

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO  
PROURB – PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM URBANISMO  
DOUTORADO EM URBANISMO

**HOMERO JORGE MATOS DE CARVALHO**

**METODOLOGIA PARA A ANÁLISE DAS INTERAÇÕES  
ENTRE A FORMA URBANA E O CLIMA:  
APLICAÇÃO A UMA CIDADE BRASILEIRA DE CLIMA  
LITORÂNEO COM BAIXA LATITUDE**

Rio de Janeiro, RJ - Brasil  
2006

**HOMERO JORGE MATOS DE CARVALHO**

**METODOLOGIA PARA A ANÁLISE DAS INTERAÇÕES  
ENTRE A FORMA URBANA E O CLIMA:  
APLICAÇÃO A UMA CIDADE BRASILEIRA DE CLIMA  
LITORÂNEO COM BAIXA LATITUDE**

Tese submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Urbanismo.

Área de Concentração: Projeto Urbano  
Linha de Pesquisa: Ambiente Urbano e Paisagismo

Orientador: **Prof. Dr. Oscar Daniel Corbella**

Rio de Janeiro, RJ - Brasil  
2006

**HOMERO JORGE MATOS DE CARVALHO**

**METODOLOGIA PARA A ANÁLISE DAS INTERAÇÕES ENTRE A FORMA URBANA E O CLIMA:  
APLICAÇÃO A UMA CIDADE BRASILEIRA DE CLIMA LITORÂNEO COM BAIXA LATITUDE**

Tese defendida em 24 de março de 2006 e aprovada pela banca examinadora constituída pelos professores:

---

Prof. Oscar Daniel Corbella, Ph.D. (Orientador) – PROURB/FAU/UFRJ

---

Profa. Denise B. Pinheiro Machado, Dra. – PROURB/FAU/UFRJ

---

Profa. Lúcia Maria Sá A. Costa, Ph.D. – PROURB/FAU/UFRJ

---

Prof. Francisco de Assis Gonçalves da Silva, Dr. - UFPB

---

Profa. Ana Maria de Paiva Macedo Brandão, Dra. – IGEO/UFRJ

Rio de Janeiro, RJ - Brasil  
2006

Dedico este trabalho a Deus, a minha mãe, aos meus irmãos, a Christine e a sua família, que foram e sempre serão a base da minha vida.

Dedico, ainda, aos que lutam por uma cidade justa e de boa qualidade para todos.

## AGRADECIMENTOS

---

Foram muitas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho. Algumas, indiretamente, desde o início da minha formação acadêmica, outros, mais diretamente, fornecendo informações, discutindo e propondo idéias. Por isso, caso tenha esquecido de mencionar alguém, peço que releve e que se sinta desde já reconhecido e agradecido.

Agradeço ao Prof. Oscar Daniel Corbella a paciente e dedicada orientação, além da amizade e confiança em mim depositadas desde o início do curso.

Ao Prof. Francisco de Assis Gonçalves de Assis a orientação iniciada ainda no curso de mestrado da UFRN, e estendida até este trabalho, especialmente através do acompanhamento dos experimentos no túnel aerodinâmico.

À Prof<sup>a</sup>. Denise Pinheiro Machado, Coordenadora do PROURB, a receptividade, confiança e valiosas contribuições a este trabalho, desde a sua primeira apresentação nos Seminários de Pesquisa.

Às Professoras Ana Lúcia Britto e Lúcia Costa, que também estiveram contribuindo com este trabalho desde o seu início.

À Prof<sup>a</sup> Ana Maria Brandão as valiosas contribuições e discussões teóricas a respeito de clima e clima urbano, desde a sua participação, como examinadora, no Exame de Qualificação.

À Prof<sup>a</sup> Raquel Coutinho os comentários e contribuições oferecidos durante o primeiro Seminário de Pesquisa em que o trabalho foi apresentado publicamente.

Aos colegas Prof. Marco Romanelli, Arq. Carlos Antunes de Souza e Silva e Arq. Fabiana Gobbo, também as contribuições feitas ao trabalho durante os Seminários de Pesquisa.

Aos colegas, Arq. Narciso Amaral, Arq. Walter Grilo, Arq. Adailton Figueiredo, Lia Monteiro, Andréia de Oliveira e Eduardo Medeiros, a imensa contribuição e companhia nas medições em campo.

Aos colegas, Prof. Paulo Peregrino, Prof<sup>a</sup>. Silvana Chaves e Arq. Viviane Guerra, a companhia e compartilhamento dos experimentos realizados no túnel aerodinâmico do IPT, em São Paulo.

A Jessé Júnior o paciente e competente trabalho de confecção dos desenhos das figuras de erosão.

A Silvino Pereira a colaboração na confecção das maquetes utilizadas nos experimentos no túnel de vento.

Ao Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo – IPT, através do Diretor do Laboratório de Vazão, Dr. Eng. Marcos Tadeu, do Dr. Eng. Gilder Nader e do Msc. Eng. Paulo, a disponibilização do túnel aerodinâmico e acompanhamento técnico dos experimentos ali realizados.

À Prof<sup>a</sup>. Ana Alayde as orientações nos estudos de estatística e na utilização do *software* SPSS.

Aos amigos (professores, funcionários e alunos) do CEFET-CE, UnED de Juazeiro do Norte e do CEFET-RN a colaboração e incentivo.

Ao CEFTE-CE o apoio institucional.

Ao Programa de Pós-Graduação em Urbanismo da UFRJ, através de sua coordenadora, Prof<sup>a</sup>. Denise Pinheiro Machado, e funcionários (D. Francisca, Keila, Edson e Carlos Eduardo) a acolhida e serviços prestados.

A CAPES a bolsa de estudos e o fomento da pesquisa brasileira.

Aos colegas de curso, especialmente, Marco Romanelli, Fabiana Gobbo e Mauro Santoro, com quem formava o “grupo dos forasteiros” e travava intensas discussões sobre urbanismo, a amizade e companhia.

Aos colegas do PROARQ, Isabela, Virgínia, Bordeira, Daqui, Luciana e Adriana, com quem compartilhei conhecimento e amizade.

À minha família, na figura da minha mãe (Hozana Matos), que jamais mediu esforços para que eu e meus sete irmãos alcançássemos nossos objetivos, sempre com ética e respeito ao próximo e à coisa pública, a exemplo de sua postura e da do nosso pai (Antônio Augusto, *in memoriam*).

À Christine, namorada, companheira e amiga há tantos anos, a dedicação, o apoio, a companhia e o carinho irrestritos. A conclusão deste trabalho se deve, em grande parte, as suas palavras de incentivo e de conforto, especialmente nos momentos mais difíceis.

Ao meu irmão Ricardo o incentivo e apoio moral e psicológico em todos os momentos. Jamais esquecerei o abraço fraterno no momento mais difícil.

À amiga Lara, que me acolheu por diversas vezes em sua casa, fazendo companhia e compartilhando os momentos difíceis e felizes dessa jornada.

À minha sobrinha e arquiteta Priscilla Matos o apoio na confecção de diversos desenhos que ilustram a tese.

Ao arquiteto Sérgio Ricardo a disponibilização de dados técnicos junto à Prefeitura da cidade de João Pessoa.

Aos amigos “cariocas” e “paraíbaes” que me acolheram e me aturaram no Rio de Janeiro durante os três anos de curso, Paula(inha), Luciana (Lú), Alessandra (Lelé), D. Marilú, Manuela, Ana Paula, Éverton, Márcia (mais Catarina e Felipe), Edu, Graça, Geórgia, Mariana e Flaviana (“as Pareias”), Vera, Aderaldo, entre outros, a amizade que construímos juntos.

Aos porteiros dos edifícios onde morei (Sr. João, Ailton, Xavier, Denis, Zé, Naldinho, Sr. Manoel, Marinaldo, Esmeraldo e Paulo) e aos guardadores de carro do final da R. Siqueira Campos (Pedro “Capitão” e Paulo), em Copacabana.

Aos boêmios, sambistas, músicos, cantores e garçons de Copacabana, Praia Vermelha, Lagoa, Centro e Lapa, que muito nos aturaram e nos alegraram durante esses anos.

Ao Rio de Janeiro, que “... continua lindo”.

A João Pessoa, que sempre me acolhe de volta.

CARVALHO, Homero Jorge Matos de. *Metodologia para a análise das interações entre a forma urbana e o clima: aplicação a uma cidade brasileira de clima litorâneo com baixa latitude*. Rio de Janeiro, 2006. Tese (Doutorado em Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1996.

Esta tese tem como objetivo elaborar uma metodologia para a observação e análise climática de cidades ou parcelas destas (unidades climáticas urbanas) que possibilite investigar como o fenômeno da urbanização influencia no clima local e é influenciado por ele, fornecendo informações para o planejamento e projeto urbanos. Adotando experimentos em túnel de aerodinâmico de camada limite atmosférica, medições microclimáticas em campo e análises estatísticas de correlação e de regressão lineares múltiplas, a metodologia desenvolvida mostrou-se adequada ao estudo do clima urbano, contribuindo especialmente para a observação dos mecanismos de ventilação intra-urbana e suas repercussões no campo térmico. A validação da metodologia desenvolvida ocorreu a partir de sua aplicação a uma parcela da cidade de João Pessoa, capital do Estado da Paraíba, situada no Nordeste Brasileiro. Os resultados obtidos dessa aplicação, além de validarem a metodologia, trouxeram à tona elementos importantes para a discussão e revisão de conceitos até então adotados em diversos trabalhos sobre climatologia urbana, em especial sobre as interações dinâmicas entre elementos do clima e da morfologia urbana em localidades situadas em clima quente-úmido e em baixa latitude. Em termos específicos, os resultados mostraram o quanto o processo de urbanização tem modificado o clima da cidade de João Pessoa, formando ilhas de calor significativas e mostrando a fragilidade dos parâmetros de planejamento estabelecidos na legislação urbana vigente.



## ABSTRACT

---

CARVALHO, Homero Jorge Matos de. *Metodologia para a análise das interações entre a forma urbana e o clima: aplicação a uma cidade brasileira de clima litorâneo com baixa latitude*. Rio de Janeiro, 2006. Tese (Doutorado em Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1996.

The object of this thesis is the development of a methodology for the observation and analyse of the urban climate, making possible to investigate the interaction between elements of the urban form and the local climate, supplying information for the planning and urban project. Adopting experiments in wind tunnel, microclimates measurements in field and statistical analyses of correlation and of multiple linear regressions, the developed methodology was shown appropriate to the study of the urban climate, especially contributing to the observation of the intra-urban ventilation mechanisms and their repercussions in the thermal field. The validation of the developed methodology happened starting from its application to a portion of the city of João Pessoa, capital of the State of Paraíba, located in the Brazilian Northeast. The obtained results of that application, besides they validate the methodology, showed important elements for the discussion and revision of concepts adopted in several works on urban climatology, especially about the dynamic interactions among elements of the climate and of the urban morphology in located places in hot-humid climate and in low latitude. In specific terms, the results showed how the urbanization process has been modifying the climate of the city of João Pessoa, forming significant heat islands and showing the fragility of the established planning parameters in the effective urban legislation.

## LISTA DE FIGURAS

|              |  |     |
|--------------|--|-----|
| Figura 1.1:  | Cidade de Kahun, no antigo Egito .....   | 21  |
| Figura 1.2:  | Esboço de um desenho chinês mostrando montanhas ao norte, água ao sul, governando o sítio para uma cidade .....  | 21  |
| Figura 1.3:  | O plano de Vitruvius para uma cidade típica mostra ruas e ruelas dispostas com respeito à direção dos ventos .....   | 22  |
| Figura 1.4:  | Esboço de um plano espanhol para a cidade de Buenos Aires no período colonial .  | 22  |
| Figura 1.5:  | Plano da cidade de Letchworth que indica o local de áreas industriais e ventos dominantes .....  | 23  |
| Figura 1.6:  | Uso de barreiras nas cidades de Nova Jersey para proteção dos ventos de inverno  | 23  |
| Figura 1.7:  | Pessoas idosas sofrendo os efeitos do vento acelerado através da situação espacial gerada pela aplicação inconseqüente dos paradigmas modernistas: prédios altos em lâmina e amplos espaços livres – Boston, EUA ..... | 25  |
| Figura 2.1:  | Esquemas da dimensão das trocas de calor em áreas rurais e urbanas durante o dia e a noite, com as variáveis que compõem o modelo de balanço de energia dado por: $R_n + F = H + G + A + LE$ .....                     | 43  |
| Figura 2.2:  | Perfis de velocidade do vento no campo e na cidade .....   | 44  |
| Figura 2.3:  | Esquema representativo da atmosfera urbana .....   | 44  |
| Figura 2.4:  | Diagrama básico do Sistema Clima Urbano .....  | 47  |
| Figura 2.5:  | Canal perceptivo do conforto térmico – subsistema termodinâmico .....  | 49  |
| Figura 2.6:  | Canal perceptivo da qualidade do ar – subsistema físico-químico .....  | 56  |
| Figura 2.7:  | Canal perceptivo do impacto meteórico – subsistema hidrodinâmico .....   | 61  |
| Figura 2.8:  | Rugosidades e coeficientes de atrito para vários tipos de terreno .....  | 63  |
| Figura 3.1:  | Escoamento em torno de uma forma prismática .....  | 76  |
| Figura 3.2:  | Efeito barreira .....  | 78  |
| Figura 3.3:  | Efeito de união de pressões diferentes .....   | 78  |
| Figura 3.4:  | Efeito das aberturas sob as edificações ou efeito pilotis .....  | 79  |
| Figura 3.5:  | Efeito de canto .....  | 80  |
| Figura 3.6:  | Efeito de canalização .....  | 81  |
| Figura 3.7:  | Efeito de turbilhão na base dos edifícios – efeito <i>Wise</i> .....   | 82  |
| Figura 3.8:  | Efeito barreira conjugado com rua estreita .....   | 82  |
| Figura 3.9:  | Efeito barreira conjugado com ruas largas .....  | 83  |
| Figura 3.10: | Gráfico de conforto – ao Sol .....   | 90  |
| Figura 3.11: | Gráfico de conforto – à sombra .....   | 90  |
| Figura 4.1:  | Fluxograma da metodologia para a análise das interações entre a forma urbana e o clima .....   | 93  |
| Figura 4.2:  | Estação climatológica experimental .....   | 98  |
| Figura 4.3:  | Detalhe da instalação dos instrumentos .....   | 98  |
| Figura 4.4:  | Vista externa do túnel de vento do IPT .....   | 103 |
| Figura 4.5:  | Vista da mesa de ensaio e do ventilador ao fundo .....   | 103 |
| Figura 4.6:  | Crítérios de semelhança .....  | 104 |
| Figura 4.7:  | Gráfico auxiliar para traçado de máscaras (360°), com demonstração para um ponto da área de estudo .....   | 106 |
| Figura 4.8:  | Correlações diretas e inversas .....   | 108 |
| Figura 4.9:  | Correlação inversa forte entre a temperatura e a umidade relativa do ar ( $r = -0,96$ ) .  | 110 |
| Figura 4.10: | Correlação inversa moderada entre a temperatura e a umidade relativa do ar ( $r = -0,64$ ) .....   | 110 |

|              |   |     |
|--------------|---|-----|
| Figura 4.11: | Correlação inversa fraca entre a temperatura e a umidade relativa do ar ( $r = -0,64$ )                                   | 111 |
| Figura 5.1:  | Classificação climática de Köppen para o Estado da Paraíba  | 115 |
| Figura 5.2:  | Planta da cidade de João Pessoa   | 117 |
| Figura 5.3:  | Vista aérea da área de estudo, a partir do Norte  | 118 |
| Figura 5.4:  | A faixa escura indica a delimitação da orla marítima com controle de gabarito   | 119 |
| Figura 6.1:  | Figura de erosão para a direção do vento $150^\circ$ - início   | 124 |
| Figura 6.2:  | Figura de erosão, em 3 dimensões, para a direção do vento $150^\circ$ - início  | 124 |
| Figura 6.3:  | Figura de erosão para a direção do vento $150^\circ$ - $U_{ref} = 8,0\text{m/s}$  | 125 |
| Figura 6.4:  | Figura de erosão, em 3 dimensões, para a direção do vento $150^\circ$ - $U_{ref} = 8,0\text{m/s}$                         | 125 |
| Figura 6.5:  | Figura de erosão para a direção do vento $150^\circ$ - $U_{ref} = 9,4\text{m/s}$  | 126 |
| Figura 6.6:  | Figura de erosão, em 3 dimensões, para a direção do vento $150^\circ$ - $U_{ref} = 9,4\text{m/s}$                         | 126 |
| Figura 6.7:  | Figura de erosão para a direção do vento $150^\circ$ - $U_{ref} = 10,7\text{m/s}$   | 127 |
| Figura 6.8:  | Figura de erosão, em 3 dimensões, para a direção do vento $150^\circ$ - $U_{ref} = 10,7\text{m/s}$                        | 127 |
| Figura 6.9:  | Figura de erosão para a direção do vento $150^\circ$ - $U_{ref} = 12,1\text{m/s}$   | 128 |
| Figura 6.10: | Figura de erosão, em 3 dimensões, para a direção do vento $150^\circ$ - $U_{ref} = 12,1\text{m/s}$                        | 128 |
| Figura 6.11: | Figura de erosão para a direção do vento $150^\circ$ - $U_{ref} = 13,4\text{m/s}$   | 129 |
| Figura 6.12: | Figura de erosão, em 3 dimensões, para a direção do vento $150^\circ$ - $U_{ref} = 13,4\text{m/s}$                        | 129 |
| Figura 6.13: | Figura de erosão para a direção do vento $150^\circ$ - $U_{ref} = 14,7\text{m/s}$   | 130 |
| Figura 6.14: | Figura de erosão, em 3 dimensões, para a direção do vento $150^\circ$ - $U_{ref} = 14,7\text{m/s}$                        | 130 |
| Figura 6.15: | Figura de erosão para a direção do vento $90^\circ$ - início  | 131 |
| Figura 6.16: | Figura de erosão para a direção do vento $90^\circ$ - $U_{ref} = 8,0\text{m/s}$   | 132 |
| Figura 6.17: | Figura de erosão, em 3 dimensões, para a direção do vento $90^\circ$ - $U_{ref} = 8,0\text{m/s}$                          | 132 |
| Figura 6.18: | Figura de erosão para a direção do vento $90^\circ$ - $U_{ref} = 9,4\text{m/s}$   | 133 |
| Figura 6.19: | Figura de erosão, em 3 dimensões, para a direção do vento $90^\circ$ - $U_{ref} = 9,4\text{m/s}$                          | 133 |
| Figura 6.20: | Figura de erosão para a direção do vento $90^\circ$ - $U_{ref} = 10,7\text{m/s}$  | 134 |
| Figura 6.21: | Figura de erosão, em 3 dimensões, para a direção do vento $90^\circ$ - $U_{ref} = 10,7\text{m/s}$                         | 134 |
| Figura 6.22: | Figura de erosão para a direção do vento $90^\circ$ - $U_{ref} = 12,1\text{m/s}$  | 135 |
| Figura 6.23: | Figura de erosão, em 3 dimensões, para a direção do vento $90^\circ$ - $U_{ref} = 12,1\text{m/s}$                         | 135 |
| Figura 6.24: | Figura de erosão para a direção do vento $90^\circ$ - $U_{ref} = 13,4\text{m/s}$  | 136 |
| Figura 6.25: | Figura de erosão, em 3 dimensões, para a direção do vento $90^\circ$ - $U_{ref} = 13,4\text{m/s}$                         | 136 |
| Figura 6.26: | Figura de erosão para a direção do vento $90^\circ$ - $U_{ref} = 14,7\text{m/s}$  | 137 |
| Figura 6.27: | Figura de erosão, em 3 dimensões, para a direção do vento $90^\circ$ - $U_{ref} = 14,7\text{m/s}$                         | 137 |
| Figura 6.28: | Perfis de camada limite atmosférica com vento a $90^\circ$  | 140 |
| Figura 7.1:  | Vista aérea da área com a indicação dos pontos de medição   | 142 |
| Figura 7.2:  | Sistema de correlações entre as variáveis climáticas e da forma urbana no turno da manhã com vento sudeste                | 159 |
| Figura 7.3:  | Sistema de correlações entre as variáveis climáticas e da forma urbana no turno da manhã com ventos leste e nordeste      | 160 |
| Figura 7.4:  | Sistema de correlações entre as variáveis climáticas e da forma urbana no turno da tarde com vento sudeste                | 161 |
| Figura 7.5:  | Sistema de correlações entre as variáveis climáticas e da forma urbana no turno da tarde com ventos leste e nordeste      | 162 |
| Figura 7.6:  | Sistema de correlações entre as variáveis climáticas e da forma urbana no turno da noite com ventos leste e nordeste      | 163 |
| Figura 7.7:  | Comparação entre as figuras de erosão para as direções de vento $150^\circ$ e $90^\circ$ , com $U_{ref} = 14,7\text{m/s}$ | 165 |

