')^{-1} \cdot \left[y' - \frac{\beta'}{\gamma'}\right] \cdot \cos(k' \cdot \mathrm{x})$$

Nesta equação, **x** e **z** representam as coordenadas horizontal e verticais na seção do *canyon* e $\boldsymbol{u_H}$ a velocidade do vento no ponto médio do *canyon* ao nível das coberturas (**H**). As demais variáveis são definidas da seguinte forma:

Equação 3.68

$$k' = \frac{\pi}{L}'$$

Equação 3.69

$$\beta' = \exp(-2\,k' \cdot H)$$

Equação 3.70

$$y' = z - H$$

Equação 3.71

$$\gamma' = \exp(k' \cdot y)$$

As velocidades $\mathbf{u_H}$ e $\boldsymbol{v_H}$ são componentes da velocidade ambiente no nível da cobertura ($\mathbf{u_{refH}}$) e podem ser determinadas a partir da sua direção e intensidade, utilizando o perfil logarítmico da Equação 3.62

O autor deixa claro, no entanto, que as relações estabelecidas por este modelo, embora validades em experimentos de campo, limitam-se a alguns tipos de configuração de edifícios. À medida que o espaçamento entre os edifícios aumenta em relação à sua altura, os fluxos se alteram significativamente

Uma velocidade representativa do vento no *canyon* deve ser obtida para cada eixo das vias na malha ortogonal, como o objetivo de determinar as trocas sensíveis com os muros e o piso. No modelo proposto por Mills (1997), as velocidades são calculadas em alturas diferentes, já que o modelo de fluxo ao longo do *canyon* não permite a determinação do fluxo adjacente às superfícies das fachadas. Deste modo, o componente rotacional é determinado em 0,1H e o componente paralelo ao *canyon* a 0,5H.

3.2.2.7. Trocas de calor por convecção

As trocas de calor entre um fluido e as superfícies ($\mathbf{Q_{Hsup}}$)são determinadas pelo coeficiente de convecção ($\mathbf{h_c}$), segundo a equação:

$$Q_{Hsup} = h_c \cdot (T_{sup} - T_f)$$ **Equação 3.72**

Onde $\mathbf{T_{sup}}$ é a temperatura da superfície e $\mathbf{T_f}$ a temperatura do fluido, normalmente o ar ($\mathbf{T_{ar}}$)

A maneira mais simples de determinar o valor de $\mathbf{h_c}$ é estabelecer uma correlação linear com a velocidade do vento ($\mathbf{u}$). Mills (1997) sugere a relação:

$$h_c = 1{,}7\, u + 5{,}1$$ **Equação 3.73**

Outra relação usual (CÓSTOLA, 2006) é dada por:

$$h_c = 4{,}8\, u + 5{,}7$$ **Equação 3.74**

Observa-se que os valores resultantes da segunda equação são maiores do que os obtidos pela primeira, principalmente a velocidades mais altas. Para cálculos de coeficientes considerando convecção livre ou efeitos combinados, ver Incropera & DeWitt (2003).

Para trocas entre Mills (1997) propõe que as trocas sensíveis entre as duas camadas ($\mathbf{Q_{Hc}}$) sejam tratadas de maneira análoga ao fluxo de momento:

$$Q_{Hc} = u_{ref} \cdot C_H \cdot [\rho \cdot c_p \cdot (T_c - T_r)]$$ **Equação 3.75**

Onde $\mathbf{c_p}$ é o calor específico do ar e ($\mathbf{T_c - T_r}$) é a diferença entre a temperatura da superfície hipotética de troca (*canyon*) e a temperatura de referência do ar na altura $\boldsymbol{z_r}$ (temperatura da camada limite urbana – $\mathbf{T_r}$). O coeficiente genérico de transferência de calor é e definido pela equação:

Equação 3.76

$$C_H = k^2 \cdot \left[\ln\left(\frac{(z_r - z_d)}{z_0}\right) \cdot \ln\left(\frac{z_r}{H}\right)\right]^{-1} \cdot$$

Onde **H** é a altura dos edifícios e os demais parâmetros funcionam como definido anteriormente.

Stull (1988) fornece uma relação semelhante, mas simplifica a equação para $\mathbf{C_H}$ com camada limite neutra e adicionado dois coeficientes pra outras condições de estabilidade.

Equação 3.77

$$C_H = k^2 \cdot \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \Psi_M\left(\frac{z}{L_{om}}\right)\right]^{-1} \cdot \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \Psi_H\left(\frac{z}{L_{om}}\right)\right]^{-1}$$

No caso de atmosfera neutra, o valor é determinado apenas pela razão entre a altura e a rugosidade aerodinâmica.

Stull (1998) define o $\mathbf{C_H}$ como sendo outra denominação para o número de Stanton. Incropera & DeWitt (2003) definem o número de stanton (St) como uma variante do número de Nusselt (Nu). Este último é o gradiente de temperatura adimensional sobre a superfície, definido por:

Equação 3.78

$$Nu = \frac{h_c L}{k_f}$$

Onde **L** é o comprimento característico, $\mathbf{k_f}$ é a condutibilidade do fluido e $\mathbf{h_c}$ o coeficiente de convecção.

O número de Stanton é dado por:

Equação 3.79

$$St = \frac{Nu}{Re_L \cdot Pr}$$

Onde **Re** é o número de Reynolds, razão entre as forças de inércia e viscosas do fluido, função também do comprimento característico e **Pr** é o número de Prandtl, que é a razão entre a difusividade de momento e térmicas.

Equação 3.80

$$Re_L = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} = \frac{VL}{\nu}$$

Equação 3.81

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k_f} = \frac{\nu}{\alpha}$$

Onde todas as propriedades se referem ao fluido: **V** é a velocidade, **ρ** é a densidade, **μ** é a viscosidade dinâmica, $\mathbf{c_p}$ é o calor específico e $\mathbf{k_f}$ é a condutividade térmica do fluido. As variáveis **ν** e **κ** são respectivamente as difusividades de momento e térmica.

Equação 3.82

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Equação 3.83

$$\kappa = \frac{k_f}{c_p \cdot \rho}$$

Onde todas as variáveis foram definidas anteriormente.

Para placas planas de grandes dimensões e com alta rugosidade, como pode ser considerada a superfície urbana, o valor médio do número de Nusselt para um determinado comprimento pode ser dado por:

$$\overline{Nu_L} = 0{,}037 \cdot {Re_L}^{4/5} \cdot Pr^{1/3}$$ **Equação 3.84**

Deste modo, o número de Stanton médio seria de:

$$\overline{St_L} = 0{,}037 \cdot {Re_L}^{-1/5} \cdot Pr^{-2/3}$$ **Equação 3.85**

Os valores de $\mathbf{C_H}$ calculados pelas duas equações e os valores de $\overline{\boldsymbol{St_L}}$ são muito diferentes, principalmente para altas rugosidades. Uma discussão sobre o assunto é apresentada no item 5.1.3.

3.2.3. *Parâmetros de armazenamento de calor*

3.2.3.1. Soluções analíticas

O armazenamento de calor pelas estruturas urbanas tem constituído tema de diversas pesquisas, sendo considerado um dos parâmetros chaves para a definição do comportamento do clima urbano (BARBIRATO, 1998; OKE, 1982; ARNFIELD & GRIMMOND, 1998). O modelo CTTC de Sashua-Bar & Hoffman (2000) é baseado principalmente na capacidade do *canyon* urbano de absorver a radiação e armazená-la nos seus materiais.

Nos estudos de climatologia tratando da camada limite urbana (UBL) , a abordagem mais freqüente tem sido a parametrização do calor acumulado, baseando-se em observações empíricas (STEEMERS, 2002; ARNFIELD & GRIMMOND, 1998). Isto advém da grande dificuldade em se obter e processar informações individuais das edificações, no que se refere à quantidade e às características dos materiais constituintes.

Oke (1986) apresenta uma equação que relaciona a variação na temperatura do solo com as propriedades térmicas do mesmo.

$$\Delta T_z = \Delta T_0 \cdot \exp\left[\frac{-z}{(\pi \cdot \kappa \cdot P)^{0,5}}\right]$$ **Equação 3.86**

Onde

$\mathbf{\Delta T_z}$ é a variação da temperatura na profundidade z em °C;

$\mathbf{\Delta T_o}$ é a variação da temperatura superficial em °C;

z é a profundidade para qual se deseja calcular a variação de temperatura em m;

κ é a difusividade térmica do solo em m^2/s e;

P é o período de interesse em s.

Esta equação pressupõe o conhecimento da variação da temperatura superficial, que é função do acúmulo de calor no substrato, gerando

uma questão de referência circular. No entanto, ela pode ser útil para determinar a condição de estabilidade térmica do solo.

Aplicando-se a relação inversa, é possível determinar a profundidade na qual a variação da temperatura do solo corresponde a uma determinada porcentagem da variação da temperatura superficial.

Equação 3.87

$$z = -\ln\left(\frac{\Delta T_z}{\Delta T_0}\right) \cdot (\pi \cdot \kappa \cdot P)^{0,5}$$

As propriedades dos materiais urbanos em relação ao armazenamento de calor são descritas como função da sua difusividade térmica (**κ**). Esta variável mede a capacidade do material de conduzir calor em relação à sua capacidade de armazená-lo (INCROPERA & DEWITT, 2003). Ela pode ser entendida como uma medida da velocidade com que o material transmite variações na sua temperatura e é dada por:

Equação 3.88

$$\kappa = \frac{k}{\rho \cdot c_p}$$

Onde:

k é a condutividade térmica do material em W/(m °C);

ρ é a profundidade densidade específica do material em kg/m³ e

$\mathbf{c_p}$ é o calor específico do material em J/ (kg °C).

Tabela 3.4: Propriedades térmicas dos materiais urbanos mais comuns

As propriedades térmicas para os materiais mais comuns nas áreas urbanas podem ser encontradas na Tabela 3.4.

		Densidade kg/m³	Calor específico J /(kg K)	Condutibilidade térmica W/(m K)	Difusividade térmica X 10^{-6} m^2/s
Solo arenoso	Seco	1600	800	0,30	0,23
	Saturado	2000	1480	2,20	0,74
Solo argiloso	Seco	1600	890	0,25	0,18
	Saturado	2000	1550	1,58	0,51
Asfalto		2115	920	0,06	0,03
Concreto		2300	880	1,40	0,69
Tijolo		2645	960	1,00	0,39
Granito		2630	775	2,79	1,37
Marmore		2680	830	2,80	1,26
Água		1000	4180	0,57	0,14

Fonte:

Os dados dos diferentes tipos de solo foram obtidos de Oke (1986). Os demais materiais foram retirados de Incropera & DeWitt (2003).

A Tabela 3.5 apresenta os resultados desta avaliação para diversos tipos de solo, considerando-se um período **P** de 24 horas (86400 segundos). Os cálculos foram efetuados a partir da Equação 3.88.

$\Delta T_z / \Delta T_0$ (%)	Solo arenoso		Solo argiloso		Asfalto	Concreto	Tijolo	Granito
	Seco	Saturado	Seco	Saturado				
100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50,00	0,17	0,31	0,15	0,26	0,06	0,30	0,23	0,42
25,00	0,35	0,62	0,30	0,52	0,13	0,60	0,23	0,85
12,50	0,52	0,93	0,45	0,77	0,19	0,90	0,68	1,27
06,25	0,70	1,25	0,61	1,02	0,26	1,20	0,91	1,69
03,13	0,87	1,56	0,76	1,29	0,32	1,50	1,13	2,11
01,56	1,05	1,87	0,91	1,55	0,39	1,80	1,36	2,54
1,00	1,16	2,07	1,01	1,71	0,43	2,00	1,51	2,81
00,78	1,22,	2,18	1,06	1,80	0,45	2,10	1,59	2,96
00,39	1,40	2,49	1,21	2,06	0,52	2,40	1,81	3,38
00,20	1,57	2,80	1,36	2,32	0,58	2,70	2,04	3,80
00,10	1,75	3,11	1,51	2,58	0,64	3,00	2,27	4,23
00,05	1,92	3,42	1,66	2,84	0,71	3,30	2,49	4,65
00,01	2,27	4,05	1,97	3,35	0,84	3,90	2,95	5,49

Tabela 3.5: Profundidades de estabilidade diária da temperatura do solo em metros

Observa-se que os intervalos nos quais a variação de temperatura cai pela metade são constantes em materiais homogêneos. É possível utilizar os valores da segunda linha como referência quando se quiser verificar a profundidade de amortecimento da onda térmica.

A cerca de 2,00 m de profundidade, as variações na temperatura do solo são da ordem de 1% da variação da temperatura superficial no pior caso, o solo argiloso saturado. Isso significa que uma variação de 50°C na temperatura superficial representaria uma variação de apenas 0,5°C na temperatura do solo àquela profundidade. Admitiu-se, portanto, que a 2,00m de profundidade a temperatura do solo apresenta valor constante. A princípio, o valor atribuído à temperatura nesta profundidade é a média diária, mas o valor pode ser alterado caso as simulações indiquem a necessidade de calibração.

Barbirato (1998) apresenta um estudo baseado no modelo de balanço de energia produzido por Tso et Al (1990)[25]. O modelo apresenta uma formulação matemática interessante, principalmente para a parametrização da massa de concreto das edificações, mas ainda assume a homogeneidade das parcelas urbanas e não leva em consideração as diferentes condições de exposição ao vento e à radiação existentes na massa urbana.

Sashua-Bar & Hoffman (2000) sugerem um modelo para cálculo de armazenamento de calor no *canyon* urbano baseado em uma variável denominada CTTC (*Cluster Thermal Time Constant*). Os valores de CTTC individuais dependem das propriedades termofísicas dos materiais e são dadas por Swaid (1995) como sendo o produto da capacitância térmica do material pela sua resistência térmica. Assim:

25 TSO, C.P.; CHAN, B. K.; HASHIM, M.A. An improvement to the basic energy balance model for urban thermal environment analysis. Energy and Buildings, n. 14, p. 143-152 *apud* BARBIRATO, 1998.

Equação 3.89

$$CTTC = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_p \cdot D\right) \cdot \frac{D}{k}$$

Onde $\boldsymbol{\rho}$ é a massa específica do material, $\boldsymbol{c_p}$ é seu calor específico, $\boldsymbol{k}$ é a condutibilidade térmica. A variável $\boldsymbol{D}$ representa a profundidade de amortecimento do material sob a superfície, definida pela profundidade a partir da qual a amplitude da onda térmica diária se reduz a 37% da amplitude térmica superficial. Esta profundidade pode ser calculada pela Equação 3.87.

O valor de **CTTC** para uma determinada configuração de *canyon* é ponderado para as fachadas e para o piso.

Equação 3.90

$$CTTC = \left(1 - \frac{A_{proj}}{A_T}\right) \cdot CTTC_{PISO} + \frac{A_f}{A_T} \cdot$$

Onde $\mathbf{A_{proj}}$ é o somatório da área de projeção dos edifícios, $\mathbf{A_T}$ é a área total do local estudado e $\mathbf{A_f}$ é a área de fachada dos edifícios.

Outra proposta para a parametrização do calor armazenado vem de Arnfield & Grimmond (1998), através do *Objective Hysterisis Model* (OMH). O modelo caracteriza o fluxo armazenado ($\mathbf{\Delta Q_s}$) em função da taxa líquida de radiação ($\mathbf{Q_R^*}$) (embora não considere o calor antropogênico).

Porém, além da dependência direta, ele estabelece também mais um termo para determinar o atraso da onda térmica em relação à radiação incidente e um termo independente.

Equação 3.91

$$\Delta Q_s = \sum_{i=1}^{n} \left[a_1 \cdot Q^*_{R\,i} + a_2 \cdot \left(\frac{\partial Q^*_{R\,i}}{\partial t}\right) + a_3\right]$$

Onde $\boldsymbol{a_1}$, $\boldsymbol{a_2}$ e $\boldsymbol{a_3}$ são os coeficientes citados ($\boldsymbol{a_1}$ seria semelhante a $\mathbf{D_c}$ ou $\mathbf{D_g}$), **t** é o tempo,**i** as superfícies, variando de 1 a *n* e a derivada da radiação liquida dada por:

Equação 3.92

$$\frac{\partial Q^*_{R\,i}}{\partial t} = \frac{1}{2} \cdot \left|Q^*_{R\,(i+1)} - Q^*_{R\,(i-1)}\right|$$

Na Equação 3.92, excepcionalmente, a radiação liquida é dada em $\mathbf{W \cdot m^2 \cdot h^{-1}}$, assim como o tempo **t** é dado em horas.

Estes coeficientes dependem de uma série de fatores e a possibilidade da sua generalização ainda é discutível, mas Arnfield e Grimmond (1998) realizaram vários experimentos e análises comparativas de modo a tentar estabelecer uma correlação entre os valores dos coeficientes e algumas variáveis.

OHM coefficients from model simulations (coefficient units: a_1, dimensionless; a_2, h; and a_3, W m^{-2}). See text for explanation of modifications to inputs for numerical experiments.

	West wall			East wall			Floor			Canyon		
	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3
Canyon aspect ratio: height/width												
2	0.49	−0.33	−6.3	0.59	0.07	−11.8	0.33	0.08	−11.5	0.55	−0.34	−57.6
1	0.37	−0.18	−6.7	0.50	0.15	−13.7	0.31	0.11	−17.2	0.43	−0.13	−44.5
0.5	0.31	−0.09	−6.7	0.46	0.23	−14.7	0.30	0.13	−21.3	0.36	0.00	−36.6
Within canyon wind-speed												
2 u	0.33	−0.22	−5.9	0.46	0.13	−13.0	0.26	0.08	−15.7	0.39	−0.18	−43.5
u	0.37	−0.18	−6.7	0.50	0.15	−13.7	0.31	0.11	−17.2	0.43	−0.13	−44.5
0.5 u	0.42	−0.14	−7.7	0.53	0.17	−14.4	0.36	0.13	−18.9	0.45	−0.08	−45.7
Within canyon air temperature												
$T+5$°C	0.37	−0.19	−7.2	0.50	0.15	−14.0	0.31	0.11	−17.5	0.42	−0.13	−45.6
T	0.37	−0.18	−6.7	0.50	0.15	−13.7	0.31	0.11	−17.2	0.43	−0.13	−44.5
$T-5$°C	0.35	−0.14	−9.1	0.47	0.15	−15.1	0.31	0.11	−17.9	0.41	−0.10	−47.2
Within canyon wind speed phase												
− 1 h	0.38	−0.19	−7.1	0.51	0.15	−14.1	0.31	0.11	−17.7	0.43	−0.14	−45.7
0	0.37	−0.18	−6.7	0.50	0.15	−13.7	0.31	0.11	−17.2	0.43	−0.13	−44.5
+ 1 h	0.37	−0.13	−6.3	0.49	0.16	−13.4	0.31	0.12	−17.1	0.42	−0.10	−43.6
Within canyon air temperature phase												
− 1 h	0.46	−0.09	−8.9	0.51	0.22	−14.0	0.32	0.15	−17.8	0.46	0.07	−48.9
0	0.37	−0.18	−6.7	0.50	0.15	−13.7	0.31	0.11	−17.2	0.43	−0.13	−44.5
+ 1 h	0.30	−0.18	−4.9	0.48	0.11	−13.2	0.29	0.07	−16.3	0.38	−0.26	−39.2
Building wall thermal properties (increasing thermal admittance)												
Light	0.23	−0.09	−5.1	0.30	0.11	−9.3	0.31	0.11	−17.2	0.33	−0.02	−37.2
Standard	0.37	−0.18	−6.7	0.50	0.15	−13.7	0.31	0.11	−17.2	0.43	−0.13	−44.5
Heavy	0.57	−0.39	−6.2	0.79	0.14	−17.2	0.31	0.11	−17.1	0.56	−0.36	−50.1

Figura 3.26: Valores dos coeficientes para as superfícies de um *canyon* no sentido N-S em várias situações

Fonte: ARNFIELD & GRIMMOND, 1998

Os autores afirmam, porém, que ainda não foi estabelecida uma equação genérica a partir dos dados observados que relacionasse todos os parâmetros, sendo ainda necessária uma investigação maior do tema.

3.2.3.2. Método de diferenças finitas

Mills (1997) apresenta um modelo de transferência de calor em sólido baseado em diferenças finitas, aplicado tanto ao solo quando à superfície dos edifícios. O modelo utiliza a discretização implícita, em que as temperaturas de um ponto em um determinado instante dependem das temperaturas dos pontos vizinhos para o mesmo instante. A solução exige a utilização de métodos iterativos. Devido à dificuldade para se implementar deste tipo de procedimento em expressões, considerou-se a utilização do método explicito apresentado por Incropera & DeWitt (2003).

No método explícito, as temperaturas de um ponto são função das temperaturas deste ponto e dos pontos vizinhos no momento anterior. Dadas as condições iniciais no momento **t =0**, o comportamento de cada nó é calculado para cada intervalo de **Δt**. O sólido é dividido em pontos discretos separados pela distância **Δx**. A posição do ponto é representada pelo índice subscrito ***m***. O momento no tempo é definido pelo índice sobrescrito **p**. A forma explícita da equação de diferenças finitas unidimensional é dada por:

$$T_m^{p+1} = Fo \cdot \left(T_{m+1}^p + T_{m-1}^p\right) + (1 - Fo) \cdot T_m^p$$

Equação 3.93

Onde **Fo** é a forma das diferenças finitas do número de Fourier, dada por:

Equação 3.94

$$Fo = \frac{\kappa \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2}$$

Onde **κ** é a difusividade térmica do solo em m^2/s.

Uma característica do método explícito é que a sua estabilidade está condicionada aos valores de **Δt** e **Δx**. A escolha de intervalos de tempo muito grandes leva a oscilações numéricas fisicamente impossíveis. Como critério de estabilidade, o coeficiente que multiplica a temperatura do ponto no instante anterior **(T_m^p)** deve ser sempre maior ou igual a zero. Deste modo, para um nó interno com condução unidimensional:

Equação 3.95

$$(1 - 2Fo) \geq 0$$

$$Fo \leq \frac{1}{2}$$

$$\Delta t \leq \frac{(\Delta x)^2}{2 \cdot \kappa}$$

Para pontos superficiais, expostos a trocas convectivas, assume-se que a distância ao segundo ponto é metade da distância dos pontos internos. Deduzindo-se a equação a partir do balanço de energia, tem-se:

Equação 3.96

$$T_0^{p+1} = 2 \cdot Fo \cdot \left(T_1^p + Bi \cdot T_\infty^p\right) + (1 - 2 \cdot Fo - 2 \cdot Bi \cdot Fo) \cdot T_0^p$$

Onde **Bi** é a forma das diferenças finitas do número de Biot, dada por:

Equação 3.97

$$Bi = \frac{h \cdot \Delta x}{k}$$

Onde **h** é o coeficiente de transferência de calor por convecção em $W/(m^2\ K)$ e **k** é a condutibilidade térmica do sólido em W /(m K). Novamente deve-se aplicar o critério de estabilidade, utilizando o menor valor de **Δt** obtido.

Equação 3.98

$$(1 - 2 \cdot Fo - 2 \cdot Bi \cdot Fo) \geq 0$$

$$Fo\,(1 + Bi) \leq \frac{1}{2}$$

No caso de exposição à convecção e a uma fonte de calor de intensidade **q** em W/m^2.

Equação 3.99

$$T_0^{p+1} = 2 \cdot Fo \cdot \left(T_1^p + Bi \cdot T_\infty^p + \frac{q \cdot \Delta x}{k}\right) + (1 - 2 \cdot Fo - 2 \cdot Bi \cdot Fo) \cdot T_0^p$$

A determinação do intervalo de tempo segue os mesmos critérios da equação anterior.

No caso da interface entre dois materiais diferentes (cujas partes são identificadas pelo subscrito A e B), a equação deduzida a partir do balanço de energia.

$$T_{AB}^{p+1} = \frac{4 \cdot Fo_A \cdot Fo_B}{Fo_A \cdot k_B \cdot \Delta x_A + Fo_B \cdot k_A \cdot \Delta x_B} \cdot \left(k_A \cdot \Delta x_B \cdot T_A^p + k_B \cdot \Delta x_A \cdot T_B^p\right) + \left[1 - \frac{4 \cdot Fo_A \cdot Fo_B \cdot (k_A \cdot \Delta x_B + k_B \cdot \Delta x_A)}{Fo_A \cdot k_B \cdot \Delta x_A + Fo_B \cdot k_A \cdot \Delta x_B}\right] \cdot T_{AB}^p$$

Equação 3.100

Para o modelo de clima urbano, foram concebidas estruturas diferentes para o solo e para os edifícios. O solo é dividido em 5 camadas, sendo que a primeira camada apresenta metade da espessura das demais. O valor de **Δx** é determinado pela espessura total do solo **(e_t)**, definida como a profundidade de estabilidade diária da temperatura. Conforme discutido anteriormente, o valor inicial adotado para esta variável é de 2,00 m.

Para os edifícios, foi elaborada uma estrutura mais complexa, onde existe uma parede exposta a radiação, uma câmara de ar que representa os ambientes internos e uma coluna de concreto interna, representando a massa não exposta do edifício. Inicialmente as espessuras para cada camada foram 0,20 m, 6,00 m e 4,00 m, respectivamente. Estas dimensões, no entanto, deverão ser ajustadas de acordo com os resultados da simulação e a comparação com os dados medidos.

Para a determinação das dimensões da coluna de concreto central dos edifícios, uma informação útil é dada por Tso et AL (1990)[26]. Os autores criaram uma variável denominada *Concrete Volume Factor* (CVF) definido pela razão entre o volume de concreto em uma edificação e o seu volume total externo. Segundo estudos realizados na Malásia sobre projetos de engenharia, um valor típico para o CVF em edificações térreas seria de 0,160 e para edificações de múltiplos pavimentos, 0,132.

26

TSO, C.P.; CHAN, B. K.; HASHIM, M.A. An improvement to the basic energy balance model for urban thermal environment analysis. Energy and Buildings, n. 14, p. 143-152 *apud* BARBIRATO, 1998.

O esquema para a distribuição de temperaturas no solo é nos edifícios é indicado na Figura 3.27.

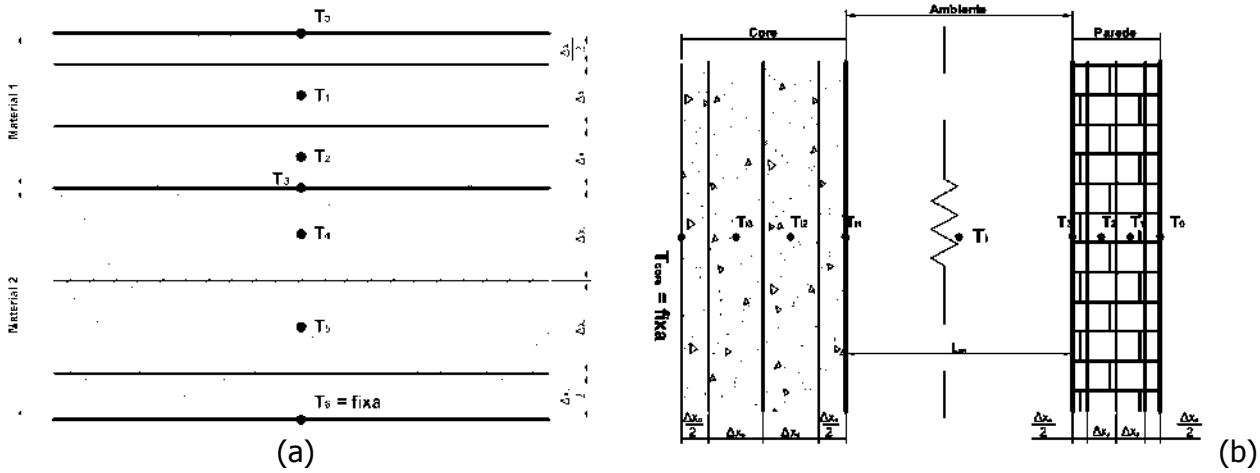


Figura 3.27: Esquema de distribuição de temperaturas no solo (a) e nos edifícios (b)

Os valores de **T_0** para ambas são determinados com base na Equação 3.99.

As temperaturas nos pontos interiores aos sólidos (**T_1, T_2, T_4 , T_5** e **T_6** para o solo e **T_1, T_2, T_{i02}** e **T_{i03}** para as edificações) são calculadas

utilizando-se a Equação 3.93. A temperatura $\mathbf{T_6}$ no solo é mantida constante.

A temperatura de interface do solo, $\mathbf{T_3}$, é calculada utilizando-se a equação Equação 3.100.

As temperaturas superficiais internas dos edifícios ($\mathbf{T_3}$ e $\mathbf{T_{i01}}$) são determinadas por uma variante da Equação 3.96, que considera também a troca por radiação entre as duas superfícies, utilizando-se um coeficiente de troca radiativa (**hr**) que gera um Biot para radiação (**BiR**) . A temperatura do fluido utilizada é a temperatura interna do ambiente ($\mathbf{T_i}$) e o coeficiente de convecção interno (**hci**) foi estimado inicialmente em 8 W/(m²K), a partir de valores encontrados em Frota & Schiffer (1995). A forma final da equação para $\mathbf{T_3}$ é:

Equação 3.101

$$T_3^{p+1} = 2 \cdot Fo \cdot \left(T_2^p + Bi \cdot T_i^p + BiR \cdot T_{i1}^p\right) + [1 - 2 \cdot Fo \cdot (1 + Bi + BiR) \cdot T3p$$

As variáveis devem ser invertidas no caso do ponto $\mathbf{T_{i01}}$. Observa-se que o número de Biot e Fourier para cada ponto devem ser alterados em função do material da parede externa e do núcleo interno do edifício.

Para cálculo da temperatura interna ($\mathbf{T_i}$) foi elaborado um balanço de energia, separando a carga referente aos vidros e à ventilação. Na primeira estimativa, não se levou em conta a possibilidade de ventilação interna, mas esta hipótese pode ser considerada no futuro. O valor da temperatura interna é dado por:

Equação 3.102

$$T_i^{p+1} = T_i^p + \frac{\Delta t}{\rho_{ar} \cdot L_{int} \cdot c_{ar}} \cdot \left\{q \cdot FS \cdot WWR + hci \cdot \left(T_i^p - T_3^p\right) \cdot (1 - WWR) + U_v \cdot \left(T_i^p - T_\infty^p\right) \cdot (1 - WWR) + hci \cdot \left(T_i^p - T_{i01}^p\right) + \rho_{ar} \cdot c_{ar} \cdot L_{int} \cdot R \cdot T_\infty^p\right\}$$

Onde **FS** e $\mathbf{U_v}$ são respectivamente o fator solar adimensional e o coeficiente de transmissão global de calor em W/(m²°C) do vidro; **WWR** é a razão entre a área de vidro e a área total da parede e $\mathbf{L_{int}}$ é o comprimento da camada de ar.

Rearranjando para manter um único coeficiente para $\mathbf{T_i}$:

Equação 3.103

$$T_i^{p+1} = \left\{1 - \frac{\Delta t}{\rho_{ar} \cdot L_{int} \cdot c_{ar}} \cdot [2 \cdot hci \cdot (1 - WWR) + U_v \cdot WWR + \rho_{ar} \cdot L_{int} \cdot c_{ar} \cdot R]\right\} T_i^p + \frac{\Delta t}{\rho_{ar} \cdot L_{int} \cdot c_{ar}} \cdot \left[WWR \cdot \left(q \cdot FS + U_v \cdot T_\infty^p\right) \cdot (1 - WWR) \cdot \left(T_3^p - T_{i01}^p\right) - hci \cdot T_{i01}^p + \rho_{ar} \cdot L_{int} \cdot c_{ar} \cdot R \cdot T_\infty^p\right]$$

A temperatura do núcleo de concreto do edifício pode ser estabelecida através de um balanço tridimensional com as quatro fachadas e o teto, considerando-se todas as superfícies externas à mesma distância da coluna de concreto e o piso a uma temperatura fixa $\mathbf{T_g}$.

$$T_{m,n,z}^{p+1} = Fo \cdot \left(T_{m+1,n,z}^{p} + T_{m-1,n,z}^{p} + T_{m,n+1,z}^{p} + T_{m,n-1,z}^{p} + T_{m,n,z+1}^{p} + T_{g}\right) + (1 - 6 \cdot Fo) \cdot T_{m,n,z}^{p}$$

Equação 3.104

3.2.4. *Balanço: exemplos*

3.2.4.1. Cluster Thermal Time Constant – CTTC

O CTTC é um modelo de balanço simplificado, baseado na premissa de que em condições de estabilidade atmosférica, sem advecção, as alterações climáticas no meio urbano são determinadas segundo a maneira pela qual sua estrutura responde à radiação líquida (solar e de onda longa) (SWAID, 1995; SASHUA-BAR & HOFFMAN, 2000).

O modelo prevê a consideração do impacto do calor antropogênico, mas a sua parametrização não é analisada com profundidade. O parâmetro *Cluster Thermal Time Constant* (CTTC) propriamente dito descreve a inércia térmica das superfícies, indicando o atraso da onda de temperatura em relação à radiação solar. Os fluxos de calor raramente são descritos como tais, sendo identificados somente pelo seu impacto no aumento da temperatura. O **ΔT**, portanto, é a principal variável neste modelo. Espacialmente, o modelo necessita da dimensão e posição relativa das superfícies. Não há uma descrição espacial clara no modelo, mas a geometria afeta principalmente o sombreamento das superfícies e a perda de radiação de onda longa para o fundo de céu.

Erro! Indicador não definido.

Definido no item 3.2.2.7.

Erro! Indicador não definido.

A diferença entre **t** e $\mathbf{t_{ac}}$ é que **t** se refere ao instante para o qual é calculada a contribuição solar e $\mathbf{t_{ac}}$ é resultado da radiação acumulada no intervalo de 0 a **t**

A equação que prevê a elevação da temperatura a partir do nascer do sol (quando a temperatura é mínima) é:

$$\Delta T(t) = \left(\Delta T_{SOLAR\,(t)} - \Delta T_{SOLAR\,(t\,min)}\right) - \left(\Delta T_{NLWR\,(t)} - \Delta T_{TNLWR\,(t\,min)}\right) + \Delta T_{AHR,(t)}$$

Equação 3.105

Onde **ΔT** é a diferença de temperatura e **t** o instante para o qual se deseja realizar o cálculo. Os índices SOLAR e NLWR se referem, respectivamente, à radiação solar direta e à radiação de onda longa. A contribuição da radiação solar direta é dada por:

$$\Delta T_{SOLAR(t)} = \frac{\alpha_{sup}}{h} \cdot \sum_{t_{ac}=0}^{t_{ac}=t} \Delta I_{pen(t_{ac})} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t - t_{ac}}{CTTC}\right)\right]$$

Equação 3.106

Onde $\boldsymbol{\alpha_{sup}}$ é a absorção da superfície à radiação solar, **h** é o coeficiente total de transferência de calor na superfície e **t** e $\mathbf{t_{ac}}$ são o tempo em horas. A radiação direta média incidente na superfície do piso ($\boldsymbol{\Delta I_{pen(tac)}}$) é dada por:

$$\Delta I_{pen(t_{ac})} = I_{g(t)} - \left(1 - PSA_{(t)}\right)$$

Equação 3.107

Onde $\mathbf{I_{D(t)}}$ é a radiação incidente em um plano horizontal desobstruído no período **t** e $\mathbf{PSA_{(t)}}$ é a área de piso parcialmente sombreada, que, para uma geometria de *canyon*, pode ser calculada pela equação a seguir.

Equação 3.108

$$PSA_{(t)} = \frac{\cos(\gamma - \gamma_s)}{\tan(\xi_s)} \cdot \frac{H}{L}$$

Onde ξ_s é o ângulo de altura solar, γ e γ_s são respectivamente o azimute da rua e o do sol, **H** a altura dos edifícios e **L** é a largura do *canyon*.

O valor de CTTC é calculado de acordo com as equações apresentadas no item 3.2.3.1

O modelo tem uma entrada bastante simplificada, sendo apenas necessária a temperatura mínima do período e as características geométricas e físicas das edificações. O resultado vem na forma de incrementos de temperatura, adicionados à temperatura mínima do local. Ao contrário dos outros modelos que serão apresentados, este não fornece o valor dos fluxos de calor, apenas a temperatura do ar ao longo do dia. No entanto, uma avaliação da curva de temperatura e do valor de PSA e do CTTC fornece informações valiosas para o planejamento urbano.

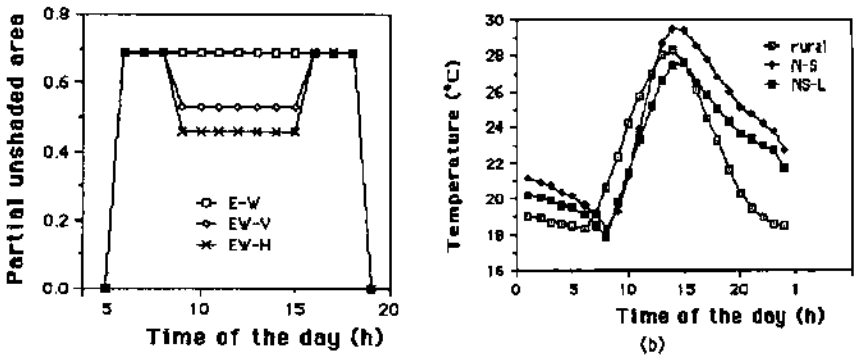


Figura 3.28: Resultados do CTTC (PUSA e Temperatura)

Fonte: SWAID, 1992

Nota: O **PUSA** é a *Partial Unshsaded Area*, a área do piso que não está sombreada, cujo valor é dado por (**1 – PSA**).

3.2.4.2. Urban Canopy Layer Model

O modelo é proposto por Mills (1997) e divide o objeto em duas escalas – a camada limite urbana (*Urban Boundary Layer* – UBL) e a camada abaixo do nível das coberturas (*Urban Canopy Layer* – UCL) – e se difere dos demais na proposta de simular simultaneamente as trocas interna das UCL e as existentes entre UBL e UCL. As trocas com a UBL derivam de uma superfície imaginária, uma interface vagamente localizada no nível das coberturas. Esta interface pode ser tratada como uma superfície plana e rugosa, com características térmicas, radiativas e de rugosidade generalizadas. As trocas na camada sob a cobertura são resultado de interações complexas entre as superfícies que a compõe e a camada limite. Para o autor, a infinidade de composições possíveis para estas superfícies torna impossível caracterizá-las completamente, exceto em situações específicas sob condições limitadas, tais como o *canyon* urbano.

Neste modelo, é analisado um grupo de edifícios, composto de estruturas idênticas dispostas em intervalos regulares sobre uma superfície plana. Os edifícios são formados a partir de cinco superfícies

com altura, comprimento e profundidade, e separados por duas larguras. Como a composição geométrica do modelo é rígida, devem-se assumir as dimensões com cuidado, de modo que elas sejam representativas da realidade urbana que se deseja estudar.

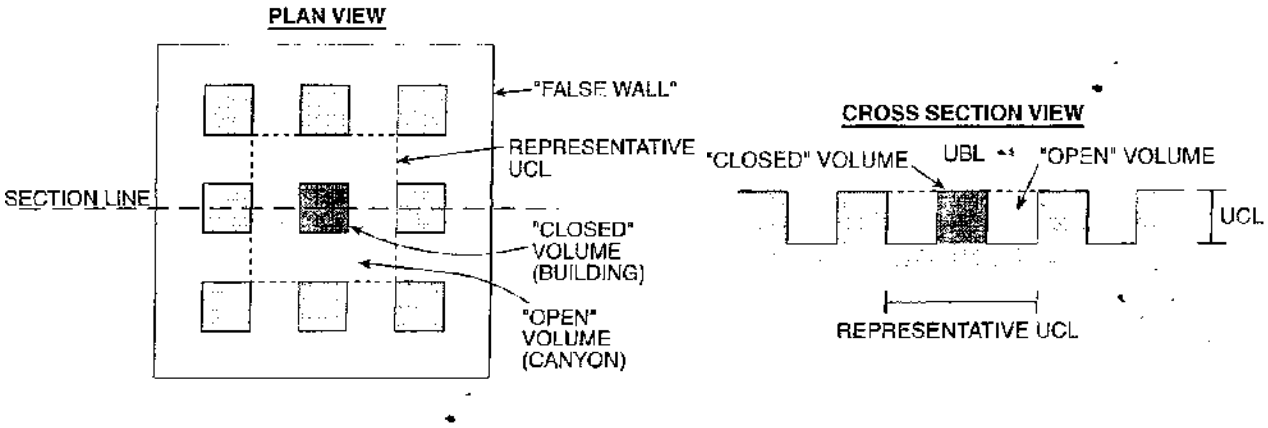


Figura 3.29: Configuração da estrutura urbana no modelo vista de cima e em corte

Fonte: MILLS, 1997

O substrato pode diferir para as diversas superfícies, mas é homogêneo na profundidade. Para fachadas e a cobertura, a profundidade é espessura das paredes; para o solo, é a profundidade a partir da qual as variações diárias de temperatura são insignificantes.

O modelo é dividido em volumes fechados (edifícios) e abertos (*canyons*). As fachadas são compartilhadas por ambos os volumes e as interações com a UBL são feitas a partir do telhado, nos prédios, e de uma superfície permeável imaginária localizada no topo do *canyon*.

O balanço dos volumes abertos e fechados é feito de maneira iterativa, balanceando temperaturas superficiais e do ar dentro dos dois volumes. O balanço final do *canyon* é dado por:

$$A_t \cdot Q_{Ht} = \sum_{j=1}^{n} A_{sup} \cdot Q_{Hsup} + A_{topo} \cdot Q_{Hc}$$

Equação 3.109

Onde **A** se refere às áreas e $\mathbf{Q_H}$ aos fluxos sensíveis por convecção. Os subscritos representam o valor total (**t**), o topo do *canyon* (**c**), as superfícies verticais (**j**) e o piso (**p**).

Para o edifício, o balanço é dado por:

$$\sum_{j=1}^{6} \left(\varepsilon_j \cdot \sigma \cdot {T_{(j,5)}}^4 \cdot F_{i \to j}\right) - \varepsilon_i \cdot \sigma \cdot {T_{(i,5)}}^4 = \frac{k}{\Delta z} \cdot \left(T_{(i,5)} - T_{(i,4)}\right) + h_c \cdot \left(T_{(i,5)} - T_{(i,4)}\right)$$

Equação 3.110

Os subscritos ***i*** e ***j*** se referem às superfícies interiores do edifício, os demais termos têm o mesmo significado anteriormente colocados, sendo que ***k*** é a condutibilidade térmica do material. Para cálculo do coeficiente de convecção interno (h_c), o autor sugere a utilização de da Equação 3.74, com velocidades de vento de 0,25 m/s. Contudo, embora a intensidade seja compatível com a encontrada em ambientes interiores, não se recomenda a utilização desta equação para cálculos internos, já que ela se aplica as situações de convecção forçada, o que raramente é verdade dentro dos edifícios. A utilização deste coeficiente deve superestimar significativamente as trocas das paredes com o ar interno. Como o solo sob o edifício não foi considerado previamente neste modelo, assume-se que a sua temperatura superficial é igual à temperatura do ar no interior do edifício[27].

27 Isso significa desconsiderar o efeito de resfriamento da massa de terra sob o piso, o que superestima a sua temperatura superficial.

O termo $\mathbf{T_b}$ representa a temperatura interna no edifício e também deve ser obtido de maneira iterativa. O incremento na temperatura é dado por:

Equação 3.111

$$\Delta T_b = \Delta t \cdot \left(\frac{\sum_{j=1}^{6} Q_{Hj} \cdot A_j}{\rho \cdot c_p \cdot V} \right)$$

Onde **A** é a área da face, **ρ** é a densidade do ar, $\mathbf{c_p}$ seu calor específico e **V** é o volume do edifício. A temperatura $\mathbf{T_b}$ é a ajustada com este incremento e é consequentemente utilizada no cálculo do substrato e do balanço de energia interno para cada intervalo de tempo (**t + Δt**).

A altura de referência usada para se levantar os dados de temperatura e vento é de 1,5 vezes a altura das edificações. O plano imaginário sobre o qual se localizam as rugosidades para efeito de atrito com a camada limite está localizado a dois terços da altura dos edifícios.

Há três tipos de dados de entrada neste modelo:

- Local e período do ano: latitude, longitude, mês e dia;
- Dados meteorológicos: temperatura e velocidade do vento em intervalos regulares para um nível de referência localizado acima da camada das coberturas e;
- Características da UCL: orientação, dimensão e separação dos edifícios, características térmicas do substrato e propriedades radiativas das superfícies.

Como resultado, o modelo permite avaliar a distribuição de temperaturas e de fluxos de calor ao longo de 24 horas. Não só as temperaturas superficiais são calculadas, mas também as temperaturas do ar tanto nos volumes abertos quanto nos fechados.

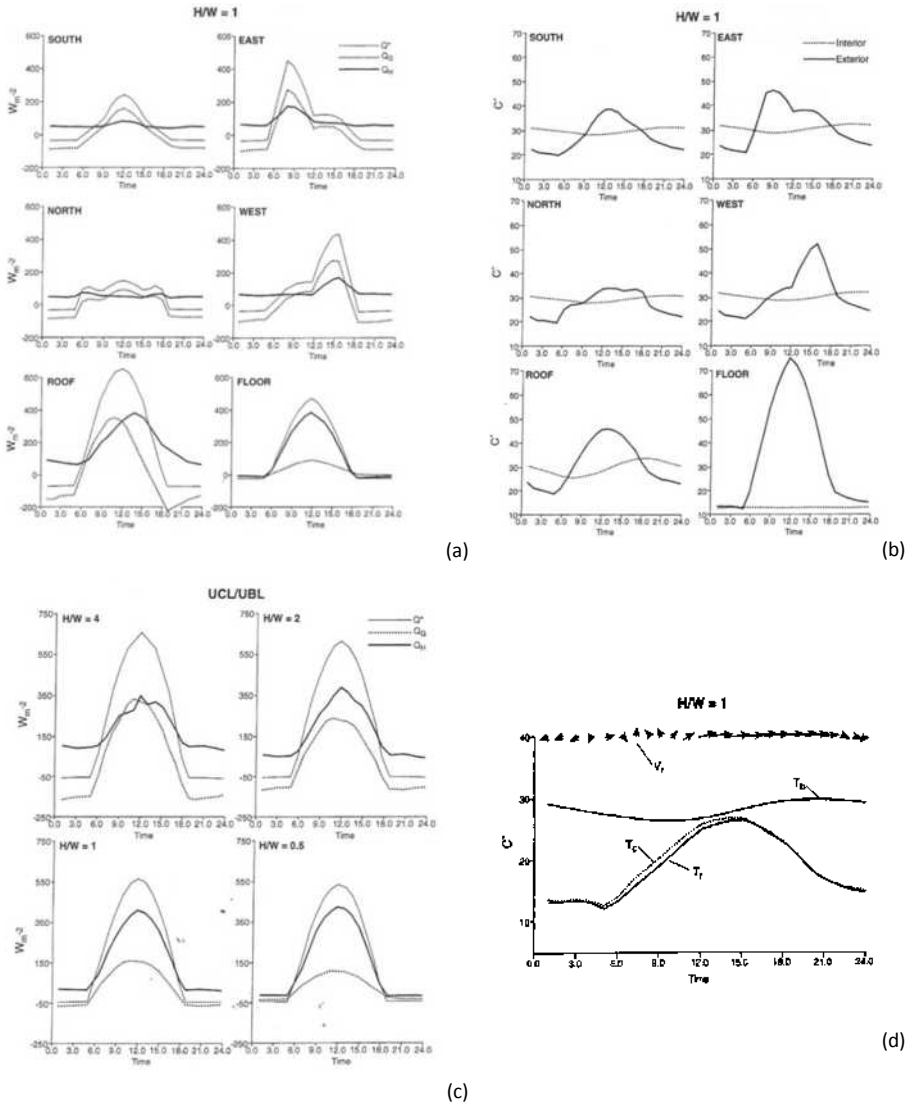


Figura 3.30: Resultados do modelo

(a) fluxos de calor

(b) temperaturas superficiais internas e externas

(c) trocas com a UBL

(d) temperatura do caynon e dos edifícios

Fonte: MILLS, 1997

3.2.4.3. UCLM 30 e UCLM 60

Os modelos UCLM 30 e UCLM 60 foram apresentados por Borghi, Corbeta & De Biase (2000) e permitem o cálculo dos fluxos de calor e das temperaturas superficiais e do ar nas camadas atmosféricas inferiores. Para isso, o espaço urbano é desmembrado horizontalmente em células quadradas cuja dimensão pode variar de 30m a 1500m. São tiradas médias de todos os dados de entrada e saída de cada célula e o valor final é considerado como sendo referente ao ponto central da célula. Verticalmente, o volume de controle é dividido 3 níveis de trabalho, z = 0 (solo), z_1 (topo dos prédios) e z_2 = 100m (céu) O céu é considerado como uma placa plana paralela ao solo na altura citada, a partir da qual as interações entre a atmosfera e a cidade sob ela são pequenas.

Há duas classes de dados de entrada: relativos às propriedades da área urbana ou rural e dados meteorológicos relativos às condições sinóticas locais.

Os primeiro dados são basicamente obtidos a partir de trabalhos com imagem de satélite Landsat TM que são convertidas em matrizes

numéricas a partir das quais podem ser determinados: o albedo das superfícies, a densidade total dos prédios, o índice de vegetação e o tipo de cobertura, com suas respectivas emissividades e alturas de edifícios (cada tipo de cobertura tem uma altura de edifício associada, que é obtida a partir de levantamentos de campo ou informada pelas autoridades locais).

O uso de imagens de satélite que descrevem o espaço urbano vem sendo disseminado para os mais diversos fins. Meyong et al (2001) apresentam uma discussão completa sobre a apropriação desta ferramenta na determinação dos tipos de cobertura na cidade. Existem ainda trabalhos que convertem as radiações captadas pelo satélite em temperaturas superficiais (SÃO PAULO, 2002; HIRANO, YASUOKA & ICHINOSE, 2004) ou mesmo do ar (FRENHAUF, 1984), embora tal aplicação seja ainda controversa.

A cidade é sempre modelada na forma de blocos quadrados com diferentes alturas, agrupados em blocos maiores e espalhados uniformemente em todas as direções, separados por *canyons* urbanos. Estes são modelos de ruas principais, ao longo da qual os prédios são alinhados continuamente.

A estrutura matemática do modelo é baseada em quatro equações independentes, que caracterizam os diferentes tipos de fluxo e armazenamento de calor. As duas primeiras referem-se aos balanços de superfície dos edifícios e do piso e as duas últimas tratam dos fluxos sensíveis e latentes na atmosfera.

Equação 3.112

$$Q_c = Q^*_{Rc} - Q_{Hc} + Qa_c$$

Equação 3.113

$$Q_g = Q^*_{Rg} - Q_{Hg} + c_{lat} \cdot Q_{Eg} \cdot Qa_g$$

Equação 3.114

$$Q_{Har} = Q_{Hc} + Q_{Hg}$$

Equação 3.115

$$Q_{Ear} = Q_{Eg}$$

A primeira equação define o balanço nas superfícies dos prédios. $\mathbf{Q_C}$ é o fluxo por condução, $\mathbf{Q_R}$* é a radiação liquida,$\mathbf{Q_H}$ o fluxo sensível turbulento, $\mathbf{c_{lat}}$ é o calor latente de evaporação, $\mathbf{Q_E}$ o fluxo latente e **Qa** o calor antropogênico. Os subscritos **ar**, **c** e **g** se referem, respectivamente, às camadas de ar entre os níveis z_1 e z_2 e à camada abaixo do nível das coberturas e ao solo.

Os fluxos latentes e sensíveis são descritos de acordo com a analogia elétrica a partir de um coeficiente (definido pelas propriedades termofísicas do ar e do solo), uma diferença de intensidade (que pode ser de temperatura ou de umidade) e uma resistência. Desse modo, estabelece-se que:

Equação 3.116

$$\text{Fluxo} \propto \text{Diferença de intensidade / Resistência}$$

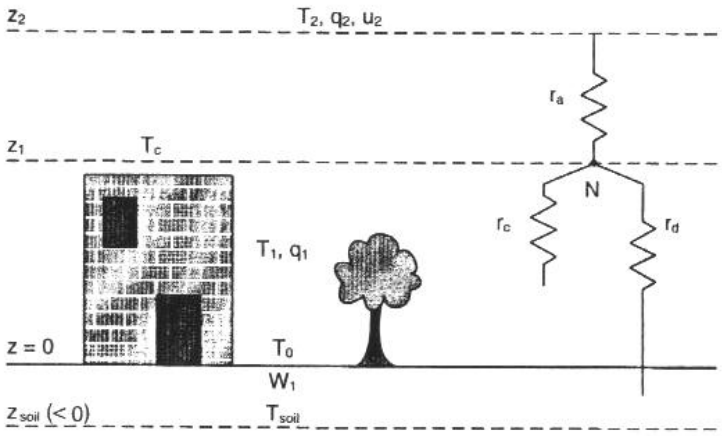


Figura 3.31: Estrutura dos programas UCLM 30 e UCLM 60 e o esquema elétrico equivalente

Fonte: BORGHI, CORBETA & DE BIASE, 2000

O modelo demanda como dado de entrada, além das características da área – tipo de cobertura (afeta o albedo, a emissividade e as propriedades térmicas) e altura e disposição das edificações – dados meteorológicos locais para o estabelecimento das condições limites. É necessário fornecer a temperatura ($\mathbf{T_2}$), a umidade absoluta ($\mathbf{q_2}$) e a velocidade de vento ($\boldsymbol{u_2}$) no nível z_2 (100 m) e a umidade absoluta ($\mathbf{q_{0s}}$) no solo. Com isso, é possível, a partir do sistema de 4 equações, obter as temperaturas do solo ($\mathbf{T_0}$), dos prédios ($\mathbf{T_c}$) e do ar abaixo das coberturas ($\mathbf{T_1}$) além da umidade absoluta do ar ($\mathbf{q_1}$) e, a partir daí, determinar os fluxos de calor para cada célula, obtendo uma distribuição horizontal de temperaturas. Esta distribuição é o principal diferencial deste modelo, que não assume uma homogeneidade da estrutura urbana analisada em uma maior escala, e permite uma avaliação comparativa dos diferentes recintos urbanos.

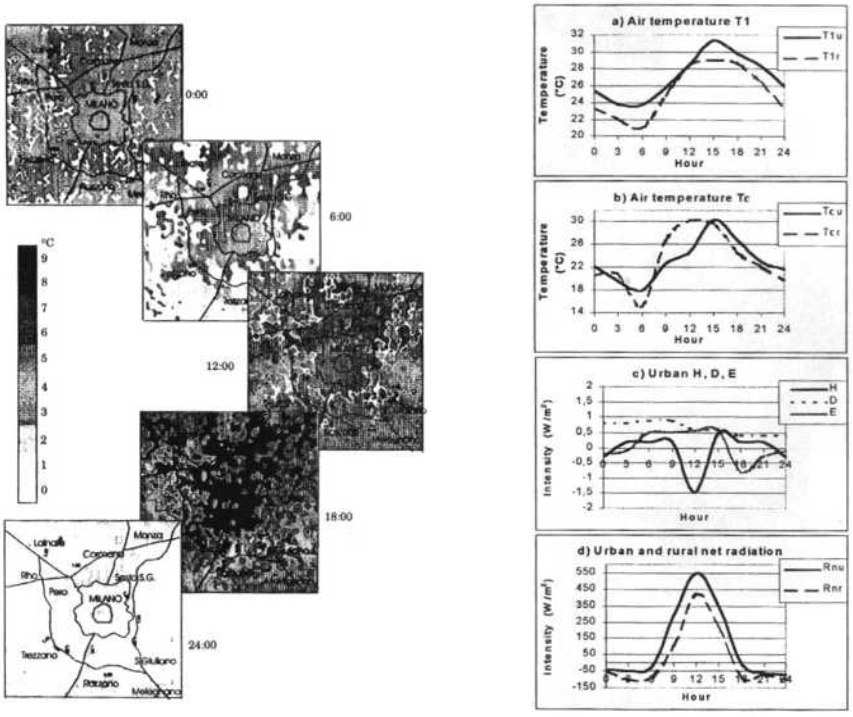


Figura 3.32: Resultados espaciais e temporais do modelo

Fonte: BORGHI, CORBETA & DE BIASE, 2000

3.3. Modelos computacionais

3.3.1. *Envi-met*

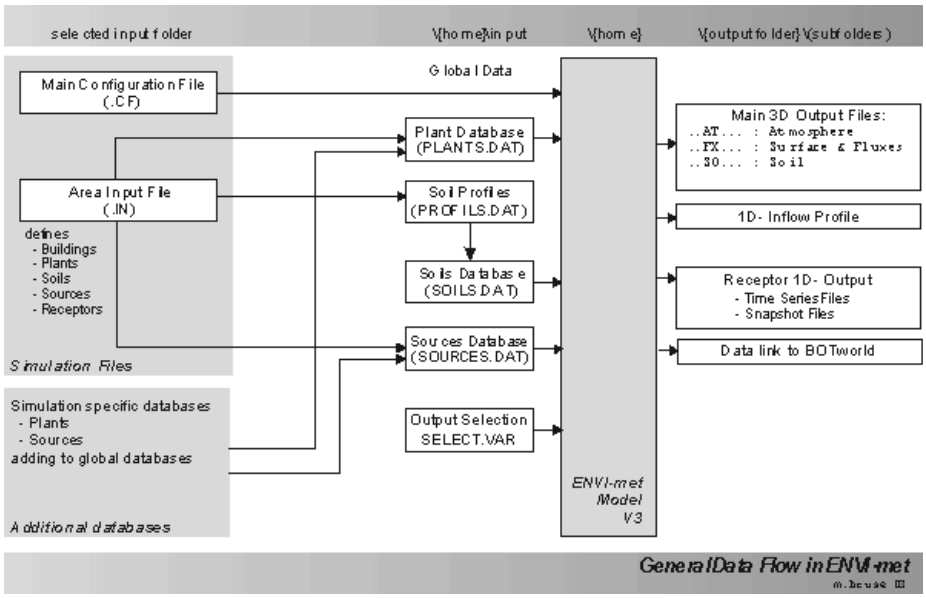
3.3.1.1. Estrutura

O ENVI-met calcula iterativamente o desempenho de uma área urbana em regime transiente, em um período que varia normalmente entre 24 e 72 horas. O programa funciona baseado em uma estrutura de quatro módulos que trabalham de maneira interativa (SPANGENBERG, 2004):

- **Atmosférico**: campo de velocidades, temperatura, vapor, umidade e poluentes;
- **Solo**: temperatura e umidade no solo, corpos d'água;
- **Superfícies**: fluxos nas superfícies horizontais e verticais, pavimentos, telhados e paredes dos edifícios;
- **Vegetação**: temperatura da folhagem, trocas de calor sensível e latente no nível das copas.

Figura 3.33: Fluxo de dados no ENVI-met

Fonte: BRUSE, 2006



28

Observa-se que os termos de advecção e difusão tridimensional estão anotados na forma u_i=u,v,w; x_i=x,y,z , para i=1,2,3

O modelo atmosférico utiliza as equações básicas de Navier-Strokes na forma diferencial conservativa (BRUSE, 2004)[28].

Equação 3.117

componente em x:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u_i \cdot \frac{\partial u}{\partial x_i} = \frac{\partial p}{\partial x} + K_m \cdot \left(\frac{\partial^2 u}{\partial {x_i}^2}\right) + \boldsymbol{f} \cdot (v - v_g) - S_u$$

Equação 3.118

componente em y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u_i \cdot \frac{\partial v}{\partial x_i} = \frac{\partial p}{\partial y} + K_m \cdot \left(\frac{\partial^2 v}{\partial {x_i}^2}\right) + \boldsymbol{f} \cdot (u - v_g) - S_v$$

Equação 3.119

componente em z:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u_i \cdot \frac{\partial w}{\partial x_i} = \frac{\partial p}{\partial z} + K_m \cdot \left(\frac{\partial^2 w}{\partial {x_i}^2}\right) + g \cdot \left(\frac{\theta(z)}{\theta_{ref}(z)}\right) - S_v$$

Onde $\boldsymbol{f}$ (=10^4 sec^{-1}) é o parâmetro de Coriolis, $\boldsymbol{p}$ é a perturbação da pressão local e $\boldsymbol{\theta}$ é a temperatura potencial no nível *z*. A temperatura de referência $\boldsymbol{\theta_{ref}}$ é um parâmetro meteorológico de escala maior,

dado pela temperatura média de todas as células do nível *z*, exceto aquelas ocupadas por edifícios. Não foi encontrada definição para $\mathbf{K_m}$. A densidade do ar foi removida da equação, considerando o fluido como não compressível e aplicando aproximação de Boussinesque para remover o empuxo vertical e substituindo-lo por um termo que parametriza o efeito do empuxo térmico. Além disso, uma equação de continuidade (Equação 3.120) deve ser satisfeita para todas as células a cada *time step* para manter a conservação de massa.

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0$$

Equação 3.120

Os parâmetros S_i descrevem o arrasto provocado pela vegetação. O efeito é parametrizado a partir do Leaf Area Index (LAD), parâmetro que descreve a área folheada da vegetação, de acordo com a Equação 3.121.

$$S_{u(t)}=\frac{\overline{\partial p'}}{\partial x_i}=\ c_{d,f}\cdot LAD\ (z)\cdot W\cdot u_i$$

Equação 3.121

Onde $\mathbf{W = (u^2+v^2+w^2)^{0,5}}$ é a velocidade média na altura *z* e o coeficiente mecânico de arrasto para as plantas ($\mathbf{c_{d,\,f}}$) é fixado em 0,2.

Como condição limite, as paredes dos sólidos são consideradas como tendo atrito. Um perfil de velocidades é ajustado nas condições de entrada e nas condições laterais e de saída, é adotada a condição de gradiente-zero de Neumann.

A distribuição da temperatura do ar e da umidade é dada por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t}+u_i\cdot\frac{\partial \theta}{\partial x_i}=-\frac{\partial p}{\partial z}+K_h\cdot\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial {x_i}^2}\right)+\frac{1}{c_p\cdot\rho}\cdot\frac{\partial Q_{R_longae}}{\partial z}+Q_H$$

Equação 3.122

$$\frac{\partial q}{\partial t}+u_i\cdot\frac{\partial q}{\partial x_i}=K_q\cdot\left(\frac{\partial^2 q}{\partial {x_i}^2}\right)+Q_E$$

Equação 3.123

Semelhante aos termos $\mathbf{S_i}$, os termos $\mathbf{Q_E}$ e $\mathbf{Q_H}$ são utilizados para compatibilizar o modelo atmosférico com a liberação de calor e vapor proveniente das plantas. O termo $\mathbf{Q_{R_longa}/\partial z}$ representa a divergência vertical da radiação de onda longa, levando em conta os efeitos de troca de calor radiante.

As temperaturas superficiais do solo, fachadas e tetos são utilizadas como condições limites. Na entrada do modelo, é possível, em teoria, selecionar a condição de contorno desejada, utilizando dados de um modelo unidimensional ou calculando as condições de entrada a partir da saída do modelo.

A turbulência é produzida quando o fluxo de ar recebe forças cortantes ao encontrar fachadas ou árvores. Em condições de ventos fortes, a magnitude da turbulência normalmente ultrapassa a sua dissipação, fazendo com que os vórtices sejam transportados pelo vento. Para simular este efeito, o programa tem acoplado um modelo de turbulência de ordem 1.5, calculando os valores da turbulência local e

da taxa de dissipação a partir da fricção com as superfícies e das condições de entrada no modelo.

Os fluxos radiativos são calculados a partir de uma parametrização das condições no topo do modelo. Estes fluxos são alterados pelos edifícios e pela vegetação, provocando um aquecimento das superfícies.

O solo é tratado como uma coluna vertical unidimensional, exceto pela camada superficial, com até 14 camadas indo a 2,0m de profundidade. A espessura das camadas varia com a profundidade, sendo a menor mais próxima à superfície. A capacidade térmica do solo é calculada a partir das propriedades termofísicas dos materiais e, no caso de solos permeáveis, da quantidade de água existente.

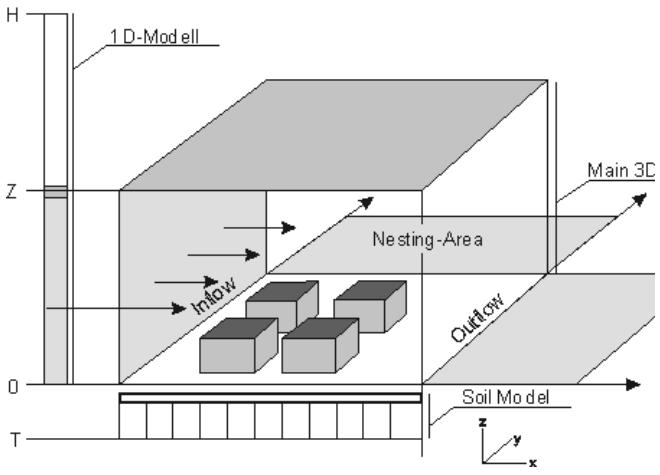
O programa apresenta ainda uma parametrização em relação à vegetação extremamente detalhada. Estes modelos serão estudados com mais detalhes em etapas futuras para verificar a possibilidade da sua incorporação em outros programas, mas não são objeto deste trabalho. Ainda assim, nas simulações da área de estudo, foi avaliado o impacto da vegetação nas variáveis climáticas.

Os edifícios, por sua vez, são representados de forma simplificada. Todos eles são compostos do mesmo material e apresentam o mesmo albedo, um valor médio para o modelo. A temperatura interna é constante e a troca por condução desconsidera o acúmulo de calor na estrutura do edifício. A modelagem, no entanto, é eficiente quando trata das trocas radiativas, calculando as interreflexões da radiação de onda curta e as trocas de onda longa por aquecimento das superfícies.

A discretização da atmosfera é feita através de uma malha estruturada, escolhida a priori, sobre a qual são dispostas as edificações, os materiais do solo e a vegetação. As células são cúbicas, com dimensões determinadas pelo usuário, recomendando-se que sejam menores que 10m. O programa conta com cinco versões diferentes que são utilizadas de acordo com o tamanho da malha escolhida.

Figura 3.34: Visão geral do modelo e dimensões de malha disponíveis

Fonte: BRUSE, 2006



Tamanho da malha	Requisitos de memória
60 x 60 x 30	-
80 x 80 x 30	-
120 x 80 x 30	256 MB
130 x 130 x 30	256 MB
200 x 200 x 25	512 MB
250 x 250 x 25	1GB

A dimensão vertical das células merece consideração especial. Recomenda-se que a altura do modelo seja sempre superior a 2,5

vezes a altura do maior prédio, o que provavelmente se deve à utilização de um modelo unidimensional como condição limite do topo da atmosfera discretizada. Baseando-se nas recomendações de Oke (2004), pode-se inferir que esta é uma distância razoável para que as condições da camada abaixo do nível das coberturas se misturem, produzindo valores médios representativos da área como um todo, que possam interagir com o modelo unidimensional. A dimensão vertical pode ser constante (equivalente) ou variável (telescópico). No caso do *grid* equivalente, a primeira célula, mais próxima à superfície, é dividida em cinco partes, para melhor descrever os fluxos na região. Isso significa que a modelagem deve sempre contar com cinco células a menos que o máximo permitido pela versão utilizada. O *grid* telescópico deve contar com uma célula a menos que o máximo permitido pela versão utilizada. Não foi encontrada razão para isso nas referências do programa. Observa-se que a divisão da última camada de células, próxima ao solo, que confere precisão aos cálculos nas condições de contorno, não acontece nas células adjacentes às edificações. Isto se deve ao *grid* estruturado, que dificultaria o tratamento de edificações não alinhadas ou descontínuas.

3.3.1.2. Análise dos termos ou etapas

A modelagem de áreas no ENVI-met é bastante direta e intuitiva. O *grid* é representado somente em planta e para cada célula horizontal é informado o tipo de cobertura: pavimentação, vegetação e edifícios em número de andares. O programa permite a sobreposição de imagens sobre a malha, o que facilita a modelagem de áreas complexas.

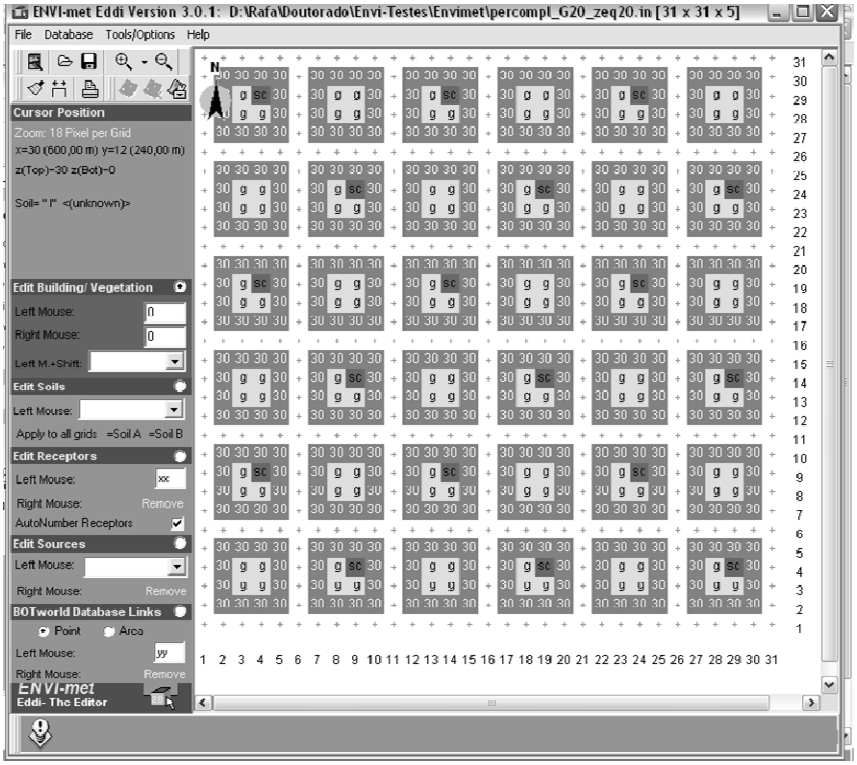


Figura 3.35: Modelagem de uma área no ENVI-met

A escolha de malhas maiores implica aumento considerável da capacidade computacional requerida e do tempo de simulação. No entanto, o *software* apresentou extrema dependência da qualidade da malha.

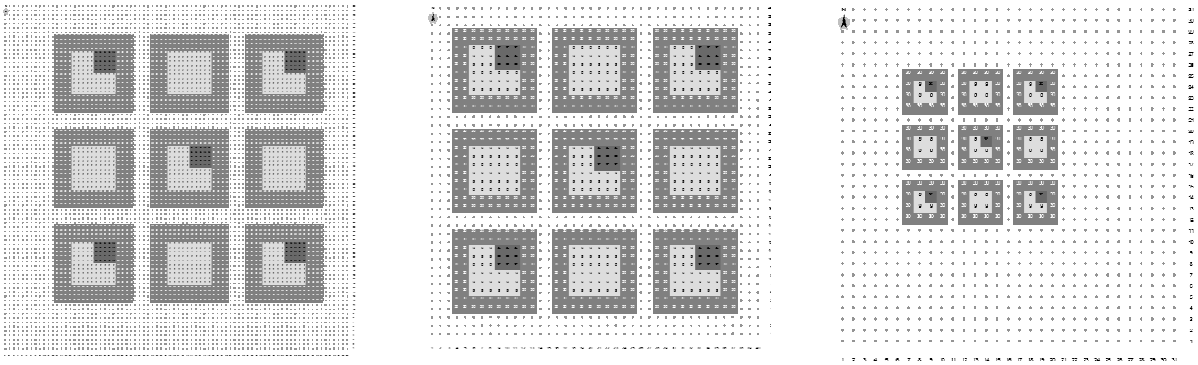


Figura 3.36: Área modelada com três níveis de refinamento

(5 m, 10 m e 20 m)

Os arquivos de configuração contêm as informações para as condições iniciais de simulação, bem como parâmetros relativos à posição na terra e ao comportamento dos edifícios. Os parâmetros foram aqui agrupados em conjuntos, não necessariamente na ordem em que aparecem no arquivo de configuração. O primeiro conjunto de parâmetros diz respeito às características da simulação em si e são mostrados na Tabela 3.6.

Itens do ENVI-met *Configuration Editor*	**Parâmetros e/ou valores adotados na simulação do estudo de caso**
Start simulation day	21.12.2001
Start simulation at time	00:00 am
Total simulation time (hours)	48
Save model each	180min
Timing Intervalo (em segundos) para atualizar informações sobre as variáveis e salvar	*surface data = 30s*** *flow field* = 600s** *radiation / shadows* = 900s** *plant processes* = 600s**
Time steps • adaptação dinâmica; • critério: altura do sol ("Smaller time steps are normally required when the solar input is high, whereas bigger ones can be used in the morning or evening"); • altura solar dividida em 3 intervalos.	*-Sun height for switching dt(0) -> dt(1) =40*** *-Sun height for switching dt(1) -> dt(2) =50*** *-Time step (s) for interval 1 dt(0) =10.0*** *-Time step (s) for interval 2 dt(1) =5.0*** *-Time step (s) for interval 3 dt(2) =2.0***
Plant Model	*- Stomata res. approach (1=Deardorff, 2=**A-gs**)=2*** *- Background CO2 concentration [ppm] =350***

Tabela 3.6: Parâmetros de simulação no ENVI-*met Configuration Editor*

** valores *default* do programa.

O dia e a hora da simulação são definidos de acordo com a estação que se deseja simular ou, no caso de comparação com medidas de campo, o dia em que a medição foi realizada. Buscou-se sempre iniciar as simulações no período noturno, minimizando a possibilidade de

erros de convergência devido à existência de radiação de onda curta nas primeiras horas da simulação.

É recomendado descartar os resultados das primeiras 12 horas, o que resulta em tempos de simulação entre 36 e 72 horas. Períodos mais longos de simulação podem ser utilizados, mas consomem tempo e capacidade computacional. Quanto maior a complexidade e o tamanho do modelo tanto maior será o aumento no tempo de processamento devido à seleção de um período maior de simulação. É importante observar também que a maior parte das condições de contorno são constantes, logo, tempos de simulação mais longos representam uma série de dias com características semelhantes. No caso de dias estáveis, com poucas nuvens e vento, isso levaria a um aquecimento progressivo do modelo, o que nem sempre corresponde à realidade. Neste trabalho, o padrão é a simulação de 48 horas.

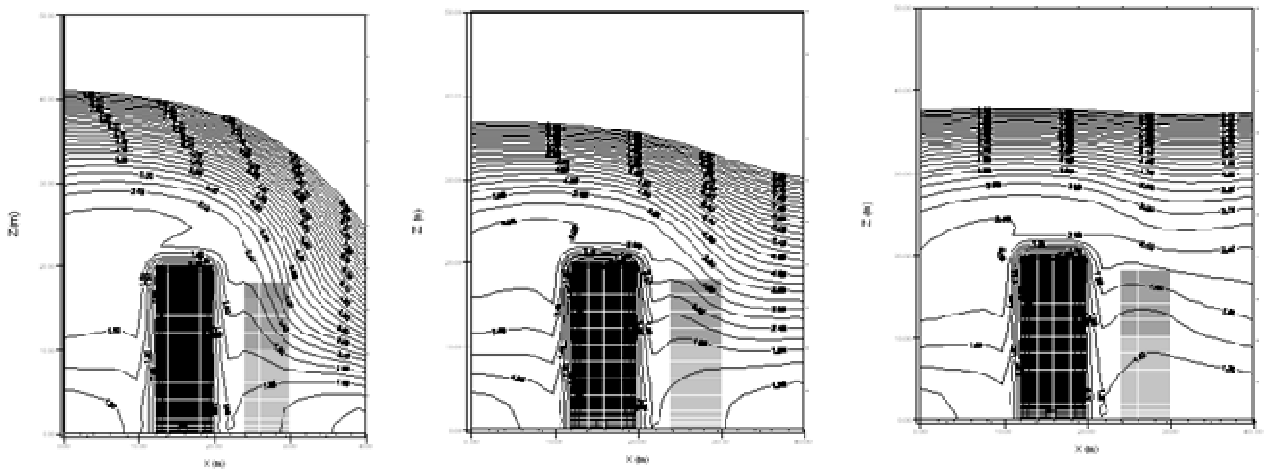
Os *time steps* para cálculo são variáveis de acordo com a altura solar, diminuindo o intervalo de cálculo em momentos de aquecimento mais intenso. Variações significativas nas condições de contorno (principalmente na radiação e no campo de ventos) podem levar à instabilidade da simulação, sendo recomendada a redução dos *time steps*. Contudo, isto acarreta um tempo maior de processamento. O tempo de atualização das condições de contorno também pode ser ajustado na função *Timing*. Isto também pode melhorar as condições de estabilidade da simulação, o que deve ser estudado caso a caso.

As condições limites são dadas por um modelo unidimensional da atmosfera, mas teoricamente poderiam ser programadas para incorporar o efeito da simulação, através do uso de condições cíclicas. Entretanto, não foi possível habilitar esta opção no decorrer das simulações.

O programa apresenta três opções para condição de contorno: fechada, na qual os valores do modelo unidimensional são copiados para a borda a cada nova simulação, aberta, na qual os valores calculados nas células laterais são copiados para a borda e cíclica, na qual os valores do final do modelo são copiados para a borda (Figura 3.37)

Figura 3.37: Condições de contorno fechada, aberta e cíclica

Fonte: BRUSE. 2006



O segundo grupo de variáveis contém as condições climáticas de inicialização e de contorno do modelo. A temperatura e a umidade relativa servem apenas como situação inicial do modelo, enquanto os demais parâmetros se mantêm constantes durante toda a simulação.

Itens do *ENVI-met Configuration Editor*	Parâmetros e/ou valores adotados na simulação do estudo de caso
Wind speed 10m above ground*	0,8m/s
Wind direction	135^0
Initial temperature atmosphere (K)	296 (= 22^0 C)
Specific humidity in 2.500m (g/Kg)	7**
Relative humidity in 2m	88%
Soil data	*upper layer* (0-20cm) = 297K (24 C^0) e 50%UR** *middle layer* (20-50cm) = 295K e 60%UR** *deep layer* (bellow 50cm) = 292K (24 C^0) e 60%UR**
Turbulence	*-Turbulence Closure ABL (0:diagn.,1:prognos.)=1*** *-Turbulence Closure 3D Modell (0:diag.,1:prog)=2*** *-Upper Boundary for e-epsilon (0:clsd.,1:op.)=0***
Clouds	*Fraction of LOW clouds (x/8) =0* *Fraction of MEDIUM clouds (x/8) =0* *Fraction of HIGH clouds (x/8) =0*

** valores *default* do programa.

Tabela 3.7: Parâmetros de ambientais no ENVI-*met Configuration Editor*

Além da temperatura e umidade iniciais, são informadas também a direção e a velocidade do vento, a umidade relativa a 2500 m para o modelo unidimensional, as características do solo, a quantidade de nuvens. Observou-se durante as simulações de teste que velocidades de vento abaixo de 0,8m/s ativam o modo térmico e causam instabilidade no programa, sendo mantido este valor como padrão nas simulações. Os demais parâmetros foram determinados, nas simulações preliminares, a partir de dados do Climáticus.

O último conjunto de parâmetros se refere à localização geográfica e às características da área modelada. A latitude, juntamente com o dia do ano, determinam a posição do sol e a radiação incidente. A rugosidade determina o atrito entre as superfícies e o ar. Os parâmetros dos edifícios determinam as trocas por condução entre os ambientes interno e externo. Conforme mencionado, as edificações têm todas as mesmas propriedades: albedo das paredes e da cobertura, condutibilidade térmica e temperatura interna. É possível ainda inserir fontes de poluentes e definir receptores em pontos específicos para análises mais detalhadas.

Itens do *ENVI-met Configuration Editor*	Parâmetros e/ou valores adotados na simulação do estudo de caso
Position	latitude = -23^0 50'
	longitude = -46^0 39'
	longitude time zone = -3
Roughness length z0 at reference point*	0,1**
Building properties	temperatura interna = 293K
	albedo paredes = 0,2**
	albedo cobertura = 0,3**
	condutância térmica paredes = 1,94 W/ m^2 k**
	condutância térmica cobertura = 6 W/ m^2 k**
Sources (fontes de poluentes)	*Type of emitted gas/particle*
• matéria particulada;	*Name of component =PM***
• CO_2;	*Particle Diameter in [µm] (0 for gas) =10***
• gases.	*Particle Density [g/cm³] =1***
	*Update interval for emission rate [s] =600***
Receptors	- atualizar e salvar informações sobre os receptores a cada = 30 min
• dados de pontos selecionados do modelo;	
• criação de até 100 receptores em *Area Input File*;	
• para cada receptor é criado um arquivo de *snapshot* *.1D(dados de um momento específico), permitindo a análise de diferentes receptores, ao mesmo tempo, para cada evento;	
• e um arquivo *time series* *.1D (dados deste ponto para a simulação corrida), contendo a evolução de diferentes variáveis em um mesmo ponto, ao longo da simulação.	

** valores *default* do programa.

Tabela 3.8: Parâmetros de características da área no ENVI-*met Configuration Editor*

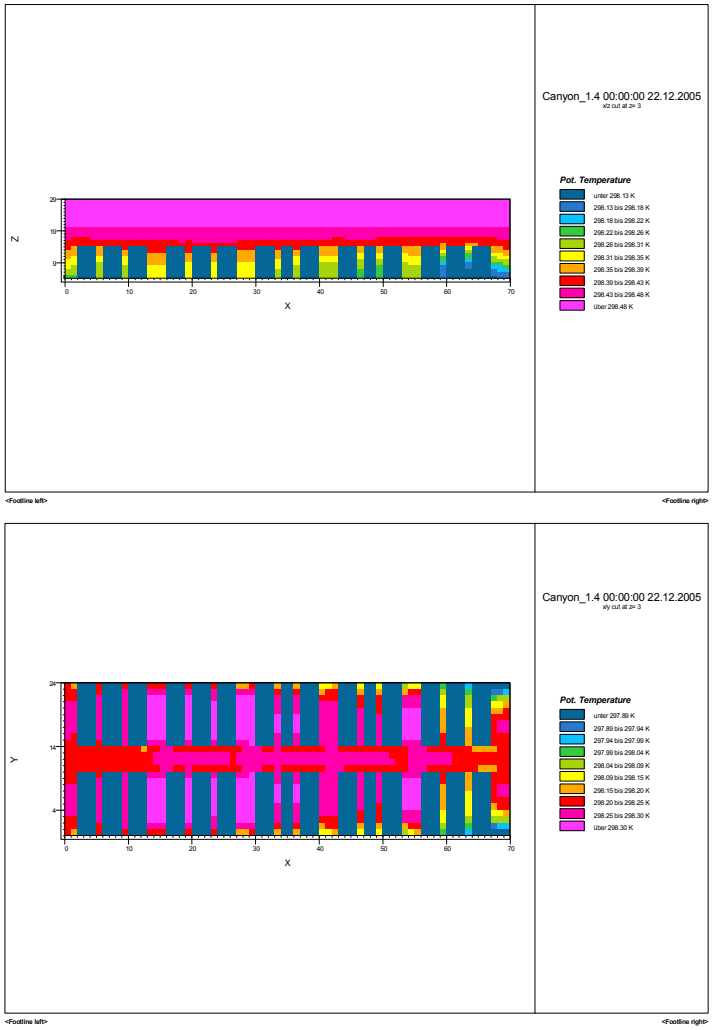
3.3.1.3. Exemplo de resultados

As simulações de ENVI-met mais simples duram entre 24 e 72 horas, as mais complexas chegam a durar uma semana. O *software* não apresenta capacidade de processamento paralelo e não permite retomada do processo em caso de interrupção. Deste modo, algumas panes de energia no período de junho a setembro prejudicaram bastante o andamento das simulações.

Em uma simulação transiente de 24 horas, é comum que problemas de convergência ocorram no período das temperaturas mais altas, entre 12h e 15h. Assim, perde-se um grande tempo em modelos falhos que não produzem resultados satisfatórios, já que os erros só ocorrem após um tempo considerável de simulação.

Os resultados gráficos produzidos são bastante interessantes, mas sua confiabilidade deve ser verificada em estudos futuros.

Figura 3.38: Exemplo de resultado em ENVI-Met, corte e planta, respectivamente



3.3.2. *Aplicativos de CFD (CFX)*

3.3.2.1. Estrutura

Dentre os diversos aplicativos de CFD disponíveis no mercado, optou-se por utilizar o CFX 5.7, devido à disponibilidade de licenças no Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética (LABAUT). Já havia também alguma experiência acumulada na utilização do aplicativo, que havia sido usado nos trabalhos de doutoramento de Prata (2006) e de mestrado de Cóstola (2006). O aplicativo foi ainda objeto de um *workshop* com o Dr. Allan Harries, do escritório BDSP Partnership de Londres, em novembro de 2005.

Ao contrário do ENVI-met, que é voltado exclusivamente para a simulação de ambientes urbanos, o CFX permite a simulação de virtualmente qualquer situação envolvendo a mecânica dos fluidos, em qualquer escala e com qualquer tipo de condição de contorno, desde que se tenha capacidade computacional para tanto. Isto significa que a parametrização da simulação é mais complexa, com menos variáveis assumidas *a priori*, sendo responsabilidade do usuário a modelagem adequada da situação desejada. Embora esta pareça ser uma

desvantagem do aplicativo, na verdade ela o torna muito mais versátil que o ENVI-met. Uma vez realizada a parametrização, o CFX permite a importação de critérios de simulação já definidos, facilitando o trabalho em simulações futuras.

O aplicativo é composto de uma série de módulos nos quais podem ser executados desde a confecção do modelo até o tratamento dos resultados. O processo é descrito na Tabela 3.9.

Tabela 3.9: Módulos do CFX com as respectivas atividades

Modulo	Atividades
ICEM	– Correções simples na geometria; – Verificação da qualidade e estanqueidade do modelo; – Definição das condições de contorno, através da separação das "*Parts*"; – Parametrização e elaboração da malha(*mesh*).
CFX-Pro	– Definição do regime de simulação (permanente ou transiente); – Definição das condições de contorno (entradas, saídas, aberturas e paredes); – Definição das equações a serem utilizadas para o cálculo, inclusive as de parametrização da turbulência; – Definição dos critérios de convergência e intervalos de iteração; – Definição de equações que definam parâmetros da simulação – Localização de pontos de monitoramento.
CFX-Solver	– Apresentação dos parâmetros de simulação em arquivo de texto; – Programação do tipo de simulação (serial ou paralelo); – Monitoramento da convergência das equações de momento e de massa; – Geração de resultados.
CFX-Post	– Visualização dos resultados (campos de pressão, velocidade, temperatura , etc) – Cálculo de parâmetros (vazão, Yplus, etc.)

O fluxo de informação e os tipos de arquivos estão detalhados na Figura 3.39.

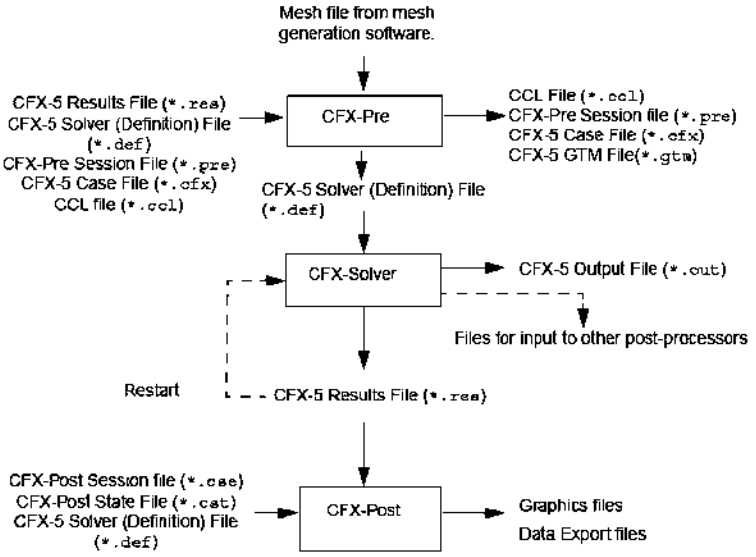


Figura 3.39: Fluxo de informações e arquivos no CFX 5

Fonte: CFX , 2003

3.3.2.2. Confecção do modelo

O modelo para CFX pode ser confeccionado em qualquer aplicativo de CAD. No caso de utilização do AUTOCAD, da Autodesk, recomenda-se confecção do modelo utilizando as ferramentas "*extrude*", "*union*" e "*subtract*". O modelo deve conter todos os objetos de interesse juntamente com o entorno, além de um volume para representar o domínio fluido. Este volume deve ser estanque, ou seja, sem aberturas, e o procedimento mais adequado para simulações urbanas é subtrair os edifícios do domínio, gerando um negativo volumétrico da área de estudo.

O formato de importação mais adequado é o ACIS e deve ser eliminado qualquer elemento que não influencie a simulação. O modelo pode ser exportado como um bloco único, sendo possível separar as superfícies posteriormente, caso se deseje.

O nível de detalhe do modelo a ser utilizado é proporcional à sua proximidade da área de interesse. Como regra geral, Harries (2005) recomenda a modelagem de obstáculos em um raio de 300 metros a partir da área de interesse. Geralmente, obstáculos cuja distância do ponto de interesse é superior a 10 vezes a sua altura não devem ser modelados.

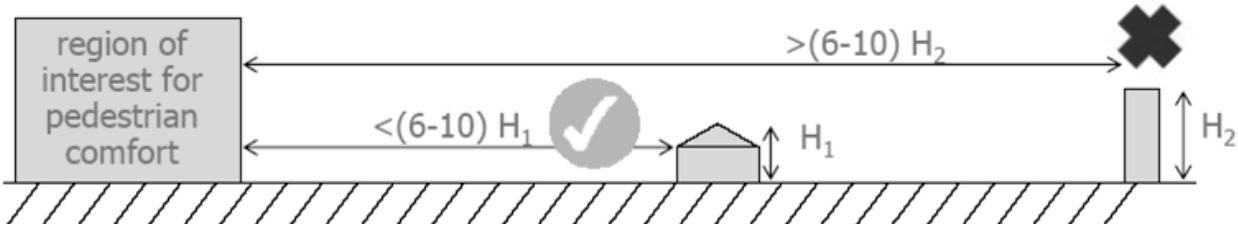


Figura 3.40: Recomendação de objetos a serem modelados

Fonte: HARRIES, 2005

Em relação à dimensão do domínio, é importante evitar que a área de blocagem exceda 3% de qualquer seção transversal no sentido do fluxo. Cost (2004) recomenda ainda as dimensões do domínio como sendo 5 vezes a altura do edifício estudado (**H**) a barlavento e nas laterais. A sotavento, deve-se garantir uma distância de 15H, para que o fluxo possa assumir novamente o perfil original.

O formato do domínio pode ser tanto retangular quanto circular, cada um com suas respectivas vantagens e desvantagens. O formato circular permite a simulação de todas as direções de vento com uma mesma malha, alterando-se apenas a direção do vento no arquivo do tipo "*ccl*"[29], sendo interessante no caso de rodadas em série (utilizando-se arquivos BAT). O domínio pode ser realmente cilíndrico ou sextavado, com 8 lados, permitindo a simulação das 8 principais direções de vento. A desvantagem deste modelo é que qualquer uma das faces pode estar a sotavento da área de interesse, devendo estar a uma distância de 15H da mesma. Com isso, aumenta-se o tamanho do domínio, e conseqüentemente o número de elementos na malha e o tempo de simulação.

29 Arquivo gerado no CFX-Pre que contém os dados da simulação e pode ser exportado e mesclado com outras malhas, desde que elas contenham as mesmas "*parts*".

A Figura 3.41 indica os parâmetros recomendados para o tamanho do domínio durante a confecção do modelo.

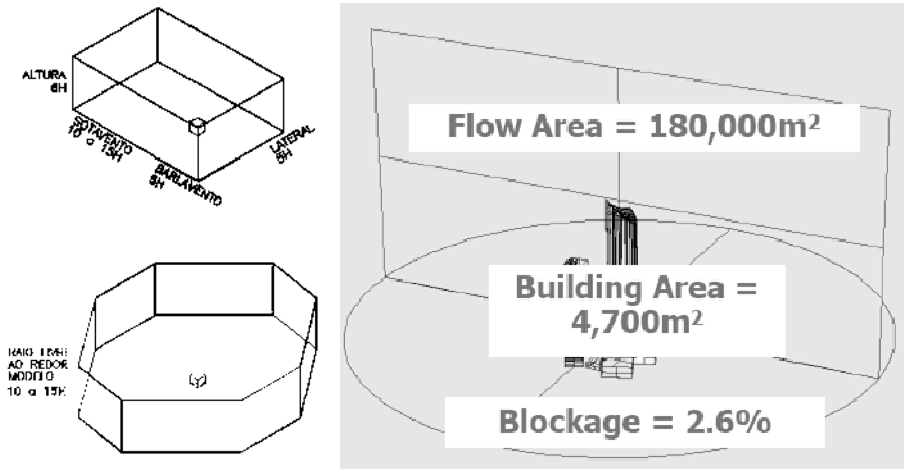


Figura 3.41: Recomendações para confecção de modelos de simulação para áreas externas

Fonte: CÓSTOLA ,2006; HARRIES, 2005

A título de exemplo, foram realizadas simulações com os mesmos modelos utilizados no ENVI-met: seis quadras com blocos de perímetro. Observa-se que, caso se optasse por utilizar torres, o domínio deveria ser ampliado (Figura 3.42).

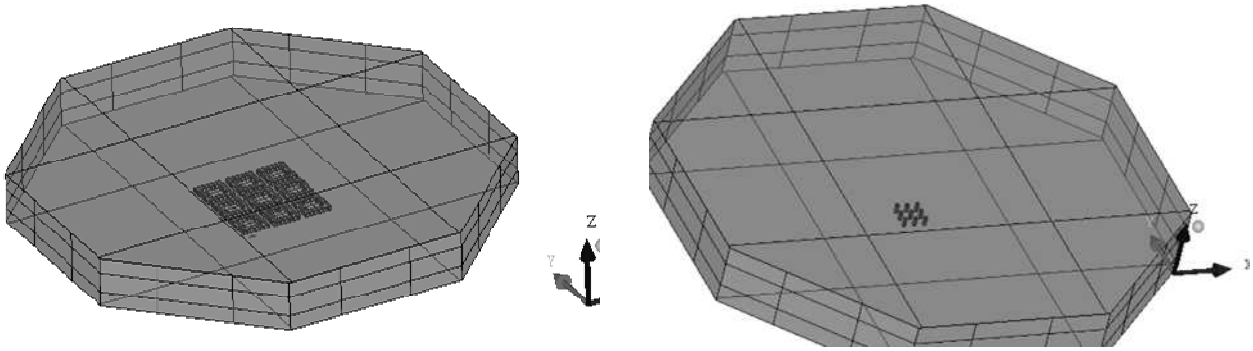


Figura 3.42: Modelos tridimensionais para quadras com blocos perimetrais e com torres altas, respectivamente

Antes de gerar a malha, devem-se agrupar as superfícies que receberão tratamento semelhante no pré-processamento. Estes grupos de superfícies recebem o nome de *Parts* e o planejamento

Uma seleção mais detalhada de *Parts* toma bastante tempo para ser realizada, principalmente se há um grande número de superfícies e se superfícies próximas devem pertencer a *Parts* diferentes. No entanto, esta seleção permite maior flexibilidade na atribuição das condições de contorno. É possível atribuir as mesmas condições de contorno a *Parts* diferentes, mas não se podem atribuir condições de contorno diferenciadas a elementos de uma mesma *Part*.

3.3.2.3. Determinação da malha

A malha (ou *mesh*) é a discretização do espaço fluido dentro do domínio, definindo os pontos e volumes para os quais as para os quais as equações fundamentais serão resolvidas. A malha é gerada automaticamente pelo programa, através de um método iterativo,

desde que se informem os parâmetros dos elementos máximos e mínimos. Os parâmetros a serem utilizados são:

- ***Maximum element size***: é o tamanho do maior elemento permitido. A documentação do *software* informa que este número deve ser sempre múltiplo de 2, mas na prática o programa permitiu a utilização de qualquer número. Como determina o tamanho das células nas regiões do domínio onde não há determinação por parte da geometria, este parâmetro tem grande impacto no número total de células. Caso a malha não seja muito refinada nos pontos de geometria mais complexa, este parâmetro torna-se ainda mais determinante do número final de elementos.
- ***Natural size***: é o tamanho do menor elemento permitido. Recomenda-se que seja uma ou duas ordens de grandeza inferior à dimensão do menor elemento geométrico no domínio. Este parâmetro, no entanto, só tem impacto no refinamento da malha próximo a elementos de pequenas dimensões, afetando pouco o número total de tetraedros na malha.
- ***Cells in gap***: é o número de células existente entre dois elementos do domínio. Estes elementos podem ser tanto as próprias superfícies quanto o espaço de ar entre elas. Quanto mais complexa a geometria e menores os espaços entre elas, maior a influência deste parâmetro no número total de elementos. Para geração de malhas de tamanho razoável, com as geometrias utilizadas, este valor ficou entre 3 e 8.

A combinação destes parâmetros resulta o número total de elementos de malha no domínio. Este número determina a capacidade computacional necessária para rodar a simulação e o tempo utilizado em cada iteração. Aproximadamente são necessários 1GB de RAM para cada 1.000.000 de elementos. Para se indicar a relação entre os parâmetros e o número final de elementos, foi realizado um teste em um domínio octogonal inscrito em um círculo de 750 m de raio, com 9 blocos de 20 x 20 x50 m uniformemente espaçados no centro do domínio. O número final de elementos e o aspecto final da malha são mostrados respectivamente na Tabela 3.10 e na Tabela 3.11.

Tabela 3.10: Número de elementos na malha para variação dos parâmetros de geração

		Cells in Gap		
Max elem	***Nat. Size***	**2**	**4**	**6**
64	2	68050	195994	480509
	4	68048	195954	482005
	6	68082	195994	482005
32	4	351664	475509	653368

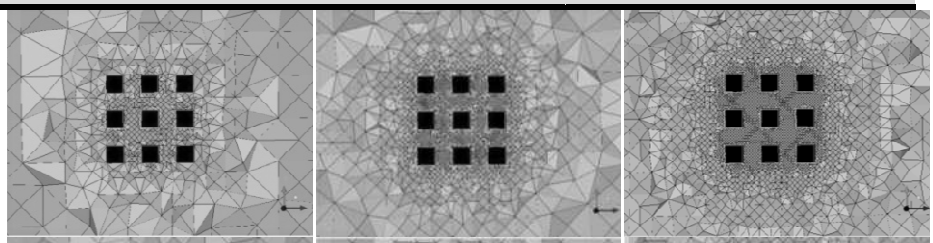
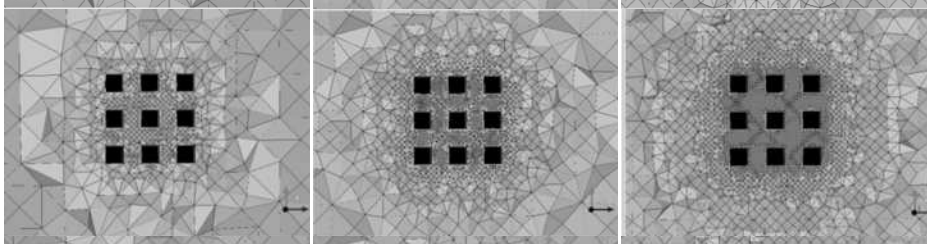
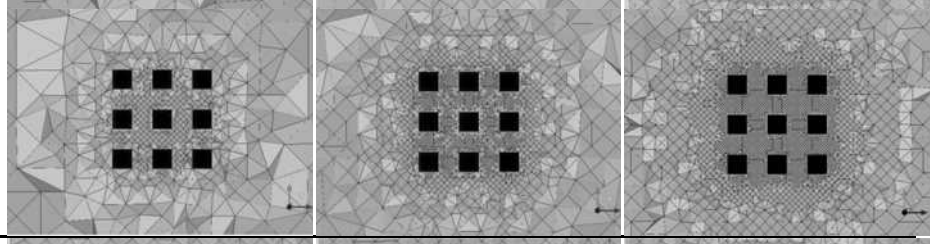
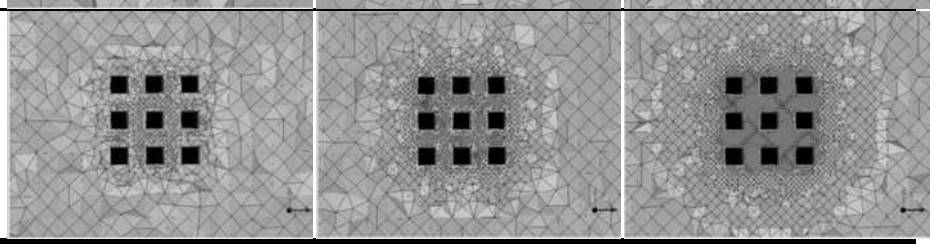
Max elem	*Nat. Size*	*Cells in Gap* 2	4	6
64	2			
	4			
	6			
32	4			

Tabela 3.11: Aspecto final da malha para variação nos parâmetros de geração

Observa-se que, a medida que a malha é refinada próxima aos elementos menores, a importância do tamanho máximo no número final de elementos é reduzida.

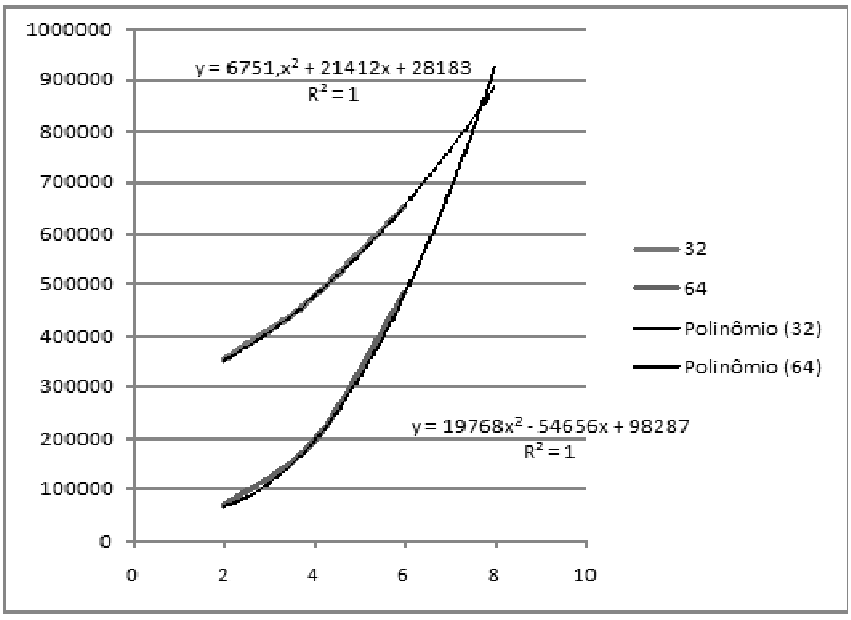


Figura 3.43: Relação entre o número de elementos e o valor do parâmetro *Cells in gap*

A malha é automaticamente adequada à forma, refinando-se nos detalhes. Nas bordas, uma borda de prismas é inflada com o objetivo de descrever melhor as trocas superficiais.

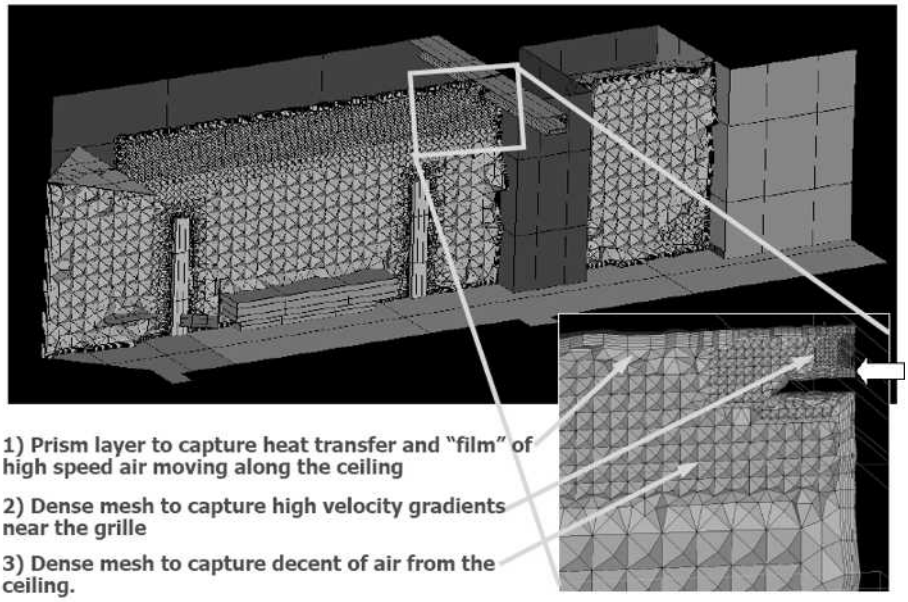


Figura 3.44: Confecção automática de borda com prismas

Fonte: HARIES , 2005

A malha pode ainda ser alterada, eliminando tetraedros com razão de aspecto achatada que dificultariam a obtenção de convergência.