## LISTA DE GRÁFICOS

---

|               |  |     |
|---------------|--|-----|
| Gráfico 7.1:  | Média da temperatura no turno da manhã para as direções de vento sudeste e leste e nordeste .....  | 164 |
| Gráfico 7.2:  | Comparativo entre as médias de temperatura e umidade relativa do ar com vento sudeste, pela manhã .....  | 165 |
| Gráfico 7.3:  | Comparativo entre as médias de temperatura e velocidade do vento com vento sudeste, pela manhã .....   | 165 |
| Gráfico 7.4:  | Comparativo entre as médias de temperatura e umidade relativa do ar com ventos leste e nordeste, pela manhã .....  | 166 |
| Gráfico 7.5:  | Comparativo entre as médias de temperatura e velocidade do vento com ventos leste e nordeste, pela manhã .....   | 166 |
| Gráfico 7.6:  | Comparativo entre as médias de temperatura e taxa de ocupação com ventos leste e nordeste, pela manhã .....  | 167 |
| Gráfico 7.7:  | Comparativo entre as médias de temperatura e índice de aproveitamento com ventos leste e nordeste, pela manhã .....  | 167 |
| Gráfico 7.8:  | Comparativo entre as médias de temperatura e fator de visão do céu com vento nordeste, pela manhã .....  | 167 |
| Gráfico 7.9:  | Média da temperatura no turno da tarde para as direções de vento consideradas  | 168 |
| Gráfico 7.10: | Comparativo entre as médias de temperatura e velocidade do vento, à tarde e com vento sudeste, à tarde .....   | 169 |
| Gráfico 7.11: | Comparativo entre as médias de temperatura e índice de aproveitamento, à tarde e com ventos leste e nordeste, à tarde .....                                | 169 |
| Gráfico 7.12: | Comparativo entre as médias de temperatura e fator de visão do céu, à tarde e com ventos leste e nordeste, à tarde .....                                   | 169 |
| Gráfico 7.13: | Comparativo entre as médias de temperatura e velocidade do vento, à tarde e com ventos leste nordeste, à tarde .....                                       | 169 |
| Gráfico 7.14: | Média da temperatura no turno da noite para as direções de vento consideradas .  | 170 |
| Gráfico 7.15: | Comparação entre as temperaturas registradas em campo e no aeroporto local, pela manhã, com vento sudeste .....  | 172 |
| Gráfico 7.16: | Comparação entre as temperaturas registradas em campo e no aeroporto local, pela manhã, com ventos leste e nordeste .....                                  | 172 |
| Gráfico 7.17: | Comparação entre as temperaturas registradas em campo e no aeroporto local, à tarde, com vento sudeste .....   | 173 |
| Gráfico 7.18: | Comparação entre as temperaturas registradas em campo e no aeroporto local, à tarde, com ventos leste e nordeste .....                                     | 174 |
| Gráfico 7.19: | Comparação entre as temperaturas registradas em campo e no aeroporto local, à noite, com vento sudeste .....   | 174 |
| Gráfico 7.20: | Comparação entre as temperaturas registradas em campo e no aeroporto local, à noite, com ventos leste e nordeste .....                                     | 175 |
| Gráfico 7.21: | Relação entre as médias de temperatura do ar e de velocidade do vento nos pares de pontos para os três turnos de medição com vento sudeste .....           | 176 |
| Gráfico 7.22: | Relação entre as médias de temperatura do ar e de velocidade do vento nos pares de pontos para os três turnos de medição com ventos leste e nordeste ..... | 178 |

## LISTA DE TABELAS

|              |  |     |
|--------------|--|-----|
| Tabela 2.1:  | Categorias taxonômicas da organização do clima e suas articulações com o clima urbano .....  | 40  |
| Tabela 2.2:  | Características do clima urbano .....  | 42  |
| Tabela 3.1:  | Valores de $k$ e $Z_0$ .....   | 75  |
| Tabela 3.2:  | Classificação Beaufort dos tipos de vento baseado em sua velocidade de deslocamento .....  | 75  |
| Tabela 3.3:  | Tentativa de critério de conforto para ação do vento .....   | 87  |
| Tabela 3.4:  | Critério de conforto .....   | 88  |
| Tabela 3.5:  | Relação entre a velocidade de rajadas de vento e sua ação sobre as pessoas .....   | 89  |
| Tabela 4.1:  | Especificações dos equipamentos utilizados .....   | 98  |
| Tabela 4.2:  | Qualidade do ajustamento das correlações .....   | 109 |
| Tabela 4.3:  | Qualidade do ajustamento das correlações .....   | 109 |
| Tabela 5.1:  | Características do bioclima mediterrâneo ou nordestino subseco .....   | 116 |
| Tabela 5.2:  | Normais climatológicas para a cidade de João Pessoa – 1985 a 1994 .....  | 116 |
| Tabela 6.1:  | Percentual de área erodida .....   | 138 |
| Tabela 7.1:  | Índices de correlação entre a temperatura do ar e variáveis climáticas e urbanas comparados com dados climáticos medidos no aeroporto local pela manhã ..... | 148 |
| Tabela 7.2:  | Índices de correlação entre a temperatura do ar e variáveis climáticas e urbanas comparados com dados climáticos medidos no aeroporto local, à tarde .....   | 149 |
| Tabela 7.3:  | Índices de correlação entre a temperatura do ar e variáveis climáticas e urbanas comparados com dados climáticos medidos no aeroporto local, à noite .....   | 150 |
| Tabela 7.4:  | Modelos explicativos das variações de temperatura do ar medida nos diversos pontos, no turno da manhã e com vento sudeste .....                              | 151 |
| Tabela 7.5:  | Modelos explicativos das variações de temperatura do ar medida nos diversos pontos, no turno da manhã e com ventos leste e nordeste .....                    | 152 |
| Tabela 7.6:  | Modelos explicativos das variações de temperatura do ar medida nos diversos pontos, no turno da tarde e com vento sudeste .....                              | 155 |
| Tabela 7.7:  | Modelos explicativos das variações de temperatura do ar medida nos diversos pontos, no turno da tarde e com ventos leste e nordeste .....                    | 155 |
| Tabela 7.8:  | Modelos explicativos das variações de temperatura do ar medida nos diversos pontos, no turno da noite e com vento sudeste .....                              | 155 |
| Tabela 7.9:  | Modelos explicativos das variações de temperatura do ar medida nos diversos pontos, no turno da noite e com ventos leste e nordeste .....                    | 157 |
| Tabela 7.10: | Diferença de velocidade de vento entre os pontos dos pares observados, considerando vento sudeste .....  | 177 |
| Tabela 7.11: | Diferença de velocidade de vento entre os pontos dos pares observados, considerando ventos leste e nordeste .....  | 177 |
| Tabela 7.12: | Velocidade do vento no interior do túnel quando se iniciou a ventilação dos pontos .....   | 178 |
| Tabela 7.13: | Freqüência da coincidência entre a figura de erosão e os dados medidos em campo .....  | 179 |
| Tabela 7.14: | Freqüência de dias em que os pontos mais ventilados permaneceram com a temperatura do ar mais baixa do que seus pares .....                                  | 180 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....   | 17  |
| 1.1 Discussão inicial .....  | 18  |
| 1.2 Motivações, justificativas e relevância .....  | 28  |
| 1.3 Proposta de tese – questões e hipóteses .....  | 32  |
| 1.4 Estrutura do trabalho .....  | 34  |
| <br>   |     |
| <b>CAPÍTULO 2 - CLIMA E CLIMA URBANO</b> .....   | 36  |
| 2.1 Definição de clima, tempo e ritmo .....  | 37  |
| 2.2 Clima urbano .....   | 41  |
| 2.2.1 Sistema clima urbano – SCU .....   | 46  |
| 2.2.1.1 Subsistema termodinâmico .....   | 48  |
| 2.2.1.2 Subsistema físico-químico .....  | 55  |
| 2.2.1.3 Subsistema hidrometeoro .....  | 60  |
| 2.2.2 Síntese: elementos morfológicos que condicionam o clima urbano .....   | 62  |
| <br>   |     |
| <b>CAPÍTULO 3 - TROCAS TÉRMICAS, EFEITOS FÍSICOS DO VENTO E REPERCUSSÕES SOBRE O CONFORTO TÉRMICO</b> .....        | 67  |
| 3.1 Trocas térmicas no ambiente urbano .....   | 68  |
| 3.2 Movimento do ar (vento) .....  | 73  |
| 3.3 Escoamentos em torno de edifícios .....  | 76  |
| 3.4 Efeitos físicos do vento .....   | 77  |
| 3.5 Conforto térmico no espaço urbano .....  | 83  |
| <br>   |     |
| <b>CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA PARA A ANÁLISE DAS INTERAÇÕES ENTRE A FORMA URBANA E O CLIMA</b> .....                 | 91  |
| 4.1 Estrutura metodológica .....   | 92  |
| 4.1.1 Primeira etapa – definição do subsistema a ser focado .....  | 92  |
| 4.1.2 Segunda etapa – caracterização do local geográfico .....   | 92  |
| 4.1.3 Terceira etapa – delimitação da área de estudo .....   | 94  |
| 4.1.4 Quarta etapa – experimentos em túnel aerodinâmico .....  | 94  |
| 4.1.5 Quinta etapa – seleção de pontos representativos .....   | 96  |
| 4.1.6 Sexta etapa – medições .....   | 97  |
| 4.1.7 Sétima etapa – análise dos registros e diagnóstico .....   | 101 |
| 4.1.8 Oitava etapa – ações .....   | 102 |
| 4.2 Métodos e técnicas utilizados .....  | 102 |
| 4.2.1 Experimentos físicos tridimensionais em túnel aerodinâmico de camada limite atmosférica .....                | 102 |
| 4.2.1.1 Critérios de semelhança: geometria, cinemática e dinâmica .....  | 103 |
| 4.2.1.2 Técnica de erosão de areia .....   | 105 |
| 4.2.2 Configuração do céu .....  | 105 |
| 4.2.3 Medidas móveis .....   | 107 |
| 4.2.4 Análise de correlação linear de Pearson .....  | 107 |
| 4.2.5 Análise de correlação (R) e de regressão (R <sup>2</sup> ) lineares múltiplas – método <i>Stepwise</i> ..... | 112 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>CAPÍTULO 5 – UNIVERSO DE ANÁLISE</b> .....   | 114 |
| 5.1 A cidade de João Pessoa – PB .....  | 115 |
| 5.2 Descrição do clima de João Pessoa .....   | 115 |
| 5.3 Delimitação e caracterização da área de estudo .....  | 117 |
| <b>CAPÍTULO 6 – EXPERIMENTOS EM TÚNEL AERODINÂMICO</b> .....  | 123 |
| 6.1 Resultados dos ensaios de erosão de areia .....   | 124 |
| 6.2 Perfis de camada limite atmosférica .....   | 138 |
| <b>CAPÍTULO 7 – ANÁLISE DE DADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA PESQUISA DE CAMPO</b> .....  | 141 |
| 7.1 Caracterização dos pontos de medição .....  | 142 |
| 7.2 Análise climática para o período de medição segundo o INPE/CPETC .....  | 143 |
| 7.3 Descrição e análise dos dados medidos em campo .....  | 144 |
| 7.3.1 Análise de correlação diária considerando os dados medidos em todos os pontos e a direção do vento predominante .....                                   | 145 |
| 7.3.1.1 Manhã .....   | 146 |
| 7.3.1.2 Tarde .....   | 147 |
| 7.3.1.3 Noite .....   | 147 |
| 7.3.2 Análise de correlação e regressão em cada ponto .....   | 151 |
| 7.3.2.1 Manhã .....   | 151 |
| 7.3.2.2 Tarde .....   | 154 |
| 7.3.2.3 Noite .....   | 156 |
| 7.3.3 Análise de correlação e regressão total – considerando todos os pontos .....  | 158 |
| 7.3.3.1 Manhã .....   | 159 |
| 7.3.3.2 Tarde .....   | 161 |
| 7.3.3.3 Noite .....   | 162 |
| 7.3.4 Análise comparativa entre os pontos: discussão dos resultados .....   | 163 |
| 7.3.4.1 Manhã .....   | 164 |
| 7.3.4.2 Tarde .....   | 167 |
| 7.3.4.3 Noite .....   | 170 |
| 7.3.5 A formação da ilha de calor .....   | 171 |
| 7.4 Relações entre os ensaios de erosão de areia e os dados medidos em campo .....  | 176 |
| 7.4.1 Comparação entre as condições de ventilação medidas no túnel aerodinâmico e em campo .....  | 176 |
| 7.4.2 Relação entre a velocidade do vento e a temperatura do ar medidas em campo .....  | 179 |
| <b>CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....   | 181 |
| 8.1 Conclusões acerca das implicações dos resultados da tese na teoria do SCU .....   | 182 |
| 8.2 Conclusões acerca das implicações dos resultados nos procedimentos metodológicos utilizados nos estudos de climatologia urbana .....                      | 185 |
| 8.3 Conclusões acerca do comportamento climático da área e sua implicação na concepção da legislação e de projetos urbanos para a cidade de João Pessoa ..... | 187 |
| 8.4 Respostas às questões norteadoras, discussão sobre as hipóteses iniciais e validação da metodologia .....   | 189 |
| 8.5 Dificuldades encontradas .....  | 191 |
| 8.6 Indicações para novos estudos .....   | 192 |
| 8.7 Considerações finais .....  | 192 |

|  |            |
|--|------------|
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                        | <b>194</b> |
| <b>APÊNDICE A - CARTOGRAFIA .....</b>                          | <b>201</b> |
| <b>APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO .....</b> | <b>206</b> |
| <b>APÊNDICE C – FIGURAS DE CORRELAÇÃO .....</b>                | <b>215</b> |



# **Capítulo 1**

## **Introdução**

---

## 1.1 Discussão inicial

Esta tese objetivou a elaboração de uma metodologia para a observação e análise climática de cidades ou parcelas destas (unidades climáticas urbanas) que possibilite investigar como o fenômeno da urbanização influencia o clima urbano e é influenciado por ele, fornecendo informações para o planejamento e projeto urbanos.

O estudo da forma da cidade teve, ao longo do tempo, diversos níveis e tipos de abordagens, mas foi a partir do final do século XIX que se observaram as maiores transformações nos modelos da forma urbana: primeiro, com as adaptações das cidades tradicionais ao processo de industrialização (a Cidade Industrial, a Cidade Jardim, o princípio de Radburn e a unidade de vizinhança, desenvolvidos por Howard, Unwin, Parker, May, Escola de Chicago, entre outros), passando ao urbanismo moderno, com a ruptura “total” com a cidade tradicional (Le Corbusier e o CIAM), chegando aos tempos atuais, com as críticas ao modernismo e o surgimento das propostas do Pós-Modernismo e do Novo Urbanismo (irmãos Krier, Culot, Rossi, Jenks, Venturi, Lynch, Lamas, entre outros), a partir da década de 1960. Daí em diante, a forma da cidade passou a ser analisada por outros prismas além do da estética e da continuidade histórica do urbanismo culturalista e do funcionalismo e racionalismo do urbanismo moderno, passando a ser entendida como um sistema cujos elementos possuem características próprias e que interagem entre si, gerando fenômenos diversos.

Este trabalho se insere no campo disciplinar do desenho urbano, cujas temáticas de desenvolvimento são, segundo Del Rio (1990),

- Técnicas e instrumentos de controle do desenvolvimento do meio ambiente construído;
- Interpretação de valores e necessidades comportamentais individuais e de grupo;
- Identificação de qualidades físico-ambientais individuais e de grupo;
- Desenvolvimento de técnicas operacionais do ambiente urbano;
- Resolução de problemas interdisciplinares;
- Desenvolvimento de meios de implementação.

Neste estudo a cidade é entendida como um sistema complexo, onde diversos fenômenos ocorrem no espaço e no tempo, caracterizado pelo conjunto de suas partes (ou subsistemas) e pelas relações entre elas. Como tal, a complexidade urbana deve ser analisada de maneira sistêmica, levando em consideração as escalas de análise, os subsistemas nela contidos e o sistema que a contém.

O trabalho aqui apresentado utiliza, principalmente, a climatologia urbana como categoria de análise da forma urbana, apoiada ainda na categoria morfologia urbana, ambas originadas na Geografia.

A categoria climatologia urbana foi utilizada para analisar as transformações do ambiente natural, ocasionado pela urbanização, analisando as possíveis relações entre os atributos da morfologia urbana e do clima local, que constituem o clima urbano. A análise dessa categoria está embasada na Teoria do Sistema Clima Urbano – SCU (MONTEIRO, 1975), discutida com maior profundidade no Capítulo 2 deste trabalho.

A morfologia urbana é entendida como “o estudo analítico da produção da forma urbana no tempo” (SAMUELS, 1979). “Estuda, portanto, o tecido urbano e seus elementos construídos formadores através de sua evolução, transformações, inter-relações e dos processos sociais que os geram” (DEL RIO, 1990). Esta categoria foi utilizada basicamente para identificar e caracterizar espaços urbanos e seus atributos em termos de homogeneidade e heterogeneidade, geometria e orientação da malha urbana, tipologias edilícias, uso e ocupação do solo (atividades), índice de aproveitamento, taxa de ocupação, orientação e gabarito em altura dos edifícios, afastamentos, materiais e cores (albedo), espaços livres, espaços arborizados e corpos d’água.

O processo contínuo de urbanização, em muitos casos, sem planejamento adequado, tem causado em muitas cidades alterações climáticas significativas, impossibilitando o atendimento das exigências humanas em termos climáticos, olfativos, respiratórios e visuais. Isso porque as construções alteram a rugosidade da superfície do solo, mudando as suas características de relevo e de permeabilidade, reduzindo a sua cobertura vegetal, provocando redirecionamentos e variações na velocidade do vento local, privilegiando algumas áreas e prejudicando outras, especialmente as mais centrais da cidade. Elas diminuem a capacidade de trocas térmicas através da evaporação e da evapotranspiração (colaborando com o fenômeno da ilha de calor), alteram o balanço energético e aumentam os índices pluviométricos nas zonas urbanas (provocando as enchentes). Todas essas transformações constituem um fenômeno urbano (ou subsistema, dependendo do ponto de vista) denominado clima urbano.

O clima urbano é, portanto, um sistema complexo formado pela relação entre o fato urbano (atributos da morfologia urbana e as atividades humanas diárias) e o fato natural (fatores climáticos), nos quais a cidade está inserida.

O estudo detalhado do clima urbano, apesar de complexo, pode contribuir para o estabelecimento de novos parâmetros a serem considerados no planejamento sistemático (e estratégico) da ocupação do solo urbano, definindo padrões de ocupação e propiciando às áreas já

ocupadas ações corretivas e possibilidades preventivas para as futuras ocupações. Este planejamento não deve se restringir à construção de edifícios e de espaços abertos; deve estar integrado a outros elementos do projeto urbano: sistema viário, sistemas de drenagem e esgotamento sanitário (captação, transporte e tratamento em lagoas de estabilização), localização de lixões, de aterros sanitários e de indústrias, áreas verdes, entre outros; deve garantir a sustentabilidade de ecossistemas que funcionem como elementos reguladores do clima e dotar a cidade de filtros e sistemas naturais de purificação e resfriamento (ou aquecimento) do ar, como as reservas florestais e os corpos d'água, devendo ainda possibilitar, quando necessário, a criação desses elementos de forma artificial para corrigir problemas em áreas já ocupadas.

O projeto urbano pautado nas condições climáticas locais, aí compreendidas todas as suas variações temporais, pode propiciar melhores condições climáticas, olfativas e respiratórias para a população, a preservação da paisagem e de acidentes geográficos importantes. Pode oferecer substancial contribuição na elaboração de planos energéticos eficientes, especialmente no que tange ao consumo de sistemas de arrefecimento (e/ou calefação) do ar em edifícios. Há, entretanto, que se observar que não há parâmetros nem modelos projetuais universais com possibilidade de serem utilizados indiscriminadamente em qualquer parte.

Da mesma maneira que o clima se modifica nas diversas latitudes e longitudes, a capacidade de adaptação e a relação das pessoas com ele se modificam. O clima influencia nos hábitos, no comportamento, nas vestimentas, na alimentação e na arquitetura de um povo. Influencia ainda na construção das imagens, na percepção e na apropriação do espaço pelos habitantes. A imposição de um determinado modelo pode trazer graves desajustes a uma sociedade, entre eles o consumo excessivo de energia e o adoecimento da população.

A busca pelo conhecimento mais aprofundado da influência da relação clima-urbanização sobre a qualidade ambiental urbana ocorreu no final do século XIX, quando o grande mal que assolava a população urbana já era a poluição do ar, fosse pelos resíduos tóxicos lançados ao ar pelas indústrias da época, fosse pelo estado de insalubridade dos ambientes de moradia, expostos a pouca insolação e ventilação, favorecendo o contágio e agravamento de doenças respiratórias.

Entretanto, estudando a história da formação das cidades medievais a partir do seu desenho, verificou-se, além das ações estratégicas de defesa do território, uma preocupação peculiar com a exposição da cidade aos rigores do clima, especialmente aos ventos, ora gelados em alguns lugares, ora quentes e carregados de poeira ou areia em outros, como no deserto. A cidade de Kahun, no antigo Egito (cerca de 2000 A.C.), teve a orientação e as características das suas construções

concebidas para tomar o melhor proveito dos ventos dominantes no vale do Nilo (FIG. 1.1). Cada casa, por menor que fosse, possuía seu próprio pátio ao ar livre.

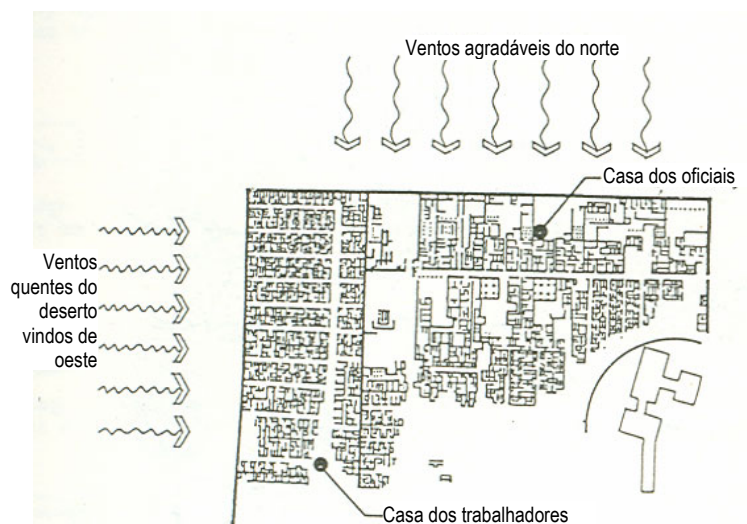


Figura 1.1: Cidade de Kahun, no antigo Egito.  
 Fonte: AYNSLEY, MELBOURNE e VICKERY (1977).

Na Figura 1.2, vê-se como a cidade chinesa era concebida a partir de um desenho que explicitava os princípios para a sua localização em termos da harmonia universal, utilizando da melhor forma os fluxos do céu (vento) e da terra (água). Na mesma figura se pode ver no símbolo completo do *ying-yang* a representação dos “ventos doces”.

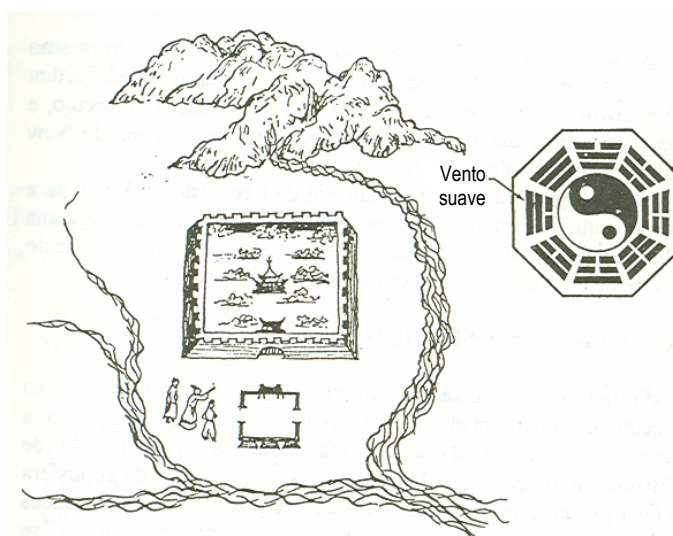


Figura 1.2: Esboço de um desenho chinês mostrando montanhas ao norte, água ao sul, governando o sítio para uma cidade.  
 Fonte: SARAIVA, J. G. (1994).

A cidade de Ur (por volta de 1.700 a.C.), possuía cerca de 13 ou 14 habitações ao redor de um pátio central pavimentado que permitia a iluminação e a aeração dos ambientes das casas. Segundo MORRIS (1984), as casas com pátio identificadas tanto na Mesopotâmia quanto no Egito e no vale do Indo, e posteriormente na Grécia e nas regiões quentes do Império Romano, haviam favorecido a convecção natural do ar, permitindo alcançar condições ambientais mais frescas. Este modelo foi posteriormente seguido em cidades espanholas de origem islâmica (MORRIS, 1984).

O clima influenciou de maneira determinante e benéfica a base de vida na antiga Grécia. Ali, o inverno é rigoroso nas montanhas, mas no resto é temperado e ensolarado. O calor no verão não chega a ser insuportável, pois o ar é seco e o calor se atenua com a brisa precedentes da terra e do mar. Esta situação atrativa estimulou uma atitude vital orientada ao ar livre e à vida comunitária, que, por sua vez, fomentou o desenvolvimento da democracia grega (MORRIS, 1984).

Vitruvius (século I a.C.) destaca nos seus “10 livros de Arquitetura” múltiplos aspectos sobre a implantação das cidades, a fim de tirar o máximo partido dos efeitos do vento, incluindo, no caso das cidades fortificadas, a sua localização, a disposição numa malha retangular das ruas, a melhor localização das entradas, pátios e terraços (FIG. 1.3). Ele chegou a definir, nas suas cidades, a melhor localização para algumas indústrias da época em função dos ventos dominantes e do posicionamento solar.

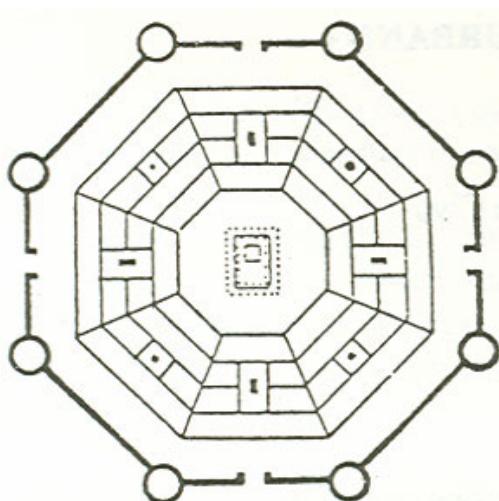


Figura 1.3: O plano de Vitruvius para uma cidade típica mostra ruas e ruelas dispostas com respeito à direção dos ventos.  
Fonte: MORRIS (1984).

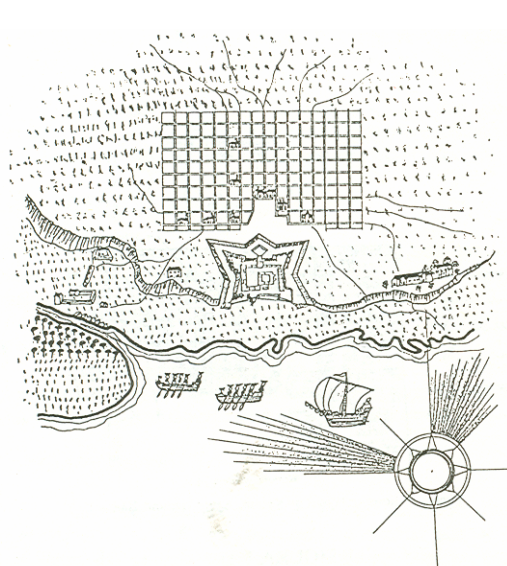


Figura 1.4: Esboço de um plano espanhol para a cidade de Buenos Aires no período colonial.  
Fonte: AYNSLEY, MELBOURNE e VICKERY (1977).

Já no século XVI há registro de que os princípios de localização das cidades fundadas pelos espanhóis na América Central e do Sul reconheciam, de imediato, os regimes de ventos dominantes

em toda a região do Golfo do México. Como exemplo, apresenta-se na Figura 1.4, um esboço do plano da cidade de Buenos Aires (1745).

Na mesma época, até o início do século XX, houve a proposição e a construção de algumas cidades jardins, a exemplo de Letchworth, na Inglaterra (FIG. 1.5) e algumas cidades dormitórios da zona de Nova Jersey, na periferia de Nova York (FIG. 1.6), que buscavam a reconquista do convívio com a natureza e uma certa oposição à cidade e ao urbanismo.

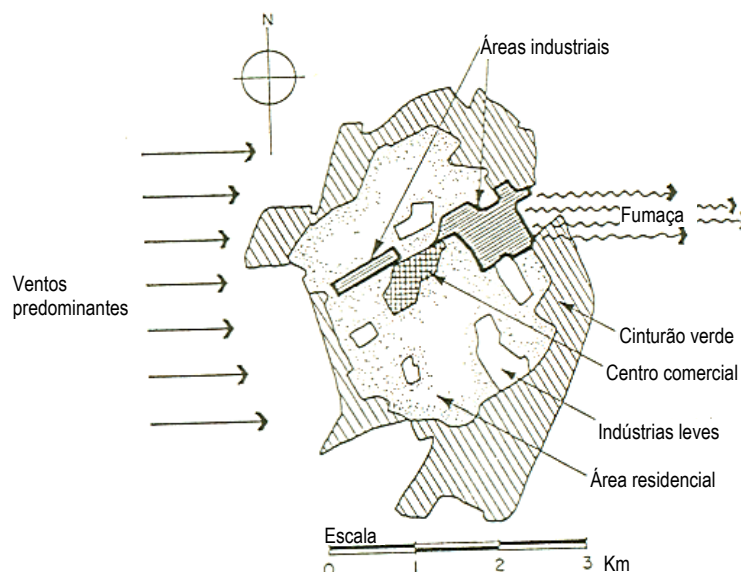


Figura 1.5: Plano da cidade de Letchworth que indica o local de áreas industriais e ventos dominantes.

Fonte: AYNSLEY, MELBOURNE e VICKERY (1977).

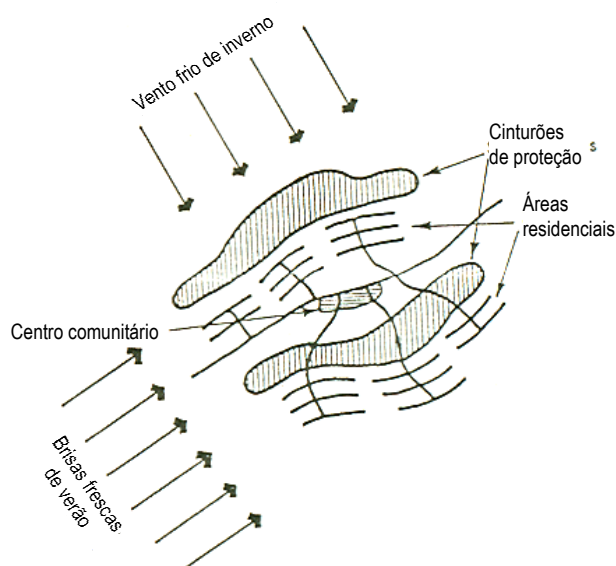


FIGURA 1.6: Uso de barreiras nas cidades de Nova Jersey para proteção dos ventos de inverno.

Fonte: AYNSLEY, MELBOURNE e VICKERY (1977).

No final do século XIX, a grande ação no sentido de proporcionar às cidades industriais uma melhor qualidade ambiental foram os planos higienistas, dos quais Haussman foi um dos principais precursores, em Paris, na França. Esses planos alteraram características significativas do desenho das cidades típicas da época, aumentando a largura das ruas, criando afastamentos entre os edifícios, para favorecer a ventilação e a incidência do sol, e implantando sistemas de saneamento.

Há um lapso de tempo muito grande entre o período medieval e o industrial do final do século XIX, durante o qual as atividades humanas nas cidades mudaram a passos bem mais lentos do que no século XX. Com o advento da máquina e a implantação dos parques fabris, as lições deixadas por Vitruvius e por algumas sociedades medievais quanto à adaptação do desenho da cidade ao meio físico foram atropeladas por uma incosequente urbanização e crescimento acelerado das cidades, sob o discurso do progresso e da felicidade das populações. Os registros históricos trataram de contar o absurdo desse pensamento e mostrar que os danos causados ao meio ambiente foram graves e muitas vezes irreversíveis.

A preocupação dos urbanistas modernos ligados ao pensamento dos CIAMs (Congressos Internacionais de Arquitetura Moderna) e de Le Corbusier quanto à adequação das cidades a então realidade da industrialização, do crescimento populacional e do uso do automóvel, apesar de legítima, trouxe em seus modelos urbanísticos alguns equívocos que proporcionaram ambientes tão ou mais inadequados do que as cidades industriais. O principal equívoco foi o de estabelecer um modelo universal de uso e ocupação do solo, já que esse modelo interagiria de maneiras distintas ao relacionar-se com o clima de lugares distintos.

Por exemplo, o afastamento excessivo dos edifícios e o invólucro envidraçado – em climas tropicais – tornaram os edifícios “verdadeiras estufas”, ao ficarem mais expostos à incidência do sol. Em algumas condições, edifícios muito altos proporcionaram fortes acelerações do vento ao nível do solo, causando risco de queda e desconforto térmico aos pedestres (FIG. 1.7).

Nas últimas décadas foi possível identificar algumas experiências positivas quanto ao desenho urbano adequado ao lugar. Os projetos elaborados para Kiruna e Svapparava (Suécia), Leaf Rapids, Inuvik e Fermont (Canadá) e de Noril'sk (Sibéria) tiveram como objetivo principal evitar o resfriamento desconfortável pelo vento, ajuntamento de neve, avalanches etc.

Na Alemanha, onde há muitos anos existe a preocupação em diminuir problemas de qualidade do ar provocados pela poluição industrial, destacam-se os planos de Stuttgart, Kassel, Frankfurt e Hanover, que buscaram corrigir a implantação dos parques fabris, redirecionar os escoamentos e a dispersão do ar poluído e criar áreas verdes para a sua regeneração.





Figura 1.7: Pessoas idosas sofrendo os efeitos do vento acelerado por causa da situação espacial gerada pela aplicação inconseqüente dos paradigmas modernistas: prédios altos em lâmina e amplos espaços livres – Boston, EUA.  
Fonte: DEL RIO (1990).

A Expo92 de Sevilha (Espanha) e a Expo98 de Lisboa (Portugal) são exemplos de intervenções urbanas com princípios bioclimáticos. Na primeira, as preocupações centrais eram a de reduzir os ganhos térmicos pelas edificações e adotar técnicas naturais de resfriamento, para, assim, reduzir o consumo energético. Os espaços externos foram dotados de diversas técnicas para a amenização dos rigores do clima. Na Expo de Lisboa, a maior preocupação foi a de reduzir o desconforto provocado pelos ventos fortes e frios, oriundos do Rio Tejo no inverno, e de técnicas de resfriamento natural no verão.

Mesmo com esses exemplos recentes, com as críticas ao urbanismo moderno e com as novas propostas de urbanismo, a partir da década de 1960, na maioria das cidades, e especialmente no Brasil, as ações urbanísticas implementadas pelo Estado têm sido burocráticas e pouco eficientes, restringindo-se à ordenação do trânsito, à implementação de sistemas de saneamento, à reforma de espaços públicos e à implantação de conjuntos de habitação (de qualidade contestável) para as famílias de baixa renda. A relação cidade-clima continua, portanto, sendo negligenciada.

Todo esse contexto é ainda permeado por um misto de omissão do Estado, de incompetência técnica de planejadores e projetistas e, em alguns casos, de irresponsabilidade (dos gestores), visto

que estudos científicos já indicaram problemas graves, mas nenhuma medida foi tomada, e muitos dos equívocos permanecem embutidos na legislação urbana e nos planos de intervenção da maioria das cidades.

No caso do Brasil, há uma deficiência técnica e gerencial aguda na área do planejamento e do projeto urbano, que se torna evidente ao avaliar o corpo técnico da gestão municipal da maioria das cidades, especialmente as de pequeno e médio porte. Tal quadro deve se modificar urgentemente, tendo em vista as exigências previstas no Estatuto da Cidade (Lei 10.257/01), criado em julho de 2001.

O Estatuto da Cidade regulamenta os artigos 182 e 183 da Constituição Federal e estabelece diretrizes gerais de política urbana. Algumas dessas diretrizes tratam do planejamento do desenvolvimento da cidade, da distribuição da população, das atividades econômicas do município e do território, de modo a evitar e corrigir distorções do crescimento urbano e seus efeitos negativos sobre o meio ambiente. Tratam ainda da ordenação e do controle do uso do solo urbano, de forma a evitar: a) a utilização inadequada dos imóveis urbanos; b) a proximidade de usos incompatíveis ou inconvenientes; c) excessos ou inadequação no parcelamento do solo, na edificação ou no uso em relação à infra-estrutura urbana e d) a poluição e a degradação ambiental.

Dos quatro problemas que o Estatuto da Cidade busca evitar através da ordenação e do controle do uso do solo urbano, citados anteriormente, três deles estão diretamente relacionados ao clima urbano, muito embora o texto não deixe isso claro, por tratar a questão de maneira generalista. Estudos nesta área dão a entender que a proximidade de usos incompatíveis ou inconvenientes e os excessos ou inadequação no parcelamento do solo levam à formação de um clima urbano hostil, provocando, em consequência, o desconforto térmico, a poluição e a degradação ambiental. Ampliando a análise dos efeitos nocivos desses problemas, verifica-se que estes interferem, inclusive, no aumento do consumo energético (para climatização e iluminação de ambientes internos aos edifícios), na degradação física de edificações, mobiliário urbano e veículos e na saúde da população.

Embora este aspecto venha sendo observado com maior atenção por geógrafos e meteorologistas, percebe-se que arquitetos e urbanistas têm se sensibilizado com o problema, chamando para si parte da responsabilidade, dado que suas decisões projetuais são o principal fator condicionador do clima urbano, através do desenho e do ordenamento dos elementos da morfologia urbana, que resultam na forma da cidade. No Brasil, a maior parte dos estudos sobre clima urbano já é feita por arquitetos (ASSIS, 2005).

Entretanto, o maior desafio é superar as dificuldades de integração entre a pesquisa sobre clima urbano e planejamento urbano, atribuído, em parte, à complexidade do tema e à falta de diálogo entre os profissionais envolvidos.

Dessa maneira, o conhecimento da relação entre a forma urbana e o clima local, como um sistema de controle da urbanização, é cada vez mais uma exigência técnica na atividade do urbanista, mesmo que este não seja um especialista em meteorologia ou em climatologia (geografia). O urbanista necessita, entretanto, de um arcabouço teórico e técnico mínimo que lhe possibilite dialogar com os especialistas e o oriente nas decisões de projeto, assim como tem feito com a engenharia. Ele deve compreender minimamente os fenômenos originados da relação entre forma da cidade que concebe e o clima, não esquecendo que no centro desta relação estão os habitantes da cidade e as atividades por eles desempenhadas.

Nesse sentido, o clima está incorporado à paisagem da cidade, sendo percebido por seus usuários tanto (ou mais) quanto a sua forma e a sua organização espacial. O clima pode gerar conforto ou desconforto, que se desencadeiam em prazer ou repulsa à cidade ou a setores dela. Isto quer dizer que os espaços urbanos também podem ser percebidos pela sensação térmica (frio, calor ou conforto), pelo olfato (odores agradáveis e desagradáveis), pelos sons (perturbadores ou não), pela umidade do ar (seco ou úmido), pela exposição ao sol (ou pelas sombras) e assim por diante. O clima é ainda um dos aspectos que podem interferir na escolha de uma pessoa preferir por viver em um determinado lugar (bairro, cidade, região ou país).

O aparato teórico e tecnológico para que isso ocorra tem sido desenvolvido, tanto por urbanistas, quanto por geógrafos e meteorologistas, inclusive de maneira interdisciplinar, quando possível. Mas ainda necessita-se de maior aprofundamento e aperfeiçoamento, especialmente nos métodos de investigação e de análise do clima urbano e de projeto urbano adequado ao clima, considerando aí o caráter interdisciplinar que requer esse campo de atividade.