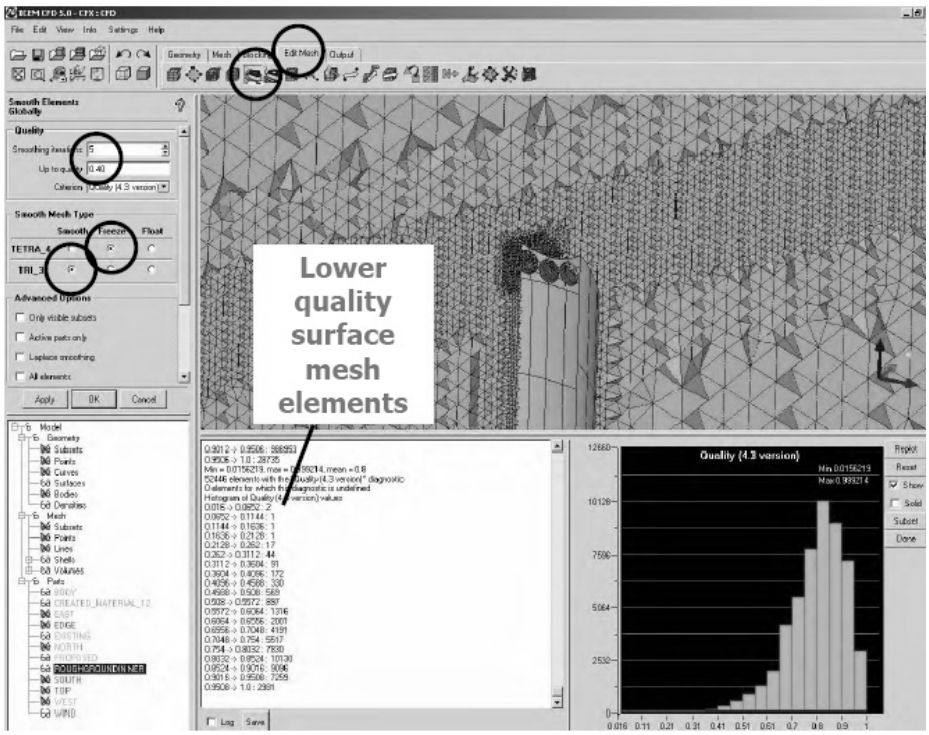


Figura 3.45: Modelos tridimensionais para quadras com blocos perimetrais

Fonte: HARIES , 2005

Para se certificar da confiabilidade da simulação, a independência da malha deve ser checada. A equipe do prof. Hansen apresentou o método conhecido como *extrapolação de Richardson* (BLOCKEN & CARMELIET, 2007), em que são realizadas simulações utilizando

malhas em cujo tamanho dos elementos é dobrado. A partir dos resultados, é possível estabelecer a diferença entre a solução analítica teórica e a solução obtida na discretização das equações, permitindo a correção do chamado "erro de discretização". Este procedimento está sendo aplicado às simulações já realizadas para verificar sua confiabilidade.

Outro parâmetro importante na avaliação da malha, segundo Cóstola (2006), é o chamado "*Yplus*". Este parâmetro é a distância adimensional da parede, baseada na distância da primeira célula à parede e na força cortante na parede. O valor é calculado após a simulação inicial, mas é medida da qualidade da malha. São recomendados valores maiores do que 20 para uma boa resolução próxima às paredes. Segundo CFX (2003), no entanto, o tratamento automático das paredes através de funções de escala variável, este critério teve sua importância diminuída.

3.3.2.4. Domínio

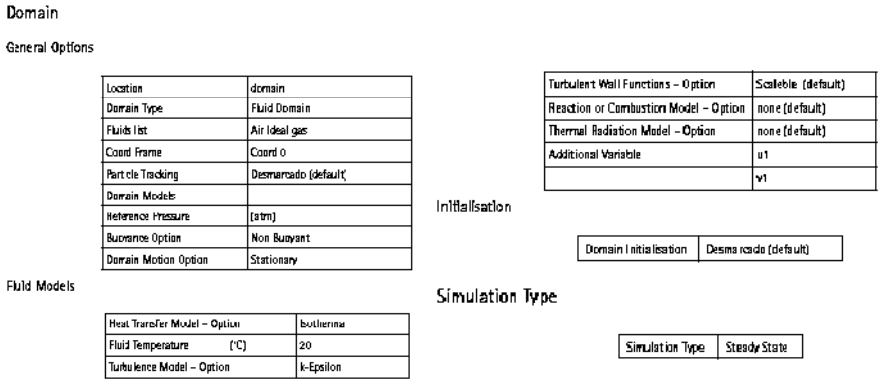
A parametrização das simulações foi tomada de Cóstola (2006), que efetuou amplo estudo a respeito das condições de contorno necessárias a um bom resultado de simulação. Os valores estão indicados a seguir. O primeiro passo é definir se a simulação se dará em regime permanente ou transiente. Simulações apenas do campo de ventos normalmente são realizadas em regime permanente, já que as condições de contorno se mantêm constantes e a relação entre as o campo de velocidades e a velocidade de entrada do ar no modelo se mantém constante para velocidades de vento médias ou altas. A partir daí, segue-se para a especificação das características do domínio.

O domínio é o volume a ser estudado. Deve-se selecionar o volume, especificando o tipo de domínio que se trata: fluido ou sólido. Escolhe-se então o material desejado, sendo para fins dos trabalhos de clima urbano normalmente o ar a 25°C ou o ar como gás ideal. A pressão de referência deve pode a pressão atmosférica local.

Em seguida, deve-se determinar o regime térmico a ser utilizado. Simulações de vento em condição de estabilidade neutra normalmente desprezam as variações de temperatura, considerando que as forças mecânicas promovem uma mistura efetiva do ar que se torna isotérmico. Para simulações urbanas em regime transiente, com velocidade de entrada variável, é desejável a utilização de um modelo térmico. Caso se opte por um modelo térmico, devem-se determinar as condições de empuxo (*buoyance*), determinando-se as forças em ação sobre o fluido. Normalmente informa-se a gravidade no eixo z, com um valor de -9,8 m/s².

A definição do modelo de turbulência também é realizada neste momento, optando-se por qualquer um dos modelos de primeira e segunda ordem disponíveis. Para simulações iniciais, utiliza-se normalmente o modelo k-ε , por ser o que oferecer a melhor relação custo (tempo de processamento) benefício (precisão) As funções turbulentas de superfície devem se manter como *scalable*, para que

elas possam se ajustar às interações entre o fluido e as superfícies sólidas.



Domain

General Options

Location	domain
Domain Type	Fluid Domain
Fluids list	Air Ideal gas
Coord Frame	Coord 0
Particle Tracking	Desmarcado (default)
Domain Models	
Reference Pressure	[atm]
Buoyance Option	Non Buoyant
Domain Motion Option	Stationary

Turbulent Wall Functions – Option	Scalable (default)
Reaction or Combustion Model – Option	none (default)
Thermal Radiation Model – Option	none (default)
Additional Variable	u1
	v1

Initialisation

Domain Initialisation	Desmarcado (default)

Fluid Models

Heat Transfer Model – Option	Isothermal
Fluid Temperature (°C)	20
Turbulence Model – Option	k-Epsilon

Simulation Type

Simulation Type	Steady State

Figura 3.46: Exemplo de parametrização do domínio

Fonte: CÓSTOLA,2006

3.3.2.5. Condição limite de entrada e saída

A especificação adequada das condições de contorno é fundamental para o cálculo adequado do campo de velocidades e temperaturas no fluido. Podem ser classificadas como entradas (*inlets*), saídas (*outlets*) ou aberturas (*openings*) por onde o ar pode entrar ou sair conforme o resultado do cálculo.

CFX (2003) apresenta recomendações neste sentido, indicando as melhores opções para a determinação das condições de contorno:

- **Mais robusta:** velocidade/fluxo de massa na entrada; pressão estática na saída, sendo a pressão total na entrada um resultado implícito do cálculo.
- **Robusta:** pressão total na entrada, velocidade, fluxo de massa na saída. A pressão estática na saída e a velocidade na entrada são parte da solução.
- **Sensível à estimativa inicial:** pressão total na entrada; pressão estática na saída. O fluxo de massa no sistema faz parte da solução.
- **Muito pouco confiável:** pressão estática na entrada e na saída. Esta combinação não é recomendada, já que neste caso, tanto a pressão total na entrada quanto o fluxo de massa no sistema são resultados implícitos do cálculo. Neste caso, as condições de contorno restringem pouco o sistema. Esta solução é possível no caso de forças internas geradoras de movimento do ar, como partes móveis e diferenças de temperatura.
- **Impossível:** A pressão total não pode ser especificada para as saídas. Esta condição é incondicionalmente instável quando o fluido sai do domínio onde a pressão total é especificada.

O domínio deve ter extensão suficiente para que as condições de entrada sejam iguais às condições de saída. Deste modo, é comum

que se estabeleça uma pressão nula na saída, para que se possa verificar a adequação do domínio. Contudo, é possível estabelecer as condições de saída de modo a repetir a situação da entrada do fluxo. Foi o que ocorreu nas simulações de Cóstola (2006), em que a todas as faces laterais do domínio foram atribuídas as mesmas condições de contorno, (*Openings* ao invés de *Inlets* ou *Outlets*) sendo as saídas e entradas determinadas pela direção de vento especificada.

É possível utilizar funções para definir as condições de entrada e saída do fluido, utilizando-se expresões matemáticas, denominadas *CEL expressions*.

Boundary Details

CFX: Boundaries

Opening

Basic Settings

Flow Regime - Option	Subsonic
Mass and Momentum	
Option	Cart. Vel. Components
U	u1
V	v1
W [m/s]	0
Turbulence	
Turbulence - Option	Medium (Intensity=5%)

Figura 3.47: Exemplo de parametrização das condições de contorno de entradas e saídas

Fonte: CÓSTOLA,2006

3.3.2.6. Condição limite das superfícies sólidas

As superfícies sólidas são definidas como paredes (*walls*) na especificação da condição de contorno. No caso, podem ser utilizadas três situações em relação ao comportamento aerodinâmico destas superfícies:

- ***Free slip***: a superfície é considerada como se não houvesse atrito. O fluido não consegue atravessá-la, mas não há arraste, estabelecendo um perfil de escoamento uniforme ao longo do elemento. No caso de simulações de vento externas, esta condição é aplicada normalmente nas paredes e no teto do domínio, reduzindo o impacto destas superfícies no comportamento do fluido.
- ***No slip – smooth wall***: há um coeficiente de atrito entre a superfície e o fluido, mas a rugosidade é considerada de ordem de grandeza muito inferior à do elemento em si. Este tipo de condição limite é colocada nas envoltórias da edificação e no piso do modelo, representando as superfícies urbanas onde a aspereza dos elementos se torna secundária na escala em que o fluxo é tratado.
- ***No slip – rough wall***: permite atribuir à superfície uma rugosidade, aumentando o seu coeficiente de atrito. Com isso, é possível estabelecer uma rugosidade na parte inicial do modelo ou considerar elementos na fachada o tais como varandas, venezianas e detalhes arquitetônicos que interfiram no fluxo de vento.

Piso

Basic Settings

Boundary Type	Wall
Location	Piso
Coord Frame	Desmarcado (default)
Create Thin Surface Partner	Desmarcado (default)

Boundary Details

Wall Influence on flow - Option	No slip
Wall Velocity	Desmarcado (default)
Wall Roughness	
Option	Smooth Wall

Prédio

Basic Settings

Boundary Type	Wall
Location	predio
Coord Frame	Desmarcado (default)
Create Thin Surface Partner	Desmarcado (default)

Boundary Details

Wall Influence on flow - Option	No slip
Wall Velocity	Desmarcado (default)
Wall Roughness	
Option	Smooth Wall

Teto

Basic Settings

Boundary Type	Wall
Location	teto
Coord Frame	Desmarcado (default)
Create Thin Surface Partner	Desmarcado (default)

Boundary Details

Wall Influence on flow - Option	Free slip

Figura 3.48: Exemplo de parametrização das condições de contorno para superfícies sólidas

Fonte: CÓSTOLA,2006

Para simulações térmicas, é possível ainda estabelecer a temperatura da superfície ou um fluxo de calor. Caso se utilize um modelo de radiação no programa, a emissividade e a refletância devem ser determinadas.

3.3.2.7. Expressões com variáveis

O CFX 5.7 permite a utilização de equações internas para cálculo de variáveis que não são feitos pelo programa. As possibilidades de utilização desta capacidade são diversas. No caso das simulações iniciais, limitou-se a estabelecer um perfil de velocidades logarítmico em condições de estabilidade neutra para as condições de contorno na entrada (Figura 3.49). No entanto, está sendo estudada a possibilidade de incorporar as trocas térmicas estudadas nos itens anteriores em simulações em regime transiente.

CCS file

```
LIBRARY :
  CEL :
    EXPRESSIONS :
      unitlen = 1. [ m ]
      unittime = 1. [ s ]
      unitvel = 1. [ m^1s^-1 ]
      ak = 0.41 [ ]
      cmu = 0.09 [ ]
      cmuhalf = cmu^0.5
      gradh = 500*unitlen
      pi180 = pi/180
      dir = 0
      dira = (180 + dir)*pi180
      thetaa = dira
      zref = 0.0*unitlen
      zuref = 150*unitlen
      uref = 5.564*unitvel
      z0 = 0.001*unitlen
      epsinner = 0.4*unitlen
      epsouter = 1.5*unitlen
      ustar = ak*uref/log((zuref-zref)/z0)
      zmod = abs(z + 0.005*unitlen)
      speed = ustar*log((zmod-zref)/z0)/ak
      u1 = speed*sin(thetaa)
      v1 = speed*cos(thetaa)
      te1 = (ustar^2)/cmuhalf
      ed1 = (ustar^3)/(ak*(zmod-zref))
      tamb = 288.15 [ K ]
      pref = 101325. [ Pa ]
      rgas = 287.09601 [ J kg^-1 K^-1 ]
      denref = pref/(rgas*tamb)
      pamb = pref*(exp(-g*z/(rgas*tamb))-1.0)
    END
  END
END
```

Figura 3.49: Exemplo de expressões com variáveis

Fonte: CÓSTOLA,2006

3.3.2.8. Controle de solução

O controle de solução determina os parâmetros para a solução matemática do modelo pelo módulo de cálculo. São estabelecidos: o intervalo de tempo (*time step*), que pode ser calculado automaticamente ou definido pelo usuário; o número máximo de iterações e o critério de convergência a ser adotado. As simulações são interrompidas quando se atinge ou o número máximo de interações ou o critério de convergência, o que ocorrer primeiro.

Solver Control

Basic Settings

Advection Scheme	High resolution
Convergence Control	
Timescale Control	Auto TimeScale (default)
Max N° Iterations	100 (default)
Length Scale Option	Conservative (default)
Maximum Timescale	Desmarcado (default)
Convergence Criteria	
Residual Type	RMS
Residual Target	0,0001
Conservation Target	Desmarcado (default)
Equation Class Setting	default

Figura 3.50: Exemplo de parametrização dos controles de solução da simulação

Fonte: CÓSTOLA,2006

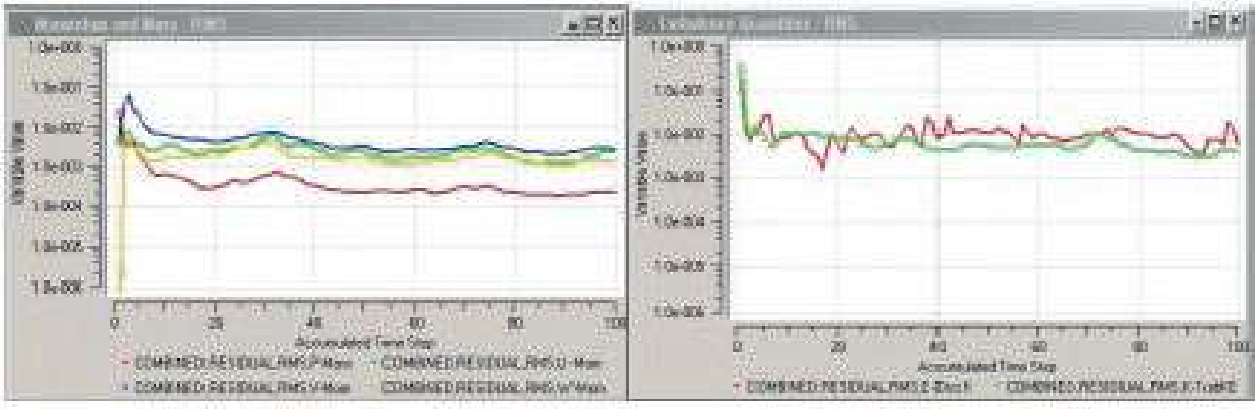
3.3.2.9. Exemplos de resultados obtidos

Para que a simulação produza resultados confiáveis, CFX (2003) recomenda a verificação do nível de convergência, que pode ser observado a partir dos gráficos RMS gerados durante a simulação. Os critérios devem ser os seguintes:

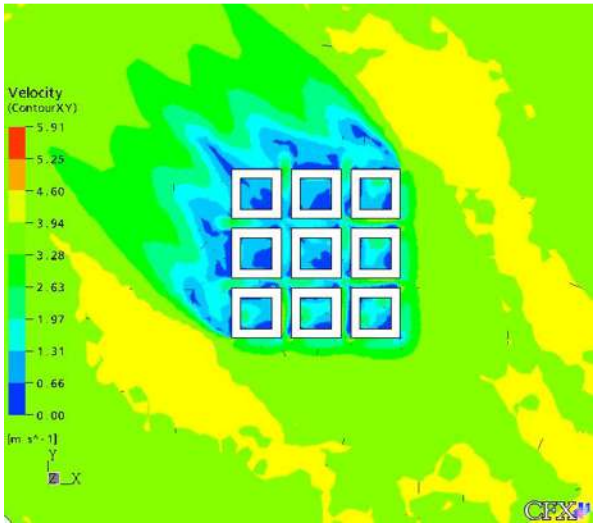
- Convergências acima de 5×10^{-4} são muito pobres e só permitem realizar avaliações gerais;

- Convergências entre 5 x 10-4 e 1 x 10^{-4} são convergências regulares, que podem ser aplicadas;
- Convergências de 1 x 10^{-4} são boas convergências, devendo ser a meta da maioria das simulações;
- Convergências de de 1 x 10^{-5} são difíceis de serem obtidas.

Figura 3.51: Exemplo de simulação com convergência pobre (10^{-3})



Os resultados podem ser visualizados de forma gráfica, indicando o campo de ventos, pressões ou temperaturas, dependendo das variáveis setadas.



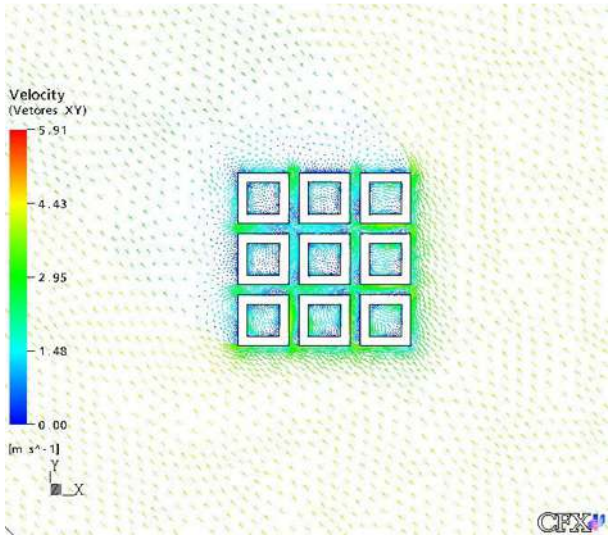


Figura 3.52: Exemplo de resultados para simulação com o pátio com contornos e vetores

3.4. Avaliação dos modelos

Observa-se que é tão importante definir os modelos quanto determinar o seu modo de utilização. Ainda há questões em relação à avaliação do clima urbano que devem ser respondidas para que o seu estudo seja útil aos arquitetos e planejadores.

A escolha das variáveis urbanas trabalhadas nos modelos é adequada, trabalhando com aspectos típicos do planejamento urbano tais como razão de aspecto das vias e dos edifícios, taxa de ocupação (com outras denominações, mas em essência o mesmo resultado) e características dos materiais. Porém, duas outras questões se colocam.

A primeira delas é como avaliar o resultado final e, a partir daí, propor alterações que causem melhorias nas condições climáticas. Assis (2000) propõe a composição de modelos climáticos com índices de conforto, o que pode ser adequado para o tratamento do conforto para pedestres e usuários do espaço externo. Isso demandaria, além da temperatura do ar, outras variáveis que também são fornecidas adequadamente por alguns dos modelos, tais como temperaturas superficiais, velocidade do vento e radiação incidente. No caso dos usuários internos às edificações, além da abordagem do conforto é possível adotar também uma abordagem energética,nos moldes adotados por Brandão (2004). Neste caso, avalia-se o consumo de energia para condicionamento dos espaços internos como parâmetro de conforto. A segunda questão, que decorre da primeira, é como se avalia este desempenho ao longo do tempo. A questão levantada é se bastaria uma temperatura máxima ou um perfil diário para avaliar o desempenho de um recinto urbano ou seria necessária uma avaliação estatística de longo prazo. A complexidade dos modelos urbanos e a dificuldade de obtenção de dados meteorológicos adequados podem forçar a primeira solução, embora a segunda pareça ser mais adequada. A solução tradicional é realizar o balanço para um dia aleatório de tempo estável, de modo a caracterizar o período em que as condições urbanas diferem mas significativamente das rurais. Ainda assim, este critério não define a qualidade do espaço urbano e a escolha dos períodos de avaliação de desempenho ainda carece de discussão aprofundada por parte dos urbanistas e arquitetos.

Avaliando-se os modelos comparativamente, vê-se que eles foram apresentados em ordem crescente de complexidade. O CTTC trata quase que exclusivamente das trocas radiativas, colocando todos os termos em função do acréscimo de temperatura em relação a uma temperatura base. O resultado também se restringe à temperatura do *canyon*, sem tratar adequadamente questão da temperatura superficial, que pode ser necessária para uma avaliação adequada do conforto do usuário. Os pontos fortes do modelo são a sua simplicidade, a facilidade de obtenção dos dados meteorológicos necessários (já que ele utiliza como referência temperaturas ao nível do solo) e o potencial do CTTC como um parâmetro de avaliação de desempenho dos materiais e superfícies urbanos. Por ser definido em horas de atraso, o significado físico do termo torna-se facilmente acessível ao projetista e ao planejador. Observa-se ainda que a parametrização do termo pode ser facilmente obtida através de trabalhos de campo, sendo necessário somente medir a temperatura e a radiação liquida.

O modelo de Mills (1997) inclui de forma mais intensiva a questão das trocas convectivas sensíveis, tanto internas à UCL, quanto com a camada limite urbana. A formulação para determinação do fluxo de ar nas duas camadas é a mais complexa e detalhada dentre os três modelos, fornecendo, por isso, resultados mais precisos. Ainda assim, o autor afirma que as equações descrevem o fluxo adequadamente apenas sem situações muito específicas (no caso em *canyons* com razão de aspecto **H/W** elevadas). Uma maior precisão poderia ser

adicionada ao modelo com o uso de um CFD em paralelo que fornecesse as velocidades de vento e/ou fosse informado pelas temperaturas superficial e do ar obtidas no modelo. Outro ponto forte é a abordagem do armazenamento de calor no substrato, feita em regime transiente. Contudo, isto adiciona significativa complexidade matemática ao modelo, que acaba por utilizar intervalos diferenciados e cálculos iterativos. Espacialmente, o modelo não permite variação, embora tenha a vantagem de considerar o *canyon* urbano como uma sucessão de edifícios esparsos e não como uma superfície continua como os demais modelos. Novamente, isso adiciona complexidade nos cálculos de fator de forma, mas contribui para a precisão do modelo. No caso de utilização conjunta com o CFD, esta característica se torna ainda mais importante, já que o modelo permitiria avaliar os fluxos de ar perpendiculares ao *canyon* que penetram através dos edifícios que o compõem.

Como resultado, o modelo oferece o comportamento diário tanto da temperatura do ar, quanto das temperaturas superficiais, além de fornecer valores de velocidade de vento com maior precisão. Isto o torna bastante adequado para a composição com um índice de conforto. Em relação aos dados de entrada, todavia, tanto este modelo quanto o de Borghi, Corbeta & De Biase (2000) utilizam valores de temperatura e velocidade de vento e temperatura não ao nível do solo, mas em uma altura de referência (1,5 vezes a altura do maior edifício no primeiro e 100m no segundo). A velocidade de vento no nível de referência pode ser facilmente obtida a partir da velocidade da estação meteorológica (tomado a 10 m de altura) com a aplicação de um perfil logarítmico. Os perfis de temperatura, no entanto, não são tão fáceis de serem extrapolados, apresentando grandes variações ao longo do dia. A obtenção deste dado, portanto, pode ser um obstáculo à utilização destes modelos.

O terceiro modelo – UCLM30 e UCLM60 – é o que apresenta resultados mais completos. Sua formulação contempla todas as trocas superficiais e volumétricas, inclusive as latentes. Também é um ponto forte o fato de o modelo mostrar seus resultados não só no tempo como também no espaço, embora as trocas horizontais não sejam contempladas. A utilização de fotos de satélite para a obtenção de dados de entrada é uma estratégia que tem vantagens e desvantagens. As informações obtidas são todas relativas à estrutura urbana e, por isso, podem ser obtidas a partir de uma única foto. Uma vez processada a foto, é possível obter um grande número de dados ao mesmo tempo para uma área significativa. A desvantagem é que fotos de satélite com a resolução desejada podem ser difíceis de obter ou não estarem disponíveis para a área em estudo. Ainda assim, o modelo permite a utilização das equações para o balanço em uma única célula, cujos dados poderiam ser obtidos de outra forma, aumentando assim a versatilidade do modelo. A principal deficiência do modelo é a falta de uma definição clara ou da parametrização de algumas variáveis importantes, tais como o armazenamento de calor e as propriedades do solo.

É importante ressaltar que os modelos podem ser usados de maneira combinada, em série ou em paralelo, com um suprindo as deficiências do outro. Porém, para que isto ocorra de maneira eficaz, é fundamental uma normalização na nomenclatura das variáveis. Em alguns textos, ocorre de um mesmo símbolo ter sido utilizado para descrever variáveis diferentes.

Os modelos de CFD apresentaram-se como ferramentas poderosas, que se tornaram o foco principal desta pesquisa, ainda que utilizados em conjunto com modelos de balanço energético paramétricos

Devido ao maior interesse dos pesquisadores do laboratório no aplicativo ENVI-met, que apresenta uma interface mais amigável e parametrização, investiu-se inicialmente nas simulações com este programa.

Foram realizadas várias simulações paramétricas com o aplicativo ENVI-met, que serviram para indicar as suas potencialidades e limitações. Uma das principais questões é o tamanho da área de estudo e a independência da malha. Nos estudos realizados, a opção de malhas com 3m, 5m, 10m ou 20m alterou fortemente o resultado. Observa-se ainda que, como o aplicativo não apresenta a opção de utilização da condição de limite cíclico, as simulações são bastante influenciadas pelo tamanho da área de modelagem, já que o perfil de vento inicial sempre se refere a uma área desobstruída. Observou-se ainda a dificuldade apresentada pelo programa em considerar o efeito da massa térmica urbana, devido à modelagem simplificada das edificações.

No caso do CFX, devido à grande dimensão das áreas de estudo e aos pequenos afastamentos entre os edifícios, há grande dificuldade em estabelecer parâmetros de malha compatíveis com as capacidades computacionais disponíveis.

As condições limites simulam apenas a condição de atmosfera neutra e regime permanente, sendo necessário aprimorar a parametrização para que o programa possa descrever adequadamente também o campo de temperaturas na área simulada. Apesar das dificuldades encontradas, verificou-se um grande potencial na utilização do CFX na simulação de áreas urbanas. Como ele permite a incorporação de novas equações no seu cálculo, os modelos de balanço podem ser aplicados sobre as superfícies, em um procedimento semelhante ao ENVI-met.

Embora a intenção inicial fosse utilizar o CFX somente para simulação de vento em situação atmosférica neutra, pretende-se agora, depois de um desenvolvimento da modelagem do balanço térmico, buscar conjugar as duas ferramentas, de modo a produzir resultados mais precisos e passíveis de aplicação.

É necessário investigar a parametrização necessária para que o CFX possa reproduzir adequadamente as condições urbanas não só em regime permanente, mas também em ciclos de 24 a 48 horas, como faz o ENVI-met.

Deste modo, as duas etapas agora se fundem em uma única atividade, que deve ser conduzida de maneira concomitante e complementar, com os resultados se alimentando mutuamente.

Estudo de Caso

4

O estudo dos modelos e da sua aplicação no planejamento exigiu a existência de uma área piloto, que será descrita a seguir.

4.1. A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e a capital

Sendo a maior aglomeração urbana da América do Sul, a região metropolitana de São Paulo conta com 20 milhões de habitantes, sendo que 11 milhões vivem no município sede[30]. Por sua extensão, ela configura um excelente campo de estudos para vários fenômenos urbanos, com impactos sociais, econômicos e ambientais intensos. A urbanização paulistana, embora tenha ocorrido em uma escala maior, apresentou padrões e tipologias semelhantes às das demais cidades brasileiras.

Figura 4.1: São Paulo, localização. Destacada a região metropolitana e, em preto, o município

Fonte: Elaboração própria sobre Abreu (2006)

O município de São Paulo é cortado pelo Trópico de Capricórnio, localizado a 23°37’ de latitude sul e 46°39’ de longitude oeste (FROTA & SCHIFFER, 1995). Embora se encontre a 802m de altitude, está em média a 45 km da costa, em uma região denominada Planalto Atlântico, sendo influenciada pelas condições oceânicas (TARIFA & AZEVEDO, 2001).

Do ponto de vista histórico, a cidade teve seu início com as missões jesuítas do século XVI, servindo como ponto de partida para a entrada

30

Os dados da cidade foram levantados em BRASIL (2006), a população da região metropolitana calculada a partir somatória da população dos municípios, fornecida na mesma fonte.

dos bandeirantes no interior do país. No entanto, ela só começou a tomar sua forma metropolitana atual a partir do século XIX, com o ciclo econômico do café e a construção de uma rede viária de comunicação entre o interior e o litoral, para o escoamento da produção (MEYER, GROSTEIN & BIDERMAN, 2004).

Ela se localiza na bacia do rio Tietê, com sua morfologia estruturada pelo rio e seus afluentes, tais como o rio Pinheiros e o rio Tamanduateí, e pela configuração topográfica resultante (SÃO PAULO, 2002b). A ocupação das terras altas e das encostas das colinas do divisor de águas foi um importante fator na determinação da estrutura radial da cidade (ANTONUCCI, 2005). Na Figura 4.2, pode-se observar claramente as várzeas dos rios e o divisor de águas, onde se localiza a Avenida Paulista, um dos centros de referência econômica na cidade.

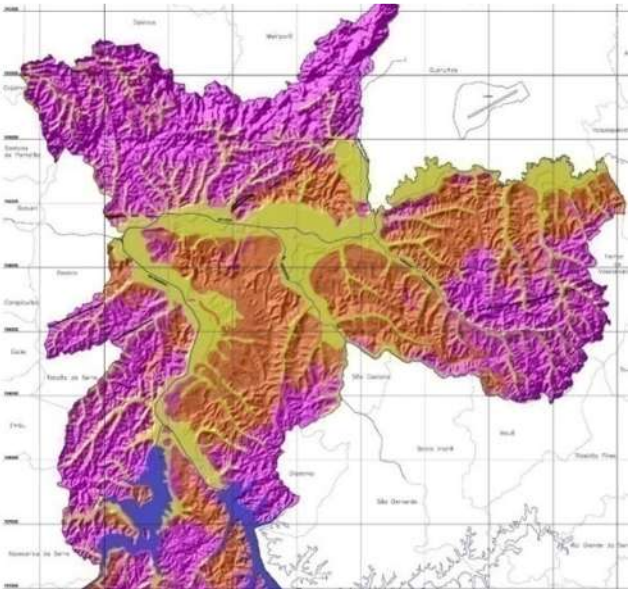


Figura 4.2: Mapa de São Paulo sobre imagem de relevo

Fonte: SÃO PAULO, 2002b

O processo de crescimento da cidade foi próximo das colinas do vale do Anhangabaú, expandindo-se de forma praticamente concêntrica desde então.

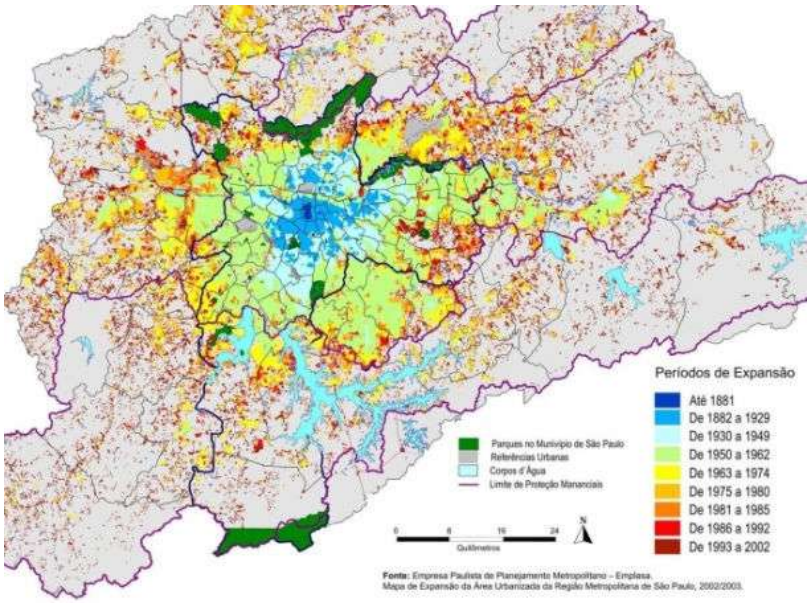


Figura 4.3: Evolução da mancha urbana de São Paulo por períodos

Fonte: SÃO PAULO, 2005

Nas décadas de 30 e 40, a cidade sofreu um novo surto de desenvolvimento, impulsionada pelo lucro das lavouras de café e mais tarde da industrialização. A concentração das atividades na área central elevou o preço dos terrenos, provocando a necessidade de verticalização (MENNEH, 1997). Após este período foram elaboradas as primeiras propostas de zoneamento urbano para a cidade, a maioria delas baseada nos padrões americano. Estas propostas buscavam proteger os valores imobiliários de áreas de alto padrão e consolidar a ordem social segregada que vinha sendo construída desde o século XIX (FELDMAN, 2005).

A partir de 1957, a mancha urbana envolvendo a cidade de São Paulo e alguns municípios vizinhos foi denominada "Aglomeração Paulistana", um estágio embrionário da futura metrópole. A concentração das chamadas "funções centrais" se deslocou do Centro em direção à Av. Paulista. O processo continuou nas décadas seguintes, expandindo-se em direção ao rio Pinheiros (MEYER, GROSTEIN & BIDERMAN, 2004). Neste momento, a região sudoeste da cidade começou também a desenvolver uma ocupação periurbana, em vários momentos buscando repetir o modelo das cidades-jardins encontradas na Europa. A ocupação, entretanto, era esparsa e cercada de grandes glebas ou terrenos vagos e muitas vezes desarticulada, como ocorria em vários outros pontos da malha urbana, principalmente nas periferias (ANTONUCCI, 2005; MEYER, GROSTEIN & BIDERMAN, 2004).

Nas décadas seguintes, observou-se um intenso processo de espalhamento da mancha urbana, devido ao grande fluxo migratório que trouxe mais de 2 milhões de novos habitantes para a cidade (MEYER, GROSTEIN & BIDERMAN, 2004). Este processo levou à formação de uma periferia pobre, com grande aumento da área construída através de uma especulação imobiliária baseada em loteamentos clandestinos. Simultaneamente, a verticalização aconteceu, principalmente a partir de 1964, expandindo-se mais tarde para os bairros pericentrais, até que gradualmente foram se intensificando em outros bairros da região sudoeste (MENNEH, 2000, ANTONUCCI, 2005).

Em 1972, pela primeira vez, teve-se uma Lei Geral de Zoneamento (7.805/72) para a cidade, abrangendo todas as suas regiões, construída a partir de um mosaico de legislações que vinham se formando nas décadas anteriores, com o objetivo de proteger interesses imobiliários locais, como já citado (FELDMAN, 2005).

A legislação reforçou o modelo arquitetônico difundido pelo movimento moderno, com a consolidação da torre centralizada isolada no terreno, com grande altura e pouco recuo em relação aos vizinhos (MACEDO, 1997). Esta tipologia serviu de base para a ocupação vertical em várias cidades brasileiras.

Na década de 80, apesar da recessão econômica, ocorreu um maciço investimento na indústria da construção civil em São Paulo. Bairros consolidados da cidade vêm desde então vivenciando um processo continuo de substituição do estoque construído com a verticalização da

habitação e de alteração no de uso de grande parte das edificações horizontais restantes, que são transformadas em edifícios de comércio e serviço (MEYER, GROSTEIN & BIDERMAN, 2004).

Figura 4.4: Ocupação vertical no centro de São Paulo e em bairro residencial

Fonte: RUBIES & RUBIES, 2005; http://www.skyscrapercity.com /showthread.php?t=226164

A verticalização atingiu vários bairros residenciais, dentre eles os bairros do Morumbi, Moema e Santana que respondiam por um quinto a um terço das unidades lançadas anualmente. A construção de residências verticais concentrou-se principalmente no setor sudoeste da cidade e em algumas áreas específicas de outras regiões, como Tatuapé e Santana. O desenvolvimento destes empreendimentos pode ser acompanhado pela Figura 4.5, onde o gráfico indica a evolução histórica dos lançamentos a partir de dados da Empresa Brasileira de Estudos de Patrimônio (Embraesp) entre 1980 e 1995 (citado por MENNEH, 2000).

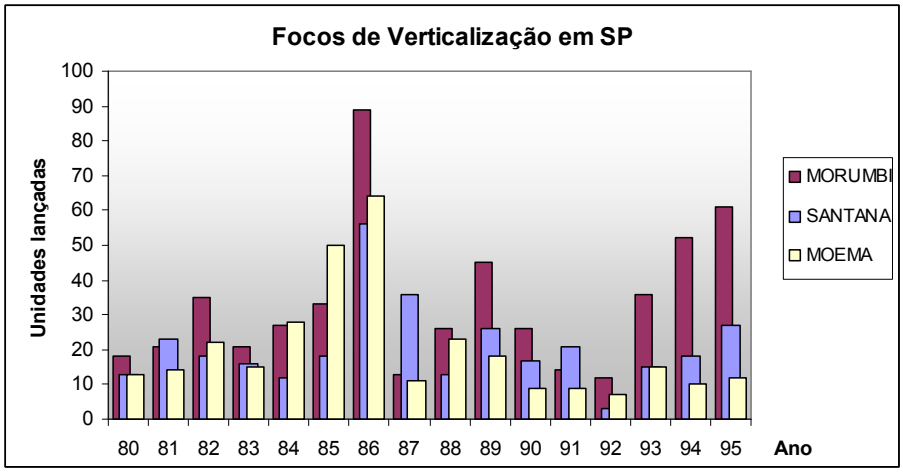


Figura 4.5: Número de lançamentos imobiliários em três bairros residenciais de São Paulo

Fonte: MENNEH, 2000

Atualmente, com a redução do fluxo migratório, o aumento da população não é mais tão significativo. Observa-se que os bairros centrais e pericentrais têm perdido sistematicamente população, inclusive bairros nobres localizados em áreas nobres da cidade. As periferias e demais municípios da região metropolitana, por sua vez, apresentam crescimentos populacionais significativos, principalmente nas áreas de menor renda da cidade.

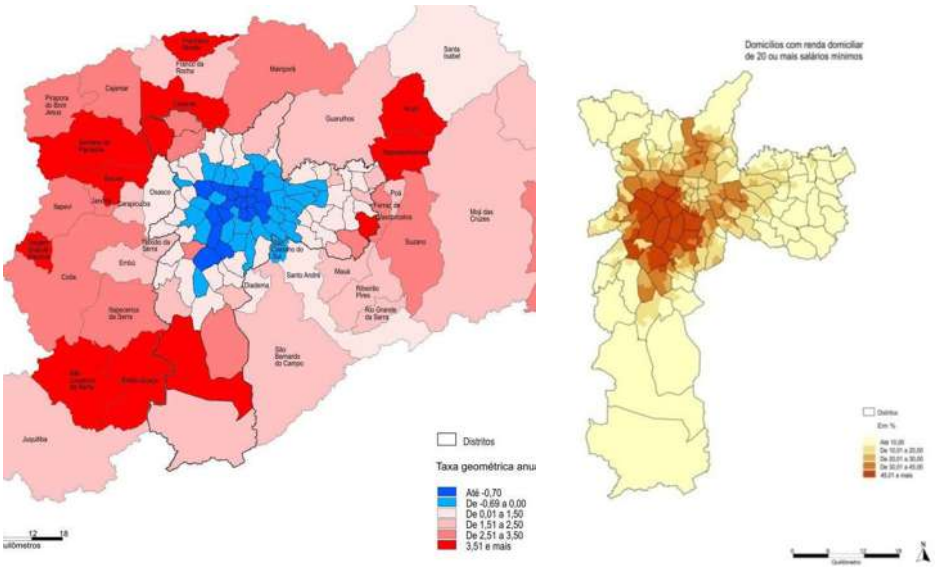


Figura 4.6: Mapa de crescimento demográfico e de concentração de famílias com renda acima de 20 salários mínimos

Fonte: SÃO PAULO (2005)

Na Figura 4.6, à esquerda, pode-se observar as áreas na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) com decréscimo populacional (azul), compreendendo todo o denominado "centro expandido" da capital. Comparando-se com o mapa da direita, percebe-se que a redução populacional se encontra nas áreas de maior renda da cidade, com o crescimento se voltando para as áreas mais periféricas. Há uma desconexão entre as áreas de maior densidade construída e as áreas de densidade populacional. Nota-se também que a área urbana continua a se expandir para áreas indevidas, tais como as áreas de proteção a mananciais, e que o aumento da densidade em algumas áreas vem acompanhado de uma perda na qualidade ambiental dentro e fora das habitações (MEYER, GROSTEIN & BIDERMAN, 2004). Nas áreas valorizadas, a especulação imobiliária é intensa, ditando os rumos da arquitetura e do espaço urbano.

Politicamente, a cidade busca superar os problemas advindos da grande dimensão a partir de uma descentralização da administração, na forma de subprefeituras, que agrupam entre 3 e 4 distritos.

Figura 4.7: Divisão político-administrativa do município São Paulo

Fonte: SÃO PAULO (2005)

4.2. Definição da área de estudo

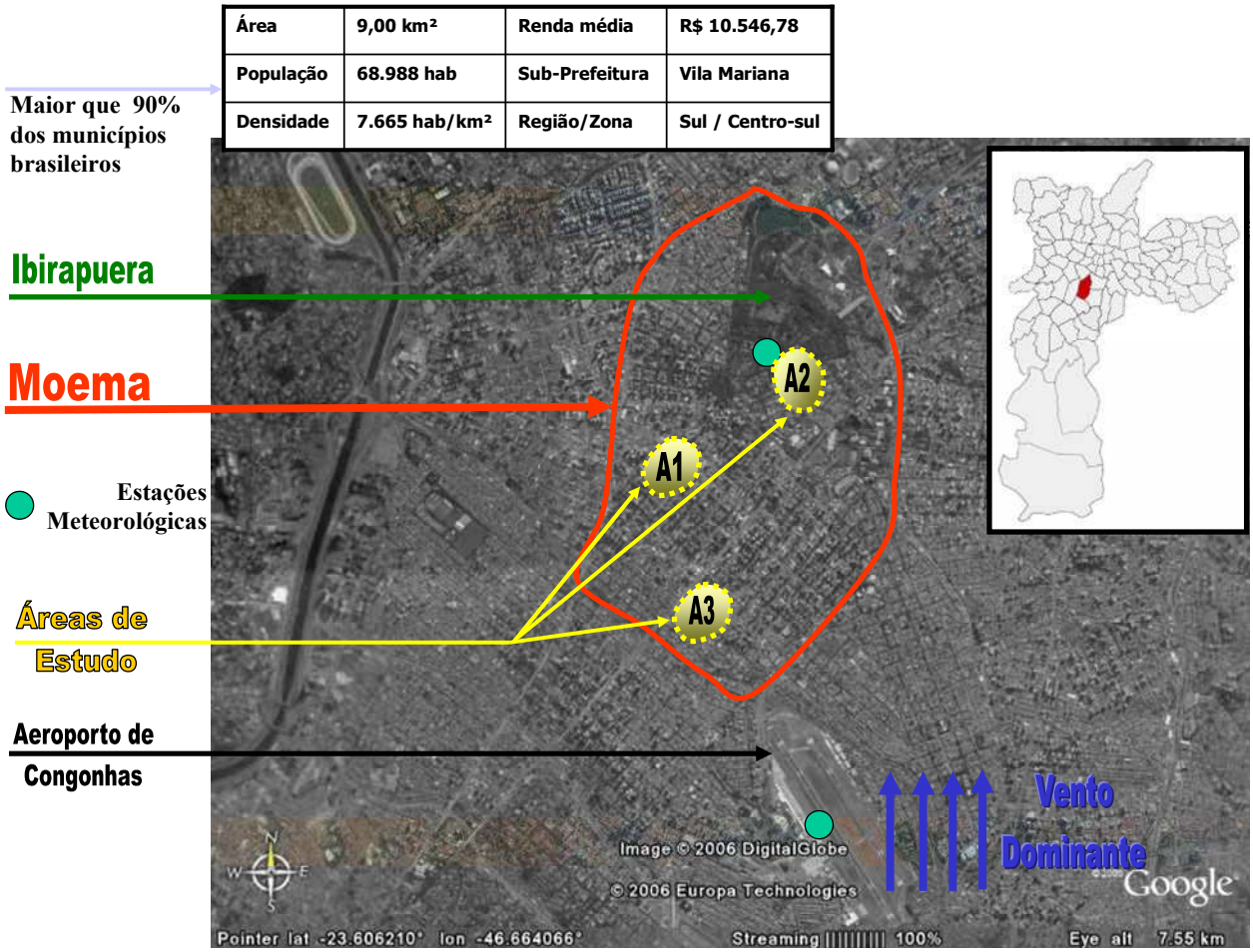
4.2.1. *Delimitação*

A área de estudo será utilizada como área-piloto para aplicação e validação dos modelos estudados e como objeto para reflexão sobre os resultados. Entender seu comportamento, portanto, é um objetivo secundário, só sendo justificada sua existência pela necessidade de um objeto empírico de estudo sobre o qual se possa desenvolver o raciocínio.

Como opção de área de estudo, foi selecionado o distrito de Moema, na cidade de São Paulo, SP. Embora inicialmente fosse pretendido um estudo da área como um todo, verificou-se uma grande dificuldade no tratamento de grandes áreas nos modelos de balanço utilizados e por isso acabou se optando por trabalhar com três áreas-piloto, com padrões de ocupação diversos, sendo que o estudo será expandido para as outras áreas caso haja tempo hábil. A localização do distrito no município indicando as áreas está na Figura 4.8.

Figura 4.8: Seleção das áreas de estudo

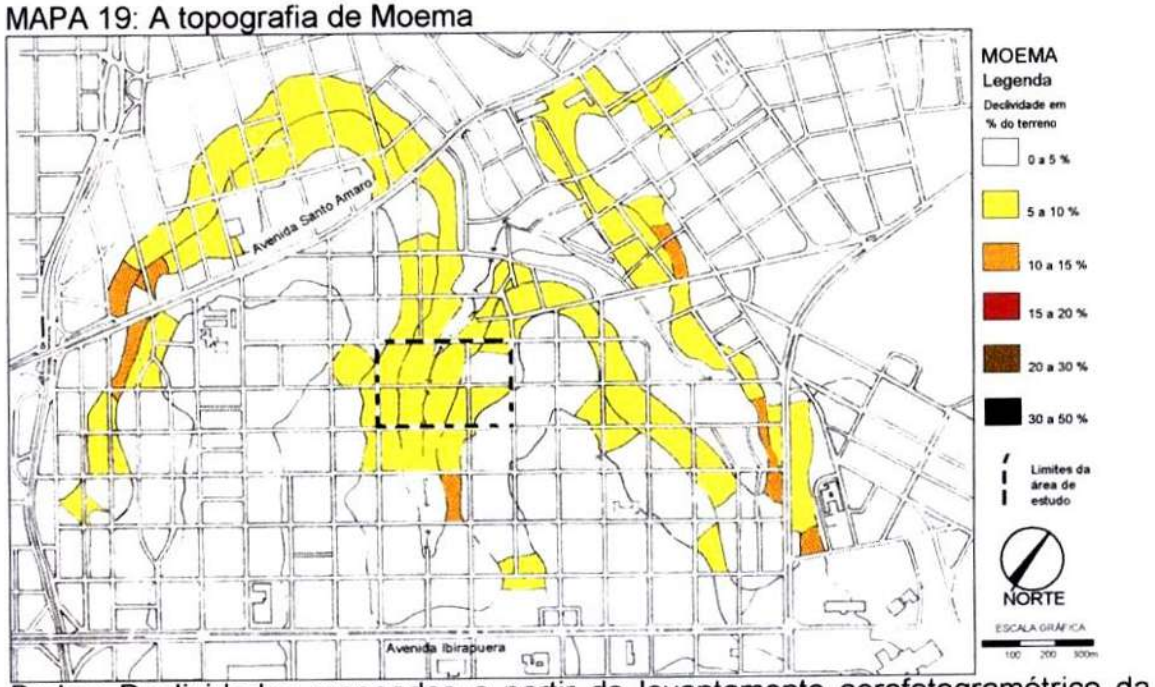
Fonte: Elaboração própria com base em GOOGLE (2005)



O bairro se localiza no setor sudoeste da cidade e foi um dos mais afetados pelo processo de verticalização e adensamento construtivo da década de 80. Além disso, a escolha do distrito se justifica pelas seguintes razões:

- Há uma estação meteorológica a barlavento (Congonhas - INFRAERO) e a sotavento (Ibirapuera - CETESB) no distrito, com uma série de dados, superior a cinco anos;
- A área conta com uma ocupação regular, regida pela lei de uso e ocupação do solo do município, que foi responsável pela configuração dos edifícios existentes (MENNEH, 1997). Deste modo é possível avaliar o impacto da legislação na qualidade ambiental do espaço urbano;
- A região apresenta uma topografia plana, principalmente na área central do distrito, o que elimina uma variável complexa e foca o estudo no efeito da ocupação;

MAPA 19: A topografia de Moema



Dados: Declividades mapeadas a partir do levantamento aerofotogramétrico da Emplasa de 1980.

- A área apresenta uma ocupação de alta renda. Nesse caso, evita-se alguns abordar tópicos sociais delicados em um estudo que se dedica a estudar principalmente a estrutura física da cidade. Ainda assim, a questão do impacto social do planejamento urbano e da construção social da cidade não são completamente abandonados e devem ser discutidos sempre que a oportunidade permitir;
- Há uma diversidade de situações de ocupação, com edificações comerciais e residenciais e horizontais e verticais, distribuídas ao longo da área. Além disso, pode-se avaliar a influência da vegetação no clima, já que a área conta com gradações de arborização urbana, desde áreas sem árvores até o Parque do Ibirapuera, uma das maiores áreas verdes do centro expandido de São Paulo. Cada uma das áreas-piloto apresenta um tipo de padrão de ocupação encontrado no bairro, conforme será detalhado no item 4.4.3.

Figura 4.9: Mapa de declividades da Área 01

Fonte: MENNEH (2000)

Figura 4.10: Vista do Parque do Ibirapuera com o bairro de Moema ao fundo, indicando as áreas de estudo

Fonte: Elaboração própria sobre PAISAGENS, (200?)

- Algumas áreas ainda apresentam grande potencial de adensamento, tendo sofrido transformações somente na questão dos usos nas últimas décadas mas mantendo a tipologia horizontal. Com a proposta do plano diretor para geração de um pólo de centralidade na área, imagina-se que o mercado imobiliário venha a exercer grande pressão para a verticalização, uniformizando o gabarito da área pelas maiores alturas. Na Figura 4.11, pode-se ver a grande quantidade de terrenos ainda disponíveis para adensamento na Avenida Ibirapuera, que vêm sendo ocupada nos últimos anos por grandes torres de hotéis.

Figura 4.11: Vista da Av. Ibirapuera

Fonte: www.moema.com

Devido a restrições de tempo e recurso, a avaliação da Área 03 foi abandonada durante o processo. A área apresentava densidades muito baixas e vegetação muito densa., homogêneas. Por isso, a condição climática seria influenciada pela vegetação, que não era objeto de

estudo desta pesquisa. Deste modo, apenas as estatísticas do levantamento da Área 03 serão apresentadas, mas não os resultados.

4.2.2. *Histórico*

O bairro de Moema nasceu a partir da estrada de ferro que ligava o município de São Paulo ao então município de Santo Amaro, hoje incorporado à capital. O processo se intensificou durante a década de 50 com a construção do Parque do Ibirapuera, que acabou por conferir ao bairro uma imagem de local com grande de qualidade de vida. Os principais acontecimentos urbanos relacionados ao bairro são relatados no quadro-resumo abaixo, baseado em informações de Antonucci (2005), Menneh (2000) e do *site* Moema.com.

Tabela 4.1: Quadro resumo da história de Moema

Fonte: www.moema.com

Período	Evento
Meados do Séc. XIX'	O então município de Santo Amaro fornecia mercadorias para São Paulo e a estrada que ligava as duas cidades era parte do caminho até o litoral. A região do distrito era uma fazenda de propriedade de Joaquim Pedro Celestino
Terço final do Séc. XIX	A construção da estrada de ferro Santos-Jundiaí causa estagnação no setor sul da cidade de São Paulo.
1883-86	Construção de uma pequena estrada de ferro ligando os dois municípios. A estrada iniciava-se onde hoje está a Av. Domingos de Morais e seguia em linha reta por 8 km até Santo Amaro.
1900	Instalação de bondes a vapor na estrada de ferro. A linha contava com três paradas, distantes umas das outras: Pavão, Vila Helena e Moema, ao redor das quais se desenvolveram povoados isolados.
1913	Os bondes a vapor são substituídos por bondes elétricos. Vestígios dos trilhos podiam ser vistos até recentemente na Av. Ibirapuera. O comerciante Fernando Arens Júnior compra o Sítio da Traição, porção de terra com 182 alqueires, localizada entre os Córregos Uberaba e Traição. Um rio percorre o trecho correspondente hoje às Avenidas Jabaquara, Indianópolis, República do Líbano, Jauaperi e Hélio Pelegrino e outro o leito Avenida dos Bandeirantes. A residência de Arens ainda pode ser vista na Av. Ibirapuera.
1922	Já há registro de arruamento do bairro Indianópolis, futuro Moema.
1924	Instalação de fábricas na região.
1932	Raul Loreiro funda a Associação dos Proprietários de Indianópolis e recebe autorização para funcionar como subprefeitura. Foi o primeiro passo para diversas obras de infra-estrutura e para a fundação do Colégio Nossa Senhora de Aparecida.
1924	Instalação de fábricas na região.
1934	O município de Santo Amaro é incorporado a São Paulo.

continua

continuação

Período	Evento
1936	Inauguração do aeroporto de Congonhas.
1941	É inaugurada, após 8 anos de construção, a Igreja Nossa Senhora de Aparecida.
1954	Construção do Parque do Ibirapuera.
1940-1960	O bairro passa de 10 mil para 55 mil habitantes em 20 anos. Até a década de 50, no entanto, a ocupação ainda era esparsa e interrompida pelos córregos que cortavam a região.
1960	Início da verticalização habitacional, apostando nos grandes lotes de baixo custo e com terrenos planos na região. Retirada dos bondes, seguida do asfaltamento e arborização da Av. Ibirapuera.
1972	O adensamento do bairro foi favorecido pelo zoneamento, que permitia uso misto e grandes edificações. Até o final da década de 70, no entanto, ainda predominavam as edificações baixas.
1976	Inauguração do Shopping Ibirapuera, grande atrativo para a população do bairro.
1987	Seguindo abaixo assinado, o prefeito Jânio Quadros altera o nome do bairro, de Indianópolis para Moema (decreto 24.764/87), regulamentado posteriormente por Luiza Erundina (Lei 10.932/91).
1992-93	Canalização dos córregos Uberaba e Uberabinha, com inauguração posterior da Av. Hélio Pelegrino.

Atualmente, o bairro ainda passa por um processo de alteração constante da paisagem, com novos prédios surgindo periodicamente. A principal desvantagem locacional do bairro atualmente é a proximidade do aeroporto de Congonhas, o que causa problemas sérios de ruído e insegurança para os moradores. A ocupação se caracteriza pelo uso misto, havendo estabelecimentos de comércio e serviços espalhados mesmo em várias das áreas residenciais do bairro. A legislação vigente no bairro é apresentada no ANEXO A1.

4.3. Contextualização Climática

4.3.1. *Classificação climática do município*

A cidade se encontra no limite da zona tropical, apresentando um clima de transição, sob vários aspectos. Na classificação climática de Köppen-Geiger, a cidade se configura como **Cwa** – Clima mesotérmico com verões chuvosos e rigorosos, também traduzido em português como tropical de altitude – na divisa com os climas subtropicais permanentemente úmidos (**Cfa** e **Cfb**) (OLIVEIRA FILHO, 2004; TARIFA & ARMANI, 2001[31]). Esta categoria climática incorpora regiões

31 TARIFA, José Roberto; ARMANI, Gustavo. Os climas urbanos. In: TARIFA & AZEVEDO, 2001

onde as temperaturas médias do mês mais frio encontram-se entre 3 e 18ºC com médias superiores a 10 ºC, com invernos secos e verões quentes.

Segundo Tarifa & Armani[32] (2001), esta posição sujeita a cidade a uma influência significativa das massas polares, o que aumenta a umidade e as variações de temperatura em um curtos segmentos de tempo (dias ou semanas).

32

TARIFA, José Roberto; ARMANI, Gustavo. Os climas urbanos. In: TARIFA & AZEVEDO, 2001

Isso resulta em altos impactos pluviométricos na bacia do Alto Tietê, especialmente na primavera-verão em anos de El Niño. No inverno, a maior freqüência de sistemas anticiclônicos polares e o avanço da alta subtropical pelo continente mantém o tempo seco e estável, prejudicando a dispersão de poluentes, gerados em grande quantidade na cidade.

A cidade de São Paulo conta com uma cobertura razoavelmente extensa de estações meteorológicas, se comparada com a maioria das cidades brasileiras. Foram levantadas dentro do município 13 estações, além de 8 outras na região metropolitana (Tabela 4.2).

Tabela 4.2: Estações meteorológicas na cidade de São Paulo

Estação	Resp.	Codigo	Lat (S)	Long (W)	Alt (m)	T	U	V	P	R	S
São Paulo	INMET	A701	23°30'	46°37'	792	x	x	x	x	?	-
Campo de Marte**	INMET/DECEA	83779	23°30'	46°38'	722	x	x	x	x	?	x
Congonhas	DECEA	83780	23°37'	46°39'	803	x	x	x	x	-	-
Água Funda	IAG	83004	23°39'	46°37'	?	x	x	x	x	x	-
Cid. Universitária	IAG (MASTER)		23°34'	46°44'	733	x	x	x	x	x	-
Ibirapuera	CETESB		Parque do Ibirapuera, setor 25			x	x	x	x	x	-
Horto Florestal	CETESB		Rua do Horto, 931			x	x	x	-	x	-
Pq D. Pedro	CETESB		P. D. Pedro II, 319			x	x	x	-	-	-
Pinheiros	CETESB		Rua Frederico Hermann Jr, 345			x	x	x	-	-	-
N. Senhora do ó	CETESB		R. Capitão José Amaral, 80			x	x	-	-	-	-
Mooca	CETESB		Rua Bresser, 2341			-	-	x	-	-	-
Santo Amaro	CETESB		Av. Padre José Maria, 355			-	-	x	-	-	-
Santana	CETESB		Av. Santos Dumont, 1019			-	-	x	-	-	-

DECEA - Departamento de Cortrole do Espaço Aéreo
CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
IAG - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas

T - Temperatura
U - Umidade
V - Vento (direção e velocidade)
P - Pressão

R - Radiação
S - Sondagem

** A estação Campo de Marte está localizada em um aeroporto, e por isso é de responsabilidade do DECEA, mas as sondagens são realizads peo INMET

Os dados medidos em várias destas estações podem ser obtidos através de instituições de pesquisa e da internet. Na maior parte das vezes, os dados disponibilizados pela internet se referem somente a períodos recentes.

Uma lista completa dos dados disponíveis e referências é apresentada no ANEXO A2. Neste trabalho foram utilizados dados medidos nas estações Ibirapuera e Congonhas.

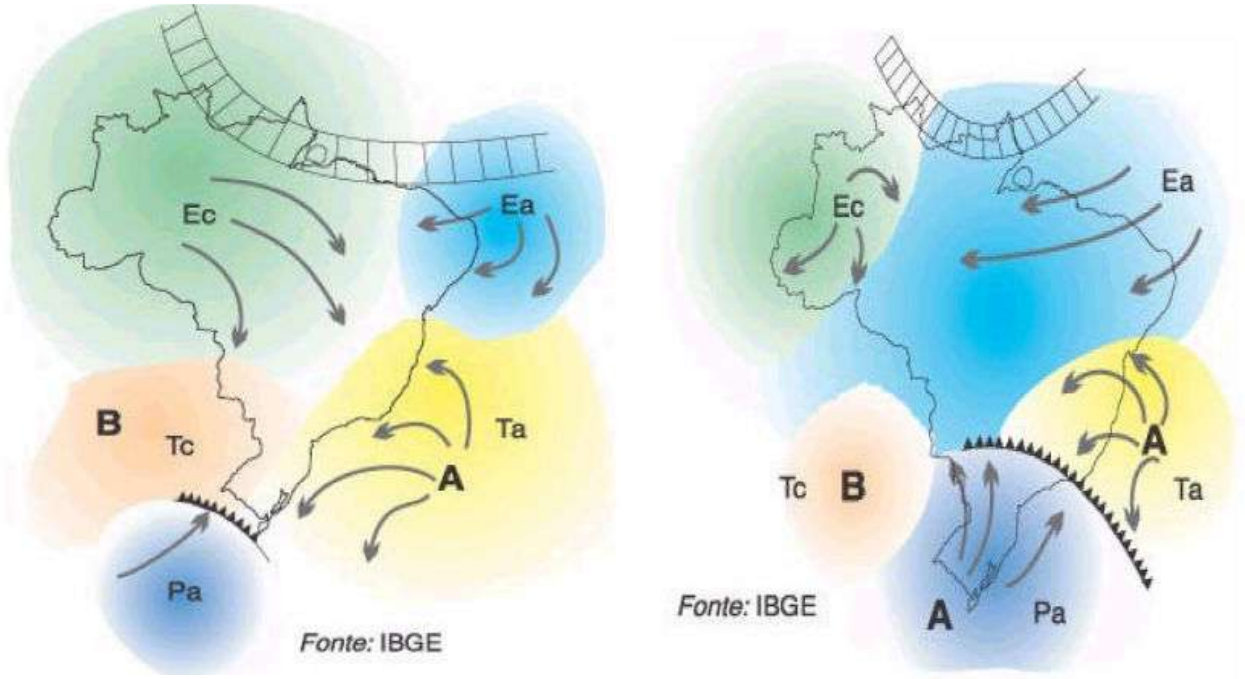
4.3.2. *Regime de ventos*

O Brasil está exposto a cinco grandes massas de ar, sendo três delas marítimas e duas continentais. Estas massas são a Equatoriais

Continental (**Ec**) e Atlântica (**Ea**), as Tropicais Continental (**Tc**) e Atlântica (**Ta**), e a Massa Polar Atlântica (**Pa**). A distribuição destas massas sobre o território nacional está indicada na Figura 4.12. Estando localizada em uma zona de fronteira entre as diversas massas, a cidade de São Paulo sofre constante influência da sua interação, provocando situações climáticas diretamente relacionadas com o seu regime de ventos.

Figura 4.12: Distribuição das massas de ar sobre o território nacional

Fonte:GALVANI (199?)



Esta dinâmica é descrita por Lopez (2001)[33], que separa os ventos da região metropolitana em dois grandes grupos:

- **Ventos de E, SE, S**: originam-se nas massas de ar oceânicas, contendo consideráveis teores de umidade e atuando durante todo o ano sobre São Paulo. Devido à condição topográfica, estas massas acabam sofrendo o efeito da descompressão adiabática, provocando a formação de nuvens ao longo da base da Serra do Mar: Estas nuvens causam chuvas nas encostas da serra, mas explicam também o alto índice de nebulosidade da região metropolitana. Estes ventos atingem a capital por volta das 15h às 16h, ainda portando características de brisa marítima. Ventos destas direções também podem se originar de frentes polares, vindas do sul, responsáveis por alto índice pluviométrico e atuando principalmente nos meses de outubro, dezembro e janeiro.
- **Ventos de W, NW e N**: ocorrem no inverno e no verão com mecanismos de formação diferentes. No verão, vêm de zonas de instabilidade do Noroeste e causam pancadas de chuva com trovoadas. No outono e inverno, prenunciam a entrada de frentes frias na região Sudeste em até 24 horas. Contam com intensidades consideráveis, mas freqüências menos significativas que os ventos de S e SE.

33 LOPEZ, Carlota Camachos. O vento. In: TARIFA & AZEVEDO, 2001

A autora ainda inclui nos grupos acima dois outros regimes de vento, aqui são apresentados separadamente.

- **Ventos de NE**: são causados por zonas de alta pressão do anticiclone tropical atlântico, com baixas velocidades de vento, altas temperaturas e sem pluviosidade. Apresentam menores índices de freqüência e são mais comuns no período de inverno, quando **Ta** apresenta maior influência na região.
- **Calmarias**: ocorrem com maior freqüência no inverno devido a sistemas atmosféricos estáveis e prejudicam a dispersão de poluentes.

Duas observações devem ser levantadas em relação ao comportamento descrito. A primeira delas é que o vento na cidade de São Paulo freqüentemente é responsável pela advecção de umidade e por altos índices de pluviosidade, sendo necessário avaliar com cuidado seu potencial de uso para providenciar conforto térmico. A segunda foi observada também por Cóstola (2006), que verificou as freqüências de ocorrência das principais direções de vento para a cidade. Devido à intensa dinâmica de massas de ar, e à sua alteração sazonal e mesmo diária, o vento em São Paulo apresenta predominâncias muito fracas (Figura 4.13), o que dificulta avaliações de desempenho (urbano ou de edificações) nas quais se faça uso do vento como ferramenta para melhoria da qualidade ambiental.

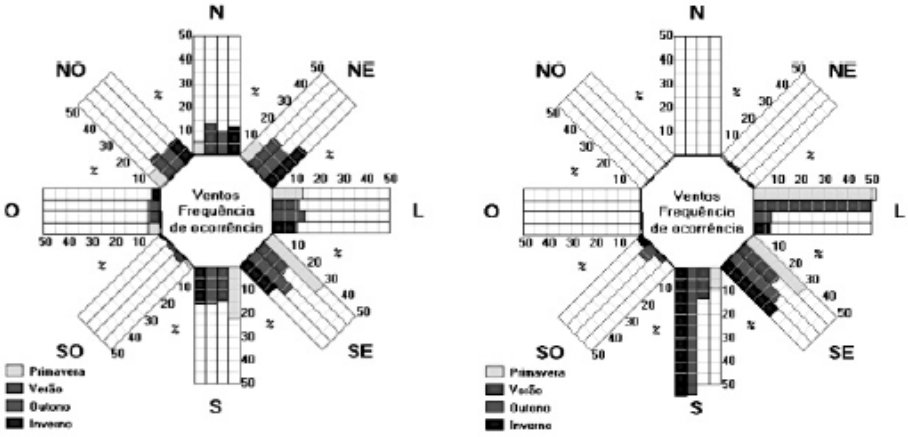


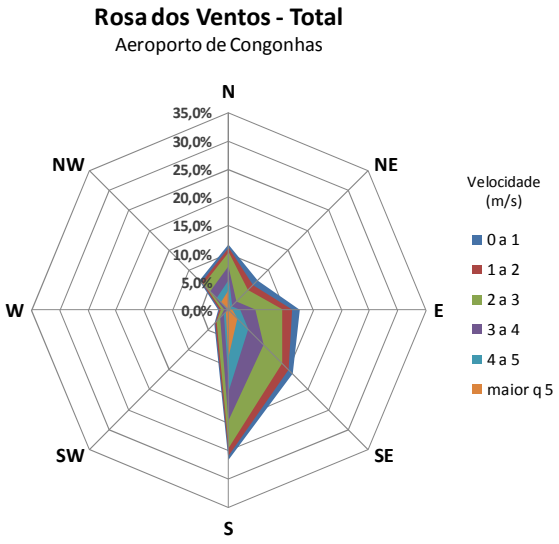
Figura 4.13: Rosa dos ventos indicando a predominância para São Paulo e Natal, respectivamente.

Fonte: CÓSTOLA, 2006)

Utilizando os dados disponibilizados pelo *Departament of Energy* (DoE), dos Estados Unidos, para o Aeroporto de Congonhas, foi realizado um estudo para determinar a freqüência de ocorrência das direções e velocidades de vento na área.

Uma análise da base de dados disponível e das freqüências de ocorrência para cada categoria de direção e velocidade é apresentada no ANEXO A3.

Para melhor visualização, apresentam-se as freqüências totais e um gráfico com a rosa dos ventos para a estação meteorológica na Figura 4.14.



Veloc. (m/s)	N	(%)
0	4380	14,9
0 a 1	1937	6,6
1 a 2	2665	9,0
2 a 3	7854	26,7
3 a 4	6215	21,1
4 a 5	4734	16,1
Maior que 5	6065	20,6

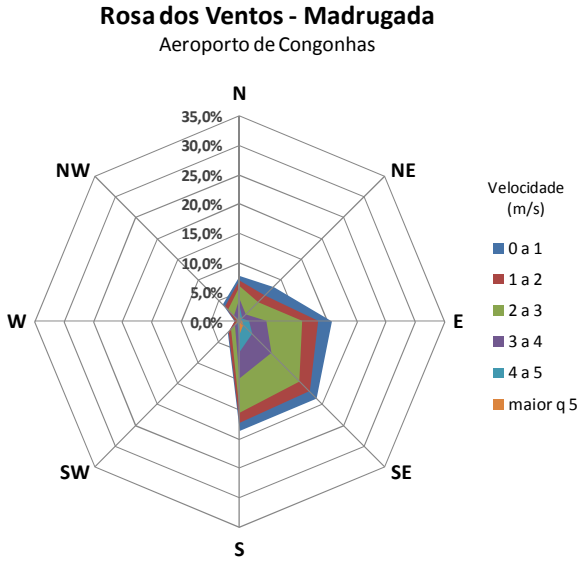
Dir.	N	(%)
N	3940	13,4
NE	2486	8,4
E	4272	14,5
SE	5434	18,4
S	9050	30,7
SW	1195	4,1
W	619	2,1
NW	2474	8,4
Tot.	**29470**	**100,0**

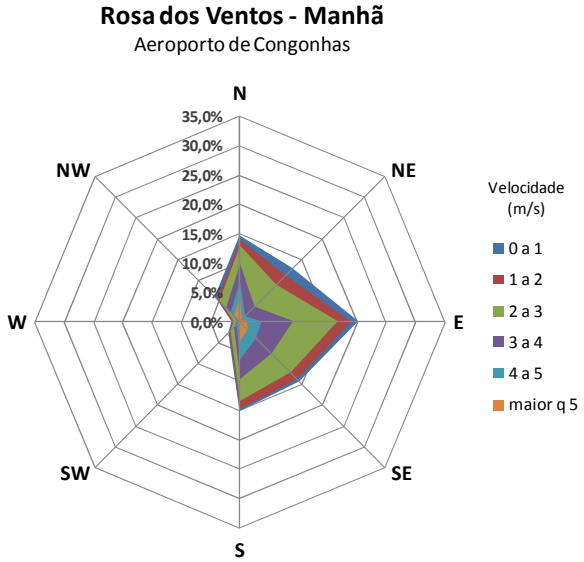
Figura 4.14: Freqüência de ocorrência total e rosa dos ventos para Congonhas

Observa-se que a primeira predominância é do vento é sul, com mais de 30% do total de ocorrências. Os ventos apresentam ainda alta intensidade, com um terço deste valor (9,7%) com velocidades superiores a 5m/s. A segunda predominância é de SE, com um vento de menor intensidade, concentrado na faixa entre 2 e 3 m/s. Em terceiro lugar estão com freqüências semelhantes, as direções E e N, com diferença de freqüência de ocorrência da ordem de 1%.

Com o objetivo de detalhar o comportamento dos ventos, os dados foram isolados por períodos e as freqüências de ocorrência foram calculadas. Foram considerados quatro períodos para o dia (ciclo de 24 horas). Como há apenas disponibilidade de dados para a hora inteira, foram consideradas 6 horas para cada um dos períodos, sendo eles: madrugada (00h – 05h), manhã (06h – 11h), tarde (12h – 17h) e noite (18h – 23h). O resultado do estudo é indicado na Figura 4.15 (madrugada e manhã) e na Figura 4.16 (tarde e noite).

Figura 4.15: Rosa dos ventos para Congonhas nos períodos da madrugada e da manhã





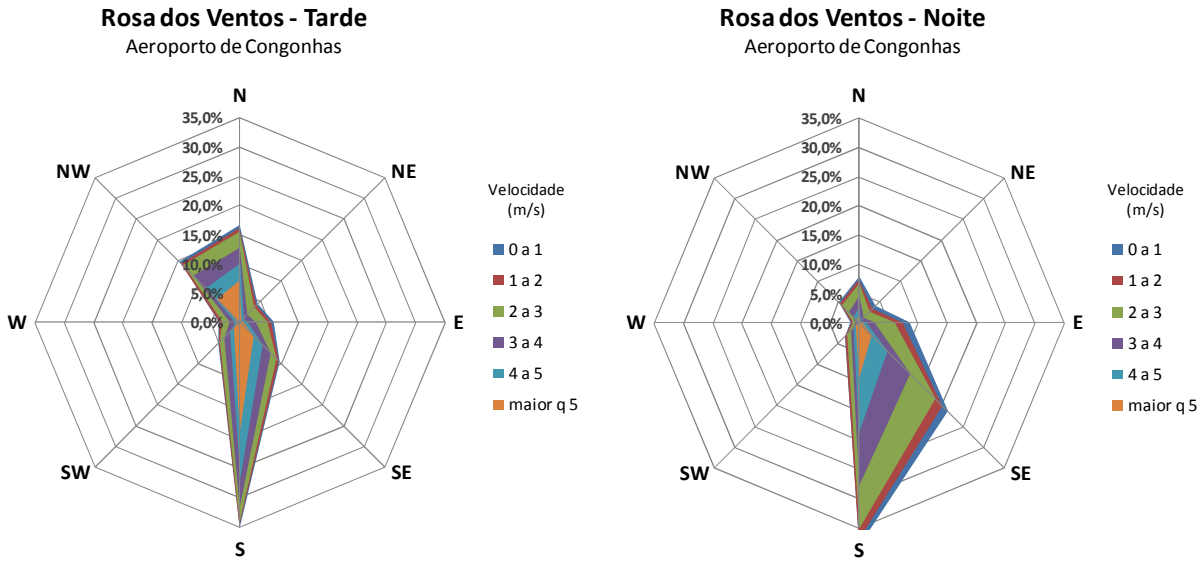


Figura 4.16: Rosa dos ventos para Congonhas nos períodos da tarde e da noite

Para o período da madrugada, observam-se velocidades moderadas, da ordem de 2 a 3 m/s, com distribuição uniforme pelo quadrante Sul-Leste, não havendo uma predominância clara entre as orientações S, SE e E.

No período da manhã, as velocidades se mantêm predominantemente na mesma ordem de grandeza da madrugada, com uma predominância mais destacada para o sentido Leste. No entanto, há grande variação na direção, que pode oscilar de Norte a Sul, sempre passando pelo setor oriental.

No período da tarde, encontra-se uma clara predominância do vento sul e as intensidades são maiores, com os ventos chegando a ultrapassar os 5 m/s com razoável freqüência. Interessante notar que o vento com predominância mais clara e com maior intensidade ocorre exatamente no período de maiores temperaturas, tornado-se ferramenta valiosa para o resfriamento de edifícios e espaços urbanos.

É importante notar, contudo, que a segunda predominância não se encontra mais no quadrante Sul-Leste, podendo-se observar a ocorrência, no período da tarde, de ventos de intensidade moderada vindos de N e NW. Observa-se que os ventos de NW só tiveram ocorrência significativa neste período.

No período da noite o vento sul permanece, mas com uma distribuição de intensidades mais homogênea, variando em de 2 a mais de 5 com praticamente a mesma freqüência. A segunda predominância volta a ser SE, também com intensidades bem distribuídas.

Como complemento a esta avaliação, foram estudadas as correlações entre a velocidade do vento e a temperatura do ar utilizando dois critérios: temperaturas abaixo de 20°C (ocorridas em 19.251 horas, ou 56,9% dos dados), consideradas como potencial para frio, e temperaturas acima de 25°C (ocorridas em 5.104 horas, ou 15,1% dos dados), consideradas como potencial para calor, principalmente se associadas à ocorrência de radiação solar. O resultado é apresentado na Figura 4.17.

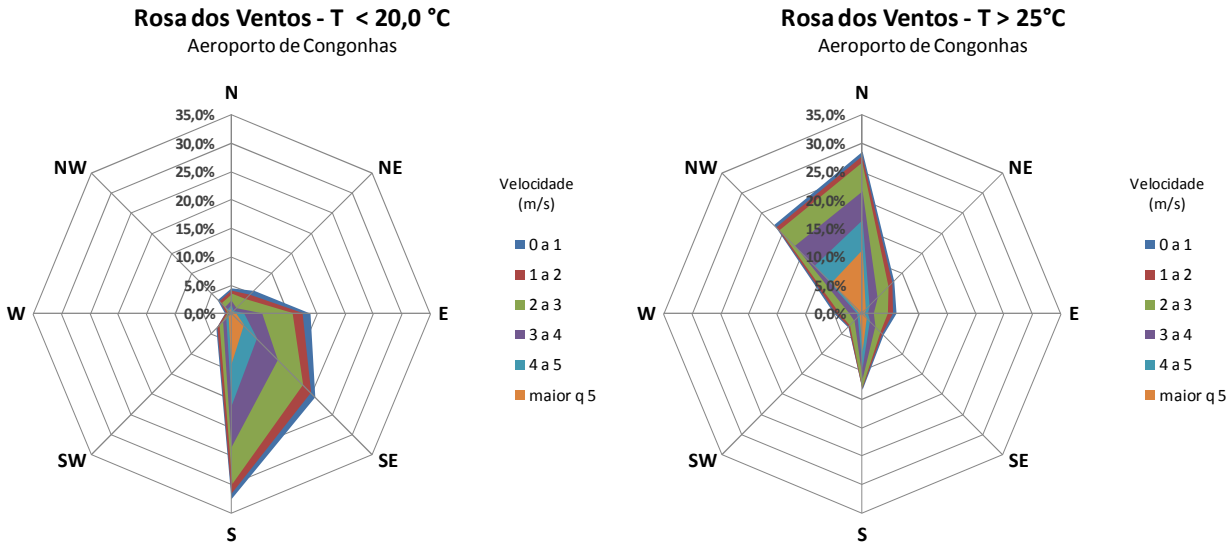


Figura 4.17: Rosa dos ventos para Congonhas filtrados por valores de temperatura do ar

O resultado indica uma concentração do vento S nas horas mais frias e N e NW nas horas mais quentes. O resultado é coerente com a avaliação dos períodos do dia, mas se observa que, no período da tarde, os ventos sul ocorrem com temperaturas vespertinas amenas, já que praticamente não houve potencial para calor com vento sul. Esta avaliação é fundamental para elaboração de métodos de análise e estratégias de planejamento climático.

4.4. Levantamento

4.4.1. *Desenho da área*

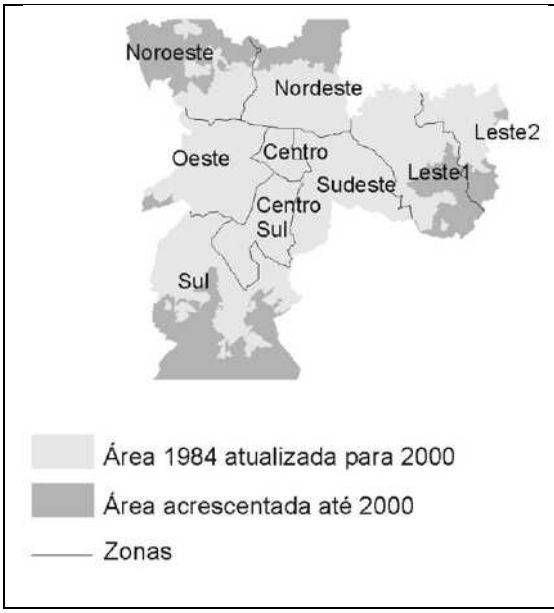
4.4.1.1. Procedimento

Inicialmente, foi levantado se havia alguma base de dados disponíveis. Como não foi encontrada nenhuma base confiável que contivesse o cadastro das edificações, optou-se por realizar um um levantamento completo da área a partir de fotos aéreas.

Para isso, foi utilizada a base cartográfica do CESAD (MSPQ2000), baseado no MSPQ1984, atualizado com informações do Guia Cartoplan 2000 e Mapograf 2000.

A partir de informação oral do Prof. Dr. Marcelo Giacaglia (GIACAGLIA, 2005), a base foi considerada como estando na projeção cartográfica **Universal Transversal Mercator (UTM) – Córrego Alegre, Fuso 23**, o que permitiu o trabalho no *software* de geoprocessamento ***MAP INFO.***

A informação foi confirmada a partir da sobreposição do arquivo do CESAD com um arquivo de logradouros que estava na projeção UTM - Córrego Alegre.



LAYERS	CONTEUDO
Divisa municipal	limites do Município de São Paulo
Ferrovia	estradas de ferro
Hidrografia	rios, lagoas, parte das represas
Logradouros	nomes de alguns logradouros
Metro	principais estações
Quadras	quadras fiscais e não fiscais
Viadutos	viadutos e pontes

Figura 4.18: Informações contidas na base cadastral utilizada

Fonte:CESAD (2003)

Sobre a base foram ajustadas fotos aéreas de 1997 também obtidas através do CESAD:

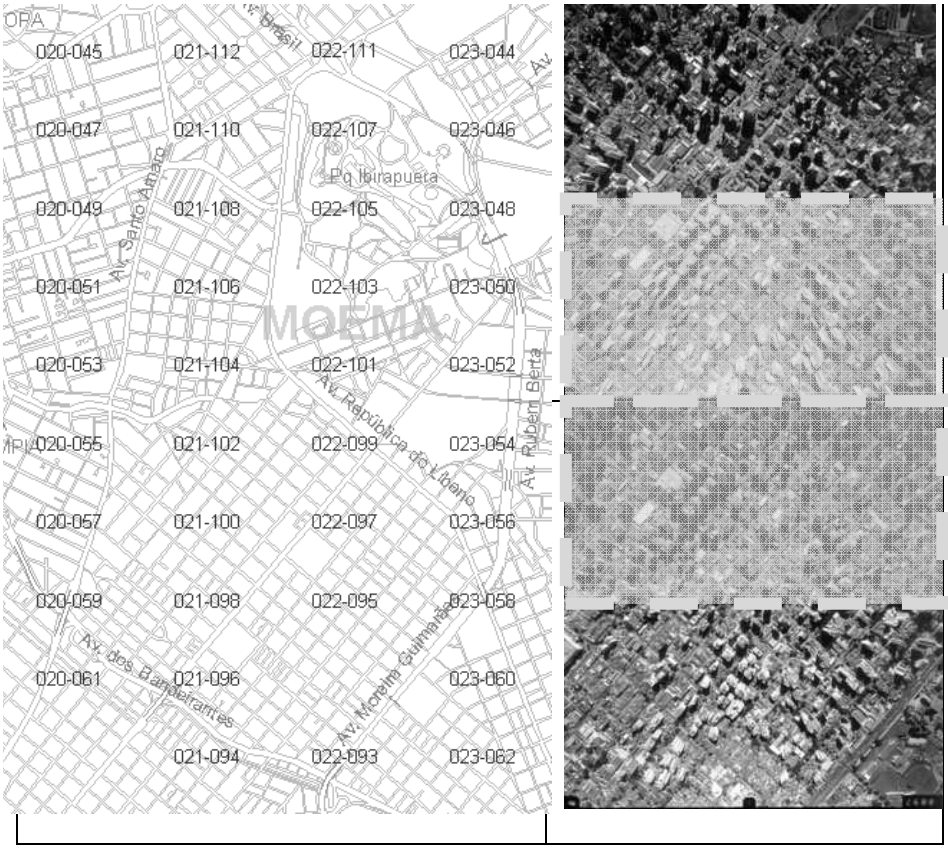


Figura 4.19: Distribuição das fotos aéreas e área de sobreposição

Fonte: Elaborado sobre informações do CESAD

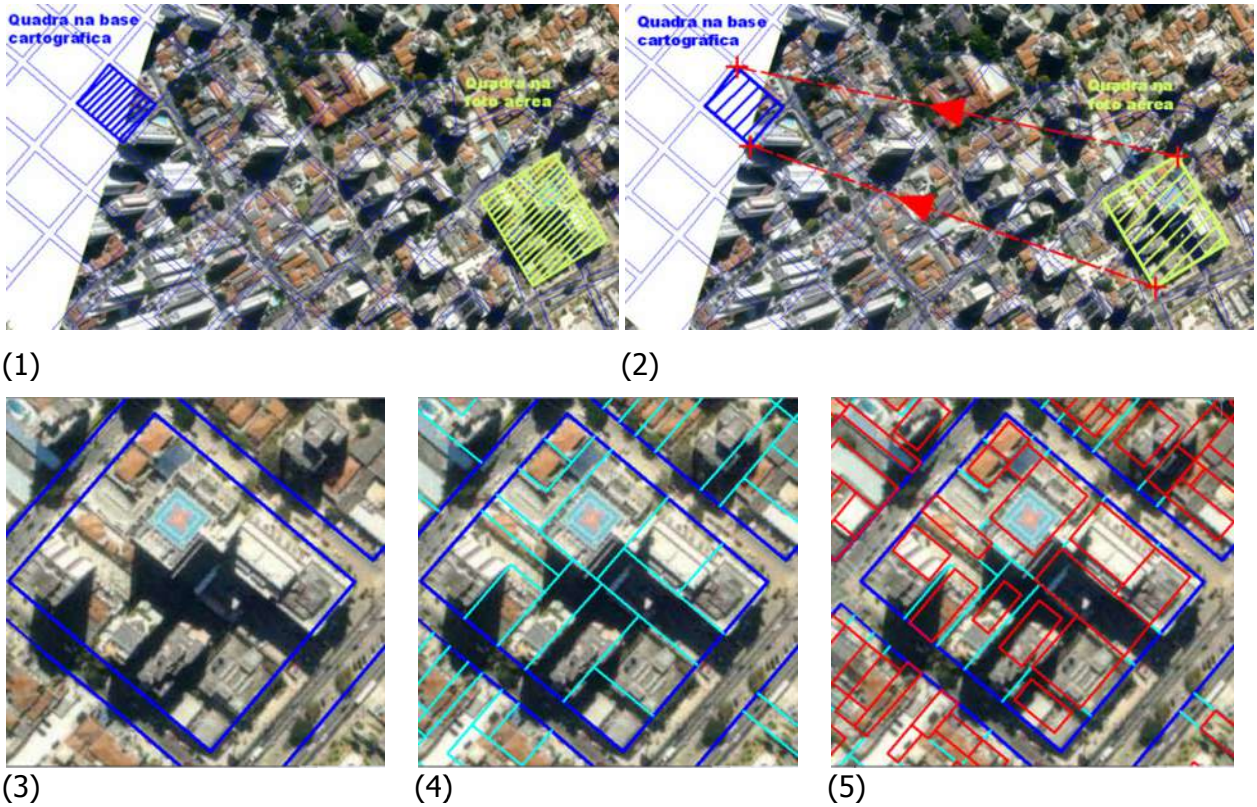
No sentido vertical da imagem há uma área de sobreposição de 60% entre as fotos (área marcada em tracejado). Buscava-se ainda utilizar a foto na qual a quadra estivesse centralizada, reduzindo as distorções pela perspectiva. Sempre que se observava alguma alteração entre a imagem da foto aérea (de melhor definição) e a imagem do *Google*

Earth (GOOGLE,2006) a primeira era substituída pela segunda no processo de desenho (Figura 4.20).

Figura 4.20: Exemplo de quadra alterada entre 1997 e 2006

Fonte:CESAD; GOOGLE, 2005

O alinhamento da fotografia aérea com a base cartográfica foi feito a partir de dois pontos quadra a quadra, evitando assim a distorção sucessiva à medida que se aproxima da borda. Buscou-se manter os ângulos retos e evitar pequenos desencontros entre linhas muito próximas, gerando paredes curtas. O processo de vetorização está ilustrado na Figura 4.21.



(1) (2)

(3) (4) (5)

Figura 4.21: Ilustração do processo de vetorização e mapeamento

Buscou-se sempre evitar espaços muito pequenos entre as edificações, que dificultariam o trabalho de modelagem no CFX. Lacunas pequenas demandariam malhas excessivamente refinadas que consumiriam muita capacidade de processamento. As lacunas no levantamento cartográfico não excediam 2 m, critério elevado para 5 m após o levantamento de campo e revisão do desenho. As edificações eram

combinadas ou levemente deslocadas, cuidando para que houvesse um balanço entre as duas estratégias.

4.4.1.2. Resultados da vetorização

Ao todo, foram digitalizadas mais de 620 quadras e 10.200 edificações. As edificações resultantes foram convertidas em objetos do tipo *polyline*, para que pudessem ser corretamente exportados para o MapInfo. O levantamento da vegetação foi interrompido para que se pudesse priorizar outras atividades da pesquisa, mas a base levantada tornou-se informação complementar disponível.

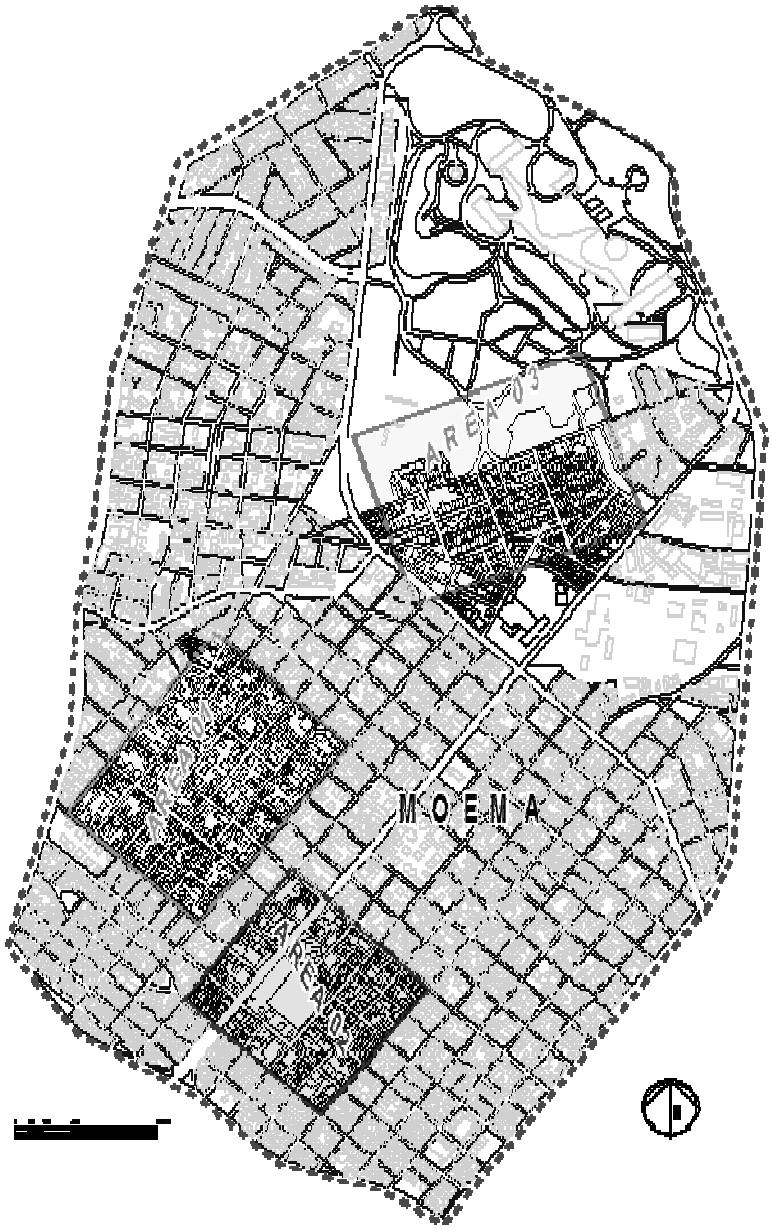


Figura 4.22: Vista geral da área levantada identificando as três áreas de estudo

4.4.2. *Levantamento em campo*

Tendo posse dos mapas digitalizados, o passo seguinte foi a elaboração de um método eficiente de levantamento. Foram tomadas as dimensões das áreas-piloto, que foram definidas como polígonos de

cerca de 400 m de lado. Com essas dimensões, seria possível se avaliar corretamente o efeito da estrutura urbana nos programas de simulação. Em seguida, foi elaborado um trajeto para que se evitassem repetições desnecessárias de percurso. Foram ainda marcado pontos de onde seria fotografada a obstrução de céu.

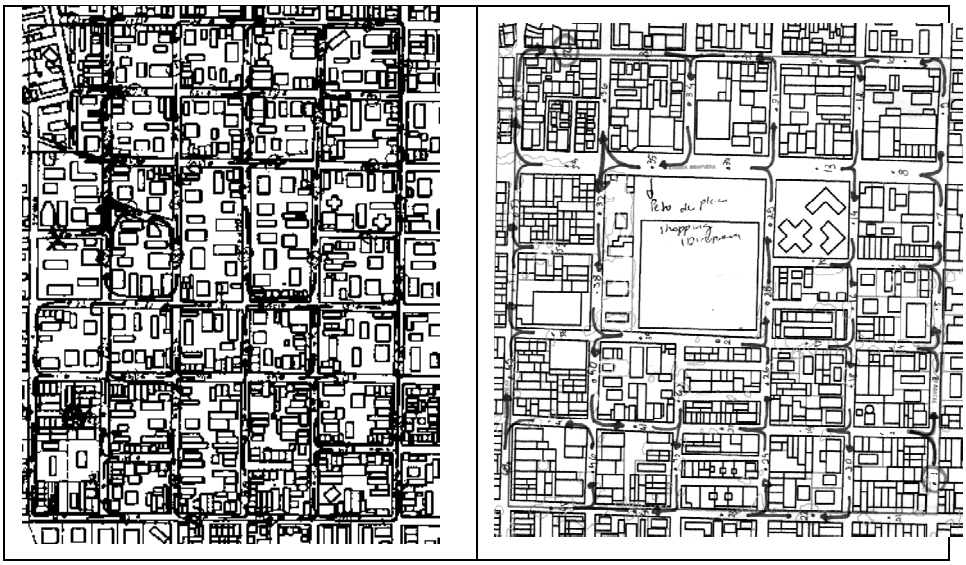
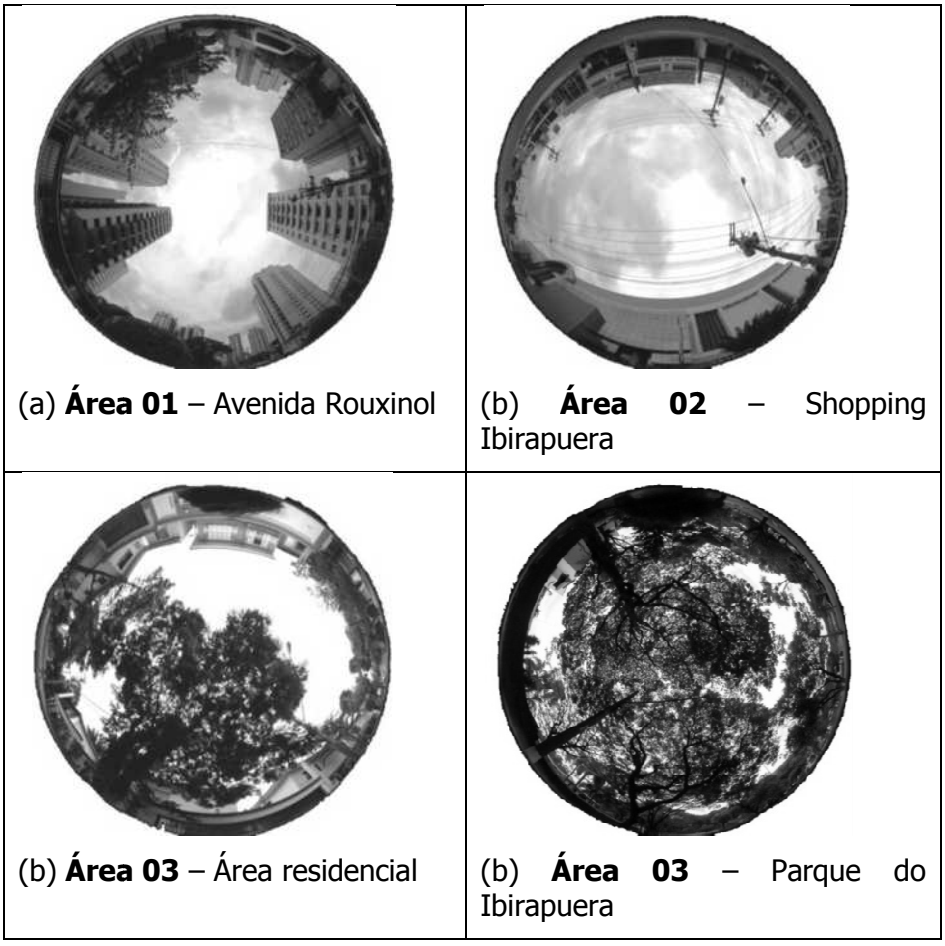


Figura 4.23: Indicação do planejamento de levantamento de duas das áreas

Exemplos das fotografias tiradas em cada área são apresentados na Figura 4.24.



(a) **Área 01** – Avenida Rouxinol

(b) **Área 02** – Shopping Ibirapuera

(b) **Área 03** – Área residencial

(b) **Área 03** – Parque do Ibirapuera

Figura 4.24: Fotos de grande angular tiradas durante o levantamento de alturas

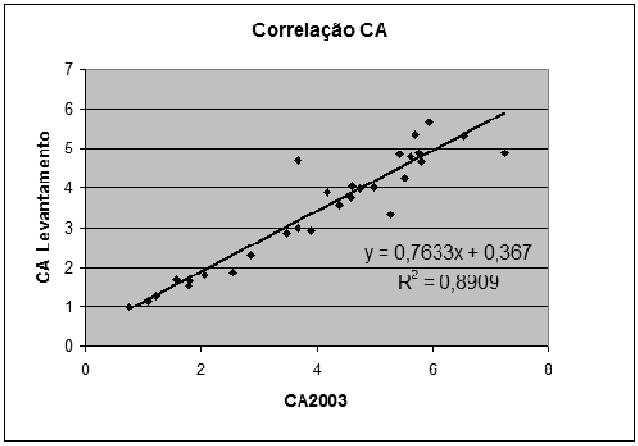
Foram levantadas três características para cada edificação: altura, uso e cor (esta última em uma escala de cinco pontos – clara, médio-clara, média, médio-escura, escura).

4.4.3. *Apresentação de resultados*

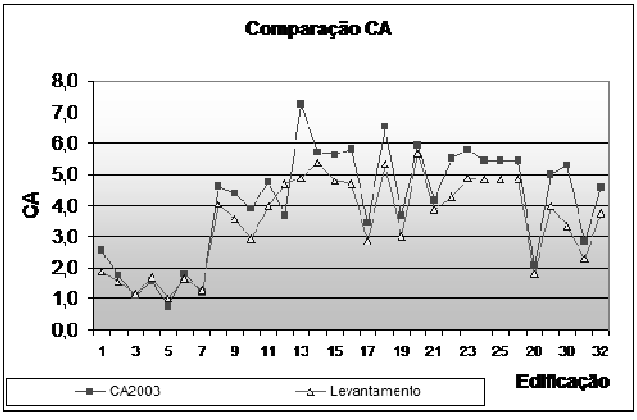
Com o levantamento de campo, a base foi redesenhada, separando ou agrupando edificações que apareciam com configurações diferentes daquelas verificadas no desenho. Durante o trabalho de campo, foram levantadas 30 quadras e 734 edificações na Área 01, 29 quadras e 556 edificações na Área 02 e 30 quadras e 528 edificações na Área 03. No total, as áreas de estudo correspondem a 15% das quadras e 18% do total de edificações.

Foram então computados os coeficientes de aproveitamento de cada quadra da Área 01, que foram comparados com dados fornecidos pela Sempla. Foi verificada uma correlação de 0,89 entre os dados levantados e as informações da Sempla[34], conforme apresentado na Figura 4.25a. No entanto, há um erro sistemático entre 10 a 15% do valor de CA para menos, especialmente nas quadras mais densas (Figura 4.25b). Isto pode ocorrer devido a diferenças no método de cálculo do coeficiente de aproveitamento, causado pela consideração de pilotis, garagens e subsolos. Para os fins desta pesquisa, considerou-se o resultado satisfatório.

34 SEMPLA (Mapeamento dos coeficientes de aproveitamento por quadra, arquivo eletrônico tipo MID)



(a)



(b)

Figura 4.25: Correlação dos coeficientes de aproveitamento obtidos pelo levantamento e a partir de dados da Sempla

As duas áreas possuem características distintas.

A **Área 01** compreende a região próxima ao antigo córrego Uberabinha, nas imediações da Av. Rouxinol, cruzamento com R. Canário. A área conta com uma ocupação bastante verticalizada, com torres isoladas no terreno e alturas entre 7 e 30 pavimentos. As edificações são de alto padrão, mas representam, em termos de volumetria, o que vem sendo construído em outras áreas da cidade, mesmo com padrões reduzidos. O uso das casas térreas vem sendo progressivamente substituído, deixando de ser residencial para abrigar atividades de comércio e serviço. A área apresenta uma malha retangular, orientada a 40° do norte, com algumas interrupções na regularidade devido à condição hidrográfica, o que influenciou bastante o início da ocupação, embora atualmente tenha sido incorporada no traçado viário e das quadras com a canalização do córrego. A topografia em geral se apresenta plana, com declividades inferiores a 10%, encontrando-se os únicos aclives e declives na bacia do antigo córrego. A área também conta com uma cobertura de vegetação considerável.

A Área 02: compreende a região próxima ao Shopping Ibirapuera. A região conta com a grande construção comercial, circundada de uma área mista com edificações predominantente horizontais de médio padrão. Não há afastamento entre grande parte das edificações, fazendo com que elas se comportem como blocos monolíticos. Ao norte da área observa-se a construção de edifícios residenciais verticais e, ao longo da Avenida Ibirapuera, uma tendência de desenvolvimento de um setor vertical de serviços (principalmente escritórios e hotéis). As edificações no setor sul não ultrapassam os três pavimentos, enquanto no setor norte elas chegam a 20. A topografia é completamente plana e a malha urbana apresenta traçado xadrez regular, com algumas penetrações no meio das quadras a leste do Shopping, onde se localizam as áreas residenciais. O Shopping ocupa um conjunto de quatro quadras, dominando a paisagem local. Ao contrário das outras áreas, a vegetação é escassa e a ocupação das quadras é de quase 100%.

Por razões que serão detalhadas no item 4.5, não foi possível realizar medidas de campo nas três áreas, optando-se por adotar como foco a Área 01, por apresentar a tipologia adensada mais típica do bairro. Este tipo de ocupação é a que representa uma alteração mais significativa das condições originais do bairro, quando comparada às demais. Porém, não foi possível efetuar as medições no local desejado, sendo necessário estabelecer outro ponto para colocação da estação fixa.