Do ponto de vista teórico, ainda é necessário realizar muitos estudos localizados, que possibilitem avaliar até que ponto é possível generalizar os conceitos e modelos até hoje desenvolvidos, especialmente por ser o clima algo muito complexo e peculiar a cada lugar. Em termos de planejamento e projeto urbano, parâmetros e metodologias de projetos adequados ao clima ainda estão por ser elaborados, apesar de algumas experiências recentes bem sucedidas, como as explicitadas anteriormente.

Obviamente que os problemas da cidade não se restringem ao seu desenho. Pelo contrário, o desenho é, em grande parte, fruto do modelo econômico vigente e dos processos políticos e culturais, agentes determinantes das cidades que aí estão. No entanto, o urbanista deve assumir uma postura mais ativa, chamando para si a responsabilidade de dar as respostas que são de sua competência e estão ausentes das discussões sobre o planejamento da cidade e da elaboração da legislação urbana.

## 1.2 Motivações, justificativas e relevância

Como campo científico relativamente novo, o estudo do clima urbano (climatologia urbana) é ainda um mar imenso a ser navegado e explorado. Por muitos anos, e até hoje, as pesquisas neste campo têm sido direcionadas para a observação e caracterização dos fenômenos climáticos no ambiente urbano, buscando entender de que maneira esses fenômenos estão sendo influenciados pelo processo de urbanização.

Só a partir da década de 1970 é que alguns conceitos puderam, de certa forma, ser generalizados, e alguns modelos (teóricos e matemáticos) passaram a ser desenvolvidos. Entretanto, a continuidade dos estudos de observação, principalmente os que aplicaram os modelos até então propostos, indica que os mesmos não se aplicavam, nem explicavam, a todas as possibilidades de comportamento do clima urbano, o que não os invalida por um todo, ao contrário, são coerentes e representativos da realidade a partir da qual foram concebidos.

A observação e a própria aplicação dos modelos, como em todo o campo científico, demandam de métodos e instrumentos de observação e de análise, que, no caso do estudo do clima urbano, passaram por diversas modificações e aperfeiçoamentos, agregando técnicas e ferramentas diversas, inclusive de outros campos do conhecimento, conferindo ao estudo do clima urbano um caráter interdisciplinar.

Oke (1984) há vários anos já chamava a atenção para a necessidade de se gerar uma base integrada de recursos para a aplicação da climatologia urbana ao planejamento, através do desenvolvimento de sua capacidade preditiva. Para o autor, esta base deveria ser constituída de três grupos de recursos: métodos empíricos, modelos físicos escalares e modelos numéricos.

Os métodos empíricos abrangem algoritmos estatísticos, parametrizações, fórmulas e conceituações qualitativas, geralmente ligados à uma base confiável de dados empíricos. Isto significa que, se por um lado, estão fundamentados em condições reais, por outro lado, sua validade se restringe àquela base de dados.

Os modelos físicos em escala têm sido usados principalmente para simular os fluxos de ar através de áreas urbanas e em torno dos edifícios, usando túneis de vento. Existem algumas experiências de simulação de padrões de sombra em arranjos de edifícios, efeitos da ilha de calor urbana, efeitos da mudança da rugosidade superficial e da geometria urbana sobre o albedo. Os modelos físicos permitem recriar as condições locais e prever o que ocorrerá com a implantação de estruturas planejadas.

Os modelos numéricos são qualquer conjunto de equações matemáticas e técnicas analíticas interligados, projetados para reproduzir aspectos do comportamento do clima urbano. Embora venham se desenvolvendo muito, poucos tiveram como objetivo modelar as condições micro e topoclimáticas, e, por outro lado, resta ainda considerar os efeitos de uma série de características urbanas, tais como o calor antropogênico, a emissão de poluentes, a disponibilidade de água superficial, a expansão urbana, o aumento do número de edifícios altos etc. (OKE, 1984).

Nesta tese desenvolveu-se uma metodologia de observação e análise do clima urbano que

possibilita uma compreensão mais acessível do problema por parte dos planejadores e projetistas, apresentando os resultados de sua aplicação através de representações gráficas e termos comuns a sua atividade. Essa metodologia busca integrar parte dos recursos disponíveis (mencionados por Oke), visando à observação e à análise mais precisas do clima urbano, de maneira que os seus resultados contribuam para o desenvolvimento de parâmetros científicos para o planejamento e projeto urbanos. Compõe-se basicamente por métodos empíricos e físicos em escala, que, ao ser aplicada, poderá gerar uma base de informações para a elaboração de modelos numéricos.

Os propósitos deste trabalho estão fundamentados especialmente em duas referências. A primeira é a Teoria do Sistema Clima Urbano (SCU), elaborada por Monteiro (1975), que estabelece um modelo teórico explicativo do fenômeno clima urbano a partir de três canais de percepção do ser humano: conforto térmico, qualidade do ar e impacto meteórico<sup>1</sup>.

A segunda referência é o método de análise dos escoamentos de vento na estrutura urbana a partir de experimentos realizados em túneis aerodinâmicos de camada limite atmosférica. Tal método foi desenvolvido por Gonçalves da Silva (1999), utilizando a técnica de erosão de areia (JANEIRO BORGES & SARAIVA, 1980) e medições de perfis de camada limite atmosférica.

Os estudos que sucederam tais trabalhos, aplicados em algumas cidades brasileiras, reforçaram a sua importância e apontaram alguns caminhos a serem percorridos. Os que tiveram como referência a teoria do SCU (SAMPAIO, 1981; ASSIS, 1990 e 2000; BRANDÃO, 1996; entre outros) indicaram quão complexas e dinâmicas são as interações entre o clima e forma urbana.

Os que utilizaram o método proposto por Gonçalves da Silva (FERRAZ, 2003; PEREGRINO 2005, QUEIROGA, 2005 e GUERRA, 2005) demonstraram o quanto a forma da cidade, através das dimensões e orientação das edificações, dos afastamentos entre eles e da orientação da malha urbana, modifica o escoamento de vento, repercutindo significativamente nas condições de temperatura e poluição do ar no interior da cidade e dos edifícios.

Os resultados desses trabalhos remetem à necessidade de aperfeiçoamento dos métodos de observação e de análise do clima urbano, sobretudo na análise do comportamento de outras variáveis climáticas além do da temperatura do ar, como a umidade relativa do ar, a direção e velocidade do vento, a nebulosidade, a radiação solar incidente e a temperatura das superfícies (verticais e horizontais).

O dinamismo das relações entre clima e cidade tem sido freqüentemente analisado e quantificado através de métodos estatísticos de correlação linear de Pearson e de regressão linear múltipla. Os estudos de Sampaio (1981), Brandão (1996) e Duarte (2000), entre outros, indicam quanto

os índices de correlação entre a temperatura do ar e as variáveis independentes (da forma urbana) consideradas podem variar ao longo do tempo, dadas as variações atmosféricas durante o período de medição dos dados, de maneira que o uso do método de correlação precisa ser acrescido de critérios de significância das correlações para que a análise se torne mais precisa.

Deste modo, como contribuição a este campo de pesquisa, este trabalho indica esses índices (ver item 4.2.4) e acrescenta às análises de correlação as variáveis climáticas umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento, nebulosidade e insolação.

Os mesmos estudos indicaram que a previsibilidade de episódios climáticos ou dias típicos é um tanto imprecisa, visto que os mesmos podem não ocorrer, inviabilizando as medições. Este pode ser um dos motivos pelo qual Sampaio (1981) não identificou correlações significativas entre a temperatura do ar e a forma urbana na cidade de Salvador-BA.

Para evitar tal situação, a metodologia desenvolvida por esta tese toma uma amostra maior de dias, possibilitando uma visualização mais precisa das variações do comportamento térmico ao longo do tempo. Optou-se aqui por um amostra de 28 dias consecutivos, representativos do verão na cidade de João Pessoa, situada no litoral do Nordeste brasileiro.

Os mesmos estudos também indicaram que o grau de influência de determinadas variáveis independentes sobre a temperatura do ar varia no tempo e no espaço. Para a compreensão deste fenômeno, a metodologia elaborada adota a análise de regressão linear múltipla, que possibilita o estudo do comportamento de uma variável dependente (neste caso, a temperatura do ar) em função de duas ou mais variáveis independentes (umidade relativa do ar, velocidade do vento, nebulosidade, radiação solar, taxa de ocupação, fator de visão do céu etc.). Para este tipo de análise, Drapper & Smith (1981) recomendam a utilização do método *stepwise* (ver item 4.2.5). Este método possibilita, a partir dos índices de correlação, a elaboração de modelos explicativos da variação de uma determinada variável dependente dada as variações das variáveis independentes.

Os estudos realizados até este momento revelaram que o processo de urbanização altera os escoamentos do vento, elevando a camada limite atmosférica e reduzindo a velocidade próxima da superfície (CHANDLER, 1976). Tal efeito é potencializado à medida que se aumenta a rugosidade da superfície.

Assis (2000) e Sakamoto (1994), entre outros, colocam em tom de suspeita a possibilidade de o comportamento térmico de algumas porções urbanas estar sendo influenciado pela ventilação. Alguns autores, como Romero (1988), afirmam que as diferenças de temperatura entre porções distintas da cidade podem provocar uma circulação interna de ar, das áreas mais aquecidas para as

---

<sup>1</sup> A Teoria do Sistema Clima Urbano será discutida no capítulo 2, item 2.2.1.

menos aquecidas, mais evidenciada quando os ventos incidentes no local estão calmos.

Serra (1984) e Assis (2000) acreditam que a baixa correlação entre a forma urbana e a temperatura do ar em cidades litorâneas se deve à ventilação mais abundante e forte nessa região, com incidência típica dos ventos alíseos.

Entretanto, estudos realizados em algumas cidades litorâneas como, Salvador (SAMPAIO, 1981), Maceió (BARBIRATO, 1999), João Pessoa (GONÇALVES DA SILVA, 1999; FERRAZ, 2003; PEREGRINO, 2005) e Rio de Janeiro (CORBELLA & YANNAS, 2003; SOUZA E SILVA, 2003), indicam que há aí uma relação mais complexa, em que a forma urbana (orientação, dimensões e organização das edificações no espaço) e a orografia condicionam a ventilação, que, por conseguinte, influencia de maneira diferenciada no comportamento térmico de uma determinada porção urbana. Isso explica, em parte, porque Sampaio (1981) não identificou correlações significativas entre a forma urbana e a temperatura do ar em Salvador, e porque Corbella & Yannas (2003) e Souza e Silva (2003) as encontraram no Rio de Janeiro, ambas cidades litorâneas, mas com distintas formas urbanas e orografias.

É importante salientar que, na maioria das vezes, os trabalhos sobre clima urbano não mediram a velocidade e a direção do vento no local, considerando apenas a temperatura e a umidade relativa do ar. Quando o fizeram, apenas as medições em campo não foram suficientes para assegurar tais afirmações, visto que não se teve o controle da direção e velocidade dos ventos incidentes, nem das mudanças provocadas em seu escoamento. De maneira que não se pode afirmar se o vento medido é o mesmo que atinge a cidade ou é fruto das diferenças de temperatura no ambiente urbano.

Buscando amenizar esse problema, esta tese apresenta como diferencial e inovação a integração do método de análise dos escoamentos de vento proposto por Gonçalves da Silva às metodologias usais de observação do clima urbano, notadamente aquelas que utilizam métodos de medições microclimáticas.

Esta integração foi importante para dois momentos do estudo do clima urbano. O primeiro refere-se à eleição de pontos significativos da estrutura urbana onde deverão ser feitas as medições microclimáticas. Para tanto, foram tomadas como referência as figuras de erosão obtidas a partir de experimentos que utilizam a técnica de erosão de areia. Num segundo momento, os resultados dos experimentos no túnel aerodinâmico foram utilizados nas análises dos dados medidos em campo, essencial para o conhecimento da origem e do destino dos escoamentos e a sua repercussão no campo térmico observado.

Assim, espera-se que a aplicação da metodologia objeto deste trabalho contribua para a formulação de conceitos mais precisos sobre a repercussão da ventilação no clima urbano; de que

maneira e com quão intensidade ela modifica a temperatura e a umidade do ar.

Também se busca contribuir para a afirmação do estudo do sistema clima urbano no campo disciplinar do projeto urbano, tornando a compreensão do funcionamento desse sistema mais acessível a arquitetos urbanistas e, assim, fazer com que os resultados da análise do clima urbano sejam mais uma peça-chave no processo de planejamento e projeto urbanos, com vistas à conquista de uma melhor qualidade ambiente.

A aplicação da metodologia desenvolvida por este trabalho poderá contribuir ainda para a concepção e reformulação de legislações urbanas, para o planejamento urbano e para a concepção de projetos urbanos.

Apesar da metodologia desenvolvida por esta tese não ter um caráter preditivo, os resultados de sua aplicação poderão auxiliar nas tomadas de decisão, pois munirá os planejadores e projetistas de um retrato mais fiel do objeto que estão transformando (a forma da cidade). Os ensaios no túnel aerodinâmico poderão ser realizados ainda durante o processo de concepção do projeto, simulando o escoamento dos ventos em função das soluções apresentadas, auxiliando na escolha daquela que proporcionar um melhor desempenho.

Por fim, a metodologia desenvolvida possibilitará a definição de estratégias para as áreas onde for aplicada, podendo ser utilizada como um dos instrumentos de controle e avaliação dos projetos urbanos, tendo como meta a qualidade ambiental da cidade, a saúde de sua população e a conservação de energia.

### **1.3 Proposta de tese – questões e hipóteses**

Com a aplicação dessa metodologia espera-se responder às seguintes questões:

- a) Que contribuições os experimentos realizados em túneis aerodinâmicos podem oferecer ao estudo do comportamento térmico do ambiente urbano e à concepção do projeto urbanístico?
- b) Existe relação entre as áreas de estagnação do vento (identificadas nos ensaios no túnel aerodinâmico) e os elementos da morfologia urbana, mencionados na questão anterior?
- c) Como ocorrem as correlações entre a temperatura do ar e as variáveis climáticas: umidade relativa do ar, velocidade do vento, insolação e condição do céu, em ambientes urbanos fisicamente distintos?



- d) Como ocorrem as correlações entre as variáveis climáticas mencionadas anteriormente e os elementos da morfologia urbana: taxa de ocupação, índice de aproveitamento, distância em relação ao mar e fator de visão do céu?

As respostas a essas questões objetivam construir conceitualmente, a partir dos resultados obtidos com a aplicação da metodologia desenvolvida por este trabalho, os argumentos necessários para confirmar ou refutar as duas hipóteses norteadoras deste trabalho:

**H1 - O comportamento da temperatura do ar no ambiente urbano está condicionado à variação dos demais elementos climáticos – especialmente a radiação solar, a umidade relativa do ar e o vento –, que, ao interagirem entre si e com a forma urbana, se modificam ao longo do tempo, definindo o ritmo das variações da temperatura.**

**H2 - Comparando duas porções urbanas com características morfológicas semelhantes, verifica-se que a situada numa área de estagnação do vento permanecerá mais aquecida do que a situada numa área ventilada.**

A primeira hipótese, se confirmada, mostrará que o comportamento da temperatura do ar no ambiente urbano está condicionado à interação dinâmica entre outras variáveis climáticas e entre estas e a estrutura urbana, dada através dos processos de trocas térmicas entre o ambiente urbano e a atmosfera. A compreensão desta relação poderá proporcionar a formulação de modelos matemáticos mais precisos e estabelecer estratégias de projeto para minimizar possíveis rigores do clima.

A segunda precisa ser verificada porque se tornou um conceito bastante aceito. Porém, há indícios na teoria e em pesquisas empíricas de que esta afirmação não seja verdadeira, devido às características dos processos dinâmicos de trocas térmicas entre as diversas porções urbanas e entre a estrutura urbana e a atmosfera.

Há que se verificar, antes de tal afirmação, a velocidade, a direção e a temperatura do vento, que dependem fundamentalmente da sua origem, para assim atestar se determinada porção da cidade está sendo resfriada ou aquecida pelo escoamento. Portanto, é possível que o vento possa se deslocar numa determinada direção e velocidade através de uma porção urbana muito aquecida e transportar o calor ali acumulado para outra porção com temperatura inferior, aquecendo-o um tanto mais.

## 1.4 Estrutura do trabalho

Esta tese estrutura-se em oito capítulos. Este primeiro, que foi iniciado com uma breve discussão sobre o tema geral em que se insere a pesquisa, a apresentação das justificativas e relevância da sua realização, finalizando com a formulação de questões e hipóteses a serem respondidas a partir da aplicação da metodologia proposta.

Os dois capítulos seguintes compõem o referencial teórico destinado ao embasamento da tese. O *Capítulo 2 – Clima e Clima Urbano* – destina-se a estabelecer os conceitos relacionados ao clima e a compreender os fenômenos que o originam. São definidas as escalas climáticas que delimitam os níveis de abordagem do estudo do clima, assim como os fatores e elementos que o caracterizam. Estes conceitos também objetivam subsidiar o entendimento dos conceitos e fenômenos relacionados ao clima urbano. Sobre este último, discutem-se os fenômenos decorrentes da relação entre a forma urbana e o clima local, identificando os elementos da morfologia urbana que podem interferir nas mudanças climáticas no âmbito da cidade.

O *Capítulo 3 – Trocas térmicas, efeitos físicos do vento e repercussões sobre o conforto térmico* – destina-se a subsidiar a tese com conceitos de fenômenos físicos inerentes ao comportamento do clima no âmbito da cidade, através da relação entre os fatores climáticos e o ambiente construído.

O *Capítulo 4 – Metodologia* – destina-se a descrever detalhadamente a metodologia desenvolvida, estabelecendo as suas etapas e apresentando os métodos e técnicas utilizados para a sua implementação.

O *Capítulo 5 – Universo de Análise* – descreve detalhadamente a porção urbana da cidade de João Pessoa escolhida para a aplicação da metodologia, visando a sua validação.

O *Capítulo 6 – Experimentos em Túnel Aerodinâmico* – descreve os procedimentos e resultados dos experimentos realizados no túnel aerodinâmico do Instituto de Pesquisa Tecnológica de São Paulo – IPT, em que foi utilizada a técnica de erosão de areia.

O *Capítulo 7 – Análise de dados e discussão dos resultados da pesquisa de campo* – descreve os critérios considerados para a seleção dos pontos onde foram feitas as medições microclimáticas, as suas características físicas e os procedimentos de medição. Apresenta, ainda, a descrição das análises de correlação e de regressão lineares múltiplas feitas com base nos dados medidos em campo; faz-se a comparação entre os pontos medidos a partir das análises de correlação; compara-se os dados medidos em cada ponto com os medidos na estação de referência (situada no aeroporto local), identificando a formação de ilhas de calor. Por fim, faz-se a discussão dos resultados obtidos à luz do referencial teórico apresentados nos capítulos 2 e 3.

O último capítulo destina-se às conclusões e às proposições de futuras investigações. Apresenta as contribuições do trabalho à teoria e aos procedimentos metodológicos utilizados no estudo do clima urbano. Apresenta, ainda, indicações para a elaboração de parâmetros para a reformulação da legislação urbana de João Pessoa e possíveis intervenções na área estudada. Por fim, faz indicações de possíveis estudos a serem realizados como desdobramento da tese apresentada.

# **Capítulo 2**

## **Clima e Clima Urbano**

---

Este capítulo discute inicialmente, de maneira sucinta, os conceitos de clima, tempo e ritmo; a classificação das escalas de abordagem do clima e a caracterização do clima de um determinado lugar.

Essa discussão inicial serve de base para o aprofundamento dos conceitos de clima urbano, para a discussão da Teoria do Sistema Clima Urbano (MONTEIRO, 1975) e para a discussão dos elementos da morfologia urbana que condicionam o clima urbano e são responsáveis pela adequação (ou não) da cidade ao clima local.

## 2.2 Definição de clima, tempo e ritmo

Os estudos sobre o clima vêm sendo tratados especialmente pelos meteorologistas e geógrafos (que atuam na área da Geografia Física). No entanto, a Meteorologia e a Geografia Física abordam o clima, especialmente o da cidade, de maneiras distintas. Sob a perspectiva meteorológica, o clima da cidade seria algo que se alcança através da observação da atmosfera acima da cidade. Na Geografia Física, em sua visão de cidade como lugar mais conspícuo da morada do homem, o objetivo será aquele de atingir a atmosfera dentro da cidade. Segundo Monteiro (1975),

não deve pairar a menor dúvida sobre o fato de que o geógrafo tem que considerar as medidas padrão tidas como **ar livre** proveniente dos postos meteorológicos contidos na cidade. Elas fornecerão os parâmetros de comparação básica com aquelas obtidas por meio da observação e mensuração pelos artefatos que pretendem alcançar o **ar comprometido** dentro da realidade do ambiente urbano.