O ponto mais adequado disponível foi próximo a um estacionamento particular, localizado no subsolo de um edifício residencial, onde se obteve autorização para realizar as medições. Com isso, os dados do ponto fixo foram tomados muito próximos à borda da área levantada, tornando-se necessária uma complementação que levou à adição de mais duas fileiras de quadras. Isto fez com que o espaço que separava a Área 01 da Área 02 fosse mapeado, levando à opção de transformar a área-piloto na união das duas. Para manter o formato regular da

área-piloto, foram levantadas algumas quadras extras a nordeste e sudoeste do setor já mapeado.

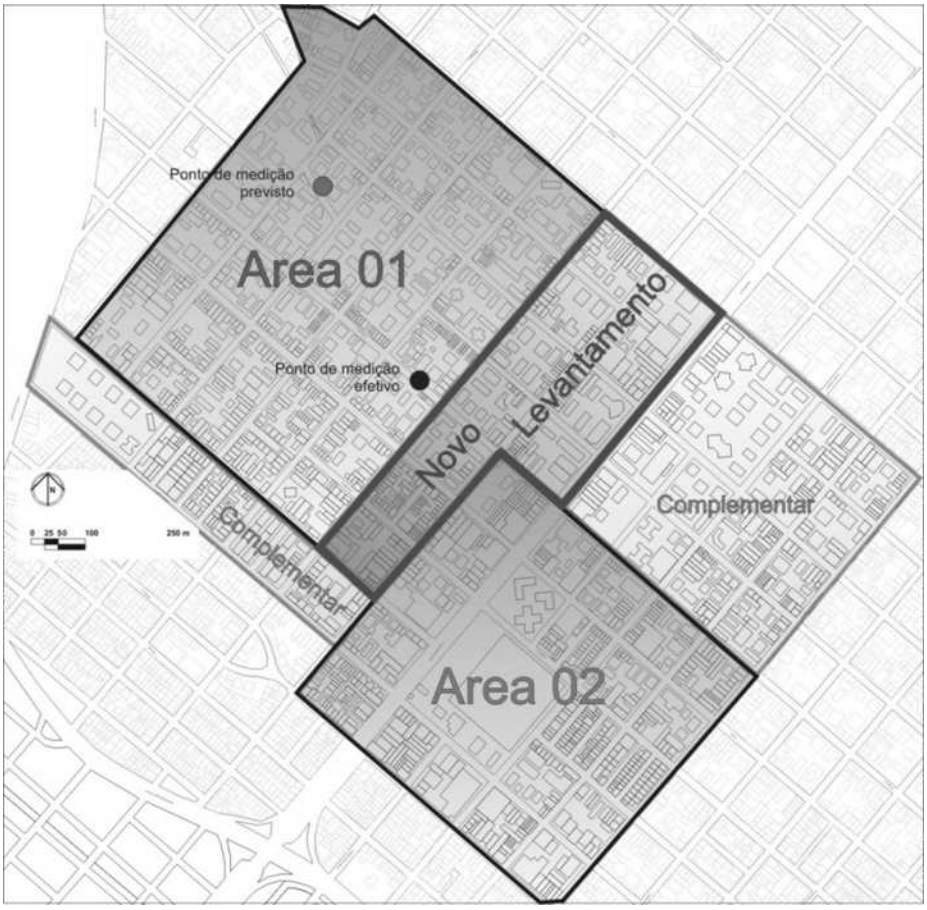


Figura 4.26: Expansão das áreas iniciais e configuração da área para estudo de caso

A **Área-Piloto**, deste modo, acabou por incorporar a área residencial verticalizada próxima ao antigo córrego Uberabinha, estendendo-se ininterruptamente até as proximidades da Av. 23 de Maio. A área apresenta com uma morfologia bastante diversificada, contando tanto com torres isoladas centralizadas em grandes lotes quanto com quarteirões inteiros de edificações geminadas assobradadas.

Em termos de uso, a predominância é residência, embora o local conte com uma forte estrutura de comércio e serviços, polarizada pelo Shopping Ibirapuera.

O setor norte é ocupado na maior parte por edificações residenciais multifamiliares, enquanto o setor sul, sofrendo restrições construtivas devido à proximidade ao aeroporto de Congonhas, apresenta edificações de um ou dois pavimentos, normalmente antigas residências que hoje abrigam atividades de comércio e serviços.

O mapeamento do uso e ocupação da área pode ser visto na e na Figura 4.28.

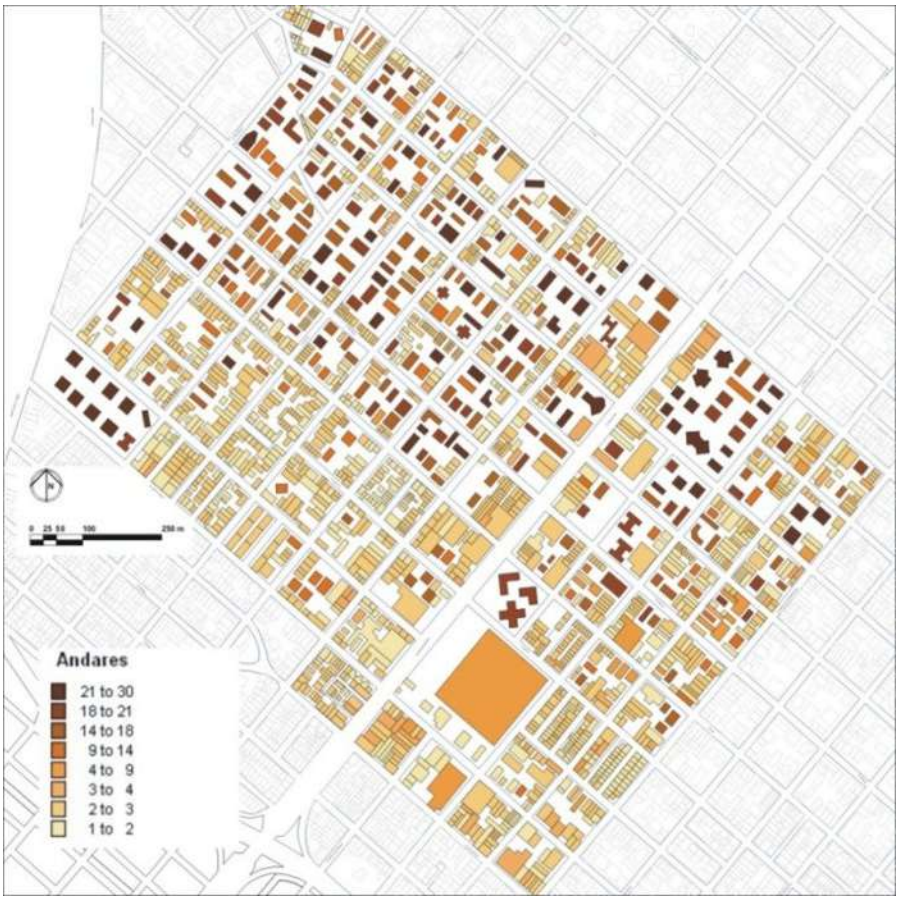


Figura 4.27: Mapeamento de alturas na área piloto

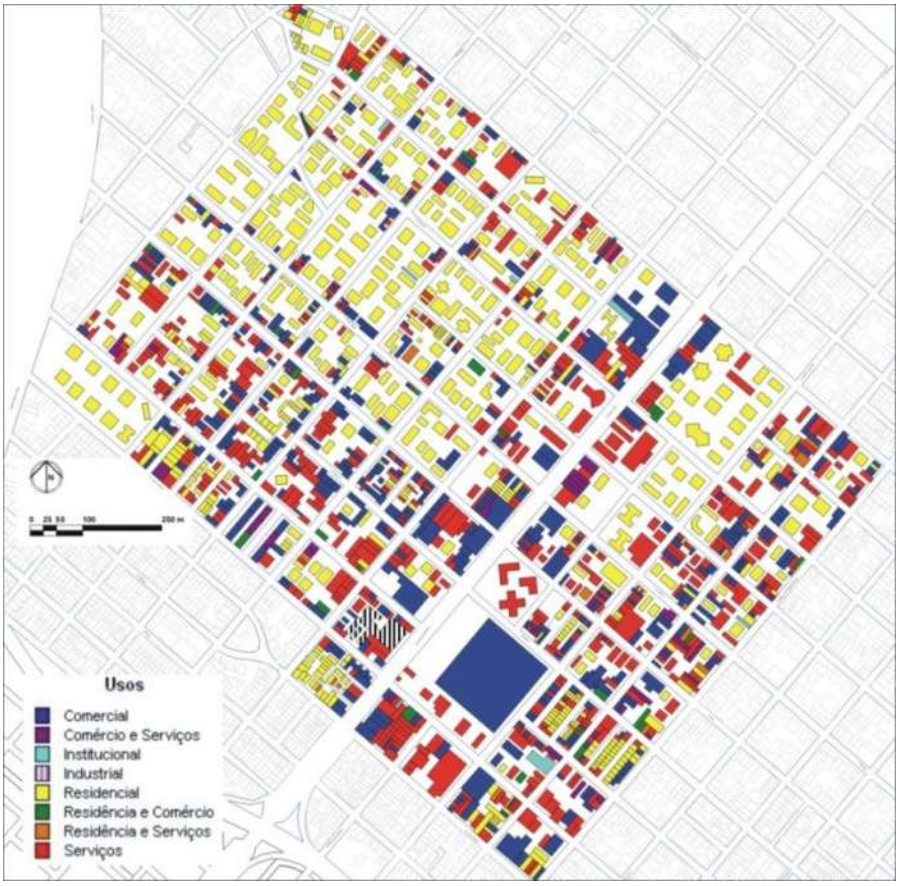


Figura 4.28: Mapeamento de uso do solo na Área-Piloto

A coloração das fachadas pode ser vista na Figura 4.29.

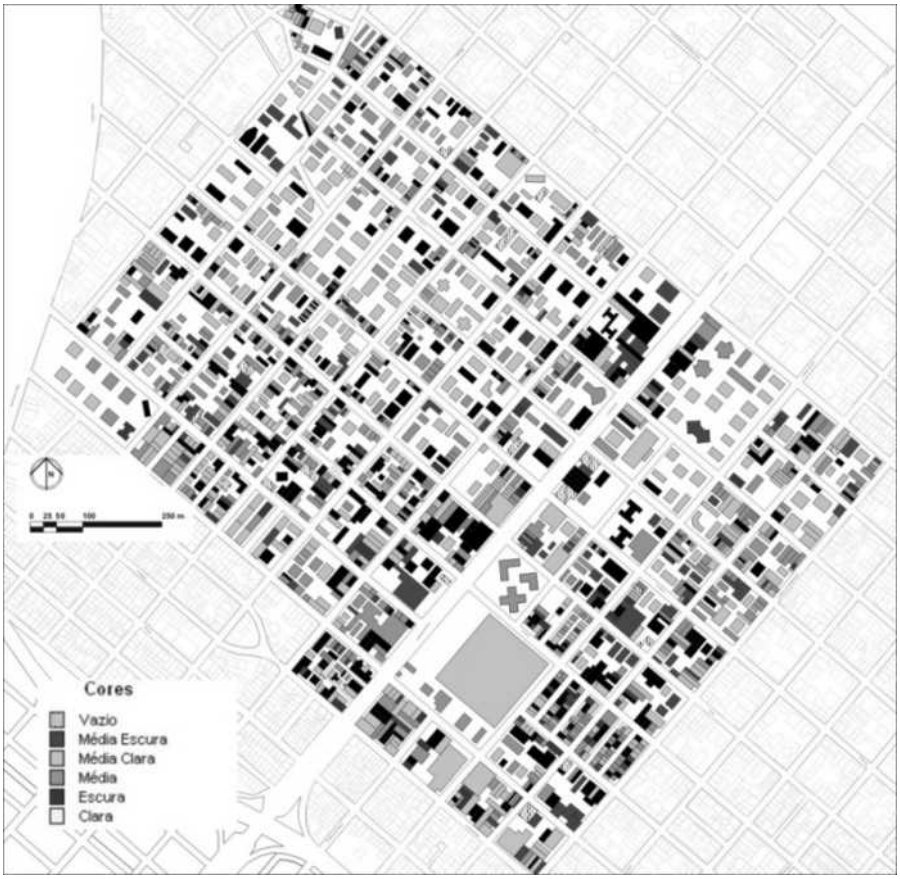


Figura 4.29: Mapeamento de cores de fachada na Área Piloto

4.5. Medidas de campo

4.5.1. *Planejamento*

Oke (2004) apresenta uma série de diretrizes para a disposição de equipamentos de medida em áreas de estudo. O autor define alguns conceitos importantes para a realização de medidas urbanas, bem como alguns cuidados que devem ser considerados.

Quanto à localização dos equipamentos, o autor afirma serem possíveis duas abordagens:

- Colocação de sensores na própria Camada Abaixo das Coberturas (UCL), em um local com ocupação representativa da área de estudo e a alturas semelhantes àquelas utilizadas em medições para terrenos não urbanos. Assume-se, desta forma, que a mistura gerada pelos fluxos de ar ao redor dos obstáculos seria suficiente para resultar em uma condição média típica da escala local em que se trabalha;
- Instalação dos equipamentos acima da camada de mistura, extrapolando os resultados para o interior da Camada Abaixo das Coberturas. Esta camada se estende até 1,5 vezes a altura média das edificações, em caso de áreas densas, ou até 4 vezes a altura em áreas menos densas e mais horizontais. No

caso de Moema, os sensores deveriam ser colocados acima dos 126 metros, o que inviabiliza esta possibilidade.

A localização da estação deve ser estabelecida de acordo com o propósito das medições. Áreas mais densas tendem a apresentar maiores impactos na atmosfera. Outro ponto importante é a exposição dos sensores. Buscou-se instalar os sensores à sombra e expostos à condição média do pedestre, seguindo as recomendações inicialmente da norma ISO: 7726 (1998). As disposições da norma foram alteradas em medições subseqüentes, principalmente na altura dos sensores. Isso é natural, uma vez que o objetivo das medidas propostas na norma e as realizadas nesta pesquisa são diferentes.

Para se aumentar a área coberta pela medida, optou-se por, além de se utilizar estações fixas, serem feitas também medidas móveis, cobrindo uma área maior. A medida segue um procedimento semelhante a Assis (2000), Mendonça e Assis (2001), Souza (2003) e Katzschner (2007), percorrendo-se um transecto no período de uma hora. Não foram realizadas duas medidas no mesmo ponto, e a correção da variação temporal dos dados será feita com base nos dados da estação fixa.

No planejamento inicial, as medições deveriam ser realizadas simultaneamente nas três áreas de estudo, facilitando a comparação entre elas através de uma uniformização das condições de contorno. Optou-se ainda por uma combinação entre pontos fixos e transectos, de modo a cobrir uma área maior de pontos, sem abrir mão de medidas contínuas que servissem de referência e pudessem corrigir as variações temporais do percurso móvel.

As equipes e equipamentos foram distribuídos nas áreas de acordo com interesses pessoais de pesquisa e questões de segurança. A equipe era sempre formada por no mínimo 3 pessoas. A estação ELE seria colocada no topo do Shopping Ibirapuera e a direção do vento não seria medida no térreo. Para cada uma das áreas foi confeccionada uma planilha de medição, especificando os pontos do transecto móvel, o tempo de percurso e o método de medição. Os pontos foram selecionados buscando áreas de sombra para a instalação dos equipamentos. Os equipamentos utilizados estão especificados no ANEXO A4.

Cada equipe deveria estar no ponto, com o equipamento montado no máximo até 6h30, sendo o ideal 6h20. As medições nos pontos fixos foram contínuas, os transectos foram realizados de 3 em 3 horas, iniciando-se às 6h45. Como a medida foi realizada no horário de verão, este horário corresponderia às 5h45 do tempo solar verdadeiro. Cada transecto tem 4 pontos. Um integrante da equipe deveria ficar junto ao equipamento fixo e os outros dois deveriam percorrer o transecto. O procedimento de medida proposto foi o seguinte:

1. Deslocamento até o ponto 15 minutos antes do início da medida. O tempo de percurso entre os pontos do transecto propriamente dito nunca é superior a 3 minutos, mas foi dado

um intervalo de tolerância de 2 minutos para qualquer eventualidade;

2. Instalar o sensor de temperatura NA SOMBRA. Depois de instalado a primeira vez, tentar repetir o local de medida. Esperar pelo menos dez minutos para realizar a medição;
3. Passados 10 minutos, anotar a medida de temperatura e umidade relativa;
4. Um dos integrantes fica encarregado de informar, em voz alta, os valores de vento de 5 em 5 segundos por dois minutos (em um total de 24 dados). Como as medições serão feitas com o anemômetro de ventoinha, pegar sempre a primeira leitura de velocidade e direção, contar até 3 e fazer a leitura seguinte. A direção pode ser dada de maneira aproximada, por quadrante (norte, noroeste, leste, etc.).

Os pesquisadores foram instruídos a realizar todas as medidas dos transectos na sombra, lembrando inclusive de proteger o sensor do sol durante o percurso entre pontos. Também se instruiu que evitassem obstruir o sensor de vento ou temperatura com o próprio corpo, buscando sempre uma sombra externa. Depois de terminada as medidas do transecto, deveriam fazer uma medida junto ao ponto fixo na primeira meia hora. Isto é necessário para checar o erro das medidas de vento e de temperatura com o ponto fixo para que se verifique se é possível efetuar a correção posteriormente.

Devido à disponibilidade de equipamentos e pessoal, as medidas foram inicialmente agendadas para a semana do dia 15 ao dia 19 de janeiro de 2007, preferencialmente nos dias 16 e 18 (terça-feira e quinta-feira). No dia 5 de janeiro de 2007 foram enviadas cartas à administração do Condomínio Rimini-Viterbo (ponto fixo da área 01), do Shopping Ibirapuera (ponto fixo da área 02) e do Parque do Ibirapuera (ponto fixo da área 03) solicitando espaço para instalação de equipamentos e acesso a sanitários e estacionamento. Até a data da primeira medida, no entanto, apenas a administração do parque, na pessoa da Sra. Francisca Ramos de Queiroz Cifuentes, havia retornado, autorizando as medições, o que levou a um adiamento para o dia 18. No dia 17 de janeiro, a administração do Shopping Ibirapuera respondeu negando autorização para utilizar as instalações do estabelecimento. Sem resposta do Condomínio Rimini-Viterbo, o plano de medidas foi alterado, passando a contar com estacionamentos privados como pontos fixos. Infelizmente, as condições climáticas do dia 18 de janeiro não foram favoráveis, com alta nebulosidade e chuvas, o que provocou um cancelamento das medidas.

4.5.2. *Medição de Fevereiro*

Por todas as questões citadas, o planejamento foi alterado. Não havendo disponibilidade da equipe completa para medição simultânea nas três áreas, optou-se por realizar a medida somente na Área 01, mais adensada, com uma equipe reduzida. Deste modo, ter-se-ia mais flexibilidade nos dias disponíveis. Outra vantagem desta opção foi a

possibilidade de se utilizar a estação Huger WM918 e do HOBO, que contam com sensores mais adequados, no percurso do transecto. Embora a estação pudesse ser conectada a um computador portátil para aquisição automática dos dados, optou-se por um registro manual. A planilha de medição utilizada foi a mesma preparada para as medições. O novo percurso está descrito na Figura 4.30.

Ponto Fixo
ESTAPAR R, Rouxinol 776 Entre R. Gaivota e Juaperi 5:00 minutos do Ponto D
Ponto A
Rua Gaivota em frente ao N° 754 Entre Av. Macuco e Jacutinga 2:50 minutos da base
Ponto B
Rua Gaivota, em frente ao N° 988 Entre Av. Macuco e Rouxinol 1:40 minutos do Ponto A
Ponto C
Rua Inhambu, em frente à garagem do N° 1120-1126 Entre Avs. Rouxinol e Pavão 2:10 minutos do Ponto B
Ponto D
Rua Canário, em frente ao N° 1320 Entre Avs. Pavão e Cotovia 3 10minutos do Ponto C

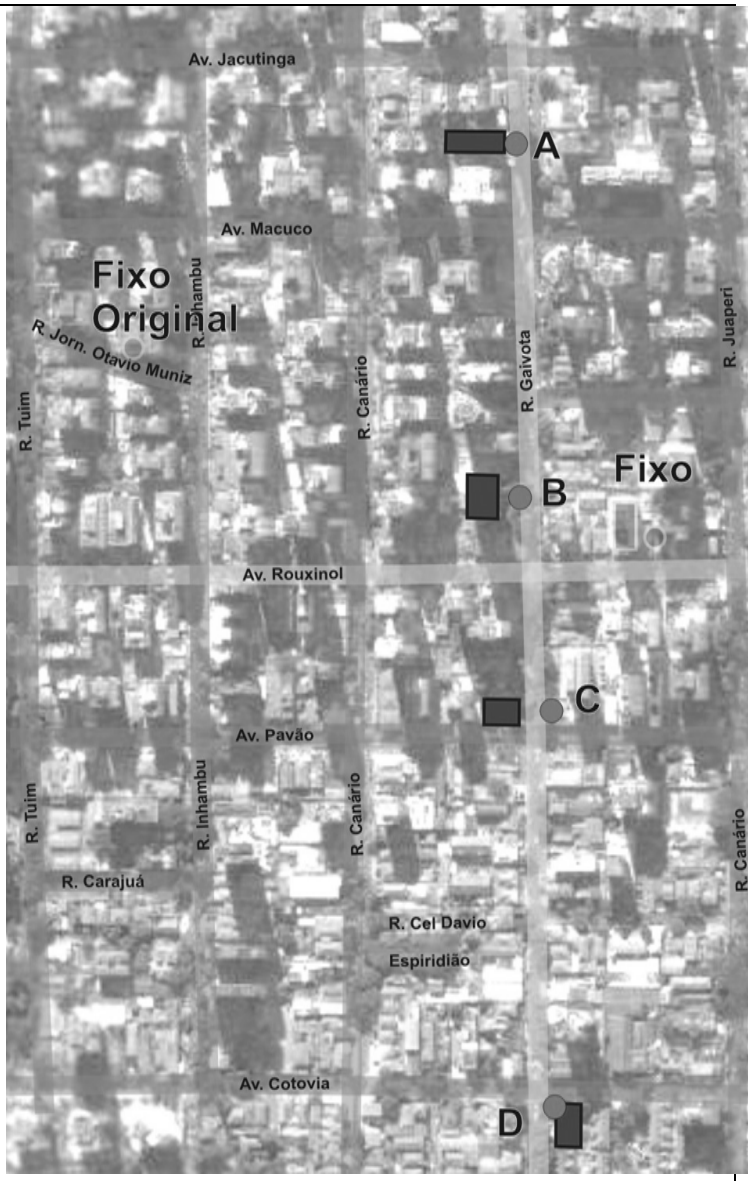


Figura 4.30: Localização final dos pontos de medição para 04 de fevereiro de 2007

A medição foi realizada no período entre 7h15 e 20h40 do dia 04. A arquiteta Bruna Luz ficou responsável pelo ponto fixo, enquanto o bolsista realizava as medidas móveis.

Uma breve apresentação das condições sinóticas para o período de medida é feita no ANEXO A4.

Ponto Fixo

Ponto A – Detalhe (proteção sensor)

Ponto A

Ponto B

Ponto C

Ponto D

Foi realizado um registro fotográfico das condições de céu no período. Nos períodos das 16h às 17h a câmera foi utilizada para registro dos pontos do transecto. Como foram tiradas fotos com grande angular, a evolução da nebulosidade até pode ser verificada pelo registro do ponto A (às 16h) e do ponto D (às 17h). Não foram realizados registros fotográficos às 12h e depois das 17h, devido a falta de espaço no cartão de memória da máquina fotográfica.

Figura 4.31: Registro fotográfico da medição de 04 de Fevereiro de 2007

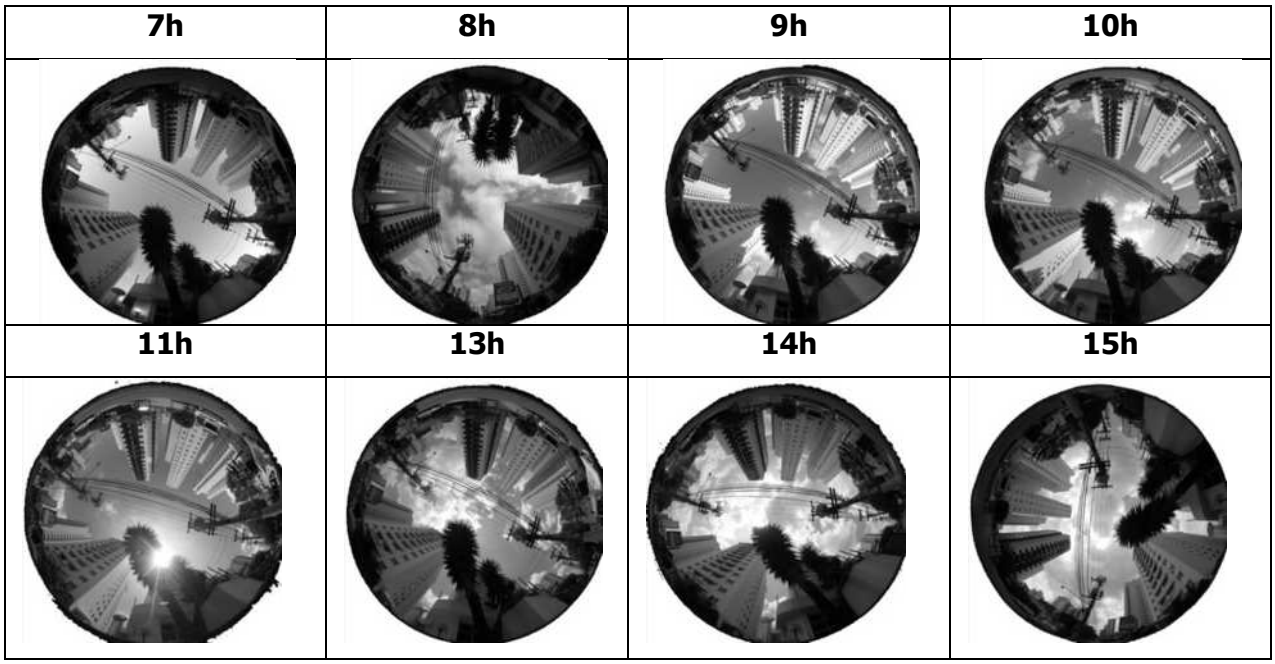


Figura 4.32: Fotos da condição de nebulosidade no dia da medida

As fotos indicam pouca ocorrência de céu claro, com um aumento de nebulosidade no período da tarde.

Inicialmente, apresentam-se os dados obtidos das estações locais fixas, no parque do Ibirapuera e no Aeroporto de Congonhas.

			Ibirapuera				Congonhas			
Hora	Pressão Atmosférica hPa	Radiação Global W/m²	Temperatura °C	Umidade %	Velocidade do Vento m/s	Direção do Vento Setor	Temperatura °C	Umidade %	Velocidade do Vento m/s	Direção do Vento Setor
01:00	929	1	20,6	84	1,5	90	20	83	4	110
02:00	928	1	20,4	84	1,6	113	20	83	4	100
03:00	928	1	20,1	85	1,3	90	20	83	3	110
04:00	927	1	19,9	85	1,5	90	20	78	3	110
05:00	927	1	19,7	86	1,1	113	19	83	2	90
06:00	926	1	18,6	90	0	calmaria	19	83	2	110
07:00	927	1	18,6	93	0,8	113	19	88	3	100
08:00	927	47	19,6	89	1,6	68	20	83	4	70
09:00	928	293	20,6	80	2,3	113	20	83	3	100
10:00	928	376	21,3	76	2	90	21	78	5	110
11:00	929	742	23,1	69	2	90	23	73	4	90
12:00	928	941	24,5	64	2	90	25	65	3	80
13:00	928	843	25,5	61	1,6	158	26	58	3	100
14:00	927	833	26,6	56	1,5	248	27	54	3	160
15:00	927	858	27,2	55	2,2	180	28	51	4	200
16:00	926	710	27,2	57	2,6	180	26	61	7	170
17:00	926	563	25,9	63	3,4	180	25	69	7	160
18:00	926	431	24,8	66	3,3	180	24	69	5	170
19:00	926	132	23,6	72	3	180	23	78	5	170
20:00	927	21	22,6	77	2,6	180	22	83	5	170
21:00	927	1	22,2	80	2,5	158	22	83	4	170
23:00	928	1	21,9	80	1,5	158	21	83	4	160
00:00	928	1	21,3	82	1,3	90	21	83	4	160

Tabela 4.3: Dados das estações Ibirapuera e Congonhas para o dia da medição (04 de Fevereiro de 2007)

Os níveis de radiação apresentaram-se elevados, apesar da ocorrência de nebulosidade, principalmente no período da tarde. Por isso o valor máximo ocorreu ao meio-dia e não às 13h, como era esperado devido ao horário de verão. Observou-se um comportamento bastante similar entre as duas estações. A umidade relativa apresentou-se alta durante o dia, com mínima superior a 50% em ambas as estações.

As medidas do ponto fixo acompanharam os valores das estações até o meio dia, momento a partir do qual foi verificado um sobreaquecimento do recinto urbano (Figura 4.33).

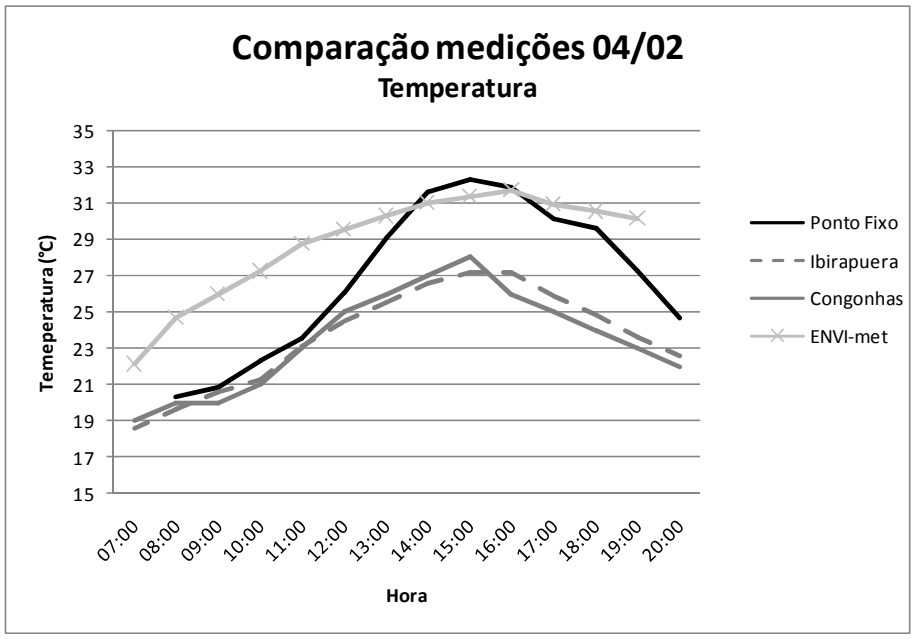


Figura 4.33: Comparação entre as temperaturas medidas nas estações fixas para o dia 04 de Fevereiro de 2007

Os resultados da simulação com o Envi-met serão apresentados em detalhe no item 5.2.2.

A diferença de máxima de 4°C, atingida por volta das 15h, é alta quando comparada aos valores informados na literatura (OKE, 1973; OKE, 1987; FREUEHAUF, 1984), especialmente considerando-se que a estação de referência se encontra dentro da área urbana, a poucas centenas de metros do ponto medido. Observando-se os resultados das medidas de ventilação, no entanto, observa-se que a redução da velocidade do ar no ponto fixo é significativa, o que reduz as trocas convectivas e pode levar a um acúmulo de calor. Ainda assim, a proteção solar do sensor foi reconsiderada nas medições posteriores.

Para a tabulação dos dados do transecto, foi realizado um ajuste nas temperaturas buscando convertê-las em temperaturas equivalentes medidas simultaneamente. Para isso, foi realizada uma correção linear, considerando-se que a diferença de temperatura entre os pontos móveis e o ponto fixo é constante e que qualquer variação na medida deste repercute proporcionalmente naqueles. A variação entre a medida do ponto fixo na hora cheia e a medida no momento em que era realizada a leitura no ponto móvel é subtraída da temperatura anotada nos pontos do transecto.

A correção mostrou-se aceitável quando aplicada à medida do ponto fixo, para todos os horários exceto 10h da manhã (cerca de 9h no Tempo Solar Verdadeiro - TSV, já que a medida foi realizada no período de horário de verão) quando a diferença entre a temperatura calculada corrigida e a medida foi de 1,5°C. Às 16h (15h TSV) obteve-se uma correspondência regular, com defasagem de 0,8°C. Nos demais horários, a diferença entre os valores calculados e medidos foi inferior a 0,5°C. O resultado gráfico é mostrado na Figura 4.34.

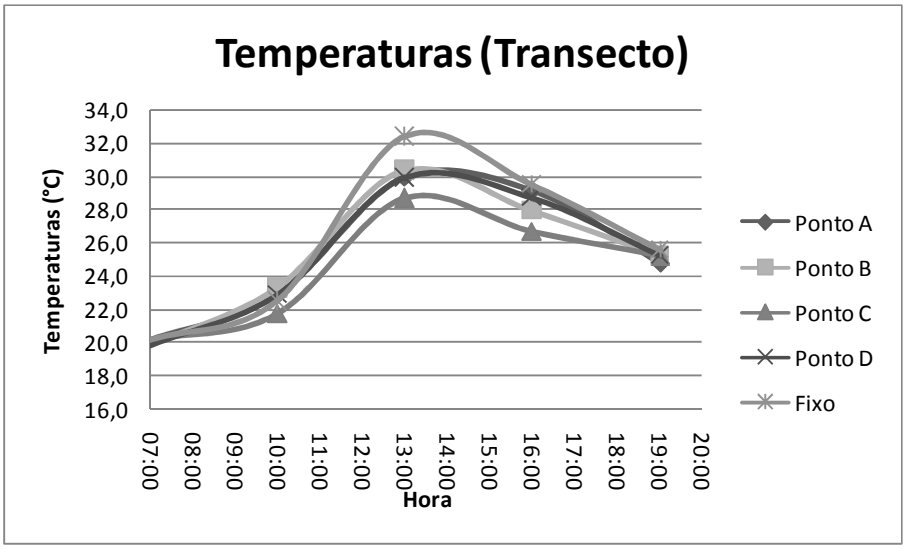


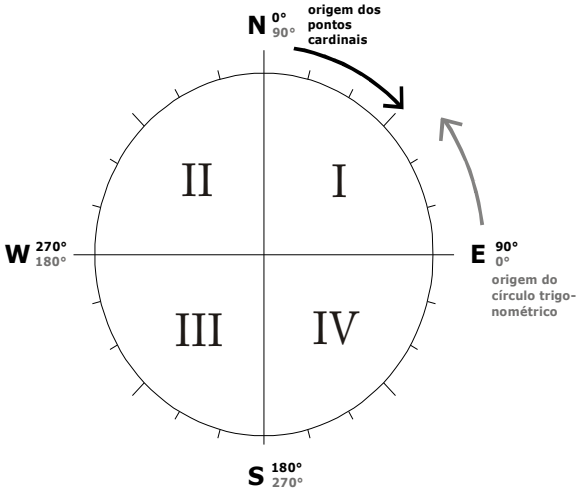
Figura 4.34: Comparação entre as temperaturas medidas no transecto para o dia 04 de Fevereiro de 2007

Observa-se que os maiores valores ocorrem na medida das 13h, e não naquela das 16h como era esperado. Pelas medidas da estação fixa, percebe-se que a informação no horário de pico (ocorrido às 15h – 14h TSV) não foi contemplada nas medidas do transecto. Além disso, o aumento da nebulosidade acelerou a queda de temperatura, achatando a curva medida nos transectos e induzindo a erros quando se analisam os dados sem a comparação com a estação fixa. No entanto, o sobreaquecimento do ponto fixo foi em muito superior ao encontrado no decorrer do transecto.

O Prof. Dr. Jorge Saraiva (SARAIVA & DA SILVA, 2008) colocou que a medição no ponto fixo é espacialmente muito restrita, dependendo principalmente das condições locais, mesmo quando se trata da temperatura do ar, que tende a apresentar menores variações espaciais. A sugestão foi que se utilizasse a observação dos resultados do transecto como parâmetro para verificar a representatividade do ponto fixo. Quando comparado com os valores das estações meteorológicas, as temperaturas encontradas nos pontos A, B e D parecem mais condizentes com os valores citados na literatura para sobreaquecimento urbano (da ordem de 2°C). No entanto, não ficou claro nesta medida se o sobreaquecimento do ponto fixo se deveu às especificidades do local ou a deficiências na proteção do sensor à radiação solar.

O tratamento dos dados de vento foi alterado incorporando informações obtidas nas reuniões do estágio no exterior. Para se estudar a direção do vento, foi calculada a média vetorial das direções, evitando-se erros gerados pela média escalar. Por exemplo, ao se calcular a média escalar entre 45° e 340° seria obtido o ângulo de 192° (vento de SSE) quando na verdade o vento estaria vindo do quadrante norte. Isto ocorre sempre que a diferença entre os dois ângulos for superior a 180°. Para o cálculo de médias vetoriais, a direção é descrita a partir de suas componentes em X e Y (respectivamente dadas pelo seno e pelo cosseno do ângulo trigonométrico), das quais se tira uma média que é novamente convertida em ângulo.

Um problema na utilização de vetores para variáveis climáticas é a não correspondência entre os ângulos cardinais e o círculo trigonométrico. Os ângulos de orientação para os pontos cardinais têm origem no Norte (x = 0, y = 1) e crescem no sentido horário até 360°. No círculo trigonométrico, a origem é no Leste (x=1, y= 0) e os ângulos são contados no sentido anti-horário. As relações para conversão dos ângulos estão descritas na Figura 4.35.



Para $\gamma \leq 90°$

$\gamma'' = 90° - \theta$

Para $90° < \gamma \leq 360°$

$\gamma''' = 450° - \gamma$

Figura 4.35: Correspondência entre os círculos cardinal e trigonométrico

Observa-se que a função inversa para o mesmo intervalo é igual. Deste modo, a mesma equação se aplica para a conversão de "ângulos cardinais" em "ângulos trigonométricos" e vice-versa. Esta constatação foi fundamental na utilização de dados climáticos no programa de CFD. Para fins do tratamento de dados, as direções medidas foram convertidas em ângulos trigonométricos, processadas nesta forma e depois revertidas a direções cardinais.Foram então calculadas médias móveis vetoriais da direção do vento em intervalos de 15, 30 e 60 minutos.

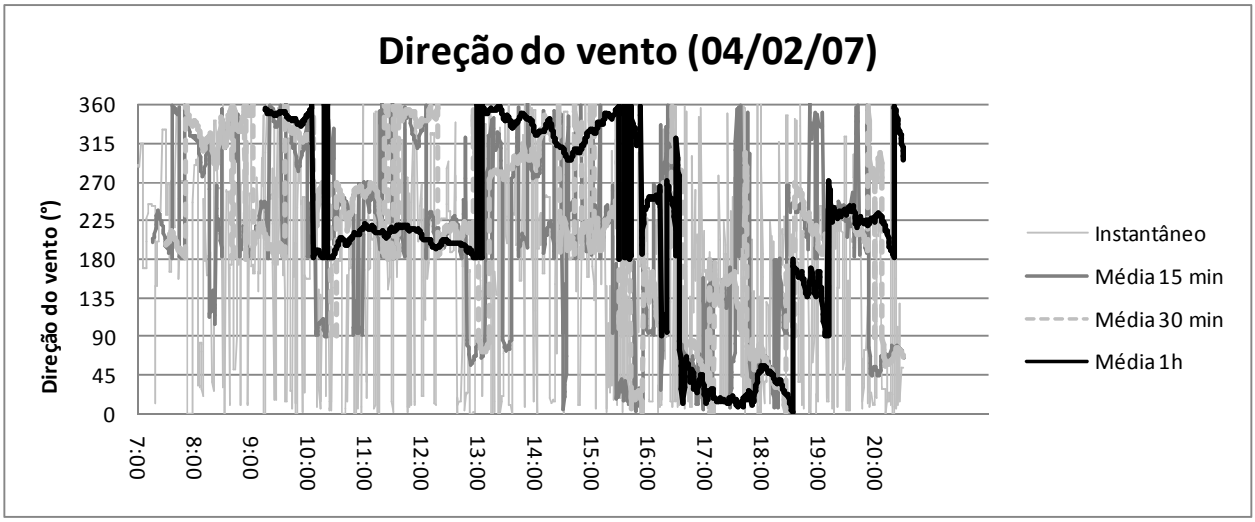


Figura 4.36: Dados de direção do vento para o dia 04 de Fevereiro de 2007

Aparentemente, a análise deste gráfico aponta para alterações sistemáticas na direção do vento a cada período de aproximadamente 3 horas. No entanto, deve-se observar que entre 13h às 19h o vento se mantém predominantemente no quadrante norte, o que é

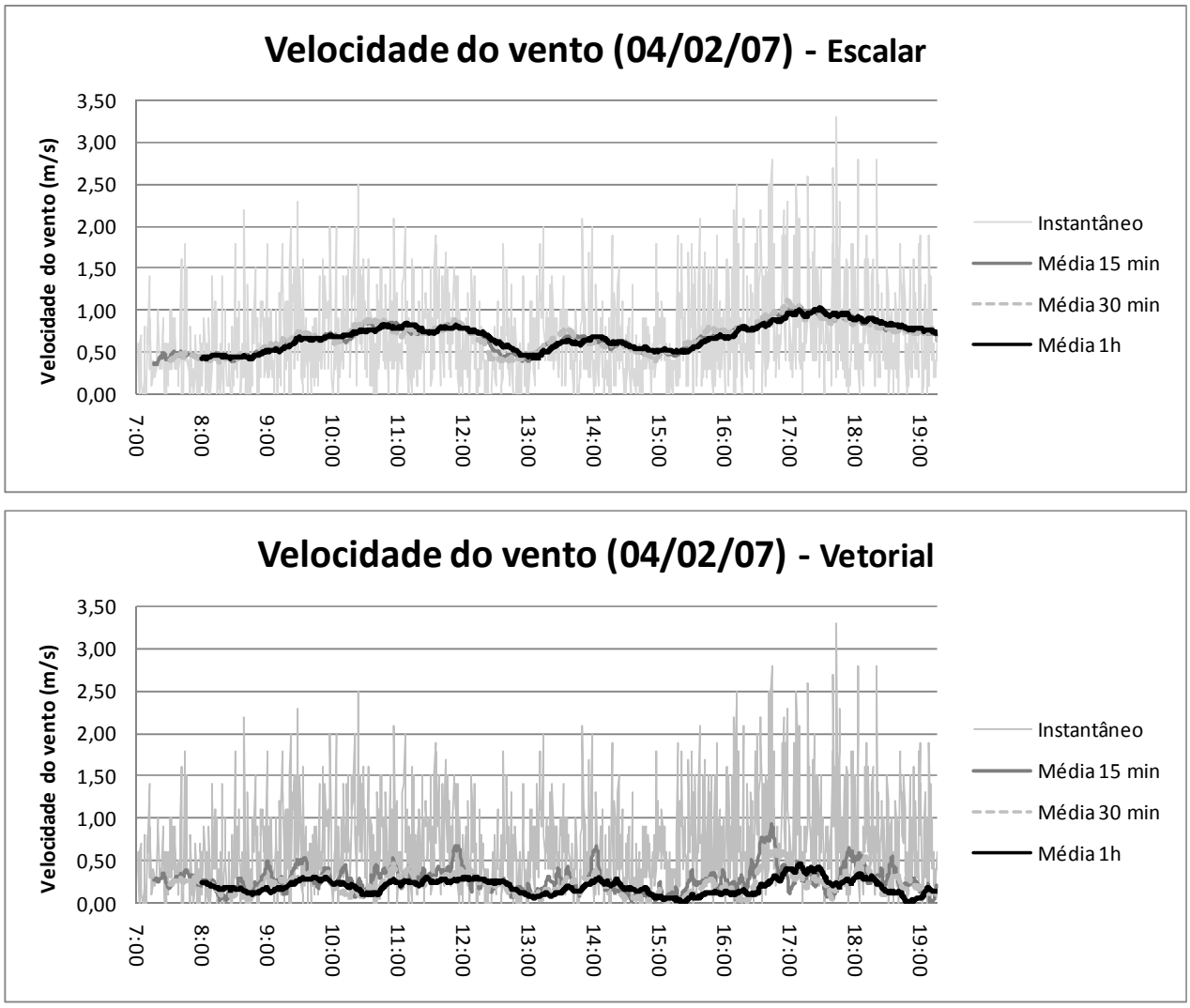
mascarado pela representação linear de valores angulares. Ainda assim, há tendências de alteração às 10h e após as 19h, reafirmando o padrão de 3 horas que, em teoria, deveria estar dentro do vazio espectral apresentado por Saraiva, Silva & Silva (2005).

Nas estações meteorológicas, o vento apresenta-se durante a manhã com predominância de leste com pequenas variações. Entre 13h e 15h, o vento passa a vir do sul, o que coincide com o aumento de nebulosidade verificado. Como as variações com ciclo de 3 horas não ocorrem nas estações fixas, deve-se investigar a hipótese de estes fenômenos são gerados pela estrutura urbana, ocupando a região do vazio espectral no estudo de cidades.

Os dados de velocidade foram tratados tanto de maneira escalar quanto vetorial. Foi calculada a média móvel para os últimos 15, 30 e 60 minutos, assim como havia sido realizado para os dados de direção de vento. Os resultados estão apresentados na Figura 4.37.

Figura 4.37: Dados de velocidade do vento para o dia 04 de Fevereiro de 2007

Média escalar e vetorial de velocidades, respectivamente



Observa-se que os resultados escalares descrevem melhor o comportamento do vento na área. No caso das médias vetoriais, a turbulência tende a gerar componentes de magnitude similar com sinais invertidos, fazendo com que as velocidades resultantes sejam excessivamente baixas.

Verifica-se que, nos períodos das 13h e das 15h, a velocidade média do vento é reduzida, coincidindo com períodos de mudança de direção. Entre 18h30 e 19h, quando há uma nova mudança na direção local, a velocidade também parece cair, mas como não há continuidade das medidas após às 19h, não é possível determinar se trata de um vale ou se o declínio de velocidade continuaria durante o período noturno. Apesar destas colocações, considera-se que ainda não é possível estabelecer com clareza uma relação entre a velocidade e a direção do vento, sendo que a avaliação das medidas permite apenas uma análise de tendências.

Os resultados de vento indicam ocorrência de turbulência intensa na área medida, com variações instantâneas da ordem de 2 a 3 m/s. Os valores médios ficaram muito abaixo dos registrados nas duas estações, conforme era esperado, mas acompanham a elevação das velocidades por volta das 17h (Figura 4.38).

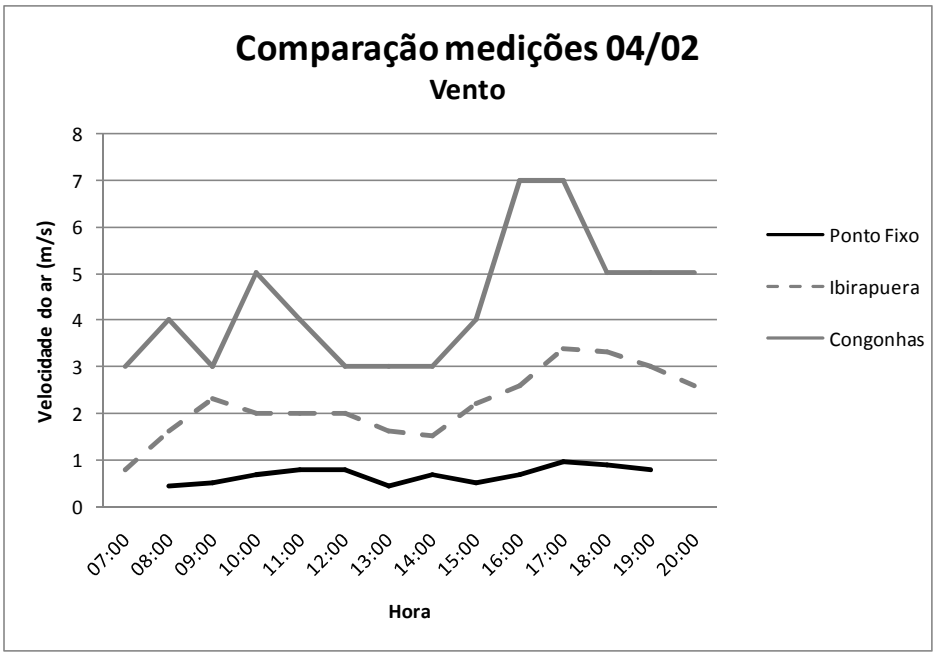


Figura 4.38: Comparação entre as velocidades de vento para o dia 04 de Fevereiro de 2007

Um dos principais problemas na comparação entre os dados de vento da estação meteorológica e da medida de campo é a incerteza na forma de tratamento dos dados. Não foi possível determinar se o valor horário fornecido pela estação meteorológica consiste em uma leitura instantânea dos dados a cada hora (situação na qual a comparação entre os dados seria inútil, dados os efeitos da turbulência), uma média dos valores horários ou uma combinação dos dois. Ainda que se soubesse que se tratassem de médias haveria dúvida a respeito do período ao qual estas médias se referem e à maneira como elas foram calculadas. Elas poderiam ser médias escalares ou vetoriais e representar o intervalo entre as horas cheias (e.g. 14h às 15h) ou serem tratadas como pontos médios (no caso a média das 14h representaria o período entre 13h30 e 14h30). Assumiu-se que foram coletados dados com uma alta taxa de amostragem, os quais foram trabalhados de forma semelhante ao tratamento dado neste estudo.

Os dados de vento obtidos na medida em transecto não puderam ser aproveitados, já que a resposta do sensor da estação meteorológica

Huger a variações no vento é lenta e a sua sensibilidade limita-se a velocidades acima de 1 m/s. A medida da temperatura radiante no transecto também apresentou problemas, já que as medidas não são simultâneas e é impossível avaliar se a variação na temperatura de globo advém da variação na temperatura do ar ou das temperaturas superficiais.

4.5.3. *Medição de Setembro*

Foi realizada uma segunda série de medidas no dia 05 de setembro de 2007, buscando-se avaliar a situação da área no inverno. No entanto, a presença de uma massa de ar quente e seco sobre a cidade provocou um maior aquecimento do ar, fazendo com que os resultados da medição se aproximassem daqueles obtidos no verão.

Para esta medição, algumas mudanças foram introduzidas com sucesso e serão reproduzidas nos demais trabalhos de campo. Dentre elas estão:

- Instalação do sensor de vento entre 1,80m e 2,00 m para evitar reduzir a influência de veículos e transeuntes;
- Alteração da proteção do sensor de temperatura, baseado no modelo acoplado à estação ELE e;
- Utilização de termômetros de mercúrio para calibração dos resultados. O termômetro foi protegido da incidência da radiação solar direta por uma roda de isopor embrulhada em papel alumínio, mas continuou exposto à radiação refletida e emitida pelo chão.

Figura 4.39: Foto da proteção solar projetada e do novo posicionamento do sensor de vento

Além disso, para as próximas medidas, será adotada uma simplificação do transecto, focando na medida de temperatura e eliminando o vento e a temperatura radiante até que se obtenham equipamentos adequados para medi-los. Os dados da medição de 05 de setembro estão em processo de tabulação.

			Ibirapuera				Congonhas			
Hora	Pressão Atmosférica hPa	Radiação Global W/m²	Temperatura °C	Umidade %	Velocidade do Vento m/s	Direção do Vento Setor	Temperatura °C	Umidade %	Velocidade do Vento m/s	Direção do Vento Setor
01:00	938	1	19,6	75	1,1	68	20	69	4	70
02:00	938	1	19,7	73	1,2	68	20	73	2	80
03:00	937	1	19,4	73	1,2	68	19	73	2	70
04:00	937	1	18,5	79	1,1	68	18	78	3	70
05:00	937	1	18,2	82	1,2	68	18	83	3	70
06:00	937	1	18	84	1,4	68	17	88	2	70
07:00	938	4	17,8	85	1,4	68	18	83	3	70
08:00	938	150	18,7	80	1,5	68	18	83	4	70
09:00	939	371	21	62	1,6	68	20	68	3	70
10:00	940	522	23,2	52	1,3	68	22	60	3	60
11:00	940	511	24,3	49	1,4	45	24	54	3	50
12:00	939	714	25,9	44	1	338	26	45	0	0
13:00	938	686	27,2	38	1,1	293	27	39	3	10
14:00	937	540	27,1	35	1	360	27	32	2	60
15:00	936	623	28,4	24	1	338	28	30	0	30
16:00	936	478	28,6	18	1,4	90	27	42	5	170
17:00	936	60	25,8	37	2,4	180	23	53	7	180
18:00	936	57	23,9	45	2,6	180	21	60	6	170
19:00	937	1	22,1	51	2	180	20	64	3	180
20:00	937	1	21,1	56	1,4	180	20	68	1	130
21:00	938	1	20,4	59	0,9	90	20	68	2	140
22:00	938	1	19,1	67	0	calmaria	21	64	1	40
23:00	938	1	18,5	73	0	calmaria	21	60	1	70
00:00	939	1	18,8	71	0	calmaria	21	56	1	120

Tabela 4.4: Dados das estações Ibirapuera e Congonhas para o dia da medição (05 de Setembro de 2007)

Ao comparar as condições sinóticas dos dois dias de medida, o primeiro fato constatado é a redução da radiação global máxima em 15%, devido à diferença da altura solar máxima dos dois dias (cerca de 83° para o dia 04 de fevereiro e 60° para o dia 05 de setembro). Os valores ao longo do dia, principalmente nos horários próximos ao meio-dia, apresentaram reduções da mesma ordem de grandeza.

Observou-se que a curva de temperatura do ar em ambas as estações apresentou comportamento semelhante àquele da medida de fevereiro, com um aumento na amplitude térmica.

Na estação do parque do Ibirapuera, houve redução de 0,8°C na temperatura mínima e um acréscimo de 1,6°C na temperatura máxima (amplitude térmica de 10,8°C contra 8.6°C na medida de fevereiro). Na estação do aeroporto, a temperatura máxima se manteve a mesma, mas houve uma redução de 2°C no valor da mínima, o que representa também aumento na amplitude térmica diária (11°C contra 9°C em fevereiro).

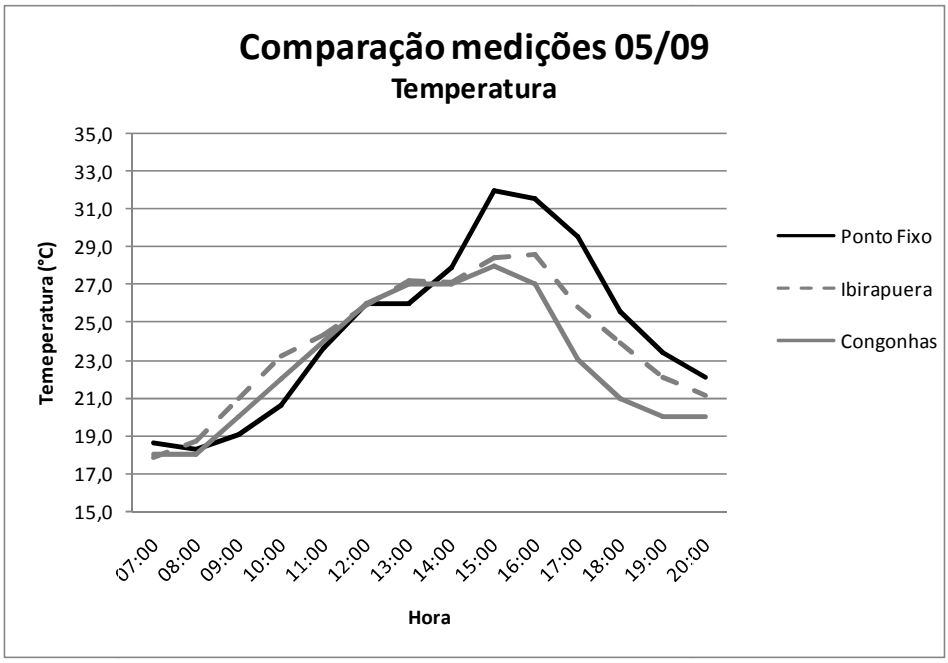
Uma breve apresentação das condições sinóticas, como a realizada para as medidas de Fevereiro, foi feita no ANEXO A4.

Tabela 4.5: Dados das medidos no ponto fixo (05 de Setembro de 2007)

Hora	Ponto Fixo Temperatura do ar (mercúrio) °C	Ponto Fixo Temperatura do ar (Hobo) °C	Ponto Fixo Temperatura de globo (mercúrio) °C	Ponto Fixo Umidade %	Ponto Fixo Velocidade do Vento m/s	Ponto Fixo Direção do Vento Setor
01:00						
02:00						
03:00						
04:00						
05:00						
06:00	19,0	18,7	17,5	70		
07:00	19,2	18,3	18,5	76		
08:00	20,0	19,0	19,7	73		
09:00	22,0	20,6	21,8	60		
10:00	23,8	23,6	23,8	52		
11:00	25,2	26,0	25,1	43		
12:00	26,5	26,0	26,8	42		
13:00	28,0	27,9	32,2	37	1,1	293
14:00	31,5	31,9	43,5	22	1	360
15:00	31,2	31,5	41,0	22	1	338
16:00	29,0	29,5	30,0	25	1,4	90
17:00	27,0	25,6	21,0	39	2,4	180
18:00	23,0	23,4	23,0	45	2,6	180
19:00	21,5	22,1	21,5	53	2	180
20:00						
21:00						
22:00						
23:00						
00:00						

A Figura 4.40 mostra a sobreposição entre os dados da medição em campo e aqueles obtidos nas estações meteorológicas.

Figura 4.40: Comparação dos dados de temperatura (05 de Setembro de 2007)



A comparação indica um processo de aquecimento semelhante nos três pontos até as 13h, quando começa a ocorrer sobreaquecimento do ponto medido. Os valores registrados no ponto fixo foram semelhantes para o termômetro de mercúrio e para o *datalogger* Hobo. Os valores absolutos máximos foram semelhantes aos obtidos na medida de fevereiro, o que reforça a validade de ambas as medidas.

No caso das medições de transecto, o *datalogger* Hobo não registrou as informações do período, mas os valores fornecidos pela estação Huger foram anotados manualmente. No entanto, a menor qualidade dos sensores levou a erros sistemáticos nos resultados. Após a correção, a temperatura final do ponto fixo ficou sempre entre 1,0°C e 1,4°C acima da temperatura da hora anterior.

A redução comparativa da umidade nas duas datas contribuiu para este aumento na amplitude térmica. Em termos relativos, a umidade chegou a atingir 18% na estação do parque e 30% no aeroporto. Ao contrário do que se esperava, a umidade no parque foi menor que aquela encontrada no aeroporto. Convertendo os valores relativos em umidade absoluta, a umidade no parque variou entre 11,69 e 4,70 gramas por quilograma de ar seco, com um valor médio de 9,86 g/kg (em fevereiro este valor oscilou entre 13,01 g/kg e 14,55 g/kg, com valor médio de 13,67 g/kg). O valor mínimo foi ocorreu às 16h, momento de máxima de temperatura, mas o valor numérico não acompanha os resultados do aeroporto, onde a umidade absoluta não ficou abaixo dos 7,60 g/kg. Nesta estação, a umidade absoluta máxima foi de 11,55 g/kg e o valor médio foi de 10,37 g/kg (em fevereiro, a umidade no aeroporto variou entre 12,31 g/kg e 14,87 g/kg, com valor médio de 13,54 g/kg, ligeiramente abaixo do valor médio do parque).

Os dados de direção de vento foram tratados da mesma forma que os obtidos na primeira medida. O resultado pode ser visto na Figura 4.41.

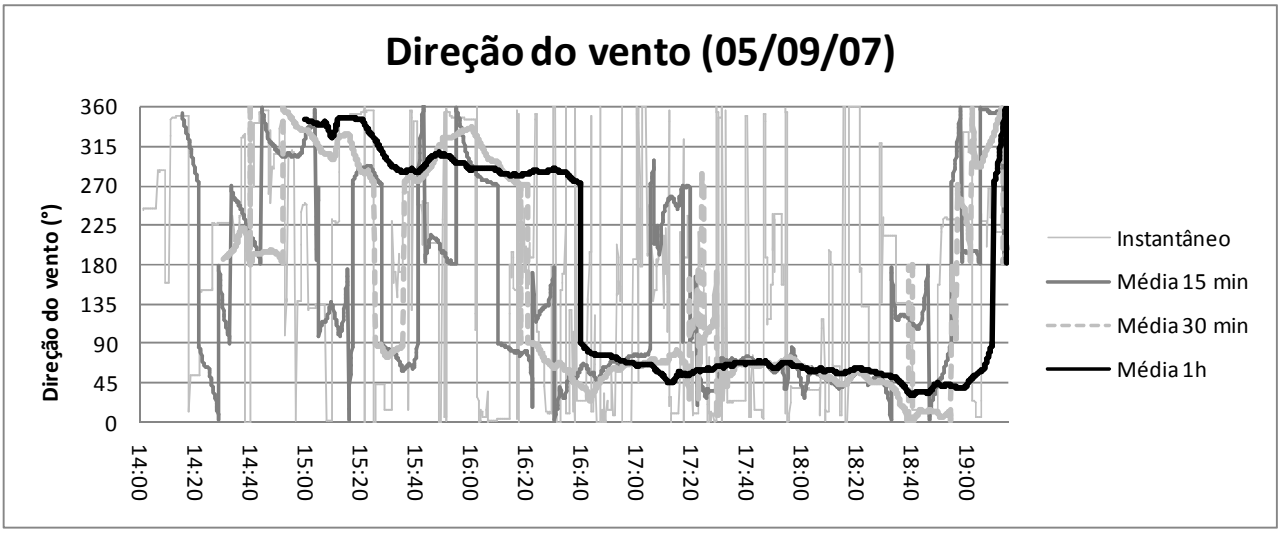


Figura 4.41: Dados de direção do vento para o dia 05 de setembro de 2007

Como na medida do dia 02 de Fevereiro, é possível observar grandes variações nos valores instantâneos e no tratamento de períodos curtos, mas quando a média é feita para 60 minutos os valores se estabilizam no quadrante noroeste, por volta de 300° (WNW), até aproximadamente às 16h30 quando mudam para o quadrante nordeste, por volta de 50°, até praticamente o final da medição.

Os horários estão condizentes com as alterações na direção do vento verificada na estação meteorológica, embora as direções em si sejam diferentes. As estações indicam vento estável nordeste (entre 60° e 70°) até as 10h, quando oscilações começam a ocorrer na estação do

Ibirapuera. No aeroporto, a tendência do quadrante se mantém até as 16h, quando o vento em ambas as estações passa a vir do quadrante sul (entre 170° e 180°) até o final do dia de medições.

Os dados de velocidade foram tratados somente na sua forma escalar, com os resultados apresentados na Figura 4.42.

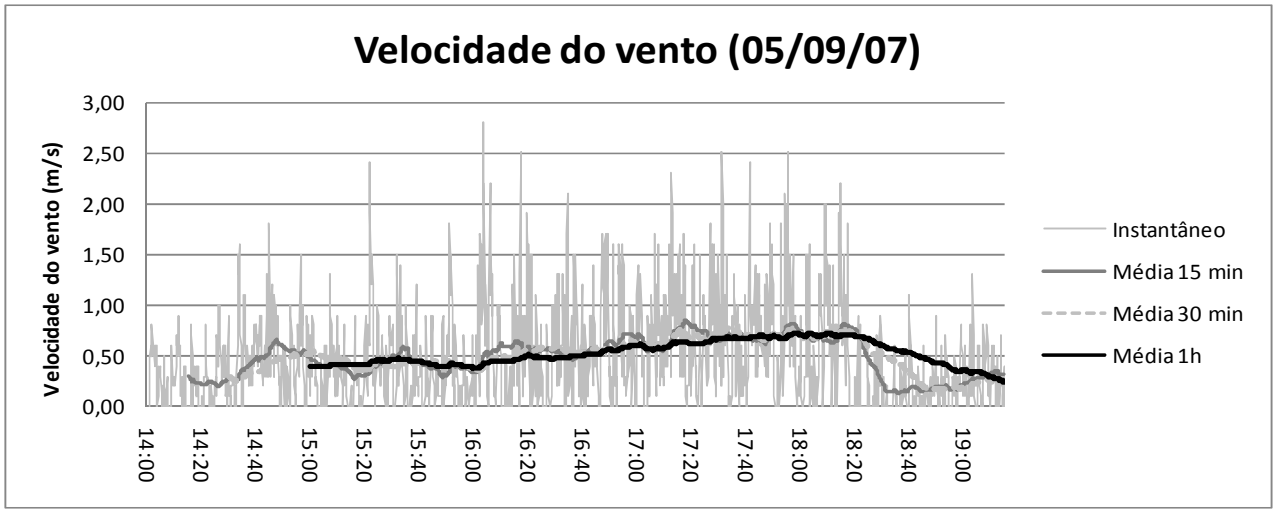


Figura 4.42: Dados de velocidade do vento para o dia 05 de setembro de 2007

Observa-se uma estabilidade da velocidade média em torno de 0,5 m/s com leve aumento até o final da tarde. No momento anterior à mudança de direção das 19h, há uma queda na velocidade média que chega próxima à calmaria. Observa-se ainda que, embora os resultados das médias de 15 minutos e 60 minutos sejam semelhantes no período entre 14h e 18h20, ao contrário do que ocorreu na medida de fevereiro, a média de 60 minutos mascara a queda brusca na velocidade ocorrida a partir deste horário. A comparação com os dados medidos nas estações meteorológicas é apresentada na Figura 4.43.

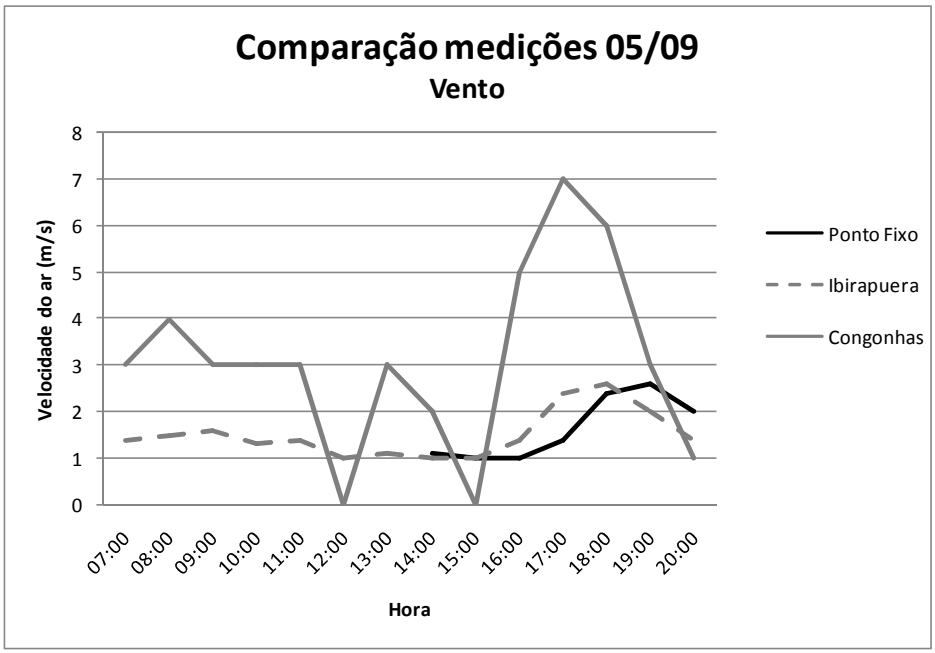


Figura 4.43: Comparação dos dados de velocidade do vento para o dia 05 de setembro de 2007

Observa-se que o comportamento do vento nas estações meteorológicas foi semelhante ao ocorrido em fevereiro, com redução da velocidade no meio do dia e um aumento significativo no final da tarde, com pico por volta das 18h. Destacam-se também os períodos de calmaria no aeroporto às 12h e às 15h que não correspondem aos valores registrados na estação do parque. Com isso, novamente, questiona-se o tratamento dado aos dados medidos no aeroporto.

Ao contrário da medida de fevereiro, o vento no ponto medido acompanhou os valores obtidos no parque, com um atraso de uma hora. A causa deste atraso deverá ser avaliada nas simulações de ventilação a serem realizadas com base nos dados de setembro.

Os dados de radiação foram tratados para se obterem as parcelas difusa e direta, apresentadas na tabela a seguir. Observa-se que, como a medida de Fevereiro foi feita durante a vigência do horário de verão, é necessário o valor de radiação de cada hora corresponderia à hora solar verdadeira anterior.

Às 18h, a radiação medida na estação Ibirapuera era intensa, o que significou valores absurdos de radiação direta em planos verticais (acima de 900 W/m²). O valor foi então corrigido para encaixar em uma curva padrão de distribuição de radiação, sendo que este valor estimado foi apresentado em cinza na Tabela 4.6 e foi utilizado nos cálculos.

Tabela 4.6: Radiação global, direta e difusa para os dias de medida

	Fevereiro			Setembro		
	I_G	I_d	I_D	I_G	I_d	I_D
7	-	-	-	4	4	0
8	47	45	2	150	135	15
9	293	203	90	371	219	152
10	376	297	79	522	280	242
11	742	258	484	511	361	150
12	941	201	740	714	325	389
13	843	360	483	626	370	256
14	833	367	466	540	356	184
15	858	285	573	623	210	413
16	710	284	426	478	149	329
17	563	230	333	60	58	2
18	431	124	307	57	28	29
18	331	193	138	-	-	-
19	132	193	28		-	-
20	21	4	17	-	-	-

Os resultados para plano inclinado também foram calculados, permitindo a análise de incidência em fachadas. Para o mês de fevereiro, os resultados estão apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Radiação global em plano vertical orientado para o fevereiro

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
8	27	30	32	31	28	27	27	27
9	131	219	266	234	141	131	131	131
10	188	239	259	237	186	186	186	186
11	245	421	469	362	203	203	203	203
12	282	392	386	268	195	195	195	195
13	326	308	264	264	264	264	264	308
14	322	267	267	267	267	313	387	391
15	278	228	228	228	228	416	543	486
16	222	213	213	213	213	486	607	498
17	171	171	171	171	210	554	674	499
18	105	105	105	105	247	800	946	600
19	65	65	65	65	130	284	310	192
20	4	4	4	4	4	4	4	4

Para o mês de setembro, tem-se o seguinte resultado, apresentado na Tabela 4.8:

Tabela 4.8: Radiação global em plano vertical orientado para o setembro

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
7	2	3	3	2	2	2	2	2
8	94	113	115	97	82	82	82	82
9	246	343	326	203	147	147	147	147
10	340	411	354	202	192	192	192	192
11	320	327	278	232	232	232	232	262
12	462	395	234	234	234	234	234	395
13	399	299	247	247	247	247	327	411
14	344	232	232	232	232	240	355	399
15	437	168	168	168	168	320	653	702
16	371	122	122	122	122	438	817	789
17	37	35	35	35	35	41	46	44
18	15	20	20	20	15	15	15	15

Embora as medições definam comportamentos da estação úmida e da estação seca, não foi possível verificar o comportamento da área durante períodos frios. O grande volume de dados a serem tratados para as medições já realizadas levou ao descarte da medição de inverno, sendo recomendada sua realização em estudos futuros.

Simulações 5

A área piloto foi estudada a partir da utilizaçdo dos de clima urbano apresentados no Capítulo 3. O objetivo foi validar estes modelos e estudar as variáveis ambientais de modo que se pudesse correlacioná-las á ocupação da área. Foram aplicados dois tipos de modelos: modelos analíticos simplificados, desenvolvidos no decorrer da pesquisa a partir do estudo da bibliografia, e modelos computacionais disponibilizados, enfatizando-se os modelos fluidodinâmicos.

5.1. Modelos analíticos desenvolvidos

A primeira parte das simulações foi realizada utilizando modelos simples, construídos a partir de planilhas eletrônicas. A principal vantagem deste tipo de modelo é que os dados de entrada podem ser rapidamente alterados para produzir resultados, mas observa-se que eles não apresentam o mesmo tratamento da questão aerodinâmica dado pelos modelos fluidodinâmicos.

5.1.1. *Estudos com índices de conforto*

Fanger (1970) define o conforto térmico como sendo a condição mental que a pessoa expressa quando está satisfeita com o seu ambiente térmico. Devido às variações fisiológicas humanas, no entanto,os limites que definem esta condição são variáveis, sendo possível que, mesmo em um ambiente climatizado artificialmente, não se garanta o conforto de todo um grupo de usuários simultaneamente.

Para definir quais são essas condições, o autor apresenta o conceito de neutralidade térmica, condição na qual o indivíduo não prefere um entorno mais frio ou quente. A condição de neutralidade depende do balanço térmico do indivíduo, sendo influenciado principalmente pelas seguintes variáveis:

- nível de atividade (que influencia a produção de calor pelo corpo);
- resistência térmica das vestimentas;
- temperatura do ar; temperatura média radiante;
- velocidade relativa do ar (que é a velocidade do ar no recinto mais a velocidade gerada pelo movimento do indivíduo) e

- pressão de vapor d'água no ar ambiente.

O modelo permite o cálculo, a partir destas variáveis ambientais, de uma sensação térmica denominada *Predicted Mean Vote* (PMV) que varia entre -3 (muito frio) e 3 (muito calor). O modelo também foi calibrado para informar o percentual de pessoas insatisfeitas com o ambiente térmico (*Percentage of Disatisfied People* – PPD), correlacionado ao primeiro PMV.

O estudo foi mais tarde incorporado na norma ISO 7730 (1994), que determina as condições de conforto. Embora isto não seja explicitamente colocado no texto, este modelo apresenta bons resultados para espaços relativamente homogêneos e com condições ambientais não muito distantes do conforto. A norma apresenta os limites dentre os quais o modelo pode ser utilizado, o que restringe sua aplicação a espaços abertos. Dentre elas estão os limites superiores para a velocidade do ar (1 m/s) e para a umidade relativa (70%).

Monteiro (2008) apresenta uma revisão completa dos índices utilizados na verificação de conforto térmico em espaços abertos, sejam eles baseados em balanços fisiológicos ou em regressões a partir de dados observados.

Um dos modelos que tem sido popularizado no estudo de conforto em espaços abertos [35] é a Physiological Equivalent Temperature (**PET**). Apresentada por Hoppe (1999). O valor de PET descreve, para qualquer ambiente interno ou externo, qual seria a temperatura equivalente em um ambiente interno padronizado que produziria as mesmas trocas térmicas. O modelo é baseado em um balanço térmico fisiológico de dois nós (interno e pele) e considera as mesmas variáveis ambientais que Fanger (1970). A utilização de uma temperatura equivalente torna o resultado do modelo facilmente apreensível pelo usuário, já que a percepção da sensação térmica está psicologicamente ligada a valores de temperatura do ar.

35 Exemplos de aplicação deste índice podem ser encontradas em Nikolopoulou (2004); Spangenber (2005) e Johansson (2006)

Outra abordagem é dada por Alucci (2005) na avaliação de coberturas têxteis. Os autores optam por avaliar condições de estresse térmico ao invés de condições de conforto, considerando o problema de salubridade mais crítico do que o problema de qualidade.

Monteiro (2008) desenvolve, através de medidas de campo e aplicação de questionários em estudantes da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, um índice próprio, denominado Temperatura Equivalente Percebida (**TEP**).

A **TEP** foi construída a partir de um modelo de regressão, que apresenta como principais vantagens para este estudo o fato de ser baseado em uma população residente na cidade do estudo de caso e a sua fácil aplicabilidade.

O valor de **TEP** pode ser obtido através da equação:

Equação 5.1

$$TEP = -29{,}877 + 0{,}4828\ T_{ar} + 0{,}5172\ T_{rm} + 0{,}0802\ UR - 2{,}322\ u - 0{,}1742\ T_{mm} + 5{,}118\ M + 38{,}023\ I_{cl}$$

Onde $\mathbf{T_{ar}}$ é a temperatura do ar; $\mathbf{T_{rn}}$ é a temperatura média radiante; **UR** é a umidade relativa (entre 0 e 100); **u** é a velocidade do ar; $\mathbf{T_{mm}}$ é a temperatura média mensal; **M**, o metabolismo em met e $\mathbf{I_{cl}}$, o isolamento da roupa em clo.

Ao valor de **TEP** se associa uma sensação térmica, dada na Tabela 5.1. Neste trabalho, considerou-se como confortável a região entre leve frio e leve calor (**TEP** entre 19,7°C e 27,2°C). Acima deste intervalo, considera-se desconforto por calor; abaixo dele, por frio.

Sensação	TEP (°C)
extremo calor	> 50,0
muito calor	42,5 ~ 50,0
calor	34,9 ~ 42,4
pouco calor	27,3 ~ 34,8
leve calor	25,4 ~ 27,2
neutralidade	21,5 ~ 25,3
leve frio	19,6 ~ 21,4
pouco frio	12,0 ~ 19,5
frio	4,4 ~ 11,9
muito frio	4,3 ~ -3,2
extremo frio	< - 3,2

Tabela 5.1: Sensação térmica associada a valores de TEP

Fonte: MONTEIRO, 2008

Além da avaliação das condições térmicas de ambientes delimitados, os índices de conforto também foram utilizados para produzir recomendações para a construção de edifícios a partir da avaliação das condições climáticas locais. Esta ferramenta foi denominada diagrama bioclimático, sendo que o primeiro deles foi proposto por Olgyay em 1963 e o mais difundido é o proposto por Givoni em 1976 (OLGYAY, 1998; GIVONI, 1976 – Figura 5.1).

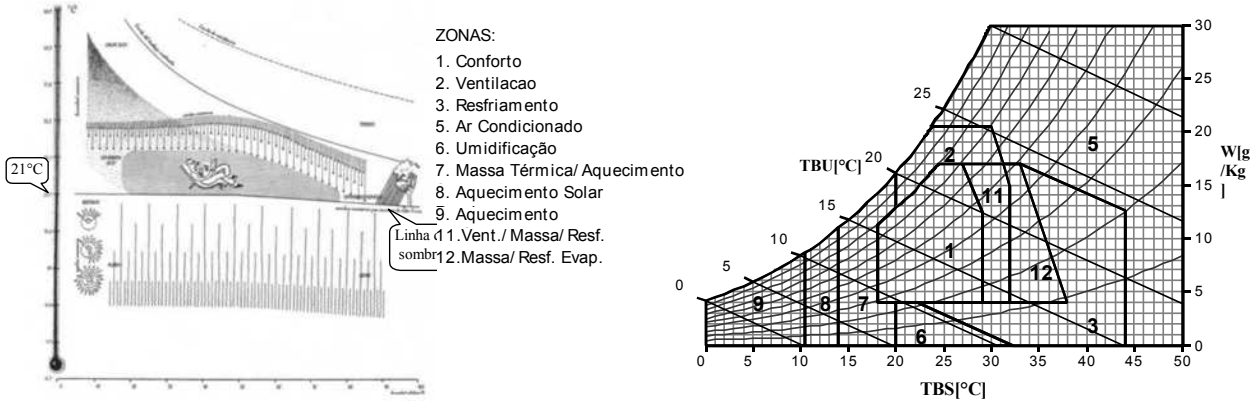


Figura 5.1: Diagramas Bioclimáticos de Olgyay e Givoni

Fonte: LAMBERTS, DUTRA & PEREIRA,1994; OLGYAY, 1998

O índice de Monteiro (2008) foi utilizado para produzir uma avaliação do clima da cidade de São Paulo, a partir de um arquivo climático anual[36], com dados de temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do ar a 10 m, radiação global e difusa e nebulosidade. Foi elaborada uma planilha que calcula o **TEP** para cada hora do arquivo climático e determina a freqüência de ocorrência das horas em conforto, calor e frio ao longo do ano. A freqüência de ocorrência foi calculada para o

36

Arquivo TMY, disponibilizado pelo DOE, gerado a partir de medições da estação meteorológica do aeroporto de Congonhas. Ver ANEXO A2.

período entre 7h e 22h, no qual a utilização dos espaços externos é mais intensa.

O valor de $\mathbf{T_{rm}}$ foi calculado assumindo-se a temperatura das superfícies iguais à temperatura do ar inicialmente. O valor é calculado a partir da radiação das temperaturas e dos fatores de forma.

Equação 5.2

$$T_{rm} = 0{,}5 \cdot \frac{(I_D + I_d)}{5{,}9} + F_{sup}\ T_{sup} + F_{céu}\ T_{céu}$$

Onde $\mathbf{F_{sup}}$ e $\mathbf{F_{céu}}$ são os fatores de forma do usuário com as superfícies e com o céu, inicialmente considerados como 0,5, $\mathbf{I_D}$ e $\mathbf{I_d}$ são as parcelas direta e difusa da radiação. Os valores de 0,5 e 5,9 correspondem à absorção da roupa e ao coeficiente de troca radiativa.

Uma das primeiras questões que se apresentou durante a aplicação do modelo foi o tratamento das variáveis **M** e $\mathbf{I_{cl}}$, que dependem da atividade e da vestimenta do usuário urbano. As primeiras regressões de Monteiro (2008) foram realizadas sem estas variáveis, que foram introduzidas posteriormente através de considerações teóricas sobre o modelo. Para se aplicar as primeiras regressões, **M** deve ser considerado como sendo 1,3 met, equivalente a uma pessoa em pé, com pouca ativadade física, e $\mathbf{I_{cl}}$ deve ser 0,6, uma roupa com isolamento médio. O autor também sugere uma correlação entre o valor de $\mathbf{I_{cl}}$ e a temperatura do ar, o que parece uma abordagem lógica. Neste caso, o valor de $\mathbf{I_{cl}}$ é dado por:

Equação 5.3

$$I_{cl} = 1{,}203 - 0{,}0263\ T_{ar}$$

Esta equação apresenta como valor máximo de $\mathbf{I_{cl}}$ para temperaturas positivas 1,2 clo .

Na Tabela 5.2 é mostrado o resultado da aplicação do modelo considerando-se os dois valores de $\mathbf{I_{cl}}$.

Tabela 5.2: Ocorrência de horários em conforto para diferentes valores de I_{cl}

	I_{cl} fixo			I_{cl} como função de T_{ar}		
Mês	**Frio**	**Confort.**	**Quente**	**Frio**	**Confort.**	**Quente**
Janeiro	25.8%	19.8%	54.4%	26.0%	18.1%	55.8%
Fevereiro	28.3%	18.1%	53.6%	27.2%	16.3%	56.5%
Março	35.3%	16.1%	48.6%	29.2%	18.8%	52.0%
Abril	35.3%	16.1%	48.6%	29.2%	18.8%	52.0%
Maio	41.0%	20.6%	38.3%	32.1%	20.8%	47.1%
Junho	53.0%	18.8%	28.2%	31.9%	25.8%	42.3%
Julho	49.2%	19.8%	31.0%	24.6%	29.4%	46.0%
Agosto	60.3%	13.3%	26.4%	33.3%	31.0%	35.7%
Setembro	50.4%	16.0%	33.5%	34.2%	23.5%	42.3%
Outubro	44.4%	19.0%	36.7%	29.6%	21.2%	49.2%
Novembro	41.0%	14.0%	45.0%	32.5%	13.8%	53.8%
Dezembro	31.7%	17.7%	50.6%	26.8%	16.1%	57.1%
Ano	**42.9%**	**17.0%**	**40.1%**	**30.3%**	**21.4%**	**48.3%**

Foi observada uma redução no perído de frio, mas um aumento no período de calor. Para tentar corrigir isto, foi testado um modelo interativo, baseado no resultado de **TEP** para a hora anterior. Deste modo, sempre que o valor de **TEP** de um determinado horário ficasse fora dos limites de conforto, o valor do isolamento da roupa era ajustado em 0,2 clo em uma tentativa de atingir o conforto por meio de troca da vestimenta. Segundo a norma ISO 9920 (1995), este ajuste equivale a se vestir um suéter de manga longa com gola v, paletó ou peça de roupa equivalente. Um limite mínimo de 0,3 clo foi estabelecido.

Com este ajuste, a ocorrência de períodos de frio foi bastante reduzida, conforme observado na Tabela 5.3. O valor máximo de $\mathbf{I_{cl}}$ obtido foi de 1,3 clo.

Tabela 5.3: Ocorrência de horários em conforto para I_{cl} iterativo

Mês	Frio	Conforto	Quente
Janeiro	4.6%	60.5%	34.9%
Fevereiro	5.1%	61.8%	33.0%
Março	5.6%	64.7%	29.6%
Abril	5.6%	64.7%	29.6%
Maio	5.4%	74.8%	19.8%
Junho	5.0%	86.3%	8.7%
Julho	3.5%	81.0%	15.4%
Agosto	4.4%	78.0%	17.5%
Setembro	7.9%	66.9%	25.2%
Outubro	7.1%	68.5%	24.4%
Novembro	7.9%	58.3%	33.8%
Dezembro	7.1%	59.9%	33.1%
Ano	**5.9%**	**69.0%**	**25.1%**

Observa-se ainda que no inverno, quando a temperatura é mais constante, registra-se menos frio do que no restante do ano. Isto é função do procedimento interativo, já que o ajuste da vestimenta é sempre posterior a um período de frio.

Foram ainda atribuídos coeficientes para as variáveis, buscando avaliar como alterações nos seus valores impactariam a freqüência de ocorrência de horas em conforto.

Os coeficientes multiplicam a velocidade do ar e a radiação. Como a temperatura das superfícies normalmente é função da radiação incidente, o multiplicador sobre radiação é suficiente para alterar a temperatura média radiante. Este multiplicador pode ter valores maiores que 1 ,por exemplo, no caso de uma área sem obstruções com piso de asfato, onde o usuário está exposto tanto à radiação solar quanto à alta temperatura do piso.

No caso da temperatura do ar, o multiplicador não se justifica, sendo necessário outro tratamento. Foi então proposta uma temperatura do

ar alterada (**T_{ar}'**) que permite a variação na amplitude térmica diária e na média. O valor de **T_{ar}'** é dado por:

Equação 5.4

$$T'_{ar} = T_{med24h} + ModT_{med} + ModAmpl \cdot (T_{ar} - T_{med24h})$$

Onde **T_{med24h}** é a temperatura média nas últimas 24 horas e **$ModT_{med}$** e **ModAmpl** são os fatores de multiplicação para a temperatura média e para a amplitude térmica.

A umidade relativa original é convertida em umidade absoluta que é convertida em umidade relativa à nova temperatura, a partir dos algoritmos apresentados na norma ISO 7726 (1998).

Avaliando-se somente o desconforto por calor, tem-se:

- Cada aumento de 1°C na temperatura média aumenta em 0.5% o tempo de desconforto considerando-se que o vento e a radiação não se alteram;
- Cada redução de 20% na amplitude térmica tem aproximadamente o mesmo efeito;
- A redução da ventilação em 33% aumenta o percentual de desconforto em 5%;
- Excluindo-se a radiação, obtém-se 97% de conforto, sendo o sombreamento o fator preponderante no conforto térmico.

Fixando-se o valor da vestimenta, reduzindo-se a ventilação a 30% do valor a 10m (hipótese razoável para um ambiente urbano), eliminando-se 90% da radiação e alterando a atividade para uma caiminhada leve (2,4 met) o efeito da temperatura no conforto fica mais óbvio.

A Tabela 5.4 mostra a variação na porcentagem de horas em desconforto por calor

Tabela 5.4: Desconforto por calor devido a variações na temperatura média e na amplitude térmica

		ModTmed				
		0°C	**1°C**	**2°C**	**3°C**	**4°C**
ModAmpl	**1,2**	39,1%	42,6%	45,8%	49,2%	52,4%
	1	38,3%	41,5%	45,0%	48,7%	51,9%
	0,8	37,4%	40,4%	44,0%	47,9%	51,6%
	0,6	36,2%	39,5%	43,1%	47,2%	51,3%
	0,4	35,1%	38,5%	42,1%	46,3%	50,6%

Avaliações deste tipo podem contribuir na determinação das condições de conforto locais, na elaboração de diretrizes de desenho urbano bioclimático e na elaboração de critérios para o desempenho térmico de ambientes urbanos. Nesta aplicação, por exemplo, seria possível buscar minimizar um aumento de 1°C na temperatura média com redução de 40% na amplitude térmica.

5.1.2. *Aplicação do modelo de diferenças finitas*

Para se testar a aplicação do modelo de diferenças finitas proposto no item 3.2.3.2, foi desenvolvida uma planilha simplificada em Microsoft Excel. Esta planilha teve como objetivo principal estudar a uma aplicação do modelo, verificar a ordem de grandeza dos valores de **Δt** e **Δx** e permitir o estabelecimento de perfis de temperatura iniciais para o modelo em CFD. As premissas para a elaboração desta planilha foram:

- Inicialmente contava com apenas um material. A planilha foi aprimorada para corresponder ao modelo apresentado posteriormente;
- Temperatura do solo estável a 2,00 m de profundidade. O solo é dividido em 10 nós, sendo a distância entre eles de aproximadamente 0,20 m. A temperatura atribuída ao solo foi de 19°C, a temperatura superficial inicial foi de 20°C e a variação da temperatura no solo no momento inicial foi considerada como sendo linear;
- Radiação comportando-se como uma curva senoidal com período de 12 horas. O valor máximo ocorria ao meio dia e pode ser alterado. Para os estudos preliminares foi fixado em 800 W/m². Quando os valores fossem negativos, deveriam ser considerados como zero. Como não considera a perda pra o fundo de céu, a temperatura superficial não pode atingir valores menores que a temperatura do ar;
- Temperatura do ar fixa em 20°C com um coeficiente de transferência de calor por convecção também fixo em 10 W /(m² °C);
- A variação de tempo máxima permitida foi de 15 minutos, mesmo que os critérios de estabilidade permitissem valores maiores. A planilha permite a simulação de até 480 iterações, o que, utilizando-se o *timestep* máximo, corresponde a 5 dias.

Os resultados para os testes de variação do *timestep* estão apresentados na Tabela 5.5. Os valores indicam as temperaturas para as 6h e 12h do terceiro dia, quando o ciclo já se encontra estabilizado.

	10 min	**15 min**	**30 min**	**60 min**
T_{min}	26,74	26,48	25,56	22,71
T_{max}	79,94	80,11	80,62	81,69

Tabela 5.5: Variação da temperatura superficial para diferentes *timesteps*

Observa-se que a diferença entre os valores obtidos com *timesteps* de 10min e 15 min são inferiores a 0,5°C. No modelo de CFD, os *timesteps* estão na ordem de 2s a 10s, sendo improvável a instabilidade numérica no modelo de armazenamento de calor. Uma avaliação dos gráficos de temperatura para o período completo indicam uma tendência de estabilização do ciclo após o terceiro dia (), independente da variação de tempo utilizada. Para as camadas mais

profundas, no entanto, a estabilidade só é atingida após vários ciclos, sendo o 10° dia utilizado para definir o perfil do solo no momento inicial da simulação.

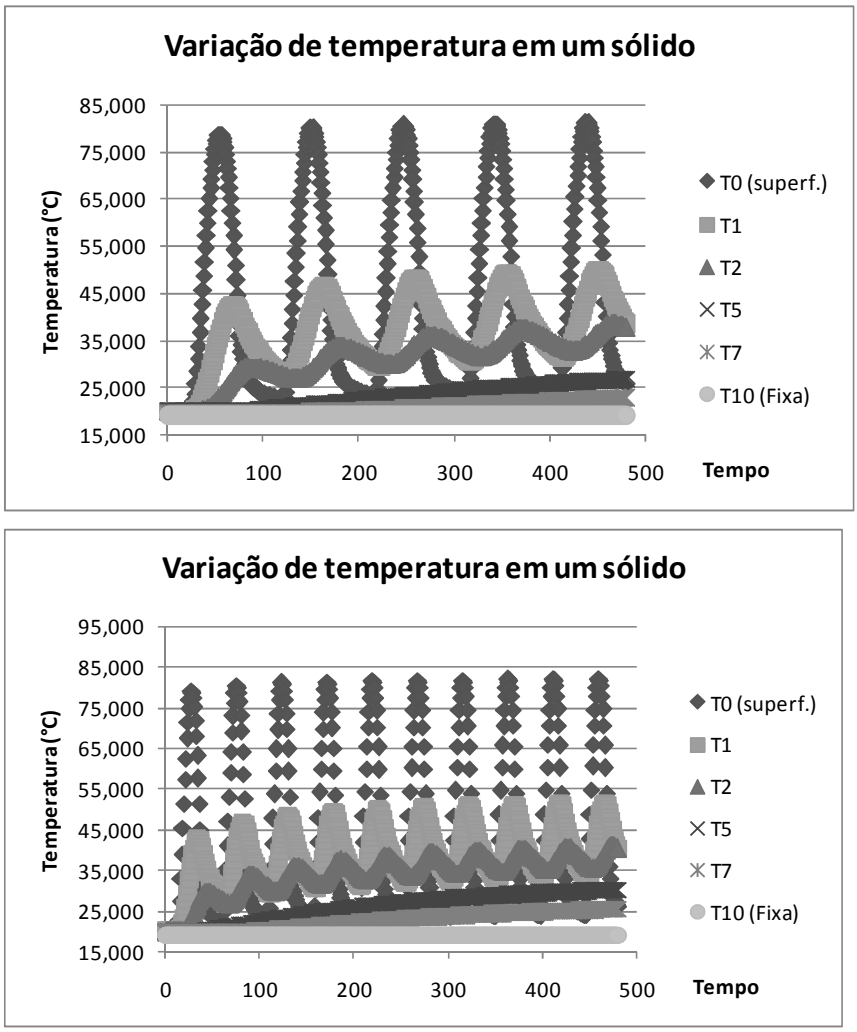


Figura 5.2: Cálculo da distribuição de temperaturas no solo para diferentes *timesteps*

(a) 15 min

(b) 30 min

Foi ainda avaliado o impacto dos diferentes materiais do solo nas temperaturas superficiais. Para verificar-se o efeito de máxima e mínima foram tomadas as temperaturas às 6h e às 15h do terceiro dia. O resultado pode ser visto na Figura 5.3, com a amplitude térmica colocada como rótulo na coluna cinza clara.

Ao contrário do que se esperava, os materiais com uma menor difusividade térmica não apresentaram menores variações de temperatura. A temperatura superficial foi fortemente condicionada pela condutibilidade térmica da camada superior do solo, medida da sua capacidade de transmitir calor para as camadas mais profundas. No entanto, deve-se levar em conta que, ao longo de períodos maiores, as camadas profundas naqueles tipos de solo tenderão a apresentar variações maiores de temperatura, alterando o resultado final do balanço.

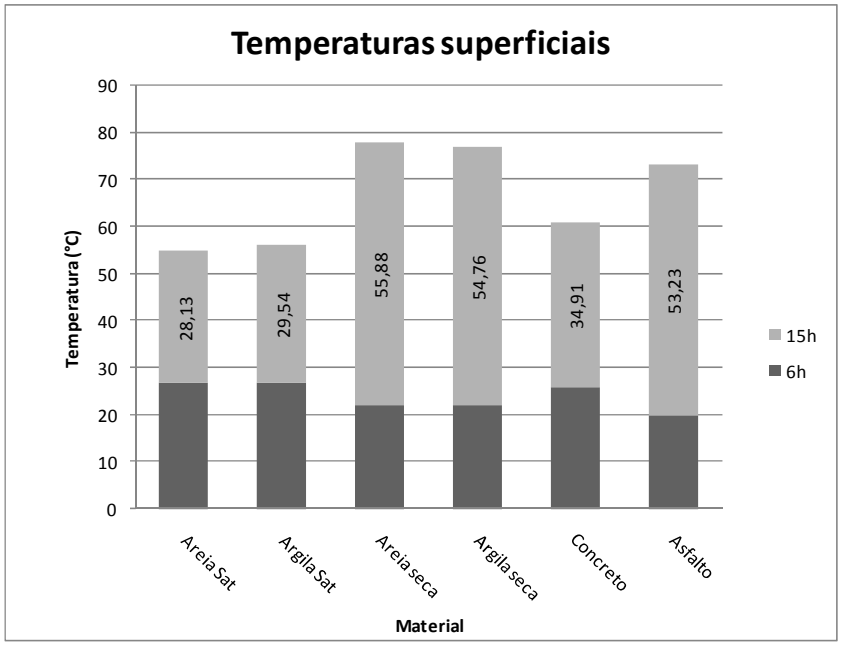


Figura 5.3: Cálculo da temperatura superficial para horários selecionados do 3° dia

A planilha foi revisada e corrigida, incorporando-se a possibilidade de mais de um material no solo. O primeiro material corresponderia aos 3 primeiros nós e os demais (até o 10°) ao segundo material. A planilha serviu não só para fornecer condições iniciais para a temperatura do solo, mas também para verificar a correção das equações que foram deduzidas e não constavam em nenhuma bibliografia e foram deduzidas a partir do balanço de energia dos nós (Equação 3.99, Equação 3.100, Equação 3.101 e Equação 3.103).

Ela foi alimentada com condições meteorológicas determinadas a partir daquelas encontradas nas medidas de campo (variando a radiação e a velocidade e temperatura do ar), de modo a produzir perfis de temperatura que possam ser utilizados como condições iniciais no modelo de CFD. O intervalo de tempo é determinado a partir da recomendação que os numeradores que multiplicam a temperatura do próprio ponto no instante anterior sejam menores que zero. Deste modo:

$$\Delta t \leq \frac{(\Delta x)^2}{2 \cdot \kappa}$$ Para Equação 3.93

$$\Delta t \leq \frac{(1 - Bi) \cdot (\Delta x)^2}{2 \cdot \kappa}$$ Para a Equação 3.96 e Equação 3.99

$$\Delta t \leq \frac{(k_A \cdot \Delta x_A + k_B \cdot \Delta x_B)^2}{4 \cdot k_A \cdot k_B \cdot (\Delta x_A)^2 \cdot (\Delta x_B)^2 \cdot (k_A + k_B)}$$ Para a Equação 3.100

$$\Delta t \leq \frac{(1 + Bi + BiR) \cdot (\Delta x)^2}{2 \cdot \kappa}$$ Para a Equação 3.101

$$\Delta t \leq \frac{\rho_{ar} \cdot L_{int} \cdot c_{ar}}{2 \cdot hci \cdot (1 - WWR) + U_v \cdot WWR + \rho_{ar} \cdot L_{int} \cdot c_{ar} \cdot R}$$ Para a Equação 3.103

O intervalo de tempo utilizado é o menor valor dentre os resultados destas equações. Para os parâmetros e materiais utilizados, verificou-se que o limitador mais freqüente é o coeficiente da equação de temperatura interna (Equação 3.100), com valores da ordem de 1 ou 6 minutos. Como nas simulações de dinâmica dos fluidos os intervalos são da ordem de 1 a 10 segundos, isto não deve apresentar problema. A planilha permite ainda estabelecer um intervalo máximo de tempo, caso os intervalos permitidos tornem-se muito grandes. Inicialmente, este valor máximo admitido foi de 5 minutos (300 s). Como a planilha conta com 1440 linhas, é possível simular com o intervalo máximo um período de 5 dias. Períodos maiores podem ser avaliados substituindo-se o valor inicial pelo resultado da primeira rodada de cálculos. A própria planilha faz uma interpolação linear dos dados climáticos, convertendo os valores horários em dados para o intervalo de tempo estipulado.

A planilha conta com o nó superficial (T0), dois nós para o primeiro material (T1 e T2), o nó de interface (T3), sete nós para o segundo material (T4 a T10) e um nó com temperatura fixa (Tcore). A espessura é do primeiro material é a distância entre T0 e T3 e a do segundo entre T3 e T6. As profundidades seguem aumentando em incrementos iguais à distância entre T5 e T6 até se atingir Tcore. Com isso, esperava-se identificar se, em T6, haveria realmente uma estabilidade da temperatura.

Os dados utilizados no primeiro teste para o piso foram:

- Absorção solar de 0,7;
- A radiação solar, temperatura do ar, velocidade do vento e temperatura de fundo de céu foram as obtidas ou calculadas a partir das medidas do dia 04 de fevereiro de 2007;
- Coeficiente de convecção externo calculado a partir da velocidade do vento segundo a Equação 3.74.

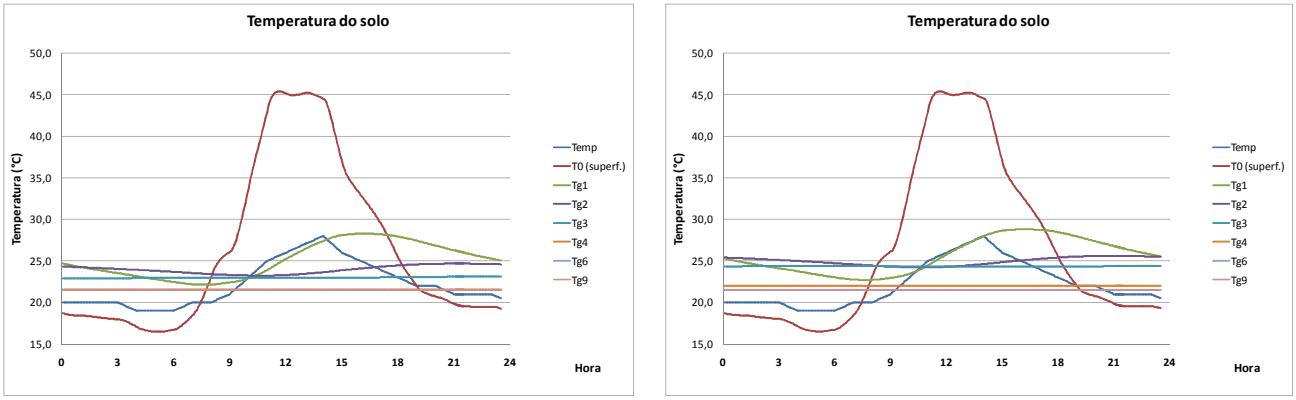
  O valor de velocidade para o período máximo foi utilizado para a determinação do intervalo de tempo
- Materiais: asfalto (12 cm de espessura) e argila seca (2,5 m de espessura);
- Temperatura inicial de 21,5°C.

Os intervalos obtidos para cada uma das equações foram:

- Para o nó de superfície: 961 s
- Para o asfalto: 25.944 s
- Para a argila: 1.795.468 s
- Para a interface: 166.316 s

Assim, foi adotado o intervalo máximo estabelecido de 300 s.

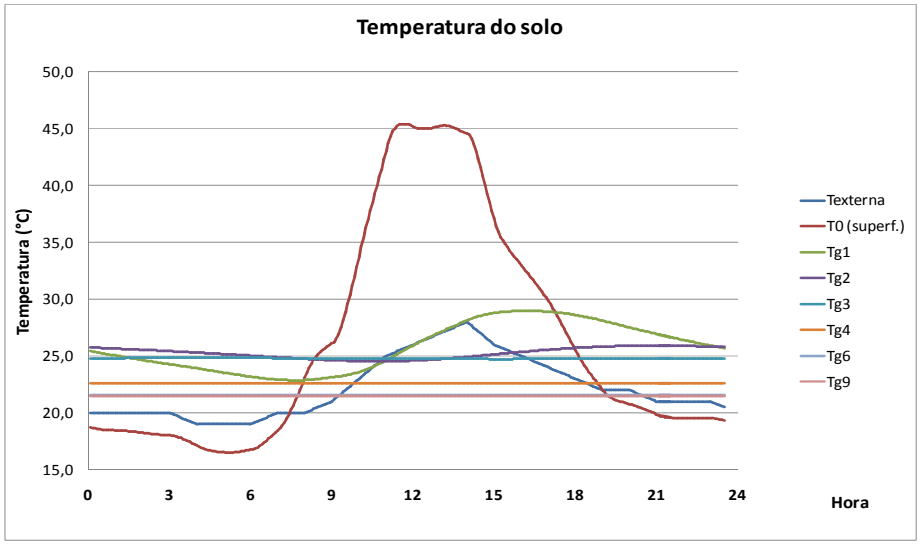
O resultado é apresentado na Figura 5.4.



Observa-se que praticamente não houve alteração na curva da temperatura superficial, cujo valor máximo manteve-se próximo a 45°C e mínimo próximo a 16°C. As temperaturas médias das duas camadas subseqüentes aumentou cerca de 1°C, fazendo com que elas oscilassem em torno de 25°C, ao invés de 24°C. O aumento mais significativo foi o da camada temperatura T3, que se manteve estável em torno de 24°C, enquanto anteriormente estava na faixa de 22,5°C. Isto, no entanto, trouxe pouco impacto para a temperatura superficial. O que se observa é uma tendência de o substrato oscilar em torno da temperatura média superficial (26,5° aproximadamente), mas, para esta configuração de materiais, apresentarem pouco impacto na condição superficial.

Figura 5.4: Resultados para a temperatura do solo em diferentes profundidades após 5 e 15 dias

O procedimento foi repetido até se considerar- um ciclo mensal, admitindo que o dia é representativo das condições médias para aquele mês. Os resultados foram utilizados como ponto de partida para as simulações de CFD.