Vários autores expressaram o seu entendimento sobre o conceito de clima, que, em suma, pode-se considerar como sendo a série de estados atmosféricos acima de um lugar em sua sucessão habitual (SORRE, 1934 *apud* TARIFA, 2001). A este conceito estão associados outros dois, o de *tempo atmosférico* e o de *ritmo*, este último proposto por Sorre e empregado e desenvolvido no Brasil por Monteiro em trabalhos realizados entre os anos de 1962 e 1969 (*apud* TARIFA, 2001). O tempo atmosférico é o estado momentâneo da atmosfera sobre um determinado lugar (MONTEIRO, 1991). Tomando como verdadeiro o conceito de clima proposto por Sorre, Monteiro (1971 *apud* TARIFA, 2001) entende a análise rítmica do clima como um processo interativo entre a circulação atmosférica e os elementos do clima, tratados em sua seqüência temporal. Para isso, Monteiro estabelece três regras básicas:

a) admitimos, pois, como válida a conclusão de que o ritmo climático só poderá ser compreendido através da representação concomitante dos elementos fundamentais do clima em unidades de tempo cronológicas, pelo menos diárias, b) só a análise rítmica detalhada ao nível de tempo, revelando a gênese dos fenômenos climáticos pela interação dos elementos

e fatores dentro de uma realidade regional, c) na análise rítmica as expressões quantitativas dos elementos climáticos estão indissolivelmente ligadas à gênese ou qualidade dos mesmos.

Tarifa (2001) propõe a utilização do termo *ritmanálise*, introduzido, segundo ele, em 1931 pelo Professor Lúcio Alberto dos Santos para seus estudos de homeopatia e, em seguida, adotado por Gaston Bachelard como uma teoria, ou dialética, das durações aplicadas à questão de aprendizagem. A esse propósito TARIFA afirma que

a ritmanálise pode, através da compreensão de todos os ritmos, propiciar uma teoria e um método capaz de ajudar a desvendar um pouco melhor a lógica dos processos biogeofísicos e a lógica dos processos socioeconômicos. Integra, dentro de uma perspectiva histórico-genética, fenômenos que pela natureza intrínseca (físicos, biológicos, humanos ou sociais) têm sido tratados de forma isolada, tanto em nível da realidade, como do método, ou da própria construção do pensamento e da elaboração de leis do conhecimento.

A análise rítmica do clima urbano é importante para o conhecimento e, assim, para a definição de estratégias de projeto que considerem as variações do clima e das atividades urbanas ao longo do tempo, que podem ocorrer entre o dia e a noite, entre dias úteis e final de semana e feriados ou entre estações climáticas (verão, inverno etc.).

Segundo Vecchia (1997), a localização geográfica determina algumas condicionantes do comportamento do regime climático de um dado local, este entendido como as flutuações de suas variáveis que podem também ser entendidos e expressos como rigor térmico, ou seja, o conjunto de valores limitantes, mínimos e máximos médios, ou os absolutos (extremos) que ocorrem em condições climáticas peculiares a cada local.

O aludido autor ainda escreve que o regime climático ou o rigor térmico podem ser entendidos e analisados na forma de “períodos críticos” definidos através de episódios representativos do tempo atmosférico. Esses episódios devem ser observados através dos elementos climáticos (conjunto de dados de superfície), em função da circulação atmosférica secundária, analisando-se a localização das massas de ar, o avanço das frentes e a presença ou a existência de ciclones e anticiclones.

Por fim, Vecchia (1997) salienta que se devem classificar as condições objetivas para a ocorrência das flutuações climáticas, em função da gênese do clima, o que inclui a circulação geral da atmosfera, a circulação secundária e a localização geográfica (latitude e longitude, altitude, relevo etc.), fatores de modificação das condições iniciais do clima. Um dos conceitos mais importantes que sustenta com sólida base tais argumentos é o entendimento e classificação das condições atmosféricas, de uma dada região, em CLIMAS REGULARES E IRREGULARES, segundo a conhecida concepção de Meynier (1955 *apud* VECCHIA, 1997).

A abordagem do estudo do clima urbano tem ocorrido em diversas escalas geográficas. Entretanto, a classificação das escalas de clima é muito difícil de ser feita. Há, na bibliografia, muitas divergências, tanto a respeito dos limites de abordagem e abrangência das escalas, quanto na sua terminologia.

Monteiro (1975, p.136), buscando uma classificação que se relacionasse melhor com o estudo do clima urbano e dentro da visão geográfica, elaborou um quadro de relacionamento das unidades climáticas com as ordens de grandeza taxonômica das formas e com unidades (ou graus) de urbanização (Quadro 2.1).

Na proposta de Monteiro, as escalas zonal e regional não consideram a presença da cidade. Ele acrescenta a escala sub-regional, que, juntamente com a escala local, aborda o clima de uma megalópole ou metrópole. A escala mesoclimática é uma subdivisão do clima local, assim como a escala topoclimática e a microclimática, cujas unidades de superfície que representam diminuem.

As unidades de superfície representadas pelas diversas escalas parecem ser o elemento de discordância entre os autores, por serem estas dimensões relativas. O próprio Monteiro (1975) considera a sua classificação um tanto débil, especialmente nas escalas inferiores, já que as dimensões dos espaços climáticos se confundem muito na prática.

Com esta classificação o autor busca ressaltar que a pesquisa do clima urbano deve considerar a relação entre as diferentes escalas geográficas, desde o zonal até o local, onde se define o urbano e as várias possibilidades de articulações entre sítio e edificação.

Brandão (1996) apresenta em sua fundamentação teórica a posição de alguns dos estudiosos da climatologia urbana acerca das escalas de abordagem do problema, dentre as quais se destaca neste trabalho a proposta de Morgan *et al.* (1977 *apud* BRANDÃO, 1996), ao procurar obter dados para o estudo do balanço de energia na escala microclimática. O autor propõe estudar a cidade a partir de quatro escalas de análise: macro escala (a cidade como um todo); meso escala (comunidades individualizadas); micro escala (zonas de uso do solo) e por fim a subdivisão da micro escala em unidades ainda menores (área impermeável, gramada e de telhados, por exemplo).

No entanto, a classificação mais citada nos trabalhos de climatologia urbana é a de OKE (1978), que propõe que o clima urbano deve ser estudado em dois níveis de escala: o “*urban boundary layer*”, que envolve toda a cidade e a atmosfera por ela alterada, e o “*urban canopy layer*”, que compreende a atmosfera intra-urbana e por isto definida a partir de processos microclimáticos (FIG. 2.3).

| Ordens de grandeza (Cailleux & Tricart) | Unidades de superfície                         | Escala cartográfica de tratamento | Espaços climáticos | Espaços urbanos                                       | Estratégias de abordagem                  |   |                                  |
|---|--|-----------------------------------|--------------------|---|---|---|----------------------------------|
|   |  |                                   |                    |   | Meio de observação                        | Fatores de organização                          | Técnicas de análise              |
| II                                      | 10 <sup>6</sup> - Milhares de Km <sup>2</sup>  | 1:45.000.000<br>1:10.000.000      | Zonal              | -   | Satélites<br>Nefanálises                  | Latitude<br>Centros de ação atmosférica         | Caracterização geral comparativa |
| III                                     | 10 <sup>4</sup> - Milhares de Km <sup>2</sup>  | 1:5.000.000<br>1:2.000.000        | Regional           | -   | Cartas sinóticas<br>Sondagens aerológicas | Sistemas meteorológicos (Circulação secundária) | Redes transectos                 |
| IV                                      | 10 <sup>2</sup> - Centenas de Km <sup>2</sup>  | 1:1.000.000<br>1:5.000.000        | Sub-Regional       | Megalópole<br>Grande área metropolitana               | Rede meteorológica de superfície          | Fatores geográficos                             | Mapeamento sistemático           |
| V                                       | 10 - Dezenas de Km <sup>2</sup>                | 1:250.000<br>1:100.000            | Local              | Área metropolitana<br>Metrópole                       | Posto meteorológico<br>Rede Complementar  | Integração geológica<br>Ação antrópica          | Análise espacial                 |
| VI                                      | 10 <sup>-2</sup> - Centenas de Km <sup>2</sup> | 1:50.000<br>1:25.000              | Mesoclima          | Cidade grande Bairro ou Subúrbio de metrópole         | Registros móveis (Episódios)              | Urbanismo                                       | Especiais                        |
| -                                       | Dezenas de m <sup>2</sup>                      | 1:10.000<br>1:5.000               | Topoclima          | Pequena cidade<br>Fáceis de bairro/subúrbio de cidade | Detalhe                                   | Arquitetura                                     |                                  |
| -                                       | M <sup>2</sup>                                 | 1:2.000                           | Microclima         | Grande edificação<br>Habitação<br>Setor de habitação  | Baterias de instrumentos especiais        | Habitação                                       |                                  |

Tabela 2.1: Categorias taxonômicas da organização geográfica do clima e suas articulações com o clima urbano. Fonte: MONTEIRO, C. A. de F. *Teoria e clima urbano*. São Paulo: FFLCH-USP, 1975. (Tese, Livre-Docência em Geografia).



## 2.2 Clima urbano

Nesta seção faz-se um relato histórico resumido dos principais estudos realizados sobre o clima urbano, buscando identificar a partir de seus resultados os principais elementos da morfologia urbana que condicionam o clima urbano e, também, os métodos e técnicas utilizados nas investigações.

O clima urbano é resultado do processo de transformação, pela urbanização, do ambiente natural, que, por conseguinte, pode alterar as características originais do clima de um determinado lugar.

Os estudos sobre clima urbano iniciaram-se através de análises comparativas entre o ambiente urbano e o rural, a partir do que foram sendo identificados os tipos de transformações que provocam as mudanças climáticas que distinguem esses dois ambientes. Muitos autores se debruçaram sobre essas investigações em várias partes do mundo, entre os quais se destacam Davenport (1965), Detwylwer (1974), Monteiro (1975), Chandler (1976), Koenisberger (1997), Landsberg (1981) e Oke (1978, 1981 e 1982).

É importante destacar que parte dos estudos descritos a seguir obteve resultados típicos de regiões frias da Europa e dos EUA, nem sempre aplicáveis ou encontrados em cidades situadas nos Trópicos, o que remete a uma análise mais atenta dos fenômenos verificados nestas últimas, que podem resultar em conceitos diferenciados.

Mas a preocupação em adequar a cidade ao clima local é bem antiga, sendo observada, por exemplo, em algumas cidades medievais (como visto na introdução deste trabalho) e em Londres ainda em 1661, quando o Sir John Evelyn sugeriu que fosse criado um cinturão verde com espécies aromáticas para purificar o ar fumarento e já nocivo daquela cidade. (MUNFORD, 1956 *apud* GONÇALVES, 1992).

Essas observações evoluíram no sentido da construção do conceito do fenômeno “*ilha de calor urbana*”, que indica o sobreaquecimento de uma determinada área em relação ao seu entorno.

O conceito da ilha de calor se limita, dentro de uma visão sistêmica, a compreender o fenômeno meteorológico e sua modelagem, observando e analisando os processos de transformação de energia a partir da interação entre o ar atmosférico e o ambiente urbano construído. (ASSIS, 1990).

Segundo Oke (1982), Luke Howard, em 1833, foi o primeiro a observar que as temperaturas do ar são freqüentemente mais altas na cidade do que no seu entorno não urbanizado.

Landsberg (1981), já em 1970, quantificou (de maneira aproximada) as diferenças entre cidade e campo quanto aos aspectos de quantidade de poluentes, radiação, nebulosidade, precipitação, temperatura e umidade relativa do ar (TAB. 2.2). O autor mostra que o meio urbano está

vulnerável à concentração maior de poluentes, a uma menor radiação, à maior nebulosidade e precipitação de chuva, a maiores temperaturas do ar e menores valores de umidade relativa do ar.

Tabela 2.2: Características do clima urbano.

|                     | ELEMENTO                          | COMPARANDO A AMBIENTES RURAIS |
|---------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| Poluentes           | Núcleos de condensação            | 10 vezes mais                 |
|                     | Particulados                      | 10 vezes mais                 |
|                     | Misturas gasosas                  | 5 a 25 vezes mais             |
| Radiação            | Total em superfície horizontal    | 0 a 20% menos                 |
|                     | Ultravioleta, inverno             | 30% menos                     |
|                     | Ultravioleta, verão               | 5% menos                      |
|                     | Duração da luz solar              | 5 a 15% menos                 |
| Nebulosidade        | Nuvens                            | 5 a 10% mais                  |
|                     | Nevoeiro, inverno                 | 100% mais                     |
|                     | Nevoeiro, verão                   | 30% mais                      |
| Precipitação        | Quantidades                       | 5 a 15% mais                  |
|                     | Dias com menos de 5mm             | 10% mais                      |
|                     | Queda de neve, interior da cidade | 5 a 10% menos                 |
|                     | Queda de neve, limite da cidade   | 10% mais                      |
|                     | Tempestades                       | 10 a 15% mais                 |
| Temperatura         | Média anual                       | 0,5 a 3°C mais                |
|                     | Mínima de inverno                 | 1 a 2°C mais                  |
|                     | Máxima de verão                   | 1 a 3°C mais                  |
|                     | Dias com uso de aquecimento       | 10% menos                     |
| Umidade relativa    | Média anual                       | 6% menos                      |
|                     | Inverno                           | 2% menos                      |
|                     | Verão                             | 6% menos                      |
| Velocidade do vento | Média anual                       | 20 a 30% menos                |
|                     | Rajadas de ventos                 | 10 a 20% menos                |
|                     | Calmaria                          | 5 a 20% mais                  |

Fonte: LANDSBERG, H. E. *The urban climate*. Nova Iorque: Academic Press, 1981.

Fuggle & Oke (1970 *apud* CHANDLER, 1976) observaram que as trocas térmicas no campo e na cidade ocorrem de maneira diferente durante o dia e a noite (FIG. 2.1). Isso se deve à influência dos fatores da urbanização, que serão vistos mais adiante, neste capítulo.

Detwyler (1974 *apud* ROMERO, 2000) classificou em três tipos as alterações provocadas pela urbanização:

- Mudança da superfície física da terra, pela densa construção e pavimentação, fazendo com que a superfície fique impermeável, aumentando sua capacidade térmica e rugosidade e, ao mesmo tempo, alterando o movimento do ar;
- Aumento da absorção de energia solar com a diminuição do albedo;

- Emissão de contaminantes, que aumentam as precipitações e modificam a transparência da atmosfera.

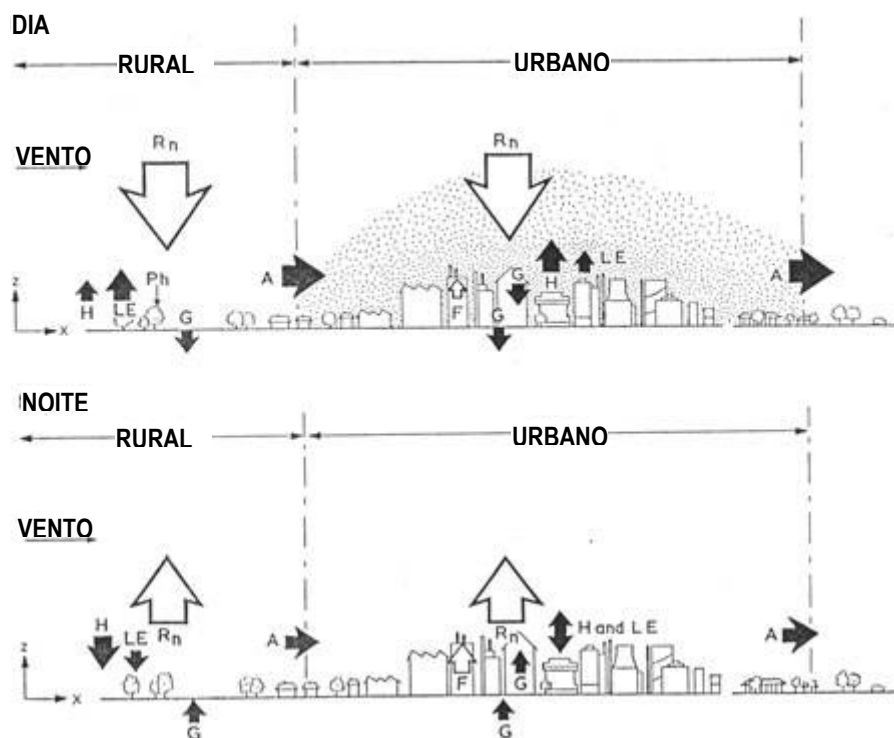


Figura 2.1: Esquemas da dimensão das trocas de calor em áreas rurais e urbanas durante o dia e a noite, com as variáveis que compõem o modelo de balanço de energia dado por:  $R_n + F = H + G + A + LE$ .

Legenda:  $R_n$  = radiação;  $H$  = calor sensível;  $LE$  = calor latente,  $Ph$  = fotossíntese;  $G$  = armazenamento de calor em edifícios e solo;  $A$  = convecção;  $F$  = calor antropogênico.

Fonte: Fuggle & Oke (1970 *apud* CHANDLER, 1976).

Outros estudos verificaram o quanto a urbanização altera os escoamentos de vento, repercutindo no campo térmico e na dispersão dos poluentes no ambiente urbano.

Davenport (1965, *apud* CHANDLER, 1976) mostrou que, a uma mesma altura, as velocidades de vento são mais baixas em cima de uma cidade do que sobre as superfícies rurais, e estas mais baixas do que sobre a superfície do mar, devido à rugosidade de cada superfície. Porém, a taxa de aumento da velocidade do vento com a altura é maior sobre a cidade. Por exemplo, com um expoente de rugosidade de 0,40, ventos a 150m sobre o solo são iguais a 91% do vento gradiente (soprando ao topo da camada de limite) em cima do mar, 76% do vento gradiente em cima de áreas rurais, mas somente 61% do vento gradiente em cima de uma cidade (FIG. 2.2).

Koenisberger (1977 *apud* ROMERO, 1988) estima que a CLA varie de 100 a 300 metros em

campo aberto, de 100 a 400 metros na periferia e de 100 a 500 metros no centro urbano. Estes limites correspondem à área habitada pelo Homem, denominada subcamada limite urbana, mas a altura real corresponde a aproximadamente 2 a 3 quilômetros de altura.

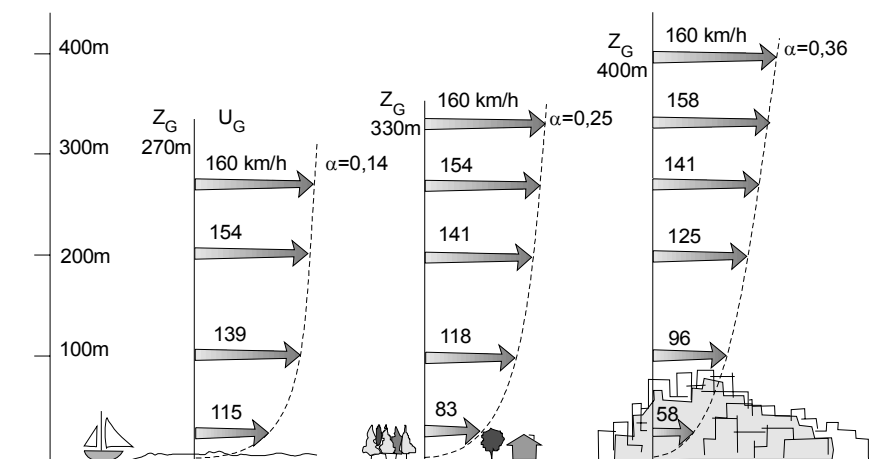


Figura 2.2: Perfis de velocidade do vento no campo e na cidade.  
Fonte: Gandemer (1976).

Em 1978, Oke, buscando compreender o processo dinâmico das transformações do clima no âmbito da cidade, descreveu a estrutura vertical da atmosfera estimando as alturas das camadas em função da relação vento-superfície terrestre. Em seguida, o autor concluiu que há um comportamento distinto entre o clima na camada limite urbana (que se estende da superfície da terra até a altura das coberturas das edificações) e a camada acima desta e da camada limite rural (FIG. 2.3). Oke (1978) verificou que, com a incidência dos ventos regionais, o domo climático pode mudar sua conformação, alongá-la em forma de pluma, atingindo a região a sotavento da estrutura urbana.