Ponto	Temperatura (°C) – 00h
0	19,303
1	25,701
2	25,797
3	24,814
4	22,612
5	21,761
6	21,547

Como exercício, foi realizada uma simulação para o solo totalmente composto por argila seca. As espessuras das camadas foram mantidas, de modo que os nós estejam mais próximos entre si até o ponto T3.

A absorção solar da superfície também não foi alterada, embora a maior parte dos solos argilosos apresente cor mais clara que o asfalto.

Figura 5.5: Resultados para a temperatura do solo em diferentes profundidades após 30 dias

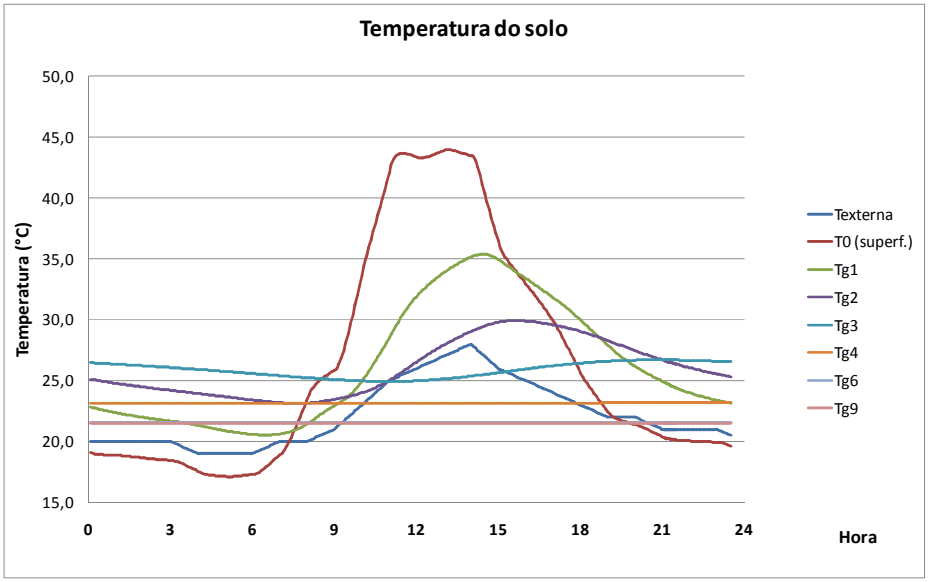


Figura 5.6: Resultados para a temperatura do solo em diferentes profundidades após 30 dias com argila

Observa-se que a curva da temperatura superficial apresenta um achatamento no meio do dia, reduzindo a temperatura máxima em cerca de 2°C. Isto ocorre porque há uma maior condução do calor para o solo, aumentando a variação de temperatura das camadas intermediárias. A camada T3, que anteriormente apresentava condição praticamente estável ao longo do dia, começa a apresentar variações da ordem de 1°C e a camada T1, que oscilava anteriormente 5°C, passa a apresentar variações diárias de 15°C.

Foram ainda realizados estudos com a redução da absorção solar para a metade do valor anterior, considerando as duas configurações de materiais mencionadas.

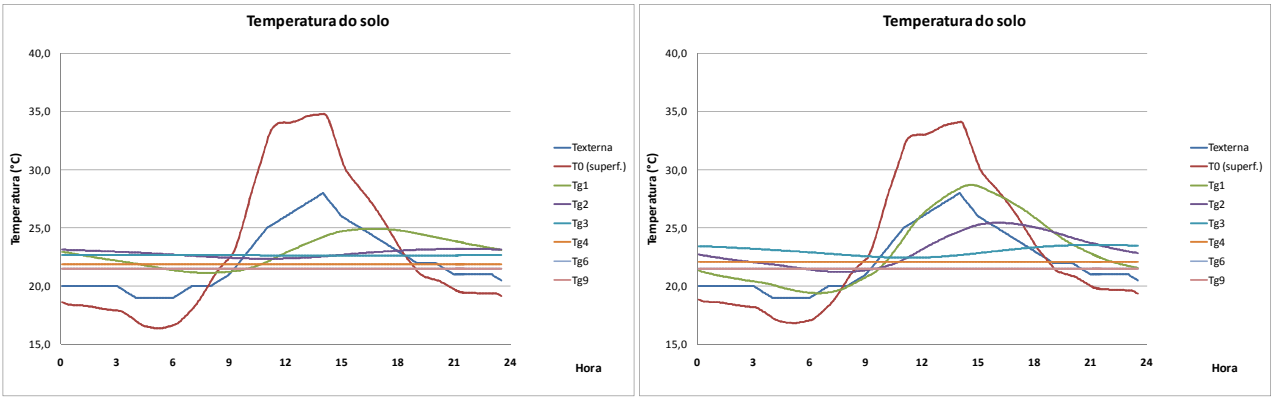


Figura 5.7: Temperatura do solo, absorção de 0,35

Para asfalto e argila seca e só argila seca, respectivamente

A configuração das curvas é parecida com o resultado anterior, com uma redução de cerca de 10°C na temperatura superficial. A redução é menos sentida nas camadas inferiores, embora a temperatura média passe a se aproximar da temperatura média do ar, de 21,5°C.

Também foram comparados resultados de dois materiais diferentes que apresentavam difusividades semelhantes, com condutibilidades diferentes. O concreto e a areia saturada apresentam, respectivamente, difusividade 0,69 X 10^{-6} m²/s e 0,74 X 10^{-6} m²/s, e o concreto tem condutibilidade térmica de 1,40 W/(m °C), enquanto a areia saturada apresenta condutibilidade de 2,20 W/(m °C).

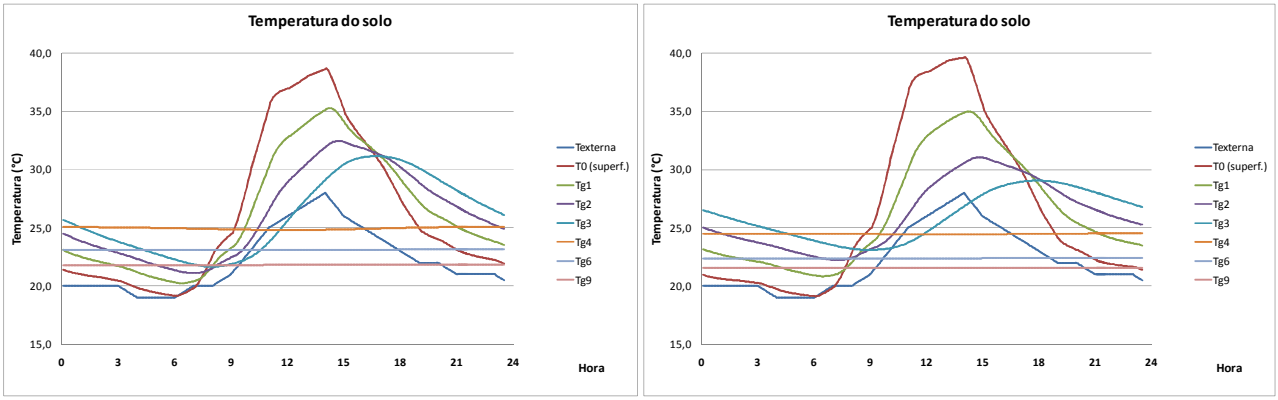


Figura 5.8: Temperatura do solo, para areia seca e para o concreto, respectivamente

É possível observar uma redução de cerca de 2°C na temperatura superficial, enquanto a segunda camada é pouco afetada. A temperatura superficial é maior para o concreto, que apresenta menor condutibilidade. A partir daí, contudo, observa-se que, para as camadas mais profundas, o concreto apresenta um maior achatamento da curva de temperaturas e um maior atraso térmico que o solo de areia saturada.

O mesmo tipo de avaliação foi realizado para as paredes dos edifícios. Os dados utilizados no primeiro teste foram:

- Absorção solar de 0,5;
- Orientação Norte;
- A radiação solar, temperatura do ar, velocidade do vento e temperatura de fundo de céu foram as obtidas ou calculadas a partir das medidas do dia 04 de fevereiro de 2007;
- Coeficiente de convecção externo calculado a partir da Equação 3.74 e o interno de 8 W/(m² °C);
- Coeficiente de radiação interno de 5,98 W/(m² °C);
- Ambiente com 6 m de profundidade, com WWR de 0,5 e vidro transparente simples;
- 6 renovações de volume por hora, como taxa de ventilação. Há um controle que corta a renovação de ar quando a temperatura fica abaixo de um determinado valor;
- Materiais: tijolo na parede (25 cm de espessura) e concreto no núcleo (3 m de espessura);
- O núcleo não conta com temperatura fixa, mas é adiabático, ou seja, troca com um parede à mesma temperatura do nó Ti03;
- Temperatura inicial de 21,5°C.

Os intervalos obtidos para cada uma das equações foram:

- Para o nó de superfície: 2.087 s
- Para a parede: 8.817 s
- Para o núcleo de concreto: 3.264 s
- Para a a temperatura interna da paredes: 4.072 s

- Para a temperatura externa do núcleo de concreto: 63.906 s
- Para a temperatura interna: 301 s

O intervalo ficou praticamente no limite do intervalo mínimo proposto, que foi utilizado. O resultado é apresentado na Figura 5.9.

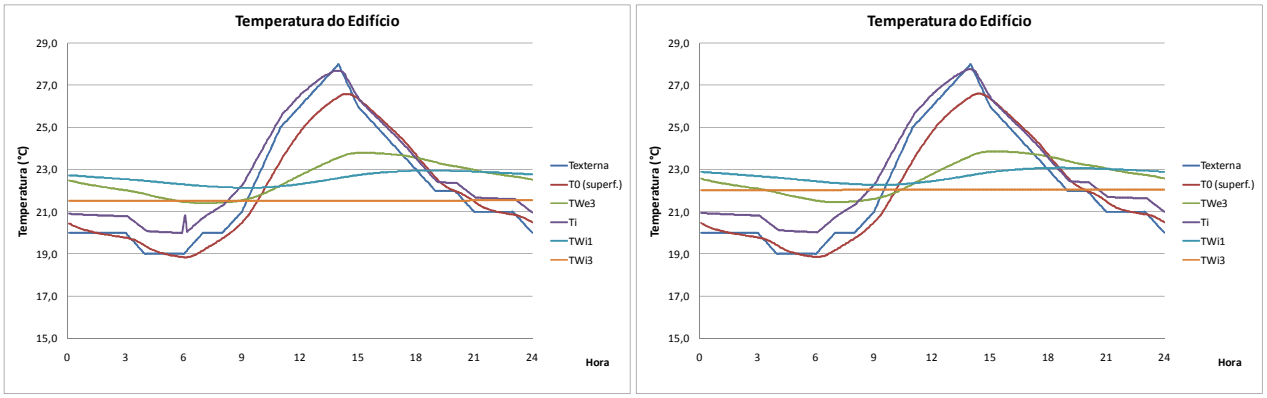


Figura 5.9: Resultados para as temperaturas para ambiente orientado a norte com 5 e 30 dias

Embora a temperatura do núcleo tenha aumentado em cerca de 0,5°C, o desempenho do ambiente apresentou pouca alteração durante o período, sem aumento visível na temperatura da superfície do núcleo de concreto.

Para testar o modelo, foram realizados dois testes, um em que apenas se eliminava a ventilação e outro aumentando a proporção entre a área de vidro e a área da fachada.

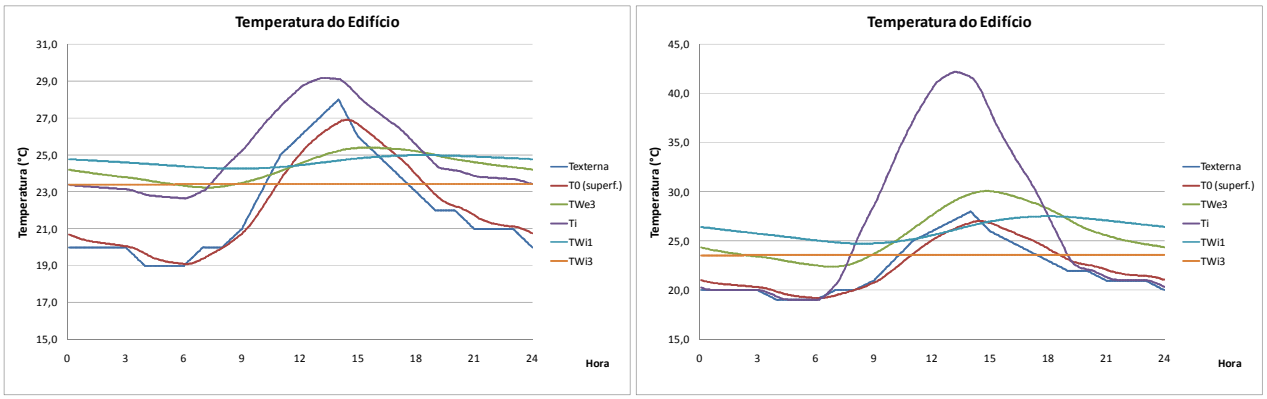


Figura 5.10: Resultados para as temperaturas para ambiente orientado a norte, sem ventilação com WWR de 0,5 e 1,0, respectivamente

A redução da ventilação provocou um aumento de 2°C na temperatura máxima e de 1°C na temperatura superficial. O aumento da área envidraçada apresentou impacto da mesma ordem de grandeza na temperatura superficial, mas a temperatura interna elevou-se em quase 15°C.

Com as configurações originais, foram ainda variadas as orientações, considerando-se a radiação incidente em fachadas orientadas para os quatro pontos cardeais e quatro colaterais. O resultado para duas destas orientações é mostrado na Figura 5.11.

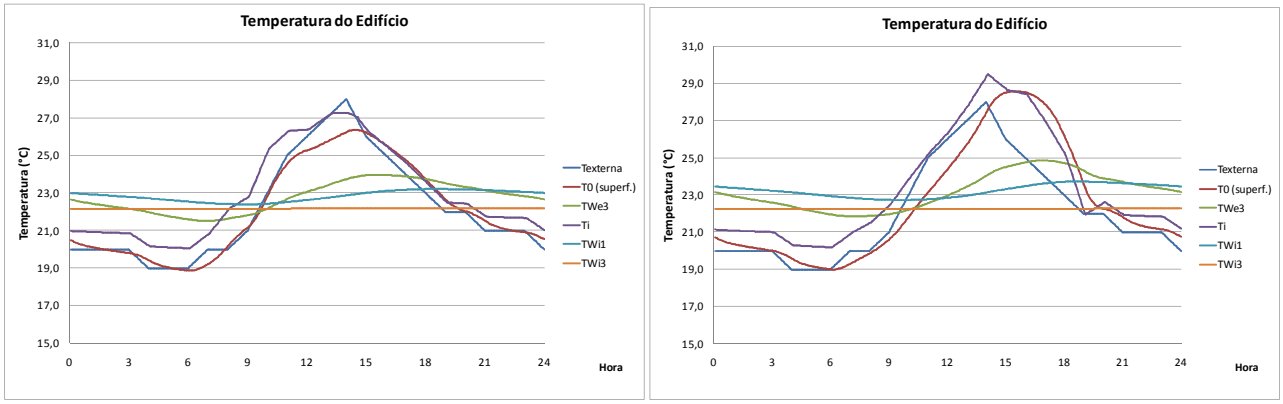


Figura 5.11: Resultados para as temperaturas para ambiente orientado a leste e a oeste, respectivamente

Observa-se que a planilha reproduz adequadamente as variações relativas à incidência da radiação, com a fachada leste se aquecendo mais rapidamente e a fachada oeste apresentando um pico maior, devido às temperaturas mais altas do ar no período da tarde.

A diferença entre os resultados das fachadas não é maior porque há grande impacto da velocidade do ar no cálculo da temperatura superficial. O estudo foi realizado para as oito orientações principais e os resultados são apresentados na Tabela 5.6.

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Média
T00	20,50	20,52	20,52	20,50	20,49	20,73	20,81	20,58	20,5825
T01	22,33	22,37	22,38	22,31	22,31	22,93	23,17	22,54	22,5431
T02	22,88	22,93	22,94	22,86	22,84	23,52	23,78	23,10	23,1065
T03	22,50	22,54	22,55	22,49	22,46	22,95	23,14	22,66	22,6626
Ti	20,82	20,84	20,84	20,82	20,81	20,94	20,99	20,86	20,8659
Ti01	22,86	22,90	22,92	22,84	22,79	23,23	23,41	22,99	22,9937
Ti02	22,85	22,81	22,81	22,76	22,71	22,92	23,09	22,85	22,8505
Ti03	22,91	22,85	22,83	22,79	22,75	22,83	23,01	22,85	22,8516
Tcore	22,92	22,86	22,84	22,80	22,76	22,80	22,97	22,85	22,8518

Tabela 5.6: Temperaturas iniciais para edificações

5.1.3. *Canyon urbano*

Aproveitando-se a estrutura para cálculo do desempenho térmico de superfícies e materiais sólidos, foi elaborada uma planilha para cálculo de temperatura no *canyon* urbano.

O *canyon* é definido por três informações básicas: altura (**H_C**), largura (**L_C**) e azimute (**Az_C**). Os edifícios dos dois lados devem ser sempre da mesma altura e o azimute pode variar de 0° a 180°. O edifício E é sempre o edifício que tem a fachada voltada para leste e edifício W tem a fachada sempre voltada para oeste.

As superfícies do *canyon* foram divididas em nove partes de acordo com a Figura 5.12. As partes do edifício são iguais entre si, o mesmo se aplica para as partes da rua. Deste modo, a dimensão de cada parte é um terço de H e de L, respectivamente. As partes são sempre numeradas no mesmo sentido, do edifício E para o edifício W no sentido horário.

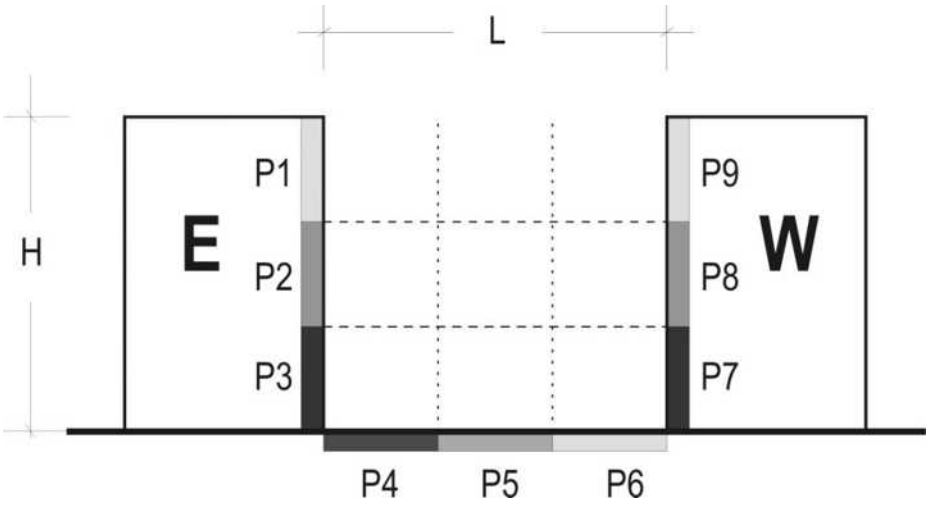


Figura 5.12: Numeração das partes na planilha

A partir da determinação de um dia para simulação, a planilha calcula o ângulo de incidência do sol e comprimento da sombra para cada hora. A incidência já é dada pelo cosseno do ângulo, de modo a se tornar um coeficiente que multiplica a radiação solar direta. Sempre que a incidência é menor que zero, ela é considerada como zero.

O comprimento da sombra é calculado a partir da altura e do azimute solar e das características do *canyon*, de acordo com a Equação 3.18 (caso a linha de sombra incida sobre o piso) e a Equação 3.19 (caso ela incida sobre a edificação voltada para o sol). Esta linha divide a superfície sobre a qual ela incide em duas áreas.

O piso é dividido entre a área **n** e **o**, sendo a primeira sempre a mais próxima do edifício leste. Caso o piso esteja totalmente sombreado ou totalmente insolado (no caso do azimute solar ser igual à orientação da rua), as áreas **n** e **o** são iguais.

Os edifícios são também divididos em duas áreas – **i** e **h** para o edifício E, **j** e **g** para o edifício W. Como os edifícios são da mesma altura, a única possibilidade de ambas as fachadas estarem sombreadas é se os raios solares forem paralelos à rua. Assim, normalmente há pelo menos uma parte de uma fachada insolada e uma fachada totalmente sombreada. Caso a linha de sombra incida em um dos edifícios, a divisão de áreas será dada por essa linha para os dois prédios. Caso a linha de sombra incida sobre o piso, as áreas serão do mesmo tamanho.

A Figura 5.13 mostra o esquema de divisão de áreas.

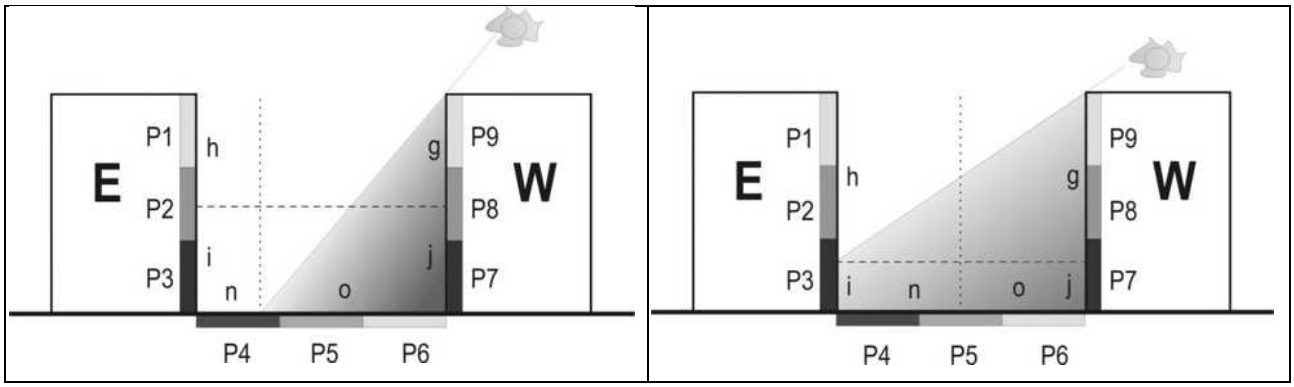


Figura 5.13: Divisão de áreas baseada na incidência de sol

Os fatores de forma das áreas em relação umas às outras e em relação ao céu são determinados de acordo com as equações mostradas no item 3.2.1.6.

De acordo com a direção do sol, determinam-se quais áreas estão sombreadas e quais estão insoladas. As áreas com incidência negativa serão sempre sombreadas. As áreas com incidência positiva serão insoladas ou sombreadas conforme a posição da linha de sombra. São calculadas ainda até três interreflexões, com base no fator de forma e no albedo (refletância) das superfícies, que são adicionadas à radiação incidente diretamente.

A partir do comprimento de **g**, **h**, **i**, **j**, **n** e **o;** determina-se qual a proporção de áreas em cada uma das partes.

No caso da parte P3, por exemplo, há possibilidade de existirem as áreas **i** e **h**. Caso o comprimento de **i** seja maior que $\mathbf{H_C/3}$, P3 terá 1,0 de **i** e 0,0 de **h**. Caso o comprimento de **i** seja menor que $\mathbf{H_C/3}$, as porções serão dadas por:

$$P3_i = \frac{P3 - i}{P3}$$ **Equação 5.5**

$$P3_h = 1 - P3_i$$ **Equação 5.6**

O raciocínio para as outras partes é análogo.

O comportamento térmico de cada parte é calculado separadamente por uma planilha que utiliza o método das diferenças finitas, semelhante à apresentada no item anterior. Dentro dos edifícios, as divisórias entre partes (lajes) são consideradas adiabáticas. O intervalo de tempo é determinado como função das características dos materiais e dos espaços de ar. Este intervalo é o mesmo para todas as partes. Os dados horários de temperatura, radiação, velocidade do vento, etc. são interpolados para este intervalo.

As trocas por onda longa também são determinadas com base no fator de forma e na temperatura superficial do instante anterior. Com isso, obtém-se a radiação liquida na superfície.

O nó superficial é calculado para as duas áreas existentes naquela fachada. As trocas entre o nó superficial e o primeiro nó interno são ponderadas na proporção da existência daquela área naquela parte.

Assim, a equação para o segundo nó de P3 se converte em:

Equação 5.7

$$T_1^{p+1} = Fo \cdot \left[\left(P3_i \cdot T_{i_0}^p + P3_j \cdot T_{j_0}^p\right) + T_2^p\right] + (1 - Fo) \cdot T_m^p$$

As paredes trocam com o espaço de ar entre os prédios em função do coeficiente de convecção. O coeficiente pode ser calculado por qualquer uma das equações no item 3.2.2.7. O *canyon* também troca com a camada de ar superior seguindo qualquer uma das equações apresentadas no mesmo item. Inicialmente adotou-se a Equação 3.85 como referência, já que as outras equações igualavam a temperatura do *canyon* à temperatura de referência e/ou tornavam o modelo instável. O balanço do *canyon* é dado por:

Equação 5.8

$$\frac{(T_c^{p+1} - T_c^p) \cdot c_{par} \cdot \rho_{ar} \cdot \boldsymbol{V_c}}{\Delta t} = h_c \cdot (T_{P1}^p - T_c^p).A_{P1} + h_c \cdot (T_{P2}^p - T_c^p).A_{P2} + \cdots + h_c \cdot (T_{P9}^p - T_c^p).A_{P9} + u_r \cdot C_H \cdot c_{par} \cdot \rho_{ar} \cdot (T_r^p - T_c^p).A_{Topo}$$

Rearranjando os termos e eliminando-se o comprimento do *canyon*, tem-se a forma:

Equação 5.9

$$\boldsymbol{T_c^{p+1}} = \left\{\mathbf{1} - \frac{\Delta \boldsymbol{t}}{\boldsymbol{H_C \cdot L_c}} \cdot \left[\boldsymbol{h_c} \cdot \frac{(\mathbf{2}\, \boldsymbol{H_C} + \boldsymbol{L_C})}{\boldsymbol{c_{par} \cdot \rho_{ar}}} + \boldsymbol{u_r \cdot C_H}\right]\right\} \cdot \boldsymbol{T_c^p} + \frac{\Delta \boldsymbol{t}}{\boldsymbol{H_C \cdot L_c}} \cdot \left\{\frac{\boldsymbol{h_c}}{\boldsymbol{c_{par} \cdot \rho_{ar}}} \cdot \left[\frac{\boldsymbol{H_C}}{\mathbf{3}} \cdot \left(\boldsymbol{T_{P1}^p + T_{P2}^p + T_{P3}^p + T_{P7}^p + T_{P8}^p + T_{P9}^p}\right) + \frac{\boldsymbol{L_C}}{\mathbf{3}} \cdot \left(\boldsymbol{T_{P4}^p + T_{P5}^p + T_{P6}^p}\right)\right] + \boldsymbol{u_r \cdot C_H \cdot T_r^p . L_C}\right\}$$

O primeiro termo deve ser maior do que zero para garantir a condição de estabilidade. Como, frequentemente, o termo de estabilidade para o *canyon* é menor do que o das superfícies, optou-se por permitir a utilização de intervalos de tempo diferenciados para as equações.

A planilha oferece como dados de saída a curva de entrada para até 1440 intervalos de tempo (com intervalos de um minuto, os resultados mostram um dia, com intervalo de 5 minutos, cinco dias, e assim por diante).

Além disso, permite-se a avaliação de parâmetros específicos:

- Temperatura máxima do período;
- Temperatura média para o período;
- Amplitude total para o período;
- Diferença máxima entre a temperatura de referência e a temperatura do *canyon*.

Para validação do modelo, foram utilizadas as medidas de Setembro e Fevereiro, considerando-se o espaço das medições como um *canyon* de 46 m de largura (rua + recuos dos edifícios); 48 m de altura e com albedo de 0,6 (ambas as variáveis são médias entre os dois edifícios).

O resultado pode ser visualizado na Figura 5.14.

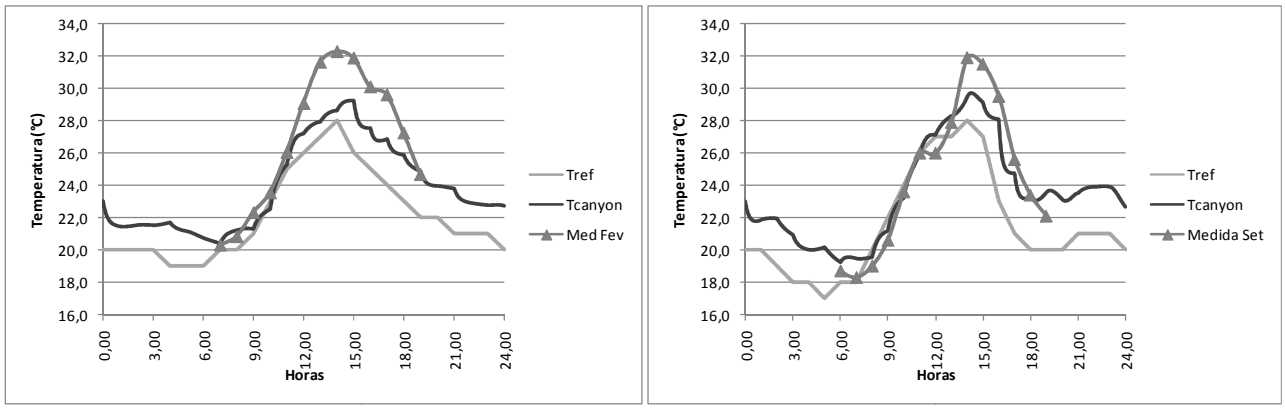


Figura 5.14: Comparação do modelo com resultados das medidas

Observa-se que a curva de aquecimento durante a manhã apresenta bom ajuste em ambos os casos, havendo divergências entre as medições e o modelo a partir das 12h em Fevereiro e das 13h em Setembro. Observando-se as fotos olho de peixe, percebe-se que este é exatamente o horário de incidência de sol no ponto de medida. Três hipóteses foram consideradas para esta discrepância:

- O sensor de temperatura não foi suficientemente protegido contra a radiação solar. Houve uma melhoria da proteção da primeira para a segunda medição, mas ela pode não ter sido suficiente.
- O modelo considera o *canyon* como sendo contínuo. Na realidade, há penetração de sol no ponto da medida por entre os prédios, em horários que o modelo não considera como insolados. Na Figura 5.15, pode-se observar esta ocorrência nos horários das 10h e das 14h em Setembro.

Figura 5.15: Fotos com grande angular durante medida de Setembro

Fotos: Bruna Luz

- O modelo superestima a inércia térmica das superfícies, amortecendo excessivamente a curva de temperatura.

As duas últimas hipóteses são mais prováveis, pelo menos no que se refere à medida de Setembro. Apesar da diferença no valor da temperatura máxima, o resultado foi considerado satisfatório, dadas as limitações do modelo. Acredita-se que os erros serão minimizados quando se tratarem dos valores médios da quadra. A diferença de temperatura de 2,0°C em Fevereiro e de 1,5°C em Setembro é menor do que a encontrada nas simulações com Envi-met (5°C entre a temperatura máxima simulada e a medida).

Validado o modelo, foram realizados alguns testes simples para se verificar o impacto da alteração de algumas variáveis. Foi tomada como base uma rua com 20m de largura e com edifícios de 20 m de altura. A rua está orientada a 45°, o albedo das fachadas é de 0,5 e o do piso 0,2. Foi avaliado somente o mês de Setembro. O resultado para três dias é apresentado na Figura 5.16.

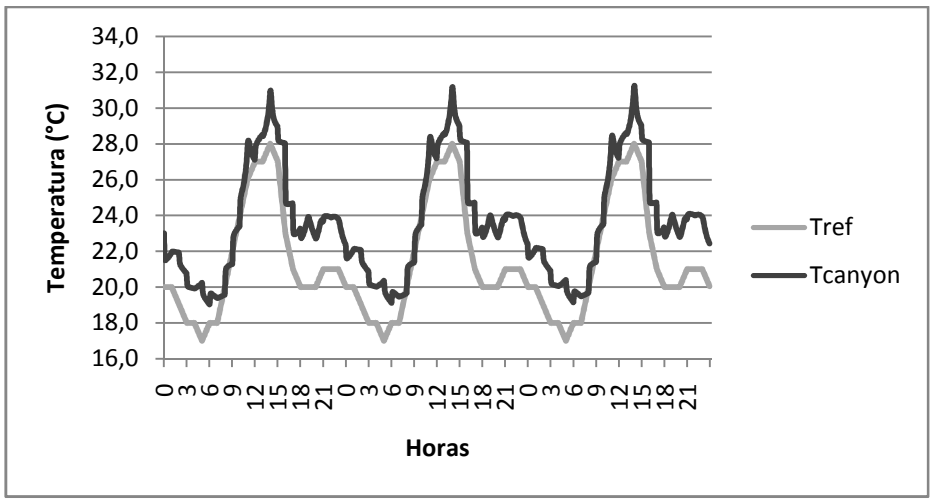


Figura 5.16: Avaliação do modelo, caso base

Observa-se que a variação entre os três dias é muito pequena, sendo possível trabalhar com um período menor. O pico ocorreu às 15h, tendo o *canyon* atingido uma temperatura de 31°C.

Inicialmente, foi feita uma avaliação do impacto da orientação da via no comportamento térmico local. A orientação da rua influência basicamente a temperatura máxima, já que determina o período de insolação das fachadas e da rua. A orientação de 90° apresentou pouca diferença, mas as orientações de 0° e 135° contaram com um aumento na temperatura máxima.

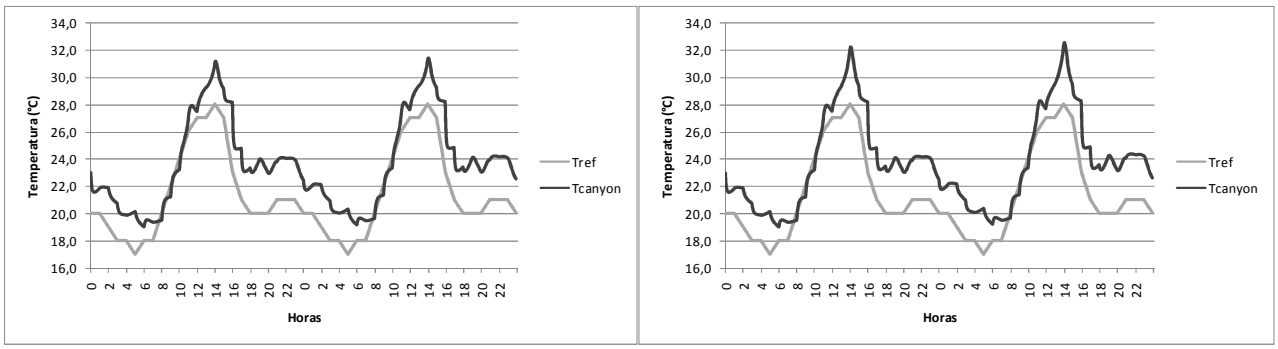


Figura 5.17: Comportamento térmico para ruas orientadas N-S e NW-SE, respectivamente

O aumento da altura dos edifícios para 40 m não alterou a temperatura média diária do recinto urbano, mas reduziu a amplitude em cerca de 3°C. A alteração ocorreu tanto na mínima quanto na máxima, aproximadamente na mesma proporção. A redução da altura para 10 m apresentou o mesmo efeito em sentido contrário, aumentando a amplitude em 3°C.

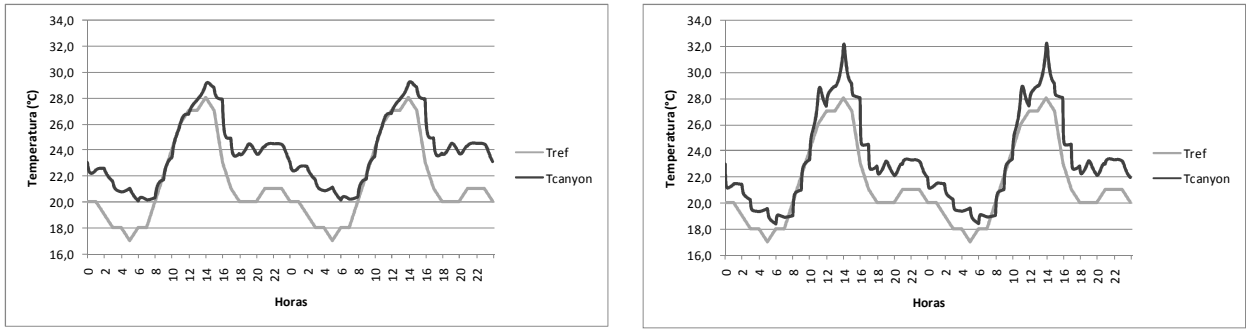


Figura 5.18: Alteração da altura dos edifícios para 40m e 10m respectivamente

Outro teste realizado foi a influência de alterações no albedo das superfícies. Como o modelo considera as interreflexões da radiação nas fachadas, o aumento da reflexão nas superfícies pode tanto levar a um aumento (devido ao aumento na radiação liquida do *canyon*) quanto a uma redução (devido à menor acumulação de calor nas fachadas) na temperatura do ar. A avaliação foi feita para edifícios de 40 m de altura, com ruas orientadas nos 4 sentidos principais (N-S, E-W, SE-NW, SW-NE) e é mostrada na Figura 5.19.

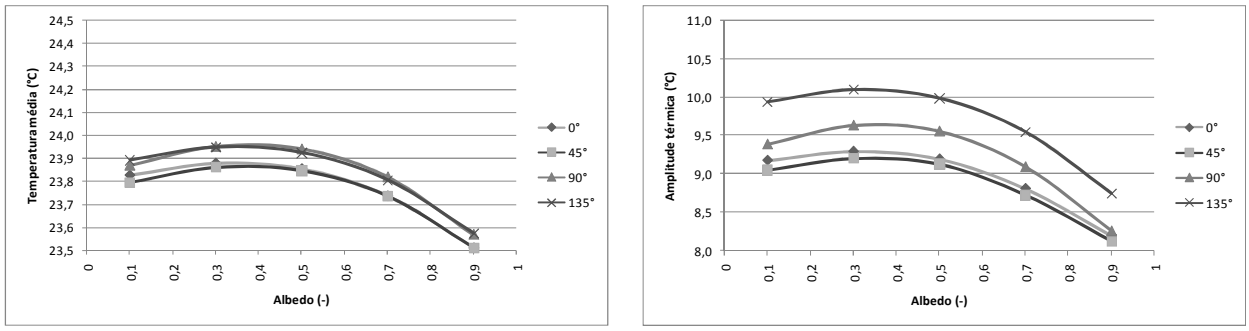


Figura 5.19: Comportamento térmico para ruas orientadas N-S e NW-SE, respectivamente

Observa-se que a temperatura média e a amplitude térmica apresentam respostas semelhantes à variação do albedo, embora a amplitude seja afetada com maior intensidade. Para fachadas escuras, há um pequeno acréscimo em ambas as variáveis ambientais com o aumento da refletância. A partir de um albedo de aproximadamente 0,4, os valores de temperatura passam a cair, atingindo o valor mínimo para paredes claras.

Uma interpretação direta destes dados seria que, para se evitar o sobreaquecimento de áreas urbanas, seria mais interessante utilizar cores escuras do que cores médias. Deve-se considerar, no entanto, que a adoção de cores escuras nas fachadas aumenta também a temperatura interna das edificações, já que a radiação é totalmente absorvida pelas paredes. Como as variações nas condições externas são pequenas para albedos entre 0,1 e 0,5, deve-se considerar que cores médias ainda apresentam um desempenho geral melhor.

5.1.4. *Consumo de energia*

5.1.4.1. LT Urban

O método descrito em Comission of the European Communities (1994) como "*The LT (Lighting and Thermal) Method*" é utilizado para o estudo da eficiência energética de edificações até certo grau de

complexidade na Europa. Originalmente, era totalmente manual, feito através de planilhas e gráficos.

O método instituiu o conceito de zonas passivas, áreas da edificação que podem se beneficiar dos recursos naturais (luz e sol) para seu condicionamento. Cada zona tem a sua orientação, conforme mostrado na e têm profundidade de 6m ou de duas vezes o pé direito do pavimento. Os ambientes com esta profundidade têm o melhor potencial para o aproveitamento de sistemas solares passivos, sendo fundamental que as condições de exposição ao sol e à luz natural sejam preservadas. O consumo das zonas passivas é determinado a partir das chamadas Curvas LT, que determinam o consumo de energia para aquecimento, resfriamento e iluminação de acordo com a orientação e a proporção de área envidraçada e opaca (Figura 5.20).

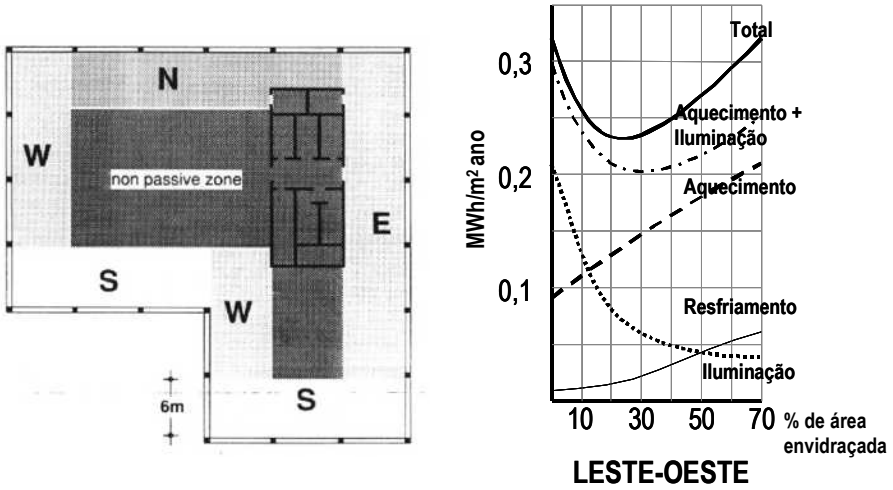


Figura 5.20: Demarcação de zonas passivas e exemplo Curvas LT

Fonte: COMISSION, 1994

Ratti, Baker & Steemers (2005) mostram uma aplicação destes conceitos para áreas urbanas. Utilizando algoritmos simples e um DEM (*Digital Elevation Model*) dos edifícios em uma determinada região, o programa calcula a zona passiva e o consumo de energia de cada fachada. A Figura 5.21 mostra o resultado da aplicação em três áreas em Londres, Toulouse e Berlim.

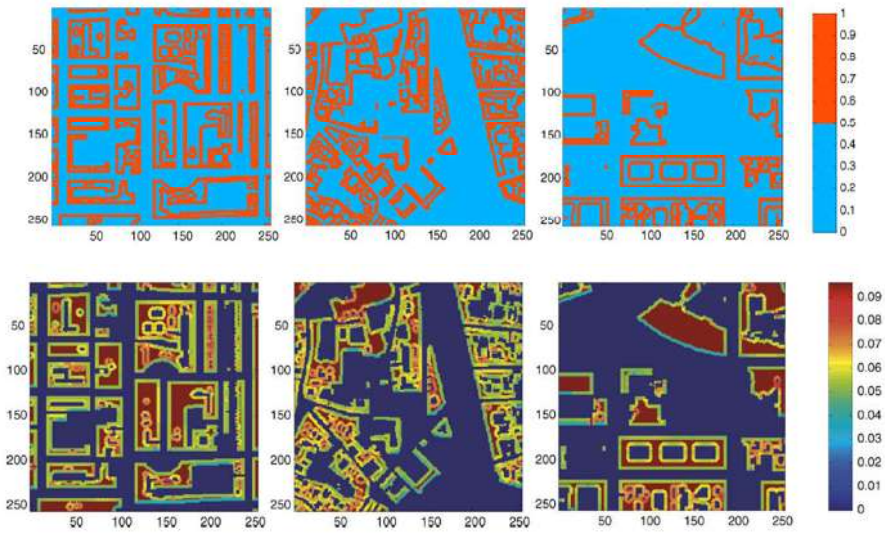


Figura 5.21: Identificação da zona passiva e estudo de consumo de energia para as cidades mencionadas

Fonte: RATTI, BAKER & STEEMERS, 2005

O consumo de energia é dado em kWh /m² ano

Um raciocínio similar foi utilizado para cálculo de energia na área piloto, apresentado no item 6.3.3.

5.1.4.2. PRECIs

O programa PRECIs – *Assessing the Potential for Renewable Energy in Cities* – busca avaliar o potencial que o meio urbano tem para o aproveitamento solar e é apresentado em Compagnon (2000). Os estudos utilizam o software Radiance, desenvolvido pelo Lawrence Berkeley Laboratory, nos Estados Unidos. O método permite verificar a radiação incidente em fachadas de novos edifícios ou avaliar o impacto de novas construções na radiação incidente nas fachadas dos edifícios pré-existentes.

São considerados como usos possíveis da energia solar o aquecimento de ambientes, a iluminação natural e a conversão fotovoltaica, sendo que os fatores de utilização são determinados para cada um destes usos. Os valores mínimos que viabilizam a utilização da energia naquele ponto de fachada são calculados a partir de equações que levam em conta as condições climáticas locais e características das edificações e dos sistemas tipicamente encontrados na Europa. São avaliadas cinco variáveis:

- Radiação anual nas fachadas por metro quadrado de área de piso;
- Porcentagem de área de fachada com irradiação superior à necessária para aquecimento no inverno (heating season);
- Porcentagem de área de fachada com irradiação anual acima de 800 kWh/m² (ou seja, com potencial para aproveitamento para geração fotovoltaica);
- Porcentagem de área de fachada com iluminância média anual superior a 10 klux e,
- Porcentagem dá área de fachada com um fator de luz natural superior a 40%.

Cada tipo de cálculo é realizado a partir de um modelo de céu adequado, que é sempre representativo das condições médias anuais do céu para o local.

A partir destes modelos, o procedimento de *ray-tracing* do programa *Radiance* calcula a radiação e a luz incidente em cada fachada e na cobertura. Determinam-se então as áreas da envoltória do edifício (fachada e cobertura) onde esta energia pode ser aproveitada. O trabalho foca na área de fachadas, pois considera imprecisa a modelagem da cobertura, uma vez que desconsidera a inclinação dos telhados. Além disso, considerou-se que as coberturas normalmente são pouco obstruídas, pois se encontram em pontos mais altos e os edifícios não apresentam grandes disparidades de altura entre si. Embora isso seja verdade para as cidades européias, onde as densidades e a estrutura urbana são relativamente homogêneas, este pressuposto não se aplica às cidades brasileiras, onde a heterogeneidade de usos e alturas é bastante comum.

Os estudos comparam várias propostas de implantação de edifícios, buscando encontrar aquele em que as superfícies apresentam a maior área disponível para o uso de tecnologias solares passivas e pró-ativas.

Embora este não seja seu objetivo, o cálculo de radiação incidente pode ser utilizado na predição do consumo energético da área estudada.

5.1.4.3. Obstrução 1.0

O programa obstrução foi desenvolvido durante a pesquisa de mestrado para calcular o impacto da obstrução causada por edifícios novos nos vizinhos (BRANDÃO, 2004). Cada vizinho é representado por uma célula de teste, um ambiente padrão colocado no ponto médio de cada divisa do terreno, com uma única abertura voltada para a edificação cujo impacto deseja-se avaliar (Figura 5.22).

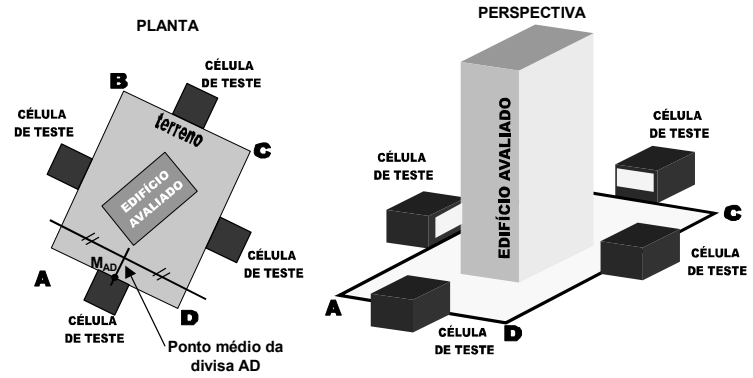


Figura 5.22: Distribuição das células de teste

Fonte: BRANDÃO,2004

O consumo de energia anual de cada célula é calculado com base nos valores horários de radiância, luminância, temperatura e umidade, utilizando-se da modelagem matemática em Brandão (2004).Os dados da edificação que projeta a obstrução são inseridos e o aumento no consumo da célula teste em relação ao consumo desobstruído é calculado.

O cálculo de consumo por metro quadrado foi realizado no aplicativo Obstrução 1.0 para as 8 orientações principais, considerando-se incrementos de obstrução de 15°. O edifício de referência utilizado tem 60 x 60 m de lado e está localizado no centro de um terreno de 84 x 84 m (Figura 5.23).

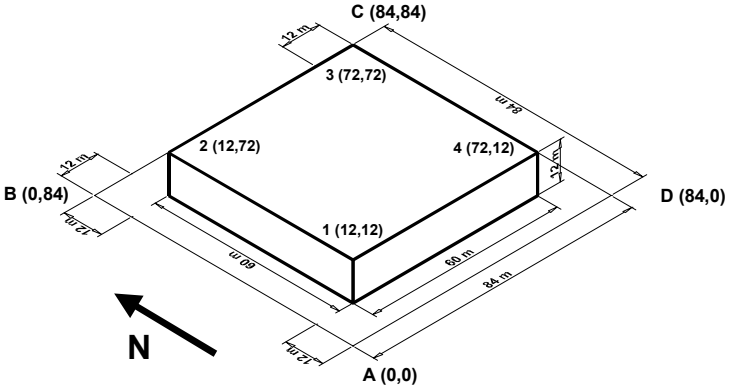


Figura 5.23: Perspectiva do edifício exemplo com dados para inserção no *Obstrução 1.0*

Fonte: BRANDÃO,2004

Como a dimensão horizontal é muito maior que a distância à divisa do terreno, esta configuração simula uma obstrução infinita. Com variações na altura do edifício, é possível verificar o impacto de diferentes ângulos de obstrução.

Ângulo de obstrução vertical (°)	Altura do edifício exemplo (m)	Número de andares
15	3	1
30	7	2
45	12	4
60	21	7
75	45	15

Tabela 5.7: Obstruções consideradas no estudo exploratório

Fonte: BRANDÃO,2004

O resultado é observado na forma de gráficos, conforme pode ser visto na Figura 5.24.

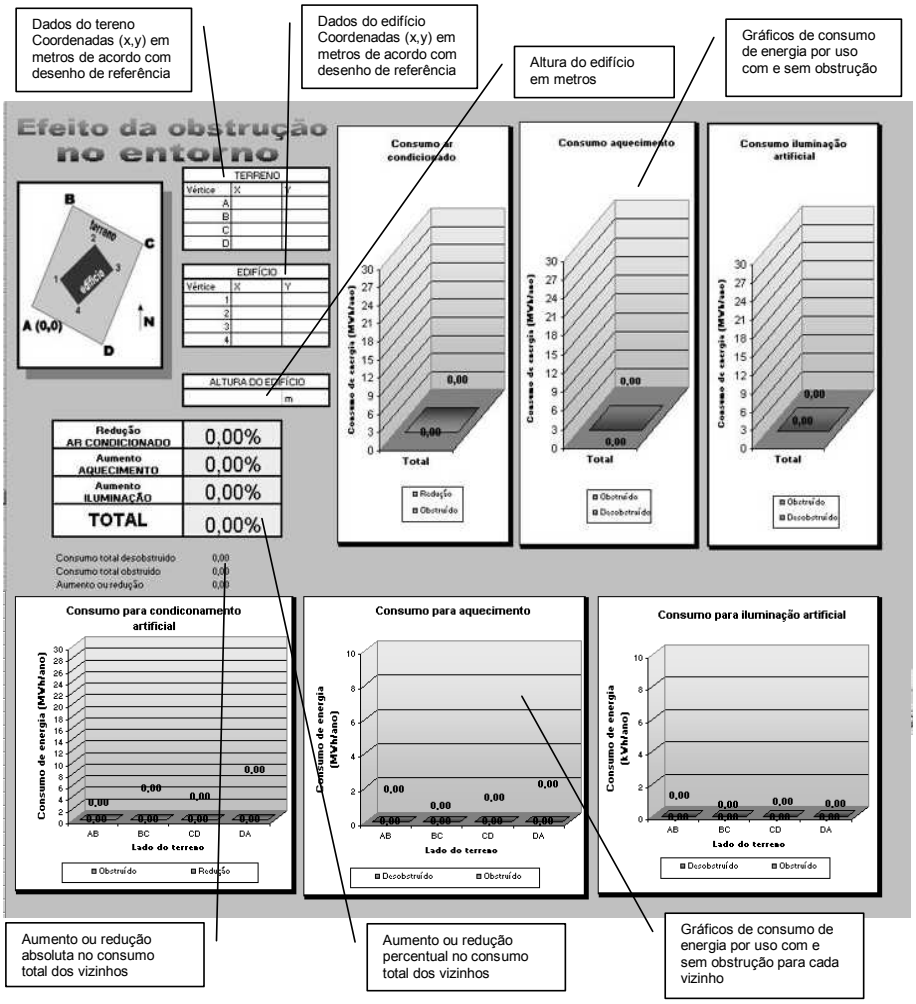


Figura 5.24: Tela inicial do *Obstrução 1.0* com indicação das variáveis envolvidas

Fonte: BRANDÃO,2004

Nesta pesquisa de mestrado foram ainda apresentados estudos para diversas configurações. O perfil de variação em função do ângulo de obstrução, carga interna ($\mathbf{Q_i}$) e relação área de vidro / área de parede (**WWR**) é mostrado na Figura 5.25.

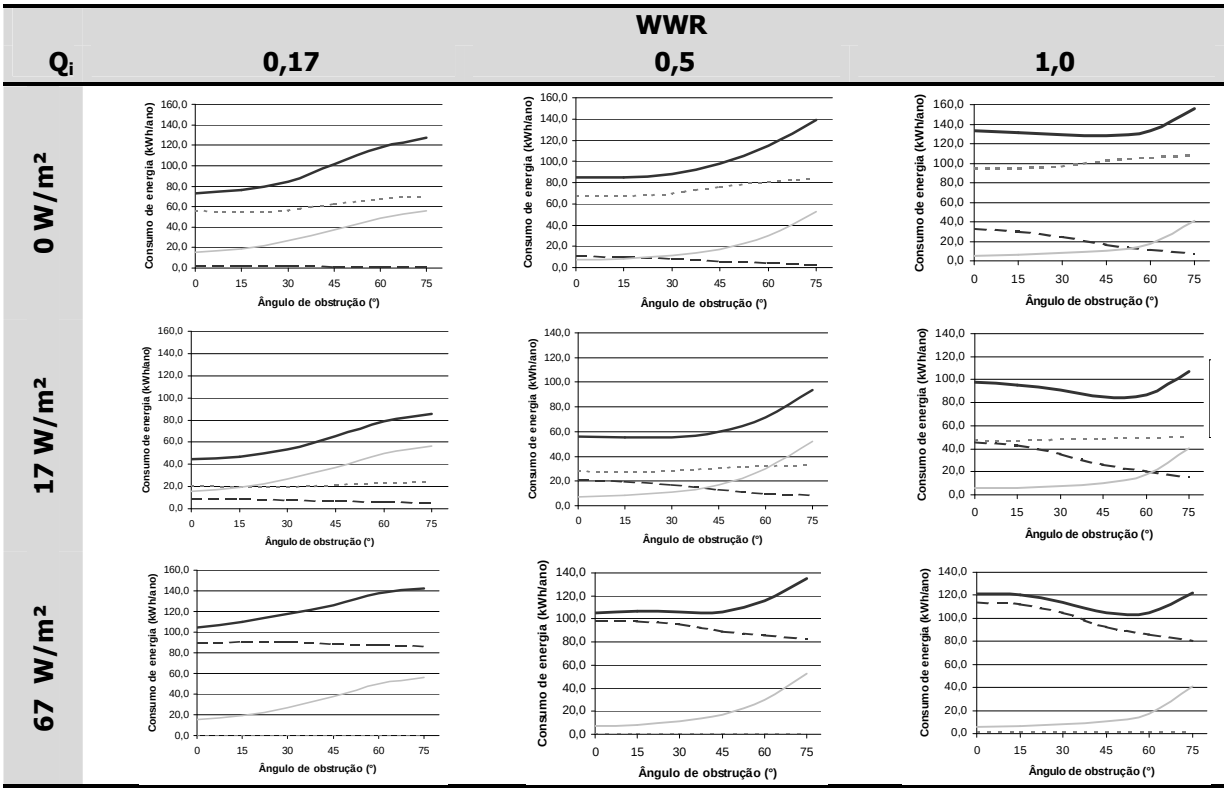


Figura 5.25: Variação do consumo de energia com a obstrução para célula de 3 x 3x 3 m

Fonte: BRANDÃO,2004

Embora este não seja seu objetivo inicial, o Obstrução 1.0 fornece o consumo de energia das células teste. Utilizando-se o edifício padrão e variando a orientação, é possível obter valores de consumo para edificações com condição de exposição equivalentes na cidade de São Paulo.

Os parâmetros utilizados no cálculo correspondem a uma edificação residencial típica (carga interna de 17 W/m², relação área transparente/área total de 0,5 e fator de massa de 0,5). Os valores de consumo são dados em kWh/(m² ano).

Tabela 5.8: Consumo de energia para diversas obstruções (Iluminação)

Valores em kWh/m².ano

	Obstrução						
Orientação	**0°**	**15°**	**30°**	**45°**	**60°**	**75°**	**Acima 75°**
0°	7,1	7,9	10,4	11,3	25,8	48,1	56,9
45°	6,6	8,4	10,4	14,9	24,8	43,5	54,7
90°	6,4	8,7	11,1	17,6	30,1	54,2	56,9
135°	7,0	8,3	10,0	15,0	24,0	34,5	40,0
180°	7,7	8,6	11,7	18,7	34,6	51,2	56,9
225°	7,5	8,6	10,2	15,0	25,4	42,7	52,7
270°	7,4	8,5	10,4	15,9	27,3	53,9	56,9
315°	7,5	8,3	9,7	11,9	16,6	23,6	27,7

Orientação	Obstrução 0°	15°	30°	45°	60°	75°	Acima 75°
0°	26,4	25,0	24,2	32,2	37,7	38,0	38,0
45°	30,2	29,0	31,5	34,2	34,7	35,4	35,0
90°	34,8	33,3	33,1	33,9	33,9	34,5	33,7
135°	41,8	39,9	37,5	35,0	33,3	32,5	32,1
180°	44,0	41,9	38,6	35,8	33,7	32,2	31,3
225°	40,6	38,6	36,2	34,1	32,5	31,8	31,4
270°	32,1	30,6	31,7	33,8	34,6	36,0	35,1
315°	26,8	25,4	29,2	33,3	34,2	35,4	35,2

Tabela 5.9: Consumo de energia para diversas obstruções (Resfriamento)

Valores em kWh/m².ano

Orientação	Obstrução 0°	15°	30°	45°	60°	75°	Acima 75°
0°	26,9	28,1	27,2	37,9	41,6	44,4	46,3
45°	26,5	28,1	33,0	39,2	42,2	44,3	45,2
90°	24,1	25,7	30,7	34,7	37,2	39,8	40,8
135°	17,9	19,1	20,7	23,1	24,4	25,6	26,0
180°	14,7	15,8	17,1	18,0	19,0	19,7	20,8
225°	18,9	20,4	22,7	25,2	26,8	28,3	33,2
270°	25,2	27,0	32,7	36,8	39,6	41,9	42,9
315°	27,7	28,9	32,9	38,9	42,1	44,4	44,9

Tabela 5.10: Consumo de energia para diversas obstruções (Aquecimento)

Valores em kWh/m².ano

Para ambientes sem contato com o exterior, foi considerado um consumo equivalente à média de consumo para todas as orientações com obstrução acima de 75°. O resultado deste consumo é:

- **Iluminação**: 50 kWh/(m² ano)
- **Resfriamento**: 34 kWh/(m² ano)
- **Aquecimento**:37 kWh/(m² ano)
- **Total**: 122 kWh/(m² ano)

Para isto, deve-se determinar a orientação e as dimensões de cada fachada do edifício, bem como a altura e a distância da obstrução significativa. Para efeito deste trabalho, a obstrução mais significativa é a mais próxima ao objeto, mas isto nem sempre é verdade, devendo cada caso ser considerado com atenção.

Considerando-se $\mathbf{H_{ed}}$ como a altura do edifício, $\mathbf{H_o}$ como a altura da obstrução e $\mathbf{L_c}$ a distância entre elas, tem-se que o número de andares ($\mathbf{N_{CE}}$) com uma obstrução menor ou igual ao ângulo $\boldsymbol{\xi_{obst}}$ é dado por:

$$N_{CE} = \frac{H_{ed} - H_o + L_c \cdot \tan \xi_{obst}}{H_{and}}$$

Equação 5.10

Onde **H_{and}** é a altura de piso a piso do andar. Nos estudos realizados este número é sempre arredondado para baixo caso a divisão não seja exata. Caso **N** seja menor que zero, toda a fachada apresenta um ângulo de obstrução maior do que o ângulo de referência. Caso **N** seja maior do que o número de pavimentos na edificação, toda a fachada apresenta um ângulo de obstrução maior do que o ângulo de referência.

A Figura 5.26 mostra um exemplo de aplicação da equação em dois edifícios

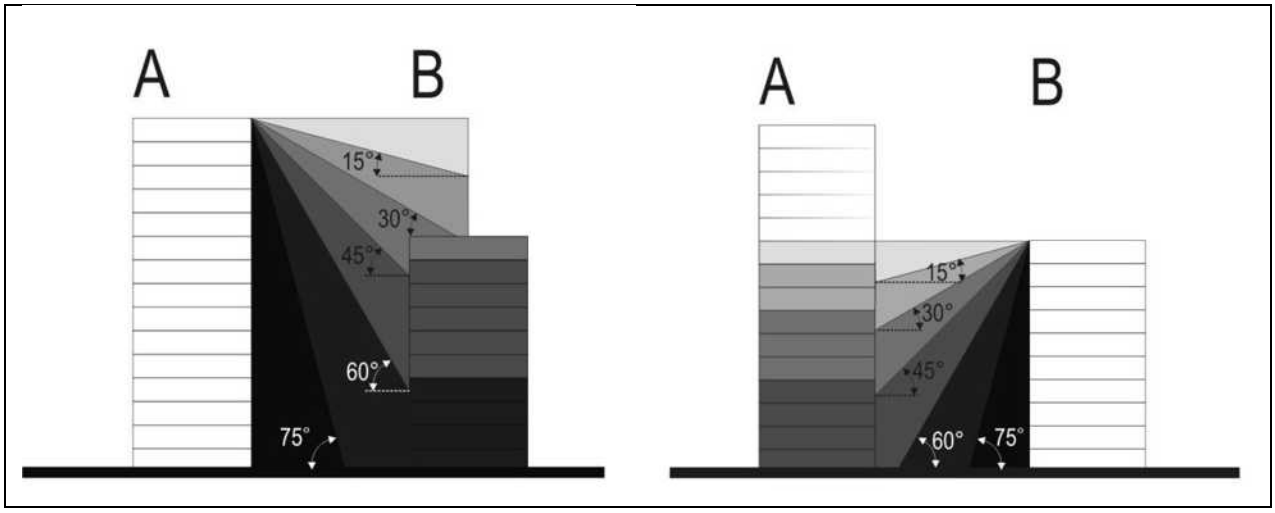


Figura 5.26: Esquema de obstrução para edifícios de múltiplos pavimentos

No caso em questão, o edifício A contaria com 5 andares desobstruídos, 1 andar com 15° de obstrução, 2 com 30°, 3 andares com 45° e 4 com 60°. Não haveria no edifício A nenhum andar com 75 ou mais de obstrução. No caso do edifício B, haveria 1 andar com 45°, 5 andares com 60° e 4 andares com 75°. Não haveria nenhum andar com menos de 30° ou mais de 75°.

O consumo de energia é calculado a partir da orientação e da obstrução para cada grupo de andares. O consumo total dos ambientes voltados para esta orientação de fachada (**C_F**) é dado pelo somatório do consumo de cada andar multiplicado pelo número de andares com esta obstrução.

Para determinar o consumo da edificação, deve-se considerar que os recursos naturais só podem ser aproveitados em uma área do edifício não muito distante da fachada, comumente chamada de "zona passiva".

A partir das recomendações dadas no método LT, determinou-se que a zona passiva se estende até a 6 m de distância da fachada, sendo que o restante da edificação deve ser condicionado artificialmente. A partir desta premissa, esta zona (**A_{pas}**) tem a área dada por:

Equação 5.11

$$A_{pas} = [(F_1 - 6) + (F_2 - 6) + (F_3 - 6) + (F_4 - 6)] \cdot 6$$

Equação 5.12

$$A_{pas} = (P - 24) \cdot 6$$

Caso a zona passiva seja maior que a área do edifício, ela deve ser reduzida para um valor igual a esta área. Um esquema com a indicação da zona passiva é dado na Figura 5.27.

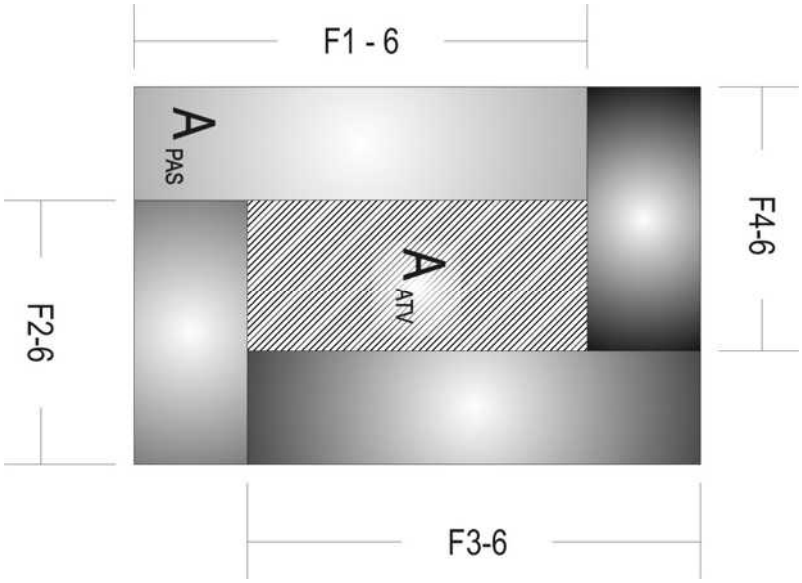


Figura 5.27: Esquema para cálculo de consumo de energia

O consumo de energia do edifício é calculado a partir da equação:

$$C_{edif} = \frac{\left(L_{f1} - 6\right) \cdot CE_{f1} + \left(L_{f2} - 6\right) \cdot CE_{f2} + \left(L_{f3} - 6\right) \cdot CE_{f3} + \left(L_{f4} - 6\right) \cdot CE_{f4}}{P} \cdot A_{pas} - CE_{AT} \cdot \left(A_{ed} - A_{pas}\right) \cdot H_{ed}$$

Equação 5.13

Quanto a este consumo calculado, é importante observar que:

- Não leva em conta o consumo de energia por eletrodomésticos, incluindo o chuveiro elétrico e outros equipamentos para aquecimento de água. Este consumo refere-se exclusivamente aos sistemas de condicionamento artificial da construção (iluminação, resfriamento e aquecimento);
- Os padrões de iluminação são para escritórios comerciais, com 12 W/m² de potência instalada. Em residências, este índice é normalmente menor, pois se aceitam níveis mais baixos na maioria dos ambientes;
- O ambiente é considerado como sendo de uso contínuo, o que na maior parte das vezes não é verdade, nem para residências nem para edifícios de comércio e serviço. O padrão de uso diferenciado de áreas de circulação, depósitos e outras áreas de permanência curta não é considerado no cálculo;
- Assume-se a utilização contínua de um sistema de ar condicionado, de um sistema de aquecimento e de um sistema de dimerização da iluminação artificial controlado pelos níveis de iluminância no plano de trabalho. Para a as residências paulistanas, as três premissas normalmente não são verdadeiras.

Deste modo, ressalta-se que este estudo não é exatamente uma avaliação do consumo de energia, mas sim uma avaliação da demanda potencial dos sistemas de condicionamento ambiental.

A seguir, apresenta-se um exemplo para a típica casa residencial, com pequenos recuos laterais, grade na frente e circundado por edificações de mesma altura.

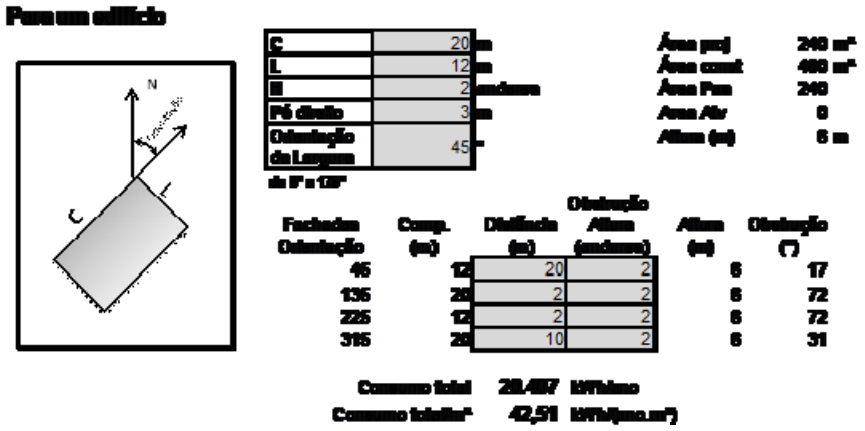
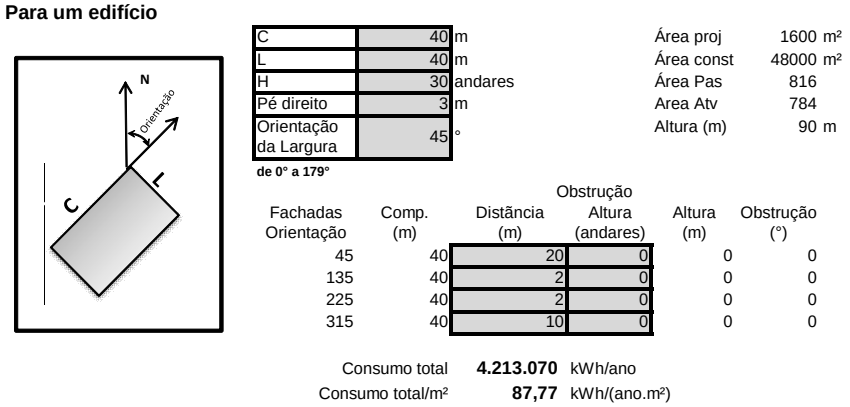


Figura 5.28: Estudo de consumo de energia para residência unifamiliar típica

Observam-se, como mencionado, os altos valores de consumo (equivalente a cerca de 1.700 kWh/mês). O resultado também reflete uma baixa densidade de ocupação, já que o valor é exclusivamente relacionado à densidade construída. Para um edifício alto, quadrado, com 20m de lado, os resultados são apresentados na Figura 5.29.



Para um edifício

C	40	m	Área proj	1600	m²
L	40	m	Área const	48000	m²
H	30	andares	Área Pas	816	
Pé direito	3	m	Area Atv	784	
Orientação da Largura	45	°	Altura (m)	90	m

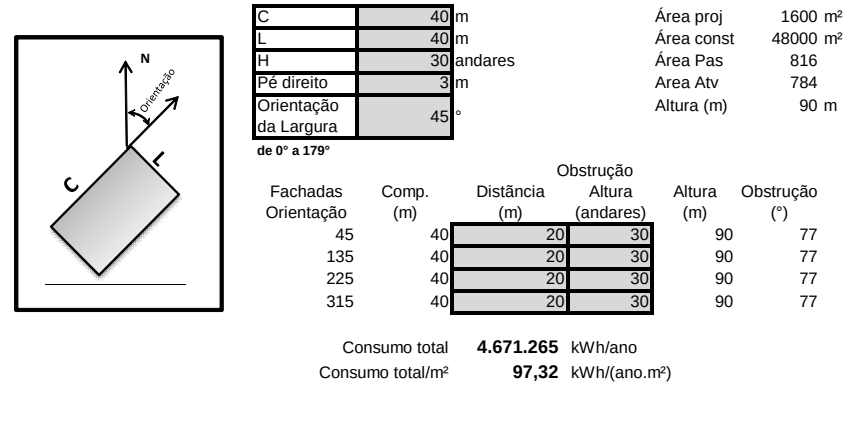
de 0° a 179°

Fachadas Orientação	Comp. (m)	Obstrução Distância (m)	Obstrução Altura (andares)	Altura (m)	Obstrução (°)
45	40	20	0	0	0
135	40	2	0	0	0
225	40	2	0	0	0
315	40	10	0	0	0

Consumo total	**4.213.070**	kWh/ano
Consumo total/m²	**87,77**	kWh/(ano.m²)

Figura 5.29: Estudo de consumo de energia para edifício alto desobstruído

Observa-se que o valor por metro quadrado é praticamente o dobro do valor da residência, devido à menor obstrução. O valor aumenta em cerca de 10% quando o edifício é localizado entre prédios do mesmo tamanho, como se observa na Figura 5.30.



Para um edifício

C	40	m	Área proj	1600	m²
L	40	m	Área const	48000	m²
H	30	andares	Área Pas	816	
Pé direito	3	m	Area Atv	784	
Orientação da Largura	45	°	Altura (m)	90	m

de 0° a 179°

Fachadas Orientação	Comp. (m)	Obstrução Distância (m)	Obstrução Altura (andares)	Altura (m)	Obstrução (°)
45	40	20	30	90	77
135	40	20	30	90	77
225	40	20	30	90	77
315	40	20	30	90	77

Consumo total	**4.671.265**	kWh/ano
Consumo total/m²	**97,32**	kWh/(ano.m²)

Figura 5.30: Estudo de consumo de energia para edifício alto entre edifícios da mesma altura

A planilha também foi preparada para receber dados em sequência, permitindo a integração com programas de geoprocessamento. Os resultados desta aplicação serão discutidos no item 6.3.5.4.

5.2. Modelos computacionais utilizados

5.2.1. *Insolação (Ecotect)*

5.2.1.1. Modelagem da área

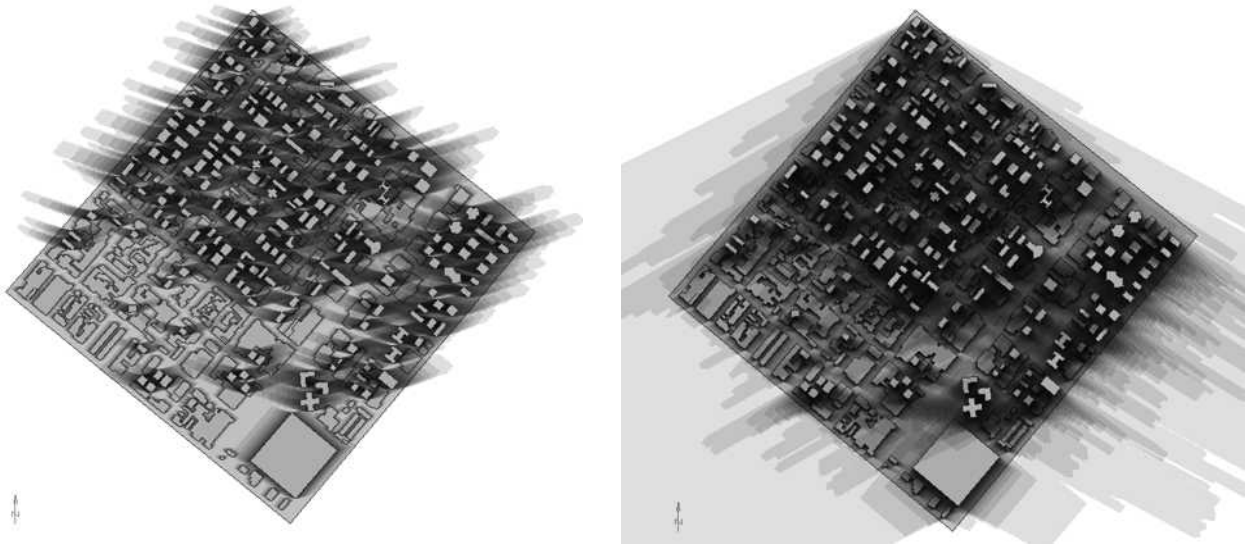
Foi feito ainda um estudo no *software* Ecotect, utilizado no caso para verificar as condições de sombreamento e exposição ao sol dos edifícios e dos espaços urbanos. O mesmo modelo elaborado para a simulação de ventilação foi utilizada. Os resultados foram avaliados de duas maneiras:

- ***Shadow Range***: sobreposição de todas as sombras ao longo do dia (entre 07:00 e 17:00). Não produz informação numérica, mas é possível identificar visualmente áreas menos insoladas que ficam escurecidas pela sobreposição das sombras;
- **Cálculo das horas de insolação**: é feita sobre uma malha ortogonal pré-determinada. Foi adotada uma malha de 100 x 100 elementos com aproximadamente 13 m de distância entre os pontos.

O resultado do sombreamento para os solstícios de verão e inverno é apresentado na Figura 5.31.

Figura 5.31: Estudo de insolação para a área (*shadow range*)

São mostradas a situação de verão e de inverno, respectivamente



Conforme esperado, a maior inclinação do sol no inverno faz com que o sombreamento do piso seja maior. É interessante observar ainda que devido ao recorte do modelo, os edifícios simulados jogam a maior parte da sua sombra nas áreas adjacentes durante o verão, mas sombreiam a própria área no inverno.

5.2.1.2. Resultados

O Ecotect permite ainda o cálculo do número de horas de sol incidente em uma malha pré-estabelecida. O resultado confirma as observações feitas no estudo de sombras, conforme pode-se ver na Figura 5.32.

As áreas a sudoeste apresentam maiores níveis de insolação devido às menores alturas. Observa-se também o aumento da incidência de sol na avenida Ibirapuera em ambos os períodos.

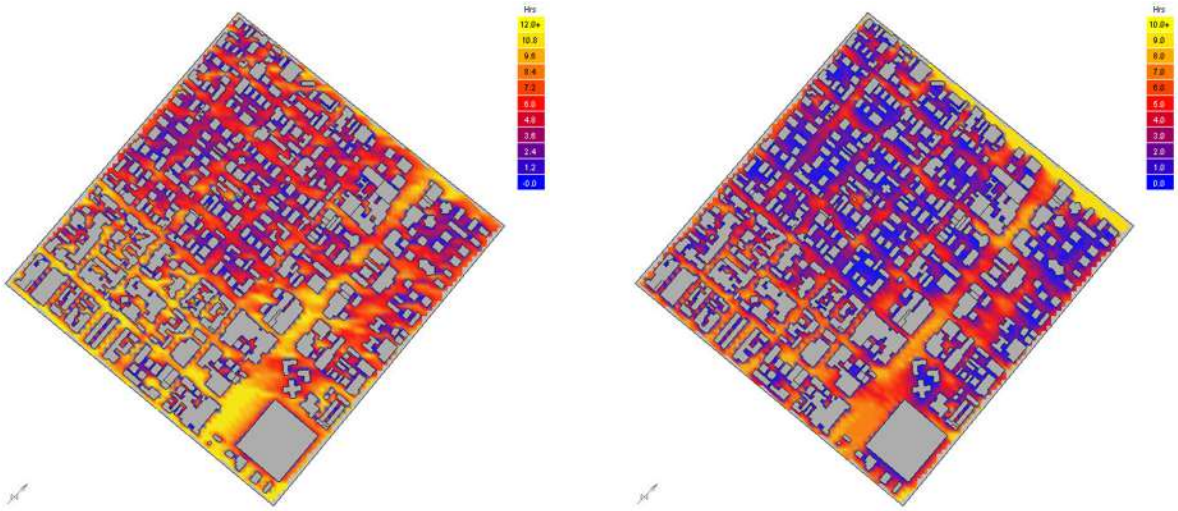


Figura 5.32: Estudo de insolação para a área (horas de sol)

São mostradas a situação de verão e de inverno, respectivamente

A título de estudo, foi feita uma avaliação girando-se o norte 45°, fazendo-o coincidir com o NE real. O resultado pode ser visto na Figura 5.33.

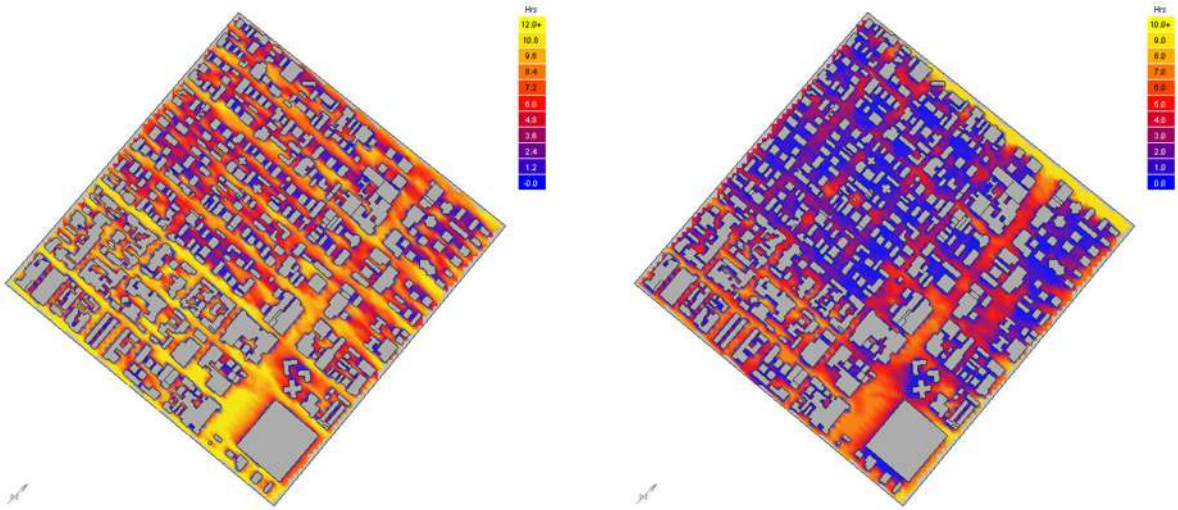


Figura 5.33: Estudo de insolação para a área, norte girado a 45°

São mostradas a situação de verão e de inverno, respectivamente

É possível observar que a alteração na orientação das quadras e dos edifícios provocou um aumento no número de horas de sol no verão e uma redução no inverno, o que pode ser considerado negativo para o desempenho da área como um todo. Foi observada uma redução média de 26% no período de insolação de inverno para a área e um aumento de 19% no verão.

Os resultados foram também exportados na forma de tabela para que pudessem ser utilizados no programa de geoprocessamento, no qual a relação com a forma de ocupação pode ser tratada com mais detalhe.

5.2.2. *ENVI-Met*

5.2.2.1. Modelagem da área

Devido à complexidade da área, encontraram-se grandes dificuldades para modelá-la de maneira eficiente. Foi escolhida uma malha de 5m x 5m, com espaçamento telescópico na vertical, iniciando-se a 1 m com 18% de incremento. A malha contava com 120 x 162 elementos na horizontal e 24 na vertical. Embora o programa declare ter 25 *grids* de altura, o ENVI-met sempre adiciona uma célula à malha telescópica e cinco à malha equivalente. Enquanto o aumento na malha equivalente representa a subdivisão da célula mais próxima à superfície, não foi encontrada referência a respeito da adição de uma célula à malha telescópica.

O número de *nesting grids* foi determinado pelo número de células disponíveis para se usar a versão de 200x200x25. Tentou-se evitar ao máximo utilizar a versão de 250x250x25, para evitar um incremento no tempo de simulação que já havia sido experimentado nas simulações da Luz, em projetos anteriores do Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (LABAUT- FAUUSP).

Foram colocados pontos de monitoramento nos locais dprevistos para a medição. As primeiras simulações apresentaram erro (*Invalid Float Point*) por volta das 10 horas da manhã no tempo de simulação (normalmente após 4 a 5 horas de processamento). O problema de convergência poderia ter várias razões, sendo recomendado aumentar o número de *nesting grids* ou reduzir a complexidade do modelo. A princípio foram aumentados os *nesting grids*, passando de 15 (75m) para 25(125m).

Como o edifício mais alto tinha 84m, o valor do *nesting* estava subestimado em relação à recomendação do programa. No entanto, os edifícios mais altos estavam localizados distantes da borda e, somando-se esta distância, cumpriam os critérios desejados. A área foi reduzida em um quarteirão nas extremidades norte e oeste, aumentando o número de *nesting grids* progressivamente para 40, o que ainda não foi suficiente para que a questão fosse corrigida.

Um dos grandes problemas no decorrer da simulação foram as falhas de convergência, que ocorriam sempre no período diurno depois de cerca de 12 a 15 horas de simulação, o que acarretava grande perda de tempo. Isto levou a progressivas simplificações na geometria do modelo, focando principalmente as áreas com edificações mais baixas, até que se conseguissem produzir resultados para o período das 48 horas.

O processo de transformação do modelo está descrito na Figura 5.34, bem como as alterações realizadas no tamanho da malha.

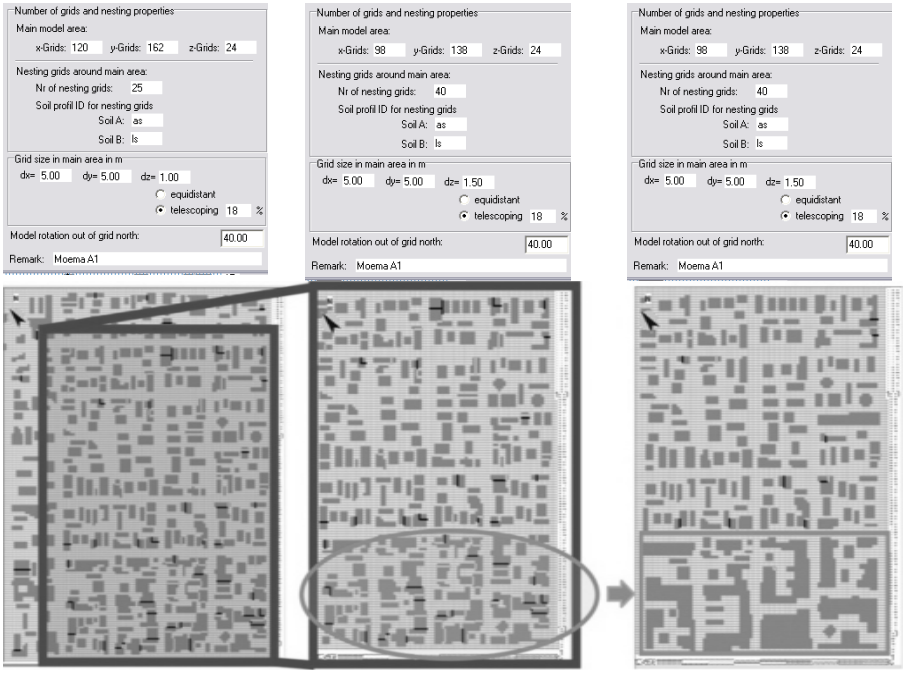


Figura 5.34: Evolução da modelagem da Área 01

Depois dos ajustes foi possível simular a área com a configuração abaixo, já adicionando a vegetação (em cinza escuro).

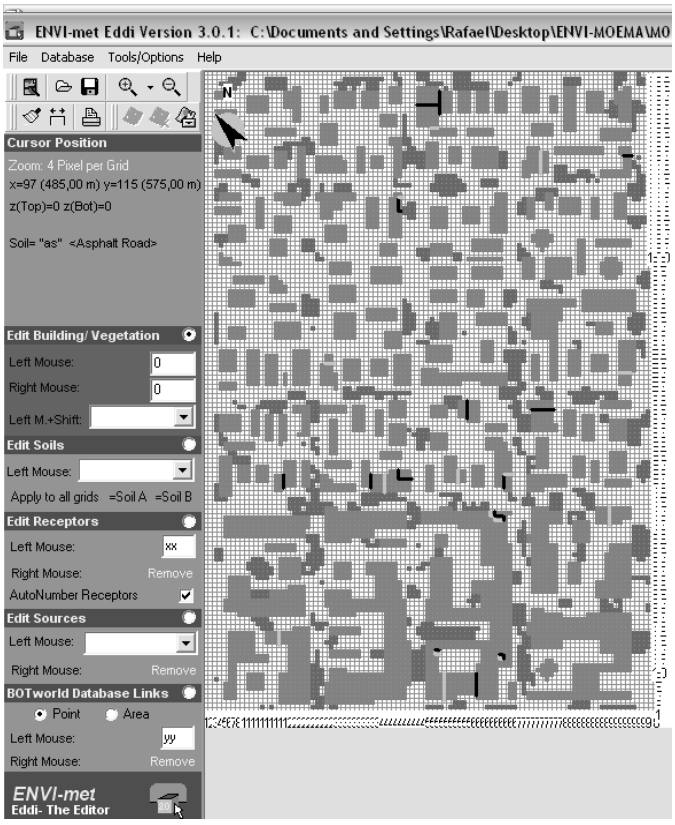


Figura 5.35: Modelo da área simulada

5.2.2.2. Parâmetros de entrada

Os parâmetros de entrada não precisaram ser alterados no decorrer da simulação, já que não eram eles a fonte dos erros. Inicialmente, os arquivos de configuração foram elaborados contemplando 4 variáveis diferentes:

Variável	Opção 1	Opção 2	Opção 3
Dia	Solstício de verão	Solstício de inverno	-
Vegetação	Sem vegetação	Com vegetação	-
Vento	135° (sudeste)	180° (sul)	-
Área Simulada	Área 01	Área 02	Área 03

Tabela 5.11: Opções para variáveis de simulação

O arquivo básico de configuração é apresentado na Figura 5.36.

```
% ---- Basic Configuration File for ENVI-met  Version 3.0----------
% ---- MAIN-DATA Block -------------------------------------------------
Name for Simulation (Text):                =M01_sveg135v
Input file Model Area                    =[CONFIG]\MOEMA\M01_sveg.in
Filebase name for Output (Text):           =M01_sveg135v
Output Directory:                        =[RESULTS]\MOEMA\M01_sveg135v
Start Simulation at Day (DD.MM.YYYY):      =21.12.2005
Start Simulation at Time (HH:MM:SS):       =00:00:00
Total Simulation Time in Hours:            =48.00
Save Model State each ? min                =180
Wind Speed in 10 m ab. Ground [m/s]        =0.8
Wind Direction (0:N..90:E..180:S..270:W..)  =135
Roughness Length z0 at Reference Point     =0.1
Initial Temperature Atmosphere [K]         =297.66
Specific Humidity in 2500 m [g Water/kg air] =7.88
Relative Humidity in 2m [%]                =77.9
Database Plants                          =[input]\Plants.dat

      ( -- End of Basic Data --)
      ( -- Following: Optional data. The order of sections is free. --)
      ( -- Missing Sections will keep default data. --)
      ( Use "Add Section" in ConfigEditor to add more sections )
      ( Only use "=" in front of the final value, not in the description)
      ( This file is created for ENVI-met V3.0 or better )
[POSITION]_____________________________________Where the area is located on earth
Longitude (+:east -:west) in dec. deg:     =-46.65
Latitude (+:northern -:southern) in dec.deg: =-23.61
Longitude Time Zone Definition:            =-45.0
[SOILDATA] _____________________________________Settings for Soil
Initial Temperature Upper Layer (0-20 cm)   [K]=297
Initial Temperature Middle Layer (20-50 cm) [K]=295
Initial Temperature Deep Layer (below 50 cm)[K]=292
Relative Humidity Upper Layer (0-20 cm)      =50
Relative Humidity Middle Layer (20-50 cm)    =60
Relative Humidity Deep Layer (below 50 cm)   =60
[BUILDING]_____________________________________Building properties
Inside Temperature [K]                   = 297
Heat Transmission Walls [W/m²K]            =2.5
Heat Transmission Roofs [W/m²K]            =2.5
Albedo Walls                             =0.4
Albedo Roofs                             =0.3
[RECEPTORS] _____________________________________
Save Receptors each ? min                =60.0
```

Figura 5.36: Arquivo de configuração

Os campos em cinza seriam alterados posteriormente, para realização das simulações combinatórias citadas. Porém, a alteração no ponto de medida fez com que o modelo tivesse que ser revisado, tendo sido avaliada somente a situação com vento sudeste e com vegetação para a Área 01 no verão.

5.2.2.3. Primeiro grupo de simulações

Os resultados obtidos serão avaliados em etapas futuras e comparados com as simulações em outros modelos. Observaram-se variações de temperatura inferiores a 0,5°C na área, o que inicialmente foi atribuído ao regime de ventos na região.

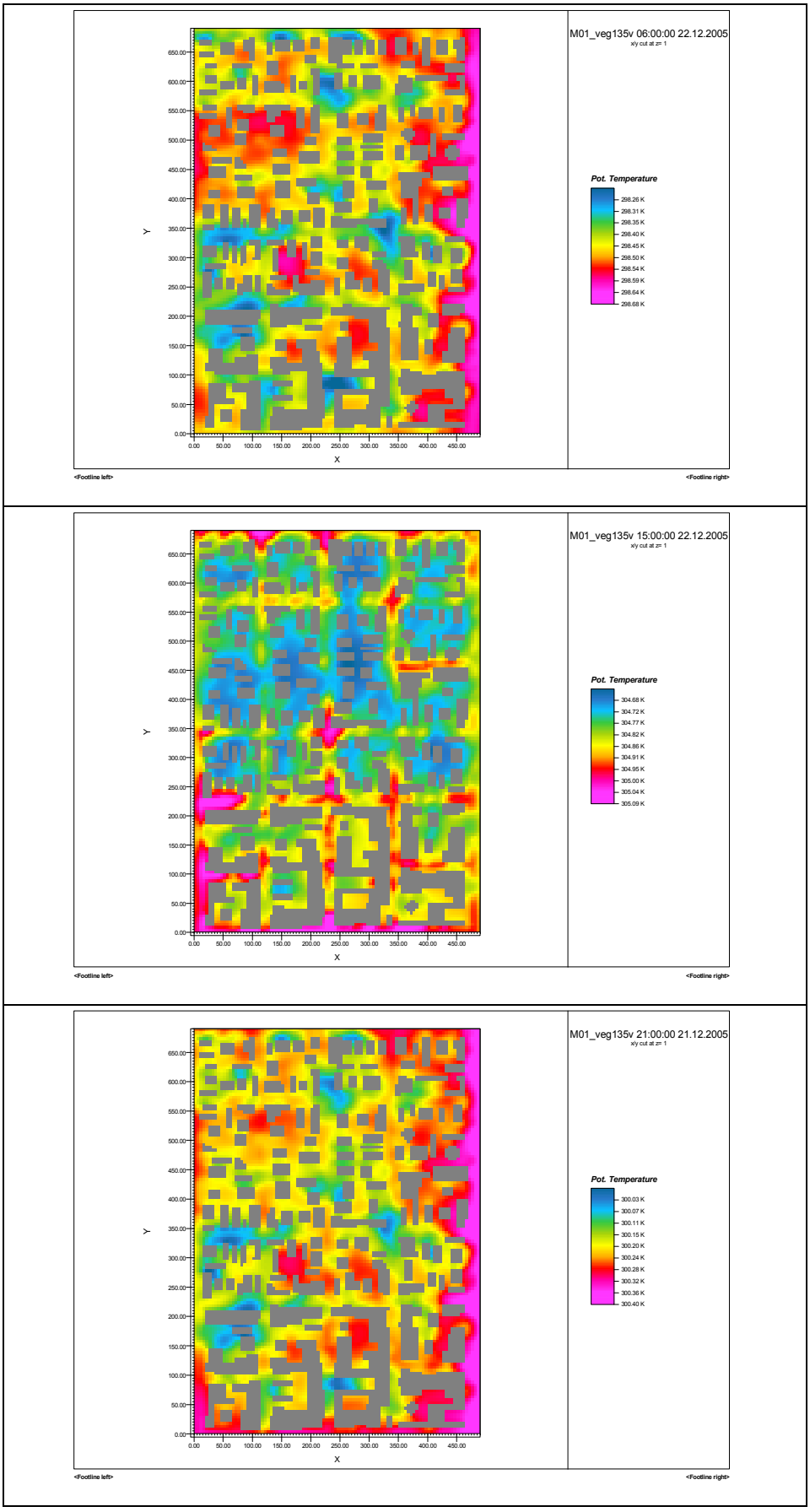


Figura 5.37: Resultados preliminares ENVI-met – Temperatura (6h, 15h e 21h)

Observa-se ainda a conservação do calor nas áreas adensadas durante a noite, embora esse acúmulo não tenha apresentado valores significativos. Supôs- se que, caso sejam reduzidas as velocidades de vento, este efeito seja pronunciado.

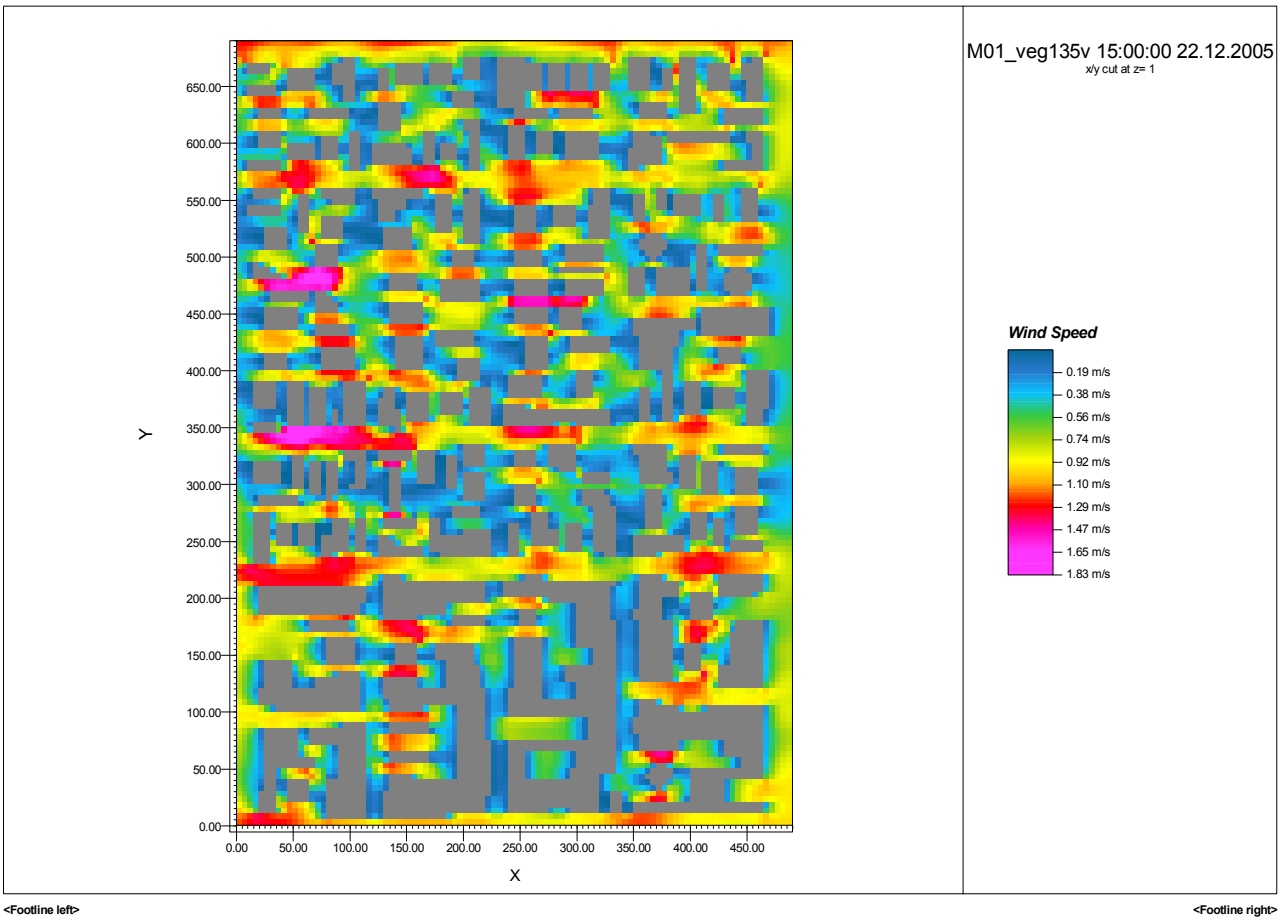


Figura 5.38: Resultados preliminares ENVI-met – Vento

Embora velocidades inferiores a 0,8m/s levem a instabilidades na simulação, deverão ser feitos testes considerando esta hipótese. Os valores de velocidade de vento indicam canalização ao longo das avenidas transversais à área com estagnação no interior das quadras. Isso foi confirmando pelas medições e pelas simulações de CFX. No entanto, a relação quantitativa entre estes estudos será objeto de etapas futuras.

A partir dos valores máximos de temperatura obtidos nas simulações, foi construída uma curva de temperatura para 24 horas, que foi comparada com o resultado das medições (Figura 4.33, pg.169). Verificou-se que, embora a máxima estivesse próxima do valor medido, a mínima utilizada na inicialização do programa estava 5°C acima do registrado nas estações meteorológicas.

A simulação mostrada foi rodada em um computador Pentium 4, 1.6 GHz com 1GB de RAM em duas semanas, o que limita a possibilidade de utilização do programa para estudar variações rápidas nos parâmetros.

5.2.2.4. Segundo grupo de simulações

Para verificar o problema da mínima e comparar adequadamente os resultados do ENVI-met com os dados da medição, as simulações foram refeitas, deslocando-se o ponto da medida para a área central do modelo. A arborização foi diretamente extraída do aplicativo Google Earth (GOOGLE, 2006).

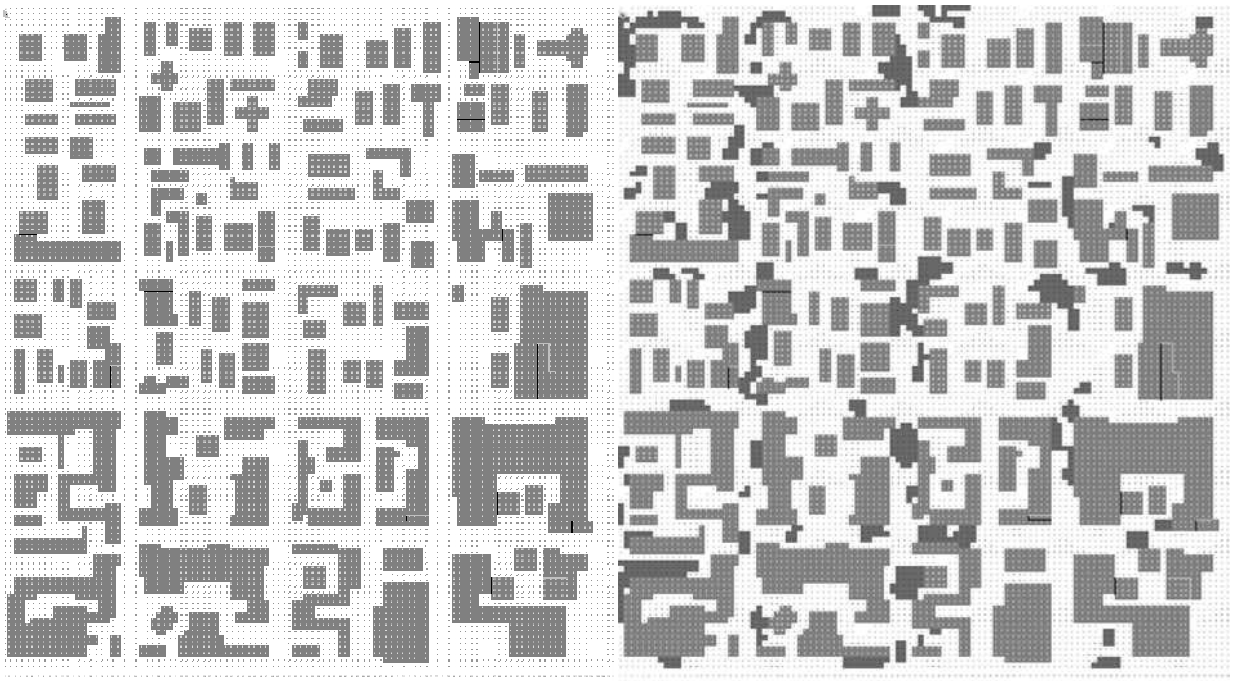


Figura 5.39: Revisão do modelo da área simulada

Apenas a área edificada e com vegetação, respectivamente

A maioria dos parâmetros de simulação foi mantida, exceto pelas condições de inicialização que foram tiradas dos dados medidos no dia pelas estações de Congonhas e do Campo de Marte. Assim, a temperatura inicial foi de 292 K, a umidade absoluta de 4,18 g/kg de ar seco e a umidade relativa de 88%.