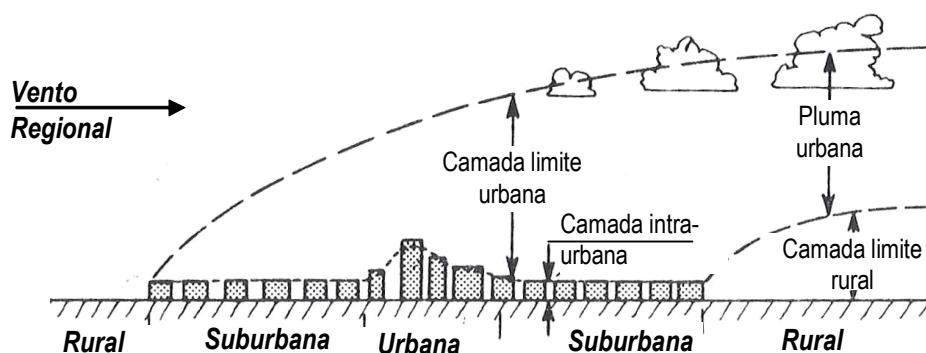


Figura 2.3: Esquema representativo da atmosfera urbana.  
Fonte: Oke (1978).

Oke (1982 *apud* LOMABARDO, 1984), após diagnosticar que os estudos sobre clima urbano ainda se encontravam dispersos e num estágio inicial, restringindo-se à observação e descrição dos fenômenos, concluiu que pouco havia sido feito em relação à pesquisa de processos e à elaboração de modelos físico-matemáticos.

Analisando na linha dos trabalhos que trataram de comparações entre campo e cidade, Oke (1982 *apud* ASSIS, 1990) tem demonstrado, através de modelagem física e numérica do conceito de ilha de calor urbana, que a diferença primária entre os processos térmicos, rural e urbano, está na repartição entre as magnitudes do fluxo turbulento de calor sensível (QH) e do fluxo turbulento de calor latente (QE) no balanço energético local, que são as trocas secas e úmidas mencionadas no capítulo seguinte.

Vários autores, a exemplo de Oke (1982) e Lombardo (1984), têm verificado que o aquecimento urbano produz diferentes campos de pressão, provocando uma ventilação própria que pode alterar o movimento de ar regional. Quando a ilha de calor urbana é mais pronunciada, ela inicia um padrão centrípeto de fluxo do ar das áreas mais frescas da periferia da cidade para o centro adensado, mais quente. O ar sopra para dentro, a poucos metros por segundo, até que seja diminuído e bloqueado ou aquecido; então se eleva, esfriando gradualmente com a altura e descendo novamente sobre o campo. O ar quente, ao subir, dá origem a correntes verticais, que aliadas à nebulosidade e maiores índices de condensação, favorecem a retenção de poluentes (forma-se uma espécie de teto). Os poluentes são carregados pelas correntes verticais e logo dispersos sobre o entorno, num processo contínuo que conforma dentro de uma calota ou domo em movimento circulatório de gases (ROMERO, 1988).

A velocidade do vento necessária para dispersar a ilha de calor ainda foi pouco estudada, podendo variar de acordo com a rugosidade da superfície, com a porosidade da estrutura urbana e com a intensidade da ilha de calor. Spirn (1995) afirma que

uma brisa desloca a ilha de calor a favor do vento; um vendaval pode dispersá-la inteiramente. A velocidade do vento requerida para dispersar uma ilha de calor varia de cidade para cidade; Londres requer uma velocidade de 12m/s, enquanto Reading, na Inglaterra, com população de 120 mil pessoas, requer apenas um vento de 4,7 m/s. Sob nebulosidade, menor radiação solar atinge o solo, e a ilha de calor é, desta forma, menos pronunciada. Sob condições de inversão térmica, quando a atmosfera é estável e o calor não consegue se dispersar, a ilha de calor é intensificada.

No Brasil, os estudos sobre clima urbano tiveram maior impulso a partir das décadas de 60 e 70, sendo o Geógrafo Carlos Augusto Monteiro um dos principais impulsionadores dos estudos nesta área. Naquele momento, Monteiro tomou conhecimento da Teoria Geral dos Sistemas (TGS), considerando-a de fundamental importância para a renovação da abordagem geográfica e para a

superação da dicotomia entre o físico e o humano. Com base na TGS o aludido autor desenvolveu a Teoria do Sistema Clima Urbano (SCU) (MONTEIRO, 1975).

Na perspectiva do SCU, segundo Assis (1995),

as definições usuais de clima urbano estão inseridas em sistemas classificatórios que abrangem várias escalas, cuja organização sistêmica de variáveis atmosféricas e geográficas são, ao mesmo tempo, seu ambiente (em função de sua inserção escalar) e suas componentes.

Em 1990, Sezerino & Monteiro (1990 *apud* ASSIS, 1990a) introduziram o conceito de “campo térmico urbano” como fenômeno diuturno, útil à percepção das mudanças de temperatura do ar dentro da cidade em correlação com a forma urbana (sua estrutura e funções) e em sua variação temporal. A aplicação deste conceito, embora ainda insuficiente, contribuiu para a representação climática da cidade no espaço e no tempo, possibilitando a confecção de mapas que podem auxiliar no planejamento urbano.

### 2.2.1 Sistema clima urbano - SCU

O clima urbano, entendido como síntese das relações decorrentes do entrosamento e articulação entre os fatos naturais e urbanos, é abordado como um **sistema: aberto**, uma vez que é sujeito à entrada e saída de energia; **singular**, pois é restrito à cidade; **complexo**, devido à variedade e intensidade de relações que nele se estabelecem; **evolutivo**, pois segue a dinâmica do fato urbano bem como a climática, e ainda **auto-regulável**, visto ser passível de ações de *feedback* por parte do Homem (MONTEIRO, 1975).

Alguns fenômenos nocivos, como a ilha de calor, a poluição do ar e as enchentes, são parte da produção do SCU, que deve ser ordenada, segundo Monteiro (*Op. Cit.*, p.24), através de canais de percepção humana, já que o homem deve constituir sempre o referencial dos problemas e valores dos fatos geográficos. Estes canais são assim definidos pelo autor:

- a) **Conforto térmico** – englobando as componentes termodinâmicas que, em suas reações, se expressam através do calor, ventilação e umidade nos referenciais básicos a esta noção. É um filtro perceptivo bastante significativo, pois afeta a todos permanentemente. Constitui, seja na climatologia médica, seja na tecnologia habitacional, assunto de investigação de importância crescente<sup>2</sup>;
- b) **Qualidade do ar** – A poluição é um dos males do século, e talvez aquele que, por seus efeitos dramáticos, atraia mais atenção. Associada às outras formas de poluição (água, solo etc.), a do ar é uma das mais decisivas na qualidade ambiente urbano;
- c) **Impacto meteórico** – Aqui estão agrupadas todas aquelas formas meteóricas, hídricas (chuva, neve, nevoeiros), mecânicas (tornados) e elétricas (tempestade), que, assumindo, eventualmente, manifestações de intensidade, são capazes de causar impacto na vida da cidade, perturbando-a ou desorganizando-lhe a circulação e serviços.

---

<sup>2</sup> Hoje, a definição das variáveis que determinam o conforto ambiental é outra. Veja a discussão na seção 3.5.

Essa ordenação é esquematizada em um diagrama apresentado na Figura 2.4.

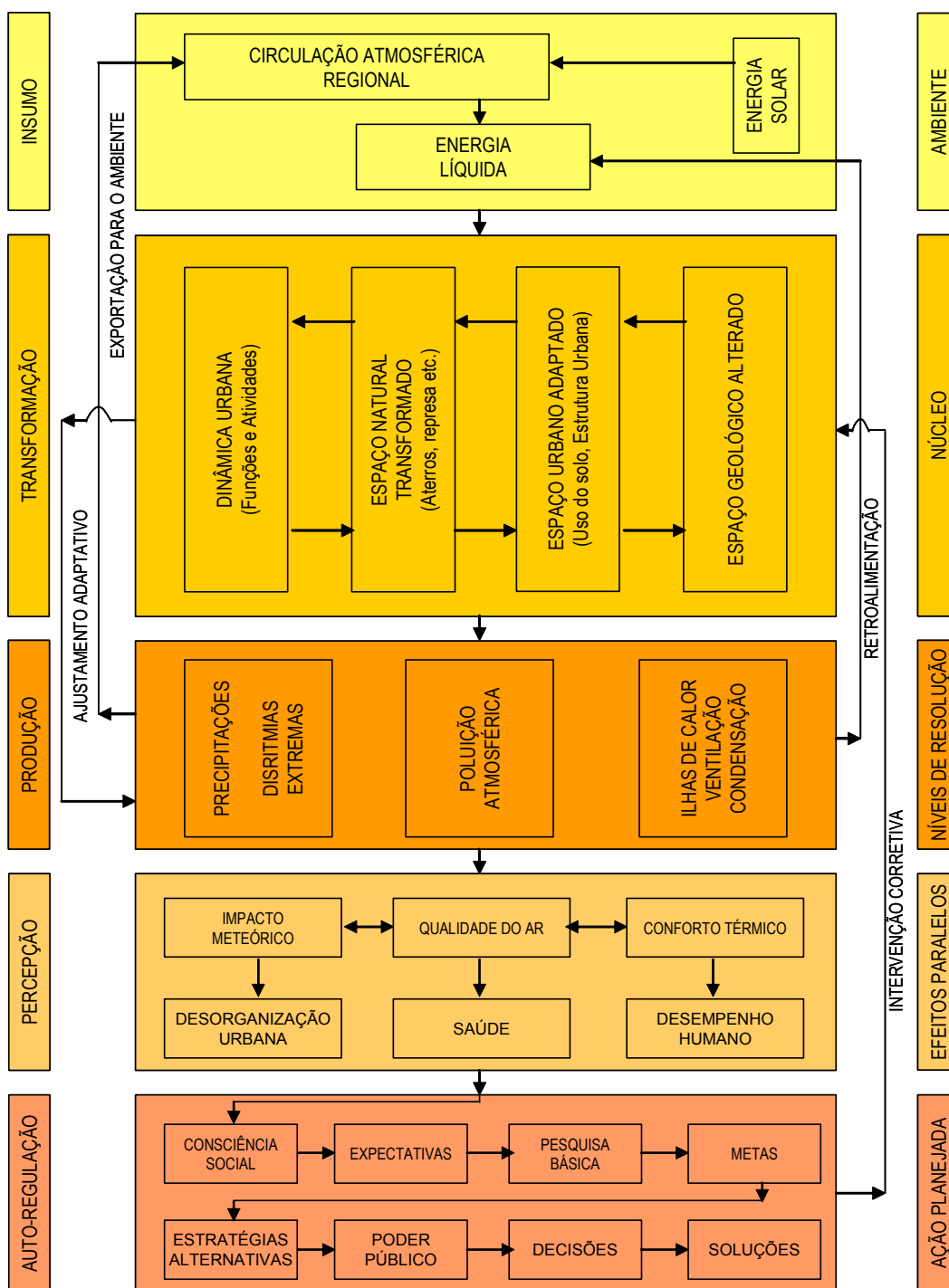


Figura 2.4: Diagrama básico do Sistema Clima Urbano.  
 Fonte: Adaptado de Monteiro (1975).

Por fim, Monteiro (*Op. Cit.* p.40) ressalta que:

Como todo sistema complexo, o SCU não poderá ser compreendido em toda a sua funcionalidade, de repente, sobretudo se a preocupação for com o comportamento funcional. Será muito difícil, se não impossível, descrevê-lo em todos os seus elementos, partes e relações, e especificar sua estrutura. Nesse sentido, o núcleo do sistema poderá apresentar-se como verdadeira caixa-preta. Num primeiro momento, teremos que contentar-nos em saber o que entra e o que sai através dela para avaliar a mudança. É a análise dita insumoprodução (input/output).

O próprio sistema é definido mais pelo seu nível de resolução (para os objetivos considerados) do que pela sua divisão em partes ou pela sua estrutura. Assim, os subsistemas nele contidos devem estar ligados antes ao nível de resolução do que às partes. A estrutura total do sistema pressupõe hierarquias entrelaçadas horizontalmente (na estrutura) e interligadas verticalmente (na função). Por isso é que o conceito de hólón e de estruturas intermediárias é importante na compreensão dos sistemas.

É possível perceber que outros produtos podem ser gerados no sistema clima urbano, como a poluição sonora e a redução da luz natural, que afetam, tanto o espaço urbano (exterior), quanto as edificações (espaço interior), que necessitariam de uma modelagem específica, além, claro, de pesquisas visando compreender tais fenômenos, o que já vem sendo feito, principalmente, por arquitetos e engenheiros ambientalistas.

Nos itens seguintes (2.2.1.1, 2.2.1.2 e 2.2.1.3) foi feita uma breve discussão sobre os subsistemas do SCU, dando maior atenção aos resultados dos estudos realizados no Brasil, direcionados a cada um deles.

### **2.2.1.1 Subsistema termodinâmico**

O subsistema termodinâmico (FIG. 2.5) tem como insumo principal a radiação solar. A quantidade desse insumo depende da circulação regional, das variações espaciais e temporais da incidência da radiação solar e da circulação atmosférica, do modo de transmissão e do balanço térmico. É ainda complementado pelos insumos provenientes da produção no sistema, ou seja, a energia produzida na cidade.

Ao interagir com a estrutura urbana, esses insumos são transformados em outras formas de energia. Essa transformação é condicionada pelas características da cidade (forma, uso do solo, topografia, funções e atividades, características óticas das superfícies etc.).

O principal produto gerado nessa transformação é o fenômeno chamado ilha de calor, que provoca alterações no regime hídrico (aumentando as precipitações) e na ventilação, merecendo, portanto, uma maior atenção. A ilha de calor influencia na conservação de energia, pois reduz o consumo de energia para aquecimento no inverno, mas em climas quentes essa economia pode ser superada pelo aumento da necessidade de resfriamento do ar no verão. Deve-se notar que o resfriamento do ar produz mais calor, que é dissipado no meio ambiente vizinho, agravando a ilha de calor.



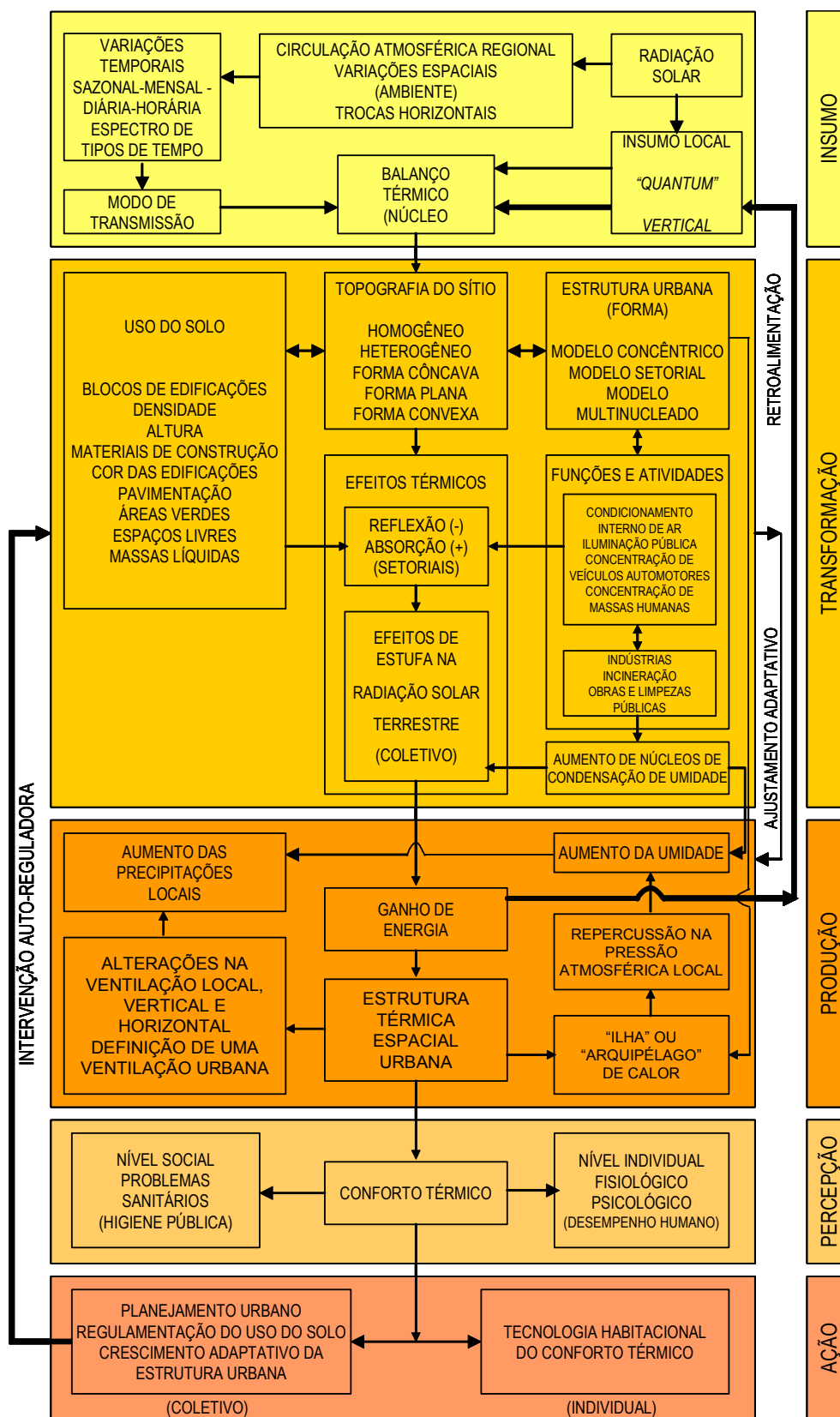


Figura 2.5: Canal perceptivo do conforto térmico – subsistema termodinâmico. Fonte: Adaptado de Monteiro (1975).

Como é papel do projeto urbano proporcionar conforto aos seus usuários, atrelado ao estudo da ilha de calor, deve-se considerar, especialmente nos climas mais quentes, o *stress* térmico devido às temperaturas elevadas, independentemente da sua relação com a temperatura nas porções não urbanizadas. O projeto urbano deve buscar mecanismos que minimizem esse *stress*, possibilitando maior conforto térmico não só no interior das edificações, mas nos espaços abertos.

Sampaio (1981) e Duarte (2000) mostraram uma forte correlação entre a densidade construída e a temperatura do ar em Salvador – BA e Cuiabá - MT, respectivamente. Chandler (1965), Lombardo (1984) e Brandão (1996), entre outros, mostraram que o centro da ilha de calor numa cidade está frequentemente localizado sobre a área de maior densidade de construção.

Lombardo (1984) estudou as relações existentes entre o uso do solo e a temperatura do ar (medidas em campo) verificadas na cidade de São Paulo e comparou com imagens em infravermelho obtidas através de satélites meteorológicos. Ela verificou a formação de diversas ilhas de calor, principalmente nas porções mais adensadas e de maior tráfego de veículos, algumas delas atingindo até 10°C a mais em relação às áreas periféricas e menos adensadas.

Assis (1990b) fez um estudo em Belo Horizonte a partir da análise da distribuição horizontal do gradiente térmico da ilha de calor em função dos dados climáticos disponíveis na rede de estações meteorológicas daquela localidade. Verificou o coeficiente de correlação de 0,70 entre a temperatura e a densidade construída em ocupações predominantemente horizontais. Em ocupações verticalizadas a correlação foi insignificante. Esses resultados foram confirmados em pesquisa posterior (ASSIS, 2000). A autora conclui que esse comportamento térmico se deve à exposição maior à radiação solar nas áreas horizontalizadas e ao fator de visão do céu, nas verticalizadas.

Santamouris (1997) observou que a maior parte dos estudos sobre ilha de calor se concentraram na observação e na análise deste fenômeno no período noturno, deixando a ilha de calor diurna um tanto de lado. A atenção para a ilha de calor diurna é pertinente, principalmente em cidades de clima tropical, com radiação solar elevada. No estudo realizado em Atenas, na Grécia, o aludido autor verificou que naquela cidade a ilha de calor diurna é mais intensa do que a noturna. Durante o dia, nas áreas mais centrais da cidade (especialmente as com maior tráfego de veículos) permanecem mais quentes do que a periferia, atingindo diferenças de até 18°C, contra 3°C à noite.

Brandão (1996) constatou na cidade do Rio de Janeiro – RJ que a ilha de calor foi melhor observada com ventos de direção sul e de intensidade fraca, com média variando de 1,3m/s a 2,5m/s. Verificou também que a ilha de calor está mais presente em áreas horizontalizadas e de baixa densidade durante o dia e em áreas verticalizadas e muito adensadas durante a noite.

Portanto, há ainda que ser levado em consideração o uso sazonal das diversas áreas da cidade. As atividades desenvolvidas nessas áreas possuem ritmos distintos, que podem se alterar no decorrer do dia, da semana ou do ano. A produção de energia térmica antropogênica nessas áreas será ditada por esse ritmo. Deve-se considerar a existência de eventos sazonais que provoquem o aumento temporário da concentração de pessoas e veículos em determinadas áreas da cidade, como alta estação turística, romarias religiosas, feiras-livres, espetáculos culturais, entre outros.

Azevedo (2001) estimou o fluxo potencial e real da radiação solar (joules/km<sup>2</sup>/ano) e o comparou aos valores estimados da energia dissipada pela aglomeração humana da Região Metropolitana de São Paulo – RMSP (biomassa, resíduos residenciais, sistemas de transportes, processos industriais, setor público e serviços). As grandezas e magnitudes encontradas nessas estimativas possibilitaram ao autor propor que “o ritmo semanal das atividades humanas é um dos elementos determinantes da derivação antrópica do sistema climático da RMSP” (AZEVEDO, 2001).

Em Salvador – BA, Sampaio (1981, p.59) verificou não ser possível (no caso daquela cidade) estabelecer para a intensidade do uso do solo uma correlação linear com a variação de temperatura do ar interna da cidade. Este fato, entretanto, não chega a caracterizar uma situação que comprove a inexistência de uma forte influência da urbanização, em termos de espaço edificado, sobre a elevação das temperaturas no meio urbano em comparação com a periferia da cidade.

Alguns estudos, a exemplo do de Duarte (2000), se empenharam em analisar as mudanças climáticas em algumas cidades, acompanhando o processo de urbanização, identificando indícios de elevação da temperatura do ar, devido ao aumento das estruturas urbanas, como a densidade de construções e de população, a redução da vegetação e o aumento da impermeabilização do solo.

Assis (1990b) constatou em Belo Horizonte – MG uma certa influência da densidade populacional no comportamento da temperatura do ar, comparando ambientes de ocupação horizontal e vertical. Segundo a autora, é possível afirmar que “a partir de uma faixa de densidade de 130 a 150 hab/ha, o impacto da ocupação horizontal sobre o conforto térmico urbano é maior do que o tipo vertical de assentamento, principalmente no verão”. Mas essa conclusão ainda requer maior análise, já que os coeficientes de correlação foram um tanto baixos.

Lombardo (1984), analisando a cidade de São Paulo, comprovou a existência de uma alta correlação entre as altas temperaturas superficiais e as áreas com crescimento vertical intenso e a densidade demográfica acima de trezentos habitantes por hectare. Em outra publicação (1995), a autora ainda menciona que muitas das cidades mais populosas da Europa e da América do Norte têm maiores efeitos da ilha de calor do que as menos populosas.

Outro elemento da morfologia urbana observado no estudo do fenômeno da ilha de calor é a relação entre a largura da rua e a altura dos edifícios que a delimita. Essa relação dá origem ao fator de visão de céu (*sky view factor*), que indica o quanto de céu se pode ver a partir de um ponto situado no centro da rua à altura de seu piso. Segundo os autores que adotam esse parâmetro na análise da ilha de calor (Oke, 1978; Sakamoto, 2001; entre outros), quanto menor o fator de visão do céu (maior obstrução da visão do céu), maior será a dificuldade de o ambiente dispersar energia térmica para a atmosfera.

No Brasil, a relação entre a configuração do céu e a temperatura foi estudada por Hasenak (1989) e Amashita (1987) – citados por Sakamoto (2001) – em Porto Alegre – RS, Sakamoto (1994) em São Paulo – SP, Imamura-Bornstein (1991) em Campina Grande – PB e Patos – PB, Assis (2000) em Belo Horizonte – MG, Brandão (1996) e Souza e Silva (2003) no Rio de Janeiro - RJ.

Sakamoto (1994), em estudo realizado na cidade de São Paulo, verificou que a configuração do céu e a temperatura do ar apresentaram relações evidentes, porém não lineares e constantes ao longo do tempo. Onde o fator de visão do céu era maior (Jardins), a temperatura do ar era mais elevada do que nos lugares onde o fator de visão do céu era menor (Centro) durante o dia, invertendo-se à noite. Entretanto, essa relação não pôde ser identificada nas várzeas dos Rios Tietê e Pinheiros, possivelmente pela interferência mais significativa de outras variáveis, como a umidade relativa do ar e o fluxo mais intenso de veículos.

A autora chama a atenção para o fato de que as diferenças de temperatura podem criar deslocamentos de ar e a interação entre o vento e a temperatura pode desempenhar papel relevante em determinados horários, diminuindo a importância da configuração do céu.

Assis (2000) verificou em Belo Horizonte que nos *canyons* urbanos com uma obstrução de até 15% não havia um aumento relevante da capacidade do recinto urbano reter calor, enquanto que, quando essa obstrução aumentava para 40%, havia uma persistência do efeito de sobreaquecimento nos recintos mais verticalizados até por volta das 9 horas da manhã, demonstrando que tal efeito se revela com mais intensidade à noite.

Com base nesse estudo a autora chegou a sugerir uma altura de 8 a 9 pavimentos para as ruas com cerca de 30 metros de largura frontal entre os prédios, característica comum da malha urbana de Belo Horizonte.

Vários estudos constataram forte correlação entre o percentual de área impermeabilizada e com reduzida cobertura vegetal e a temperatura do ar (LOMBARDO, 1984, GOUVÊA, 2002, TARIFA & ARMANI, 2001a,b, entre outros). Esses estudos constataram que as áreas da cidade com maior percentual de impermeabilização apresentaram maiores valores de temperatura do ar em relação às

áreas, ainda no âmbito da cidade, que possuíam acentuado percentual de cobertura vegetal (árvores, gramas etc.).

O processo de impermeabilização da cidade através da pavimentação das ruas com asfalto tem provocado mudanças climáticas que podem interferir no comportamento social. Gouvêa (2002), ao estudar o comportamento do clima no Plano Piloto e nas Cidades Satélites do Distrito Federal, constatou que o excesso de calçamento asfáltico utilizado, mesmo em vias locais, tem aumentado a temperatura ambiente, impedindo, com isto, hábitos culturais regionais de utilização do espaço da rua em frente à casa, para conversas de fim de tarde.

Tanto a impermeabilização do solo, quanto a redução da vegetação influenciam na transformação da energia absorvida e nas trocas de calor latente, influenciadas basicamente pela redução da umidade relativa do ar.

Em Cuiabá - MT, a intensidade média da ilha de calor foi de 3,8°C no período da estação seca, com valores máximos de até 5°C, sob condições de tempo estável, céu limpo e calmaria, e de 1,8°C no período chuvoso, com valores máximos de até 2,3°C, resultados estes atribuídos ao aumento da pavimentação da superfície por asfalto e à redução da vegetação. (DUARTE & MAITELLI, 1999).

Assis (1990b) verificou que em Belo Horizonte o efeito do resfriamento das massas de vegetação urbana é muito localizado. No entanto, nos locais onde existem essas massas arbóreas, há uma significativa diminuição da amplitude térmica diária, que, na época de inverno, tende a ser mais significativa, alcançando-se temperaturas mínimas muito abaixo do limite de conforto térmico noturno previsto.

Corbella & Yannas (2003), em estudo realizado no bairro de Copacabana, Rio de Janeiro – RJ, compararam as temperaturas registradas em duas ruas perpendiculares ao mar, ambas arborizadas, verificando que os valores eram mais baixos naquela rua que continha uma maior densidade de árvores, mostrando a importância da vegetação na redução da temperatura no ambiente urbano.

Percebe-se, portanto, que as áreas com maior presença de vegetação tendem a permanecer com temperaturas mais baixas e com menor variação do que as áreas mais áridas. Apesar disso, alguns estudos (Gouvêa, 2002) indicam que os gramados (principalmente, quando secos) trazem pouca contribuição para a amenização das altas temperaturas, o que reforça a necessidade de massas arbóreas, que, além de absorverem a radiação solar, sombreiam as superfícies.

Gouvêa (2002) detectou que a performance ambiental de Brasília (Plano Piloto) na época seca quase equivale a das áreas não vegetadas das cidades satélites, apesar dos imensos gramados, que nesta época ressecam e expõem o solo. Observou-se, por exemplo, em medições de microclimas urbanos, uma diferença média de 1% de umidade relativa do ar entre o Plano Piloto e os núcleos

satélites pesquisados, evidenciando a baixa eficiência, apesar dos altos custos de manutenção destes gramados.

Vale ressaltar a importância da vegetação no sombreamento das vias de pedestre e nos espaços abertos com vistas ao conforto térmico dos transeuntes. Em relação à permeabilidade do solo, é importante a manutenção do maior percentual possível de áreas permeáveis para favorecer os processos de drenagem das águas pluviais.

Muitos estudos também identificaram a influência das características óticas das superfícies (fachadas dos edifícios, pavimentação das ruas etc.) no comportamento térmico do ambiente urbano.

No bairro de Copacabana, Rio de Janeiro – RJ, Corbella & Yannas (2003) identificaram diferenças de até 6°C entre as temperaturas medidas em pontos na Av. Atlântica (à beira-mar) e no interior do bairro. Esse comportamento foi atribuído, em grande parte, à alta densidade construída, que constitui pouca permeabilidade à infiltração dos ventos oriundos do mar; à ausência de vegetação; ao baixo fator de visão do céu; à reflexão da radiação solar pelas fachadas dos edifícios e ao asfalto negro.

Naquele bairro predominam os edifícios com fachadas envidraçadas ou revestidas com granito, mármore, argamassa ou pastilha, com cores claras, o que aumenta a reflexão das radiações para a rua. Segundo os autores, as ruas sem arborização recebem, além da radiação solar direta, a refletida.

Corbella & Yannas (2003) chamam a atenção para o fato de que, por outro lado, as cores claras das fachadas contribuem para redução dos ganhos de energia térmica pelos edifícios, reduzindo-se o consumo energético com resfriamento. Dessa maneira, para climas tropicais, a combinação de fachadas claras e a presença da vegetação parece ser a combinação ideal para reduzir os efeitos adversos da radiação solar.

A proximidade de áreas urbanas de corpos d'água (mar, rios, lagos) e a sua localização em relação ao relevo (vale ou platô, planície, sotavento ou barlavento de morros etc.), também pode refletir no comportamento térmico do ambiente urbano.

Utilizando dados coletados através de estações móveis na cidade de São Carlos – SP, Fontes (1999) analisou as variações de temperatura do ar e sua correlação com alguns parâmetros da estrutura urbana, constatando que as maiores variações climáticas estavam correlacionadas com as diferenças altimétricas entre os pontos medidos, tendo sido verificadas temperaturas mais elevadas nos pontos mais baixos da cidade, especialmente em vales.

Os locais situados em pontos mais altos, em topos de colinas e morros, permanecem com temperaturas mais baixas do que em áreas mais próximas do nível do mar. Há também diferença de temperatura entre lugares altos, dependendo da sua orientação. Os locais situados em elevações

expostas a uma menor exposição ao sol e maior exposição à incidência dos ventos dominantes mantêm-se com temperaturas mais baixas do que aqueles locais a sotavento e mais expostas ao sol, especialmente nos horários de pico.

Situação semelhante a esta foi verificada em Salvador, onde os ambientes situados em pontos mais altos da cidade e em planos de declividade orientados para a direção dos ventos predominantes mantiveram-se com temperaturas mais baixas (SAMPAIO, 1981).

Assis (1990) verificou em Belo Horizonte que as áreas de maior altitude apresentaram temperaturas mais baixas do que as situadas em vales.

Normalmente os locais próximos de corpos d'água permanecem com valores de temperatura mais estáveis e com amplitudes menores do que locais mais distantes. Também nesses locais a umidade relativa do ar é mais elevada.

Em Salvador, onde predomina a incidência dos alísios, Sampaio (1981) verificou que quanto maior as distâncias dos pontos de medição em relação ao Oceano Atlântico, maiores foram as amplitudes da curva de elevação da temperatura. Segundo a autora, isso ocorreu porque os ventos alísios vêm do oceano em direção ao continente, principalmente a partir das 9 horas da manhã, resfriando primeiro as áreas mais próximas da linha d'água e posteriormente o interior do continente, que já aquecido continua liberando calor nas horas de pico.

#### **2.2.1.2 Subsistema físico-químico**

De acordo com o modelo proposto por Monteiro (1975), no subsistema físico-químico (FIG. 2.6), o ar atmosférico composto por seus elementos básicos e secundários (impurezas) é o principal insumo, associado à circulação regional e à estrutura vertical da atmosfera geográfica local. Os processos de transformação neste sistema são extremamente complexos, dependendo dos tipos de tempo, da topografia local, das emissões (tipos de substâncias, quantidade e periodicidade etc.).

O principal produto é a poluição do ar, cujo reflexo pode ser percebido na formação de chuva ácida, no desgaste de bens móveis e imóveis (materiais) e na saúde da população, a ponto de comprometer a sobrevivência do sistema. A cidade de Cubatão - SP é um exemplo claro deste fenômeno.

As ações de controle neste subsistema podem ocorrer em duas vertentes: a previsão do tempo e estratégias anti-emissivas.

A poluição do ar é um fenômeno típico dos centros urbanos, apesar de seus efeitos poderem ser observados além dos limites das cidades ou dos lugares onde está sendo gerada, isso devido à ação do vento, que serve de veículo para o transporte de gases e partículas sólidas contidas no ar.

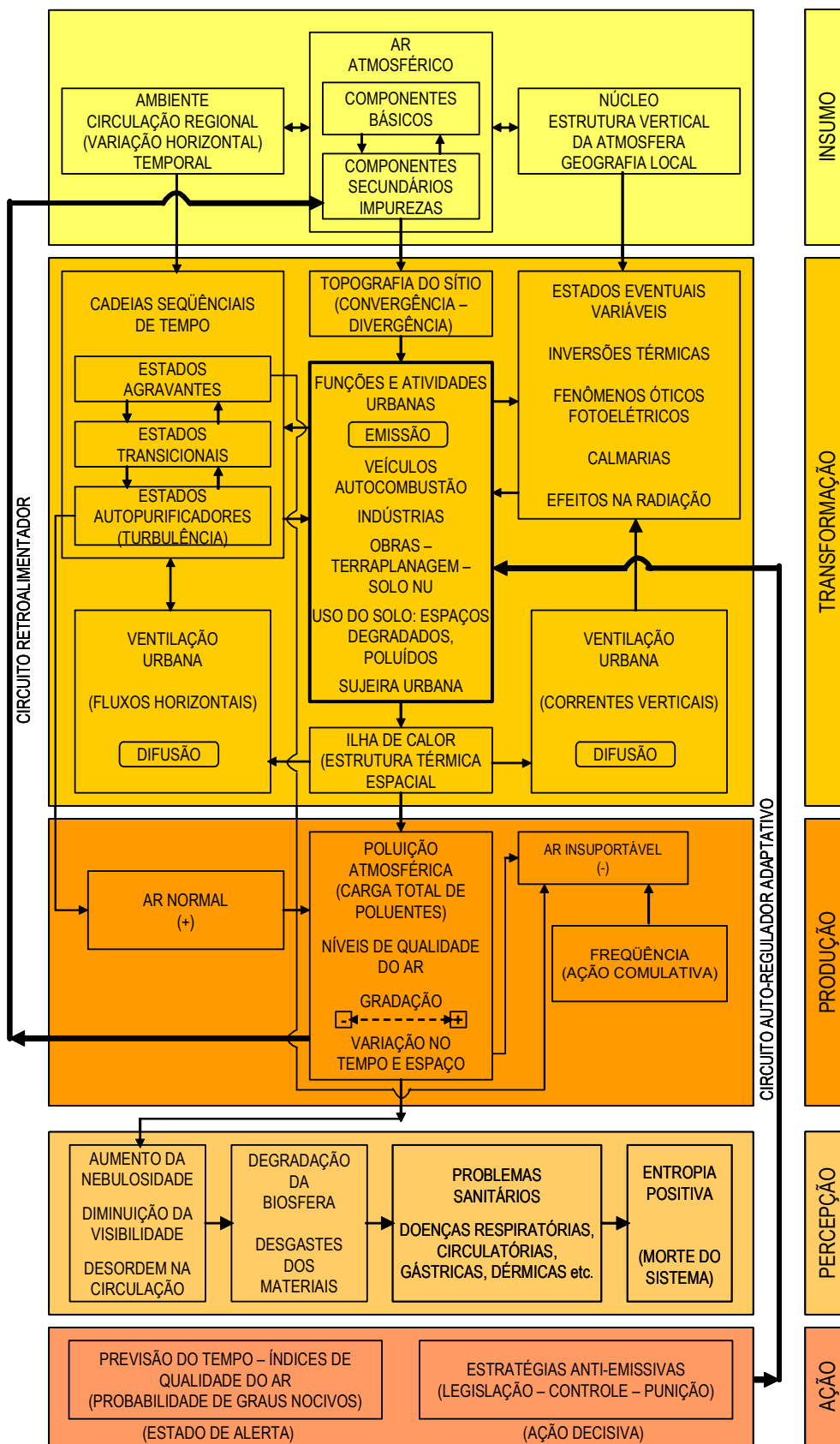


Figura 2.6: Canal perceptivo da qualidade do ar – subsistema físico-químico. Fonte: Adaptado de Monteiro (1975).



Vianello & Alves (2000) citam como exemplo os casos de poluentes oriundos da Inglaterra, que chegaram a ser registrados na Noruega, e do pânico da população europeia frente ao acidente atômico de Chernobyl. Os autores ainda dizem que, por outro lado, os movimentos convectivos naturais, que ocorrem na atmosfera terrestre, são os principais agentes transportadores de poluentes das baixas para as altas camadas atmosféricas.

Os efeitos graves da poluição atingem, na superfície da Terra, os seres humanos, animais, a vegetação, o solo, os corpos d'água e os bens materiais. Acima da superfície, na atmosfera, os poluentes têm contribuído para a destruição da camada de ozônio, expondo a Terra e a vida aqui existente a sérios riscos.

Em termos teórico-metodológicos, Spirn (1995) afirma que compreender como esses poluentes são emitidos é o primeiro passo para seu controle e dispersão. A autora classifica em três os tipos de fontes – pontual, linear e setorial – cada uma delas caracterizada pela variedade e quantidade de poluentes produzidos e pelos possíveis padrões de sua dispersão.

O planejamento da forma urbana e do seu uso e ocupação contribui para a poluição do ar nos processos de geração e de dispersão dos poluentes. Quanto ao primeiro processo, cabe ao planejador decidir pela localização da implantação das fontes poluidoras estáticas (fábricas, estações de tratamento de esgoto, usinas de lixo etc.) e dimensionar os fluxos das fontes móveis (especialmente o tráfego de veículos). Esse planejamento deve estar ciente da necessidade de se dispersar (De onde? Para onde?) os poluentes. Para tanto, a forma da cidade deve contemplar canais de dispersão que permitam o escoamento satisfatório dos ventos, sem prejudicar, claro, as áreas situadas ao longo do caminho. Daí a necessidade do conhecimento, pelos planejadores, das interações entre a forma da cidade (principalmente quanto aos fatores rugosidade e porosidade da massa construída associada ao relevo) e os padrões de vento do local. Porém, isso não elimina a necessidade urgente de se reduzirem as emissões.

Constata-se que as áreas de maior rugosidade, configurada por ruas-desfiladeiros, tendem a aprisionar os poluentes. Portanto, ignorar considerações sobre a poluição atmosférica, ao projetar cidades em locais sujeitos a freqüentes inversões ou a períodos de calmaria, é irresponsabilidade, isso porque os projetistas tendem a localizar novas indústrias, depósitos de lixo (lixões e aterros sanitários) e lagoas de estabilização, baseando-se na direção predominante dos ventos e não na direção dos ventos durante as inversões; o resultado é que, numa inversão térmica, os poluentes podem ser carregados de volta para a cidade. Para exemplificar, Landsberg (1981) identificou que, em Baltimore, 52% dos ventos sopram de sudoeste para noroeste, mas, nos períodos de estagnação, 41% dos ventos sopram do leste para sul.