O vento foi mantido em 0,8 m/s, embora a estação de congonhas tenha registrado valores maiores no decorrer do dia. Buscava-se, com isso, reproduzir a pior situação de acumulação de calor, acreditando-se que o programa superestimaria a temperatura no horário de máxima.

Os resultados (Figura 5.40) indicam uma tendência aquecimento mais lento nas áreas mais adensadas. As diferenças mais acentuadas ocorrem durante o período de aquecimento, entre 9h e 12h, o que leva a crer que este comportamento se deve à menor incidência de radiação solar direta durante o dia em áreas com alto fator de obstrução do céu.

É possível também que os *nesting grids*, aos quais são atribuídos apenas materiais inertes, sem possibilidade de adição de edifícios ou vegetação, estejam se aquecendo excessivamente e este calor seja transportado para dentro do modelo por advecção. Com isso, os canais de ventilação se tornaram os pontos mais quentes do modelo. Um sinal disto é a existência de uma "ilha de frio" imediatamente após a cidade em alguns horários.

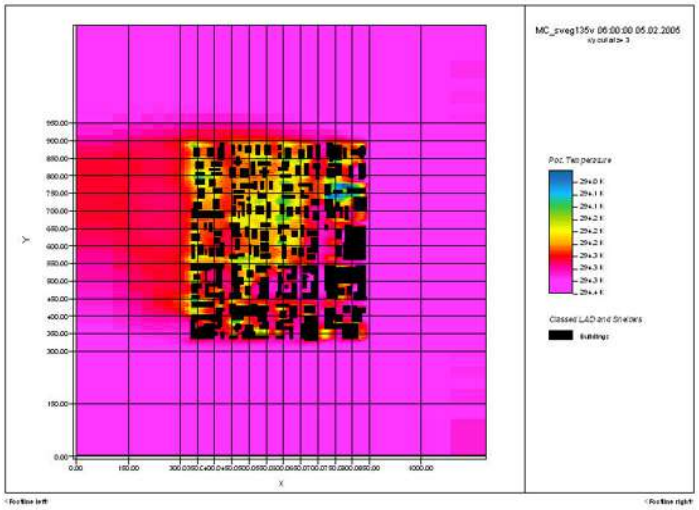
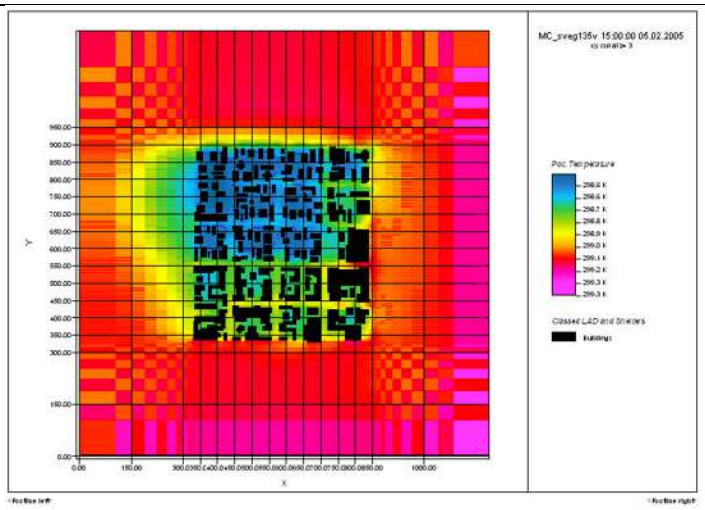
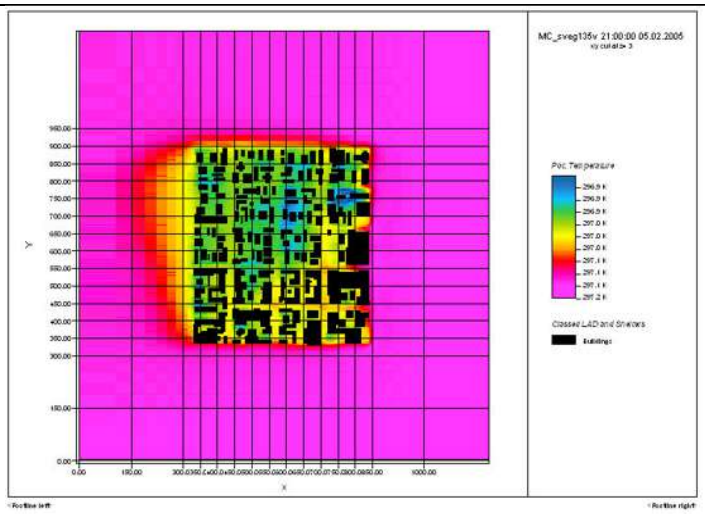
	Variação de temperatura 294,0 K a 294,4 K 20,5°C a 20,9°C
	Variação de temperatura 298,6 K a 299,3 K 25,1°C a 25,8°C
	Variação de temperatura 296,9 K a 297,2 K 23,4°C a 23,7°C

Figura 5.40: Resultados segunda rodada ENVI-met – Temperatura (6h , 15h e 21h)

Observa-se que, em alguns períodos, embora a região adensada apresente-se mais fria, ela causa um aumento de até 0,5°C a temperatura a barlavento. Outro fato que chama a atenção é que no período da noite, quando era esperada uma reversão da tendência, com a área adensada retendo mais calor devido à ventilação reduzida e à perda para fundo de céu limitada pela obstrução das edificações.

Entretanto, não foi o que ocorreu. Os resultados entre 18h e 24h indicam que a área verticalizada se manteve relativamente mais fria, embora as diferenças de temperatura no entanto foram reduzidas para valores abaixo de 0,5°C.

Construindo-se o gráfico horário de temperatura para os dois modelos, com e sem vegetação, tem-se a Figura 5.41.

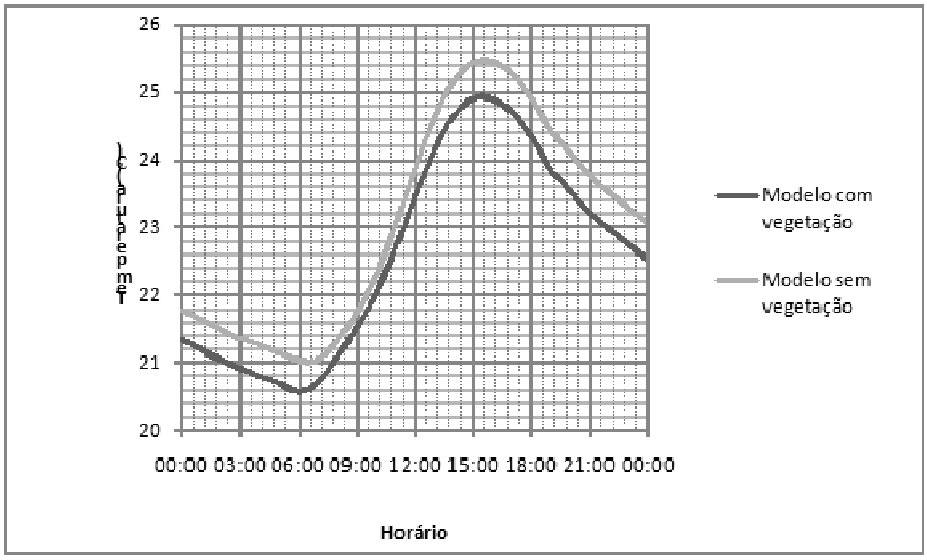


Figura 5.41: Temperatura do ar para o ponto de medição (modelos com e sem vegetação)

Verificou-se o mesmo achatamento na curva de temperaturas que havia sido observado nas primeiras simulações, embora desta vez a máxima simulada fique mais de 5°C abaixo da medida, devido à redução da temperatura de inicialização do modelo.

O resultado pode se dever às trocas com as edificações. Como a temperatura dos prédios é considerada constante e o valor utilizado para a transmitância dos materiais, baseado em valores médios da construção civil brasileira, é muito alta, o modelo tente a se aproximar da temperatura interior dos edifícios nas áreas mais densas. Esta hipótese, contudo, não explica por que as áreas mais densas demoram mais para se aquecer quando a temperatura externa está abaixo da interna.

Consultado sobre os problemas encontrados no uso do programa, o Prof. Bruse (BRUSE, 2008) apresentou os seguintes argumentos:

- Quanto à redução da amplitude térmica, foi afirmado que a amplitude térmica é função de fatores que não estão na escala climática local, sendo comum a programas que lidam com o microclima subestimarem esta variável. Isso, no entanto, não prejudicaria a avaliação comparativa entre duas situações distintas de ocupação;
- Quanto à interferência dos *nesting grids*, foi sugerido alterar os materiais, atribuindo solos argilosos aos terrenos adjacentes. A combinação de asfalto e cimento tende a superaquecer e camuflar os resultados internos da área. Outras possibilidades de redução do erro seriam reduzir a radiação nos *nesting grids* e utilizar condições cíclicas de contorno. Estas condições

estavam desabilitadas por um *bug* no programa que foi corrigido na versão atual;

- Quanto à limitação nas possibilidades das condições de contorno, espera-se oferecer mais flexibilidade na versão futura do Envi-met, que se encontra em fase de desenvolvimento. Nesta versão, seria possível inserir a curva diária para qualquer variável climática nas superfícies de contorno;
- Quanto à capacidade de processamento em paralelo, a estrutura de programação atual não permite este procedimento de maneira eficiente. Caso fosse implementado hoje, ele levaria a um aumento no tempo de processamento devido à necessidade de troca de grande quantidade de informação entre os computadores utilizados. Já a retomada da simulação a partir de simulações interrompidas foi considerada viável, mas demandaria a geração de arquivos intermediários contendo um maior número de informações do que aqueles produzidos atualmente como dados de saída do programa;
- Quanto aos problemas de independência da malha, o Prof. Bruse suspeita de algum erro na preparação dos arquivos de configuração, já que o teste foi realizado previamente com bons resultados. Uma possibilidade para o erro foi a utilização de um número demasiadamente pequeno de células entre os edifícios. Segundo o professor, o número mínimo recomendado de células entre dois edifícios são 6, de modo que se desconsiderassem os resultados das duas primeiras células. Desta maneira, evita-se tomar resultados que são fortemente influenciados pelas funções de extrapolação da superfície. Isto reduz bastante a dimensão máxima das áreas simuladas, sendo uma das limitações inerentes ao programa;
- Quanto ao *grid* estruturado, foi dito que ele será mantido nas versões futuras devido à estrutura de processamento do *software*. Um dos principais problemas gerados pela malha estruturada é a impossibilidade de se detalhar as células próximas às superfícies verticais. Isso implicaria dividir toda a linha e a coluna de células adjacentes àquela superfície, o que acabaria por gerar um refinamento total da malha, principalmente em ocupações irregulares.
- Quanto ao armazenamento de calor por parte dos prédios, concordou-se que a configuração atual reproduz bem a condição das cidades européias, com edificações termicamente isoladas e condicionadas artificialmente. Para a nova versão, será estudado um modelo que leve em conta a possibilidade de variação interna da temperatura dos edifícios.

Inicialmente, os modelos de Envi-met seriam refeitos e ressimulados a partir das recomendações acima. Com a tentativa de se desenvolver um modelo de simulação fluidodinâmcia baseado no CFX, no entanto, os estudos com o Envi-met acabaram sendo abandonados, tendo sido apresentados como discussão de possibilidades.

5.2.3. *CFX: Simulação aerodinâmica*

5.2.3.1. Modelagem da área

A modelagem da área foi feita diretamente a partir da base cartográfica, atribuindo-se as alturas levantadas aos blocos até então horizontais. Foram construídos dois domínios retangulares, orientados para as direções de vento a serem simuladas. As simulações para se verificar a independência da malha não puderam ser realizadas devido à insuficiência da capacidade computacional.

Foram programadas simulações alterando-se a direção do vento, a área simulada e a dimensão da malha. Os estudos ainda estão em andamento, bem como a análise dos resultados das simulações já realizadas.

Tabela 5.12: Opções para variáveis de simulação

Variável	Opção 1	Opção 2
Direção do vento	135° (sudeste)	180° (sul)
Células nas lacunas do modelo	2	4
Malha - menor elemento	2 m	4 m
Malha - maior elemento	32 m	64 m

A Figura 5.42 apresenta o modelo da Área 01 com os parâmetros para a geração de malha com vento sudeste (135°). Embora esta conte com um grande número de elementos, a sua qualidade foi considerada boa pelos parâmetros indicados pelo programa.

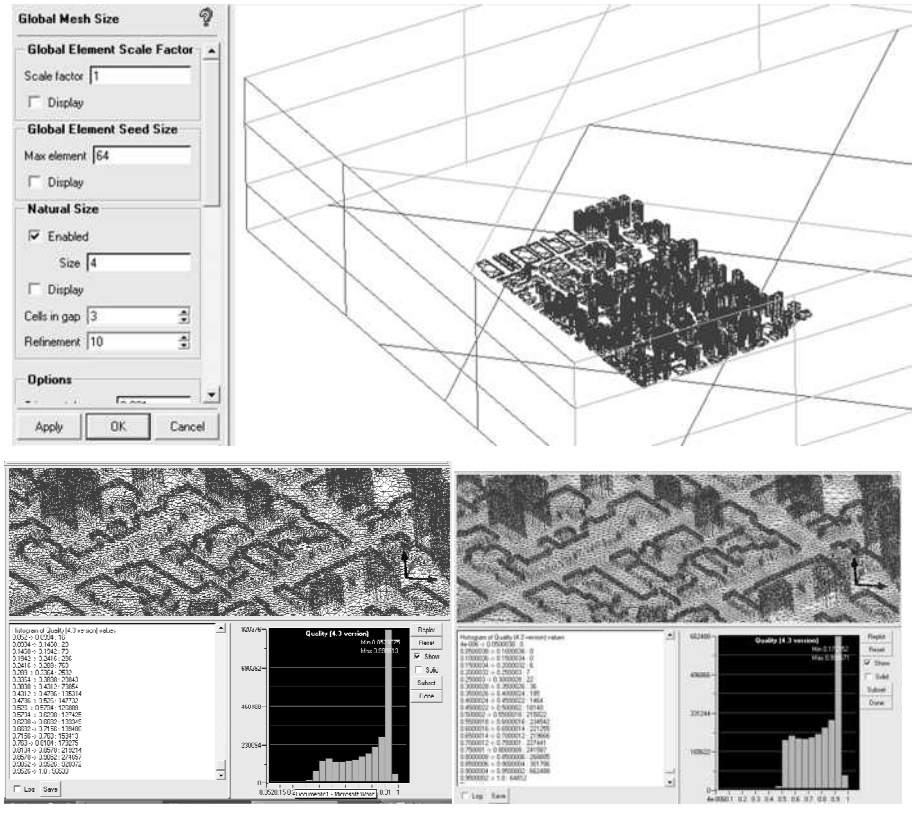


Figura 5.42: Modelo para geração da malha

5.2.3.2. Primeiro grupo de simulações

O resultado é apresentado somente para a simulação sudeste, já que a mudança no ponto de medida levou a uma alteração do modelo.A simulação apresentou resultado de convergência satisfatório, sendo que todas as equações de momento e a de massa estabilizaram com RMS inferior a 1 x 10^{-4}.

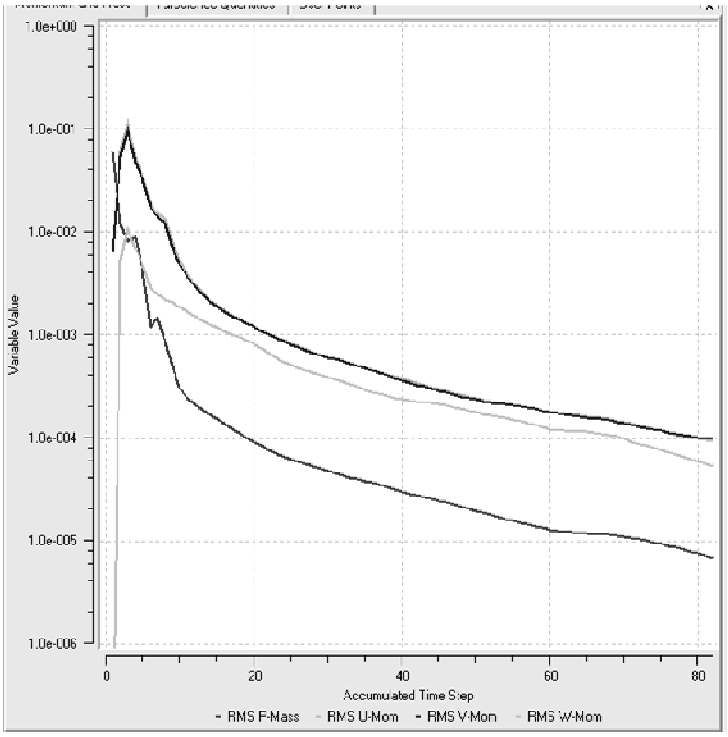
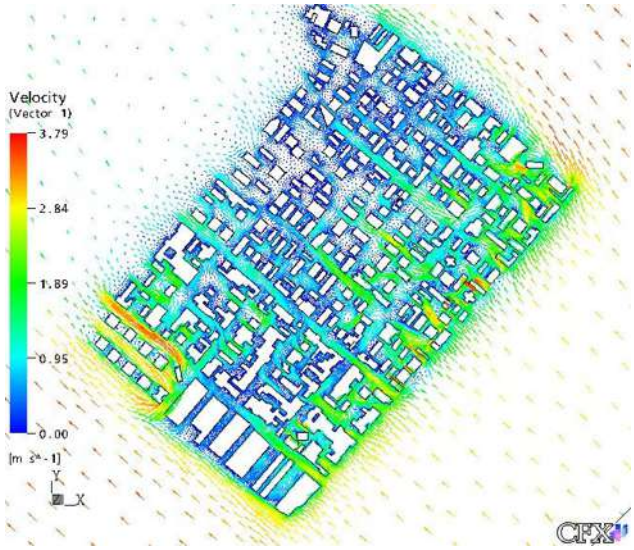


Figura 5.43: Convergência da simulação para a Área 01

Os resultados indicados são semelhantes aos obtidos no ENVI-met, confirmando as medidas e indicando uma canalização do ar nas ruas transversais e uma estagnação no interior das quadras mais adensadas. Alguns edifícios isolados apresentaram aceleração nos cantos. O fluxo se torna extremamente turbulento. Observa-se que a área de medidas ainda está sob influência da borda do modelo, sendo necessário adicionar ao menos mais uma fileira de quadras em simulações futuras.



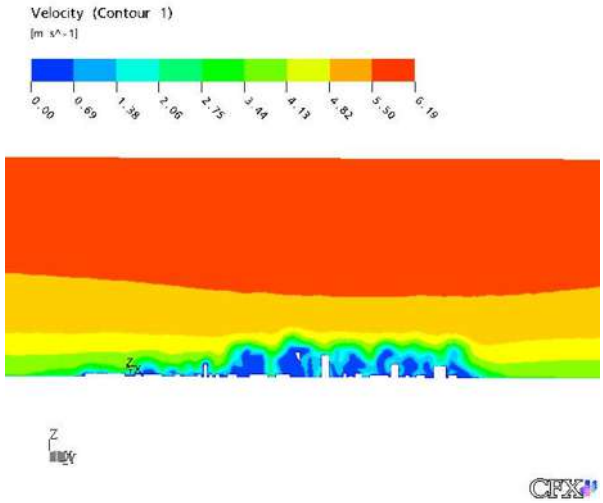


Figura 5.44: Resultados CFX – Planta e corte na rua Canário

5.2.3.3. Segundo grupo de simulações

A partir do novo levantamento foi modelada a área-piloto, gerando-se a malha a partir de dois parâmetros de tamanho mínimo: 2 m e 4m. Observa-se pouca alteração nas condições da malha e no número de elementos. Como observado no item 3.3.2.3, o refinamento da malha é determinado pelo número de células nas lacunas e não pelo menor tamanho da célula.

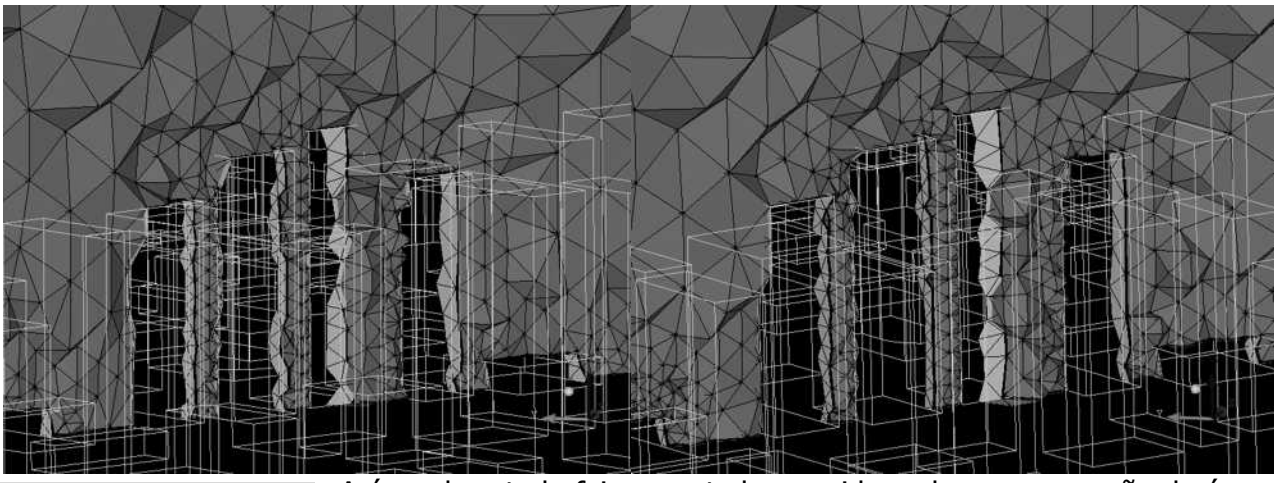


Figura 5.45: Vista da nova malha, respectivamente com elemento mínimo de 4m e de 2m

A área de estudo foi aumentada, considerando-se a expansão da área piloto. Deste modo, a fileira de quadras as duas últimas fileiras de quadra a noroeste foram eliminadas e oito novas fileiras foram inseridas a sudeste, estendendo a simulação até a região do shopping Ibirapuera. Os parâmetros de entrada e saída foram os mesmo utilizados anteriormente.

A convergência nas simulações é apresentada na Figura 5.46.

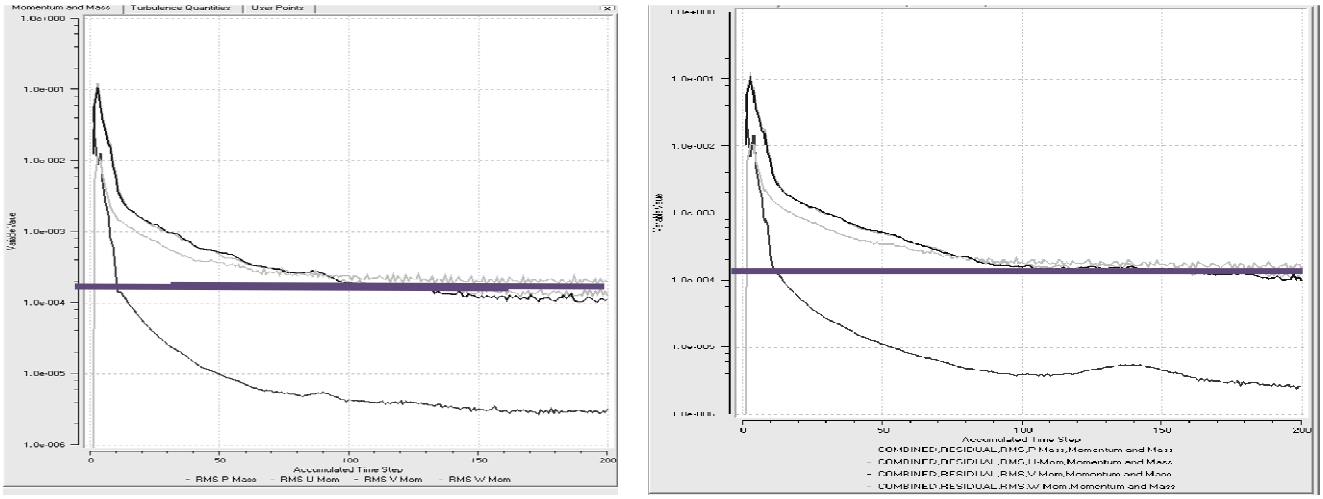


Figura 5.46: Convergência para simulações com malhas de 4m e de 2m, respectivamente

Embora seja difícil verificar visualmente o impacto da escolha pela malha de 2m, a convergência melhorou no segundo caso. O resultado, porém, é pouco alterado (Figura 5.47).

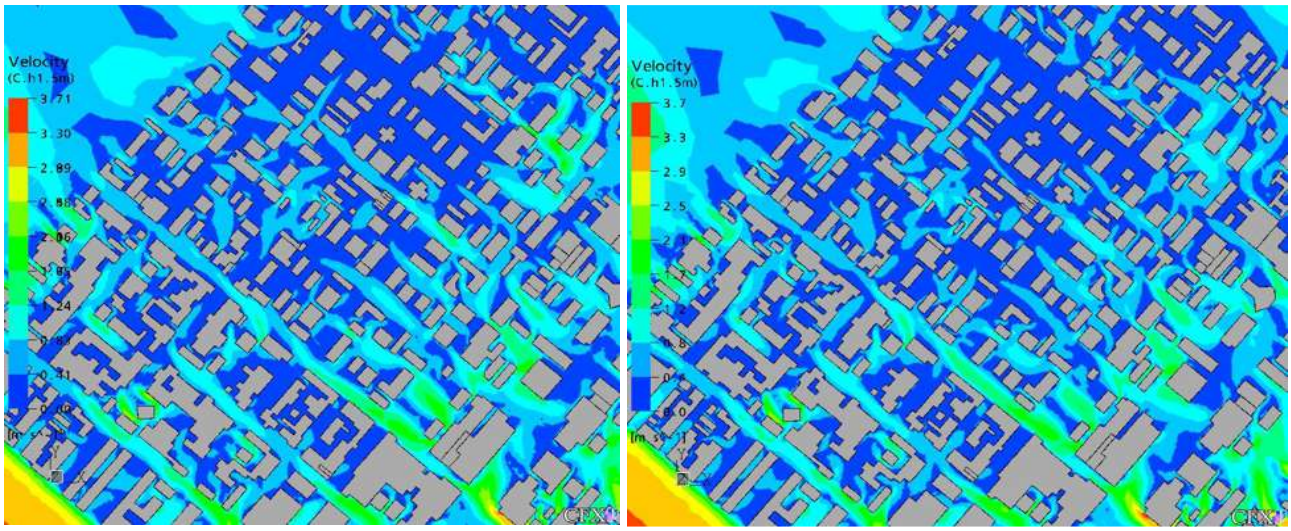


Figura 5.47: Comparação de resultados de simulações com malhas de 4m e de 2m, respectivamente

Observando-se o modelo do topo (Figura 5.48), é possível identificar uma área de aceleração do vento imediatamente em frente à área de estudo. Isto se deve à diferença entre a rugosidade do piso do modelo em relação àquela especificada na fronteira de entrada. Deve-se estudar no futuro maneiras de contornar este efeito. Após a área urbana, é possível observar a formação do mesmo efeito esteira identificado na simulação anterior, atrás do conjunto de edifícios altos, que se prolonga por mais de 1 km. O domínio não teve comprimento suficiente para absorver o impacto causado pelo conjunto urbano. Todavia, isto não parece impactar de forma significativa a simulação.

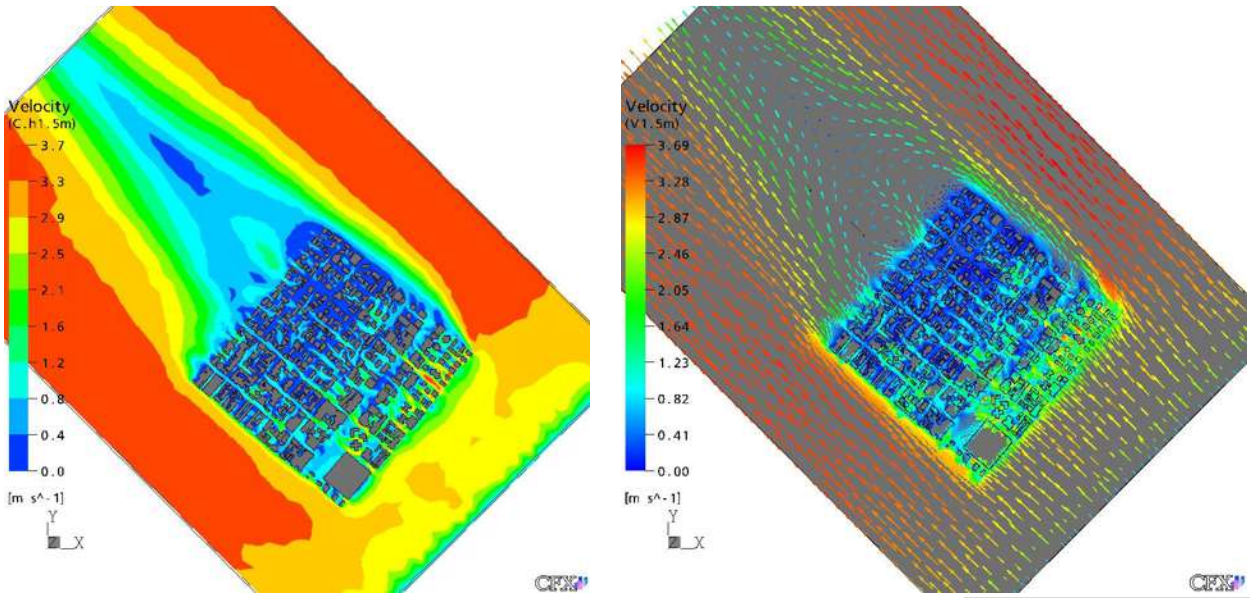


Figura 5.48: Vista de topo do modelo, com campo de velocidades indicado na forma de contornos e vetores

Para uma velocidade a 10 m de 5 m/s, a velocidade entre 0 e 10 m dentro da área urbana varia de 0,27m/s a 0,53m/s. Isso significa que a velocidade no bairro é entre 5 e 11% da velocidade na estação meteorológica de Congonhas quando o vento é sudeste.

O Dr. Eng. Marques da Silva observou que a aceleração do vento nas laterais da simulação indica um efeito de blocagem da estrutura urbana, embora suas dimensões respeitassem os pressupostos apresentados no anteriormente. As dimensões haviam sido tomadas

com base na edificação mais alta, mas segundo a equipe do LNEC, os edifícios não estavam se comportando como prédios isolados, mas sim como uma única estrutura. Isso causava uma aceleração do vento nas laterais da área e a ocorrência de coeficientes de pressão maiores do que 1 na primeira fileira de edifícios, o que é fisicamente impossível.

Outra observação relevante durante os atendimentos foi a identificação de um grande vórtice imediatamente após a área com os edifícios mais altos. Para o Prof. Bruse (BRUSE, 2008), a existência deste vórtice deveria ser avaliada com cuidado, já que o esperado era a geração de pequenos vórtices individuais ao redor de cada edifício. Para a equipe do LNEC (SARAIVA & DA SILVA, 2008), no entanto, a existência deste vórtice é mais uma indicação de que a estrutura urbana, devido à densidade de elementos, se comportou como um único bloco, determinando a geração de vórtices maiores.

Deste modo, foi sugerido um aumento nas dimensões laterais do domínio, de modo que ela tivesse a mesma ordem de grandeza da área urbana simulada. Observando os perfis verticais obtidos, verificou-se que a altura do domínio poderia ser reduzida em 20% sem prejuízo para os resultados finais. Com isso, compensou-se um pouco o aumento do número de elementos causado pela expansão lateral do domínio. Nas simulações térmicas, espera-se evitar o efeito de blocagem com a utilização de um domínio octogonal, onde as direções laterais são da mesma ordem de grandeza que a dimensão a sotavento. Os perfis verticais de vento podem ser vistos na Figura 5.49 e na Figura 5.50.

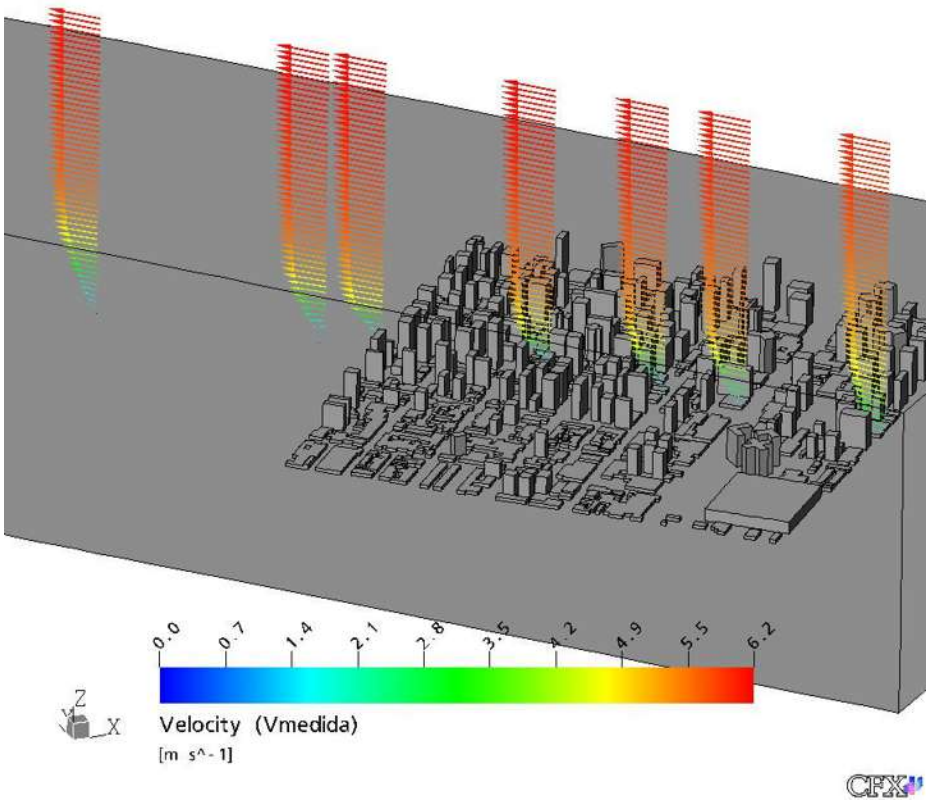
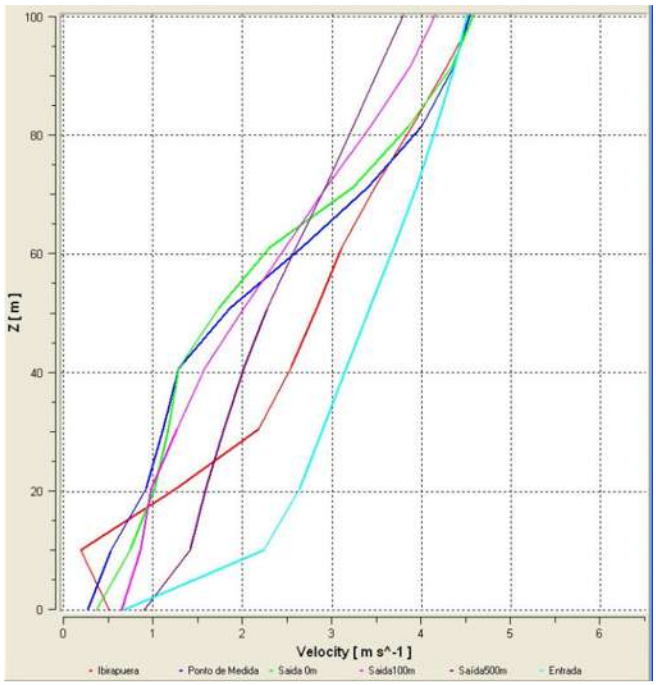


Figura 5.49: Perfis de velocidade ao longo do modelo em perspectiva



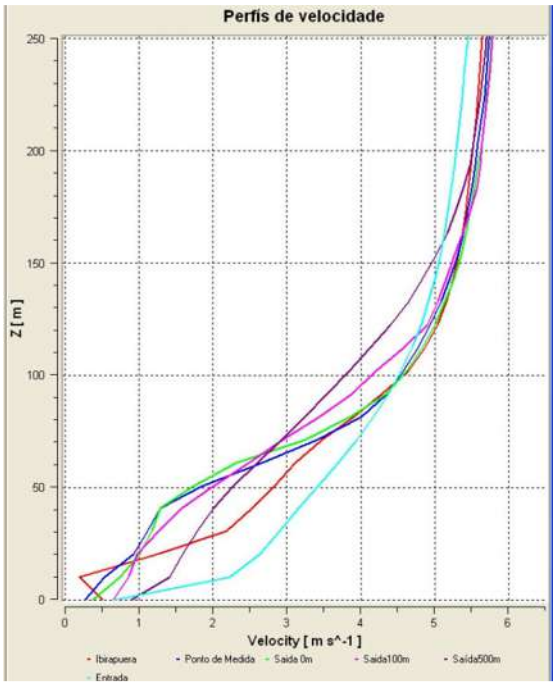


Figura 5.50: Gráficos dos perfis de velocidade ao longo do modelo

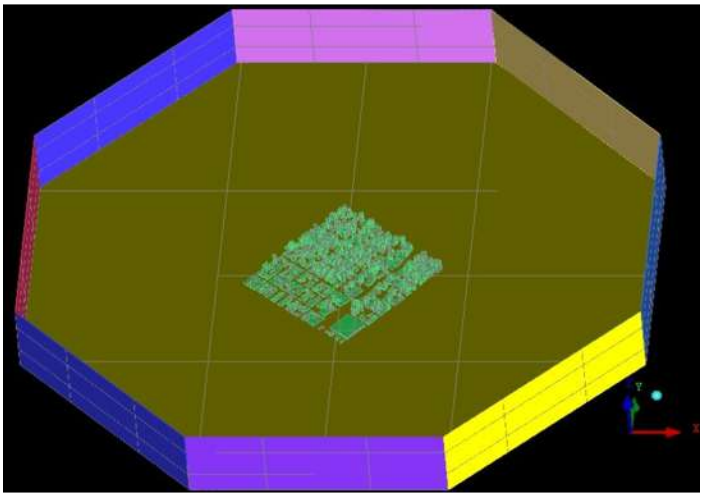
Para a área urbana, os perfis de velocidade se unificam por volta de 75m, podendo ser esta definida como o limite da camada de coberturas, a partir da qual o tecido urbano começa a funcionar como uma rugosidade e não mais como elementos separados. A camada limite urbana apresenta altura próxima dos 200m, momento a partir do qual os perfis se unificam e se tornam homogêneos, podendo definir a camada limite urbana para condições de estabilidade atmosféricas neutras. Os perfis de velocidade dos pontos urbanos (Ponto de Medida, Al. Gaivota, Al. dos Arapanés e Av. Ibirapuera) se cruzam por volta dos 2m de altura, definindo uma altura adequada para medida de condições médias.

5.2.3.4. Simulação com modelo octogonal

Apesar de respeitadas as dimensões recomendadas para o domínio, verificou-se, como afirmado anteriormente, a ocorrência de efeito de blocagem na simulação de ventilação. Como o modelo de clima urbano deveria permitir a variação na direção de incidência do vento, optou-se por um construir um modelo com domínio octogonal. Foram respeitadas as medidas recomendadas para elaboração do domínio, a distância mínima a sotavento deve ser 15 vezes a altura do maior elemento, sendo da ordem de 1350 m. Com isso, a área de seção do modelo aumentou significativamente e as lacunas laterais triplicaram de tamanho, eliminando o efeito de blocagem ocorrido nas simulações anteriores.

Embora a condição de contorno das aberturas do domínio sejam uniformes, foram determinadas 8 partes laterais, de modo que fosse possível estabelecer condições diferenciadas para as diferentes regiões. Além destas partes, foram criadas partições referentes ao piso, aos edifícios e ao topo do modelo, que se manteve como superfície sem atrito.

A malha foi estabelecida com os seguintes parâmetros: elemento máximo de 64 m, elemento mínimo de 0,5 m e número máximo de células entre as lacunas de 3.



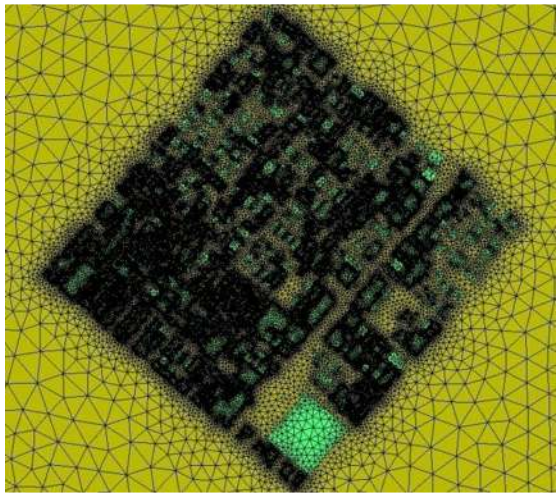


Figura 5.51: Modelo octogonal para simulação do vento

. Esta configuração resultou em uma malha com cerca de 3.500.000 elementos, já próxima do limite para o mais potente computador disponível (que conta com 4 GB de memória RAM). Alterações na rede do Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética da FAUUSP impediram a utilização de simulações em paralelo para esta etapa. As estatísticas da malha são fornecidas a seguir.

Tipos de elemento :
- NODE : 4946
- LINE_2 : 67837
- TETRA_4 : 4820326
- TRI_3 : 569782
- PENTA_6 : 566184
- QUAD_4 : 103
- PYRA_5 : 243

Total elements : 6029421
Total nodes : 1235734

Element parts :
- DOMAIN : 5386753
- DOM_E : 171
- DOM_N : 166
- DOM_NE : 193
- DOM_NW : 187
- DOM_PAR : 2258
- DOM_PISO : 150259
- DOM_S : 157
- DOM_SE : 192
- DOM_SW : 198
- DOM_W : 157
- EDIF : 488730

O resultado da malha para a região próxima à região da medida, para a superfície e para o volume é apresentado na Figura 5.52.

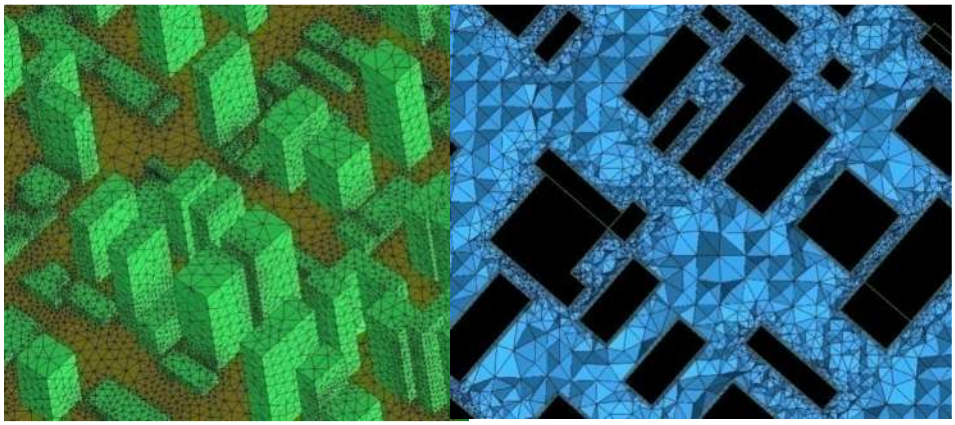
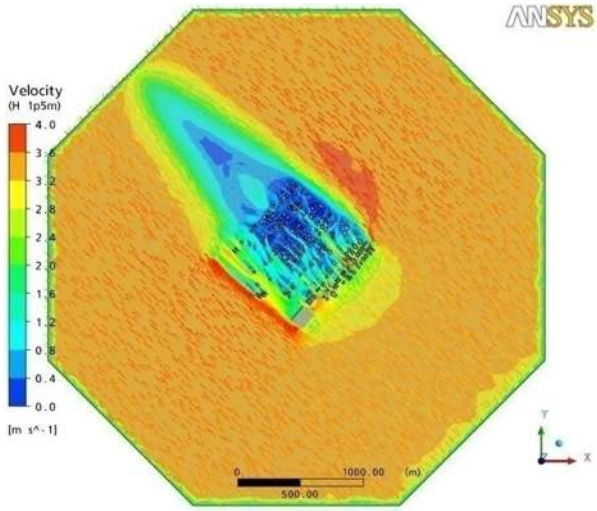


Figura 5.52: Aspecto da malha próxima ao ponto de medida

As simulações foram realizadas para as oito direções de vento principais. Inicialmente, foi avaliada a orientação sudeste.



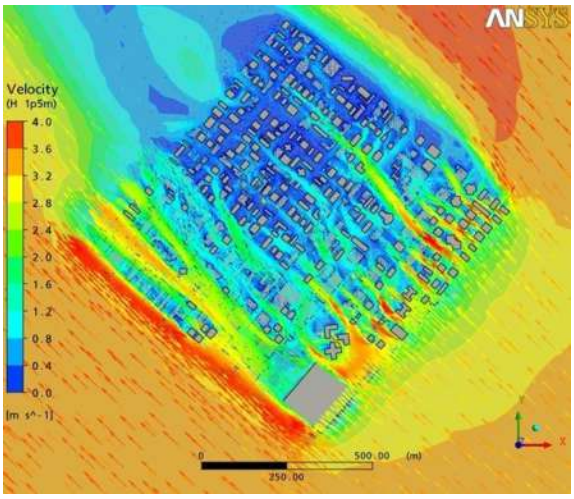
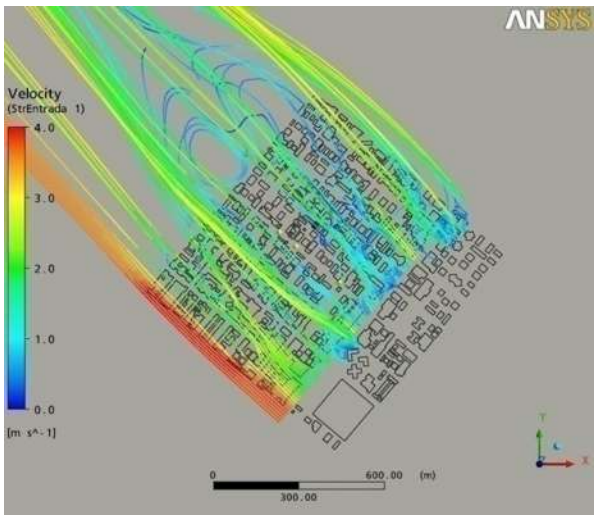


Figura 5.53: Campo de vento, vista de topo, direção SE

Observa-se que, apesar da ocorrência de um efeito de canto, não há mais afunilamento do vento a nordeste e sudoeste da área simulada. O efeito da ocupação se estende até a borda noroeste do modelo, ou seja, o efeito da área se propaga por até 1350 m. Observa-se a canalização nas ruas paralelas ao sentido do vento e a redução das velocidades na área mais adensada. A disposição dos edifícios na primeira fileira de edifícios, a sotavento da Av. Ibirapuera, determina a distribuição do vento e em quais ruas acontecerá a canalização. A observação dos vetores permite constatar que a tendência do vento é desviar para o sentido NE quando encontra obstáculos. Isso se deve ao fato de as ruas estarem orientadas a 40° do norte e não a 45°, favorecendo este tipo de deslocamento.

Foram geradas *streamlines* iniciadas no eixo central da Av. Ibirapuera.



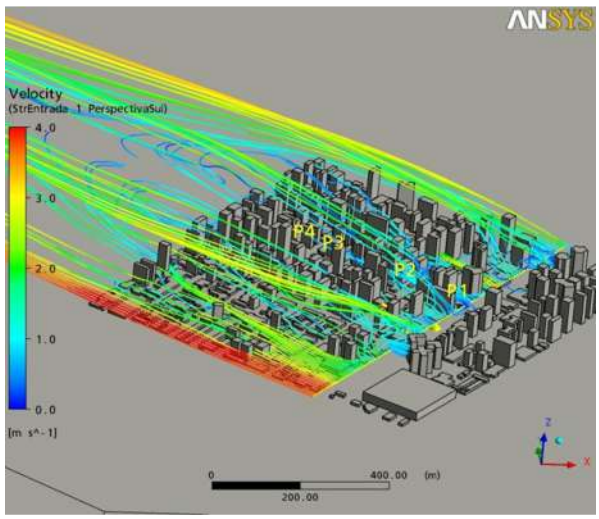


Figura 5.54: *Streamline* a partir da Av. Ibirapuera, direção SE

A partir da avaliação da Figura 5.54, é possível identificar a os vórtices gerados após o conjunto de edifícios. O vórtice tem dimensão equivalente a 4 quadras (aproximadamente 500 m). Percebe-se ainda na vista de topo que a existência de dois prédios altos nos primeiros quarteirões, a sudoeste da Av. Rouxinol (identificada pelos pontos amarelos em planta) que desviam o vento para fora da rua, fazendo com que ele canalize no meio da quadra.

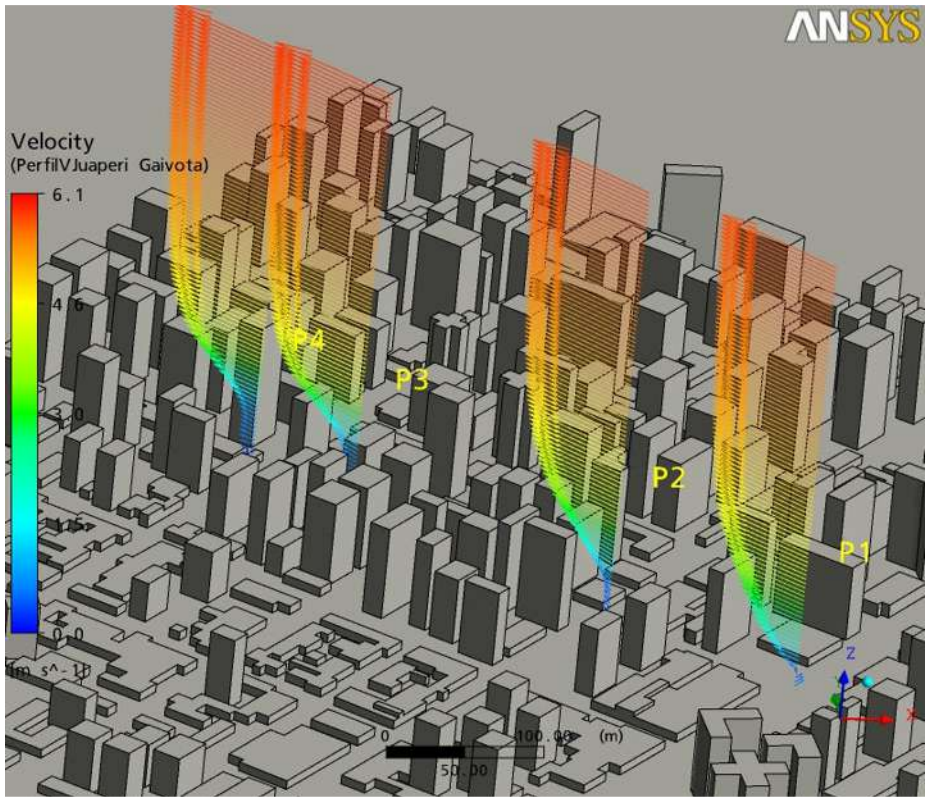


Figura 5.55: Perfis de vento em pontos selecionados, direção SE

Para a orientação sul, os resultados são apresentados na Figura 5.56.

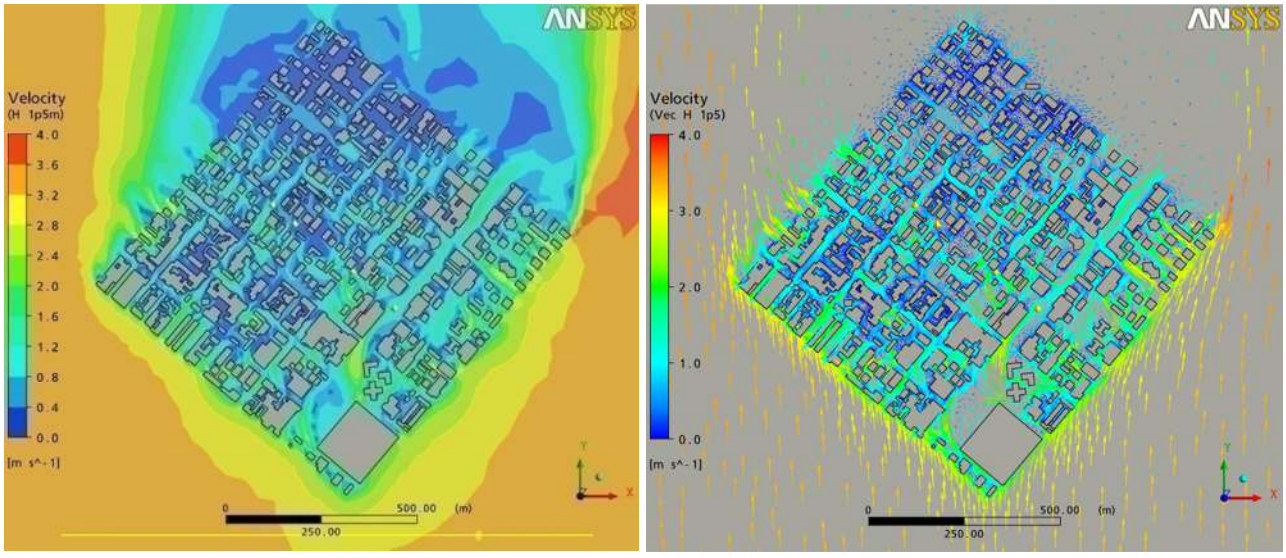
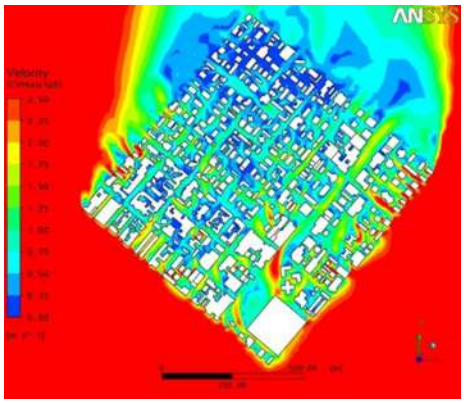


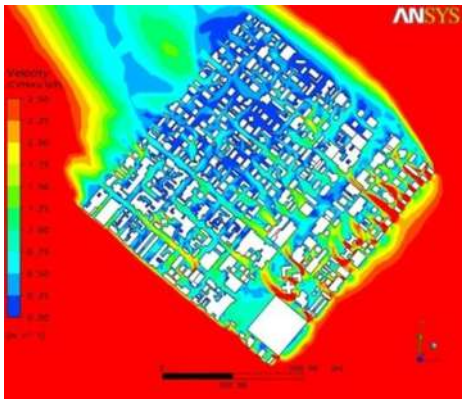
Figura 5.56: Campo de vento, vista de topo, direção Sul

É observado um efeito de canalização no sentido nordeste. As ruas paralelas à Av. Rouxinol tendem a apresentar velocidades menores. Novamente, a tendência é que a área norte do modelo apresente velocidades menores, mas a distribuição apresenta-se mais homogênea em relação àquela obtida com o vento de sudeste.

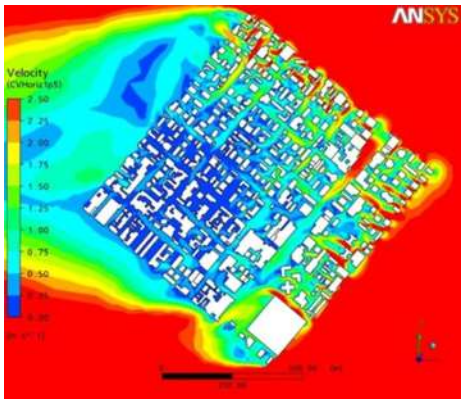
Foram avaliadas também outras seis orientações. As simulações para SE e S são reapresentadas com outra escala de velocidades, para efeito de comparação.



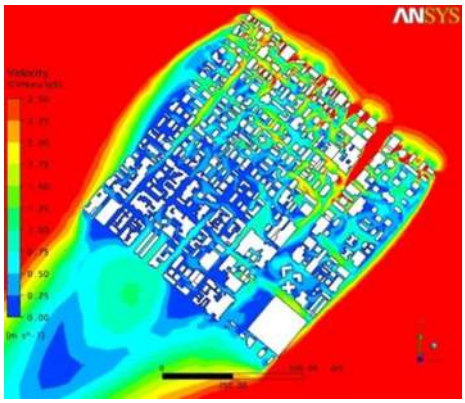
Direção Sul



Direção Sudeste

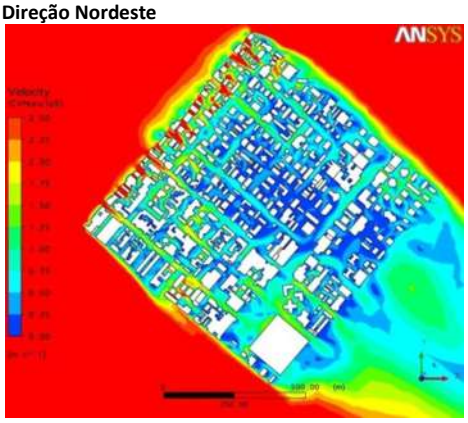


Direção Leste

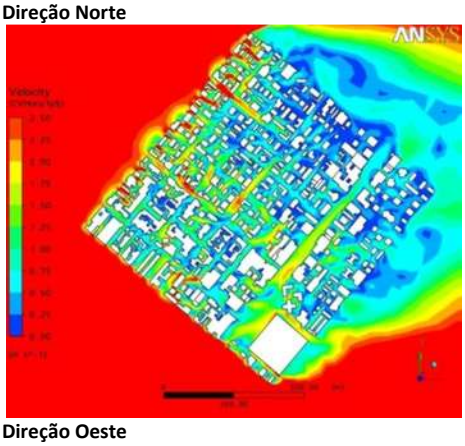


Direção Nordeste

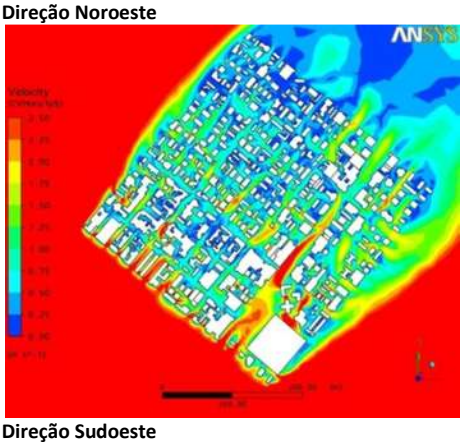
Direção Norte



Direção Noroeste



Direção Oeste



Direção Sudoeste

Figura 5.57: Velocidades do vento para as 8 direções cardinais

De maneira geral, observa-se que os campos de velocidade mais homogêneos são obtidos para as incidências cardeais. A exceção é dada pelo vento proveniente leste, que configura uma região de 4 x 4 quadras com baixas velocidades no setor oeste do modelo. As

simulações que apresentaram menor proporção de áreas estagnadas foram aquelas com incidência de vento pelo quadrante sul, onde as edificações são mais baixas.

Os resultados foram extraídos na forma de planilhas, que puderem ser comparadas com os parâmetros de ocupação das quadras. As planilhas apresentam as coordenadas de cada elemento da malha, sua área e a velocidade média. Os valores do perfil de velocidades foram utilizados na validação dos resultados com simulações de túnel de vento.

5.2.3.5. Comparação com resultados de túnel de vento

A pesquisadora Dra. Alessandra Rodrigues Prata Shimomura (Pós-doutoramento FAPESP N° 2006/03821) realizou s ensaios em túnel de vento para a mesma área. O ensaio foi realizado no túnel de vento do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e as medidas foram tomadas com anemômetros de fio quente.

Figura 5.58: Túnel de vento do IPT e modelo utilizado

Fotos: Alessandr aPrata Shimomura

Os resultados foram comparados com os perfis apresentados, permitindo mais uma validação para a modelagem realizada.

Figura 5.59: Aspecto da malha próxima ao ponto de medida

Fonte: mapa à esquerda elaborado por Alessandr aPrata Shimomura

Foram avaliados comparados os quatro pontos de medida localizados na Rua Rouxinol, nos cruzamentos com a Ibirapuera (P1), Arapanés (P2) e Canário (P4) e no ponto central do quarteirão entre as ruas

Juaperi e Gaivota (P3), ponto onde foi realizada a medida de campo. Observa-se que para o modelo simulado no túnel de vento não foi construída a região a sudeste da Av. Ibirapuera. O ponto 1 encontra-se exposto a vento desobstruído, ao contrário do que ocorre na simulação de CFD.

Para possibilitar a comparação, os gráficos não são feitos em função da velocidade, mas da razão entre a velocidade na altura **z** e a velocidade máxima no ponto.

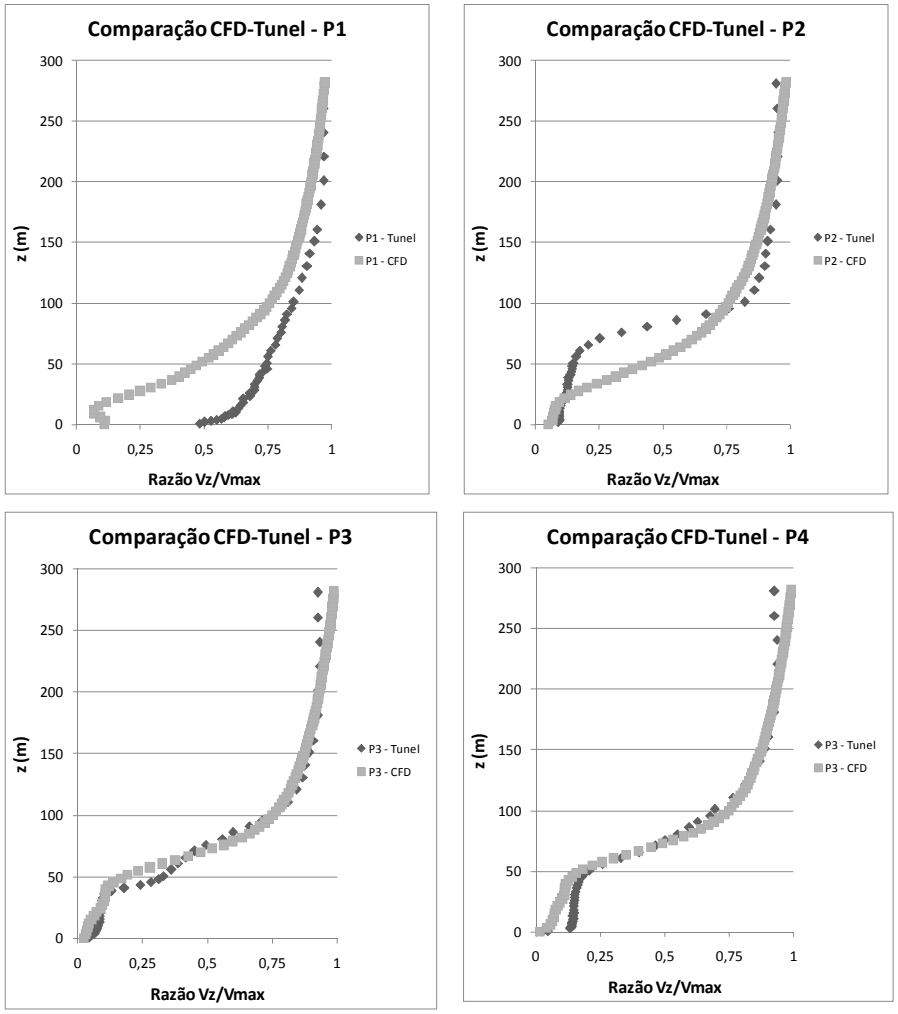


Figura 5.60: Comparação dos perfis obtidos no modelo de CFD e em túnel de vento para orientação SE

Fonte: elaborado sobre resultados da simulação e dados fornecidos por Alessandra Prata Shimomura

Conforme esperado, não houve correspondência no ponto 1, já que os modelos apresentavam condições diferenciadas. Surpreendeu, no entanto, o fato de, no ponto 2, o modelo do túnel apresentar o corte do perfil a 50m, enquanto o modelo de CFD, apresentava a quebra do perfil a cerca de 20 m.

Os pontos 3 e 4 apresentaram boa concordância de perfis. A concordância é melhor acima dos 50 m, mas no ponto 3 a sobreposição foi razoável mesmo dentro da camada de rugosidade. Neste caso, é esperada uma maior dificuldade na sobreposição, já que pequenas variações no modelo e no posicionamento dos pontos de tomada de velocidades podem causar grandes variações no resultado.

5.2.4. *CFX – Simulação térmica*

5.2.4.1. Modelo

O modelo de clima urbano foi desenvolvido durante o estágio no BDSP Partnership, utilizando o programa CFX, versão 11.0. A principal vantagem deste programa sobre o Envi-met é um maior controle das condições de contorno e, conseqüentemente, dos fenômenos envolvidos. Não foi encontrada na literatura nenhuma referência ao uso de programas de dinâmica dos fluidos genéricos para simulações climáticas, principalmente com foco na UCL. Embora a colaboração do BDSP Partership tenha sido fundamental para o desenvolvimento do modelo, através da apresentação das ferramentas e discussão dos resultados obtidos, trata-se de um desenvolvimento inovador e como tal demandou uma intensiva realização de simulações de teste e investigação das capacidades do programa.

Os testes necessários foram realizados com 3 modelos diferentes. O primeiro era um domínio octogonal circunscrito em um raio de 750m com 9 edifícios de 20 x 20 x 50 m; uma caixa de 15 x 15 x 10 m com um cubo central de 5 x 5 x 5 m; uma caixa com 10 x 5 x 5 m, sem obstáculos internos. No total, foram realizadas 158 simulações durante o estágio.

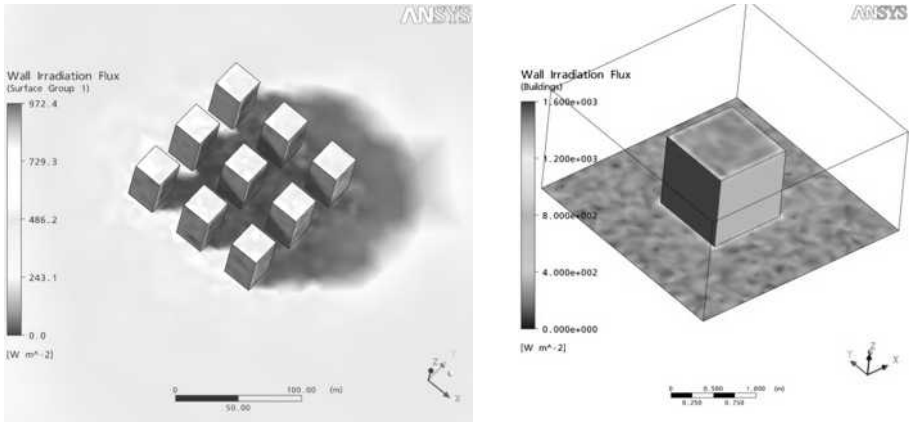


Figura 5.61: Modelos utilizados para os testes

O modelo pode ser dividido em três sub-sistemas: o estudo de radiação, a definição das condições limites para o fluido e a determinação do armazenamento de calor nas superfícies.

Para organizar melhor o grande número de expressões utilizadas, buscou-se desenvolver um sistema de nomenclatura que separasse organizasse automaticamente a informação no arquivo CCL. Deste modo, a escolha dos nomes das variáveis seguiu a seguinte lógica, baseada nas iniciais de cada variável:

- **C**: variáveis climáticas. Normalmente se trata dos dados de entrada obtidos diretamente da estação meteorológica ou de parâmetros calculados que não se encaixam em nenhuma das demais categorias, tais como umidade e nebulosidade. Exemplos: CTpo (calcula a temperatura de ponto de orvalho);
- **G**: parâmetros relativos às propriedades do solo (*ground*) e ao cálculo do armazenamento de calor no mesmo. Exemplos:

GpT00 (calcula a temperatura superficial do solo no timestep anterior), GHF (calcula o fluxo de calor do solo);

- **L**: parâmetros relativos à localização geográfica da área. Exemplos: Latrad (calcula a latitude em radianos), Lnorthrad (corrige a posição do norte em relação ao plano cartesiano do cfx, também em radianos);
- **R**: variáveis relativas ao modelo de radiação. Exemplos: RLW (define a região do espectro referente à radiação de onda longa), RemiG (define a emissividade do solo);
- **S**: variáveis para o cálculo da posição do sol. Estão ligadas às variáveis de radiação, mas foram consideradas separadamente para facilitar sua localização no arquivo. Exemplos: Sdayj (calcula o dia Juliano a partir do mês e do dia informados nos parâmetros), Solzh (calcula o ângulo zenital do sol;
- **T**: variáveis relativas ao tempo. Normalmente colocadas como parâmetros;
- **U**: parâmetros relativos às unidades utilizadas, com o objetivo de tentar uniformizar as unidades de todas as variáveis. Foi incluído após problemas com unidades na simulação de teste e ainda implica alterações várias das equações do modelo. Exemplos: Umeter (= 1 [m]), Uvel (= 1 [m s^-1]);
- **V**: parâmetros relativos ao ar e ao vento na entrada do modelo. Exemplos: Vzuref (indica a altura onde a medida da velocidade de referência foi tomada), Vbu1 (calcula a componente em x da velocidade do vento);
- **W**: parâmetros relativos às propriedades dos edifícios (*walls*) e ao cálculo do armazenamento de calor nos mesmos. Exemplos: WpT00 (calcula a temperatura superficial da fachada no timestep anterior), Wediff (calcula a difusividade da parede externa da edificação) e
- **par**: referem-se a dados de entrada que devem ser informados manualmente pelo usuário. São os parâmetros a partir dos quais as demais equações são calculadas. Antes da variável propriamente dita, ainda levam a inicial do termo ao qual se referem. Exemplo: parLLat (parâmetro de localização, informa a latitude do modelo), parGdens (parâmetro do solo, informa a densidade do solo), parTmonth (parâmetro de tempo, informa o mês da simulação).

As expressões no formato CEL são apresentadas no ANEXO A5.

Nas trocas por radiação, o CFX conta com 4 opções para modelagem de radiação, sendo o modelo adotado para esta pesquisa o único que permite a utilização de fontes direcionais de radiação. O modelo de Monte Carlo simula interações a radiação e o ambiente através de um método de *ray-tracing*, acompanhando o percurso de um fóton através do sistema desde sua fonte até o momento em que seu conteúdo energético atinge um limite inferior estabelecido. Quando um fóton encontra uma superfície, ou interage com o fluido, suas características

físicas são alteradas e gravadas em uma "história" que permite estabelecer o resultado final das interações. O programa deve produzir um número suficientemente elevado de "histórias" para poder gerar estimativas precisas. O modelo permite ainda tratar a radiação como cinza (apenas um comprimento de onda) ou separá-la por bandas de freqüência, caso os materiais ou superfícies tenham respostas diferenciadas para os diferentes comprimentos de onda.

Como no caso dos estudos para a camada sob o nível das coberturas (UCL), a absorção de radiação ao longo da atmosfera é um fenômeno secundário. O modelo foca principalmente nas interações entre as superfícies. Novamente a documentação do programa recomenda o uso do modelo de Monte Carlo para esta situação. Considera-se, no entanto, que o teto e as paredes do domínio definem superfícies radiantes que podem ser calibradas para reproduzir o comportamento radiante do céu, procedimento que será discutido adiante.

Os parâmetros gerais do modelo devem ser configurados juntamente com as características do domínio. Eles são:

- ***Thermal Radiation Model***: como já mencionado, a única opção viável para o estudo de ambientes urbanos (e para a maior parte das aplicações arquitetônicas e urbanísticas) é o modelo de Monte Carlo.
- ***Radiation transfer mode***: esta opção só existe na versão 11.0 e permite definir previamente se o fluido será transparente ou não à radiação. No caso, somente as trocas entre superfícies interessam, devendo-se optar por "*Surface to Surface*".
- ***Number of histories***: têm como valor padrão 10000, mas verificou-se que este número é baixo para a maioria das aplicações. O aumento deste número tem um impacto direto no tempo necessário para calcular as trocas radiativas e o seu valor deve objetivar um equilíbrio entre a precisão necessária e o tempo disponível. A relação entre o número e o tempo é aproximadamente uma proporção direta. Deste modo, dobrar o número de histórias significa dobrar o tempo necessário para a simulação de radiação (o que não necessariamente dobra o tempo total de simulação, como será explicado mais tarde). Valores muito baixos produzem manchas com radiações mais altas ou mais baixas sem explicação física razoável. Foram testados valores entre 1.000.000 e 20.000.000, sendo que normalmente o valor de 5.000.000 oferece uma boa relação precisão *versus* tempo. No entanto, deve ser verificada a sua validade para geometrias mais complexas.

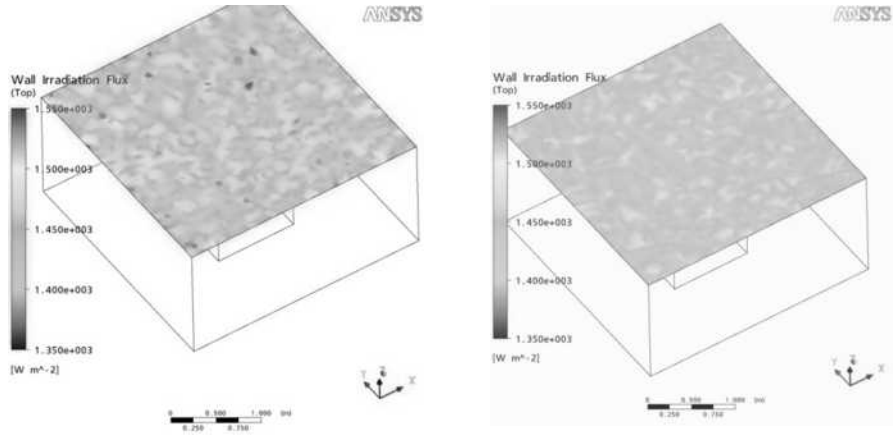


Figura 5.62: Resultado de simulação com 1.000.000 e 5.000.000 de "histories"

- ***Spectral Model***: define se a simulação será "cinza"(radiação uniformemente definida pelo espectro) ou se o espectro será definido. Para simulações urbanas, como é o caso, bastariam teoricamente duas subdivisões do espectro – onda curta e onda longa – já que as fontes de radiação (sol e céu) emitem na primeira banda e os materiais aquecidos na segunda. Normalmente, os componentes urbanos possuem propriedades de emissividade diferente para os dois comprimentos de onda, tornando necessária a separação. Após várias tentativas de se modelar o céu com radiação direta e difusa, simultaneamente, foi detectada uma limitação do programa, que não permite a colocação de duas fontes de natureza diferente em um mesmo elemento e em um mesmo comprimento de onda. Sempre que uma fonte direta e difusa eram colocadas simultaneamente, a radiação difusa era convertida em direcional e o valor de ambas somado. Deste modo, optou-se por dividir o espectro em três

No modelo espectral, as propriedades radiativas dos materiais podem ser determinadas em função do comprimento de onda, o que foi adotado neste trabalho.

Além das características do modelo no domínio, algumas características do processo de solução devem ser determinadas.

- ***Interation control***: determina o intervalo de iterações nos quais a radiação será calculada. Como os processos radiativos tendem a apresentar variações menores ao longo do tempo que os processos convectivos, os cálculos de radiação não precisam ser realizados para todas as iterações, reduzindo o tempo total de simulação. No caso, foram utilizados valores entre 5 e 10, sendo o primeiro para simulações transientes e o segundo para simulações em regime estacionário (utilizadas na maior parte dos testes).
- ***Coarsening control***: no caso de simulações com o gás como meio participante, absorvendo e espalhando a radiação, normalmente torna-se computacionalmente custoso manter uma malha com o mesmo nível de detalhe. Por isso, pode-se

usar esta função para tornar utilizar uma malha mais grosseira para o cálculo de radiação. Como o gás não é meio participante na simulação realizada, este controle não é necessário.

Para cálculo da direção da radiação, são utilizadas as expressões apresentadas no item 3.2.1. O azimute solar é convertido em ângulo trigonométrico, conforme indicado no item 4.5.2. O valor é adicionado à direção do norte, também convertida em ângulo trigonométrico. Com estes valores é possível determinar os vetores da radiação solar direta.

As emissividades devem ser função do material a ser utilizado. Para especificar separadamente as características de cada superfície, elas devem ser agrupadas por tipo de material. Na primeira aproximação, separou-se apenas o piso e as superfícies das edificações. Posteriormente, os edifícios foram agrupados segundo orientação e distância do ponto de interesse. As propriedades radiativas foram determinadas para cada banda do espectro que é ponderada pelo espectro da radiação solar.

Os valores colocados para o albedo e a emissividade do solo e dos edifícios estão baseados inicialmente no asfalto e no tijolo cerâmico respectivamente. A emissividade das superfícies que representam o céu é dada pelas equações do item 3.2.1.5 e a sua temperatura é a temperatura do ar na entrada do modelo

O modelo oferece como resultado para todas as superfícies as seguintes variáveis:

- ***Wall Irradiation Flux (WIF):*** fluxo de radiação incidente na superfície, calculado como o valor integrado pelo hemisfério visto pela superfície
- ***Wall Absorbed Radiation (WAR):*** representa a radiação absorvida pela superfície, função da radiação incidente multiplicada pela emissividade naquele comprimento de onda.
- ***Wall Radiative Flux (WRF)***: radiação liquida que deixa a superfície, função do balanço entre a radiação incidente e a radiação emitida pela superfície. Quando o valor de WRF é negativo, a superfície está absorvendo radiação e conduzindo através do material e funciona como sumidouro de calor. Quando ele é positivo, a superfície é um irradiador, fornecendo calor ao ambiente.
- ***Wall Convective Heat Flux (WCF)***: apesar de não se tratar de uma variável radiativa, é complementar a essa no processo de troca de calor, função da diferença de temperatura entre a superfície e o fluído e do coeficiente de conveccção.
- ***Wall Heat Flux (WRF)***:é o fluxo total de calor pela superfície. Para uma superfície adiabática, este valor deve ser igual a zero, significando que o fluxo radiativo e convectivo são iguais com os sinais trocados. Para outras condições, o programa calcula um fluxo por condução para dentro da superfície para que a condição superficial especificada seja atendida.

O processo de identificação das variáveis de entrada e saída do modelo de radiação foi demorado. A principal dificuldade foi identificar o aumento da radiação incidente em simulações isotérmicas, quando se considerava que o resultado líquido da troca de radiação de onda longa entre as superfícies seria nula. Esperava-se também que nessas condições a radiação que deixa a superfície seria sempre equivalente à radiação incidente multiplicada pela emissividade.

Após várias simulações em modelos simplificados foi identificado que, enquanto ele trabalha com valores líquidos para fluxo radiante da superfície, a radiação incidente considera todos os comprimentos de onda incidentes e não subtrai do valor a radiação emitida. Deste modo, há diferenças entre a radiação absorvida e o fluxo radiativo em simulações isotérmicas ou adiabáticas, já que as paredes emitem radiação de acordo com as suas temperaturas superficiais. A segunda questão que dificultou a análise das simulações prévias foi a limitação já citada de atribuição de fontes à superfície, que não permite a colocação de fontes diretas e difusas em uma mesma superfície para um mesmo comprimento de onda.

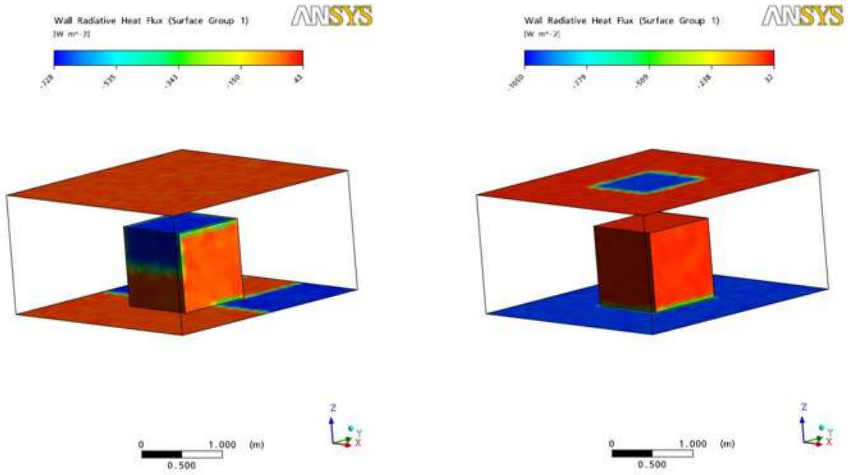


Figura 5.63: Simulação de radiação alterando-se a emissividade de uma superfície

Os parâmetros de convecção são dados principalmente para a entrada de ar no sistema. As demais variáveis são calculadas internamente pelo programa. Deste modo, foram inicialmente adotadas as mesmas bases já utilizadas, exceto pela variação do vento ao longo do tempo. O modelo, no entanto, permite a incorporação de ajustes caso eles se mostrem necessários.

Para a implementação do modelo de armazenamento de calor no CFX, foi necessário primeiro criar os grupos de variáveis relativas à temperatura do substrato, já que os sólidos não foram modelados explicitamente. O modelo utiliza a média da temperatura do instante anterior relativa àquela parte para calcular a temperatura do ponto no instante atual. Os parâmetros de condutibilidade, densidade e capacidade térmica dos materiais do solo e dos edifícios são informados, para que possam ser utilizados no modelo de diferenças finitas.

Além das informações relativas a cada fenômeno, o modelo também apresenta diretrizes para questões gerais de simulação.

É possível questionar a possibilidade de se usarem simulações estacionárias seqüenciais para cada hora, ao invés de uma única simulação transiente. Deste modo, ao invés de vários *timesteps* com dez iterações cada, ter-se-ia um único *timestep* com um número maior de iterações. Isto potencialmente faria o número de iterações cair de 18.000 (considerando-se um *timestep* de 2s) para cerca 1.000.

A principal dificuldade em se fazer isso foi a opção pela utilização da forma explícita do método de diferenças finitas. A utilização de simulações estacionárias com grandes intervalos de tempo pode levar a instabilidades numéricas no modelo e a redução do intervalo entre as simulações anularia o benefício de se utilizarem as simulações estacionárias. Outra dúvida é se as condições de estabilidade realmente reproduzem o comportamento transiente, já que no meio urbano as trocas não são estáveis no período de uma hora.

A princípio, foi feita a opção pelo regime transiente, buscando-se uma boa aproximação das condições iniciais através da realização prévia de uma simulação isotérmica para se determinar o regime de ventos no domínio e de um estudo da distribuição de temperaturas no solo através da planilha confeccionado. Com isso, espera-se reduzir o número de iterações dentro de cada *timestep*, reduzindo o tempo total de simulação para períodos equivalentes ao de uma simulação transiente.

Ainda assim, para se reduzir o tempo de simulação, utilizou-se de um artifício apontado na programação do Envi-met: o intervalo de tempo foi vinculado à altura solar. A lógica deste método é que os períodos em que o sol está mais alto no céu apresentam maior variação das condições térmicas, demandando intervalos de tempo menores do que aqueles demandados, por exemplo, durante a noite, quando as trocas ocorrem de maneira mais lenta.

Uma importante diferença deste modelo para outros como o Envi-met é a forma de entrada das condições sinóticas. O modelo permite a entrada de dados medidos em estação meteorológica através da utilização de funções de interpolação. Através desta ferramenta, os dados de radiação, vento, temperatura e umidade são informados em função do tempo (horários) e o programa interpola os valores para os períodos intermediários. Deste modo, trabalha-se com condições de contorno mais realistas, baseadas em medidas de campo, e que variam ao longo do dia.

Os arquivos de CCL criados podem ser utilizados como modelo em outras simulações, sendo importados para o pré-processador do CFX sobre malhas diferentes. Para que a compatibilidade seja aumentada, no entanto, é interessante que as *Boundary Conditions* criadas em ambos os modelos sejam as mesmas. As condições de contorno para grupos com nomes diferentes ou para novas grupos devem ser completadas manualmente. Alguns nomes de grupos de superfícies foram utilizados nas expressões e devem ser corrigidos caso os nomes sejam trocados. Por fim, o armazenamento de calor só foi programado para dois grupos: o piso e as edificações. Configurações mais

complexas exigem a criação de novas variáveis adicionais e a complementação das expressões CEL.

5.2.4.2. Aplicação

As simulações foram realizadas para o dia 04 de Fevereiro, utilizando os dados de radiação obtidos na estação da CETESB no Parque do Ibirapuera. O modelo inicial foi mesmo utilizado na simulação de vento. A malha apresentou aproximadamente 5,4 milhões de elementos. As simulações foram realizadas em um Pentium Core Duo 2,0 GHz, com 4 GB de memória RAM.

Inicialmente, foram realizados estudos somente com as variáveis de radiação, para se verificar o comportamento da parametrização proposta. Os resultados são comparados com estudos de insolação produzidos no aplicativo *Ecotect*.

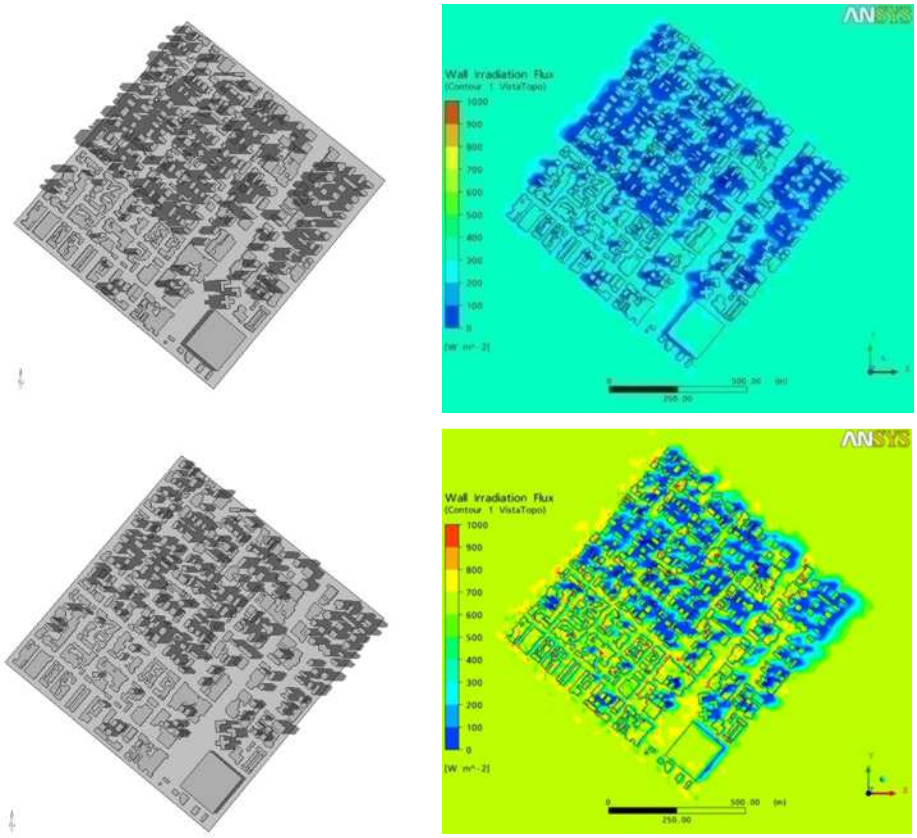


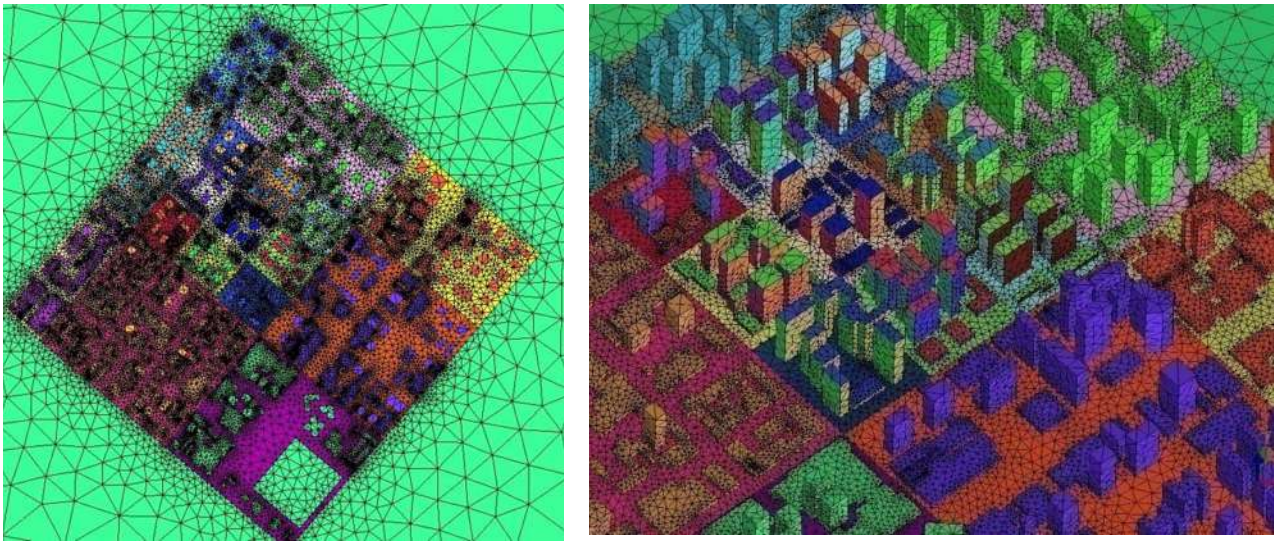
Figura 5.64: Sombreamento da área feito no Ecotect e estudo de radiação feito no CFX para as 09h e 15 h

Em termos gerais, os resultados se sobrepuseram de maneira adequada. A definição das sombras no caso do CFX depende do refinamento da malha e normalmente produz um efeito de graduação mais suave entre zonas expostas e sombreadas. A simulação das 15h também apresentou resultados adequados. Há mais manchas no desenho de contorno, que podem ser reduzidas aumentando-se o número de "histórias".

Na aplicação inicial, o modelo apresentava apenas divisão entre superfícies de piso e superfícies de edificação. Devido à grande variação observada na incidência de radiação, optou-se por fazer uma reestruturação do modelo e na divisão das partes. A quadra da medida

e as adjacentes foram detalhadas, separando-se o piso, cada orientação de fachada e o topo dos edifícios. Nas quadras mais distantes, manteve-se o agrupamento entre superfícies de edifícios e de piso, mas estas áreas também foram subdivididas em 8 grupos, conforme observado na figura. A temperatura do piso externo ao modelo é dada pela média das temperaturas de modo a simular a inserção do mesmo em uma área com características semelhantes.

Figura 5.65: Alteração na divisão de partes do modelo



Foi então realizada uma simulação em regime permanente para o período das 00h, cujo resultado deveria servir de base para a simulação transiente. O resultado para convergência é apresentado na Figura 5.66.

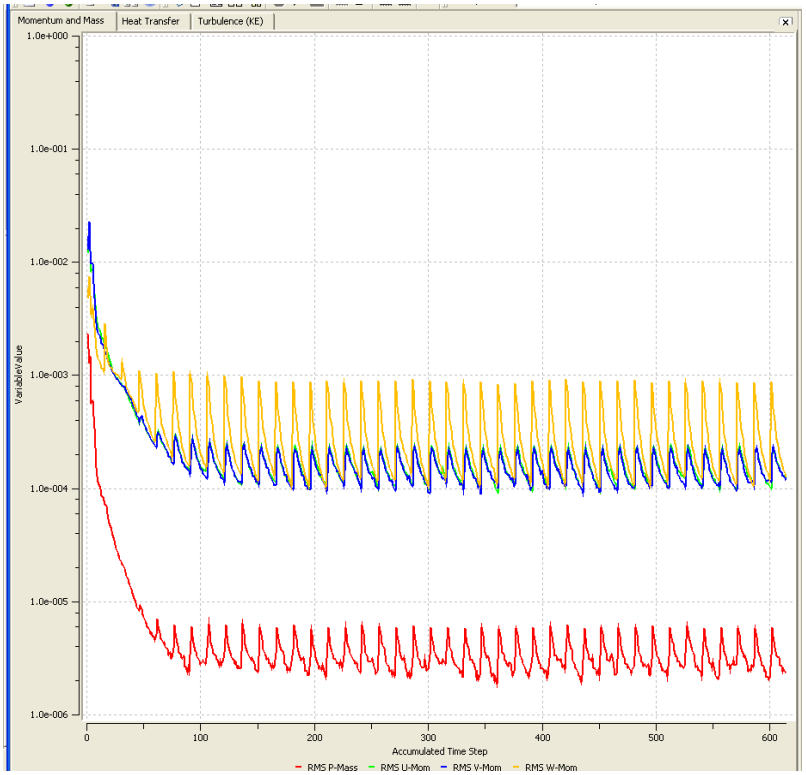


Figura 5.66: Convergência para a simulação em regime permanente

A simulação apresentou problemas de convergência, principalmente na componente vertical da velocidade do ar. Esta foi a melhor

convergência obtida, mesmo após vários ajustes. Os resultados, no entanto, foram considerados satisfatórios. A distribuição das temperaturas do ar, superficiais e do primeiro nó sob a superfície é indicada na Figura 5.67.

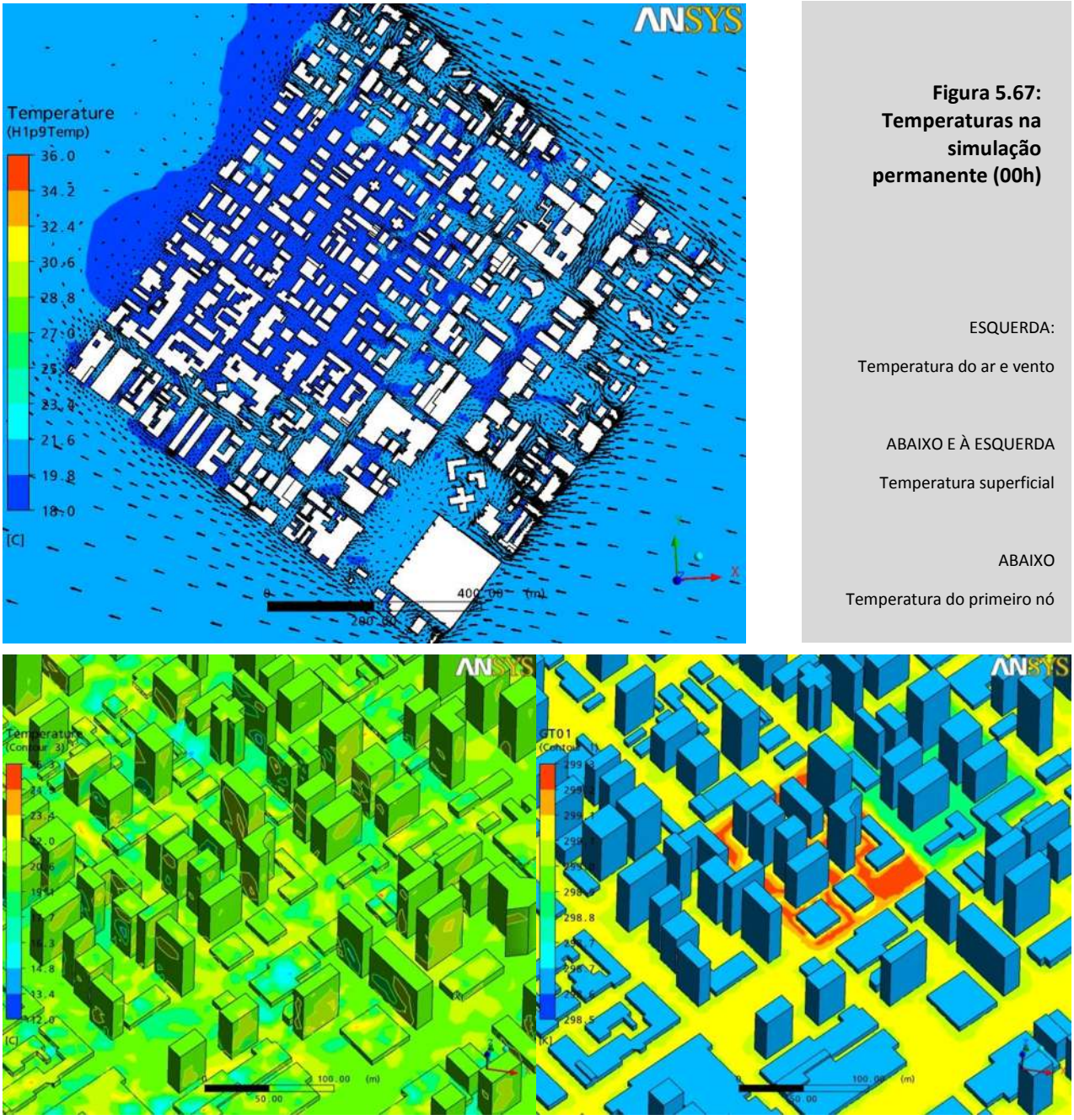


Figura 5.67: Temperaturas na simulação permanente (00h)

ESQUERDA:

Temperatura do ar e vento

ABAIXO E À ESQUERDA

Temperatura superficial

ABAIXO

Temperatura do primeiro nó

Durante a simulação transiente, a estratégia de atribuir variáveis aos nós sub-superficiais de temperatura apresentou problemas de instabilidade, tendo que ser alterado. O horário inicial considerado foi o das 00h, tendo sido utilizada a simulação anterior como condição inicial do sistema.

A simulação foi interrompida por volta a interação de número 5600, com o objetivo de reduzir o intervalo de tempo de 10s para 6s, com o objetivo de melhora a convergência da simulação. Os resultados de

temperatura até o horário foram verificados e considerados razoáveis. Depois de cerca 120 dias de simulação, só havia resultados até as 14h15. Os dados avaliados se referem a este período, já que depois focou-se nos modelos analíticos.

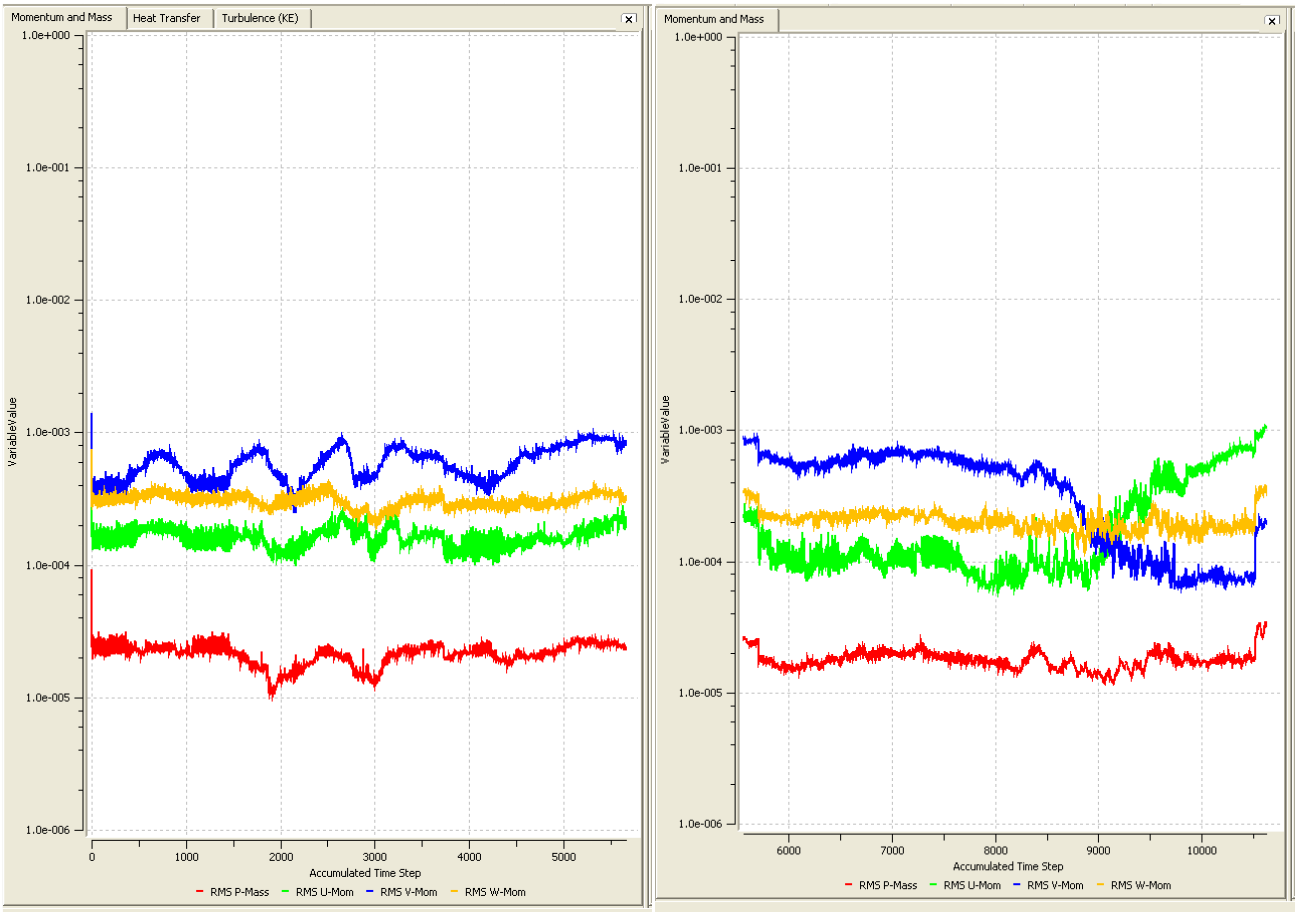


Figura 5.68: Convergência para a simulação em regime transiente

A primeira imagem é até a iteração 5600, o segundo até a iteração 11400, onde a simulação foi interrompida.

Observa-se que na maior parte do tempo a convergência para a o momento horizontal em **u** (em azul) ficou acima de 5 x 10^{-4}, chegando próxima a 10^{-3} em ciclo s de certa de 800 iterações. O ajuste do intervalo de tempo evitou elevações maiores da curva, que se estabilizou por volta de 5 x 10^{-4}, considerada razoável.Esta estabilização também se deveu às reduções no intervalo de tempo programadas no arquivo CCL (para 4s e depois para 2s) Com a alteração do sentido do vento para sul, no período da tarde, a curva de momento em **u** passou a cair, sendo acompanhada por um aumento proporcional da curva de momento em **v** (em amarelo). Isto indica que há problemas na área de incidência perpendicular do vento, o que não pode ser explicado, já que a malha utilizada é a mesma das simulações de vento sem efeito térmico, que não apresentaram problemas.

A convergência para as equações de energia ficou o tempo todo por volta de 10^{-4}.

Os resultados foram tratados para se verificar a temperatura superficial, a temperatura do ar e o vento. Devido à eliminação das variáveis para as temperaturas dos nós sob a superfície, não foi

possível obter o resultado de temperatura sub-superficial. A temperatura superficial para o começo da manhã e para o meio da tarde é apresentada na Figura 5.69.

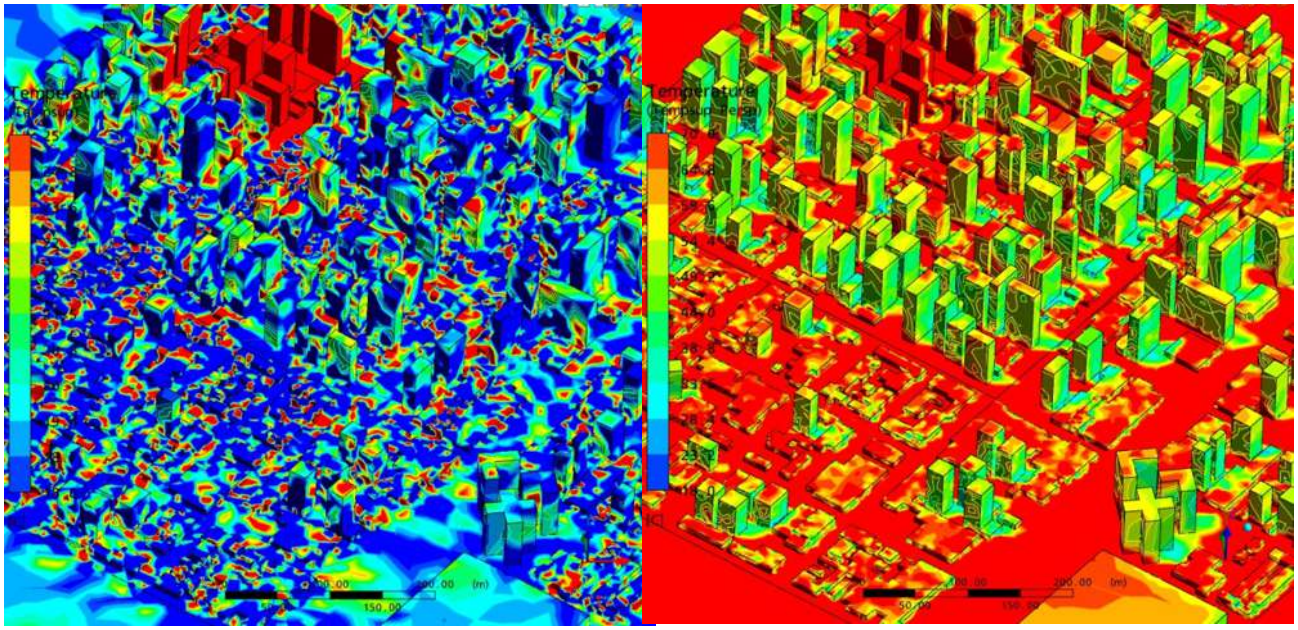


Figura 5.69: Temperatura superficial para os horários das 7h e das 15h

Os resultados da simulação não foram considerados satisfatórios. Houve um erro na determinação da temperatura superficial de uma das quadras (em vermelho na parte superior da figura), que apresentou valores superiores a 70°C durante a madrugada. Houve também grandes variações nos valores de temperaturas para os horários da madrugada. Mesmo no período da tarde as temperaturas ficaram acima do esperado.

Quando, no entanto, se avalia o perfil de temperaturas em corte, os resultados parecem ser razoáveis (Figura 5.70)

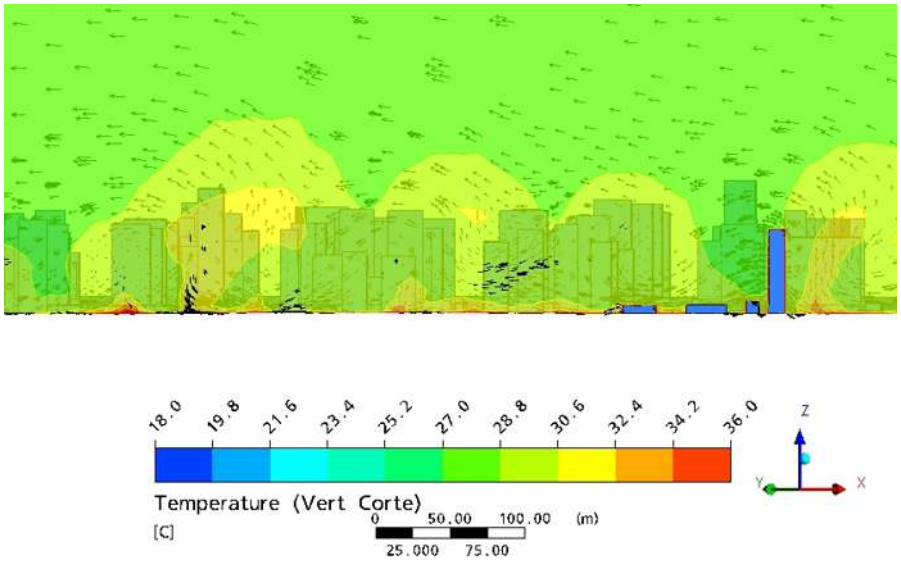


Figura 5.70: Temperaturas em corte passando pela rua Rouxinol (15 h)

Isto indica que há um problema principalmente nas camadas mais baixas do modelo, onde a temperatura parece ser superestimada. O resultado para um plano horizontal a 1,5 m de altura é apresentado na Figura 5.71.

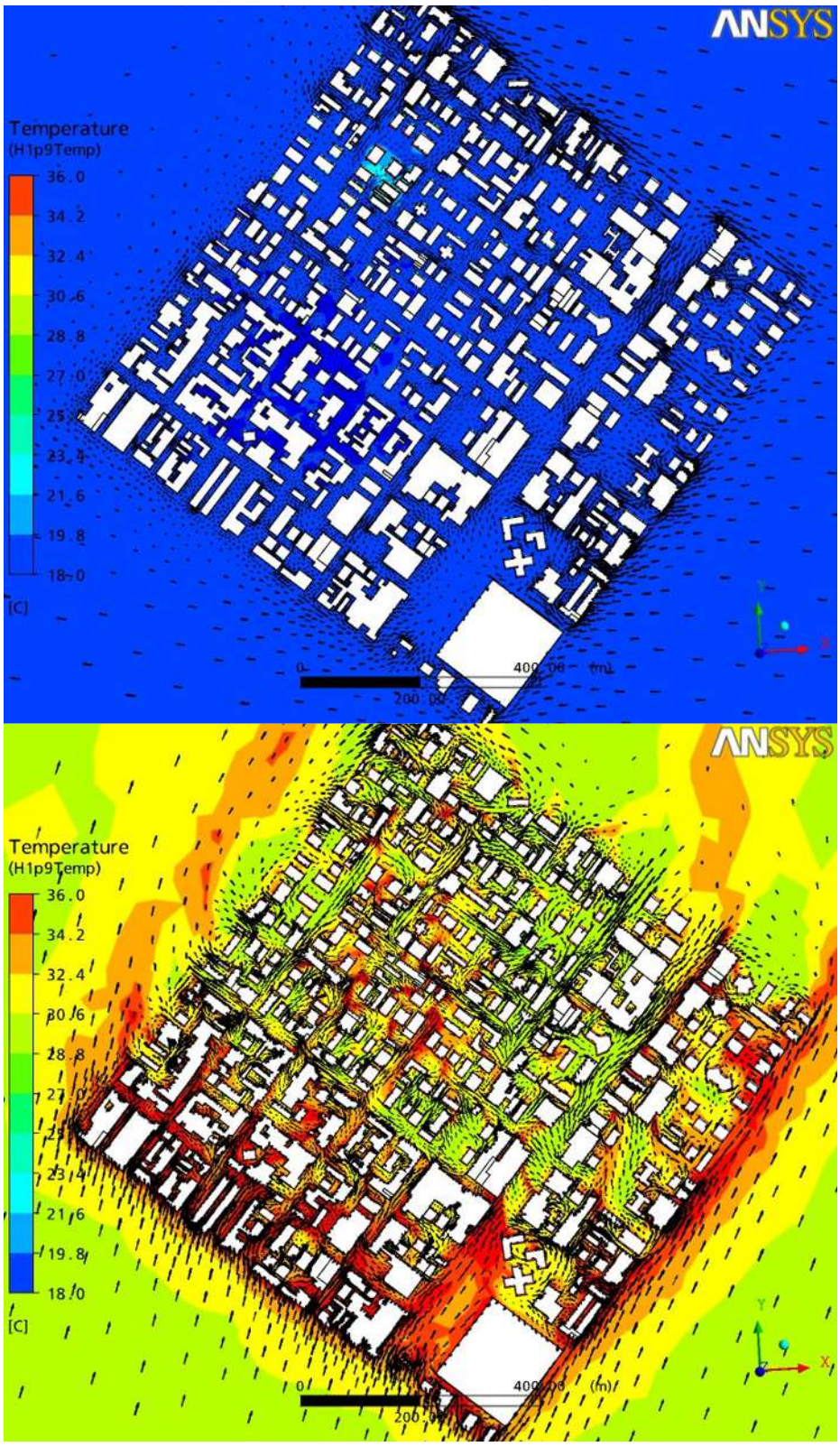


Figura 5.71: Resultado das simulações para vento e temperatura às 7h e 15h (hora legal)

No resultado das 7h, pode-se perceber um leve sobre aquecimento da quadra que apresentou erro. De maneira geral, a temperatura do ar encontrada foi muito próxima à temperatura do ar de entrada, conforme esperado. O resultado das 14 h apresentou uma distribuição de temperatura dentro das expectativas, mas com magnitudes muito acima do esperado.

De uma maneira geral, considerou-se que o modelo ainda precisa de ajustes antes que seus resultados possam ser apropriados de maneira adequada. Devido a restrições de tempo, isto não foi feito neste trabalho e os dados acabaram não sendo utilizados.

5.3. Avaliação geral dos procedimentos e resultados

De uma maneira geral, observou-se que os resultados do modelo analítico apresentaram uma melhor concordância com os valores registrados na medida de campo. Este modelo apresentou ainda duas vantagens, ao possibilitar a fácil manipulação de dados, com produção rápida de resultados, e o conhecimento dos procedimentos internos, permitindo ajustes quando considerados necessários. Suas grandes limitações são a restrição nos parâmetros de aplicação e na abrangência espacial. Normalmente modelos analíticos permitem a avaliação de apenas um ponto ou trecho no espaço, havendo dificuldades em simular áreas maiores ou a interação entre áreas.

Os modelos fluidodinâmicos, em tese, permitiriam superar estas limitações. Sua aplicabilidade, no entanto, se restringe principalmente a dois fatores, interligados entre si: capacidade computacional e tempo de processamento. O tempo que se demorou para produzirem os resultados foi uma limitação séria, já que erros muitas vezes levaram dias ou meses para serem identificados e alterações no modelo tornaram-se inviáveis. A relação entre a área de interesse e a área simulada também foi uma questão importante. A opção de simular uma área maior, de modo a garantir que as condições de contorno da área de interesse fossem estabelecidas com precisão levou a simulações de grandes extensões espaciais, o que por vezes reduziu a precisão na análise de áreas específicas. Houve ainda dificuldades em se identificar exatamente quais foram os responsáveis por eventuais erros, devido ao grande número de variáveis de entrada envolvidas.

O Envi-met apresentou uma estrutura particularmente fechada e houve dificuldades para identificar procedimentos de simulação adequados para o programa. Ocorreram diferenças significativas entre as temperaturas calculadas e resultados medidos, principalmente se comparado com os resultados obtidos com o modelo analítico. Outro problema do Envi-met é que ele apresenta pouca possibilidade de aumento da capacidade computacional disponível para rodar uma única simulação, já que não permite a incorporação de várias máquinas.

O modelo desenvolvido para o CFX apresenta potencial de utilização, mas provavelmente as áreas simuladas deverão ser reduzidas ou simplificadas. Com isso, seria possível validar melhor o modelo antes de aplicá-lo a áreas complexas como o caso de bairros densos em cidades brasileiras. Embora os resultados tenham sido descartados, as bases do modelo podem ser desenvolvidas em oportunidades futuras.

A maioria das análises de dados realizadas foi feita a partir dos resultados dos modelos analíticos, e não dos fluidodinâmicos. Ainda assim, considera-se que estes últimos apresentam grande potencial para utilização nos estudos de clima urbano, principalmente levando-se em conta o processo contínuo de desenvolvimento da tecnologia computacional.

Clima e ocupação

As limitações atuais do planejamento urbano no Brasil são inúmeras. O poder local ganhou autonomia, recebendo a incumbência de resolver problemas da sociedade sobre os quais muitas vezes não tem capacidade real para intervir, principalmente por estar subjugado à questões políticas e econômicas referentes a outras esferas de governo e aos interesses econômicos locais (BRAGA, 2001). Uma das principais ferramentas na mão de planejadores urbanos é a legislação urbanística Prerrogativa do Estado e protegido pela legislação federal, o controle do uso do solo apresenta uma grande capacidade de moldar a cidade. Neste capítulo, se propõe avaliar a relação entre os resultados obtidos nas simulações anteriores e a ocupação urbana, a fim de identificar dependências e subsidiar a construção de ferramentas de planejamento.

6.1. Ferramentas de planejamento urbano no Brasil

A legislação contém vários mecanismos para a definição da forma urbana, através de restrições construtivas e de uso aplicadas às edificações. Embora largamente usados pelas administrações públicas e por urbanistas, estes mecanismos tornam-se instrumentos com pouca reflexão crítica, e normalmente são determinados a partir da avaliação do seu impacto e não de metodologias generalizáveis. Atualmente, algumas legislações de uso e ocupação do solo têm adotado a flexibilidade de usos, controlando apenas a densidade da região e buscando garantir a qualidade ambiental através de estudos específicos, como relatórios de impacto de vizinhança. O objetivo é atingir certa uniformidade de densidade aproveitando a infra-estrutura já disponível e evitando os chamados vazios urbanos.

Como ferramentas principais, são utilizados índices, aplicados a cada lote, que limitam a área construída e o percentual de cobertura do terreno. Os resultados espaciais gerados pela combinação destes fatores foram avaliados em alguns trabalhos (MARTIN & MARCH, 1972; MACEDO, 1988; ALEXANDER & REED, 1988; MENNEH, 1997), mas as densidades populacionais resultantes dependem de diversas inferências acerca do tamanho médio das famílias e das habitações. Estas referências internacionais carecem de adaptação para o contexto nacional. Ainda que seus efeitos na densidade potencial e efetiva ainda

devam ser melhor estudados, a legislação de ocupação do solo consiste em um dos principais delineadores da forma urbana.

Como tal, ela pode representar um ponto de equilíbrio entre o interesse público, de limitar e organizar o crescimento urbano, e possibilitar a vida em comum, e os interesses privados, a quem interessa uma utilização irrestrita da propriedade, prevalecendo este direito sobre qualquer interesse comum (TARALLI, 1993). As configurações espaciais urbanas resultantes visam, em teoria, a permitir condições ambientais mínimas, protegendo as relações de vizinhança e a qualidade de vida local.

Contudo, esta forma de planejamento também apresenta diversas limitações. Uma das principais, conforme coloca Taralli (1993, p. 256):

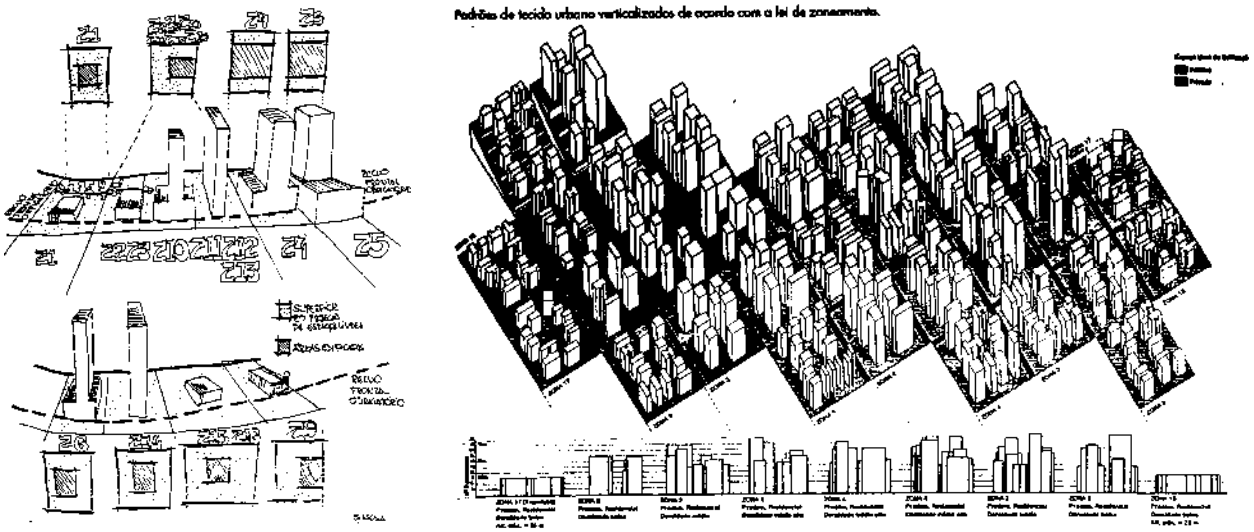
> *Relaciona-se com a questão da legitimidade alcançada nestes instrumentos, que restringem o universo de possibilidades de produzir o ambiente construído a determinados modelos e tipologias projetuais pré-estabelecidas e padronizadas. Descartam-se outras alternativas [...] que também representam a construção de um espaço edificado com qualidade e adequação às condições ambientais.*

Ao tomar como base a figura jurídica existente para a propriedade urbana, o lote, e considerando as quadras urbanas como nada mais do que um somatório de lotes, a legislação se limita no que diz respeito a novas formas de ocupação, permitindo, e muitas vezes incentivando, desperdícios de espaço (MACEDO, 1988). Com isso, as boas intenções da lei acabam se perdendo na monotonia ou em exemplos indesejáveis.

No caso de São Paulo, o autor demonstra como a legislação de uso e ocupação do solo da cidade de São Paulo de 1970 configurou os padrões de construção na cidade, instituindo a torre isolada no lote como modelo de verticalização da cidade nos anos 80 e 90.

Figura 6.1: Padrões de ocupação para a legislação de 1972 em São Paulo

Fonte:MACEDO, 1988



À representação gráfica (Figura 6.1), o autor acrescenta:

> *O desenho mostra a limitação da norma que, aberta no tocante à variedade de usos, é formalista e direcionista na busca de um padrão de assentamento dos novos volumes construídos. O resultado é este, [...] um resultado morfológico simplório, espacialmente discutível e que pouco a pouco se mostra carente de novas disposições, normas e formas de arranjo mais flexíveis em relação às conformações espaciais possíveis e de abertura em relação à questão do meio urbano preexistente (MACEDO, 1988, p. 158).*

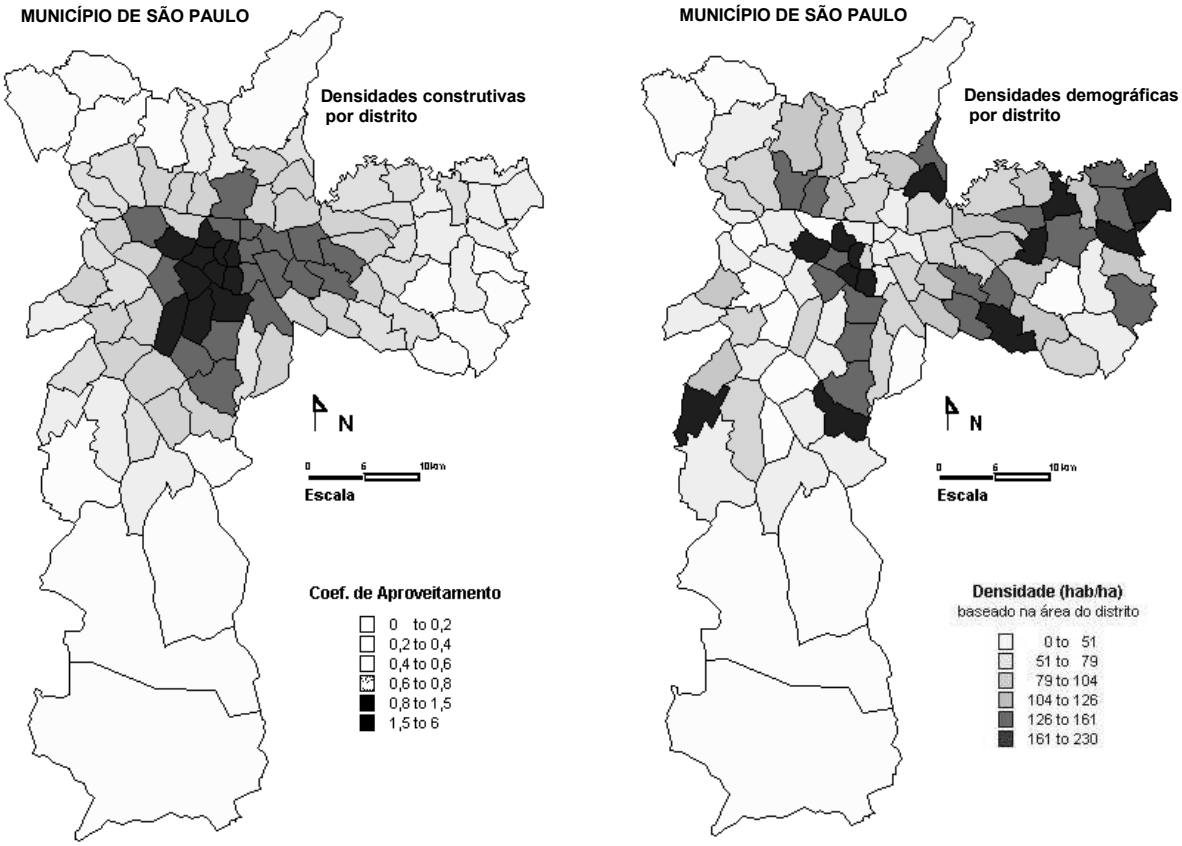
Dentro deste ponto de vista, a legislação tem um papel fundamental nos edifícios verticalizados que, por seu potencial de adensamento construtivo, apresentam grande impacto na estrutura espacial, social e ambiental da cidade. É interessante notar como a distribuição espacial destas densidades construtivas obedece a uma lógica própria que, muitas vezes, não é facilmente compreensível.

> *A posse do poder decisório sobre o direcionamento da expansão urbana é um poderoso foco de conflitos e disputas, uma vez que permite influir na valorização e desvalorização de ambientes construídos naturais e urbanos e provê acesso a lucros e sobre-lucros no mercado fundiário imobiliário (BRAGA, 2001, p. 1327).*

No caso da cidade de São Paulo, observa-se uma forte concentração da densidade construtiva na área central, expandindo-se para setor sudoeste, o que não corresponde à maior densidade habitacional (Figura 6.2).

Figura 6.2: Densidades de ocupação para São Paulo

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da SEMPLA (Mapeamento dos coeficientes de aproveitamento por quadra, arquivo eletrônico tipo MID) e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE, Sumário de Dados 2004. Base cartográfica: CESAD/FAUUSP



É curioso notar que, ao se dividir a população pela área construída, e não pela área geográfica do distrito, obtém-se um resultado quase inverso ao mapa de densidades construídas. Ou seja, as áreas mais densamente construídas são proporcionalmente menos povoadas. Em alguns distritos, isso é um reflexo de que grande parte produção verticalizada é voltada para edifícios comerciais. Em outros, porém, é um indicativo de que as pessoas simplesmente contam com áreas maiores de habitação. Quando se compara com os dados de renda, percebe-se que realmente as áreas mais adensadas abrigam uma população de maior renda, podendo-se concluir que o processo de adensamento construtivo da cidade não segue demandas habitacionais, com as camadas mais pobres da população vivendo em espaços exíguos. Nota-se que as áreas densas contam com um alto padrão construtivo, abrigando uma população de alto poder aquisitivo e, conseqüentemente, alto poder de formação de opinião.

Quanto ao processo de ocupação urbana brasileiro, deve-se observar ainda que, ao contrário do que ocorre na Europa, os projetos de empreendimentos urbanos não apresentam plano de massas das edificações, limitando-se a desenhar o sistema viário e os lotes. A forma de ocupação é muitas vezes definida posteriormente pela administração pública através do zoneamento. Um levantamento feito a partir da legislação de algumas capitais (BELO HORIZONTE, 1996; CURITIBA, 2000; RIO DE JANEIRO (Cidade), 1992; SÃO PAULO (Cidade), 2002) mostra as principais variáveis utilizadas no controle do solo urbano:

- **Coeficiente de aproveitamento (CA):** é o fator que, multiplicado pela área do terreno, define a área máxima computável admitida nesse mesmo terreno. Este é o fator que determina a densidade construtiva de uma determinada área, embora não defina por si só a configuração urbana. Coeficientes restritivos inibem construções de múltiplos andares, mas é possível verticalizar reduzindo-se a ocupação do terreno;
- **Taxa de ocupação (TO):** é dada pela razão entre a área de projeção da edificação ou edificações sobre o plano horizontal e a área do lote ou terreno. A taxa de ocupação dá uma idéia da porcentagem de cobertura do solo, mas não da densidade construída. Assim como o coeficiente de aproveitamento, não definem por si só a configuração urbana, mas baixas taxas de ocupação, combinadas com altos coeficientes de aproveitamento incentivam a verticalização das edificações;
- **Gabarito** ou altura máxima da edificação: em alguns casos limita-se diretamente a altura do edifício, embora a combinação entre a taxa de ocupação e o coeficiente de aproveitamento indique uma tendência de altura máxima. É normalmente estabelecida por razões de composição urbana ou de tráfego aéreo;
- **Afastamentos mínimos:** os afastamentos ou recuos, determinam a distância da borda do terreno a partir da qual se

pode edificar. Pode ser fixo de acordo com o tipo de divisa (frontal, lateral, fundos) ou progressivo, ou seja, variar de acordo com a altura da edificação. Neste caso, os edifícios descrevem um ângulo em relação à divisa determinando o quanto ele obstruirá a visão do céu a partir daquele ponto. Este recurso é tradicionalmente utilizado para preservar o acesso ao sol e à luz natural, mas normalmente não varia de acordo com a orientação do lote nem com a topografia. Suas recomendações se sobrepõem com o resultado da combinação dos outros fatores, podendo inclusive impedir a realização do potencial construtivo do terreno determinado pelas outras variáveis;

- **Taxa de permeabilidade**: determina a porcentagem do terreno que deve ser deixada livre de construções ou impermeabilização. Foi criada para evitar a sobrecarga no sistema de drenagem e conseqüentes enchentes e pode em alguns casos ser desconsiderada, caso o construtor se proponha a fazer um sistema de drenagem, sendo menos determinante na ocupação do terreno do que a taxa de ocupação. Ainda assim, ela define o tratamento de parte da superfície do lote, obrigando a implantação de superfícies diferenciadas;
- **Transferência do direito de construir e solo criado**: relacionadas no Estatuto da Cidade (BRASIL, 2001), estas ferramentas permitem construir acima do potencial construtivo determinado pela legislação local. Em alguns locais, como em Belo Horizonte e Curitiba, tem-se por objetivo evitar a desvalorização de terrenos com imóveis tombados, cujos proprietários poderiam vender o excedente para o mercado imobiliário. Em outras cidades, como no Rio de Janeiro, foi estabelecido um coeficiente de aproveitamento unitário para todos os terrenos, sendo onerosa a criação do solo na cidade (RIO DE JANEIRO, 1992), o que torna o aumento da densidade construtiva privilégio daqueles que possam pagar por isso. Embora possam ser utilizados como meio de apenas aumentar a arrecadação da administração municipal, estes instrumentos apresentam potencial pra um controle fino das densidades das quadras. É possível incentivar a concentração de potencial construtivo ou evitar que certas áreas se adensem sem prejuízo para os proprietários.

Partiu-se do princípio, inicialmente, de que a definição do **CA** e da **TO**, juntamente com o número de edificações na quadra (**N**) e os recuos médios, caracterizam uma determinada ocupação e o seu desempenho térmico. A relação entre estas quatro variáveis e a forma e distribuição dos edifícios na quadra é mostrada na Figura 6.3.

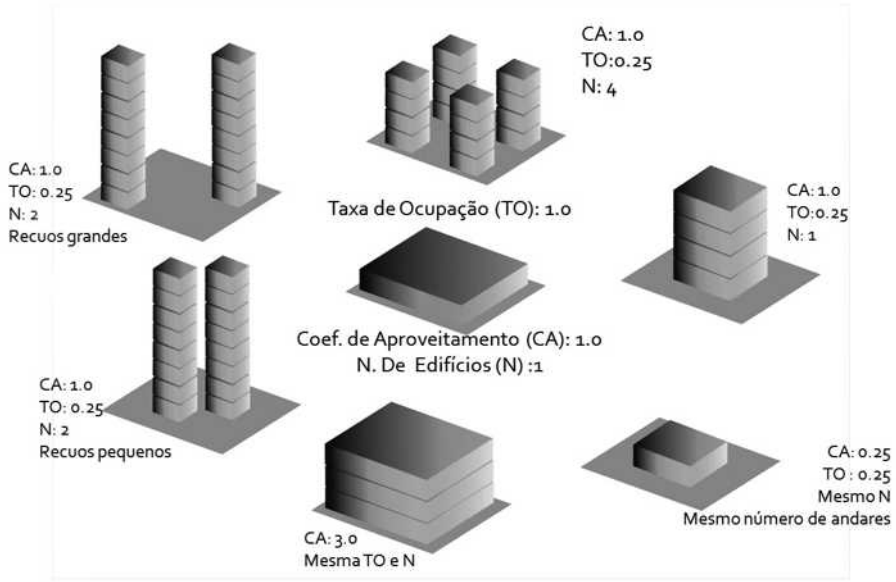


Figura 6.3: Relações entre a forma urbana e os parâmetros de planejamento

6.2. Variáveis de ocupação

Para se estabelecer a relação entre as variáveis de planejamento torna-se necessário levantar as características da ocupação da área de estudo e compará-la com os resultados das simulações. A unidade escolhida para se avaliar as características é a da quadra. Os parâmetros selecionados foram divididos entre básicos e avançados.

Os parâmetros básicos são aqueles derivados diretamente do parcelamento do solo e da legislação de uso e ocupação, citados no item anterior. Eles compreendem:

- Coeficiente de aproveitamento (CA);
- Taxa de ocupação (TO);
- Recuos médios (RM).

Estes parâmetros permitem diversas organizações espaciais, que produzirão diferentes impactos nas condições ambientais locais. Para isso, foram desenvolvidos parâmetros avançados que podem fornecer idéias mais precisas das trocas de calor envolvidas. Estes parâmetros são:

- Rugosidade(Zd e Z0);
- Fator de Visão de Céu no chão (dado na forma de um ângulo de obstrução equivalente) (Obst);
- Índice de compacidade da quadra (IC).
- Variabilidade na altura (DpH e DpH%)

Foi ainda avaliada a orientação das fachadas e seu ângulo de obstrução. Os valores foram calculados para cada edificação e foram obtidos valores médios para cada quadra.

Para se estabelecer estas relações, utilizou-se o aplicativo MapInfo, que já contava com a base de dados construída a partir dos levantamentos.

Inicialmente, as informações são organizadas em três camadas:

- Fachadas_central: contendo os dados das fachadas desagregadas
- Edifícios_central: contendo as edificações com suas informações de uso e altura;
- Quadras_brutas_central: contendo quadras construídas como sendo a quadra fiscal mais metade da largura das ruas. Foi trabalhada com as quadras brutas para que se pudesse incluir a área de ruas.

A explicação detalhada das ferramentas de geoprocessamento utilizadas nos cálculos de cada parâmetro foram apresentadas no ANEXO A6.

6.2.1. *Dados das fachadas*

Para que alguns parâmetros pudessem ser obtidos, foi necessário calcular alguns dados referentes às fachadas. Para isto, foi elaborado um novo desenho em que as linhas das fachadas foram levemente deslocadas para o interior dos edifícios, de modo a garantir que cada fachada estivesse sempre dentro do edifício ao qual pertencia.

As fachadas foram então desagregadas para que pudessem ter seus atributos calculados separadamente. Foram calculados:

- A orientação da fachada, a partir das coordenadas dos seus vértices, utilizando a Equação 6.1.

$$\gamma_f = \operatorname{atan}\frac{x_1 - x_2}{y_2 - y_1}$$

Equação 6.1

  Onde $\boldsymbol{\gamma_f}$ é a orientação da fachada e **x** e **y** as coordenadas dos vértices. O valor deve ser corrigido de acordo com o quadrante e transformado em coordenada geográfica (ver Figura 4.35, p. 171).

- A obstrução da fachada, utilizando-se um *grid* auxiliar com linhas espaçadas de 2,5 m (Figura 6.4). Esta malha foi utilizada também em outros estudos.

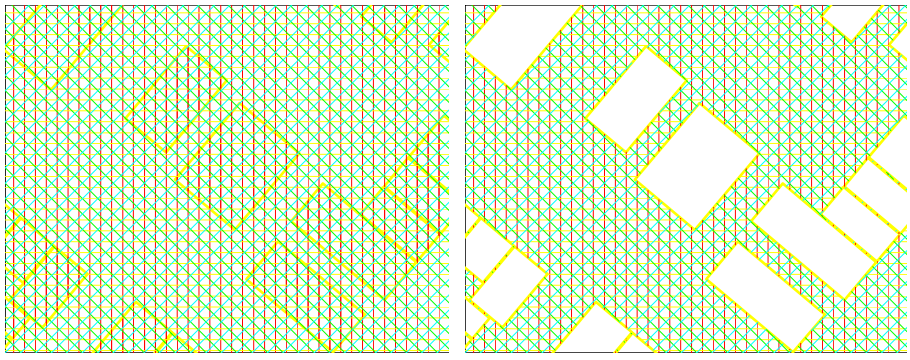


Figura 6.4: Malhas auxiliares, com exclusão da área interna ao edifício

Cada linha intercepta duas fachadas. É calculada a soma das alturas das duas fachadas que integram a linha e, subtraindo-se a altura da própria fachada, tem-se a altura da fachada oposta. A obstrução da fachada é calculada a partir de uma das alturas das fachadas opostas e do comprimento de cada linha que chega à fachada.

Equação 6.2

$$ObstX_Y = \frac{\sum H_{total} - n_{grid} \cdot H_f}{\sum L_{grid}}$$

Onde ObstX_Y é a obstrução no sentido do *grid* (X_Y pode ser N_S, E_W, etc.) , $\mathbf{H_{total}}$ é a soma das altura das fachadas para aquela linha, $\mathbf{H_f}$ a altura da própria fachada, $\mathbf{n_{grid}}$ o número de linhas que chegam àquela fachada e $\mathbf{L_{grid}}$ o comprimento da linha do grid auxiliar. O resultado final pode ser observado na Figura 6.5.

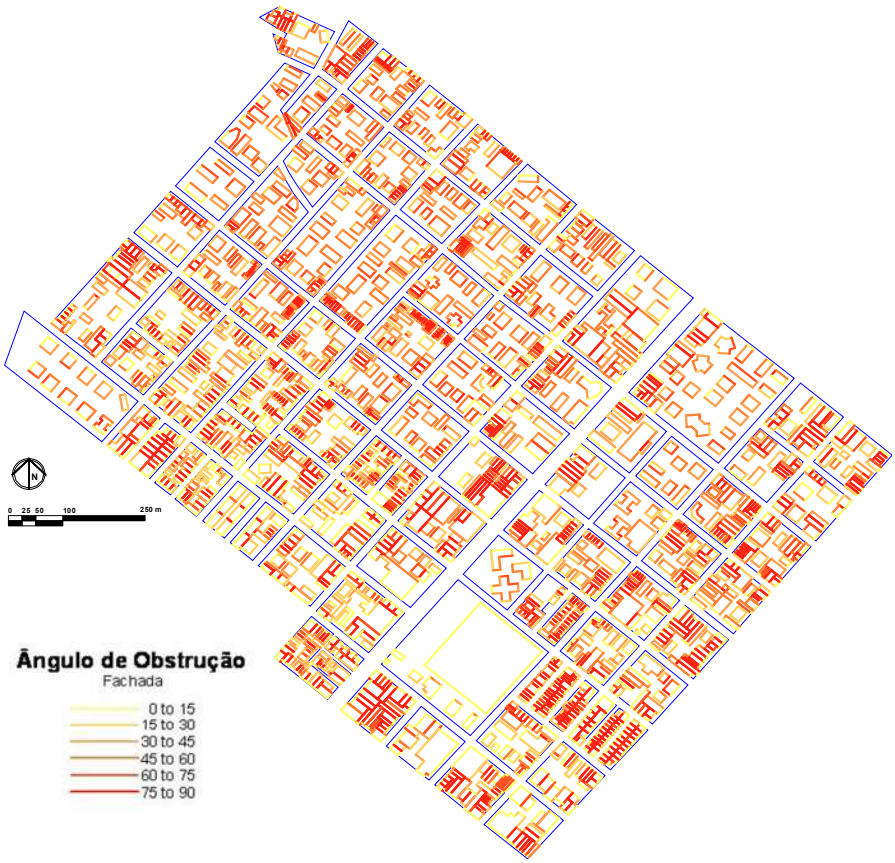


Figura 6.5: Mapeamento do ângulo de obstrução das fachadas

Uma das falhas neste procedimento é considerar as paredes internas de edificações geminadas como paredes obstruídas, embora isto não tenha grandes implicações na utilização desta informação.

6.2.2. *Parâmetros básicos*

Os parâmetros básicos são facilmente calculados a partir da área projetada, da área total construída e da área da quadra. Como já foi dito, o trabalho trabalhará sempre com os parâmetros básicos brutos, incluindo as ruas e calçadas no cálculo

Os resultados para coeficiente de aproveitamento e taxa de ocupação são apresentados a seguir.

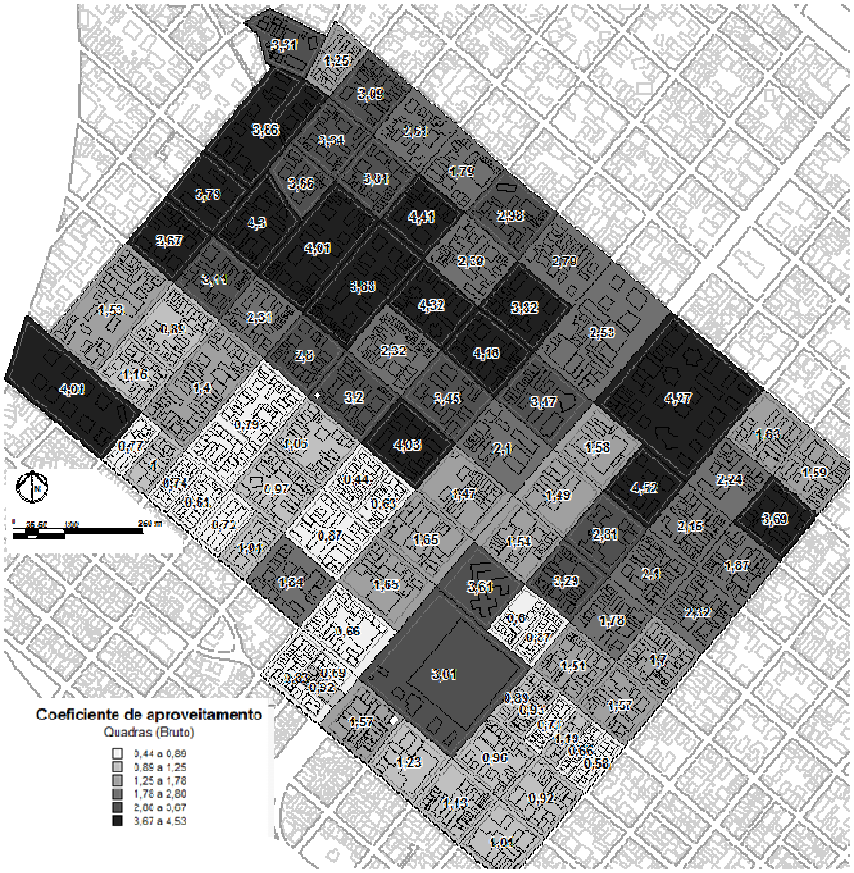


Figura 6.6: Mapeamento do coeficiente de aproveitamento

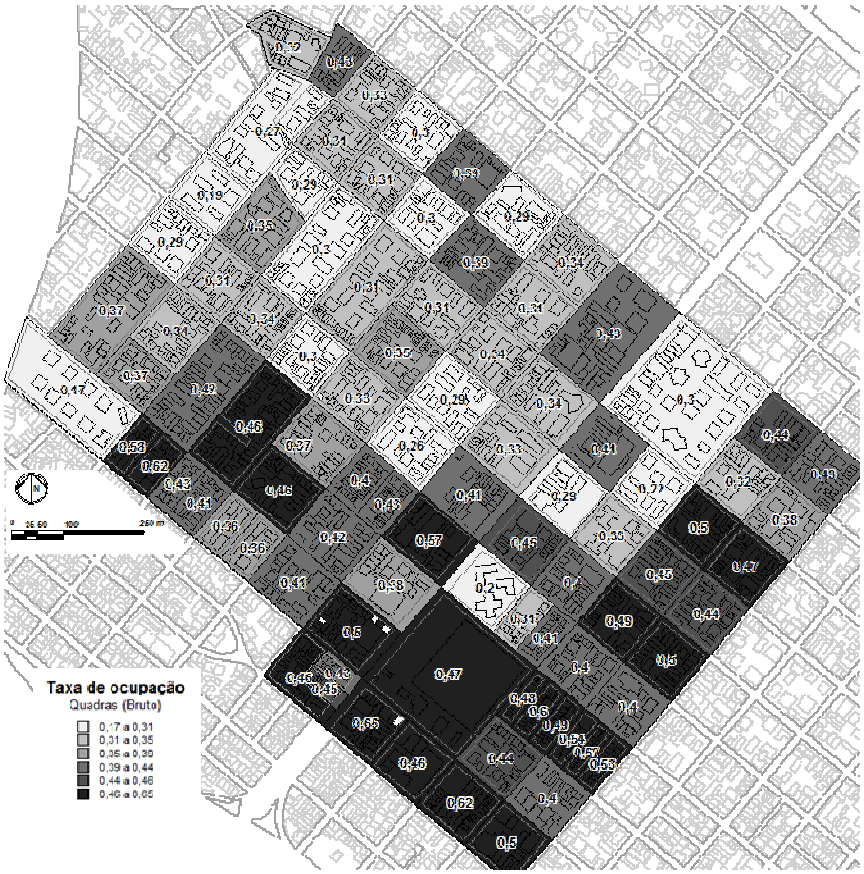


Figura 6.7: Mapeamento da taxa de ocupação

É possível notar que as áreas com maior densidade construtiva se encontram no setor norte da área de estudo. Observa-se também que as duas variáveis estão correlacionadas na razão inversa, ou seja, quanto maior o coeficiente de aproveitamento, menor a taxa de ocupação. Deste modo, tende-se a produzir torres altas isoladas no terreno ou edificações baixas próximas umas às outras. A exceção mais notável é o quarteirão do shopping Ibirapuera, no setor sul da área, que apresenta grande área construída com uma taxa de ocupação do terreno relativamente alta também.

Os recuos médios são determinados a partir da mesma malha auxiliar criada para calcular a obstrução das fachadas. Os resultados podem ser observados na Figura 6.8.

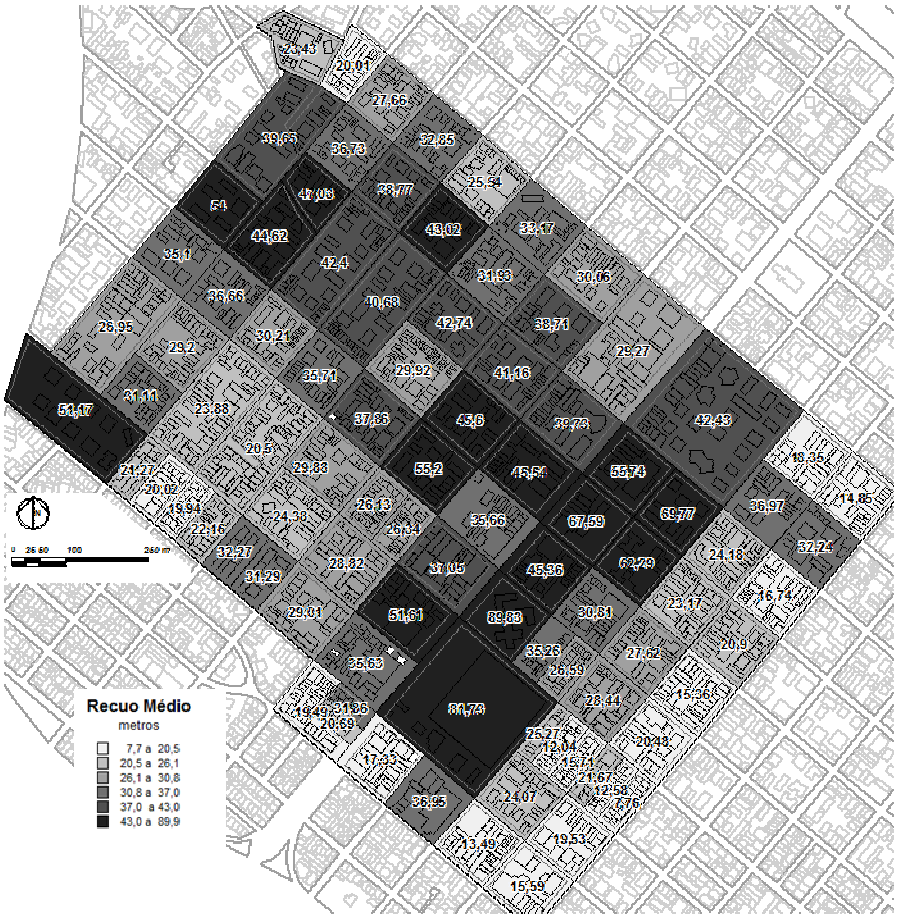


Figura 6.8: Mapeamento dos recuos médios

As variáveis CA_bruto, TO_bruto e Recuos_M foram denominadas CA, TO e RM nos estudos de avaliação de resultados.

6.2.3. *Parâmetros avançados*

Considerou-se que os parâmetros básicos possam ser insuficientes para descrever a área, ou pelo menos, para se estabelecer uma correlação direta com o comportamento das variáveis ambientais térmicas e energéticas. Por isso, foram calculados critérios secundários, baseados em índices utilizados nos modelos anteriormente descritos.

6.2.3.1. Rugosidade

O primeiro dos índices utilizados foi a rugosidade, cujo cálculo é apresentado no item 3.2.2.2. Embora a rugosidade seja utilizada para determinar o comportamento do vento acima do nível médio das edificações, foi testado se há uma correlação entre o seu valor e as condições médias nos recintos urbanos, que deverá ser verificada a seguir.

Como a rugosidade é função da área de silhueta, ela varia de acordo com a incidência do vento. Edificações orientadas perpendicularmente ao vento tendem a apresentar menores áreas de silhueta que aquelas com incidência inclinada.

Para se calcular a área de silhueta, é necessária a obtenção do comprimento da edificação no sendo perpendicular à incidência de vento. Tentou-se inicialmente utilizar uma estratégia semelhante àquela aplicada no cálculo dos recuos, somando-se o comprimento interno às edificações, ao invés do externo, mas observa-se pela Figura 6.9 que isto implicaria subestimação do comprimento.

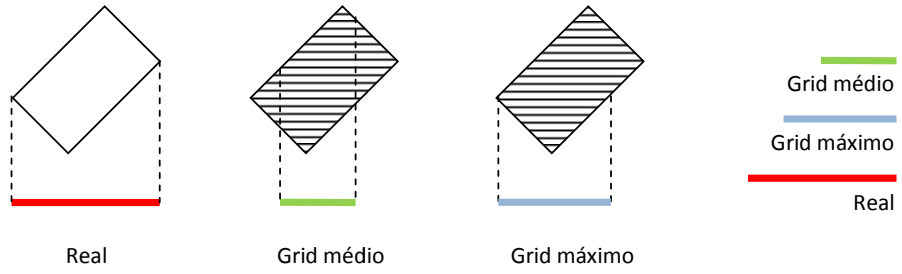
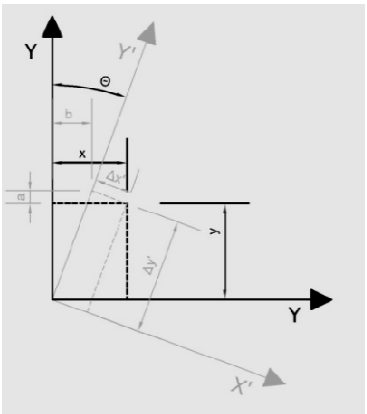


Figura 6.9: Estratégias para cálculo da área de silhueta

Caso o desenho esteja orientado com o eixo Y coincidindo com o norte, observa-se que a área de silhueta no sentido Norte-Sul pode ser calculada subtraindo-se o valor máximo da coordenada em X pelo valor mínimo. O mesmo pode ser afirmado em relação ao sentido Leste-Oeste e a diferença das coordenadas em Y.

O raciocínio pode ser aplicado a qualquer orientação de incidência de vento, desde que se ajuste o sistema de coordenadas para que o eixo Y coincida com a direção de incidência desejada. A Figura 6.10 indica as variáveis para a conversão do sistema XY para o sistema X'Y', rotacionado na origem pelo ângulo **γ'**.



$$\cos \gamma' = \frac{a + y}{\Delta y'}$$

$$\cos \gamma' = \frac{x - b}{\Delta x'}$$

$$\text{sen } \gamma' = \frac{a}{\Delta x'}$$

$$\text{sen } \gamma' = \frac{b}{\Delta y'}$$

Figura 6.10: Rotação de coordenadas

Resolvendo-se o sistema acima para Δx' e Δy', tem-se que:

Equação 6.4

$$\Delta x' = x \cdot \cos\theta - y \cdot \operatorname{sen}\theta$$

Equação 6.3

$$\Delta y' = x \cdot \operatorname{sen}\theta + y \cdot \cos\theta$$

A rugosidade foi então calculada para cada direção (N-S, E-W, NE-SW e NW-SE) por três dos métodos apresentados no item 3.2.2.2 (L para Lettau, Ma para MacDonald e Ra para Rapachau). Foi calculado também o valor do plano de deslocamento básico (considerando-se 70% da altura média) e pelos métodos de MacDonald e Rapachau. Para os valores orientados, foi calculada também a média para todas as direções.

Na Figura 6.11 apresentam-se os valores calculados para a área piloto. É mostrada a razão entre $\mathbf{z_d}$ e $\mathbf{z_0}$ e a altura média da edificação. Valores de referência para esta razão são dados na Figura 3.17, p. 86.

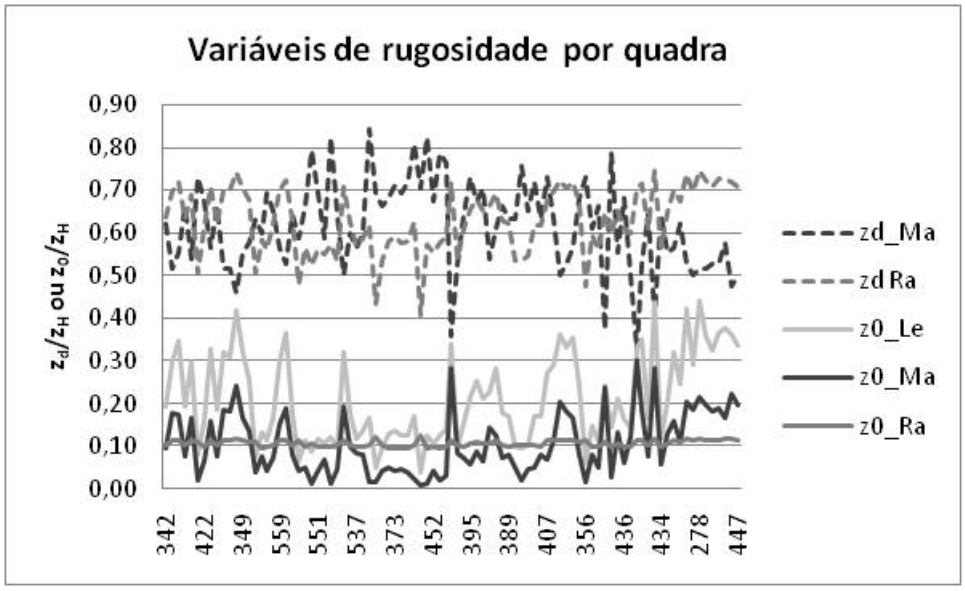


Figura 6.11: Gráfico com valores de z_d e z_0 calculados para a área de estudo

Observa-se que, quanto aos valores de $\mathbf{z_d}$ para a área de estudo, ambos os modelos apresentam resultados semelhantes, com valores oscilando em torno de 70% da altura média. Já para os valores de $\mathbf{z_0}$ as diferenças entre os modelos são maiores. O modelo de Rapachau apresenta valores praticamente estáveis por volta de 10% da altura média, semelhante às recomendações de Oke & Grimmond (1999). Os valores calculados pelas equações de Lettau e MacDonald apresentam variações semelhantes para as quadras, mas os valores calculados pelo primeiro são mais elevados, principalmente para densidades mais altas.

Os valores estáveis calculados pelo modelo de Rapachau provavelmente se devem às limitações artificiais introduzidas na equação para a variação de **U/u***. Este modelo não diferencia as quadras, embora elas apresentem condições de ocupação variadas. Deste modo, optou-se por iniciar os estudos pelas rugosidades determinadas através do modelo de MacDonald, conforme apresentado na Figura 6.12 e na Figura 6.13.

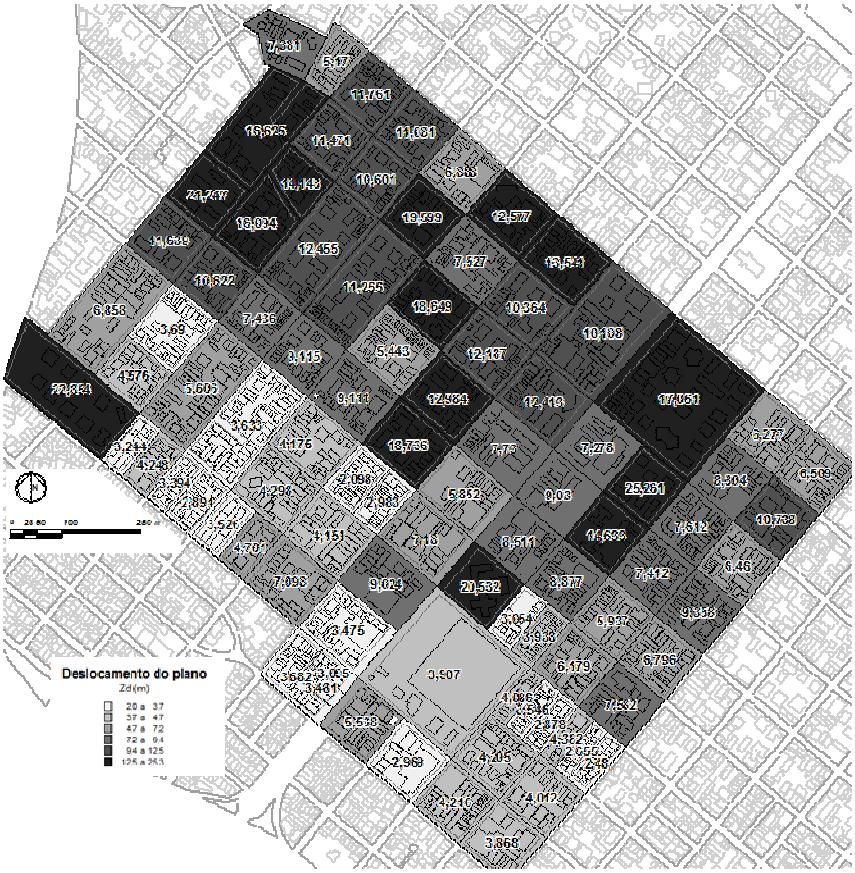


Figura 6.12: Mapeamento do plano de deslocamento (z_d)

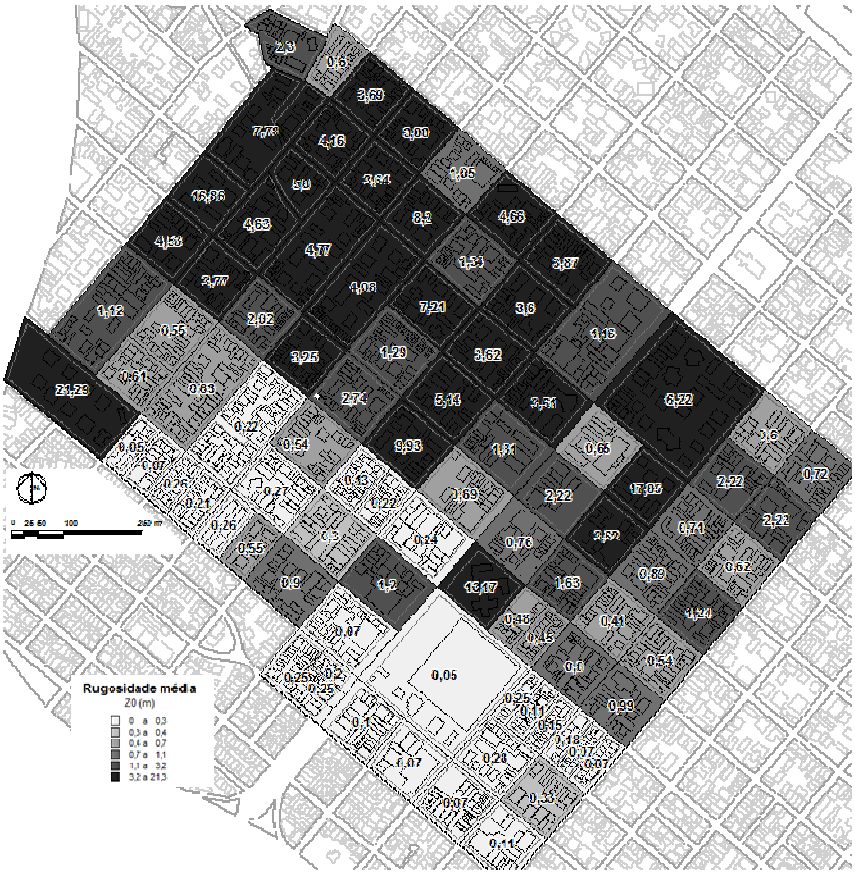


Figura 6.13: Mapeamento da rugosidade (z_0)

6.2.3.2. Obstrução média

A seguir, foi mapeada a obstrução média do piso. Para isto, foi realizado procedimento análogo ao utilizado na determinação da obstrução das fachadas, considerando o ponto obstruído como sendo o ponto médio das linhas de *grid* estabelecidas e as alturas consideradas homogêneas naquela direção.

Embora na Figura 6.14, é mostrado o mapeamento do Ângulo de Obstrução em graus. O Fator de visão de céu (FVC) pode ser calculado a partir desta relação, determinando relação entre a área vista desobstruída da abóbada e sua área total.

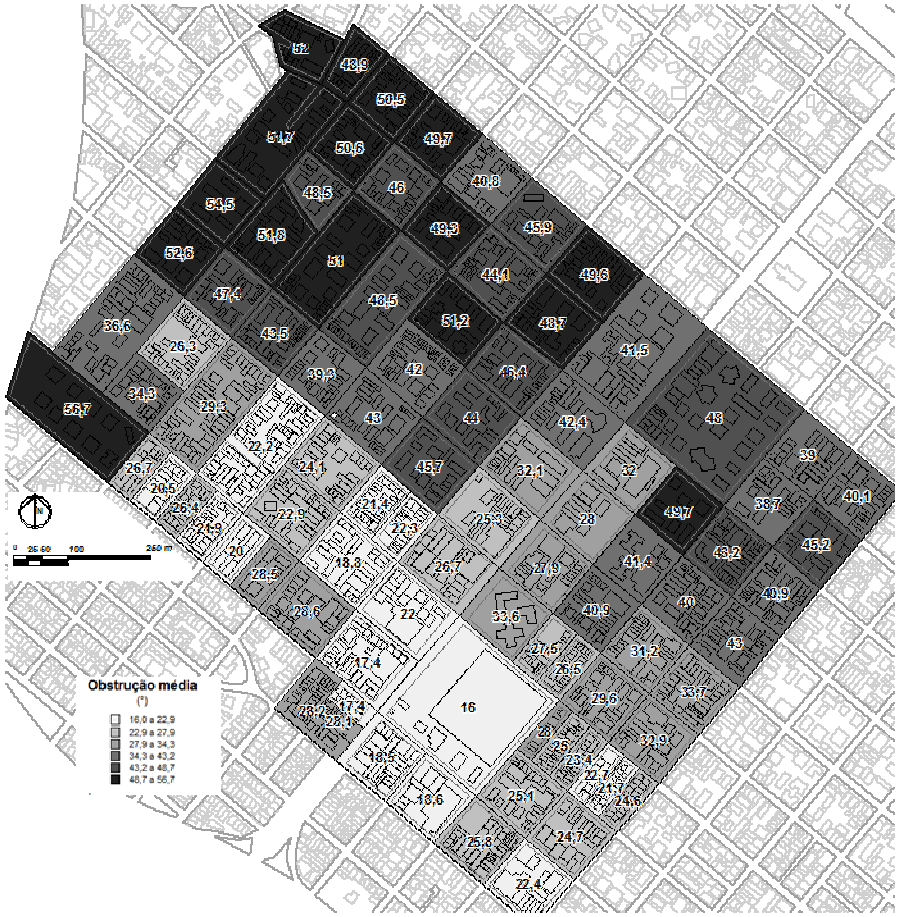


Figura 6.14: Mapeamento do ângulo de obstrução médio

6.2.3.3. Índice de compacidade

Tendo por objetivo avaliar a capacidade de troca da massa edificada com a atmosfera, julgou-se ainda importante um índice que medisse a variação da interface entre os dois meios. Para isso, foi calculada a razão entre o volume e a área superficial dos edifícios.

Esta relação, no entanto, depende das dimensões do objeto. Quanto maior ele for, menor tenderá a ser a relação entre a área superficial e o volume. Isto dificulta comparações entre formas de volumes diferentes, o que teve que ser repensado.

A solução para eliminar a interferência da dimensão do objeto foi dividir a menor relação possível entre área superficial e volume pela relação obtida naquele caso. Deste modo, o valor estaria sempre entre

0 e 1 para qualquer sólido, e mediria o quanto aquela forma é compacta (menor área superficial em relação ao volume) quando comparada à forma mais compacta de mesmo volume.

A forma com a menor área de superfície para um determinado volume é a esfera, mas como esta é uma forma rara para edificações, foram consideradas apenas opções com paralelepípedos. Neste caso, a forma mais compacta para um determinado volume seria a de um cubo de lado L. Neste caso:

$$V = L^3 \text{ e } A = 6 \cdot L^2$$ **Equação 6.5**

A menor dimensão possível é, então:

$$\left(\frac{A}{V}\right)_{min} = \frac{6}{L}$$ **Equação 6.6**

Para um determinado volume, portanto, tem-se que:

$$L = \sqrt[3]{V} \qquad \Rightarrow \qquad R_{A/V} = \left(\frac{A}{V}\right)_{min} = \frac{6}{\sqrt[3]{V}}$$ **Equação 6.7**

No entanto, os edifícios não são necessariamente aproximados para paralelepípedos de seis lados. A exemplo do que foi feito no cálculo da área superficial na tabela Edifícios_central, normalmente se desconsidera a superfície inferior, em contato com o solo. Como o objeto de estudo são as interações entre o edifício e a atmosfera, esta abordagem parece mais adequada. Assim sendo, o edifício tem apenas 5 faces e sua forma mais eficiente assume uma configuração mais achatada, com paredes mais baixas e uma maior área de cobertura. A forma de planta mais eficiente permanece sendo a quadrada. Neste caso, tem-se que:

$$V = b^2 \cdot H \text{ e } A = 4 \cdot b \cdot H + b^2$$ **Equação 6.8**

Fazendo a razão entre as duas variáveis, o resultado é:

$$R_{A/V} = \frac{A}{V} = \frac{4}{b} + \frac{1}{H}$$

$$\frac{1}{H} = \frac{b^2}{V} \quad \rightarrow \quad R_{A/V} = \frac{4 \cdot V + b^3}{b \cdot V}$$ **Equação 6.9**

Para que o valor de $\mathbf{R_{A/V}}$ seja mínimo, sua derivada $\mathbf{R_{A/V}'}$ deve ser igual a zero. Considerando-se **V** constante, a derivada é dada por:

$$R_{A/V}{}' = \frac{b^3 - 2 \cdot V}{b^2}$$

$$\frac{b^3 - 2 \cdot V}{b^2} = 0 \quad \rightarrow \quad b^3 - 2 \cdot V = 0 \rightarrow \quad b = \sqrt[3]{2 \cdot V}$$ **Equação 6.10**

Substituindo-se **b** na equação acima:

Equação 6.11

$$R_{A/V(min)} = \frac{4 \cdot V + \left(\sqrt[3]{2 \cdot V}\right)^3}{\left(\sqrt[3]{2 \cdot V}\right) \cdot V} \rightarrow R_{A/V(min)} = \frac{4 \cdot V + 2 \cdot V}{\left(\sqrt[3]{2 \cdot V}\right) \cdot V} = \frac{6}{\sqrt[3]{2 \cdot V}}$$

O índice de compacidade **Ic** é então dado por:

Equação 6.12

$$Ic = \frac{R_{A/V}}{R_{A/V(min)}} = \frac{\frac{A}{V}}{\frac{6}{\sqrt[3]{2 \cdot V}}} \rightarrow Ic = \frac{A \cdot \sqrt[3]{2 \cdot V}}{6 \cdot V}$$

O índice de compacidade pode ser calculado tanto para as quadras quanto para os edifícios. O valor médio para a quadra não é equivalente ao valor médio para as edificações, pois a existência de vários elementos aumenta a área superficial, reduzindo o índice. Deste modo, o **Ic** da quadra deverá ser sempre menor ou igual ao **Ic** médio dos edifícios que a compõem.

O resultado para a área de estudo é apresentado na Figura 6.15.

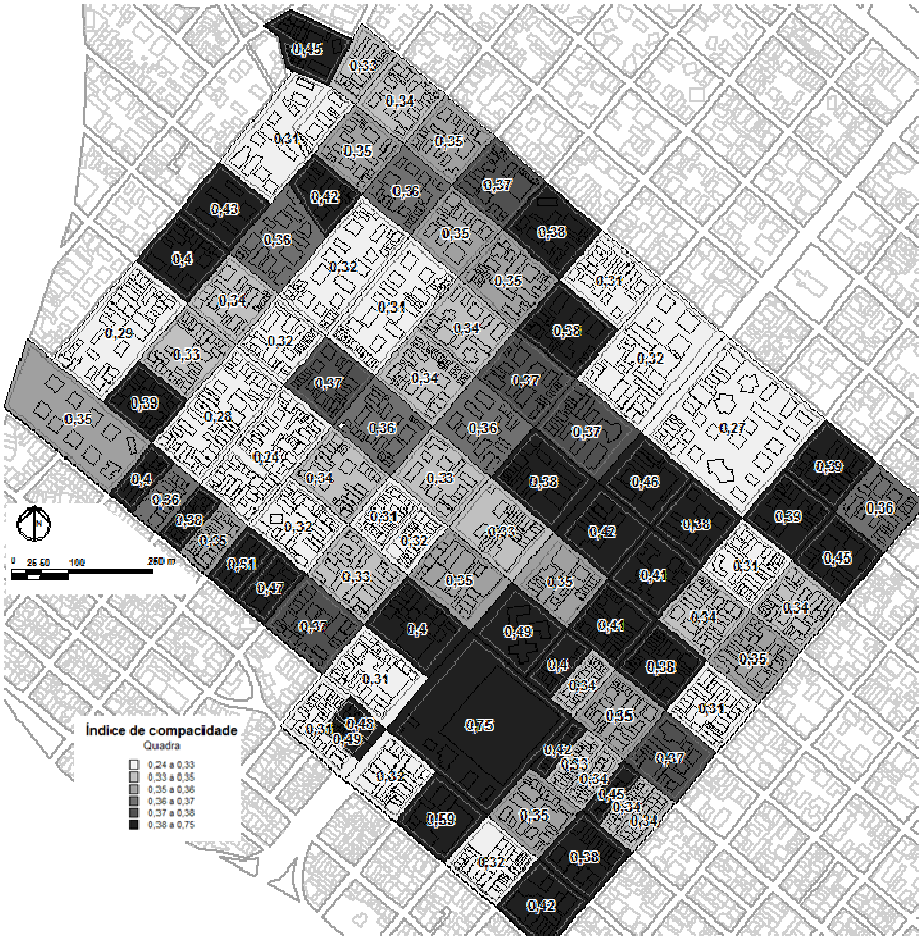


Figura 6.15: Mapeamento do Índice de Compacidade das quadras

É observada uma tendência de um menor índice de compacidade nas áreas verticalizadas, com maior coeficiente de aproveitamento. No entanto, houve casos em que áreas com variáveis de ocupação diferentes apresentaram um índice de compacidade semelhante.

6.2.3.4. Variação de alturas

Como último parâmetro avançado, foi calculada a variabilidade das alturas a partir do desvio padrão de altura em cada quadra. Este desvio pode se calculado considerando a área total da quadra ou apenas a área projetada construída:

$$DpH1 = \sqrt{\frac{\sum[A \cdot (H - \overline{H})^2]}{\sum A}}$$

Equação 6.13

$$DpH2 = \sqrt{\frac{\sum[A \cdot (H - \overline{H})^2] + (A_Q - \sum A) \cdot \overline{H}^2}{A_Q}}$$

Equação 6.14

Onde **A** é a área do edifício, **H** é a altura e $\mathbf{A_Q}$ é a área da quadra. O valor pode ainda ser dividido pela altura média, fornecendo um desvio padrão percentual da altura.

O resultado da aplicação na área de estudo mostra poucas diferenças entre as duas aplicações. Diferenças significativas ocorrem somente em quadras onde há somente prédios altos (433, 450, 493 e 539). Isto porque os prédios apresentam alturas homogêneas entre si, mas apresentam baixas taxas de ocupação.

Figura 6.16: Gráfico com resultados do desvio padrão por quadra

Optou-se por adotar os valores de DpH1, já que as variações que causam as diferenças entre DpH1 e DpH2 são contempladas em outras variáveis, tais como o Coeficiente de Aproveitamento, a Taxa de Ocupação e o Índice de Compacidade. A utilização de valores percentuais em relação à altura também evita a sobreposição de critérios.

A Figura 6.17 apresenta o mapeamento dos resultados de DpH1% para a área de estudo.

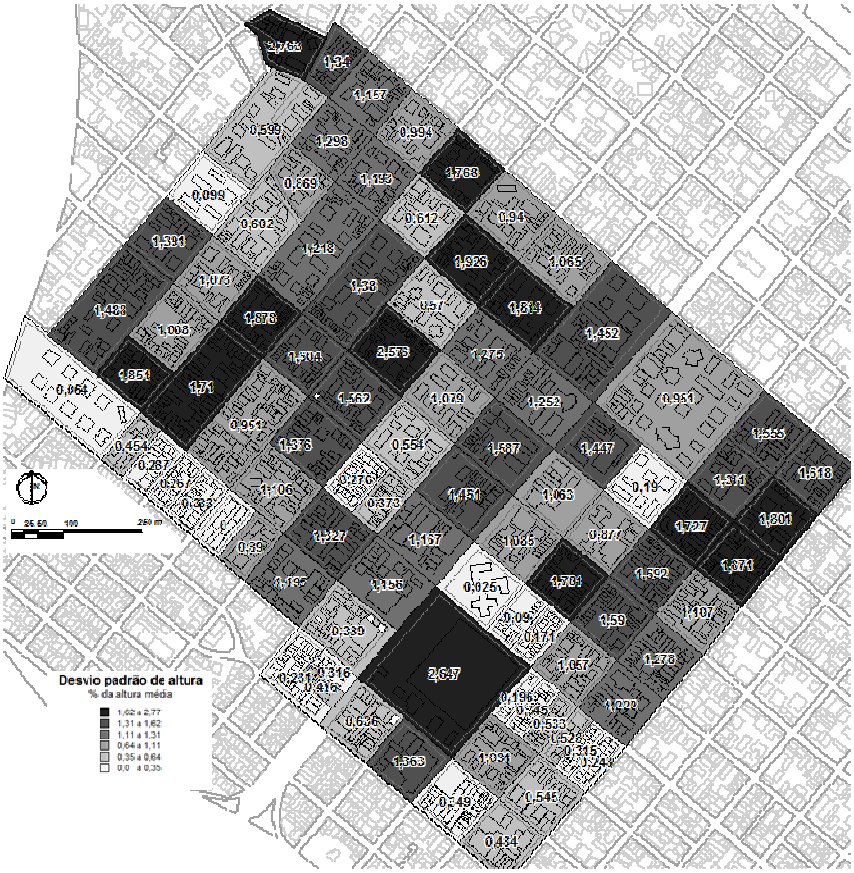


Figura 6.17: Mapeamento do Desvio padrão percentual das alturas

6.3. Simulações

Para que seja possível estabelecer correlações entre os dados produzidos, é necessário permitir o trabalho com os dados gerados em simulação nos programas de geoprocessamento. Para isso, foi desenvolvido um método para importação dos resultados das simulações de insolação e ventilação para o MapInfo, o que será detalhado neste item.

6.3.1. *Insolação*

O *Ecotect* indica na guia *Grid Management* o início em X e em Y da malha cálculo e a sua dimensão total, além do número de células. Com estas informações foi possível reconstruir a malha em um programa de CAD, para então exportá-la para o MapInfo, na tabela Insolação_Ecotec.

No aplicativo AutoCAD, a maneira mais eficiente encontrada para se gerar a malha foi desenhar o retângulo com as dimensões obtidas no *Ecotect* sobre um desenho georreferenciado, dividir os lados pelo número de células e desenhar o retângulo correspondente ao nó inferior esquerdo. Este objeto foi então ser multiplicado utilizando o comando *Array*, marcando a distância entre fileiras e colunas como sendo a dimensão da própria célula. Ao exportar o desenho para o MapInfo, a numeração das células na coluna ID é feita iniciando-se no

canto superior direito e seguindo para baixo e para a esquerda respectivamente.

No *Ecotect*, os resultados podem ser exportados no formato de arquivo de texto, em que os valores de insolação serão colocados em uma tabela com o mesmo formato (colunas e linhas) da malha original. Os dados foram rearranjados de forma seqüencial, colocando cada coluna abaixo do final da anterior e se inserido uma coluna numerada progressivamente, na ordem inversa – a primeira célula deve conter o maior número e a última o menor. Foi montada uma única planilha para as diversas simulações.

A estrutura da tabela Insolação_ecotect foi então alterada para incorporar as colunas para os dados de horas de sol: SolInverno, SolVerao, SolInverno45 e SolVerao45. As colunas foram atualizadas com valores da planilha gerada, para que os objetos de ambas as planilhas tinham o mesmo ID. O resultado final pode ser visto na Figura 6.18.

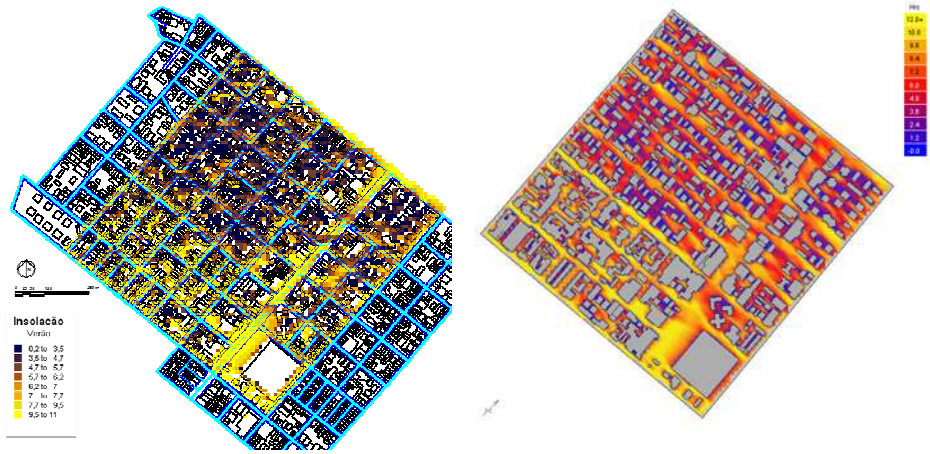


Figura 6.18: Resultado do Ecotec importado para o MapInfo e simulação original

Na tabela Quadras_bruta_central, foram cridas as colunas Sol_Verão, Sol_Inverno, Sol_Verão45, e Sol_Inverno45 que foram atualizadas com os valores médios das colunas correspondentes, de modo que o objeto da tabela Isolação_ecotect está contido no objeto da tabela Quadras_bruta_central. O resultado é apresentado na Figura 6.19.

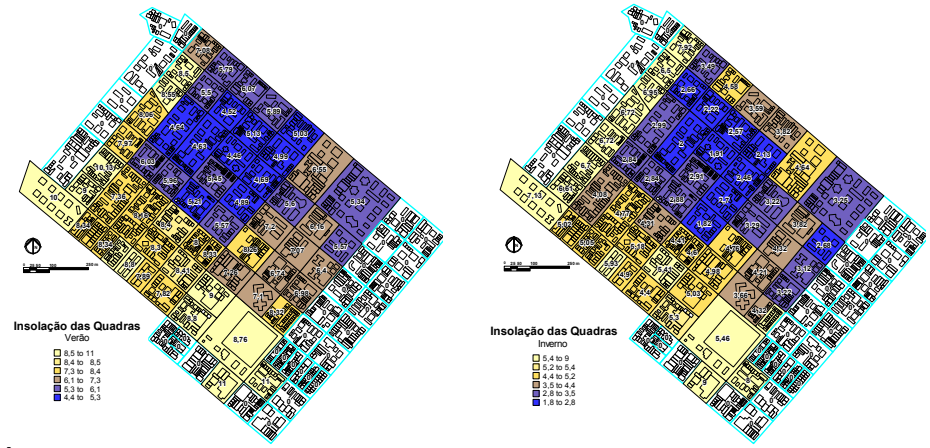


Figura 6.19: Resultado do Ecotec importado para o MapInfo

É possível observar que os resultados médios correspondem às áreas mais adensadas. Como áreas não modeladas foram incluídas no

cálculo, a avaliação deve considerar apenas as quadras que foram efetivamente simuladas.

6.3.2. *Vento CFD*

Para avaliação do vento médio, foi traçado um plano horizontal a 1,5 m de altura para cada simulação de vento realizada. Os valores foram exportados na forma de tabela, com informações das coordenadas da malha (X, Y e Z), a área de cada elemento e os valores de velocidade. Qualquer variável calculada pelo programa pode ser exportada desta maneira. Os arquivos gerados contaram com mais de 350.000 linhas e o número de colunas corresponde ao número de informações solicitadas.

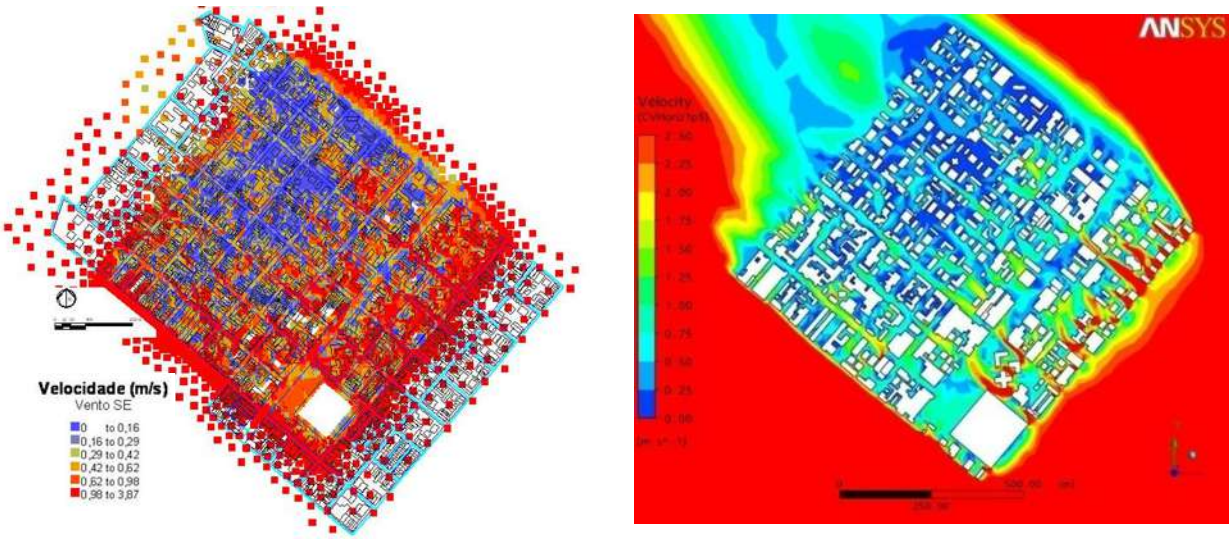
Os resultados foram combinados em uma única planilha, tomando-se o cuidado de alterar o cabeçalho de modo que ficasse identificada a direção de vento à qual a coluna se referia. A tabela foi exportada então para o MapInfo em formato de texto, solicitando-se que as colunas fossem nomeadas pela primeira linha da tabela.

O CFX apresentou erros ao tratar modelos utilizando coordenadas georreferenciadas, devido à ordem de grandeza dos valores de X e Y (330.000 para o primeiro e 7.387.000 para o segundo) e por isso os modelos foram movidos para próximo da origem no momento da simulação. Por isso, foram criadas duas colunas (Xgeo e Ygeo) na tabela do MapInfo onde foram calculadas as coordenadas georreferenciadas, desfazendo-se o deslocamento do modelo.

No MapInfo foi utilizada a ferramenta ***Create Points***, que gera objetos pontuais a partir de coordenadas na tabela. Bastou indicar então as colunas Xgeo e Ygeo como fontes para os dados da geração de pontos.

A Figura 6.20 apresenta um mapa de velocidades gerado sobre os pontos e uma comparação com o resultado da simulação original.

Figura 6.20: Resultado da simulação de vento SE importado para o MapInfo e simulação original



Na tabela Quadras_bruta_central, foram cridas as colunas Sol_Verão, Sol_Inverno, Sol_Verão45, e Sol_Inverno45 que foram atualizadas com os valores médios das colunas correspondentes, de modo que o

objeto da tabela Isolação_ecotect está contido no objeto da tabela Quadras_bruta_central. O resultado é apresentado na Figura 6.21.

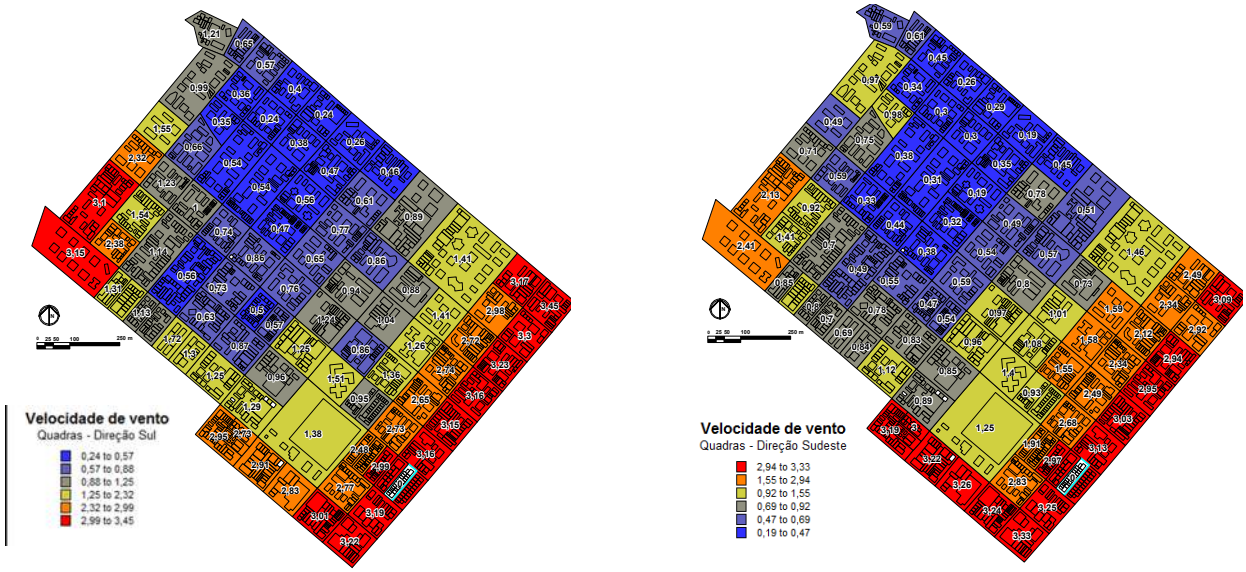


Figura 6.21: Resultado da simulação de vento SE importado para o MapInfo

A imagem permite verificar a redução progressiva da velocidade no sentido da penetração do vento, sendo ela mais intensa nas quadras mais adensadas.

Em seguida, foi tirada a média para as 8 direções de vento, apresentado na Figura 6.22.

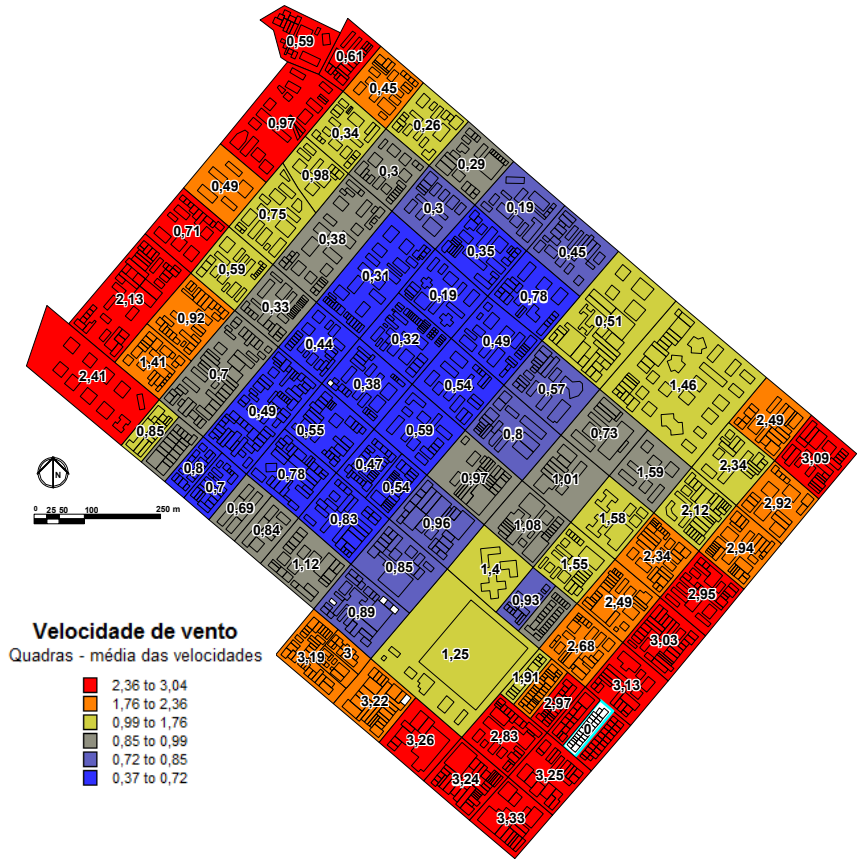


Figura 6.22: Mapeamento do Índice de Compacidade das quadras

O resultado foi então correlacionado com as características de ocupação de cada quadra.

6.3.3. *Temperatura- Modelo Analítica*

Os valores de temperatura foram obtidos para todos elementos do grid com intervalos de 10 m, utilizando a planilha apresentada no item 5.1.3. Foram consideradas as dimensões do *canyon* e as velocidades do vento simuladas, que dão a proporção da velocidade de referência a ser utilizada no cálculo dos coeficientes de convecção.

Foi tirada uma média a partir da malha utilizada nas simulações de insolação. Os valores médios por quadra foram então obtidos para as variáveis: temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin), temperatura média (Tmed) e Amplitude (Ampl).

Os resultados foram então comparados com a temperatura de referência, medida na estação meteorológica. Deste modo são calculados os parâmetros: diferença máxima de temperatura (dMax), diferença entre amplitudes (dAmpl), diferença entre as temperaturas máximas (dTmax), diferença entre as temperaturas médias (dTmed). As três últimas variáveis foram utilizadas na análise de resultados.

Os dados foram calculados com os dados da estação meteorológica de Congonhas para os dias de medida em fevereiro e setembro de 2007. Os resultados da média por quadra de dAmpl, dTmax e dTmed para os dois dias são apresentados respectivamente na Figura 6.23, na Figura 6.24 e na Figura 6.25

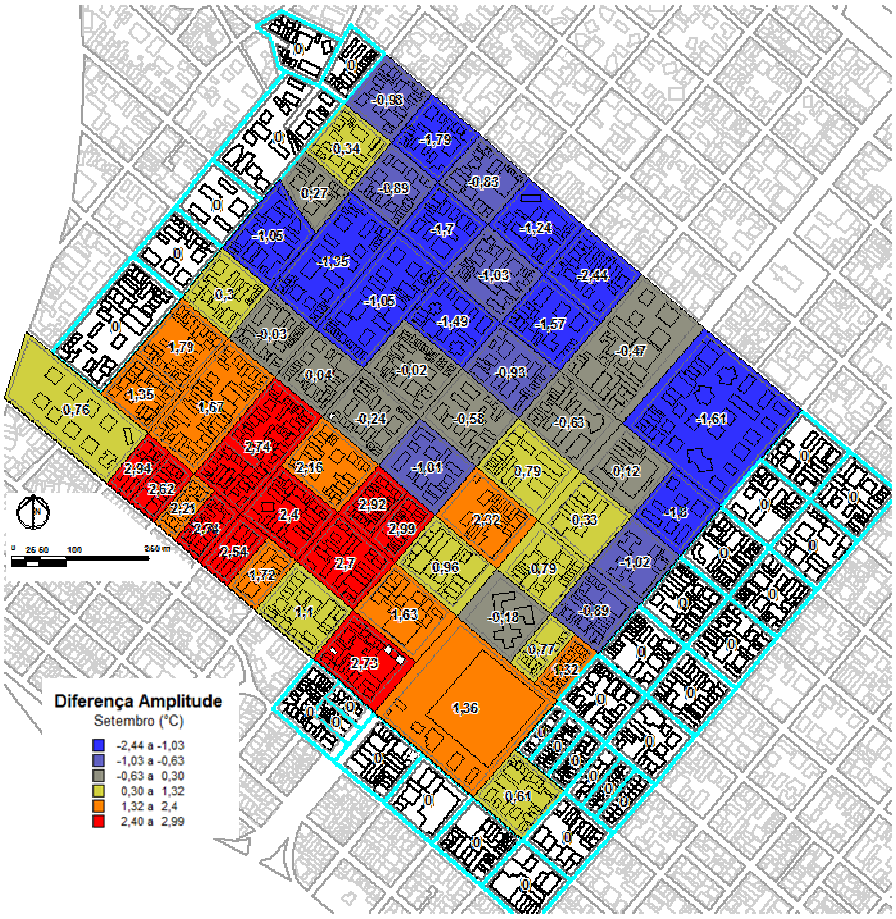


Figura 6.23: Mapeamento da diferença de amplitude térmica média por quadra

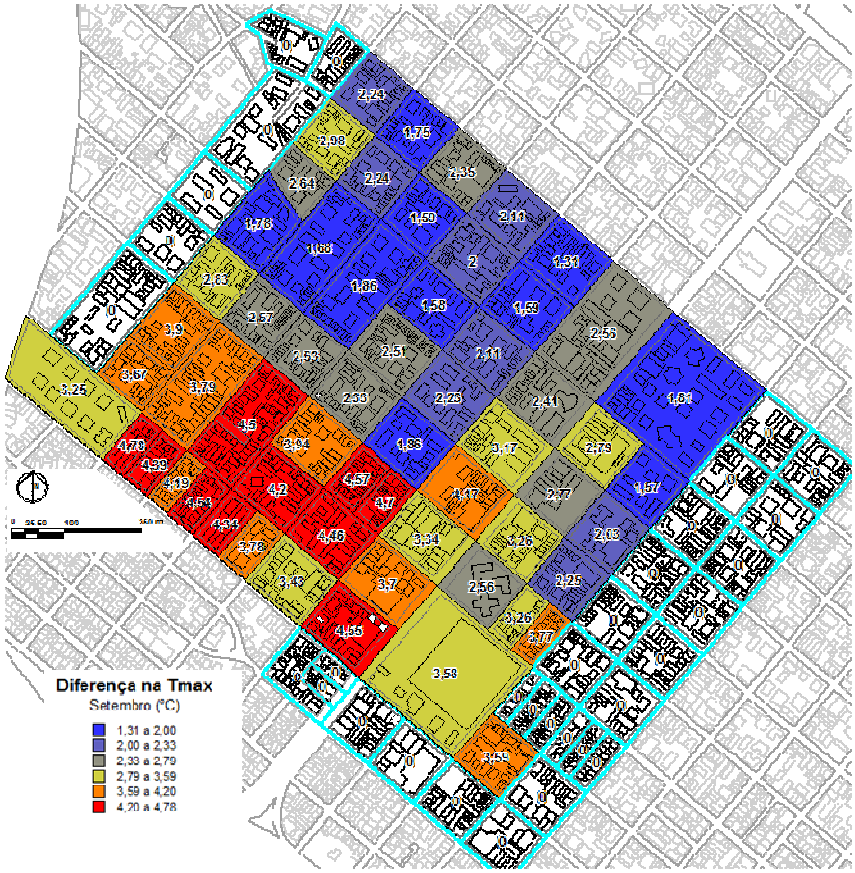


Figura 6.24: Mapeamento da diferença de temperatura máxima por quadra

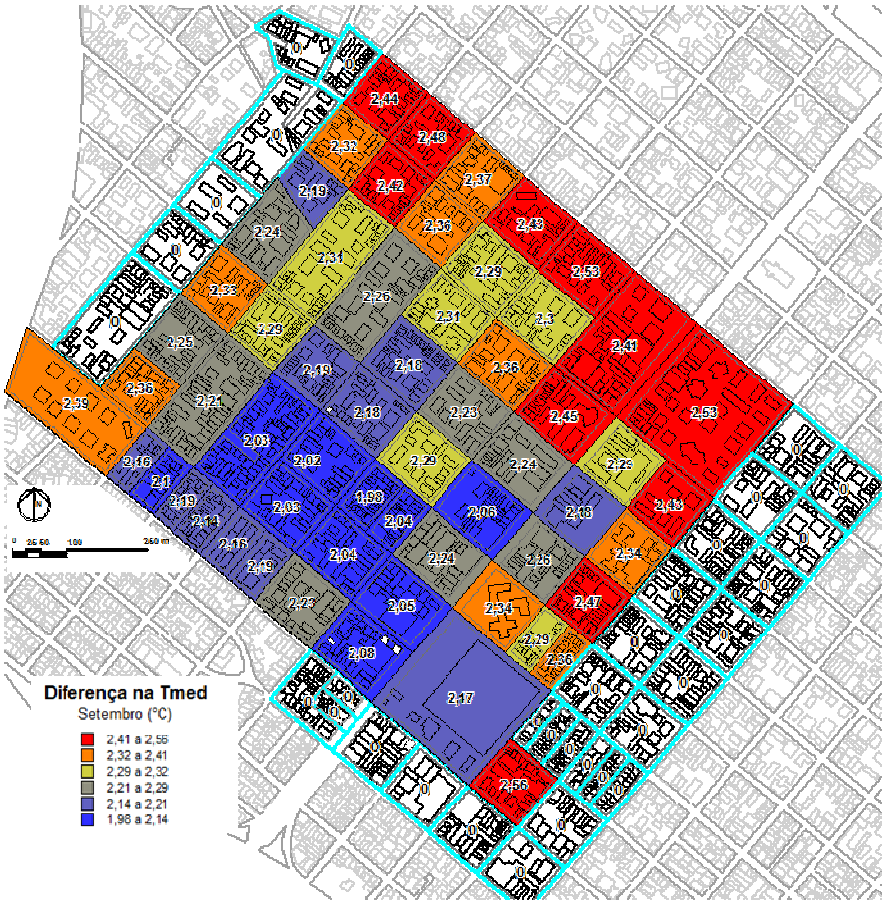


Figura 6.25: Mapeamento da diferença de temperatura média por quadra

6.3.4. *Consumo de energia*

Como cada para fachada foi calculado o valor de obstrução (distância e altura da fachada mais próxima), é possível, com a utilização da planilha elaborada no item 5.1.4, determinar o consumo de energia de ambientes adjacentes a cada uma das fachadas. Os cálculos são apresentados no ANEXO A6.

A variável E_Total_T será designada Consumo de Energia (CE) e será utilizada na avaliação dos resultados. Os resultados médios por quadra são apresentados Figura 6.26.

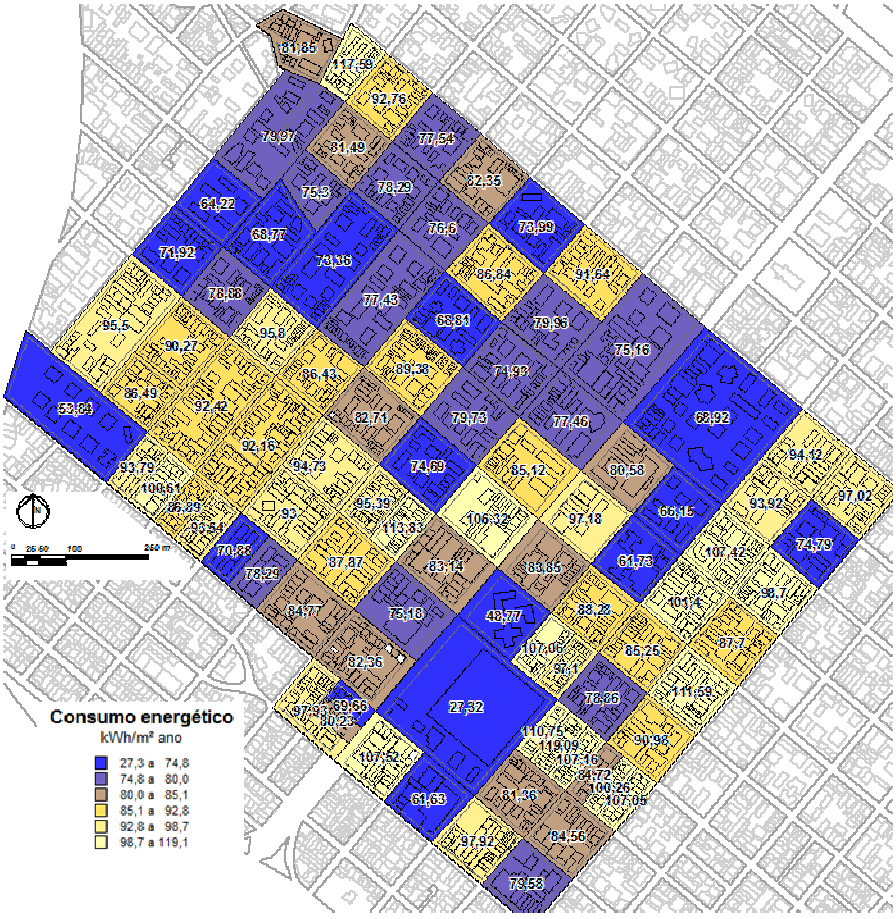


Figura 6.26: Mapeamento do consumo energético médio por quadra

6.3.5. *Equações de regressão*

Para cada uma das variáveis consideradas, foi estabelecida uma correlação entre as variáveis calculadas e os valores médios para ventilação e insolação simulados (DUARTE, 2000; ASSIS, 2000). Este tipo de análise foi aplicado em trabalhos anteriores, com mais ou menos propriedade. O avanço neste trabalho é a conjugação da avaliação de correlação com a simulação, que permite uma base de dados mais ampla para os estudos

Inicialmente, havia uma expectativa de correlação entre o aumento nas variáveis de ocupação e os parâmetros ambientais, indicada na Tabela 6.1.

	Insolação	Consumo de energa	Vento	Temp. média	Variação diária de temp.
Taxa de Ocupação (TO)	↑	↑	↔	↔	↓
Coeficiente de Aproveitamento (CA)	↓	↑	↔	↑	↓
Recuos (RM)	↓	↓	↓	↑	↑
Numero de Edifícios (NEd)	↔	↔	↓	↓	↓
Ângulo de Obstrução (Obst)	↓	↑	↓	↔	↓
Rugosidade (Zd e Z0)	↑	↔	↔	↑	↑
Índice de Compacidade (IC)	↓	↔	↔	↔	?
Variação na altura (DpH1 e DpH1%)	↑	↓	↑	↔	↔

Tabela 6.1: Hipótese inicial de correlação entre parâmetros de ocupação e variáveis ambientais

As setas indicam o que se esperava que ocorresse quanto houvesse aumento da variável independente. Uma seta para cima indica correlação positiva entre as variáveis, uma seta para baixo, correlação negativa.

O universo destas regressões compreende 91 quadras, das quais 50 foram simuladas. Os intervalos e valores médios para cada variável são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Limites das variáveis no universo estudado

Variáveis de Ocupação				Variáveis Ambientais			
Variável	**Máximo**	**Mínimo**	**Médio**	**Variável**	**Máximo**	**Mínimo**	**Médio**
CA	4,52	0,44	2,11	CE	119,09	27,32	85,61
TO	0,65	0,17	0,39	ΔAmpl	2,99	-2,44	0,62
RM	89,8	7,8	32,9	$\Delta T_{máx}$	4,78	1,31	2,79
NEd	64	3	20	$\Delta T_{méd}$	2,78	1,95	2,32
Obst	56,7	16	35,3	$\bar{u}$	3,68	0,07	1,45
Zd	25,26	2,098	8,26	$HS_{verão}$	11	4,5	7,16
Z0	21,29	0,05	1,70	$HS_{inverno}$	9	1,2	3,8
IC	0,75	0,24	0,37				
DpH1	37,77	0,52	15,89				
DpH1%	2,76	0,025	1,05				

Foi feita uma matriz de correlação para determinar se as variáveis independentes apresentavam relação entre si. A multicolinearidade altera os cálculos de coeficiente de determinação, tornando-os menos confiáveis. Equações regredidas com variáveis correlacionadas apresentam fraca possibilidade de extrapolação, já que falham ao

determinar a influência individual de cada variável. Deve-se, assim, evitar a utilização de variáveis correlacionadas como variáveis independentes em equações de regressão. A matriz de correlação é apresentada na Tabela 6.3:

Tabela 6.3: Matriz de correlação entre as variáveis independentes

	CA	TO	RM	NEd	Obst	Zd	ZO	IC	DpH1
DpH1%	0,24	-0,08	0,03	0,17	0,27	-0,08	0,10	0,10	0,68
DpH1	0,76	-0,52	0,30	0,13	0,75	0,50	0,22	-0,08	x
IC	0,03	-0,05	0,42	-0,15	-0,20	-0,06	0,00	x	
Z0	0,72	-0,71	0,60	-0,03	0,62	0,90	x		
Zd	0,89	-0,72	0,64	-0,01	0,77	x			
Obst	0,85	-0,67	0,27	0,09	x				
NEd	0,06	-0,12	-0,01	x					
RM	0,58	-0,63	x						
TO	-0,68	x							

Observa-se que a variável coeficiente de aproveitamento (**CA**) apresenta forte correlação com a maioria das outras variáveis. As exceções seriam o número de edifícios (**NEd**), índice de compacidade (**IC**) e a variação percentual da altura (**DpH1**). Os recuos médios (**RM**) apresentaram correlação mais fraca que as demais variáveis e sua utilização em conjunto com **CA** foi testada nas regressões.

A variável taxa de ocupação (**TO**) apresenta comportamento semelhante, embora as correlações sejam menores. A existência de uma correlação entre **TO** e **CA** é resultado de toda a área estar sujeita a uma mesma legislação de ocupação do solo que promove baixas densidades de ocupação do solo para maiores densidades totais de ocupação (conforme indica a correlação negativa). Em áreas onde vigorem outras normas, estas relações não seriam necessariamente verdadeiras e este fato deve ser observado. A correlação entre **TO** e **RM** é maior que entre **CA** e esta variável. No caso de **TO**, o coeficiente de correlação apresenta mesma ordem de grandeza dos coeficientes das demais variáveis, não se recomendando a utilização de **TO** em conjunto com os recuos médios nas regressões múltiplas.

Ainda assim, foi testada, para todos os casos a regressão múltipla com **CA**, **TO** e **RM** como variáveis independentes. Isto porque estas são parâmetros usuais no planejamento urbano e a verificação do seu impacto na determinação do ambiente térmico urbano é um dos principais objetivos deste trabalho. Ainda assim, recomenda-se cautela na utilização das equações desenvolvidas, principalmente na extrapolação para condições de ocupação muito diferentes daquelas existentes em bairros densos com ocupação formal na cidade de São Paulo. A esta equação se deu o nome de **equação padrão**.

A avaliação foi feita através de uma análise progressiva, iniciando-se em uma variável base (inicialmente trabalhou-se sempre com **CA** e **TO**), adicionando outras variáveis progressivamente e verificando-se alterações na qualidade estatística da regressão. Esta qualidade é determinada através do coeficiente de correlação (**r**), do coeficiente de

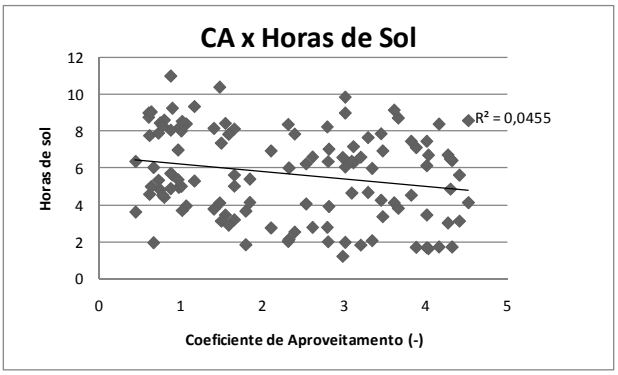
determinação (**r²**), do erro padrão da estimativa (**ep**) e do fator **F** e da significância relacionada Análise de Variância da equação. Aumentos na correlação e na determinação e reduções no erro padrão e no fator **F** representam melhorias na estimativa da regressão.