Spirn (1995) faz uma extensa discussão sobre as interações entre a forma da cidade e a concentração/dispersão da poluição, chegando às seguintes conclusões:

- os episódios mais graves de poluição do ar são invariavelmente causados pelas inversões térmicas;
- os ventos determinam se os poluentes no nível da rua se dispersam e se dissipam rapidamente ou estacionam, concentrando-se em níveis perigosos. Muitas rajadas sentidas pelos pedestres da cidade são redemoinhos de massas de ar estacionário que aprisionam e concentram poluentes, ao invés de dispersá-los;
- a cidade dissipa, desvia, intensifica e gera movimentos do ar, que, se dirigidos, podem dispersar a poluição.
- qualquer técnica que reduza a velocidade do tráfego nas vias principais servirá apenas para exacerbar a poluição do ar;
- uma inversão local pela manhã pode se formar na base de uma rua-desfiladeiro sombreada, prendendo no nível da respiração a descarga dos escapamentos causada pelo tráfego das horas de maior movimento. A menos que seja dissipada pelo vento, essa inversão persistirá até que o sol do meio-dia atinja a rua e aqueça a superfície e o ar no nível do solo;
- a altura dos edifícios em relação à largura da rua deve permitir que a luz do sol atinja a rua no meio da manhã, de forma a dissipar as inversões térmicas locais no nível da rua e permitir a penetração das brisas para dispersarem e diluírem os poluentes.

Enfim, qualquer análise sobre a dispersão de poluentes na baixa troposfera necessita de amplo conhecimento da distribuição horizontal e vertical dos ventos.

Testes em túneis de vento são atualmente a maneira mais segura de prever o movimento do ar nessa escala, mas modelos computadorizados que prevêem a difusão da poluição do ar em ruas-desfiladeiro poderão facilitar essa tarefa no futuro.

A contaminação pode ocorrer pela inalação do ar, pela ingestão de água ou alimentos contaminados pelas chuvas ácidas, pelo contato da pele com o ar contaminado.

Ribeiro (2001), em pesquisa realizada com crianças de 11 a 13 anos em três cidades (Juquitiba, Osasco e Tatuapé) da Região Metropolitana de São Paulo no ano de 1986, constatou um gradiente nas taxas de prevalência de sintomas que, mais ou menos, acompanhavam o gradiente de poluição do ar (dióxido de enxofre e material particulado). Segundo a autora, a diferença entre as diversas áreas pesquisadas era mais acentuada em sintomas mais graves, como tosse sem resfriado,

chiado, catarro na maior parte dos dias (quatro dias ou mais por semana) por até três meses do ano, que indicam condições patológicas. Esses sintomas são referência para o diagnóstico médico de bronquite crônica.

A mesma relação foi evidenciada para sintomas de doenças graves, como a asma, problema cardíaco e alergia, estendendo-se para outros tipos de doenças, como infecções do ouvido e garganta.

Ribeiro (2001) ainda estudou a evolução desses casos por um período de 10 anos (1988-1998) e verificou que do primeiro estudo em 1986 até 1998 houve um crescimento assustador da prevalência de sintomas de doenças respiratórias.

Mas até as construções podem adoecer com a poluição do ar, como mostra o estudo feito por Mendes Neto (2003) na cidade do Rio de Janeiro, que observou a existência de um maior percentual de edifícios com patologias em suas estruturas de concreto armado nas regiões com maior índice de poluição do ar.

Em Curitiba, durante o inverno, Danni-Oliveira (2003) constatou as maiores concentrações das espécies de material particulado e de dióxido de nitrogênio nas áreas de tráfego mais intenso de veículos, confirmando o resultado de outros estudos realizados em outras cidades. Nesse mesmo estudo, a autora identificou que as situações em que a incidência de ventos foi menor eram mais favoráveis ao aumento dos índices das espécies monitoradas, enquanto que a incidência de chuva favoreceu, grosso modo, a remoção das espécies de material particulado e dos íons nitratos.

O tipo de poluente encontrado em cada tipo de área da cidade pode variar de acordo com o tipo de uso. Danni-Oliveira (2003) verificou que em Curitiba, no setor denominado Rodoferroviária (onde se situam as estações rodoviária e ferroviária de Curitiba), havia uma maior concentração de NO<sub>2</sub> (dióxido de nitrogênio), proveniente da emissão dos veículos. No setor industrial, a predominância encontrada foi de SO<sub>4</sub> (tetróxido de enxofre) e no setor residencial verificou-se uma maior concentração de partículas transportadas pelo vento, provavelmente oriundas de canteiros de obra.

Segura & Tela (*apud* SAMPAIO SILVA, 2001) verificaram que, devido aos avanços tecnológicos no controle de emissões pelas indústrias, as fontes móveis são responsáveis por 90% da contaminação na grande São Paulo, que atualmente possui uma frota de aproximadamente cinco milhões de veículos. O problema é mais grave no período da manhã quando se observam as calmarias e o maior fluxo de veículos (SAMPALIO SILVA, 2001).

A poluição do ar também é responsável pela formação da chuva ácida, que é responsável, em parte, pela contaminação do solo, dos corpos d'água e da deteriorização das construções e outros bens materiais expostos a sua incidência. As coletas e análises sobre o grau de alteração do pH da água de chuva, bem como a identificação e a quantificação dos principais ânions, durante 5 anos

(1986-1990), não deixa dúvidas sobre a natureza ácida da água de chuva na cidade de São Paulo, em decorrência da influência da poluição do ar (CASTRO, 2001).

É importante ressaltar que a poluição do ar interfere no sobreaquecimento da cidade, como o próprio modelo do SCU prevê, através da relação entre seus subsistemas. Neste sentido, Dines (1991), após analisar diversos trabalhos concluiu que garantir a permeabilidade ao vento no tecido urbano parece ser a forma mais efetiva de garantir a diminuição da ilha de calor e a dispersão de poluentes, especialmente em cidades de grande porte.

### **2.2.1.3 Subsistema hidrometeorológico**

Há muito já se constatou que o processo de urbanização acentua a incidência de chuvas e outras formas de precipitações (CHANDLER, 1976; LANDSBERG, 1981, entre outros).

O problema é mais grave naqueles locais onde o potencial hídrico é bastante elevado e concentrado, situação típica do clima tropical úmido, especialmente quando o processo de urbanização não respeita os processos naturais de drenagem e absorção, ocupando encostas, vales de rios e lagoas, impermeabilizando o solo e extraíndo a vegetação nativa.

De acordo Monteiro (1975), o principal insumo do subsistema hidrometeorológico (FIG. 2.7) é a chuva, que deve ser considerada segundo o seu regime de incidência (potencial, volume, intensidade e variação sazonal), assim como a organização regional da drenagem relativa ao sítio urbano (centrípeto/centrífugo).

As transformações neste sistema ocorrem sob a interferência das características de escoamento aerolar urbano, dos fatores urbanos de aumento da pluviosidade local, do uso do solo, da infra-estrutura urbana, dos fatores geomorfológicos e da estrutura da drenagem urbana.

O principal produto gerado dessa transformação são as enchentes, que acarretam deslocamento coletivo do solo, acúmulo de entulho e lixo, saturação do solo, ataque às edificações, obstrução de obras de infra-estrutura e contaminação da água potável.

Os problemas acarretados por estes produtos são percebidos através dos problemas sanitários, de abastecimento, dos transtornos na circulação urbana e nas atividades e serviços, colapso nos transportes e perdas e danos (materiais e humanos).

Para evitar tantos transtornos, as ações de planejamento e projeto urbano devem garantir a regulamentação da drenagem fluvial, a regulamentação e controle do uso do solo, a adequação das galerias pluviais, criando um programa de previsão do tempo com acionamento de estado de alerta e estratégias de emergência.

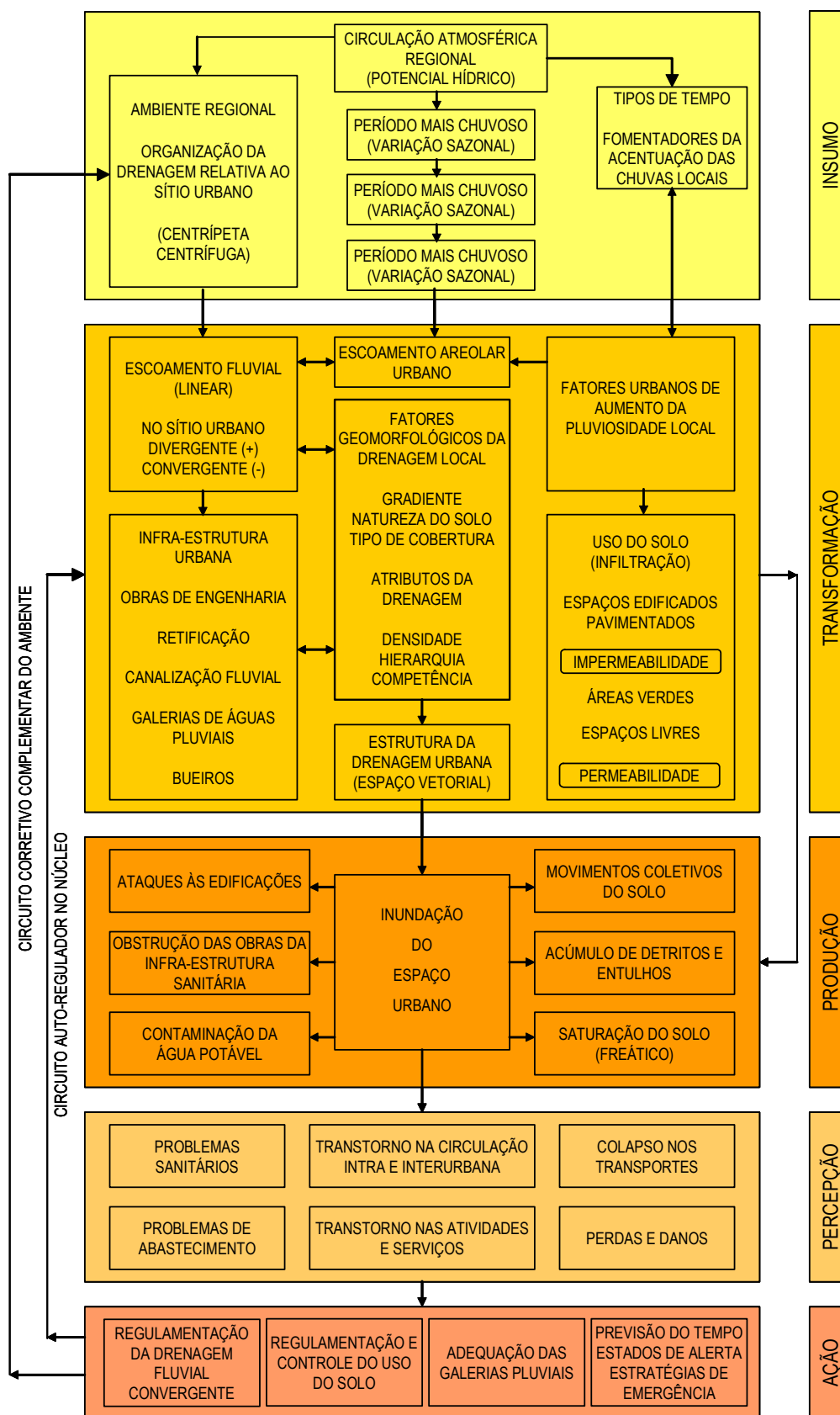


Figura 2.7: Canal perceptivo do impacto meteorológico – subsistema hidrodinâmico. Fonte: Adaptado de Monteiro (1975).

No Brasil, os estudos mais relevantes sobre este tema têm sido desenvolvidos nas cidades do Rio de Janeiro e São Paulo, onde os impactos das chuvas já trouxeram bastantes danos àquelas sociedades.

Em estudo realizado na cidade de Salvador por Gonçalves (2003), constatou-se que os eventos pluviais têm acompanhado o processo de expansão urbana, isto é, têm aumentado concomitantemente com a incorporação de novos espaços ocupados, sobretudo em áreas consideradas de risco. O trabalho também verificou que houve um aumento de 14,9% das médias pluviométricas anuais entre os anos de 1939 a 1989.

Segundo a autora, os problemas mais graves ocorridos em Salvador foram observados quando a precipitação máxima em 24 horas foi igual ou superior a 60 mm, fato comum nos meses de outono e inverno. Quando essa precipitação supera 70 mm em 24 horas, aumentam os riscos de escorregamento de solo.

Alves Filho (2001) observou comportamento semelhante ao de Salvador na Região Metropolitana de São Paulo, onde também houve o aumento concomitante das precipitações e a urbanização desde 1930. Segundo o autor, no início da década de 1990 já chovia cerca 200mm anuais a mais em relação à década de 1930. O autor também observou que a isolinha de maior pluviometria coincidia com a mancha da Região Metropolitana, reforçando a tese de que a urbanização contribui significativamente para o aumento das precipitações.

No Rio de Janeiro, Brandão (2001) constatou, a partir da análise do mapa de intensidade máxima da chuva em 24 horas, conjugada aos mapas geocológicos e uso e ocupação do solo, que os episódios pluviais de maior intensidade coincidiam com as áreas de maior ocupação urbana, de atividade industrial intensa, de densidade demográfica mais elevada, de maior concentração de favelas e loteamentos irregulares, de pior qualidade do ar e, finalmente, com a grande maioria das áreas de risco e sujeitas a inundações.

São enormes as perdas materiais e a quantidade de vítimas (feridas ou mortas) das enchentes e deslizamento de encostas, provocados pelos impactos pluviais. São comuns reportagens relatando esses fatos, mostrando a importância do problema e alertando para que o mesmo não seja tratado apenas como um evento trágico inesperado, mas como algo comum, ocorrido em grande parte das cidades, especialmente naquelas cuja ocupação desrespeitou as leis básicas da natureza.

### **2.2.2 Síntese: elementos morfológicos que condicionam o clima urbano**

Os resultados dos estudos apresentados nos itens anteriores possibilitam classificar em oito categorias os atributos da morfologia urbana que alteram o clima de um determinado local:

### a) Rugosidade e porosidade

A rugosidade é um parâmetro adimensional utilizado para distinguir diferentes categorias de terrenos (FIG. 2.8), que influenciarão diretamente no comportamento da velocidade do vento. O seu valor é tipicamente 3% da dimensão média dos obstáculos dispostos sobre a superfície da terra (SARAIVA, sem referência).

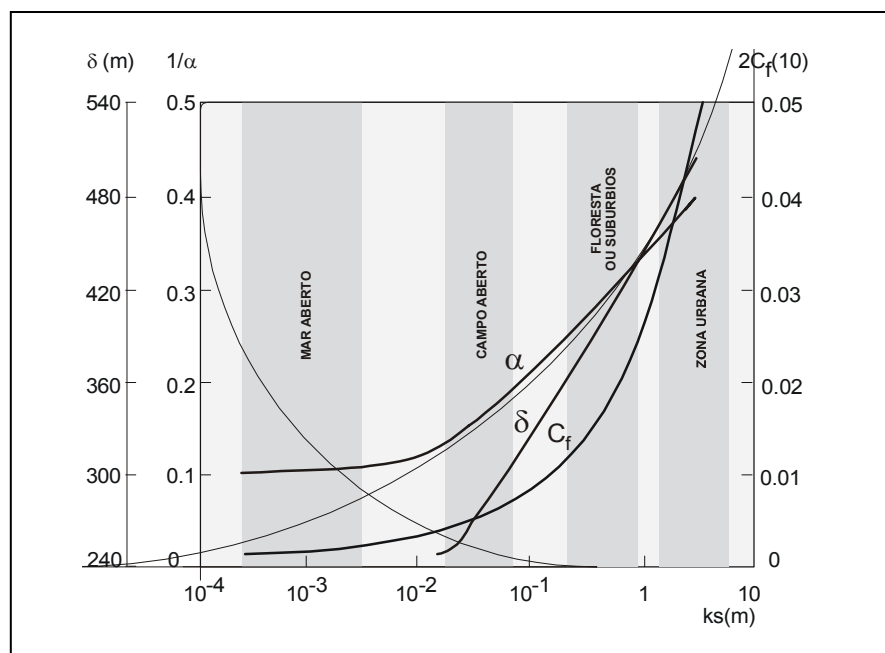


Figura 2.8: Rugosidades e coeficientes de atrito para vários tipos de terreno. Fonte: Saraiva (1983: 86).

O movimento das massas de ar é governado por três princípios básicos: a inércia, a diferença de pressão e a fricção. A superfície urbana, sendo mais rugosa do que o campo à sua volta, gera um maior atrito com as massas de ar em movimento, ocasionando a redução de sua velocidade e alterando a forma de deslocamento, que passa a ser turbilhonar (DINES, 1991).

As diferentes rugosidades se devem à morfologia da cidade, através das suas abruptas mudanças na forma, altura e orientação de edifícios e ruas-desfiladeiros. Não se deve esquecer que a topografia ou a orografia do sítio também compõem a referida rugosidade.

A orografia recebeu atenção especial em trabalhos realizados em cidades como Kassel (Alemanha), Salvador (KATZSCHENER *et alli*, 1999a) e Rio Claro (KATZSCHENER *et alli*, 1999b), ambas no Brasil.

Conforme comentado na introdução à seção 2.2, o aumento da rugosidade provoca a elevação da camada limite. Portanto, quanto maior a rugosidade menor será a velocidade do vento nas camadas mais próximas da superfície. Pelo mesmo motivo, maior será a relação entre o aumento da velocidade

do vento e a altura, ou seja, o vento atingirá maiores velocidades à medida que se distanciar da superfície até atingir o topo da camada limite atmosférica, a partir do que a velocidade do vento tende a permanecer constante (vento geostrófico).

A porosidade, definida por OLIVEIRA (1988 *apud* DINES, 1991) como a maior ou menor permeabilidade que a estrutura urbana apresenta aos ventos, pode modificar substancialmente o comportamento destes dentro da cidade. A direção e a velocidade dos ventos são rigorosamente controladas pela forma e disposição dos edifícios (afastamentos), padrão de arruamento e espaços abertos, além das condições topográficas do sítio urbano, como já foi discutido.

O controle da rugosidade e da porosidade no projeto urbano ocorre, principalmente, através dos limites de gabarito em altura e do espaçamento entre os edifícios, da forma e da orientação dos edifícios.

#### **b) Densidade de construção**

Os aspectos relacionados à forma da cidade interagem entre si na composição do clima urbano. A densidade de construção é, em geral, analisada segundo dois aspectos bastante conhecidos da legislação urbana: taxa de ocupação e coeficiente de aproveitamento. Mas a análise pode levar em consideração a relação entre o volume construído ( $m^3$ ) pela área do terreno ( $m^2$ ).

#### **c) Uso e ocupação do solo**

O elemento uso e ocupação do solo engloba os tipos de ocupação (residencial, industrial, comercial, áreas verdes, espaços abertos, mistos etc.) e os tipos de atividades que ocorrem nas diversas áreas da cidade, considerando a variação sazonal, a intensidade dos fluxos de pessoas e veículos e a produção antropogênica.

#### **d) Tamanho (extensão urbanizada e densidade populacional)**

Para Dines (1991), a relação entre a magnitude da ilha de calor e o tamanho da área urbanizada parece ser muito variável. Oliveira (1988 *apud* DINES, 1991), analisando vários autores, conclui que a relação entre o tamanho da cidade e a diferença de temperatura rural-urbana não é linear, embora seja evidente que quanto maior a estrutura urbana, maior será a alteração da superfície e a quantidade de fontes produtoras de calor.

Apesar disso, os estudos analisados até o momento não indicam correlações muito fortes entre o tamanho da cidade (extensão territorial) e as mudanças climáticas no local, não tendo sido comprovado, enfim, que cidades maiores apresentam piores ou melhores condições climáticas do que



as pequenas em função da área urbanizada. Isso dependerá do grau de influência dos outros fatores urbanos, que poderão ter maior impacto numa pequena cidade, mal planejada, do que numa maior, bem planejada.

#### **e) Orientação e geometria da malha urbana**

Oliveira (1988 *apud* DINES, 1991) indica que a orientação também é um importante elemento condicionador do clima urbano. Refere-se ao posicionamento da malha urbana em relação ao caminho aparente do Sol e aos ventos locais.

A orientação da malha urbana tem forte relação com a porosidade, determinando a permeabilidade da forma urbana aos escoamentos de vento. Da mesma maneira, a forma e a orientação dos edifícios influenciará significativamente nesse escoamento, devido ao seu efeito aerodinâmico no conjunto construído.