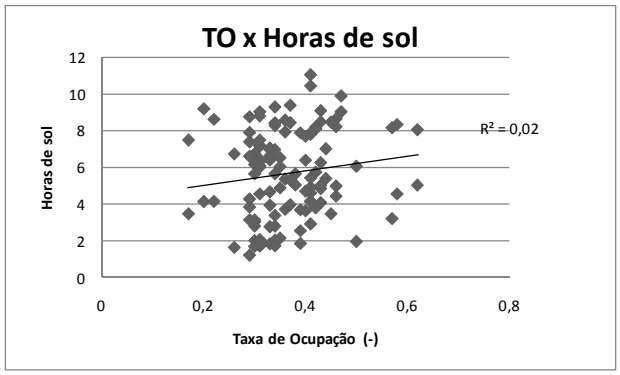
Devido à baixa correlação com as demais variáveis, a influência de **NEd**, **DpH1per** e de **IC** foi testada para todos os casos, exceto para a ventilação.

6.3.5.1. Insolação

Como o estudo de insolação utilizou um modelo menor que a área mapeada, os resultados foram avaliados somente para as áreas simuladas. O resultado da correlação entre os parâmetros de ocupação e o número de horas de sol no solo ao nível do pedestre apresentou alta dispersão de dados e uma fraca correlação.

Figura 6.27: Correlação entre CA e TO e a insolação





A análise das demais variáveis mostrou que isso se aplica a todas elas com maior ou menor intensidade (Tabela 6.4).

Tabela 6.4: Fatores de correlação e determinação com insolação para cada variável independente

	r	r²		r	r²
CA	-0.320	0.102	Obst	-0.352	0.124
TO	0.200	0.040	Zd	-0.305	0.093
RM	-0.058	0.003	Z0	-0.200	0.040
NEd	-0.089	0.008	IC	0.265	0.070
			DpH1	-0.362	0.131
			DpH1%	-0.058	0.003

Para tentar minimizar a dispersão, foi feita uma avaliação separada dos dados de verão e inverno.

Para o verão, foram obtidas as equações, a partir das variáveis padrão e daquelas que apresentaram melhor ajuste, respectivamente:

$$HS_v = 3{,}537 + 0{,}0031\,CA - 0{,}451\,TO - 0{,}216\,RM$$

r =	0,420	r² =	0,176	r²aj =	0,146
ep =	1,487	F =	3,92	p	0,0131

Equação 6.15

$$HS_v = 4{,}896 - 0{,}051\,Obst + 2{,}062\,IC$$

r =	0,400	r² =	0,160	r²aj =	0,145
ep =	1,488	F =	5,33	p	0,0076

Equação 6.16

As equações de inverno apresentaram níveis de confiança maiores que 0,05 e, por isso, não foram apresentadas neste trabalho.

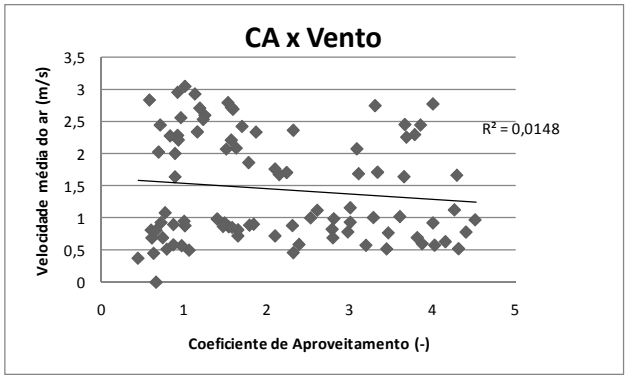
Devido ao baixo valor do coeficiente de determinação, não se recomenda a utilização desta equação para a obtenção de parâmetros de planejamento.

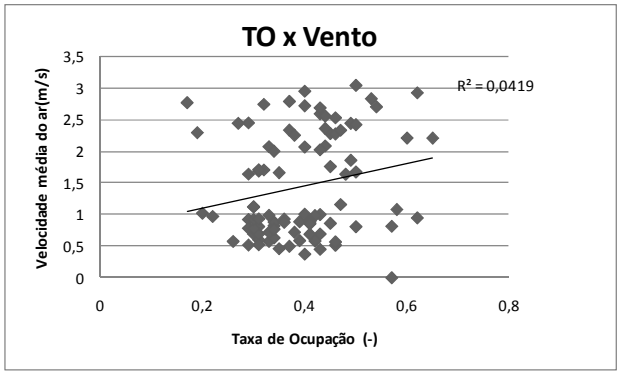
6.3.5.2. Ventilação

A ventilação mostrou-se a variável mais complexa a ser avaliada pela regressão. Através dos modelos de rugosidade e do estudo dos perfis logarítmicos de velocidade, é relativamente simples estimar a velocidade do vento na camada limite urbana. Estimar o seu valor dentro da camada de rugosidade, no entanto, é uma tarefa complexa, pois a interferência combinada das estruturas produz efeitos de difícil previsão.

O vento na camada abaixo das coberturas (UCL) tende a apresentar grande variação, mas foi testada a hipótese de que a velocidade média poderia ser estimada a partir dos parâmetros de ocupação. Partiu-se do mesmo raciocínio aplicado às demais variáveis, com a análise gráfica da correlação entre as variáveis e estabelecimento dos coeficientes de correlação e determinação. O resultado para CA e TO é apresentado na Figura 6.28:

Figura 6.28: Correlação entre CA e TO e vento





Observou-se uma fraca correlação entre estas variáveis. O teste para os demais parâmetros revelou fatores semelhantes (Tabela 6.5).

Tabela 6.5: Fatores de correlação e determinação com vento para cada variável independente

	r	r²
CA	-0.122	0.015
TO	0.205	0.042
RM	-0.355	0.126
NEd	-0.108	0.012

	r	r²
Obst	0.036	0.001
Zd	-0.102	0.010
Z0	-0.020	0.000
IC	0.114	0.013
DpH1	-0.182	0.033
DpH1%	-0.038	0.001

Os melhores coeficientes de determinação foram obtidos para IC e para RM, mas não podem ser considerados significativos. Mesmo as variáveis aerodinâmicas Zd e Z0 não apresentaram correlações satisfatórias. Considerou-se, assim, que a velocidade do vento não

pode ser determinada exclusivamente pelas características da quadra. Foi então verificada a hipótese de que isto se deve à histerese espacial do vento, sendo necessário estudar o caminho percorrido pelo ar para se determinar adequadamente a sua velocidade na quadra específica.

Para isto, foram construídos mapas com linhas paralelas a cada direção do vento, espaçadas em 100 m, semelhantes ao *grid* utilizado para medição dos recuos. As linhas foram divididas em trechos, delimitados por cada quadra e a informação das quadras foi transferida para os trechos através do programa de geoprocessamento. Isto permitiu verificar o comportamento do vento médio ao longo percursos definidos.

Foram observados, inicialmente, o comportamento do vento ao longo do percurso, correlacionando a velocidade e a distância do ponto de origem. Cada linha produzia dois gráficos, pois cada direção representa dois sentidos de vento. Na Figura 6.29 tem-se um exemplo para uma linha no sentido SE-NW (sendo 0 m o ponto mais a sudeste da linha e cerca de 1300 m o ponto mais a noroeste). É também apresentado o valor de Z0 para as quadras em questão.

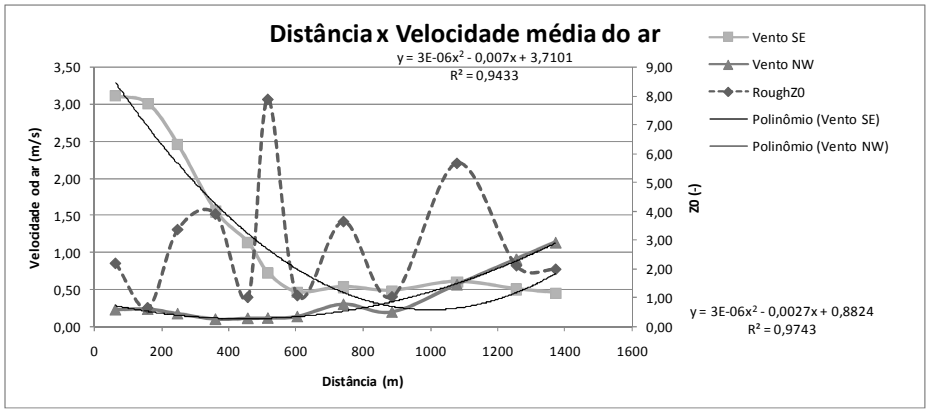


Figura 6.29: Perfil de velocidade do vento ao longo de uma linha paralela à sua direção

Neste gráfico é difícil observar qualquer relação entre a velocidade e a rugosidade das quadras. Porém, adicionando-se uma linha de tendência polinomial à relação entre distância e velocidade, consegue-se um ótimo ajuste com uma equação de segundo grau. Como a equação da curva variava para cada linha e sentido de vento e apresentava desvios da curva de regressão, foi estudada a possibilidade de que a inclinação da curva em um determinado ponto pudesse estar relacionada com as variáveis de ocupação.

Isto foi feito comparando-se a variação da velocidade do vento sobre o comprimento do trecho com a variação de cada variável sobre o comprimento do trecho. Como a área simulada é menor que a área mapeada, alguns trechos não apresentavam na simulação as características existentes na base georreferenciada. Deste modo, sempre que uma quadra não havia sido simulada, o valor da variável de ocupação era considerado como sendo 10% do valor mínimo que aquela variável assumia no conjunto. Com isto, por exemplo, se o valor mínimo de Z0 é de 0,20, todas as quadras não simuladas eram consideradas como tendo Z0 de 0,02. Isto foi feito para evitar valores nulos que prejudicassem a regressão. A Figura 6.30 mostra a relação

entre a variação da obstrução e variação da velocidade do ar para uma das linhas no sentido SE-NW.

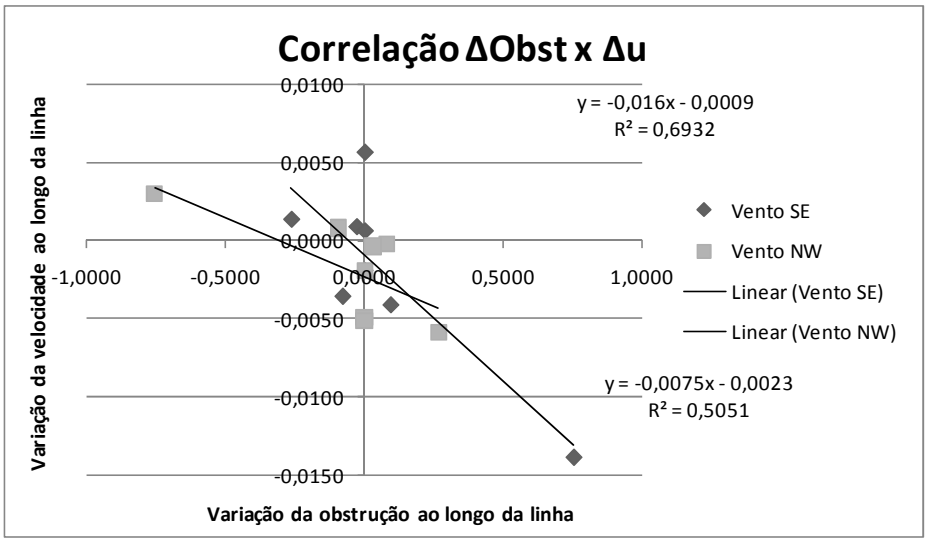


Figura 6.30: Correlação entre as variações de obstrução e de velocidade ao longo da linha (vento SE)

Observa-se que o coeficiente de determinação aumenta significativamente se comparado aos testes anteriores. A correlação da variação de cada parâmetro urbanístico com a variação da velocidade de vento foi comparada para os sentidos SE e NW separadamente e para o total de dados desta direção.

Tabela 6.6: Fatores de correlação e determinação com variação de vento para cada variável independente (total)

	SE	NW	Total		SE	NW	Total
CA	-0.25	-0.11	-0.16	Obst	-0.39	-0.18	-0.25
TO	-0.27	-0.17	-0.20	Zd	0.00	-0.06	-0.16
RM	-0.23	-0.12	-0.16	Z0	-0.25	-0.07	-0.14
NEd	Não avaliada			IC	-0.36	-0.23	-0.27
				DpH1	-0.26	-0.15	-0.19
				DpH1%	-0.16	-0.16	-0.15

Quando se eliminam os valores das quadras não simuladas a correlação aumenta significativamente, sendo que este foi o modelo utilizado para se obterem as regressões.

Tabela 6.7: Fatores de correlação e determinação com variação de vento para cada variável independente (só simuladas)

	SE	NW	Total		SE	NW	Total
CA	-0.36	-0.29	-0.33	Obst	-0.56	-0.48	-0.52
TO	-0.39	-0.47	-0.43	Zd	0.00	-0.12	-0.23
RM	-0.33	-0.34	-0.33	Z0	-0.36	-0.20	-0.28
NEd	Não avaliada			IC	-0.36	-0.23	-0.51
				DpH1	-0.38	-0.40	-0.39
				DpH1%	-0.24	-0.42	-0.32

As regressões foram feitas para três grupos: cada sentido isoladamente; para os conjuntos dos sentidos perpendiculares à malha viária (SE, NW, SW, NE) e dos sentidos diagonais à malha viária (N, S, E,W), e para a totalidade dos dados disponíveis. Estavam disponíveis

para análise 121 trechos SE-NW, 112 trechos SW-NE, 152 trechos N-S e 149 trechos E-W. A equação para cada sentido de vento é dada no ANEXO A7.

Para o grupo de direções perpendiculares à malha de ruas, o resultado para a equação padrão foi:

$$\frac{\Delta\bar{u}}{\Delta x} per = -0{,}0004 - 0{,}0062\ \Delta CA - 1{,}1585\ \Delta TO — 0{,}0026\ \Delta RM$$

Equação 6.17

r =	0,555	r² =	0,308	r²aj =	0,303
ep =	0.0043	F =	42,06	p	<0,001

Para o melhor ajuste, tem-se:

$$\frac{\Delta\bar{u}}{\Delta x} per = 0{,}000008 - 0{,}0090\ \Delta Obst - 1{,}0359\ \Delta IC$$

Equação 6.18

r =	0,580	r² =	0,336	r²aj =	0,334
ep =	0.0042	F =	71,45	p	<0,001

Para o grupo de direções diagonais à malha de ruas, a equação padrão assumiu a forma:

$$\frac{\Delta\bar{u}}{\Delta x} diag = 0{,}0022 + 0{,}0245\ \Delta CA - 1{,}6117\ \Delta TO — 0{,}0067\ \Delta RM$$

Equação 6.19

r =	0,669	r² =	0,448	r²aj =	0,445
ep =	0.0049	F =	99,19	p	<0,001

Observa-se uma inversão no sinal do coeficiente de CA. O coeficiente de determinação também foi melhor que o obtido na equação padrão perpendicular. Por serem casos relativamente fáceis de identificar durante um mapeamento, recomenda-se que a diferenciação quanto a incidência do vento seja feita ao se aplicar este método. A equação com melhor ajuste obtida foi:

$$\frac{\Delta\bar{u}}{\Delta x} diag = 0{,}000013 - 0{,}0061\ \Delta Obst - 1{,}1528\ \Delta IC$$

Equação 6.20

r =	0,563	r² =	0,317	r²aj =	0,315
ep =	0.0054	F =	83,21	p	<0,001

Observa-se que neste caso, a equação padrão apresentou resultados estatísticos melhores, embora deva-se sempre considerar o efeito da multicolinearidade neste caso.

Analisando-se o conjunto de dados, tem-se a seguinte equação padrão:

$$\frac{\Delta\bar{u}}{\Delta x} = 0{,}0011 - 0{,}0001\ \Delta CA - 1{,}4781\ \Delta TO — 0{,}0049\ \Delta RM$$

Equação 6.21

r =	0,611	r² =	0,374	r²aj =	0,372
ep =	0.0048	F =	130,62	p	<0,001

A equação apresentou um alto nível de significância e uma correlação média com os resultados da base de cálculo. No entanto, as variáveis

ambientais foram suficientes para explicar somente cerca de um terço da variação da velocidade média do ar nas quadras. Chama a atenção o alto erro padrão, comparado aos valores que $\boldsymbol{\Delta\bar{u}/\Delta x}$ assume. Os valores máximos e mínimos da base de cálculo são respectivamente 0,0517 e -0,0285, o que significaria um erro entre 10% a 15% do intervalo da variável. No entanto, a média dos valores é de 0,0011 e o erro padrão representa uma variação de 500% da média. Como este valor é multiplicado ainda pela distância, podem ser obtidos resultados falseados, devendo-se ter muito cuidado na aplicação desta equação.

Os coeficientes são sempre negativos, indicando que uma variação positiva dos parâmetros entre quadras leva a uma redução na velocidade do vento. Este resultado correspondeu à expectativa inicial.

Como no caso da da incidência de vento diagonal, a equação padrão mostrou resultados estatísticos melhores que as equações ajustadas de parâmetros não correlacionados. O melhor ajuste continuou sendo para as variáveis **Obst** e **IC**, com a seguinte forma:

Equação 6.22

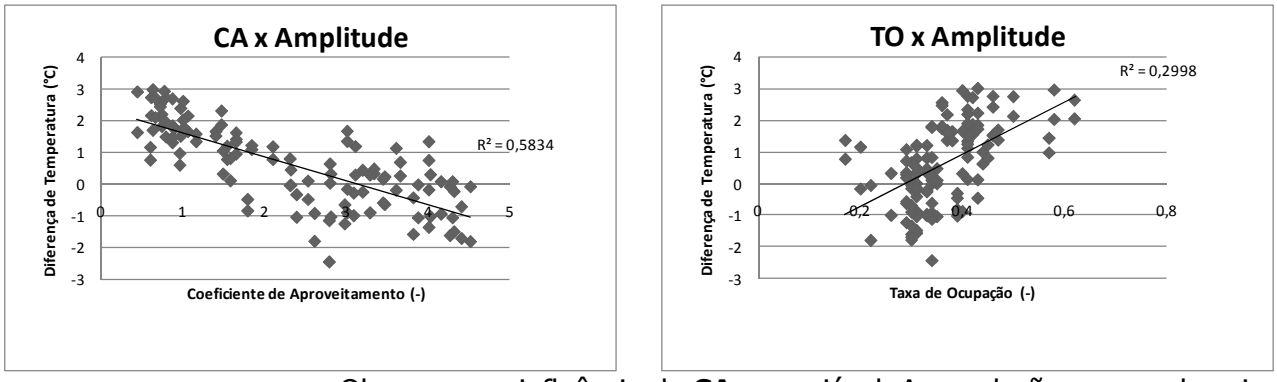
$$\frac{\Delta\bar{u}}{\Delta x} = 0{,}000006 + 0{,}129\,\Delta Obst - 1{,}6574\,\Delta IC$$

r =	0,523	r² =	0,355	r²aj =	0,353
ep =	0.0049	F =	120,22	p	<0,001

6.3.5.3. Temperatura

Os resultados de temperatura foram calculados para a mesma malha utilizada no estudo de insolação, para evitar distorções na borda da área mapeada. As regressões foram realizadas considerando-se separadamente os resultados de Setembro e Fevereiro e para o conjunto de dados. As equações de regressão individuais para as medidas de fevereiro e setembro foram apresentadas no ANEXO A7. Não foram avaliados os valores absolutos e sim as diferenças entre o valor obtido na simulação para o ponto e o valor medido na estação meteorológica para aquela variável. Para a diferença de amplitude térmica, as correlações entre CA e TO e o conjunto de dados é apresentada na Figura 6.31.

Figura 6.31: Correlação entre CA e TO e diferença na amplitude térmica



Observa-se a influência de **CA** na variável. A correlação com as demais variáveis independentes é dada na Tabela 6.8

	r	r²
CA	-0.764	0.583
TO	0.548	0.300
RM	-0.276	0.076
NEd	0.110	0.012

	r	r²
Obst	-0.821	0.674
Zd	-0.670	0.449
Z0	-0.436	0.191
IC	0.092	0.008
DpH1	-0.752	0.565
DpH1%	-0.221	0.049

Tabela 6.8: Fatores de correlação e determinação com a amplitude térmica para cada variável independente

Para o total de dados têm-se as variáveis **CA** e **Obst** com forte influência na amplitude térmica local. É possível notar, ao contrário do esperado, a fraca influência de **IC** no resultado final. Neste caso a variável **DpH1%** apresentou uma correlação maior do que para as outras variáveis ambientais. A equação padrão para esta variável é:

$$\Delta Amp = 1{,}008 - 0{,}768\,CA + 2{,}058\,TO + 0{,}017\,RM$$

r =	0,783	r² =	0,613	r²aj =	0,606
ep =	0.802	F =	60,21	p	<0,001

Equação 6.23

Para o melhor ajuste, obtém-se:

$$\Delta Amp = 4{,}110 - 0{,}089\,Obst + 0{,}226\,DpH1\%$$

r =	0,830	r² =	0,689	r²aj =	0,686
ep =	0.715	F =	127,42	p	<0,001

Equação 6.24

Observa-se que, apesar da utilização de **DpH1%** na equação, a obstrução é praticamente suficiente para determinar a extensão da variação de temperatura média da quadra. O erro padrão também é aceitável, considerando-se a necessidade de precisão e os valores que a diferença de amplitude assume.

Para a diferença na temperatura máxima, a participação das variáveis independentes apresenta configuração semelhante, já que esta variável está ligada à variação na amplitude térmica local. Para o conjunto de dados, os coeficientes de correlação e determinação são dados a seguir:

	r	r²
CA	-0.741	0.548
TO	0.534	0.285
RM	-0.263	0.069
NEd	0.074	0.005

	r	r²
Obst	-0.789	0.622
Zd	-0.634	0.402
Z0	-0.408	0.167
IC	0.109	0.012
DpH1	-0.741	0.548
DpH1%	-0.231	0.053

Tabela 6.9: Fatores de correlação e determinação com a diferença em Tmax para cada variável independente

A equação de regressão padrão resultante foi:

Equação 6.25

$$\Delta T_{máx} = 2{,}290 - 0{,}486\ CA + 1{,}372\ TO + 0{,}011\ RM$$

r =	0,761	r² =	0,613	r²aj =	0,606
ep =	0.546	F =	52,15	p	<0,001

Para o melhor ajuste, obteve-se:

Equação 6.26

$$\Delta T_{máx} = 4{,}999 - 0{,}056\ Obst - 0{,}193\ DpH1\%$$

r =	0,801	r² =	0,641	r²aj =	0,638
ep =	0.502	F =	102,80	p	<0,001

Novamente a determinação do resultado pode ser feito quase que exclusivamente pela obstrução. A precisão obtida nesta equação é maior, com a redução do erro padrão.

A diferença na temperatura média assume valores menores e foi sempre positiva. A correlação com as variáveis de planejamento é menor do que nos dois casos anteriores.

Tabela 6.10: Fatores de correlação e determinação com a diferença em Tmed para cada variável independente

	r	r²		r	r²
CA	0.498	0.248	Obst	0.546	0.298
TO	-0.390	0.152	Zd	0.506	0.256
RM	0.254	0.065	Z0	0.393	0.155
NEd	-0.249	0.062	IC	0.073	0.005
			DpH1	0.384	0.148
			DpH1%	0.033	0.001

Como equação de regressão padrão resultante obteve-se:

Equação 6.27

$$\Delta T_{méd} = 2{,}289 + 0{,}0588\ CA - 0{,}251\ TO - 0{,}00037\ RM$$

r =	0,506	r² =	0,256	r²aj =	0,243
ep =	0.152	F =	13,10	p	<0,001

O melhor ajuste é conseguido com as variáveis **Obst** e **IC**, embora a primeira, novamente, apresente maior significância que a segunda no resultado final.

Equação 6.28

$$\Delta T_{méd} = 1{,}816 + 0{,}009\ Obst + 0{,}50\ IC$$

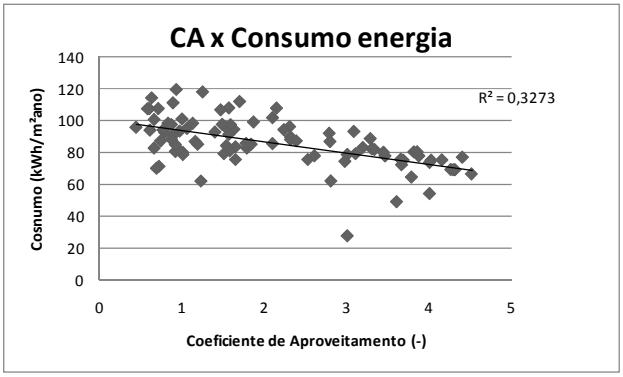
r =	0,580	r² =	0,337	r²aj =	0,331
ep =	0.143	F =	29,19	p	<0,001

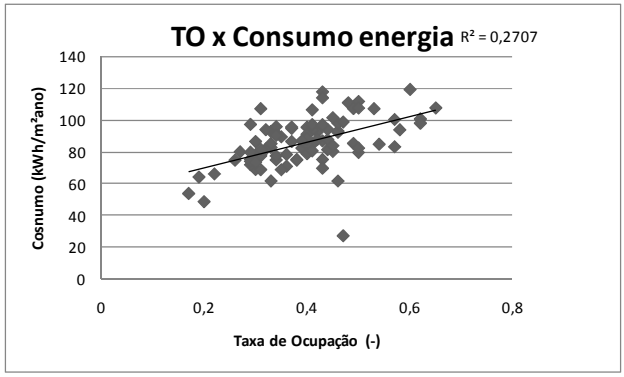
Observa-se que a Equação 6.28 assume uma diferença mínima de 1,86°C entre a temperatura média de um recinto urbano e a temperatura média de uma estação meteorológica. O erro padrão encontrado é da ordem de 10% das variações na temperatura média, o que pode ser considerado aceitável. Os coeficientes de determinação obtidos foram menores do que os encontrados na avaliação das demais variáveis. Estima-se que isto ocorreu principalmente por que o modelo de cálculo de temperaturas tende a subestimar o resfriamento noturno, conforme colocado no item 5.1.3.

6.3.5.4. Consumo de energia

Avaliando-se a influência separada das variáveis independentes, percebe-se que o consumo de energia é influenciado tanto pelo coeficiente de aproveitamento quanto pela taxa de ocupação, com sinais invertidos (Figura 6.32).

Figura 6.32: Correlação entre CA e TO e consumo de energia





A correlação com as demais variáveis é dada na Tabela 6.11.

Tabela 6.11: Fatores de correlação e determinação com o consumo de energia para cada variável independente

	r	r²		r	r²
CA	-0,572	0,327	Obst	-0,269	0,073
TO	0,520	0,271	Zd	-0,545	0,297
RM	-0,718	0,515	Z0	-0,524	0,274
NEd	0,448	0,201	IC	-0,553	0,305
			DpH1	-0,284	0,081
			DpH1%	-0,066	0,004

Dentre as demais variáveis, observa-se que a maior correlação ocorre com os recuos médios. A equação padrão é dada por:

$$CE = 113{,}0 - 3{,}0\,CA - 3{,}0\,TO - 0{,}6\,RM$$

Equação 6.29

r =	0,743	r² =	0,551	r²aj =	0,541
ep =	10,285	F =	35,63	p	<0,001

A equação com melhor ajuste, excluindo-se as variáveis correlacionadas é dada por:

$$CE = 139{,}4 - 4{,}6\,CA - 88{,}7\,IC - 0{,}3\,RM$$

Equação 6.30

r =	0,821	r² =	0,674	r²aj =	0,666
ep =	8,773	F =	59,84	p	<0,001

As variáveis DpH1% e NEd contribuíram para um aumento no coeficiente de determinação, mas não de maneira significativa.

As equações para consumo desagregado de iluminação, aquecimento e resfriamento são apresentadas no ANEXO A7.

6.4. Avaliação dos resultados

As equações desenvolvidas no item anterior são limitadas pela pequena quantidade de dados em que são baseadas e pelos coeficientes de determinação reduzidos na maioria dos casos. A multicolinearidade das variáveis também é motivo para desaconselhar sua generalização, principalmente para situações climáticas e de ocupação muito diferentes das existentes na área piloto.

Ainda assim, estas equações podem servir para balizar estimativas iniciais, quando poucos dados estão disponíveis. Estas estimativas devem sempre ser verificadas por meio de análises aprofundadas e simulações, mas se constituiriam em regras gerais (ou utilizando um termo corrente na língua inglesa, "*rules of thumb*") quando se fosse iniciar um processo de desenho urbano, principalmente nos estágios de desenvolvimento de planos de massa.

Por exemplo, fixando-se os recuos médios em 15 m, pode-se tentar avaliar a relação entre TO e CA, buscando um menor consumo energético e evitando aumentos de temperatura. Foram usadas a Equação 6.25 e a Equação 6.29 para calcular os valores.

Tabela 6.12: Consumo de energia (kWh/m²ano) e aumento da temperatura (°C)

CE		**CA**								
		0,5	**1,0**	**1,5**	**2,0**	**2,5**	**3,0**	**3,5**	**4,0**	**4,5**
	0,2	110,9	109,4	107,9	106,4	104,9	103,4	101,9	100,4	98,9
	0,3	110,6	109,1	107,6	106,1	104,6	103,1	101,6	100,1	98,6
TO	**0,4**	110,3	108,8	107,3	105,8	104,3	102,8	101,3	99,8	98,3
	0,5	110,0	108,5	107,0	105,5	104,0	102,5	101,0	99,5	98,0
	0,6	109,7	108,2	106,7	105,2	103,7	102,2	100,7	99,2	97,7
$\Delta T_{máx}$		**CA**								
		0,5	**1,0**	**1,5**	**2,0**	**2,5**	**3,0**	**3,5**	**4,0**	**4,5**
	0,2	2,16	1,91	1,67	1,43	1,19	0,94	0,70	0,46	0,21
	0,3	2,29	2,05	1,81	1,57	1,32	1,08	0,84	0,59	0,35
TO	**0,4**	2,43	2,19	1,95	1,70	1,46	1,22	0,97	0,73	0,49
	0,5	2,57	2,33	2,08	1,84	1,60	1,35	1,11	0,87	0,62
	0,6	2,71	2,46	2,22	1,98	1,73	1,49	1,25	1,01	0,76

Observa-se que ambas as variáveis diminuem com o aumento do coeficiente de aproveitamento, que deve, deste modo, ser o maior possível. As variações na taxa de ocupação, por outro lado, apresentam sentidos opostos para as duas variáveis.

O intervalo de variação vai de 97,7 a 110,9 kWh/(m² ano) para o consumo de energia (variação de 13,2 kWh) e de 0,21 a 2,71°C para a diferença de temperatura. Pode-se calcular a diferença entre cada ponto e o valor mínimo, dividindo-se o intervalo pelo resultado total

CE		CA								
		0,5	**1,0**	**1,5**	**2,0**	**2,5**	**3,0**	**3,5**	**4,0**	**4,5**
	0,2	1,00	0,89	0,77	0,66	0,55	0,43	0,32	0,20	0,09
	0,3	0,98	0,86	0,75	0,64	0,52	0,41	0,30	0,18	0,07
TO	**0,4**	0,95	0,84	0,73	0,61	0,50	0,39	0,27	0,16	0,05
	0,5	0,93	0,82	0,70	0,59	0,48	0,36	0,25	0,14	0,02
	0,6	0,91	0,80	0,68	0,57	0,45	0,34	0,23	0,11	0,00
$\Delta T_{máx}$		**CA**								
		0,5	**1,0**	**1,5**	**2,0**	**2,5**	**3,0**	**3,5**	**4,0**	**4,5**
	0,2	0,78	0,68	0,58	0,49	0,39	0,29	0,19	0,10	0,00
	0,3	0,83	0,74	0,64	0,54	0,44	0,35	0,25	0,15	0,06
TO	**0,4**	0,89	0,79	0,69	0,60	0,50	0,40	0,31	0,21	0,11
	0,5	0,94	0,85	0,75	0,65	0,56	0,46	0,36	0,26	0,17
	0,6	1,00	0,90	0,81	0,71	0,61	0,51	0,42	0,32	0,22

Tabela 6.13: Variação dos valores em relação à variação máxima para consumo de energia e diferença na temperatura máxima

O resultado indica que a variável diferença de temperatura máxima é mais influenciada pela taxa de ocupação, devendo ser preponderante. Deste modo, seria recomendado para este caso utilizar um alto coeficiente de aproveitamento com uma pequena taxa de ocupação

Os resultados podem ser melhorados caso se adotem as equações com melhor ajuste, ao invés da equação padrão.

Outra possibilidade seria resolver sistemas de equações. Por exemplo, determinar os parâmetros de ocupação de uma área de modo a obter-se um consumo de energia, variação de temperatura média e amplitude dentro de uma meta. Esta meta pode ser obtida através da avaliação do diagnóstico climático indicado no item 5.1.1.

O problema com esta abordagem é que, devido à multicolineariade presente na equação padrão,os sistemas frequentemente apresentam resultados absurdos. A utilização das equações com melhor ajuste reduz este problema.

Considerações Finais

7

7.1. Verificação da hipótese e dos objetivos

A partir da avaliação dos dados obtidos no capítulo 6, chegou-se à conclusão de que a hipótese não pôde ser confirmada. Embora algumas das equações de regressão desenvolvidas apresentem validações estatísticas satisfatórias, as variáveis de planejamento tradicionais não são suficientes para se determinar a ambiência térmica urbana.

O coeficiente de aproveitamento e a taxa de ocupação apresentaram uma boa correlação com os resultados das análises climáticas, mas as equações desenvolvidas contam com baixos coeficientes de determinação em relação à maioria das variáveis da ambiência térmica quando consideram as variáveis conjuntamente.

Outros fatores que normalmente não são considerados pela legislação, como o índice de compacidade, demonstraram ter papel fundamental na caracterização da ambiência térmica e energética dos espaços estudados. Soma-se a isso o fato de só haverem sido consideradas neste trabalho as trocas sensíveis externas ao *canyon*, devendo-se prever que as correlações serão ainda menores quando se incluírem no estudo os efeitos da evapotranspiração e o calor antropogênico.

Com isso, o trabalho aponta na direção de uma necessidade de revisão dos parâmetros urbanísticos utilizados nas legislações de uso e ocupação do solo brasileiras.

7.2. Contribuições e limites

Além da verificação da hipótese, o trabalho apresenta outras contribuições como subprodutos.

Considerou-se que foi atingido o objetivo geral do trabalho, uma vez que o método aplicado para se obterem os dados para a regressão pode ser organizado na forma de um procedimento para avaliação do comportamento térmico de áreas urbanas. A metodologia desenvolvida permite a análise de uma área urbana já existente, conforme apresentado no decorrer do trabalho, mas também pode ser utilizada para avaliar comparativamente propostas de ocupação, verificando seus impactos na ambiência térmica. Com o desenvolvimento de

critérios e metas de conforto térmico e consumo energético, os métodos pode ser incorporados a um procedimento para avaliação de desempenho de áreas urbanas, semelhante aos que existem hoje para edificações.

Uma das diretrizes deste trabalho foi a incorporação da questão da variabilidade da ocupação urbana, fator típico das cidades brasileiras. Grande parte dos estudos de clima urbano foi produzida na Europa e nos Estados Unidos, onde as cidades apresentam uma estrutura consolidada e homogênea na sua maior parte, com duas ou três situações de ocupação bem definidas. No Brasil, as legislações de uso e ocupação do solo e a informalidade na construção civil produziram um tecido urbano extremamente heterogêneo. São raros na literatura trabalhos que abordam a questão da atmosfera abaixo do nível das coberturas em áreas urbanas com enfoques que extrapolam o clássico *canyon* urbano. Embora esta seja uma redução útil, que foi utilizada nas simulações deste trabalho, trata-se de um modelo conceitual que deve ser superado. O desenvolvimento de maneiras para se conjugarem modelos analíticos, simulações computacionais e ferramentas de geoprocessamento constitui um caminho para a solução desta questão e é dos pontos fortes do trabalho. As descrições detalhadas destes procedimentos, no corpo do texto e nos anexos, tiveram por objetivo permitir a apropriação futura destes métodos.

A experimentação de modelos produziu resultados satisfatórios em alguns casos, mas mostrou-se limitada em outros. Foi ainda dado um passo inicial para a incorporação de simulações térmicas e fluidodinâmicas na analise das condições ambientais de áreas urbanas heterogêneas, com ênfase na camada sob o nível das coberturas. Os parâmetros utilizados no modelo fluidodinâmico que considera a transferência de calor precisam ainda ser explorados e ajustados, mas já apresentaram tendências corretas e alguns dos subsistemas apresentaram resultados adequados. A principal vantagem das simulações em CFD é a possibilidade de se verificar o efeito simultâneo da alteração das variáveis ambientais de contorno no comportamento térmico ambiental, com uma resolução espacial relativamente alta. A geometria da camada urbana sob o nível das coberturas (UCL) é modelada de maneira explicita, o que é interessante devido à falta de parametrização para o comportamento do vento no interior desta camada. A conjugação do efeito do vento com o balanço térmico foi realizada nos modelos analíticos com a ajuda de simulações fluidodinâmicas isotérmicas, em uma interação que apresentou bons resultados. No entanto, os efeitos do aquecimento das superfícies na movimentação do ar podem alterar significativamente o campo de ventos. Por esta razão, a simulação fluidodinâmica completa, incluindo a transferência de calor, ainda se apresenta como importante recurso potencial na avaliação do comportamento térmico urbano.

As simulações realizadas neste trabalho, no entanto, apresentam diversas limitações. Do ponto de vista acadêmico, as simulações não atenderam às recomendações de convergência, independência da malha e de distância adimensional da primeira célula. Considera-se que foi uma estratégia demasiadamente ambiciosa desenvolver o

modelo tendo como estudo de caso uma área real, com uma ocupação complexa e em uma grande escala. As diretrizes desenvolvidas, no entanto, podem servir de base para novos estudos simplificados, que permitam ajustar o modelo e aplicá-lo a casos mais complexos.

Quanto à escolha do estudo de caso, considerou-se que a área permitiu várias conclusões a partir da aplicação do modelo. No entanto, a homogeneidade da área em termos a uma área homogênea sob o ponto de vista da legislação vigente nos últimos anos limitou o intervalo das variáveis de planejamento utilizadas e determinou correlações entre os parâmetros de ocupação. Isto reduziu a capacidade de extrapolação das regressões realizadas.

As equações de regressão desenvolvidas, embora limitadas pela base de dados que as gerou, apresentam-se como opção para produzir regras gerais de ocupação. A tentativa de aplicação das equações padrão apresentou problemas, com sistemas de equação insolúveis e resultados fora do intervalo confiável para as variáveis ambientais. Por esta razão, a sua utilização deve ser feita com cuidado. No entanto, elas permitem uma análise rápida da influência dos parâmetros de ocupação nos parâmetros ambientais e podem ser utilizadas como estimativas iniciais. É importante ressaltar, porém, que elas prevêem com boa confiabilidade o comportamento da área estudada, devendo-se verificar os seus resultados, através da aplicação de outros modelos. A utilização de modelos de balanço de energia aumenta a qualidade da previsão, mas a parametrização adequada é crucial para o seu aproveitamento no processo de intervenção urbana. O refinamento e ajuste desta parametrização ainda é campo aberto para pesquisa.

7.3. Desenvolvimentos futuros

Este trabalho abre caminho para o desenvolvimento de algumas frentes de pesquisa, que avançam em direções diversas, mas complementares.

Os modelos utilizados e produzidos neste trabalho ainda podem apresentar desenvolvimentos futuros. O modelo de consumo de energia, por exemplo, leva em conta somente a incidência de radiação nas fachadas dos edifícios. Porém, o consumo de energia para condicionamento artificial e aquecimento é fortemente impactado pelas condições de temperatura externa. Seria interessante desenvolver uma maior integração entre os modelos de ambiência térmica externa e de consumo de energia.

O modelo de cálculo de temperatura nos *canyons* também pode ser melhorado, introduzindo-se a possibilidade de edifícios com alturas diferenciadas e melhorando a resposta do *canyon* no período de resfriamento. Pode-se ainda inserir novas variáveis no balanço, dentre elas as trocas latentes resultantes da existência de corpos de água e de vegetação. Esta última apresenta um desafio complexo, já bastante desenvolvido no Envi-met, mas devido às limitações do programa,

seria interessante o desenvolvimento de novos modelos que incorporassem esta variável.

O modelo de CFD é o que apresenta maior potencial de desenvolvimento, embora esteja ainda limitado por fatores como preço da licença comercial, disponibilidade de tempo e capacidade computacional instalada. Acredita-se, no entanto, que este tipo de abordagem é a mais adequada para espaços urbanos com as características de ocupação das cidades brasileiras. Como mencionado, o desenvolvimento do modelo pode ser feito para situações mais simples, com validação a partir de dados da literatura ou medidas de campo em áreas homogêneas. Uma vez corrigido e ajustado, o modelo permitiria a simulação de áreas complexas, como a do estudo de caso apresentado, abrindo caminho para uma análise mais precisa das correlações entre ocupação e as variáveis ambientais térmicas e fluidodinâmicas.

Outro caminho para novos estudos é a avaliação de novas variáveis ambientais, utilizando-se os mesmo princípios apresentados. Embora cada variável exija um tratamento específico, a ocupação urbana tem efeito sobre outros aspectos ambientais além do campo térmico. Dentre as muitas possibilidades, cita-se o estudo da dispersão de poluentes, que pode partir da base já desenvolvida para ventilação urbana, e do conforto acústico. O impacto destas variáveis nos seres humanos vai além de uma questão de conforto, abarcando também questões de salubridade que as tornam ainda mais críticas.

Pode-se, por fim, aplicar os modelos desenvolvidos em outras áreas, com características de ocupação e condições de contorno climático diferenciadas. Com isso, seria possível ampliar a base de dados para análise de resultados, o que permitiria maiores generalizações. Embora o método, no estado atual, permita este tipo de abordagem, seria interessante que ela fosse desenvolvida de modo concomitante com um refinamento dos modelos de cálculo.

7.4. Considerações sobre a interdisciplinaridade

A parcela habitável da atmosfera urbana, que se estende até a algumas dezenas de metros de distância da superfície da Terra, pareceu por muito tempo constituir uma espécie de "vácuo disciplinar", que vem sendo progressivamente explorado pela Meteorologia, Geografia, Arquitetura e Engenharia, dentre outros.

Nota-se que não há consenso no tratamento que deve ser dado ao estudo destas camadas atmosféricas mais baixas, principalmente quando elas se encontram nas cidades. Há uma disparidade não só de escala e método de tratamento, mas também de objetivos entre as áreas. A Meteorologia, por exemplo, busca entender os impactos das áreas urbanas na atmosfera e nos fenômenos meteorológicos, com o objetivo de melhorar a previsão de estados atmosféricos futuros. A Arquitetura, por sua vez busca mecanismos de intervenção nestas áreas com o objetivo de tornar as condições atmosféricas mais seguras, confortáveis ou adequadas para o usuário urbano. As

deficiências na formação do arquiteto nas áreas de cálculo, física e estatística, no entanto, dificultam o entendimento dos fenômenos atmosféricos e a apropriação dos conceitos referentes a eles na prática cotidiana.

Acredita-se que deve haver um esforço de cada disciplina para entender a linguagem e produzir informações úteis para o desenvolvimento estudos em outra área. A fronteira entre as elas deve ser abordada de maneira conjunta. A definição das condições de contorno para as simulações realizadas neste trabalho, por exemplo, pode ser aprimorada através de uma interface com a Meteorologia. Do mesmo modo, os resultados das simulações podem ser utilizados para refinar o conhecimento da "superfície urbana" e da maneira com que a região adjacente da atmosfera é afetada por ela.

Este trabalho representa mais um passo na tentativa de aproximação entre as áreas, com a transposição de conceitos e discussão de abordagens e relações. Busca-se, assim, colocar mais uma pedra no arco que liga as disciplinas, com o objetivo de melhor entender como clima e cidade interagem e se transformam mutuamente.

Referências

- ABREU, Raphael Lorenzeto de. *São Paulo: microregiões e municípios*. São Paulo, 2006. Disponível em <http://pt.wikipedia.org/wiki/Imagem:SaoPaulo_MesoMicroMunicip.svg> Acessado em 15 /01/2007. (Mapa)
- ACSELRAD, Henri. Discursos da sustentabilidade urbana. *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, São Paulo: ANPUR. n.1, p. 79-90, maio de 1999.
- AKUTSU, Maria. *Método para avaliação do desempenho térmico de edificações no Brasil.* 1998. 156 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Estruturas Ambientais Urbanas). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- ALEXANDER, Ernest R.; REED, K. David. *Density measures and their relation to urban form*. Milwaukee: Centre for Architecture and Urban Planning Research, 1988, 78 p.
- ALUCCI, Márcia Peinado (Coord.). *Coberturas têxteis*; determinação das características termo-luminosas. São Paulo: LABAUT, CNPq, 2005, 80 f. (Relatório de pesquisa)
- ALUCCI, Márcia Peinado. *Conforto térmico, conforto luminoso e conservação de energia elétrica*: procedimentos para desenvolvimento e avaliação de projetos de edificações, 1992, 225 f.. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Estruturas Ambientais Urbanas) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.
- ANDERSON, J. *Computational Fluid Dynamics*. New York: McGranHill, 1995. 546 p.
- ANTOINE, Pierre. *Príncipes d'urbanisme*. Paris: B. Ballière et Fils, 1946, p.5-15.
- ANTONUCCI, Denise. *Morfologia urbana e legislação urbanística*: estudo de setores de bairros na cidade de São Paulo no período de 19752/2002. 2005. 350 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e

Urbanismo, Estruturas Ambientais Urbanas) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

- ARNFIELD, A. John; GRIMMOND, C.S.B. An urban canyon energy budget model and its application to urban storage heat flux modeling. *Energy and Buildings*. Amsterdam, Elsevier, 27, p. 61-68, 1998
- ASSIS, Eleonora Sad de et al. Aplicação de dados do clima urbano no desenvolvimento de planos diretores de cidades mineiras. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9, ENCONTRO LATIONO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2007, Ouro Preto. *Anais*... Belo Horizonte: ANTAC, 2007, p. 152-161.
- ASSIS, Eleonora Sad de. *Impactos da forma urbana na mudança climática*; método para previsão do comportamento térmico e melhoria de desempenho do ambiente urbano. 2000. 273 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Estruturas Ambientais Urbanas) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 5413*: Iluminância de interiores. Rio de Janeiro: ABNT, 1991
- AUSTRALIA. Department of the Environment and Heritage. Australian Greenhouse Office. *The Kyoto Protocol*, s. d. <available online http://www.greenhouse.gov.au/international/kyoto/, cited on 15/07/2005 >
- BARBIRATO, Gianna Melo. *Aplicação de modelo de balanço de energia para análise do ambiente térmico urbano de Maceió-AL*. 1998. 179 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1998
- BARTELMUS, P.. *Environment, growth and development, the concepts and strategies of sustainability*. London: Routledge, 1994. 60-78.
- BELO HORIZONTE, Prefeitura Municipal. *Legislação urbanística de Belo Horizonte*: Plano diretor, lei n.7165 de 27 de agosto de 1996, parcelamento, ocupação e uso do solo urbano, lei n.7166 de 27 de agosto de 1996. Belo Horizonte, 1996. 301 p.
- BLOCKEN, Bert; CARMELIET, Jan. *Introduction do computational fluid dynamics*. Eindhoven: TU/e, 2007. Power Point Presentation. (Class notes)
- BORGHI, S.; CORBETTA, G.; DE BIASE, L.. A heat island model for large urban areas and its application to Milan. *Il nuovo cimento*, Bologna, v. 23, n. 5, p. 517-566, set-out 2000.
- BORNSTEIN, Robert D. The two-dimensional URBMET urban boundary layer model. *Journal of Applied Meteorology,* 14, p. 1459-1477, 1975.

- BOTTEMA, Marcel; MESTAYER, Patrice. Urban roughness mapping - validation techniques and some first results. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v.74-76,163-173, 1998
- BRAGA, Tânia. Principais limitações à internalização da discussão ambiental nas práticas urbanas.. In: Encontro Nacional da ANPUR, , Rio de Janeiro, junho de 2001. *Ética, Planejamento e Construção Democrática do Espaço*...v.3 Rio de Janeiro: ANPUR, 2001, p. 1322-1333
- BRANDÃO, Rafael Silva. *Acesso ao sol e à luz natural*: avaliação do impacto de novas edificações no desempenho térmico, luminoso e energético no seu entorno. 2004. 156 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, Tecnologia da Arquitetura) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- BRASIL, Comando da Aeronáutica. *Manual de Estações Meteorológicas de Altitude*. Rio de Janeiro, 2002, 38 p.
- BRASIL, Ministério das Minas de Energia. *Balanço energético nacional*. Brasília, 2008
- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Estatísticas do século XX. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. <Disponível online em www.ibge.gov.br>. Acessado em 15 de janeiro de 2009.
- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Estimativas das populações residentes, em 01.07.2006, segundo os municípios. Brasília: IBGE, 2006. Disponível online <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2006/POP_2006_DOU.pdf>. Acessado em 20 de janeiro de 2007.
- BRASIL. Lei 10.257, de 10 de julho de 2001. Estatuto da Cidade. Brasília:Congresso Nacional, 2001 <disponível em http://www.planalto.gov.br/CCIVIL/LEIS/LEIS_2001/ L10257.htm, citado em julho de 2007>
- BRUSE, M. *ENVI-met 3.0:* Updated Model Overview. 2004. Available from <http://www.envi-met.com/>. Access in July, 2005.
- BRUSE, M. *ENVI-met 3.1:* Online Manual. 2006. Available from <http://www.envi-met.com/>. Access in Dec, 2006.
- BRUSE, Michael. Mainz, Alemanha, 16 de Janeiro, atendimento a Rafael Silva Brandão, notas, 2008
- BUCKMINSTER FULLER INSTITUTE (BFI). *Fuller's Global Resea*rch. New York: BFI <available online http://www.bfi.org/fullers_global_research.htm, cited on 06/07/2005 >
- BUCKMINSTER FULLER INSTITUTE (BFI). *Fuller's Global Research*. New York: BFI, 2005 <available online http://www.bfi.org/fullers_global_research.htm, cited on 06/07/2005 >
- CAMBRIDGE Systematics. *EPA Cool Pavements Study* - Task 5. Chevy Chase: EPA, 2005. 65 p.

- CENTRO DE PREVISÃO DO TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (CPTEC). Síntese sinótica mensal. < Disponível em http://www.cptec.inpe.br/tempo/sintese_sinotica.shtml> Citado em 25 de outubro de 2007.
- CFX. *Installing and introduction to CFX-5*. Diddcot Oxfordshire: CFX, 2003.
- CHOAY, François. *O urbanismo*, utopias e realidades. São Paulo:Perspectivas, 1997, 350 p.
- COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. *Guide on daylighiting of building interiors*. Paris: CIE, 1990 (draft, to be published)
- COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. *Energy in architecture*; the European passive solar handbook. London: BT Batsford. 1994, 340p.
- COMPAGNON, Raphael. *Solar and daylight availability in urban areas*. Fribourg: Ecole d'ingéineurs et d'architectes de Fribourg, 2000, 59 p. (Final Technical Report of the PRECIs programa – Assessing the Potential for Renewable Energy in Cities)
- CONGRESS of New Urbanism. *Charter of the New Urbanism*. Chicago: CNU, 2001. <available online http://cnu.org/charter >
- COST. Cost Action 14: *Recommendations on the use of CFD in predicting Pedestrian Wind Environment*. Bruxelas: COST, 2004.
- COSTA, Heloisa Soares de Moura. Desenvolvimento urbano sustentável: uma contradição em termos? *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, São Paulo: ANPUR, n.2, p. 55-71, março de 2000.
- CÓSTOLA, Daniel. *Ventilação por ação do vento no edifício*: procedimentos para quantificação. 2005. 240 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, Tecnologia da Arquitetura) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005
- CROMPTON, D. The Daylight Code; some notes on the form of control space about buildings. *Town Planning Review*. Liverpool: University of Liverpool, v. 26, p. 155-164, 1955
- CURITIBA. Lei n. 9800 de 03 de janeiro de 2000. *Zoneamento, Uso e Ocupação do Solo no Município de Curitiba*. Curitiba: Prefeitura, 2000, 15 p. <disponível na internet em http://www.curitiba.pr.gov.br/Cidadaos.aspx?url=/Servicos/Governo/Legislacao/zoneamento/index.html >
- DE SCHILLER, Sílvia. Building form, transformation of urban tissue and the evaluation of sustainability. In: PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 18, Florianópolis, 2001. *Proceedings*...Florianópolis: PLEA, 2001, p.453-460.

- DEAR, Richard; BRAGER, Gail; COOPER, Donna. *Developing an adaptative model of thermal comfort and preference*. Sydney: ASHRAE, 1997. (ASHRAE FINAL REPORT RP-884)
- DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG, *DIN 5034*: Daylight in interiors, Part 1-2. Berlin, 1979.
- DUARTE, Denise Helena. *Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima tropical continental*; método para previsão do comportamento térmico e melhoria de desempenho do ambiente urbano. 2000. 278 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Estruturas Ambientais Urbanas) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- DUFFIE, Jonh A.; BECKMAN, William A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. New York: Wiley-Interscience. 1980. 762 p.
- ECHENIQUE, Martin. Modelos: una discusión. In MARTIN, L. et al. *La estructura del espacio urbano*. Barcelona: Gustavo Gili, 1975. 235–249.
- ELNAHAS, M.M.; WILLIAMSON, T.J. An improvement of the CTTC model for predicting urban. *Energy and Buildings*. Amsterdan, Elsevier Science, 25, p. 41-49, 1997.
- FANGER, P.O.. *Thermal Comfort*. New York: Mc Graw-Hill, 1970, 239p.
- FARNSTEIN, Susan F.. New directions in planning theory. *Urban Affairs Review*, v. 34,n. 4, 2000, p.451-478.
- FARNSTEIN, Susan F.. Planning theory and the city. Journal of Planning Education and Research, v. 25, 2005, p.121-130.
- FELDMAN, Sarah. *Planejamento e Zoneamento*: São Paulo 1947/1972. São Paulo: EDUSP, FAPESP, 2005, 304 p.
- FOSTER AND PARTNERS, *Elephant & Castle*; development framework. London, 2004.
- FROTA, Anésia, SCHIFFER, Sueli. *Manual de conforto térmico*. 2a ed. São Paulo: Nobel, 1995, 243p.
- FROTA, Anésia. Geometria da insolação. São Paulo: Geros, 2004.
- FRUEHAUF, Magda Adelaide Lombardo. *Ilha de calor na metrópole paulistana*. 1984. 210 f. Tese (Doutorado em Geografia, Geografia Física) FFLCH, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.
- GALVANI, Emerson. *As unidades climáticas brasilieiras*. São Paulo: USP, 199?. <Disponível no endereço: www.geografia.fflch.usp.br/graduacao/apoio/Apoio/Apoio_Emerson/Unidades_Climaticas_Brasileiras.pdf> Acesso em Novembro de 2006.
- GIACAGLIA, Marcelo Eduardo. AUT5826: Sistemas de informação espacial. Notas de aula, 2005

- GIVONI, Baruch. *Climate considerations in building and urban design*. New York: John Wiley & Sons, 1998, 464 p.
- GIVONI, Baruch. *Man, Climate and Archictecture*. 2ª ed. London: Applied Science Publishers LTD., 1976. 307-339.
- GIVONI, Baruch. *Passive and low energy cooling of buildings*. New York: John Wiley & Sons, 1994, 263 p.
- GOLDEMBERG, José. *Energia, meio ambiente e desenvolvimento*. São Paulo: USP, 2001, 234 p.
- GOOGLE EARTH, v. 3.0, 2005. Acesso em novembro 2006.
- GOTTDIENER, Mark. *A produção social do espaço urbano*. São Paulo: Ed USP, 1993, 310 p.
- GOULART, Solange V. G., LAMBERTS, Roberto , FIRMINO, Samanta. Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras. 2a Ed. Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC, 1998. 345 p.
- GRIMMOND, C. S. B. et al.: Aerodynamic roughness of urban areas derived from wind observations, *Boundary Layer Meteorology*, 89, p. 1-24, 1998.
- GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T.R.. Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form. *Journal of Applied Meteorology*, v. 18, 1262-1292, 1999
- GUNN Philip; CORREIA Telma de Barros. O Urbanismo: a medicina e a biologia nas palavras e imagens da cidade. In: BRESCIANI, Maria Stella (org). *Palavras da Cidade*. Porto Alegre: UFRGS, 2001.
- GUNN, Philip. O paradigma de cidade-jardim na via fabiana de reforma urbana. *Espaços & Debates*. São Paulo, NERU, Ano 17, n. 40, p. 11-27, 1997.
- GUNN, Philip. *System theory in architecture and planning*; an outline review. 1971, (mimio.)
- HALL, Peter. *Cidades do amanhã*. São Paulo:Perspectivas, 1995, 550 p.
- HARRIES, Alan. *Notas de Aula*. In: Workshop: CFX – FAU-USP. São Paulo, 2005.
- HARVEY, David. The New Urbanism and the communitarian trap. *Harvard Design Magazine*. n.1. Boston: Harvard College, MIT Press, Winter/Spring 1997.
- HEAT ISLAND GROUP. Energy Use. San Francisco: LBL, 2000 <available on the internet: http://eetd.lbl.gov/HeatIsland/EnergyUse/, cited in July, 2007>
- HERZOG, Thomas (ed.). *Solar energy in architecture and urban planning*. London: Prestel, 1998, 216 p.
- HIRANO, Y.; YASUOKA Y.; ICHINOSE, T. Urban climate simulation by incorporating satellite-derived vegetation cover distribution into

a mesoscale meteorological model. *Theoretical and Applied Climatology*. 79, p. 175-184, 2004.

- HÖPPE, Peter. The physiological equivalent temperature: a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment.International Journal of Biometeorology, v 43, 71-75, 1999
- HOWARD, Ebenezer*. Garden cities of to-morrow*. London: Faber and Faber, 1946, 168 p.
- ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY. *Lighting Handbook*; Reference & Application. 8 ed. New York, IES of North America. 1998.
- INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003
- INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION (ISO). *ISO 7726*: Ergonomics of the thermal environment: instruments for measuring physical quantities. Genève: ISO, 1998.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION (ISO). *ISO 7730*: Moderate thermal environments: determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. Genève: ISO, 1994.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION (ISO). *ISO 9920*: Ergonomics of the thermal environment: estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of a clothing ensemble. Genève: ISO, 1995.
- JACOBS, Jane. *Muerte y vida de las grandes ciudades*. Madrid: Península, 1973, 468 p.
- JOHANSSON, Erik. *Urban design and outdoor thermal comfort in thermal climates:* studies in Fez and Colombo. 2006. 237 f. Thesis (Doctorate in Engineering) Architecture and Built Environment, University of Lund. Lund, 2006.
- KATZCHNER, Lutz Urban climate studies as tools for urban planning and architecture. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4, 1997, Salvador. *Anais*... Salvador: FAUFBA / LACAM; ANTAC, 1997, p. 49-58.
- KATZSCHNER, Lutz. New developments in applied urban climatology. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9, ENCONTRO LATIONO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2007, Ouro Preto. *Anais*... Belo Horizonte: ANTAC, 2007, p. 1-10.
- KNOWLES, Ralph; BERRY, Richard. *Solar envelope concepts*; moderate density building applications. Los Angeles: University of Southern California. 1980.135 p.
- KOENIGSBERGER, O.H. et al. *Viviendas y edifcios em zonas cálidas y tropicales*. Madrid: Paraninfo, 1977.

- KOTTEK, M. et al, 2006: *World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated*. *Meteorol*. Z., 15, 259-263. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130.
- KUHN, Thomas. *A estrutura das revoluções científicas*. São Paulo: Perspectivas, 1994, 257 p.
- LAMBERTS, Roberto, GHISI, Enedir, PAPST, Ana Lígia. *Desempenho térmico de edificações*. Florianópolis: UFSC, 2000, 62 p. (Apostila da Disciplina Desempenho Térmico de Edificações).
- LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano, PEREIRA, Fernando O. R. *Eficiência energética na arquitetura*, São Paulo: PW, 1997. 192 p.
- LE CORBUSIER. *A Carta de Atenas*. São Paulo:HUCITEC:EDUSP, 1993
- LETTAU, H. Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on basis of roughness-element description. *Journal of Applied Meteorology,* 8, p. 828-832, 1969.
- LYNCH, Kevin. *A theory of good city form*. Cambridge: MIT Press, 1981, p 73-120
- MACDONALD, R.W.; GRIFFITHS, R. F.; HALL, D.J.. An improved menthod for the estimation of surface roughness of obstacle arrays. *Atmospheric Environment*, v 32, n 11, 1857-1864, 1994
- MACEDO, Sílvio Soares. *São Paulo, Paisagem e Habitação Verticalizada*: os espaços livres como elementos de desenho urbano. 1988. 285 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Estruturas Ambientais Urbanas) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.
- MARION, William, URBAN, Ken. *Typical Meteorological Year*. Golden: NREL, DOE, 1995. 48p.
- MARTIN, Leslie; MARCH, Lionel (Ed.). *Urban Space and Structures*. London: Cambridge University Press 1972. 272 p.
- MENDONÇA, Roxane Sidney Resende de; ASSIS, Eleonora Sad de. Conforto térmico ubano – estudo de caso no bairro Floresta, Belo Horizonte. ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO,6, São Pedro, 2001. *Anais*...São Pedro: ANTAC, 2001. (CD-ROM)
- MENNEH, Márcia Halluli. *Morfologia da paisagem verticalizada*: conflitos e padrões urbanísticos. 1997. 282 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, Estruturas Ambientais Urbanas) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- MEYER, Regina Maria Prosperi, GROSTEIN, Marta Dora; BIDERMAN, Ciro. *São Paulo Metrópole*. São Paulo: EDUSP, Imprensa Oficial, 2004, 292.
- MILLS, G. An urban canopy-layer climate model. *Theoretical and Applied Climatology,* 57, p. 229-244, 1997.

- MOCHIDA, Akashi, et al. CFD analysis of mesoscale climate in the Greater Tokio . *Journal of Wind Engineer and Industrial Aerodynamics,* 67 & 68, p. 459-477, 1997.
- MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo; MENDONÇA, Francisco. *Clima Urbano*. São Paulo: Contexto, 2003, 192 p.
- MONTEIRO, Leonardo Marques. *Modelos preditivos de conforto térmico*: quantificação de relações entre variáveis microclimáticas e de sensação térmica para avaliação e projeto de espaços abertos, 2008. 291 p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Tecnologia da Arquitetura) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008
- MONTEIRO, Leonardo, ALUCCI, Márcia. Procedimentos de quantificação de variáveis para análise termo-fisiológica em espaços abertos. ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8, Maceió, 2005. *Anais*...Maceió: ANTAC, 2005. (CD-ROM)
- MOREIRA, Antônio Cláudio M.L. Megaprojetos & ambiente urbano: parâmetros para elaboração do Relatório de Impacto de Vizinhança. *Pós - Revista do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUUSP*, São Paulo: FAUUSP, n. 7, p. 107-118., 1999.
- MUMFORD, Lewis. *A cidade na história*. São Paulo: Martins Fontes,1998, 742 p.
- MYEONG, Soojeong et al. Urban cover mapping using digital, high-spatial. *Urban Ecosystems*. Amsterdam, Kluwer, 5, p. 243–256, 2001
- MYRUP, Leonard O.A numerical model of the urban heat island. *Journal of Applied Meteorology,* 8, p. 908-918, 1969.
- NG, Edward. A new method for daylight design in high density cities – experiences from Hong Kong. In: PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 20, Santiago, 2003. *Proceedings*…Santiago: PLEA, 2003, D-6. (Available in CD-ROM).
- NIKOLOPOULOU, Marialena (Ed.). *Designing open spaces in the urban environment*. Athens: CRES, 2004, 53p.
- OKE, T.R. *Boundary Layer Climates*. 2 ed. London: Methuen, 1987.
- OKE, T.R. Canyon Geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*. 1, p. 237-254, 1981.
- OKE, T.R. Siting and exposure of meteorological instruments at urban sites. IN: NATO/CCMS INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING ON AIR POLLUTION MODELLING AND ITS APPLICATION, 27,2004, Banff. *Proceedings*… Banff: Kluwer, 2004.p. 1-14.
- OKE, T.R. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphere*, 14, 4, p. 268-277, 1976.

- OKE, T.R. Towards a prescription of the greater use of climatic principles in settlement planning. *Energy and Buildings.* London, Elsevier Science, 7, p. 1-10, 1984.
- OKE, T.R.. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*. London, Pergamon, v. 7, p. 769-779, 1973.
- OKE, T.R.. Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Building*. Amsterdan, Elsevier Science, 11, p. 103-113, 1988.
- OKE, T.R.. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphere*, v. 14, n. 4, p. 268-277, 1976.
- OKE, T.R.. The energetic base of urban heat island. *Quartely Journal of the Royal Meteorological Society*. London, Elsevier Science, v. 108, p. 1-24, 1982.
- OLGYAY, Victor. *Arquitectura y clima*; manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas. Barcelona: Gustavo Gili, 1998, 203 p.
- OLIVEIRA FILHO, José João Pires de. *Estudo de viabilidade técnica da utilização de coberturas monolíticas em aterros sanitários no Estado de São Paulo*: 2004. 250 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil, Engenharia Civl) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento. *Nosso Futuro Comum*. Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas, 1988. 1-26.
- PACHECO, R. S. et al. Atores e conflitos em questões ambientais urbanas. Espaço & Debates 35:46-51. São Paulo: NERU, 1992
- POMERANTZ et al. *The effect of pavements' temperatures on air temperatures in large cities*. Berkeley: Heat Island Group, 2000, 18p.
- PRATA, Alessandra Rodrigues. *Impacto da altura de edifícios nas condições de ventilação natural do meio urbano*. 2005. 240 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Tecnologia da Arquitetura) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005
- RATTI, Carlo; BAKER, Nick; STEEMERS, Koen. Energy consumption and urban texture. *Energy and Buildings,* v 37,n 7: 762-776, 2005
- RIBEIRO, Maurício Andrés; MELLO, Hygina Bruzzi de. Arquitetura e Energia. *Cadernos de Arquitetura e Urbanismo*, Belo Horizonte: PUC-MG, n. 4, 63-96, maio de 1996.
- RIO DE JANEIRO (Cidade). Lei complementar n. 16 de 04 de junho de 1992. *Política Urbana*. Rio de Janeiro: Prefeitura, 1992, 113 p. <disponível na internet em http://www.camara.rj.gov.br/legislacao/lei16_92.pdf>
- ROAF, Susan. *Adapting buildings and cities to climate change; a* 21st century survival guide. London: Elsevier, 2004

- ROGERS, Richard. *Ciudads para un pequeño planeta*. Barcelona: Gustavo Gili, 2000, 160 p.
- RUANO, Miguel. *Ecourbanismo*; entornos humanos sustenibles:60 proyectos. 2a ed. Barcelona: Gustavo Gili, 2000, 192 p.
- RUBIES Edmundo Otavio; RUBIES Jorge Eduardo. *Paisagens urbanas brasileiras*. 2005. Disponível em <http://www.fotosedm.hpg.ig.com.br/Aereas/aereas.htm>. Acesso em 25 de janeiro de 2007.
- SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D. *Passive Cooling of Buildings*. London: James & James, 1996, 470p.
- SÃO PAULO (Cidade). Grupo Executivo do Planejametno. *Plano Urbanístico Básico*, (PUB), 5 volumes, São Paulo:ASPLAN: DALY: MONTREAL: WILBUR SMITH, 1968.
- SÃO PAULO (Cidade). Lei nº 13.430 de 13 de setembro de 2002. *Plano diretor estratégico do município de São Paulo*, 2002a, Disponível em <http://www6.prefeitura.sp.gov.br/secretarias/planejamento/plano_diretor/0004>. Acesso em 15 de dezembro de 2006
- SÃO PAULO (Cidade). Secretaria Municipal de Planejamento Urbano. *Atlas ambiental do município de São Paulo*, São Paulo: SEMPLA, 2002b, 198 p.
- SÃO PAULO (Cidade). Secretaria Municipal de Planejamento Urbano. *Município em mapas*, São Paulo: SEMPLA, 2005?, 33 p. Disponível em <http://www9.prefeitura.sp.gov.br/sempla/mm/>. Acesso em 10 de Janeiro de 2007
- SÃO PAULO (Cidade). Secretaria Municipal de Planejamento Urbano. *Atlas ambiental do município de São Paulo*, São Paulo: SEMPLA, 2002, 198 p.
- SÃO PAULO (Cidade). Secretaria Municipal de Planejamento Urbano. *Plano diretor do município de São Paulo*, versão para debates. São Paulo: SEMPLA, 1985, 358 p.
- SÃO PAULO (Estado). Grupo Executivo da Grande São Paulo. *Plano metropolitano de desenvolvimento integrado da Grande São Paulo*. São Paulo: GEGRAN, 1972.
- SÃO PAULO. Secretaria Municipal de Planejamento Urbano. *Atlas ambiental do município de São Paulo*, São Paulo: SEMPLA, 2002, 198 p.
- SARAIVA, J. *Boundary layers over urban areas*, PASCOOL, Meeting, Lisboa: LNEC, 1994.
- SARAIVA, J.; DA SILVA, F. M.. Lisboa, Portugal, 06 de Janeiro, atendimento a Rafael Silva Brandão, notas, 2008
- SARAIVA, Jorge Gil; .SILVA, Francisco Gonçalves da; SILVA, Fernando Marques da. Condições climáticas e anos típicos. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8, ENCONTRO LATIONO-AMERICANO DE

CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO 2005, Maceió. *Anais*... Maceió: ANTAC, 2005, p. 1740-756.

- SASHUA-BAR, L.; HOFFMAN, M. E. Geometry and orientation aspects in passive cooling of canyon streets with trees. In: PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 17, Cambridge, 2000. *Proceedings*... Cambridge: PLEA, 2000, p.483-488.
- SCHENEIDER, Wolf. *De Babilônia a Brasília*; las ciudades y sus hombres. Barcelona: Noger, 1961. 522p.
- SILVA, Luiz Carlos Marques. *Força de Coriolis*. São Paulo, 2001. Disponível em <http://br.geocities.com/saladefisica/planos/atmosfera.htm>. Acesso em 04/12/2006.
- SIMMONS, Matthew. *Revisiting The Limits of Growth*; could the Club of Rome have been correct, after all?,2000 <available online http://www.greatchange.org/ov-simmons,club_of_rome_revisted.pdf, cited on 25/06/2005 >
- SOUZA, Roberta Vieira Gonçalves de. *Iluminação natural em edificaçõe*s: cálculo de iluminâncias internas; Desenvolvimento de ferramenta simplificada. 1997.159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Construção Civil). Escola de Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 1997.
- SOUZA, Tatiana Moreira de. *Leitura e Representação Gráfica das Condições Ambientais Urbanas.* Estudo de caso - Av. Paulista. 2003. 58 f. Iniciação Científica. (Graduando em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. Orientador: Denise Helena Silva Duarte.
- SPANGENBERG, Jörg. *Improvement of micro-climate in tropical metropolis*: a case study. 2004. 240 f. Dissertation (Masters in Engineering) Institute for Technologies in the Tropics, University of Applied Sciences Cologne. Cologne, 2004
- STEEMERS, Koen. *Urban Thermal Diversity*: Microclimate, form, comfort. São Paulo, 2002. Power Point Presentation. (Palestra realizada no painel de conforto do congresso NUTAU de 2002)
- STEINBERGER, Marília. A (re)construção de mitos sobre a (in)sustentabilidade do (no) espaço urbano. In: Encontro Nacional da ANPUR, , Rio de Janeiro, junho de 2001. *Ética, Planejamento e Construção Democrática do Espaço*...v.3 Rio de Janeiro: ANPUR, 2001, p. 1334-1353
- STRANGROOM, Paul. *CFD Modelling of Wind Flow Over Terrain*. 2004. 298 f. Thesis (Doctorate in Civil Engineer) School of Civil Engineer, University of Nottingham, Nottingham, 2004
- STULL, R. *An Introduction to boundary layer meteorology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988
- SWAID, H. Intelligent Urban Forms (IUF); a new climate-concerned, urban planning strategy. *Theoretical and Applied Climatology,* 46, p. 179-191, 1992

- SWAID, H. Urban climate related aspects of the force-restore method. *Atmospheric Environment*, v. 29, n. 23, p. 3401-3409, 1995
- TAKAHASHI, Kazuya. Measurement of thermal environment in Kyoto city and its prediction by CFD simulation. Energy and Buildings, 36, p.771–779, 2004
- TARALLI, Cibele Haddad. *Ambiente construído e legislação:* o visível e o imprevisível. 1993. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Estruturas Ambientais Urbanas) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993
- TARIFA, José Roberto; AZEVEDO, Tarik Rezende de. *Os climas na cidade de São Paulo*: teoria e prática. São Paulo: FFLCH-USP, 2001. (Geousp, 4)
- TATE, Jonh, MULUGETTA, Yacob. Sustainability: the technocentric challenge. *Town Planning Review*, v. 69, n. 1, 65-86. Liverpool: University of Liverpool, 1998
- THARA, Haider; CHANG, Sheng-chieh; AKIBARI, Hashem. *Meteorological and air quality impacts of heat island mitigation measures in three U.S. cities*. Berkeley: LBNL, 2000, 51p.
- VIOLA, Eduardo J. A problemática ambiental do Brasil (1971-1991): da proteção ambiental ao desenvolvimento sustentável. São Paulo, *Polis*, n. 3, p. 4-14, 1991

Anexos

Sumário

A1. Legislação vigente em Moema _____ A2
A2. Disponibilidade de dados climáticos básicos_____ A7
A3. Análise dos ventos _____ A14
A4. Medidas de campo_____ A16
A5. Modelo CEL para simulação térmica em CFX _____ A21
A6. Ferramentas de geoprocessamento _____ A32
A7. Equações de regressão _____ A40

A1. Legislação vigente em Moema

A1.1. *Diretrizes gerais*

Como o restante da cidade, a ocupação do bairro é regida pela lei 13.430 de 2002, o "Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo". Em seu anexo que trata da Subprefeitura da Vila Mariana, reproduzido abaixo, São Paulo (2002) considera as seguintes diretrizes gerais relativas à área de estudo.

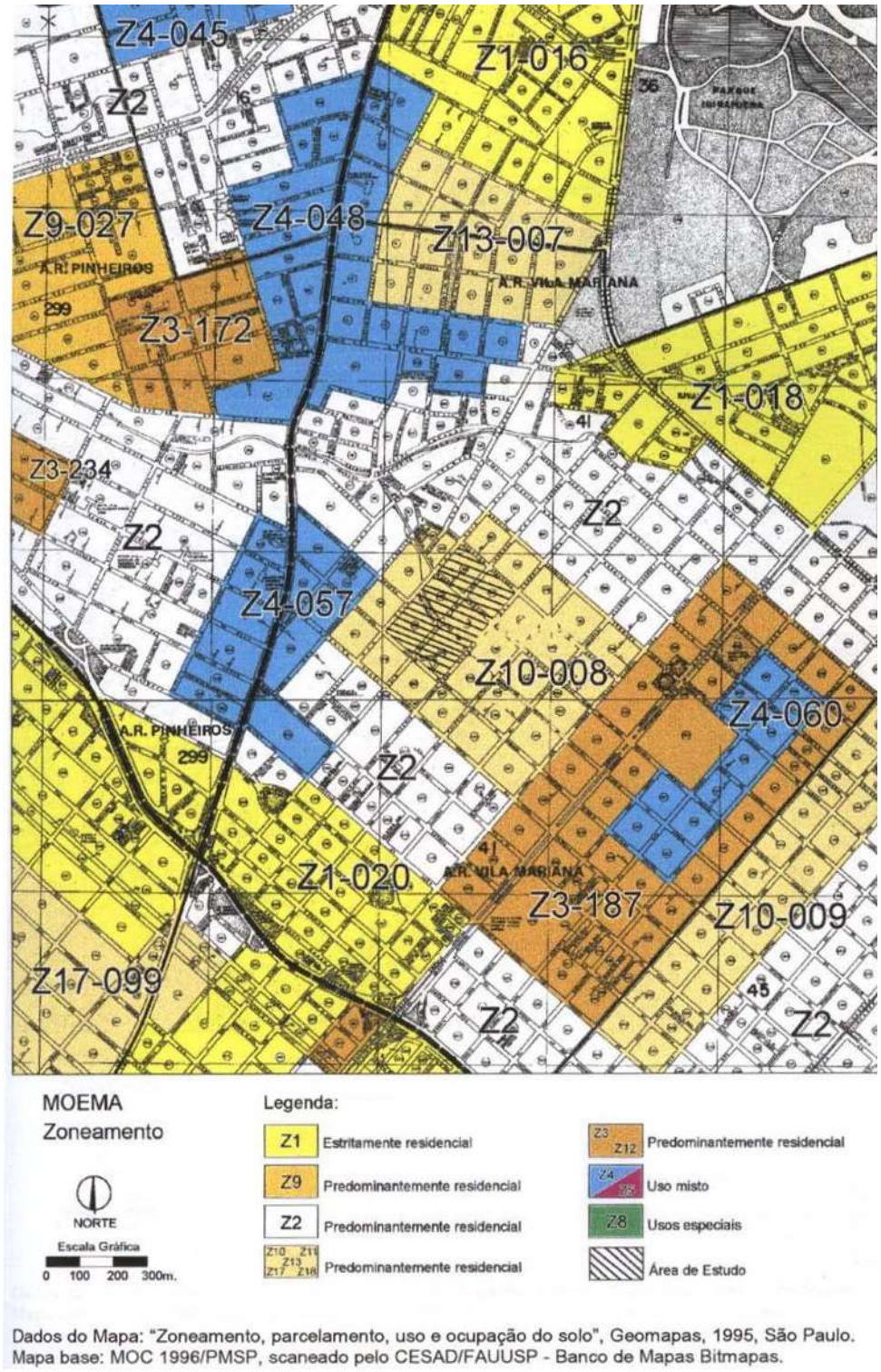
> *"Art. 1º - O Plano Regional Estratégico da Subprefeitura Vila Mariana estabelece os objetivos de desenvolvimento urbano e ambiental visando à consolidação da sua função de pólo regional de comércio geral e especializado e de serviços e equipamentos voltados ao lazer e à área médica, através das seguintes diretrizes:*
>
> *I. melhorar o padrão urbanístico dos espaços públicos dos bairros por meio da resolução dos problemas de convivência entre o uso residencial e os demais usos e da reorganização dos fluxos de passagem de veículos;*
>
> *II. consolidar os distritos de Moema e Vila Mariana como área de convívio equilibrado entre usos residenciais e não residenciais;*
>
> *III. manter e promover os bairros com características exclusivamente residenciais;*
>
> *IV. criar mecanismos para viabilização de intervenções urbanas de pequeno porte nos bairros pelos moradores organizados; (...)*
>
> *VII. adequar os bairros contíguos à futura linha 5 do Metrô através do planejamento dos espaços públicos no entorno das futuras estações;*
>
> *VIII. melhorar as condições de acesso e permanência no entorno dos equipamentos de grande porte localizados no distrito de Moema, - Parque e Ginásio do Ibirapuera, DETRAN e Assembléia Legislativa."*

Basicamente, as diretrizes gerais tratam somente da questão da incompatibilidade de usos e de deficiências no trânsito e no sistema viário, abordando pouco a questão da densidade construtiva e populacional no local.

A1.2. *Uso e ocupação do solo*

Antes de avaliar os parâmetros da nova lei de 2002, é importante avaliar os impactos da ocupação da legislação anterior. Na lei de 1972, os coeficientes de aproveitamento para a área têm valores que começam em 1,0 para a Z1, e podem chegar a 4,0 em Z3, Z4 e Z10 (ver Figura A.1 para a distribuição das zonas no bairro). Observa-se que a Z2, embora seja descrita como zona de predominantemente residencial de baixa densidade, permitiu a construção de vários edifícios residenciais multifamiliares, com dimensões não muito diferentes daquelas encontradas nas zonas de alta e média densidade. Isso ocorre principalmente nos setores norte, próximo à V. Nova Conceição e ao Parque do Ibirapuera, e leste, próximo à Av. Rubem Berta. Na verdade, ao se analisar a ocupação atual do bairro, há pouca diferença perceptível entre as zonas Z2, Z3, Z4, Z10. Na área próxima á Av. dos Bandeirantes.

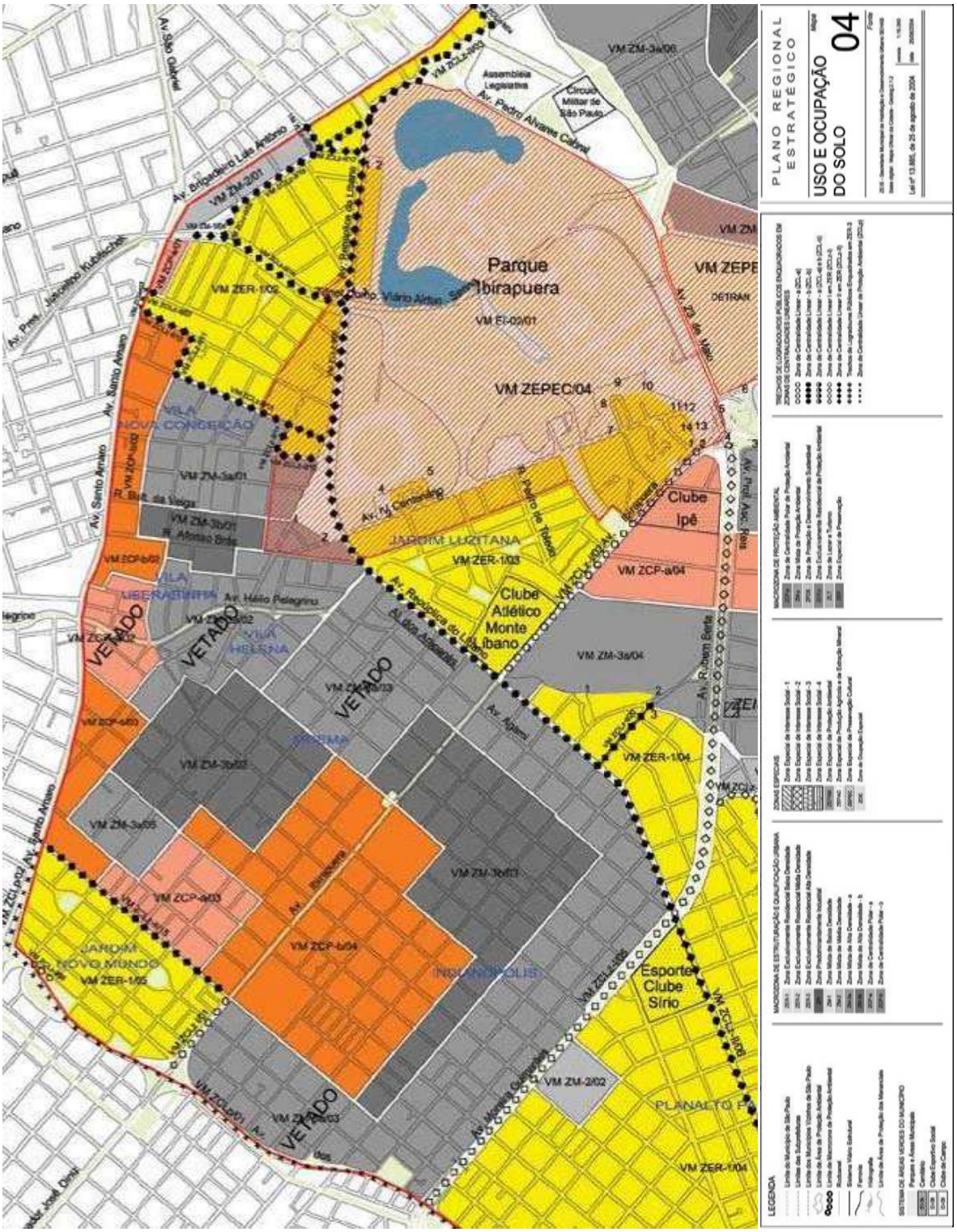
Em termos da distribuição de usos, a legislação foi um sucesso: atingiu seus objetivos criando uma zona verdadeiramente mista. Isso significou uma substituição do uso das edificações mais baixas por atividades comerciais.



Fonte: MENNEH (2005)

Figura A.1 – Zoneamento do distrito de Moema em 1972

A principal alteração da nova lei é a transformação da área lindeira à Av. Ibirapuera em um centro local para a região, com maior possibilidade de adensamento. Isso significa que a área ao redor do Shopping Ibirapuera tem agora os maiores coeficientes de aproveitamento do distrito e, com isso, o maior potencial construtivo, sendo limitada apenas pelas restrições do tráfego aéreo.



Fonte: SÃO PAULO (2002b)

Figura A.2 – Zoneamento atual do distrito de Moema

Houve uma redução de potencial construtivo, embora a área ainda conte com alguns dos maiores coeficientes da cidade, que ainda pode ser aumentado com a outorga onerosa de potencial construtivo, segundo a qual o construtor paga à prefeitura para poder exceder o coeficiente de aproveitamento básico.

Tabela A.1 – Quadro-resumo da história de Moema (Fonte: SÃO PAULO, 2002a)

Plano Regional Estratégico da Subprefeitura Vila Mariana - PRE - VM
Quadro 04 do Livro XII
CARACTERÍSTICAS DE APROVEITAMENTO, DIMENSIONAMENTO E OCUPAÇÃO DOS LOTES

CARACTERÍSTICAS DAS ZONAS DE USO		ZONAS DE USO	COEFICIENTE DE APROVEITAMENTO			CARACTERÍSTICAS DE DIMENSIONAMENTO E OCUPAÇÃO DOS LOTES						RECUOS MÍNIMOS (m)		
			MÍNIMO	BÁSICO	MÁXIMO	TAXA DE OCUPAÇÃO MÁXIMA	TAXA DE PERMEABILIDADE MÍNIMA	LOTE MÍNIMO (m²)	FRENTE MÍNIMA (m)	NÚMERO MÁXIMO DE HABITAÇÕES POR m²	GABARITO DE ALTURA MÁXIMO (m)	FRENTE	FUNDOS E LATERAIS	
													ALTURA DA EDIFICAÇÃO MENOR OU IGUAL A 6, 00 m	ALTURA DA EDIFICAÇÃO SUPERIOR A 6,00 m
MACROZONA DE ESTRUTURAÇÃO E QUALIFICAÇÃO URBANA	ZER - BAIXA DENSIDADE	**ZER-1/02 (m)** V. Paulista e V. Nova Conceição **ZER-1/03** Jd. Lusitânia **ZER-1/04** Planalto Paulista **ZER-1/05** Jd. Novo Mundo	0,05	1,00	1,00	0,50	0,30	250 m²	10,00 m	0,0042	10,00 m	5,00 m	NÃO EXIGIDO	2,00 m em toda a extensão
	ZONA CENTRALIDADE LINEAR INTERNA OU LINDEIRA A ZER	**ZCLz-I ou ZCLz-II (k)**	0,05	1,00	1,00	0,50	0,30	250 m²	10,00 m	0,0125	10,00 m	5,00 m	NÃO EXIGIDO	**(e)**
	ZM - MÉDIA DENSIDADE	**ZM-2/01 (n)** Bento de Andrade	0,20	1,00	2,00	0,5 **(a)**	0,15	125 m²	5,00 m	0,0286 **(g)**	25,00 m	5,00 m **(d)**	NÃO EXIGIDO **(f)**	**(e) (f)**
MACROZONA DE ESTRUTURAÇÃO E QUALIFICAÇÃO URBANA	ZM - ALTA DENSIDADE	**ZM-3a/01** V. Nova Conceição **ZM-3a/02** V. Uberabinha **ZM-3a/03** Indianópolis/ V. Helena **ZM-3a/04** Rubem Berta **ZM-3a/05** Moema	0,20	1,00	2,00	0,5 **(a)**	0,15	125 m²	5,00 m	0,0333 **(g)**	SEM LIMITE	5,00 m **(d)**	NÃO EXIGIDO **(f)**	**(e) (f)**
		ZM-3b/01 Uberabinha **ZM-3b/02** Moema **ZM-3b/03** Indianópolis	0,20	2,00	2,50	0,5 **(a)**	0,15	125 m²	5,00 m	0,0333 **(g)**	SEM LIMITE	5,00 m **(d)**	NÃO EXIGIDO **(f)**	**(e) (f)**
MACROZONA DE ESTRUTURAÇÃO E QUALIFICAÇÃO URBANA	ZONA CENTRALIDADE POLAR OU LINEAR	**ZCP-a/01** Santo Amaro/ V. Nova Conceição **ZCP-a/02** V. Uberabinha **ZCP-a/03** Jd. Novo Mundo **ZCP-a/04** Lusitânia	0,20	1,00	2,00	0,70	0,15	125 m²	5,00 m	SEM LIMITE	SEM LIMITE	5,00 m **(d)**	NÃO EXIGIDO **(f)**	**(e) (f)**
		ZCP-b/02 Santo Amaro/ V. Nova Conceição **ZCP-b/03** Santo Amaro/ Eucaliptos **ZCP-b/04** Moema **ZCL-b (k)**	0,20	2,00	3,00	0,70	0,15	125 m²	5,00 m	SEM LIMITE	SEM LIMITE	5,00 m **(d)**	NÃO EXIGIDO **(f)**	**(e) (f)**
		ZCLp (k)	0.05	1,00	1,00	0,50	0,30	250 m2	10,00 m	0,0125	10,00	5,00	NÃO EXIGIDO	(e)
ZONA ESPECIAL DE PRESERVAÇÃO CULTURAL		**ZEPEC/04** Parque do Ibirapuera	Parâmetros da zona de uso em que se situa o bem imóvel representativo (BIR) ou a área de urbanização especial (AUE) ou a área de proteção paisagística (PP), enquadrado como ZEPEC, observadas as disposições específicas da Resolução de tombamento quando houver.											

A1.3. *Diretrizes específicas para a área*

O distrito de Moema conta com três Áreas de Intervenção Urbana (AUI), onde regulamentações específicas se aplicam.

A Área de Intervenção Urbana de Moema (AUI-1) busca adequar o bairro à instalação da linha 5 do metrô, estabelecendo diretrizes gerais de ocupação e uso do espaço. A maioria das propostas está em nível preliminar e simplesmente declara a intenção de aproveitar a obra do metrô para requalificar o espaço urbano da região, estabelecendo parcerias com moradores e comerciantes da região no intuito de compartilhar as tarefas de manutenção de equipamentos que venham porventura a ser instalados.

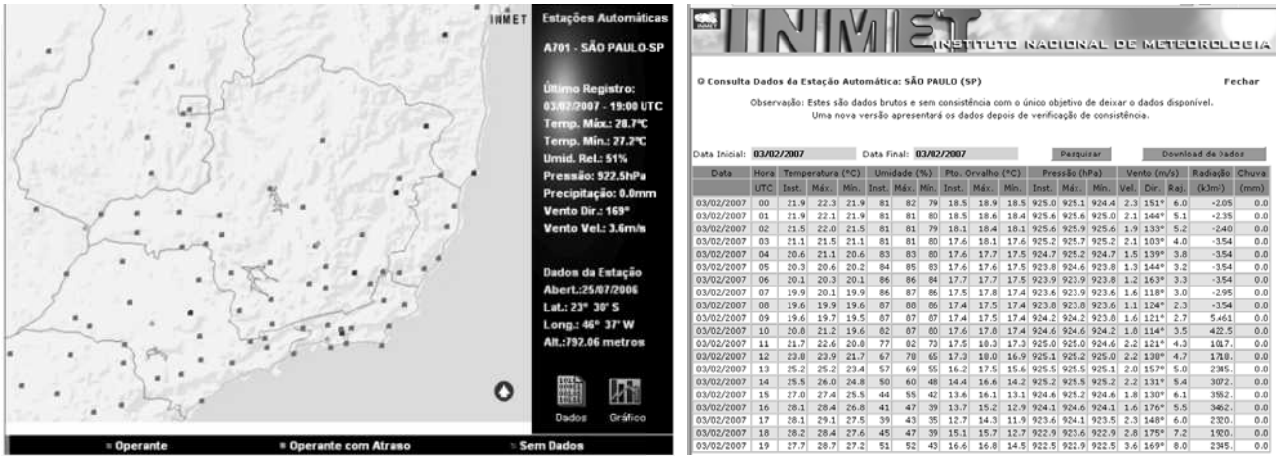
A Área de Intervenção Urbana do Parque do Ibirapuera (AUI-5) visa a garantir e melhorar a acessibilidade ao equipamento, considerando a incorporação de novas áreas a ele. Limita ainda os instrumentos que podem ser aplicados para construções no seu interior e estabelece índices de ocupação iguais àqueles utilizados no entorno.

A Área de Intervenção Urbana do Aeroporto de Congonhas (AUI-6) tem por objetivo integrar o aeroporto na malha urbana ao redor, adequando o sistema viário e de transporte, além da distribuição de usos e densidades às condições sócio-ambientais geradas. São definidos altos padrões de densidade, sobre os quais se permite coeficientes de aproveitamento máximos de até 4,0 e básicos de 2,5. A questão dos gabaritos não é mencionada na legislação, sendo objeto de legislação federal.

A2. Disponibilidade de dados climáticos básicos

A2.1. *Estações meteorológicas de superfície*

As observações de superfície instantâneas das estações do INMET, além de dados brutos sem avaliação de consistência para os últimos noventa dias estão disponíveis em sua página da internet, no endereço: http://www.inmet.gov.br/html/rede_obs.php?lnk=../sonabra/sonabra.html.



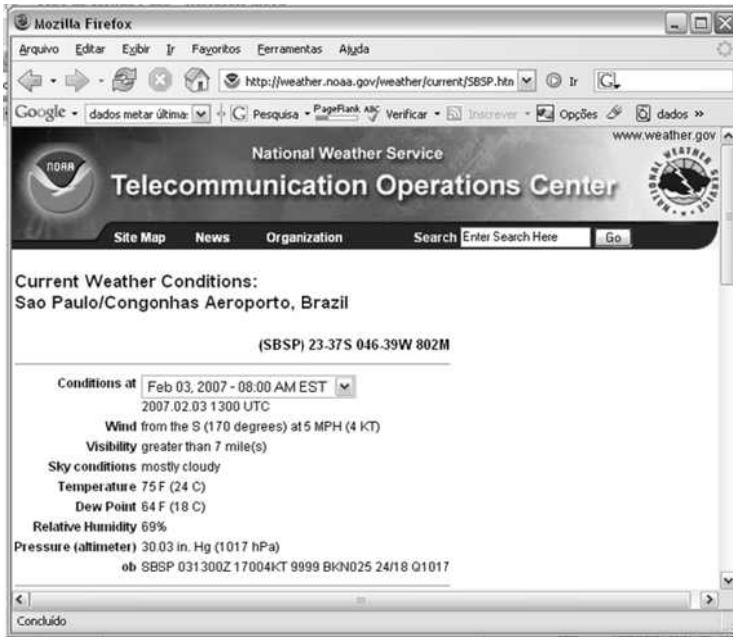
Data	Hora	Temperatura (°C)			Umidade (%)			Pto. Orvalho (°C)			Pressão (hPa)			Vento (m/s)			Radiação	Chuva
	UTC	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Vel.	Dir.	Raj.	(kJm²)	(mm)
03/02/2007	00	21.9	22.3	21.9	81	82	79	18.5	18.9	18.5	925.0	925.1	924.4	2.3	151°	6.0	-205	0.0
03/02/2007	01	21.9	22.1	21.9	81	81	80	18.5	18.6	18.4	925.6	925.6	925.0	2.1	144°	5.1	-235	0.0
03/02/2007	02	21.5	22.0	21.5	81	81	79	18.1	18.4	18.1	925.6	925.9	925.6	1.9	133°	5.2	-240	0.0
03/02/2007	03	21.1	21.5	21.1	81	81	80	17.6	18.1	17.6	925.2	925.7	925.2	2.1	103°	4.0	-354	0.0
03/02/2007	04	20.6	21.1	20.6	83	83	80	17.6	17.7	17.5	924.7	925.2	924.7	1.5	139°	3.8	-354	0.0
03/02/2007	05	20.3	20.6	20.2	84	85	83	17.6	17.6	17.5	923.8	924.6	923.8	1.3	144°	3.2	-354	0.0
03/02/2007	06	20.1	20.3	20.1	86	86	84	17.7	17.7	17.5	923.9	923.9	923.8	1.2	163°	3.3	-354	0.0
03/02/2007	07	19.9	20.1	19.9	86	87	86	17.5	17.8	17.4	923.6	923.9	923.6	1.6	118°	3.0	-295	0.0
03/02/2007	08	19.6	19.9	19.6	87	88	86	17.4	17.5	17.4	923.8	923.8	923.6	1.1	124°	2.3	-354	0.0
03/02/2007	09	19.6	19.7	19.5	87	87	87	17.4	17.5	17.4	924.2	924.2	923.8	1.6	121°	2.7	5461	0.0
03/02/2007	10	20.8	21.2	19.6	82	87	80	17.6	17.8	17.4	924.6	924.6	924.2	1.8	114°	3.5	422.5	0.0
03/02/2007	11	21.7	22.6	20.8	77	82	73	17.5	18.3	17.3	925.0	925.0	924.6	2.2	121°	4.3	1017.	0.0
03/02/2007	12	23.8	23.9	21.7	67	78	65	17.3	18.0	16.9	925.1	925.2	925.0	2.2	138°	4.7	1710.	0.0
03/02/2007	13	25.2	25.2	23.4	57	69	55	16.2	17.5	15.6	925.5	925.5	925.1	2.0	157°	5.0	2345.	0.0
03/02/2007	14	25.5	26.0	24.8	50	60	48	14.4	16.6	14.2	925.2	925.5	925.2	2.2	131°	5.4	3072.	0.0
03/02/2007	15	27.0	27.4	25.5	44	55	42	13.6	16.1	13.1	924.6	925.2	924.6	1.8	130°	6.1	3552.	0.0
03/02/2007	16	28.1	28.4	26.8	41	47	39	13.7	15.2	12.9	924.1	924.6	924.1	1.6	176°	5.5	3462.	0.0
03/02/2007	17	28.1	29.1	27.5	39	43	35	12.7	14.3	11.9	923.6	924.1	923.5	2.3	148°	6.0	2320.	0.0
03/02/2007	18	28.2	28.4	27.6	45	47	39	15.1	15.7	12.7	922.9	923.6	922.9	2.8	175°	7.2	1920.	0.0
03/02/2007	19	27.7	28.7	27.2	51	52	43	16.6	16.8	14.5	922.5	922.9	922.5	3.6	169°	8.0	2345.	0.0

Figura A.3 – Exemplo de seleção de dados climáticos no site do INMET

Basta selecionar a estação desejada e clicar em dados, selecionando o período desejado. Os dados podem ser visualizados na tela, podendo ser transportados para planilhas, ou baixados no formato DAT. É importante notar que as observações do INMET e do DECEA estão em **horário universal** (UTC), devendo-se **subtrair 3 horas** (2 horas durante o horário de verão) do resultado para se obter a hora de Brasília.

O Departamento de Energia dos Estados Unidos (DoE), dentro do seu programa de Eficiência Energética e Energias Renováveis (EERE) disponibiliza uma grande série de dados de vários aeroportos brasileiros, dentre eles Congonhas (SBSP) e Guarulhos (SBGL). Os dados posteriores a 20 de fevereiro de 2002 podem ser requisitados no endereço: http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weatherdata/weather_request.cfm. O próprio programa oferece ainda a possibilidade de preenchimento de campos de temperatura que não foram computados, através de interpolação. Ao contrário de outros *sites*, os dados não se tornam disponíveis automaticamente, não sendo possível obter dados dos 10 dias anteriores à data de acesso. Observa-se ainda que os aeroportos não registram a radiação solar, devendo o dado ser obtido de alguma outra fonte. Este dado foi utilizado para se estabelecer uma freqüência de ocorrência de ventos para a cidade de São Paulo.

No caso da necessidade de se acessar dados recentes (últimos 10 dias), há a opção de utilizar o *National Weather Service*, do governo americano, que também disponibiliza de maneira limitada dados das estações vinculadas ao METAR (Sistema de informações meteorológicas para a aviação), dentre elas as colhidas em aeroportos brasileiros. Pode-se obter os dados de 24 horas de um dia recente (últimos 5 dias), mas as unidades estão no sistema americano de medidas. É possível acessar dados do aeroporto de Congonhas no endereço http://weather.noaa.gov/weather/current/SBSP.html. Observar sempre a conversão de unidades e a inversão na ordem das linhas (os dados mais recentes estão sempre no topo da tabela).



24 Hour Summary

	Time EST (UTC)	Temperature F (C)	Dew Point F (C)	Pressure inches (hPa)	Wind MPH	Weather
Latest	8 AM (13) Feb 03	75 (24)	64 (18)	30.03 (1017)	S 5	
	7 AM (12) Feb 03	73 (23)	64 (18)	30.03 (1017)	S 9	
	6 AM (11) Feb 03	71 (22)	64 (18)	30.03 (1017)	SE 6	
	5 AM (10) Feb 03	69 (21)	66 (19)	30.00 (1016)	SSE 5	mist
	4 AM (9) Feb 03	66 (19)	64 (18)	30.00 (1016)	SSE 3	
	3 AM (8) Feb 03	66 (19)	64 (18)	30.00 (1016)	S 5	
	2 AM (7) Feb 03	68 (20)	64 (18)	29.97 (1015)	SE 3	mist
	1 AM (6) Feb 03	68 (20)	64 (18)	30.00 (1016)	SE 5	
	Midnight (5) Feb 03	68 (20)	64 (18)	30.00 (1016)	S 6	
	11 PM (4) Feb 02	69 (21)	64 (18)	30.03 (1017)	ESE 3	
	10 PM (3) Feb 02	68 (20)	64 (18)	30.03 (1017)	SSE 5	
	9 PM (2) Feb 02	69 (21)	66 (19)	30.06 (1018)	SSE 8	
	8 PM (1) Feb 02	69 (21)	66 (19)	30.06 (1018)	S 10	
	7 PM (0) Feb 02	69 (21)	66 (19)	30.03 (1017)	SSE 8	
	6 PM (23) Feb 02	69 (21)	66 (19)	30.00 (1016)	SSE 13	
	5 PM (22) Feb 02	71 (22)	68 (20)	30.00 (1016)	S 12	
	4 PM (21) Feb 02	71 (22)	68 (20)	29.97 (1015)	S 14	
	3 PM (20) Feb 02	75 (24)	68 (20)	29.97 (1015)	S 15	
	2 PM (19) Feb 02	78 (26)	68 (20)	29.97 (1015)	S 15	
	1 PM (18) Feb 02	80 (27)	64 (18)	30.00 (1016)	SSW 9	
	Noon (17) Feb 02	80 (27)	66 (19)	30.00 (1016)	SSW 6	
	11 AM (16) Feb 02	78 (26)	66 (19)	30.03 (1017)	SW 6	
	10 AM (15) Feb 02	77 (25)	66 (19)	30.03 (1017)	SSW 3	
Oldest	9 AM (14) Feb 02	75 (24)	66 (19)	30.06 (1018)	S 6	

Figura A.4 – Exemplo de dados climáticos obtidos do National Weather Service

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) também disponibiliza os resultados do METAR, além de divulgar dados de uma rede própria de estações meteorológicas. Infelizmente, o INPE não conta com nenhuma estação no município de São Paulo. Para acessar as informações, basta acessar o site http://www.cptec.inpe.br/dados_observados/. Estão disponíveis as medições do dia anterior e do dia atual até o presente momento. Como a maioria das utilizações dos dados climáticos pressupõe o uso de planilhas, o formato gráfico dificulta a sua manipulação.

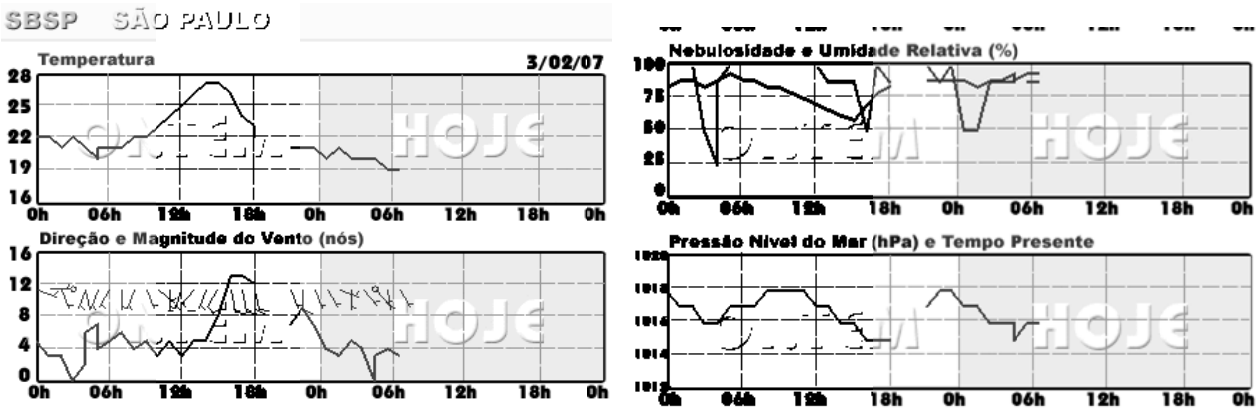


Figura A.5 – Exemplo de dados climáticos para o aeroporto de Congonhas disponibilizados pelo INPE

Outra opção para a obtenção dos dados de aeroportos através do Departament of Atmospheric Sciences da University of Wyoming, muito útil principalmente para complementar a base do DoE. No endereço http://weather.uwyo.edu/surface/meteogram/ é possível selecionar um dia por vez, com dados das 26 horas que antecedem o horário selecionado como base, sendo apresentados do mais recente para o mais antigo. Podem ser obtidos dados dos últimos 28 a 30 dias, sempre em intervalos de 24 horas.

Surface Observations

Type of Output determines what is generated. **Listing**, **METARs**, and **GIF Meteogram** will obtain 24 hours of data for the selected station. The **Hour** is not used. **Lastest Observations** will get the latest observation available. **All Observations** and **All METARs** will get all the observations for the selected **Hour** for all the stations in the country of the selected station.

Region	Type of Output	Date	Hour	Units	Station
South America	Listing	01 Feb 2007	23Z	Metric	SBSP

Observations for SAO, Brazil (SBSP)

2200Z 31 Jan 2007 to 2300Z 1 Feb 2007

STN	TIME DD/HHMM	ALTM hPa	TMP C	DEW C	RH %	DIR deg	SPD m/s	VIS km	CLOUDS		Weather
SBSP	01/2300	1015.9	22	20	86	170	4	5.0	OVC007		F
SBSP	01/2200	1015.9	22	20	86	170	4	5.0	OVC007		F
SBSP	01/2100	1015.9	21	20	94	150	6	5.0	OVC005		F
SBSP	01/2000	1014.9	22	21	94	150	5	4.0	OVC005		F
SBSP	01/1900	1014.9	23	21	89	200	8	3.0	OVC004		F
SBSP	01/1600	1014.9	25	21	78	190	6	4.0	BKN006		F
SBSP	01/1700	1014.9	31	18	46	310	4	10.0	BKN030		
SBSP	01/1600	1014.9	30	19	52	0	0	10.0	BKN035		
SBSP	01/1500	1015.9	29	20	58	20	2	10.0	BKN035		
SBSP	01/1400	1016.9	27	20	66	340	1	10.0	BKN030		
SBSP	01/1300	1016.9	25	19	69	120	2	9.0	BKN022		
SBSP	01/1200	1018.0	24	19	74	100	2	9.0	BKN017		
SBSP	01/1000	1016.9	21	19	88	70	3	8.0	BKN011		
SBSP	01/0900	1016.9	21	19	88	50	2	8.0	BKN012		
SBSP	01/0800	1016.9	21	19	88	40	2	8.0	BKN011		
SBSP	01/0700	1015.9	21	18	83	90	2	8.0	BKN011		
SBSP	01/0600	1015.9	20	18	88	140	3	8.0	BKN011		
SBSP	01/0500	1016.9	20	19	94	150	3	8.0	BKN017		
SBSP	01/0400	1016.9	21	19	88	170	2	9.0	BKN020		
SBSP	01/0300	1018.0	21	19	88	90	3	8.0	BKN011	BKN020	
SBSP	01/0200	1018.0	21	19	88	120	3	8.0	SCT008	BKN015	
SBSP	01/0100	1018.0	21	19	88	140	3	6.0	BKN008	BKN015	
SBSP	01/0000	1016.9	21	19	88	160	3	6.0	BKN008	BKN015	
SBSP	31/2300	1016.9	20	19	94	160	4	5.0	BKN006	BKN012	F
SBSP	31/2200	1015.9	20	19	94	160	4	4.0	OVC006		F

Figura A.6 – Exemplo de dados disponibilizados pela University of Wyoming

O Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo disponibiliza no seu *site* somente os dados de superfície referentes à estação da cidade universitária e ainda assim em formato gráfico para as últimas 48 horas (http://www.master.iag.usp.br/index.php?pi=N).

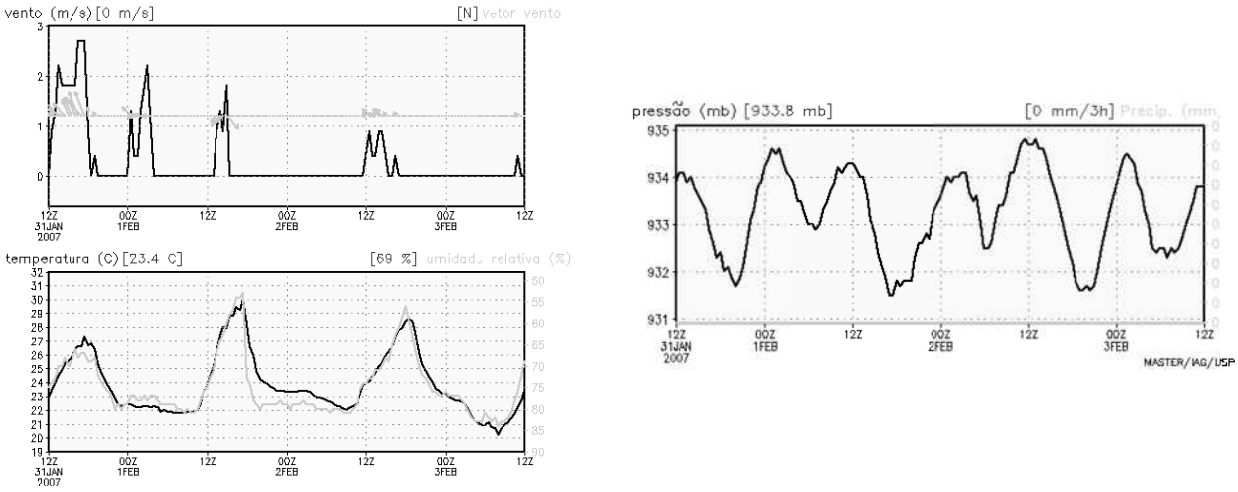


Figura A.7 – Exemplo de dados da estação Cidade Universitária obtidos através do IAG/USP

Os dados do METAR dos últimos 3 dias também estão disponíveis no *site* em formato gráfico. Os resultados medidos são comparados com as previsões meteorológicas para o período, sendo também indicadas as projeções para os próximos 3 dias. As previsões podem ser úteis para o planejamento de medidas de campo.

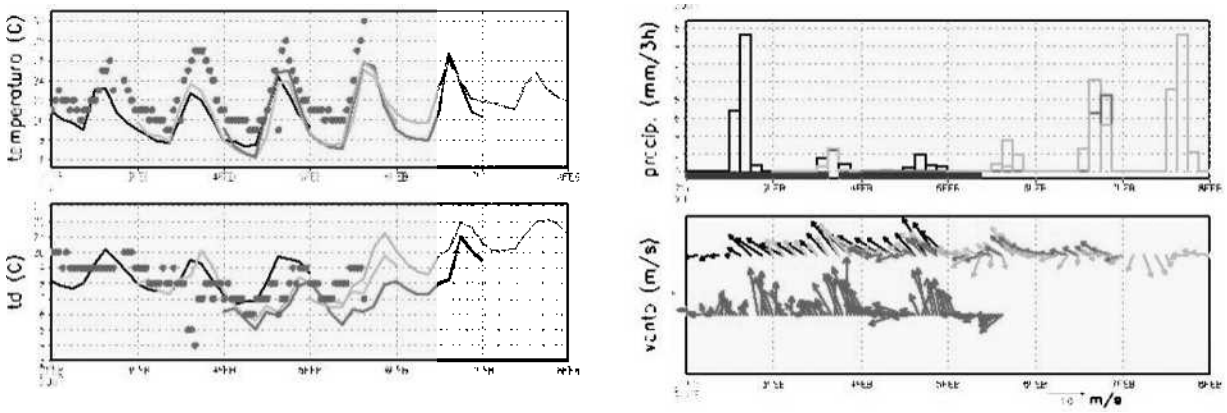


Figura A.8 – Exemplo de dados do METAR obtidos através do IAG/USP

O IAG também disponibiliza séries mais longas de dados através de requisição, desde que seja declarado o uso para fins exclusivamente acadêmicos.

No caso das estações controladas pela CETESB, há possibilidade de acesso direto aos dados dos últimos 7 dias no endereço: http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/ar_dados_horarios.asp. Não foi possível levantar a latitude, longitude e altitude das estações, embora isto possa ser determinado a partir do endereço, fornecido pela empresa. Observa-se que nem todas as estações medem todas as variáveis, como pode ser constatado na tabela anterior. No entanto, a estação mais completa se localiza no Parque do Ibirapuera, que está dentro da área de estudo selecionada. Um exemplo do formato de dados encontrados na internet está apresentado na Tabela A.4 para o dia 01 de fevereiro de 2007.

Tabela A.2 – Estações meteorológicas na cidade de São Paulo

Hora	Velocidade do Vento m/s	Direção do Vento Setor	Umidade %	Temperatura °C	Radiação Global W/m²	Pressão Atmosférica hPa	Radiação UV W/m²
1:00	1,4	E	87	21,3	1	929	0,3
2:00	1,1	ESE	88	21,4	1	929	0,3
3:00	0,8	ESE	89	21	1	928	0,3
4:00	1,1	E	89	21,1	1	928	0,3
5:00	1,1	E	88	21,1	1	928	0,3
6:00	1,3	ENE	88	21,2	1	928	0,3
7:00	1,2	E	88	21,3	1	928	0,3
8:00	0,8	NE	89	21,2	35	929	1
9:00	1,4	E	83	22,1	208	929	2,4
10:00	1,6	E	73	23,6	515	929	4,6
11:00	1,3	E	68	25	679	929	6,9
12:00	1	NE	65	26,3	795	929	10,1
13:00	1	NNW	61	27,6	925	928	13,8
14:00	1	variável	58	28,5	767	928	12,7
15:00	1,3	WNW	54	29,2	746	927	12,1
16:00	3	S	60	27,9	435	927	6,2
17:00	3,6	S	78	24	239	927	3,3
18:00	3,1	S	86	23	108	927	2
19:00	2,5	S	88	22,5	33	927	0,8
20:00	1,9	S	88	22,2	14	927	0,6
21:00	1,1	NNW	83	23,2	1	926	0,3
22:00	0,8	NNW	86	22,8	1	927	0,3
23:00	0,8	NW	87	22,7	1	927	0,3
24:00	0,8	NW	84	22,9	1	927	0,3

A2.2. *Sondagens*

Além das observações de superfície, a estação do Campo de Marte realiza radiossondagens, observações em altura com a utilização de balões meteorológicos. Os balões transportam sensores de temperatura, umidade, pressão, direção e velocidade do vento (BRASIL, 2002). As medições são tomadas em pressões aproximadamente definidas.

As sondagens são sempre realizadas às 00h, 06h, 12h e 18h no Horário Universal UTC), com prioridade para as medições de 00Z e 12Z. Deste modo, no Campo de Marte, a sondagem noturna ocorre às 09 ou 10 da noite, em horário local, e a diurna às 09 ou 10 da manhã.

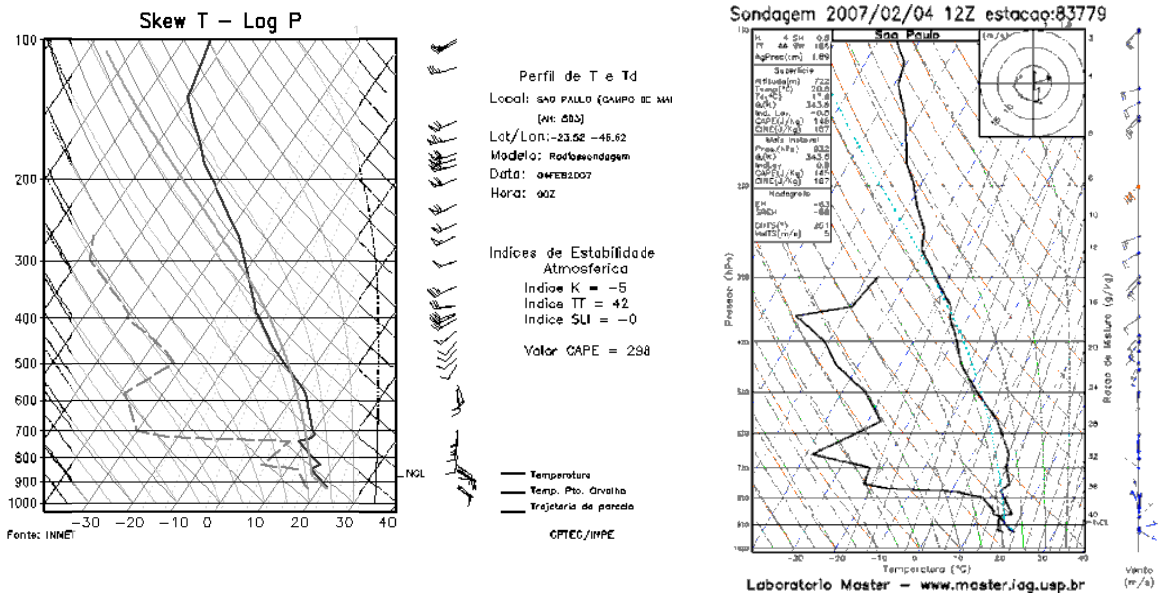


Figura A.9 – Perfis de temperatura e vento obtidos através do site do INPE e do IAG

Dados tabelados podem ser encontrados no site da *University of Wyoming* no endereço http://weather.uwyo.edu/upperair/. Estas informações podem ser úteis na determinação da estabilidade da atmosfera e na determinação das condições de contorno para as simulações.

A2.3. *Dados tratados estatisticamente*

A2.3.1. Typical Meteorolgical Year (TMY)

Segundo Marion e Urban (1995), o TMY é um conjunto de dados horários de radiação solar e outros elementos meteorológicos para o período de um ano, construído a partir da concatenação de meses reais selecionados de anos individuais. A recomendação é para uso em sistemas solares ou para a avaliação de sistemas prediais, não sendo indicado para estudos de potencial de geração de energia eólica, devido à metodologia de seleção dos dados. Marion e Urban (1995) ressaltam ainda duas importantes características deste conjunto de dados. A primeira delas é que o conjunto não tem poder preditivo e não necessariamente representa as condições climáticas do(s) próximo(s) ano(s). Trata-se apenas de condições consideradas típicas no decorrer do período avaliado. Disto decorre a sua segunda característica: o TMY não é um bom indicativo das condições críticas locais, não sendo indicado para projetos que tem por objetivo desenvolver sistemas que atendam o pior cenário possível.

Dados para a cidade de São Paulo estão disponíveis através das seguintes fontes:

Tabela A.3 –Fontes para dados tipo TMY

Fonte	Origem	Endereço internet
LABEE[i]	SBSP	http://www.labeee.ufsc.br/downloads/downloadaclim.html
DOE	SBSP	http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data.cfm
METEONORM	SBSP/São Paulo	-não disponível

A2.3.2. Test Reference Year (TRY)

O TRY, de maneira semelhante ao TMY, é também um conjunto de dados horários de radiação solar e outros elementos meteorológicos para o período de um ano. No entanto, trata-se de um ano real, selecionado a partir de uma base de dados extensa a partir da eliminação dos anos em que ocorreram médias de temperatura mais altas e mais baixas. O procedimento é detalhado em Goulart, Lamberts e Firmino (1998). O TRY apresenta limitações semelhantes às encontradas no TMY, não representando de maneira adequada situações extremas. Os arquivos encontram-se disponíveis no site do LABEEE, no endereço http://www.labeee.ufsc.br/downloads/downloadaclim.html.

A2.3.3. Normais climatológicas

As condições climáticas da cidade de São Paulo podem ser obtidas a partir do *software Climaticus* (ALUCCI, 2003), que se referencia nas normais climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia, INMET (baseado em dados obtidos pela estação meteorológica Mirante Santana – A701 - São Paulo, SP).

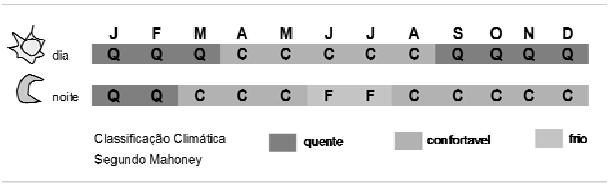
As normais são médias dos dados obtidos em uma determinada estação em um período de 30 anos, sendo que a mais recente compreende o período entre 1960 e 1990.

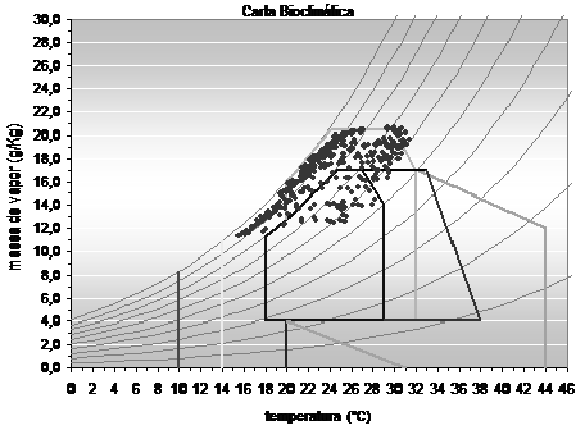
Tabela A.4 - Normais climatológicas para a cidade de São Paulo (fonte: Alucci, 2003)

cidade	Lat (s)		Long. (W.Grw.)			Alt. (m)							
São Paulo	23,3		46,37			792,1							
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANO
Pressão Atmos (hPA)	923,5	924,2	924,9	926,2	927,4	928,7	929,4	928,3	927,2	925,4	923,8	923,2	926
Temperatura Média (°C)	22,1	22,4	21,7	19,7	17,6	16,5	15,8	17,1	17,8	19	20,3	21,1	19,3
Temperatura Máxima (°C)	27,3	28	27,2	25,1	23	21,8	21,8	23,3	23,9	24,8	25,9	26,3	24,9
Temperatura Mínima (°C)	18,7	18,8	18,2	16,3	13,8	12,4	11,7	12,8	13,9	15,3	16,6	17,7	15,5
Temp Máx Absoluta (°C)	34,2	34,7	33,5	31,4	29,7	28,6	29,3	33	35,2	34,5	35,3	33,5	35,3
Temp Mín Absoluta (°C)	11,9	12,4	12,1	6,8	2,2	1,2	1,5	3,4	3,5	7	7	10,3	1,2
Precipitação Total (mm)	238,7	217,4	159,8	75,8	73,6	55,7	44,1	38,9	80,5	123,6	145,8	200,9	1454,8
Precip-Máx em 24h (mm)	103,5	121,8	90,8	57,9	71,8	74	70,8	42,3	62,6	63,7	82,8	151,8	151,8
Evaporação Total (mm)	99,9	86,9	88,4	80,7	79,8	78,2	91,1	104,8	100	99,9	101,4	96,9	1107,9
Umidade Relativa (%)	80	79	80	80	79	78	77	74	77	79	78	80	78
Insolação Total (horas)	148,6	144,5	144,6	140	152,4	145,2	164,4	156,5	125,8	135,6	144,7	130,4	1732,7
Nebulosidade (0-10)	8,1	7,5	7,7	7,4	6,6	6,2	6,1	6,2	7,2	7,7	7,7	8,2	7,2

O *Climaticus* também oferece uma análise do clima em relação aos períodos noturnos e diurnos de calor, frio ou conforto, a partir das tabelas de Mahoney (KOENIGSBERGER et al, 1977) e com recomendações arquitetônicas baseada nas zonas bioclimáticas de Givoni (1976).

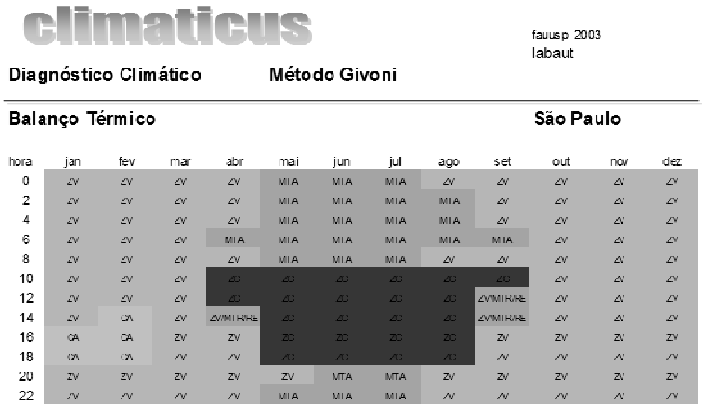
[i] Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Departamento de Engenharia Civil,Universidade Federal de Santa Catarina

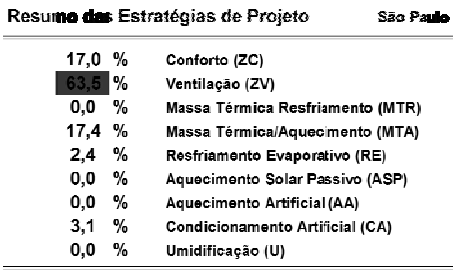




Fonte: ALUCCI (2003)

Figura A.10 – Avaliação bioclimática da cidade de São Paulo pelos métodos deMahoney e Givoni, respectivamente





Fonte: ALUCCI (2003)

Figura A.11 – Balanço horário com resumo das estratégias bioclimáticas para edificações em São Paulo

A avaliação indica que a principal estratégia para se obter conforto na cidade de São Paulo é a ventilação natural. A significativa amplitude média (entre 9°C e 10°C) indica também a possibilidade de se beneficiar da utilização de massa térmica, armazenando o calor durante o dia quente

A2.3.4. Dia típico de projeto

Akutsu (1998) e Alucci (1992) apresentam procedimentos que identificam os meses e dias típicos de verão e inverno. O método é baseado na freqüência de ocorrência de temperaturas máximas e mínimas, definindo os chamados dias típicos. Ao contrário da metodologia do TMY e do TRY, este método identifica situações críticas e pode ser utilizado para resolver cenários de "pior caso possível". Não há base de dados recente disponível com este tratamento, devendo ser elaborada a partir dos dados brutos, caso necessário.

A3. Análise dos ventos

Foi estudado o período entre 17 de Junho de 2003 a 16 de Junho de 2008, totalizando 43802 horas. O período entre 11 de Novembro de 2002 e 16 de Junho de 2003 foi descartado por conter o maior número de ausências de dados e para manter a contagem em um número inteiro de anos. Como havia horários sem dados, foi realizado um estudo para verificar se havia algum padrão nas lacunas e se isso prejudicaria o estudo. Estavam disponíveis 33850 dados de temperatura e vento, 77% do número de horas do período.

A Tabela A.5 mostra a porcentagem de dados disponíveis para cada hora, indicando que não há concentração de lacunas em nenhuma hora específica.

Tabela A.5 – Avaliação da disponibilidade de dados por horário

Hora	Dados disponí-veis	Dados total	% disponível	Hora	Dados disponí-veis	Dados total	% disponível
01:00	1365	1827	75%	13:00	1333	1827	73%
02:00	1392	1827	76%	14:00	1342	1827	73%
03:00	1397	1827	76%	15:00	1349	1827	74%
04:00	1420	1827	78%	16:00	1379	1827	75%
05:00	1437	1827	79%	17:00	1391	1827	76%
06:00	1416	1827	78%	18:00	1395	1827	76%
07:00	1388	1827	76%	19:00	1372	1827	75%
08:00	1396	1827	76%	20:00	1392	1827	76%
09:00	1397	1827	76%	21:00	1406	1827	77%

Foi avaliada também a distribuição dos dados disponíveis em função dos meses e das estações do ano.

Tabela A.6 – Avaliação da disponibilidade de dados por mês

Mês	Dados disponíveis	Dados total	% disponível	Mês	Dados disponíveis	Dados total	% disponível
1	2870	3720	77%	7	2974	3720	80%
2	2505	3408	74%	8	2714	3720	73%
3	3397	3720	91%	9	2736	3600	76%
4	2880	3600	80%	10	2806	3720	75%
5	3055	3720	82%	11	2095	3600	58%
6	2756	3600	77%	12	3062	3720	82%

Tabela A.7 – Avaliação da disponibilidade de dados por estação

Estação	Dados disponíveis	Dados total	% disponível
Verão	8437	10802	78%
Inverno	8444	11040	76%

Estação	Dados disponíveis	Dados total	% disponível
Outono	9332	11040	85%
Primavera	7637	11040	69%

A observação dos dados indica a concentração destes no período de outono. O mês com maior percentual de dados disponível é o mês de março. Em compensação, o período da primavera, principalmente o mês de novembro, conta com o maior número de lacunas. Considera-se, no entanto, que os meses de março e novembro não apresentam características muito diversas entre si, podendo o maior número de dados em um compensar a ausência no outro.

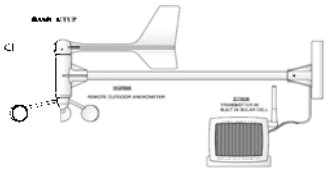
O resultado para a ocorrência de direções e velocidades de vento é apresentado em quantidade de dados (N) e porcentagem (%) na Tabela A.8.

Tabela A.8 – Freqüência de ocorrência de direções e velocidades de vento para o Aeroporto de Congonhas

Dir.	0 a 1		1 a 2		2 a 3		3 a 4		4 a 5		maior q 5	
	N	(%)	N	(%)	N	(%)	N	(%)	N	(%)	N	(%)
N	218	0,7	286	1,0	844	2,9	759	2,6	668	2,3	1165	4,0
NE	402	1,4	448	1,5	961	3,3	404	1,4	163	0,6	108	0,4
E	438	1,5	590	2,0	1637	5,6	942	3,2	440	1,5	225	0,8
SE	326	1,1	518	1,8	1604	5,4	1356	4,6	862	2,9	768	2,6
S	267	0,9	462	1,6	1646	5,6	1856	6,3	1950	6,6	2869	9,7
SW	69	0,2	97	0,3	331	1,1	263	0,9	195	0,7	240	0,8
W	65	0,2	89	0,3	222	0,8	131	0,4	63	0,2	49	0,2
NW	152	0,5	175	0,6	609	2,1	504	1,7	393	1,3	641	2,2
Calm	4380	14,9										
TOT.		**33850**										

A4. Medidas de campo

A4.1. *Equipamentos utilizados*

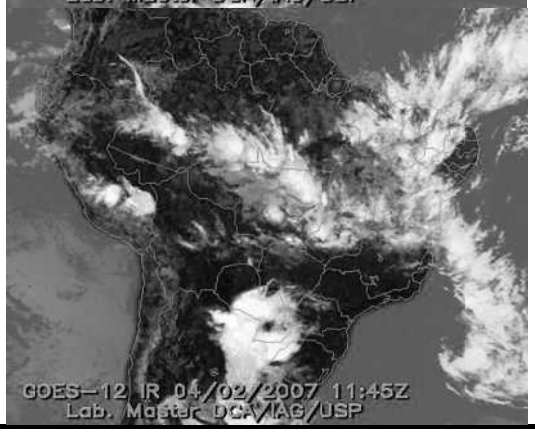
Equipamento	Imagem	Especificações
Data logger MM900 (ELE)		– 16 canais analógicos e 4 digitais – Bateria – Comunicação RS232 com micro computador – Memória interna de 128k – Escaneia e grava em intervalos de 1 a 30s, 1 a 10m e 1 a 24h
Anemômetro e direção de vento (ELE)		– Velocidade inicial : 0,25 m/s – Velocidade máxima: 65 m/s – Resolução: 0,1 m/s – Precisão: ± 2% – Constante de distância: 6,5 m
Estação Huger WM918		– Registrador com saída RS232 – Sensores internos de temperatura e umidade – Alimentação AC/DC (8 pilhas AAA) – 4m de cabos para conexão com os sensores
Anemômetro e direção de vento WMN918		*Velocidade* – Faixa de trabalho: 2 a 56 m/s – Precisão entre 2 e 10 m/s: ±1 m/s – Resolução: 0,2 m/s – Amostragem para vento médio: 1 m – Amostragem para rajada: 5 s *Direção de vento* – Faixa de trabalho: 2 a 98% – Precisão entre 0°C e 40°C: ±6% a ±8% – Resolução: 1°C – Amostragem: 10
Anemômetro e direção de vento Oregon Scientific WMN968		*Velocidade* – Faixa de trabalho: 2 a 56 m/s – Precisão: sem dados, assume-se ±1 m/s – Resolução: 0,2 m/s *Direção de vento* – Faixa de trabalho: 2 a 98% – Precisão entre 0°C e 40°C: ±6% a ±8% – Resolução: 1°C

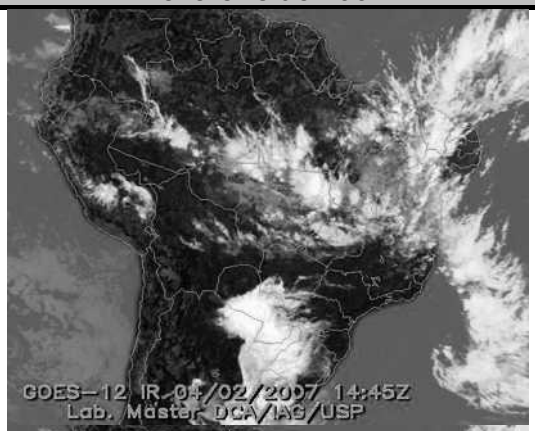
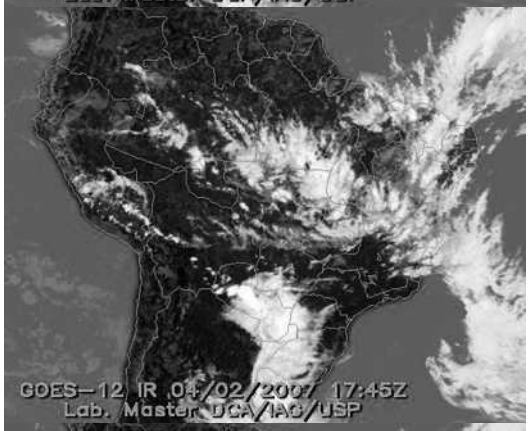
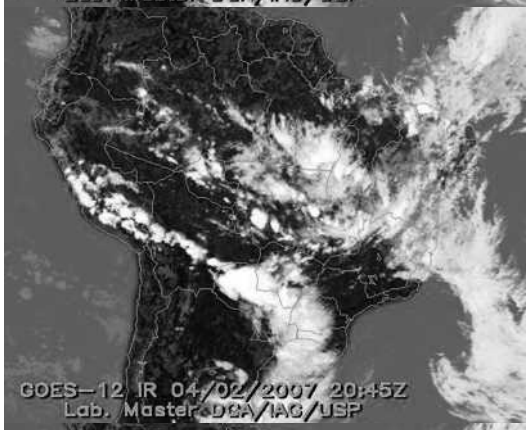
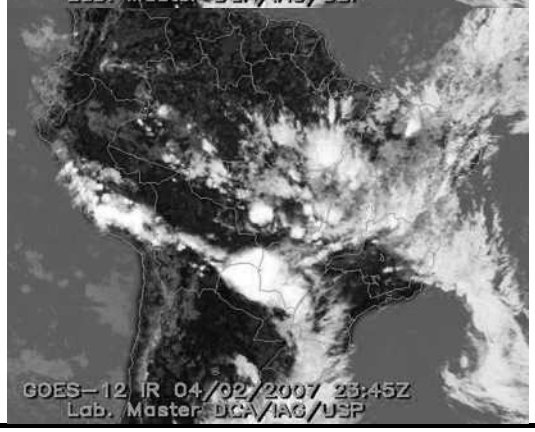
continuação

Equipamento	Imagem	Especificações
HOBO Onset **H8-004-02**		*Temperatura* – Faixa de trabalho: -40°C a 100°C – Precisão: ±0,7°C a 20°C – Resolução: 0,4°C a 25°C *Umidade* – Faixa de trabalho: 25 a 95% – Precisão: ±5% da escala total (±3,5%)
Sensor externo para ar, água ou solo		*Sensor externo de temperatura* – Faixa de trabalho: -40°C a 100°C – Precisão: ±0,5°C a 20°C – Resolução: 0,41°C a 20°C – Tempo de resposta: 3 minutos com vento de 1 m/s – Comprimento: 6,1m

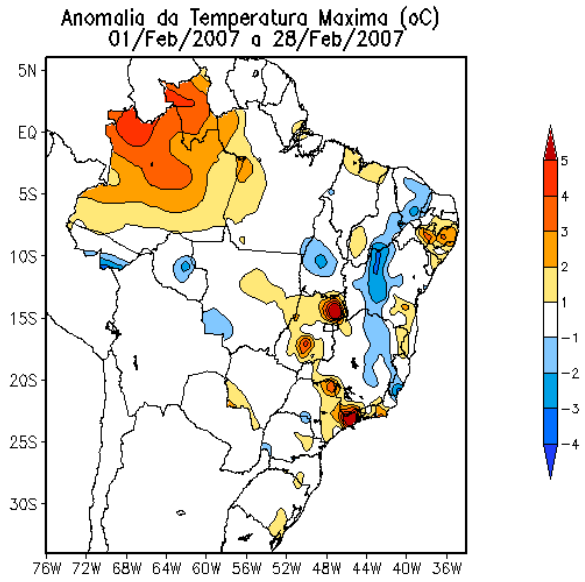
A4.2. *Condições sinóticas*

A4.2.1. Imagens de satélite

Horário	Fevereiro de 2007	Setembro de 2007
08:45 Z Fevereiro 6:45 local Setembro 5:45 local		
11:45 Z Fevereiro 9:45 local Setembro 8:45 local		

Horário	Fevereiro de 2007	Setembro de 2007
14:45 Z Fevereiro 12:45 local Setembro 11:45 local		
17:45 Z Fevereiro 15:45 local Setembro 14:45 local		
20:45 Z Fevereiro 18:45 local Setembro 17:45 local		
23:45 Z Fevereiro 21:45 local Setembro 20:45 local		

A4.2.2. Síntese sinótica - CPTEC (2007)

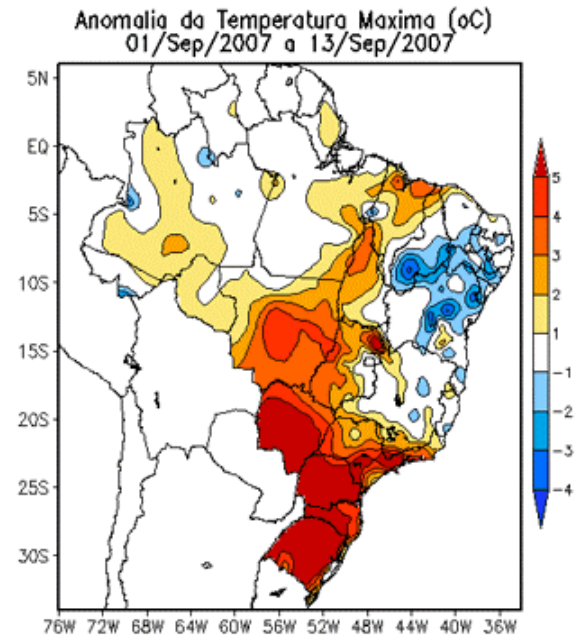


Fevereiro

Durante o período entre 30 de janeiro e 09 de fevereiro houve formação de uma Zona de Convergência do Atlântico Sul, que provoca instabilidade e está associada a altos índices de precipitação no sudeste brasileiro.

Este sistema apresentou um enfraquecimento somente entre os dias 05 e 07, significando que a medida foi feita sob sua influência.

Nas imagens de satélite, no entato, observa-se que a maior parte da nebulosidade estava localizada sobre Minas Gerais e o Paraná, enquanto o estado de São Paulo mantinha céu claro no dia da medida.



Setembro

No mês de setembro, houve um sistema frontal no dia 04 que passou sobre a Argentina e o Rio Grande do Sul, sem conseguir atingir latitudes mais baixas.

Houve predomínio de circulação anticlonica que inibiu a formação de nuvens e causou anomalias positivas de temperaturas, com baixa umidade associada. Nas imagens de satélite é possível perceber a pequena ocorrência de nuvens durante o período.

A nebulosidade verificada provavelmente é proveniente da brisa marítima.

Figura A.12 – Avaliação sinótica dos períodos de medida

Fonte: baseado em CPTEC (2007)

A4.3. *Correção das medidas do transecto*

A4.3.1. Fevereiro

		Ponto móvel					Estação fixa					Correção
Date/Time	Ponto	T(°C)	UR (%)	T. O(°C)	UA (g/m³)	TG(°C)	T(°C)	UR (%)	T. O(°C)	UA (g/m³)	TG(°C)	T(°C)
02/04/07 07:15:00.0	A	20,2	71,6	14,9	12,5	19,4	20,2	73,0	15,2	12,8	19,8	20,2
02/04/07 07:35:00.0	B	20,2	73,0	15,2	12,8	20,2	20,6	72,3	15,4	12,9	20,6	19,8
02/04/07 07:55:00.0	C	20,6	72,3	15,4	12,9	20,2	20,6	70,9	15,1	12,7	21,0	20,2
02/04/07 08:15:00.0	D	20,2	72,3	15,1	12,6	20,2	20,6	70,3	15,0	12,6	20,6	19,8
02/04/07 08:35:00.0	Fixo	21,0	70,3	15,3	12,8	21,0	21,0	70,3	15,3	12,8	21,3	20,2
02/04/07 10:00:00.0	A	22,9	62,2	15,3	12,7	22,9	22,5	62,6	15,0	12,5	23,2	22,9
02/04/07 10:20:00.0	B	24,0	58,2	15,3	12,7	27,9	23,2	59,6	14,9	12,4	23,6	23,3
02/04/07 10:40:00.0	C	23,2	60,2	15,1	12,5	23,6	24,0	57,2	15,0	12,4	24,8	21,7
02/04/07 11:00:00.0	D	24,4	56,3	15,1	12,5	25,2	24,0	55,5	14,6	12,1	24,8	22,9
02/04/07 11:20:00.0	Fixo	26,7	49,5	15,3	12,6	26,7	25,2	53,2	15,0	12,4	26,0	24,0
02/04/07 13:00:00.0	A	29,9	39,5	14,7	11,9	31,1	32,3	30,6	12,9	10,5	36,1	29,9
02/04/07 13:20:00.0	B	30,3	35,4	13,3	10,9	30,3	32,3	35,1	15,0	12,1	37,4	30,3
02/04/07 13:40:00.0	C	29,9	33,0	11,9	10,0	30,3	33,6	32,9	15,0	12,1	38,8	28,7
02/04/07 14:00:00.0	D	31,1	34,1	13,4	11,0	31,5	33,6	30,9	14,1	11,3	37,9	29,9
02/04/07 14:20:00.0	Fixo	33,6	35,1	16,1	12,9	37,4	33,2	33,1	14,8	11,9	35,7	32,8
02/04/07 16:00:00.0	A	29,1	44,1	15,6	12,7	29,5	29,5	42,8	15,5	12,6	29,9	29,1
02/04/07 16:20:00.0	B	27,9	50,9	16,8	13,8	27,1	29,5	46,6	16,9	13,7	30,3	27,9
02/04/07 16:40:00.0	C	28,7	49,2	17,0	13,9	28,3	31,5	40,1	16,3	13,2	35,7	26,7
02/04/07 17:00:00.0	D	29,9	46,0	17,0	13,9	29,9	30,7	41,2	16,0	13,0	34,0	28,7
02/04/07 17:20:00.0	Fixo	28,7	45,8	15,9	13,0	29,5	29,5	44,6	16,2	13,1	32,3	28,7
02/04/07 19:00:00.0	A	24,8	62,5	17,2	14,2	24,4	25,56	58,7	16,88	13,9	25,56	24,8
02/04/07 19:20:00.0	B	24,4	64,2	17,2	14,3	23,6	24,79	61,4	16,87	14	24,79	25,2
02/04/07 19:40:00.0	C	24,0	65,6	17,2	14,3	23,6	24,4	63,4	16,99	14,1	24,4	25,2
02/04/07 20:00:00.0	D	23,6	67,1	17,2	14,3	23,2	24,01	64,7	16,95	14,1	24,01	25,2
02/04/07 20:20:00.0	Fixo	24,4	65,5	17,5	14,6	24,0	24,01	65,6	17,17	14,3	24,01	26,0

A4.3.2. Setembro

		Ponto móvel		Estação fixa		Correção
Date/Time	Ponto	T(°C)	UR (%)	T(°C)	UR (%)	T(°C)
05/09/07 06:40:00.0	A	19,0	72,0	18,2	75,0	19,0
05/09/07 07:00:00.0	B	19,4	71,0	18,3	76,0	19,4
05/09/07 07:20:00.0	C	20,8	71,0	18,3	76,0	20,8
05/09/07 07:40:00.0	D	19,6	69,0	18,7	73,0	19,2
05/09/07 08:00:00.1	Fixo	20,3	68,0	19,0	71,0	19,5
05/09/07 09:00:00.0	A	23,5	58,0	20,6	62,0	23,5
05/09/07 09:20:00.0	B	26,8	49,0	21,3	59,0	26,0
05/09/07 09:40:00.0	C	25,7	48,0	21,7	59,0	24,6
05/09/07 10:00:00.0	D	24,5	46,0	23,6	52,0	21,4
05/09/07 10:20:00.0	Fixo	25,8	48,0	24,8	47,0	21,6
05/09/07 12:00:00.0	A	29,5	45,0	26,0	42,0	29,5
05/09/07 12:20:00.0	B	31,7	34,0	26,7	38,0	30,9
05/09/07 12:40:00.0	C	31,5	33,0	27,1	37,0	30,3
05/09/07 13:00:00.0	D	29,1	33,0	27,9	35,0	27,1
05/09/07 13:20:00.0	Fixo	30,7	33,0	29,5	31,0	27,2
05/09/07 15:00:00.0	A	31,8	29,0	31,5	22,0	31,8
05/09/07 15:20:00.0	B	31,5	29,0	30,7	23,0	32,3
05/09/07 15:40:00.0	C	30,2	30,0	30,3	24,0	31,4
05/09/07 16:00:00.0	D	30,8	30,0	29,5	25,0	32,8
05/09/07 16:20:00.0	Fixo	28,6	32,0	27,5	37,0	32,6
05/09/07 18:00:00.0	A	26,2	38,0	23,2	45	26,2
05/09/07 18:20:00.0	B	25,9	40,0	23,2	47	25,9
05/09/07 18:40:00.0	C	24,8	42,0	22,5	50	25,6
05/09/07 19:00:00.0	D	24,1	46,0	22,1	53	25,3
05/09/07 19:20:00.0	Fixo	23,5	49,0	22,1	54	24,7

A5. Modelo CEL para simulação térmica em CFX

As informações sobre o modelo de radiação são colocadas no arquivo formato CCL da seguinte forma:

```
FLUID MODELS:
  THERMAL RADIATION MODEL:
  Number of Histories = 5000000
  Option = Monte Carlo
  Radiation Transfer Mode = Surface to Surface
  SCATTERING MODEL:
    Option = None
  END
  SPECTRAL MODEL:
    Option = Multiband
    SPECTRAL BAND:Longwave
      Option = Wavelength in Vacuum
      Wavelength Lower Limit = RbSWBxLW
      Wavelength Upper Limit = 1000. [micron]
    END
    SPECTRAL BAND:ShortwaveA
      Option = Wavelength in Vacuum
      Wavelength Lower Limit = 0. [micron]
      Wavelength Upper Limit = RbSWAxB
    END
    SPECTRAL BAND:ShortwaveB
      Option = Wavelength in Vacuum
      Wavelength Lower Limit = RbSWAxB
      Wavelength Upper Limit = RbSWBxLW
    END
  END
END
```

Os valores para os limites das bandas espectrais são estabelecidos através de expressões do tipo CEL:

```
RLW = step((wavelo-RbSWBxLW)/1[micron])
RSWA = step((RbSWAxB-wavelo)/1[micron])
RSWB = step(-(wavelo/ RbSWAxB)^2+3*(wavelo - RbSWBxLW) /1[micron])
RbSWAxB = 1 [ micron ]
RbSWBxLW = 2 [ micron ]
```

As funções do tipo *step* são funções lógicas que trabalham com valores adimensionais. Caso o valor da expressão interna seja negativo, é retornado o valor 0, quando positivo, 1 e quando a expressão tiver resultado 0, é retornado o valor 0.5. Deste modo, as propriedades radiativas dos materiais podem ser determinadas em função do comprimento de onda. Isso será tratado em detalhe quando se falar do tratamento das superfícies de contorno.

O dia Juliano e a declinação são calculadas a partir das seguintes expressões:

```
parTDay = 4
```

```
parTHV = 1* Uhour
parTHi = 0 * Uhour
parTHour = parTHi + t - step(step((parTHi + t)/Uhour-24)-0.1)*24*Uhour - step(step((parTHi + t)/Uhour-48)-0.1)*24*Uhour - step(step((parTHi + t)/Uhour-72)-0.1)*24*Uhour - step(step((parTHi + t)/Uhour-96)-0.1)*24*Uhour - step(step((parTHi + t)/Uhour-120)-0.1)*24*Uhour
parTMonth = 2
Sdayj = parTDay+31*step(parTMonth-1.1)+28*step(parTMonth-2.1)+31*step(parTMonth-3.1)+30*step(parTMonth-4.1)+31*step(parTMonth-5.1)+30*step(parTMonth-6.1)+31*step(parTMonth-7.1)+31*step(parTMonth-8.1)+30*step(parTMonth-9.1)+31*step(parTMonth-10.1)+30*step(parTMonth-11.1)
Sdec = 23.4511*pi/180*sin(360*(Sdayj-81)/368*pi/180)
```

O parâmetro parTHour é função do tempo de simulação transcorrido e foi elaborado de modo a gerar um ciclo de 24 horas, ou seja, depois da 24ª hora, o parâmetro volta a assumir o valor de 1. Isso ocorre para os 5 primeiros dias de simulação.

O azimute e a altura solar são calculadas pelo seguinte conjunto de expressões:

```
Sahs = 15*((parTHour -parTHV )/Uhour-12)*pi /180*Urad
Sahsb = step(Sahs)
SolAza = (cos(Sahs)*cos(Sdec)*sin(Latrad)-sin(Sdec)*cos(Latrad)) /sin(SolZh)
SolAzaa = step(step(1-abs(SolAza))-0.6)
SolAzb = acos(SolAza*SolAzaa+1*(1-SolAzaa))
SolAzc = (Sahsb*(2*pi-SolAzb)+(1-Sahsb)*SolAzb) * (4*Sahsb^2-4*Sahsb+1)+(4*Sahsb^2-4*Sahsb)*step(step(Sdec-Latrad)-0.6)*pi
SolAzdegrees = (SolAzc*180/pi)
SolZh = acos(sin(Latrad)*sin(Sdec)+cos(Latrad)*cos(Sdec) *cos(Sahs))
SolZhdegrees = SolZh*180/pi/Urad
```

O azimute solar é convertido em ângulo trigonométrico e o valor é adicionado à direção do norte para determinar os vetores da radiação solar direta. No formato CEL:

```
SolAzTrig = step(90–SolAzdegrees)*(90-SolAzdegrees) + step (step(SolAzdegrees-90)-0,6)*(450-SolAzdegrees)
LNorthTrig = step(90–parLNorth)*(90-parLNorth) + step (step(parLNorth-90)-0,6)*(450- parLNorth)
SolAzF = (SolAzTrig + LNorthTrig)*pi/180*Urad
Radx= cos(SolAzF)
Rady= sen(SolAzF)
Radz = -1/tan(SolZh)
```

As emissividades são função do material a ser utilizado. As equações são escritas na forma:

```
parRalbG = 0.12
parRalbN = 0.5
parRemiG = 0.93
parRemiN = 0.85
RemiG = parRemiG*RLW+(1-parRalbG)*(RSWA+RSWB)
RemiN = parRemiN*RLW+(1-parRalbN)*(RSWA+RSWB)
```

Observa-se que as propriedades radiativas são determinadas para cada banda do espectro e a propriedade geral da superfície é dada pela última linha. As superfícies dos edifícios estão identificadas pela letra N para permitir no futuro a atribuição de propriedades diferenciadas para superfícies verticais orientadas para cada um dos pontos cardinais. Os valores colocados para o

albedo e a emissividade do solo e dos edifícios estão baseados inicialmente no asfalto e no tijolo cerâmico respectivamente

A emissividade das superfícies que representam o céu (o topo e as laterais do domínio) é dada pelas equações acima, enquanto o albedo (que determina a "emissividade solar") deve ser 0. No formato CEL, obtém-se o seguinte conjunto de expressões:

```
CTpo = 234.175* (ln(parCUR/100) + 170805*CTsky/ (234,175+CTsky)) / (17,08085 -ln(parCUR/100) -
        170805*CTsky/(234,175+CTsky))
RemiskyA = 0,013*cos(pi/Uhour*t/12) +0,711 +0,56*(Tpo/100) +0,73*(Tpo/100)^2
RemiskyB = RemiskyA * (1+0.0224*parCNI-0.0035*parCNI^2 +0.00028*parCNI^3)
RemiTop = Remisky*RLW+1*(RSWA+RSWB)
```

A temperatura do céu (**CTsky**) é a temperatura do ar na entrada do modelo.

Os modelos de convecção são dados principalmente para a entrada de ar no sistema. As expressões CEL utilizadas que dizem respeito a isto são:

```
Vak = 0.41 [ ]
Vbu1 = Vspeed*sin(Vthetaa)
Vbv1 = Vspeed*cos(Vthetaa)
Vdira = (180 + parCVdir-parLNorth)*pi/180
Vspeed = Vustar*loge((Vzmod-Vzref)/parVz0)/Vak
Vthetaa = Vdira
Vustar = Vak*parCVuref/loge((Vzuref-Vzref)/parVz0)
Vzmod = abs(z + 0.005*Umeter)
Vzref = 0.*Umeter
Vzuref = 10*Umeter
```

Deste modo, foram inicialmente adotadas as mesmas bases já utilizadas, exceto pela variação do vento ao longo do tempo.

Para o solo foram criadas as variáveis **GT01**, **GT02**, **GT03**, **GT04** e **GT05**. A variável **GT00** é a temperatura superficial e se trata de uma variável padrão do programa.

Para os edifícios, foram criadas as variáveis **WT01**, **WT02**, **WT03**, **WTi**, **WTi01**, **WTi02** , **WTi03** e **WTbc**. Do mesmo modo que no solo, a variável **WT00** é uma variável padrão do programa. Inicialmente havia sido utilizada a letra N ao final das variáveis para que se pudesse tratar de forma separada as temperaturas dos substratos com orientações diferentes. Embora tenha sido identificada uma maneira de realizar isso sem alterar o nome das variáveis, o índice N foi mantido nas expressões CEL, evitando que se reescrevesse todo o material.

No arquivo CCL, estas informações são colocadas da seguinte maneira:

```
LIBRARY:
  ADDITIONAL VARIABLE:GT01
    Boundary Only Field = 1
    Option = Definition
    Tensor Type = SCALAR
    Units = [C]
    Variable Type = Unspecified
  END

FLUID MODELS:
     ADDITIONAL VARIABLE:GT01
       Additional Variable Value = GT01s
       Option = Algebraic Equation
     END
```

```
LIBRARY:
  ADDITIONAL VARIABLE:WT01N
    Boundary Only Field = 1
    Option = Definition
    Tensor Type = SCALAR
    Units = [C]
    Variable Type = Unspecified
  END

FLUID MODELS:
     ADDITIONAL VARIABLE:WT01N
       Additional Variable Value = WT01Ns
       Option = Algebraic Equation
     END
```

Para se realizar o cálculo, foi necessário obter os valores das variáveis para o momento anterior. A única maneira encontrada na documentação do programa para se fazer isso foi utilizando expressões que obtinham valores médios para as *Parts* (grupos de superfície). Deste modo, as temperaturas do substrato não são calculadas célula a célula, mas são resultado de condições médias de exposição das *Parts*. Quanto mais detalhada a especificação das superfícies, mas específico será o valor da temperatura do substrato. Os valores de variáveis do timestep anterior são obtidos através das seguintes expressões CEL:

```
Ghtc = areaAve(Wall Heat Transfer Coefficient)@Ground
GpAT = areaAve (Wall Adjacent Temperature)@Ground
GpT00 = areaAve (Temperature)@Ground
GpT01 = areaAve (GT01)@Ground
GpT02 = areaAve (GT02)@Ground
GpT03 = areaAve (GT03)@Ground
GradA = areaAve(Wall Irradiation Flux)@Ground* (1-parRalbG) - stefan*GpT00^4*parRemiG
```

```
WpATN = areaAve (Wall Adjacent Temperature)@EdifN
WpT00N = areaAve (Temperature)@EdifN
WpT01N = areaAve (WT01N)@EdifN
WpT02N = areaAve (WT02N)@EdifN
WpT03N = areaAve (WT03N)@EdifN
WpTbc = areaAve (WTbc)@EdifN
WpTi01N = areaAve (WTi01N)@EdifN
WpTi02N = areaAve (WTi02N)@EdifN
WpTiN = areaAve (WTiN)@EdifN
WradN = areaAve(Wall Irradiation Flux)@EdifN*(1 - parRalbN) - stefan*WpT00N^4*parRemiN
```

Nos testes realizados, esta estratégia levou a uma uniformização excessiva das temperaturas superficiais. Deste modo, optou-se por calcular as temperaturas e valores anteriores utilizando-se a função *inside()@REGION*. Esta função do tipo *callback* retorna o valor 1 quando o ponto se encontra dentro da região indicada e 0 quando se encontra fora dela. O modelo para implementação desta função é:

```
GpT00A = areaAve(Temperature )@REGION A
GpT00B = areaAve(Temperature )@REGION B
GpT00 = GpT00A*inside()@REGION A +GpT00B*inside()@REGION B
```

A seguir, apresentam-se as funções para cálculo de todos os dados referentes a uma das partes utilizadas:

```
GpradE1 = areaAve(Wall Irradiation Flux )@REGION: DOM_PISO_E1
GphtcE1 = areaAve(Wall Heat Transfer Coefficient )@REGION: DOM_PISO_E1
GpATE1 = areaAve(Wall Adjacent Temperature )@REGION: DOM_PISO_E1
```

GpT00E1 = areaAve(Temperature)@REGION: DOM_PISO_E1
GpT01E1 = areaAve(GpT01)@REGION: DOM_PISO_E1
GpT02E1 = areaAve(GpT02)@REGION: DOM_PISO_E1
GpT03E1= areaAve(GpT03)@REGION: DOM_PISO_E1
GpT04E1= areaAve(GpT04)@REGION: DOM_PISO_E1
GpT05E1= areaAve(GpT05)@REGION: DOM_PISO_E1

No caso das variáveis criadas, é necessário atribuir um valor inicial. A nesse caso, foram utilizados os valores apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**.

Os parâmetros necessários para o cálculo das temperaturas do piso, no caso com dados para asfalto (A) e argila seca (B), são:

parGCondA = 0.06 [W m^-1 K^-1]
parGCondB = 0.25 [W m^-1 K^-1]
parGDensA = 2115 [kg m^-3]
parGDensB = 1600 [kg m^-3]
parGTemp = 21.5 [C]
parGcA = 920 [J kg^-1 K^-1]
parGcB = 890 [J kg^-1 K^-1]
parGdepth = 2 [m]
parGdepthA = 0.12 [m]

Para o cálculo da temperatura das paredes dos edifícios, os parâmetros são:

parWFSvidro = 0.86
parWLint = 6 [m]
parWRen = 6 [h^-1]
parWUv = 5.4 [W m^-2 K^-1]
parWWR = 0.5
parWeCond = 1.0 [W m^-1 K^-1]
parWeDens = 2645 [kg m^-3]
parWec = 960 [J kg^-1 K^-1]
parWedepth = 0.25 [m]
parWiCond = 1.4 [W m^-1 K^-1]
parWiDens = 2300 [kg m^-3]
parWiHc = 8 [W m^-2 K^-1]
parWiHr = 5.98 [W m^-2 K^-1]
parWic = 880 [J kg^-1 K^-1]
parWidepth = 3 [m]

As expressões que descrevem as temperaturas instantâneas para as camadas do solo são dadas por:

GBi = Ghtc*GdZA/parGCondA
GDiffA = parGCondA /(parGDensA *parGcA)
GDiffB = parGCondB /(parGDensB *parGcB)
GFoA = GDiffA*parTstep/GdZA^2
GFoB = GDiffB*parTstep/GdZB^2
GHF = Ghtc*(GpT00-GpAT)
GradA = Grad* RemiG - stefan*GpT00^4*RemiG
GT00s = 2*GFoA*(GradA*GdZA/parGCondA + GBi*GpAT + GpT01) + (1-2*GBi*GFoA - 2*GFoA)*GpT00
GT01s = GFoA*(GpT00 + GpT02) + (1-2*GFoA)*GpT01

```
GT02s = GFoA*(GpT01 + GpT03) + (1-2*GFoA)*GpT02
GT03s = (1 - 4*GFoA*GFoB * (parGCondA*GdZB+parGCondB*GdZA) / (GFoA*parGCondB*GdZA+GFoB*parGCondA*GdZB)) * GpT03 + 4*GFoA*GFoB / (GFoA*parGCondB*GdZA+GFoB*parGCondA*GdZB)* (parGCondA*GdZB*GpT02 + parGCondB*GdZA*GpT04)
GT04s = GFoB*(GpT03 + GpT05) + (1-2*GFoB)*GpT04
GT05s = GFoB*(GpT04 + parGTemp) + (1-2*GFoB)*GpT04
GdZA = parGdepthA/3
GdZB = (parGdepth-parGdepthA)/3
```

As temperaturas instantâneas para o edifício são mais complexas para se determinar, devido à existência de materiais e espessuras diferenciados e da camada de ar interna. Como as fachadas podem ter várias orientações, o número de partes, e conseqüentemente de variáveis, é maior. A seguir, apresentam-se as funções para todos os dados de uma das partes utilizadas para as edificações:

```
WpradNE1 = areaAve(Wall Irradiation Flux )@REGION: EDIF_E1
WphtcNE1 = areaAve(Wall Heat Transfer Coefficient )@REGION: EDIF _E1
WpATNE1 = areaAve(Wall Adjacent Temperature )@REGION: EDIF _E1
WpT00NE1 = areaAve(Temperature )@REGION: EDIF _E1
WpT01N = areaAve(WT01 )@REGION: EDIF _E1
WpT02N = areaAve(WT02 )@REGION: EDIF _E1
WpT03N = areaAve(WT03 )@REGION: EDIF _E1
WpTiN = areaAve(WTi )@REGION: EDIF _E1
WpTi01N = areaAve(WTi01 )@REGION: EDIF _E1
WpTi02N = areaAve(WTi01 )@REGION: EDIF _E1
WpTi03N = areaAve(WTi01 )@REGION: EDIF _E1
```

No caso das variáveis criadas, é necessário atribuir um valor inicial. Para tanto, foram utilizados os valores apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**. As expressões CEL são definidas por:

```
WeBiI = parWiHc *WedZ/parWeCond
WeBiN = WphtcN*WedZ/parWeCond
WeBiR = parWiHr *WedZ/parWeCond
WeDiff = parWeCond /(parWeDens *parWec)
WeFo = WeDiff*parTstep/WedZ^2
WedZ = parWedepth/3
WiBi = parWiHc *WidZ/parWiCond
WiBiR = parWiHr *WidZ/parWiCond
WiDiff = parWiCond /(parWiDens *parWic)
WiFo = WiDiff*parTstep/WidZ^2
WidZ = parWidepth/4
WHFN = WphtcN*(WpT00N - WpATN)*(1-WWR)+(WpTiN-WpATN)*(parWUv*WWR + parArDens*parArCp*parWLint*parWRen)
WT00Ns = 2*WeFo*(WradNA*WedZ/parWeCond + WeBiN*WpATN + WpT01N) + (1-2*WeBiN*WeFo - 2*WeFo)*WpT00N
WT01Ns = WeFo*(WpT00N + WpT02N) + (1-2*WeFo)*WpT01N
WT02Ns = WeFo*(WpT01N + WpT03N) + (1-2*WeFo)*WpT02N
WT03Ns = 2*WeFo*( WpT02N+WeBiI*WpTiN +WeBiR*WpTi01N ) + (1 - 2*WeFo-2*WeBiI*WeFo- 2*WeFo*WeBiR)*WpT03N
WTi01Ns = 2*WiFo*( WpTi02N+WiBi*WpTiN +WiBiR*WpT03N ) + (1 - 2*WiFo -2*WiBi*WiFo - 2*WiBiR*WiFo)*WpTi01N
```

```
WTi02Ns = WiFo*(WpTi01N + WpTi03N) + (1-2*WiFo)*WpTi02N
WTi03Ns = WiFo*(WpTi02N + WpTbcN) + (1-2*WiFo)*WpTi03N
WTiAr = parTstep / (parArDens * parArCp * parWLint)
WTiNs = (1 - WTiAr* (2*parWiHc*(1-parWWR) + parWWR*parWUv + parArDens*parArCp*parWLint*parWRen)) *WpTiN + WTiAr*(parWiHc*(1-parWWR) *(WpT03N+WpTi01N)+parWWR*(WradN*parWFSvidro + parWUv*WpATN) +parArDens*parArCp*parWLint*parWRen*WpATN)
WradNA = WradN* RemiN - stefan*WpT00N^4*RemiN
```

A programação do regime transiente no formato CCL é dada pelo seguinte texto:

```
OUTPUT CONTROL:
  RESULTS:
    File Compression Level = Default
    Option = Standard
  END
  TRANSIENT RESULTS:Intermediarios
    File Compression Level = Default
    Option = Standard
    OUTPUT FREQUENCY:
      Option = Time Interval
      Time Interval = 15[min]
    END
  END
END
SIMULATION TYPE:
  Option = Transient
  EXTERNAL SOLVER COUPLING:
    Option = None
  END
  INITIAL TIME:
    Option = Automatic with Value
    Time = 0 [s]
  END
  TIME DURATION:
    Option = Total Time
    Total Time = 24 [h]
  END
  TIME STEPS:
    Option = Timesteps
    Timesteps = parTstep
  END
END
CEL:
    EXPRESSIONS:
      parTDay = 4
      parTHV = 1* Uhour
      parTHi = 0 * Uhour
      parTHour = parTHi + t - step(step((parTHi + t)/Uhour-24)-0.1)*24*Uhour - step(step((parTHi + t)/Uhour-48)-0.1)*24*Uhour - step(step((parTHi + t)/Uhour-72)-0.1)*24*Uhour - step(step((parTHi + t)/Uhour-96)-0.1)*24*Uhour - step(step((parTHi + t)/Uhour-120)-0.1)*24*Uhour
```

```
    parTMonth = 2
    parTres = 15 [min]
    parTstangAB = 20
    parTstangBC = 50
    parTstep = parTstpA + step(SolZhdegrees - parTstangAB)*(parTstpB - parTstpA) + step(SolZhdegrees -
               parTstangBC)*(parTstpC - parTstpB)
    parTstpA = 2 [s]
    parTstpB = 5 [s]
    parTstpC = 10 [s]
   END
  END
END
```

Para se colocarem as condições de entrada como funções de interpolação das variáveis medidasd na estação, devem-se inserir as funções são inseridas no arquivo CCL com o seguinte formato:

```
FUNCTION:DVento
  Argument Units = [h]
  Option = Interpolation
  Result Units = []
  INTERPOLATION DATA:
    Data Pairs = 0,110,1,110,2,100,3,110,4,110,5,90,6,110,7,100,8,70,
                 9,100,10,110,11,90,12,80,13,100,14,160,15,200,16,170,
                 17,160,18,170,19,170,20,170,21,170,22,160,23,160,24,110
    Extend Max = Off
    Extend Min = Off
    Option = One Dimensional
  END
END
FUNCTION:RadDiff
  Argument Units = [h]
  Option = Interpolation
  Result Units = [W m^-2]
  INTERPOLATION DATA:
    Data Pairs = 0,0,1,0,2,0,3,0,4,0,5,0,6,0,7,0,8,45,
                 9,203,10,297,11,258,12,201,13,360,14,367,15,285,16,284,
                 17,230,18,124,19,104,20,17,21,0,22,0,23,0,24,0,25,0
    Extend Max = Off
    Extend Min = Off
    Option = One Dimensional
  END
END
FUNCTION:RadDir
  Argument Units = [h]
  Option = Interpolation
  Result Units = [W m^-2]
  INTERPOLATION DATA:
    Data Pairs = 0,0,1,0,2,0,3,0,4,0,5,0,6,0,7,0,8,2,9,90,10,79,11,484,
                 12,740,13,483,14,466,15,573,16,426,17,333,18,307,19,28, 20,4,21,0,22,0,23,0,24,0,25,0
    Extend Max = Off
```

```
    Extend Min = Off
    Option = One Dimensional
  END
END
FUNCTION:TempEntrada
  Argument Units = [h]
  Option = Interpolation
  Result Units = [C]
  INTERPOLATION DATA:
    Data Pairs = 0,20,1,20,2,20,3,20,4,20,5,19,6,19,7,19,8,20,
      9,20,10,21,11,23,12,25,13,26,14,27,15,28,16,26,17,25,18,24,
      19,23,20,22,21,22,22,21,23,21,24,20
    Extend Max = Off
    Extend Min = Off
    Option = One Dimensional
  END
END
FUNCTION:URent
  Argument Units = [h]
  Option = Interpolation
  Result Units = []
  INTERPOLATION DATA:
    Data Pairs = 0,83,1,83,2,83,3,83,4,78,5,83,6,83,7,88,8,83,
      9,83,10,78,11,73,12,65,13,58,14,54,15,51,16,61,17,69,18,69,
      19,78,20,83,21,83,22,83,23,83,24,83
    Extend Max = Off
    Extend Min = Off
    Option = One Dimensional
  END
END
FUNCTION:VVento
  Argument Units = [h]
  Option = Interpolation
  Result Units = [m s^-1]
  INTERPOLATION DATA:
    Data Pairs = 0,4,1,4,2,4,3,3,4,3,5,2,6,2,7,3,8,4,9,3,10,5,11,4,12,3, 13,3,14,3,
      15,4,16,7,17,7,18,5,19,5,20,5,21,4,22,4,23,4,24,4
    Extend Max = Off
    Extend Min = Off
    Option = One Dimensional
  END
END
```

Além dos parâmetros estabelecidos via função, a cobertura de nuvens foi atribuída como sendo constante ao longo do dia, assim como a relação entre a radiação direta e difusa. Isto pode ser corrigido em estudos futuros.

```
parCNI = 0.10
parCRadiff = RadDir(parTHour )*0.2*RSWB
parCRadirect = RadDir(parTHour )*0.8*RSWA/cos(SolZh)
parCText = TempEntrada(parTHour)
parCUR = URent(parTHour)
```

parCVdir = DVento(parTHour)
parCVuref = VVento(parTHour)

O arquivo utilizado contém as seguintes condições de contorno, já com indicadas no formato CCL, com as *Parts* componentes e as variáveis estabelecidas:

Tabela A.9: Condições de contorno para o modelo proposto – laterais e teto do domínio

```
BOUNDARY:Boundary
  Boundary Type = OPENING
  Location = DOM_E,DOM_N,DOM_NE,DOM_NW,DOM_S,
DOM_SE, DOM_SW,DOM_W
  BOUNDARY CONDITIONS:
    FLOW REGIME:
      Option = Subsonic
    END
    HEAT TRANSFER:
      Opening Temperature = parCText
      Option = Opening Temperature
    END
    MASS AND MOMENTUM:
      Option = Cartesian Velocity Components
      U = Vbu1
      V = Vbv1
      W = 0 [m s^-1]
    END
    THERMAL RADIATION:
      Blackbody Temperature = RTskyB
      Option = External Blackbody Temperature
    END
    TURBULENCE:
      Option = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
    END
  END
  BOUNDARY SOURCE:
    SOURCES:
      RADIATION SOURCE:SkyB
        Option = Isotropic Radiation Flux
        Radiation Flux = parCRadiff
          END
          RADIATION SOURCE:SunB
            Option = Directional Radiation Flux
            Radiation Flux = parCRadirect
            DIRECTION:
              Option = Cartesian Components
              Unit Vector X Component = Radx
              Unit Vector Y Component = Rady
              Unit Vector Z Component = Radz
```

```
BOUNDARY:Top
  Boundary Type = WALL
  Location = DOM_TOPO
  BOUNDARY CONDITIONS:
    HEAT TRANSFER:
      Option = Adiabatic
    END
    THERMAL RADIATION:
      Diffuse Fraction = 1.
      Emissivity = RemiTop
      Option = Opaque
    END
    WALL INFLUENCE ON FLOW:
      Option = Free Slip
    END
  END
  BOUNDARY SOURCE:
    SOURCES:
      RADIATION SOURCE:SkyB
        Option = Isotropic Radiation Flux
        Radiation Flux = parCRadiff
      END
      RADIATION SOURCE:SunB
        Option = Directional Radiation Flux
        Radiation Flux = parCRadirect
        DIRECTION:
          Option = Cartesian Components
          Unit Vector X Component = Radx
          Unit Vector Y Component = Rady
          Unit Vector Z Component = Radz
```

Tabela A.10 – Condições de contorno para o modelo proposto – piso e edifícios

BOUNDARY:**EdifN**	BOUNDARY:**Ground**
Boundary Type = WALL	Boundary Type = WALL
Location = **VARIOS**	Location = **VARIOS**
BOUNDARY CONDITIONS:	BOUNDARY CONDITIONS:
HEAT TRANSFER:	HEAT TRANSFER:
Heat Flux in = WHFN	Heat Flux in = GHF
Option = Heat Flux	Option = Heat Flux
END	END
THERMAL RADIATION:	THERMAL RADIATION:
Diffuse Fraction = 1.	Diffuse Fraction = 1.
Emissivity = RemiN	Emissivity = RemiG
Option = Opaque	Option = Opaque
END	END
WALL INFLUENCE ON FLOW:	WALL INFLUENCE ON FLOW:
Option = No Slip	Option = No Slip
END	END
WALL ROUGHNESS:	WALL ROUGHNESS:
Option = Smooth Wall	Option = Smooth Wall

A6. Ferramentas de geoprocessamento

A6.1. *Dados das fachadas*

Para o cálculo dos dados da fachada, foi elaborado um novo desenho para as edificações com um *offset* de 10 cm para o interior. Os polígonos resultantes foram decompostos em linhas, exportados para o MapInfo (Fachadas_central.tab), que automaticamente atribuiu a elas uma identificação (ID). A tabela resultante foi novamente exportada no formato *.mif.

Nesta extensão, tem-se de cada elemento na ordem em que aparecem na tabela original e os valores dos pontos que o compõe na seguinte sequência:

"Line CoordX-$P_{inicial}$ CoordY-$P_{inicial}$ CoordX-P_{final} CoordY-P_{final} → objeto 1
Pen (1,2,255)
Line CoordX-$P_{inicial}$ CoordY-$P_{inicial}$ CoordX-P_{final} CoordY-P_{final} → objeto 2
Pen (1,2,255)"

Esta informação foi colocada em uma planilha onde foi, filtrada para eliminar a linha Pen (x, y, z). As coordenadas foram separadas em colunas e foi inserida uma coluna numerada sequencialmente. Os valores de orientação são calculados no próprio aplicativo de planilha eletrônica, que corrige o valor para ângulos trigonométricos.

O resultado final deve ser exportado para o MapInfo. A estrutura da tabela original foi então alterada para comportar às coordenadas X e Y inicial e X e Y final de cada objeto, o comprimento da fachada e a orientação. Os valores são então atualizados fazendo com que o ID de cada objeto da tabela Fachada_central coincida com a coluna seqüencialmente numerada na planilha.

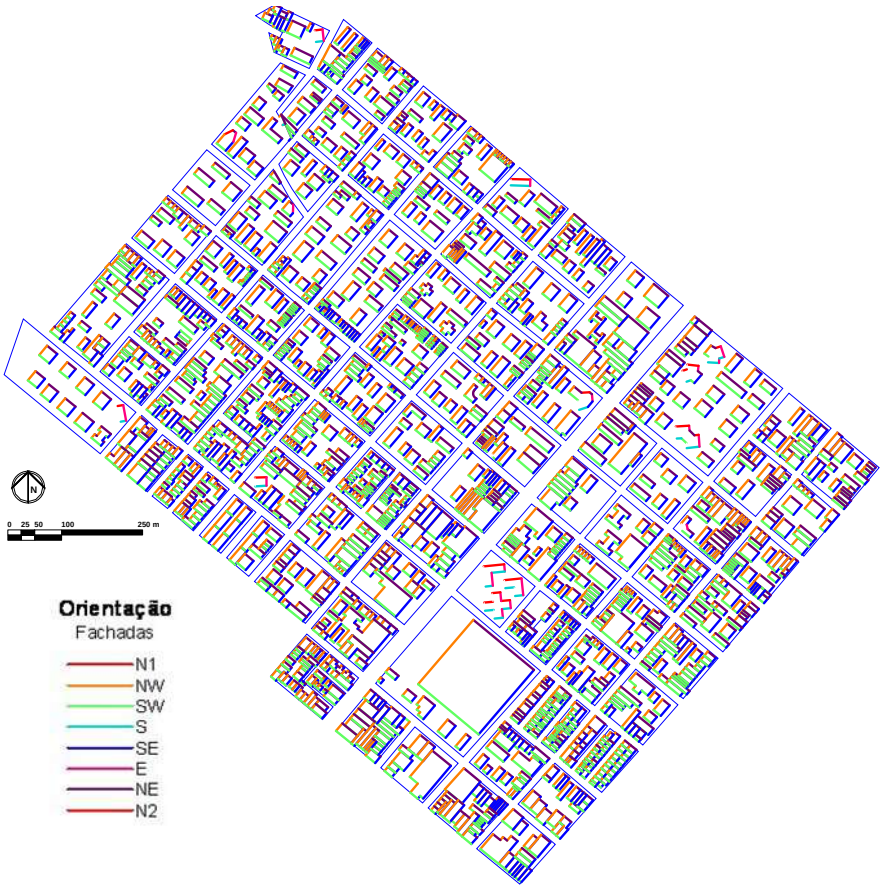


Figura A.13: Mapeamento da orientação das fachadas

A altura das fachadas (coluna Altura), em metros, pode ser obtida a partir da tabela Edifícios_central, atualizando-se a coluna com o valor (*Value*) da coluna altura, sendo que o objeto da tabela Fachada_central está contido no objeto da tabela Edifício_central. Entre parênteses está colocado o nome da função disponível no MapInfo para este tipo de cálculo. Quando se pede para atualizar uma coluna da tabela A com dados de outra tabela B é possível escolher se serão utilizados apenas o valor de um elemento da B (*Value*), com o a soma de todos os elementos (*Sum*), com a média (*Avg*) ou com a média ponderada por alguma outra coluna ou expressão, dentre outras opções.

Para cálculo das obstruções das fachadas, foi necessária a elaboração de quatro malhas auxiliares, percorrendo o modelo nos sentidos Norte-Sul, Leste-Oeste, Nordeste-Sudoeste e Noroeste Sudeste, com linhas espaçadas em 2,5 m. As planilhas foram denominadas genericamente de "GridX_Y", onde X_Y são as orientações utilizadas: N_S, E_W, etc. A área no interior dos prédios foi apagada (função *Erase* de edição de objetos) , utilizando como molde para corte o polígono formado pelas fachadas dos edifícios, deixando apenas as áreas externas.

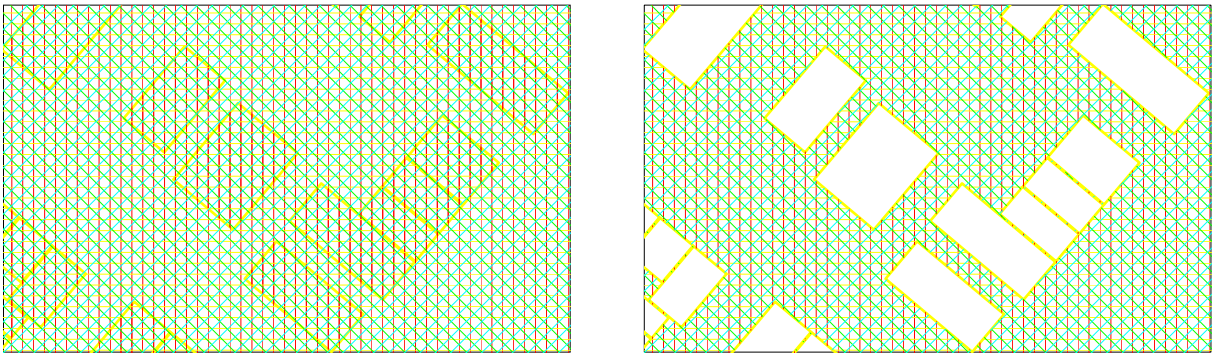


Figura A.14 – Malhas auxiliares, com exclusão da área interna ao edifício

As linhas foram desagregadas, de modo a se tornarem objetos individuais. A estrutura da tabela foi modificada de modo a incorporar as colunas Comprimento, Comp_Fach, Alt_Fach e Albedo_M. Para garantir que os elementos da malha intersectassem as fachadas, foi produzido um *buffer* com *offset* de 1 cm. O *buffer* é um polígono produzido ao redor de um objeto, cujo limite é dado por uma linha cujos pontos têm a mesma distância do objeto gerador. Esta distância é denominada *offset* do *buffer*. A área, no caso, possui as mesmas informações do objeto gerador e pode ser atualizada utilizando-se o sistema de sobreposição em que o objeto da tabela *buffer* contem o objeto da tabela original. O resultado foi salvo em uma planilha auxiliar.

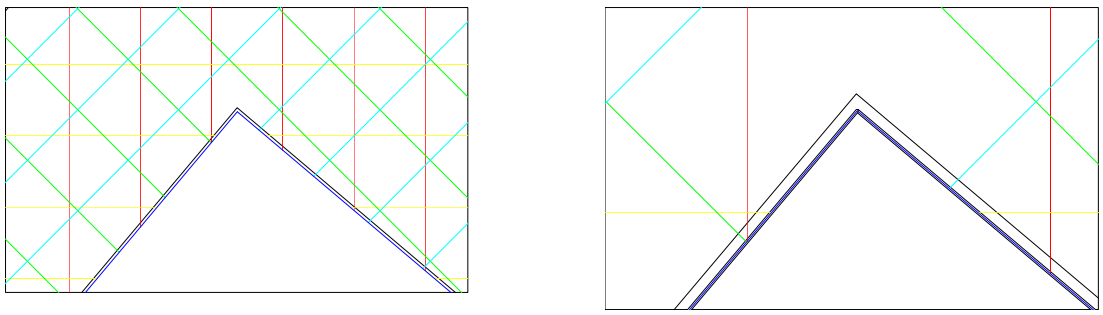


Figura A.15 – *Buffer* gerado ao redor das fachadas

A coluna Comprimento é atualizada utilizando-se a função:

```
CartesianObjectLen(obj, "m")
```

As colunas Comp_Fach, Alt_Fach e Albedo_M são calculadas a partir da junção das tabelas GridX_Y e Fachadas_central_buffer, onde o objeto da tabela GridX_Y intersecta o objeto da

tabela Fachada_central_buffer. São calculadas então as somas (*Sum*) das colunas Comprimento (criada utilizando a mesma função apresentada anteriormente) e Altura da tabela Fachada_central_buffer.

A princípio, cada objeto das tabelas GridX_Y cruza com apenas dois objetos da tabela Fachada_central_*buffer*. Como o *buffer* gerado é pequeno comparado ao espaçamento da malha, há poucas exceções a esta regra e elas puderam ser desconsideradas. Deste modo, para se obter a altura da fachada oposta para uma, basta subtrair o valor da própria altura da fachada do valor total.

Como, no entanto, cada objeto da tabela Fachada_central_buffer intersecta vários objetos de cada tabela GridX_Y, é necessário saber quantas vezes o valor da própria altura deverá ser subtraído do total. Para isso, geram-se 12 novas colunas (CountX_Y, SumAltX_Y, SumCompX_Y) que são atualizadas com a contagem (*Count*) de objetos das tabelas GridX_Y e com a soma (Sum) das colunas Alt_Fach e Comp_Fach, respectivamente.

A obstrução da fachada (tangente do ângulo de obstrução) para uma determinada orientação X_Y é e atualizada nas colunas ObstX_Y. A expressão utilizada tem o formato:

```
atn( (SumAltX_Y- CountX_Y*Altura)/SumCompX_Y)*57.29577951
```

O multiplicador final (57,29577951) tem por objetivo converter o valor encontrado em radianos para graus.

Uma nova coluna foi adicionada – ObstrMedia – atualizada com os valores médios de obstrução para as quatro direções, através da expressão:

```
(ObstN_S+ObstE_W+ObstNE_SW+ObstNW_SE)/4
```

A estrutura final da tabelas tipo GridX_Y foi a seguinte:

ID	Integer
Comprimento	Decimal (10,2)
LargFach	Decimal (10,2)
AltFach	Decimal (10,2)
H_W	Decimal (10,4)
Albedo_M	Decimal (5,1)
Angulo	Decimal (5,1)

Para a tabela Fachadas_central_buffer, a estrutura final foi:

ID	Integer	SumCompN_S	Decimal(10,2)
CoordX1	Decimal(10,2)	SumCompE_W	Decimal(10,2)
CoordY1	Decimal(10,2)	SumCompNE_SW	Decimal(10,2)
CoordX2	Decimal(10,2)	SumCompNW_SE	Decimal(10,2)
CoordY2	Decimal(10,2)	SumAltN_S	Decimal(10,2)
CentX	Decimal(10,2)	SumAltE_W	Decimal(10,2)
CentY	Decimal(10,2)	SumAltNE_SW	Decimal(10,2)
Orient	Decimal(6,1)	SumAltNW_SE	Decimal(10,2)
Altura	Decimal(5,2)	ObstN_S	Decimal(10,2)
Área	Decimal(10,2)	ObstE_W	Decimal(10,2)
Comprimento	Decimal(10,2)	ObstNE_SW	Decimal(10,2)
CountN_S	Integer	ObstNW_SE	Decimal(10,2)
CountE_W	Integer	ObstMedia	Decimal(10,2)
CountNE_SW	Integer		
CountNW_SE	Integer		

A6.2. *Parâmetros básicos*

Para se obter a taxa de ocupação e o coeficiente de aproveitamento, foi necessário primeiro calcular a área de projeção e a área construída de cada edificação. Isto pode ser obtido utilizando a ferramenta ***Update column*** do aplicativo. O procedimento para isto foi o seguinte:

1. Modificou-se a estrutura da tabela de Edifícios incluindo as colunas Area e Area_proj;
2. A coluna Area_proj foi atualizada com a função:

   CartesianArea (obj, “sq m”)

3. Atualizou-se a coluna Area com a expressão:

   Area_proj*Andares

4. A estrutura da tabela Quadras_brutas foi modificada, inserindo-se as colunas Area_proj_T, Area_T,Area_quadra, CA e TO;
5. Atualizaram-se a coluna Area_proj_T com a soma (*Sum*) de Area_proj da tabela Edifício e a coluna Area_T com a soma (*Sum*) de Area da tabela Edifício;
6. As colunas TO e CA foram atualizadas com as expressões

   Area_proj_T / CartesianArea (obj, “sq m”) → TO
   Area_T / CartesianArea (obj, “sq m”) → CA

   Para se simplificar o procedimento, pode-se criar uma coluna Area_quadra e utilizá-la no denominador.
7. O mesmo procedimento pode ser aplicado à tabela Quadras_fiscal_central, obtendo-se os índices líquidos (CA_liq, TO_liq) ao invés dos brutos (CA_bruto,TO_bruto).

Para determinação dos recuos médios, bastou criar novas colunas na tabela Quadras_bruta_central correspondentes a cada um dos GridX_Y (RecuoN_S, RecuoE_W, etc.) propostos e atualizá-las com o valor médio (Avg) de Comprimento. Neste caso, o objeto da tabela GridX_Y intersecta o objeto da tabela Quadras_bruta_central. A média para os quatro conjuntos de orientações foi denominado Recuo_M.

A6.3. *Parâmetros avançados*

Como afirmado, os parâmetros básicos são insuficientes para descrever a área, ou pelo menos, para se estabelecer uma correlação direta com o comportamento das variáveis ambientais. Por isso, foram calculados critérios secundários, baseados em índices utilizados nos modelos anteriormente descritos.

A6.3.1. Rugosidade

Para se calcular a área de silhueta, é necessária a obtenção do comprimento da edificação no sendo perpendicular à incidência de vento. Caso o desenho esteja orientado com o eixo Y coincidindo com o norte, observa-se que a área de silhueta no sentido Norte-Sul pode ser calculada subtraindo-se o valor máximo da coordenada em X pelo valor mínimo. O mesmo pode ser afirmado em relação ao sentido Leste-Oeste e a diferença das coordenadas em Y.

As coordenadas de cada edificação estão disponíveis na tabela Fachadas_central. Observa-se que como os polígonos são fechados, as coordenadas iniciais de um ponto são sempre coordenadas finais de outro. Assim, é possível criar colunas MaxX, MinX, MaxY e MinY na tabela Edifícios_central e atualizá-las o valor máximo (*Max*) e mínimo (*Min*) de CoordX1 e CoordY1, colocando-se que o objeto da tabela Edifícios_central contém o objeto da tabela Fachadas_central.

Para converter os valores de CoordX1 e Coord Y1 em CoordX1r e CoordYr1r, correspondentes aos sentidos NE-SW e NW- SE, podem-se utilizar, respectivamente, as expressões abaixo:

CoordX1*cos(45/57.29577951)-CoordY1*sin(45/57.29577951)
CoordX1*sin(45/57.29577951)+CoordY1*cos(45/57.29577951)

Os valores são atualizados na tabela Edifícios_central nas colunas MaxXr, MinXr, MaxYr e MinYr da mesma maneira que as coordenadas originais. Isso permite o cálculo da área de silhueta do edifício para cada orientação (SL_X_Y), dado por:

(MaxX-MinX)*Altura	→	SL_N_S
(MaxY-MinY)*Altura	→	SL_E_W
(MaxXr-MinXr)*Altura	→	SL_NE_SW
(MaxYr-MinYr)*Altura	→	SL_ NW_SE

O valor médio(*Avg*) da área de silhueta para cada orientação é atualizado em cada coluna SLr_X_Y da tabela Quadras_bruta_central, onde o objeto da tabela Edifícios_central está contido no objeto da tabela Quadras_bruta_central.

É também criada a coluna N_Edif, que é atualizada com a contagem (*Count*) de elementos da tabela Edifícios_central, onde o elemento da tabela Quadras_bruta_central contém o elemento da tabela Edifícios_central.

A coluna Area_lote determina a densidade de elementos e é calculada através da expresssão:

CartesianArea(obj, sq m)/N_Edif

Foram criadas 12 novas colunas, denominadas RoughX_Y_M,em que. X_Y descrevem a orientação do vento para o qual a rugosidade está sendo calculada (N_S, E_W, NE_SW e NW_SE) e M é o método de cálculo (L para Lettau, Ma para MacDonald e Ra para Rapachau).

Foram também criadas 6 colunas para cálculo de do deslocamento do plano de rugosidade ($\mathbf{z_d}$). São então calculados os valores do plano de deslocamento considerando três equações: Zdbásico (baseado na estimativa inicial proposta por Oke & Grimmond(1999) em que $\mathbf{z_d}$ é igual a 70% da altura média), ZdMa e quatro do tipo ZdRa_X_Y. Como $\mathbf{z_d}$ na equação de Rapachau é função da área frontal, ele deve ser calculado separadamente para cada orientação.

Os valores do plano de deslocamento são calculados respectivametne pelas expressões a seguir

- ZdBásico:

  0,7*Hmed

- ZdMa:

  Hmed*(1+3.39^(-TO_bruto)*(TO_bruto-1))

- ZdRa_X_Y:

  Hmed*(1-((1-exp(-1*(15*SL_X_Yr)^0.5))))

Os cálculos de rugosidade para cada método são dados por:

- Lettau:

  0,5*Hmed*SL_X_Y/Area_lote

- MacDonald:

  (Hmed-Zd_Ma)*exp(-1*(0.5*1*1.2/(0.41^2)*(1-Zd_Ma/Hmed) *(SL_X_Yr/Area_lote)*0.5)^(-0.5))

- Rapachau:

  (Hmed-Zd_Ra_X_Y)*exp(-0.41*(Maximum(0.3, (0.003+0.3*SL_X_Yr/Area_lote)^0.5))^-1+0.193)

O valor médio da rugosidade por quadra é dado por:

(RoughN_S_M+RoughE_W_M+RoughNE_SW_MRoughNW_SE_M)/4

A6.3.2. Obstrução média

. A obstrução deste ponto médio do *grid* (tangente do ângulo de obstrução) é calculada na própria tabela GridX_Y, em uma coluna denominada H_W. O valor é dado pela expressão:

Alt_Fach/Comprimento

O ângulo de obstrução é obtido pela expressão a seguir, convertida de radianos para graus pelo multiplicador final (57,29577951) e adicionado na coluna Ângulo.

atn(H_W)*57.29577951

Depois de calculadas as obstruções, os objetos das tabelas GridX_Y são cortados (*Split*) pelos objetos da tabela Quadras_brutas_central. Uma nova coluna de comprimento (Comp_cort) é criada e atualizada. Deste modo, ao se calcular a obstrução da quadra, é possível calcular uma média da coluna Ângulo ponderada pela coluna Comp_cort (*WtAvg*). A obstrução para cada orientação é atualizada na coluna Obst_X_Y da tabela Quadras_bruta_central.

Uma nova coluna foi adicionada – ObstrMedia – atualizada com os valores médios de obstrução para as quatro direções, através da expressão:

(ObstN_S+ObstE_W+ObstNE_SW+ObstNW_SE)/4

A6.3.3. Índice de compacidade

O cálculo do volume e da área superficial para cada edifício foi feito e atualizado nas colunas Volume e AreaSup, pelas respectivas expressões:

CartesianArea(obj, "sq m")*Altura → Volume
CartesianPerimeter(obj, "m")*Altura + CartesianArea(obj, "sq m") → AreaSup

Foi então calculada a razão entre as duas variáveis na coluna RazaoAreaSupVol:

AreaSup/Volume

Os valores de IC podem ser calculados tanto para os edifícios quanto para a quadra pela expressão:

(6/((2*VolumeTotal)^(1/3)))/RazaoSup_Vol

A6.3.4. Variação de alturas

Para se calcular o valor dos desvios padrão, foram criadas duas colunas na tabela Edifícios_central: HmedQuadra e Ad2. A coluna HmedQuadra foi atualizada com os valores (*Value*) de Hmed da tabela Quadras_bruta_central, onde o elemento da tabela Quadras_bruta_central contém o elemento da tabela Edifícios_central.

O valor de Ad2, que será utilizado no cálculol dos dois valores de desvio padrão, é dado pela expressão:

```
Area*(Altura-HmedQuadra)^2
```

Na tabela Quadras_bruta_central, são criadas três colunas: Ad2Total, DpH1 e DpH2. A coluna Ad2Total é atualizada com a soma (Sum) de Ad2 databela Edifícios_central, onde o elemento da tabela Edifícios_central está contido no elemento da tabela Quadras_bruta_central. Os valores de DpH1 e DpH2 são calculados, respectivamente, pelas expressões:

```
(Ad2Total/Areaproj)^0.5
((Ad2Total+(Area-Areaproj)*Hmed^2)/Area)^0.5
```

A6.4. *Temperatura Analítico*

Uma nova tabela do tipo Grid_X_Y (Grid_X_Y_10m) foi criada, mas com intervalos de 10 m entre as linhas. A tabela foi atualizada com os valores médios obtidos na tabela Grid_X_Y (Comp, AltFach e Albedo_M) e com os valores de vento obtidos na simulação. Observa-se que estas são as informações necessárias para o cálculo da temperatura na planilha apresentada no capítulo 5. Os resultados das tabelas Grid_X_Y_10m foram exportados no formato de planilha eletrônica e uma Macro foi aplicada no programa Microsoft Excel com o objetivo de copiar os dados de cada objeto de Grid_X_Y_10m para a planilha de cálculo de temperatura e depois copiar os resultados de volta para a planilha original.

O resultado foi novamente exportado para o programa de geoprocessamento e associado aos objetos da planilha original. Para evitar a utilização de *canyons* contínuos no cálculo, foram tiradas médias das temperaturas e diferenças de temperatura nas quatro orientações. As informações foram tiradas em para a mesma malha utilizada na simulação de insolação.

A macro utilizada para se calcular toda a malha foi:

```
Sub Entrada()
Dim Origem As Worksheet, Destino As Worksheet
Set Origem = Worksheets("EntradaPlan")
Set Destino = Worksheets("EntradaUnit")
For k = 2 To 2030
Application.Calculation = xlCalculationManual
For i = 1 To 11
Destino.Cells(4, i + 10) = Origem.Cells(k, i + 2)
Next i
Application.Calculation = xlCalculationAutomatic
For j = 12 To 19
Origem.Cells(k, j + 3) = Destino.Cells(4, j + 10)
Next j
Next k
End Sub
```

A6.5. *Consumo de energia*

Mantendo-se a ID original das fachadas na planilha de cálculo, é possível associar novamente os consumos à base georreferenciada. O resultado é colocado nas colunas E_Ilu_m2, E_Aque_m2, E_Resf_m2 e E_Total_m2, que indicam o tipo de consumo por metro quadrado. O valor do consumo total daquela fachada é dado por:

```
E_XXX_m2*(CartesianObjectLen(obj, "m")-6)*6
```

Onde XXX é o tipo de consumo tratado (Ilu, para iluminação; Aque, para aquecimento; Resf, para resfriamento, Total, para total).

São criadas as colunas E_XXX_pass na tabela Edifícios central, que é atualizada pela soma (*Sum*) dos resultados das respectivas colunas em Fachada_central, onde o objeto da tabela Edifícios_central contém o objeto da tabela Fachada_central.

O consumo total (E_XXX_T), considerando a zona ativa é dado pelas expressões:

```
E_Ilu_pass + Maximum(0, (Area-(CartesianPerimeter(obj, "m")-24)*6)* 50)
E_Aque_pass + Maximum(0, (Area-(CartesianPerimeter(obj, "m")-24)*6)* 37)
E_Resf_pass + Maximum(0, (Area-(CartesianPerimeter(obj, "m")-24)*6)* 34)
E_Total_pass + Maximum(0, (Area-(CartesianPerimeter(obj, "m")-24)*6)* 112)
```

O consumo relativo por área (E_XXX_m2) da edificação pode ser obtido pela expressão:

```
E_Ilu_T /AreaTotal
```

Na tabela Quadras_bruta_central foram criadas as colunas E_XXX_m2, atualizadas pela média proporcional (*ProportionalAvg*) dos valores das colunas E_XXX_m2 da tabela Edifícios_central, onde o objeto da tabela Edifícios_central está contido no objeto da tabela Quadras_bruta_central.

A7. Equações de regressão

A7.1. *Ventilação*

A equação padrão para cada sentido é dada por:

$$\frac{\Delta\bar{u}}{\Delta x}SE = -0{,}0021 - 0{,}0315\,\Delta CA - 0{,}7997\,\Delta TO - 0{,}0014\,\Delta RM$$

r =	0,466	r² =	0,217	r²aj =	0,201
ep =	0.0037	F =	9,73	p	<0,001

$$\frac{\Delta\bar{u}}{\Delta x}NW = -0{,}0005 + 0{,}0199\,\Delta CA - 0{,}5531\,\Delta TO - 0{,}0057\,\Delta RM$$

r =	0,448	r² =	0,201	r²aj =	0,185
ep =	0.0029	F =	8,44	p	<0,001

$$\frac{\Delta\bar{u}}{\Delta x}SW = 0{,}0013 - 0{,}1491\Delta CA - 1{,}3132\ \Delta TO - 0{,}0028\,\Delta RM$$

r =	0,774	r² =	0,599	r²aj =	0,585
ep =	0.0035	F =	28,42	p	<0,001

$$\frac{\Delta\bar{u}}{\Delta x}NE = 0{,}0016 - 0{,}0076\,\Delta CA - 2{,}2952\,\Delta TO - 0{,}0051\,\Delta RM$$

r =	0,783	r² =	0,613	r²aj =	0,599
ep =	0.0038	F =	30,04	p	<0,001

$$\frac{\Delta\bar{u}}{\Delta x}E = 0{,}0022 + 0{,}0560\,\Delta CA - 1{,}1115\,\Delta TO - 0{,}0113\,\Delta RM$$

r =	0,737	r² =	0,543	r²aj =	0,533
ep =	0.0038	F =	34,91	p	<0,001

$$\frac{\Delta\bar{u}}{\Delta x}W = 0{,}0023 + 0{,}0334\,\Delta CA - 2{,}3509\,\Delta TO - 0{,}0055\,\Delta RM$$

r =	0,785	r² =	0,617	r²aj =	0,608
ep =	0.0049	F =	47,18	p	<0,001

$$\frac{\Delta\bar{u}}{\Delta x}S = 0{,}0025 - 0{,}0564\,\Delta CA - 0{,}8744\,\Delta TO - 0{,}0001\,\Delta RM$$

r =	0,445	r² =	0,198	r²aj =	0,180
ep =	0.0051	F =	7,32	p	<0,001

$$\frac{\Delta\bar{u}}{\Delta x}N = 0{,}0018 + 0{,}0823\,\Delta CA - 1{,}9109\,\Delta TO - 0{,}0099\,\Delta RM$$

r =	0,721	r² =	0,520	r²aj =	0,509
ep =	0.0049	F =	32,12	p	<0,001

As equações com melhor ajuste são dadas por:

$$\frac{\Delta\bar{u}}{\Delta x}SE = -0{,}0020 - 0{,}0062\,\Delta Obst - 0{,}7308\,\Delta IC$$

r =	0,587	r² =	0,345	r²aj =	0,337
ep =	0.0026	F =	21,27	p	<0,001

$$\frac{\Delta\bar{u}}{\Delta x}NW = -0{,}0013 - 0{,}0084\,\Delta Obst - 0{,}9784\,\Delta IC$$

r =	0,673	r² =	0,453	r²aj =	0,447
ep =	0.0026	F =	36,05	p	<0,001

$$\frac{\Delta\bar{u}}{\Delta x}SW = -0{,}0009 - 0{,}0101\,\Delta Obst - 1{,}25\,\Delta IC$$

r =	0,712	r² =	0,506	r²aj =	0,498
ep =	0.0038	F =	30,27	p	<0,001

$$\frac{\Delta\bar{u}}{\Delta x}NE = 0{,}0014 - 0{,}0126\,\Delta Obst - 1{,}3172\,\Delta IC$$

r =	0,636	r² =	0,405	r²aj =	0,395
ep =	0.0048	F =	20,05	p	<0,001

$$\frac{\Delta\bar{u}}{\Delta x}E = 0{,}0022 - 0{,}0031\,\Delta Obst - 1{,}3546\,\Delta IC$$

r =	0,641	r² =	0,411	r²aj =	0,405
ep =	0.0043	F =	31,10	p	<0,001

$$\frac{\Delta\bar{u}}{\Delta x}W = 0{,}0024 - 0{,}0042\,\Delta Obst - 1{,}7389\,\Delta IC$$

r =	0,590	r² =	0,349	r²aj =	0,341
ep =	0.0063	F =	23,82	p	<0,001

$$\frac{\Delta\bar{u}}{\Delta x}S = 0{,}0027 - 0{,}0121\,\Delta Obst - 0{,}1374\,\Delta IC$$

r =	0,518	r² =	0,268	r²aj =	0,260
ep =	0.0049	F =	16,51	p	<0,001

$$\frac{\Delta\bar{u}}{\Delta x}N = 0{,}0016 - 0{,}0047\,\Delta Obst - 1{,}3207\,\Delta IC$$

r =	0,566	r² =	0,321	r²aj =	0,313
ep =	0.0055	F =	21,24	p	<0,001

A7.2. *Temperatura*

A seguir são apresentadas regressões para variáveis de temperatura baseada nas simulações de Fevereiro (F) e Setembro (S). Para amplitude térmica, tem-se:

Equação padrão:

$$\Delta Amp(F) = 0{,}867 - 0{,}575CA + 1{,}413\,TO + 0{,}020\,RM$$

r =	0,789	r² =	0,622	r²aj =	0,608
ep =	0.568	F =	30,19	p	<0,001

$$\Delta Amp(S) = 1{,}149 - 0{,}9614\,CA + 2{,}703\,TO + 0{,}014\,RM$$

r =	0,844	r² =	0,712	r²aj =	0,702
ep =	0.849	F =	45,37	p	<0,001

Melhor ajuste:

$$\Delta Amp\,(F) = 2{,}938 - 0{,}045Obst - 0{,}032\,DpH1\%$$

r =	0,873	r² =	0,761	r²aj =	0,757
ep =	0.448	F =	89,31	p	<0,001

$$\Delta Amp\,(S) = 4{,}861 - 0{,}114\,Obst - 0{,}305\,DpH1\%$$

r =	0,877	r² =	0,770	r²aj =	0,766
ep =	0.753	F =	93,68	p	<0,001

Para Temperatura máxima os resultados são:

Equação padrão:

$$\Delta T_{máx}(F) = 2{,}463 - 0{,}336\,CA + 0{,}879\,TO + 0{,}015\,RM$$

r =	0,765	r² =	0,585	r²aj =	0,570
ep =	0.335	F =	25,81	p	<0,001

$$\Delta T_{máx}(S) = 3{,}517 - 0{,}636CA + 1{,}864\,TO + 0{,}007\,RM$$

r =	0,869	r² =	0,755	r²aj =	0,746
ep =	0.514	F =	56,57	p	<0,001

Melhor ajuste

$$\Delta T_{máx}(F) = 3{,}766 - 0{,}023\,Obst - 0{,}021\,DpH1\%$$

r =	0,884	r² =	0,712	r²aj =	0,707
ep =	0.292	F =	69,36	p	<0,001

$$\Delta T_{máx}(S) = 5{,}943 - 0{,}075\,Obst - 0{,}227\,DpH1\%$$

r =	0,887	r² =	0,787	r²aj =	0,784
ep =	0.475	F =	103,70	p	<0,001

Para a variação na temperatura média, tem-se:

Equaçao padrão

$$\Delta T_{méd}(F) = 2{,}262 + 0{,}579\ CA - 0{,}198\ \ TO + 0{,}001\ RM$$

r =	0,531	r² =	0,282	r²aj =	0,256
ep =	0.161	F =	7,19	p	<0,001

$$\Delta T_{méd}(S) = 2{,}316 + 0{,}0597\ CA - 0{,}305\ TO - 0{,}002\ RM$$

r =	0,585	r² =	0,342	r²aj =	0,318
ep =	0.118	F =	9,54	p	<0,001

Melhor ajuste

$$\Delta T_{méd}(F) = 1{,}774 + 0{,}009\ Obst + 0{,}732\ IC$$

r =	0,583	r² =	0,340	r²aj =	0,328
ep =	0.153	F =	14,44	p	<0,001

$$\Delta T_{méd}(S) = 1{,}858 + 0{,}009\ Obst + 0{,}268\ IC$$

r =	0,679	r² =	0,460	r²aj =	0,451
ep =	0.106	F =	23,89	p	<0,001

A7.3. *Consumo de energia*

Para o consumo de energia desagregado de iluminação (IL), aquecimento (AQ) e resfriamento (RESF), têm-se:

Equações padrão

$$CE_{IL} = 21{,}83 - 1{,}41\ CA + 24{,}30\ TO - 0{,}16\ RM$$

r =	0,752	r² =	0,566	r²aj =	0,556
ep =	5,044	F =	37,83	p	<0,001

$$CE_{AQ} = 47{,}99 - 0{,}73\ CA - 17{,}79\ \ TO - 0{,}20\ RM$$

r =	0,713	r² =	0,508	r²aj =	0,497
ep =	2,678	F =	29,99	p	<0,001

$$CE_{RESF} = 41{,}54 - 0{,}88\ CA - 7{,}15\ \ TO - 0{,}21\ RM$$

r =	0,728	r² =	0,529	r²aj =	0,519
ep =	3,280	F =	32,62	p	<0,001

Melhor ajuste:

$CE_{IL} = 45{,}7 - 3{,}8\,CA - 39{,}5\,IC$

r =	0,725	r² =	0,525	r²aj =	0,520
ep =	5,246	F =	48,68	p	<0,001

$CE_{AQ} = 48{,}3 - 1{,}1\,CA - 35{,}5\,IC$

r =	0,758	r² =	0,575	r²aj =	0,570
ep =	2,476	F =	59,49	p	<0,001

$CE_{RESF} = 49{,}1 - 1{,}9\,CA - 40{,}9\,IC$

r =	0,791	r² =	0,626	r²aj =	0,622
ep =	2,907	F =	73,69	p	<0,001

Livros Grátis

(http://www.livrosgratis.com.br)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo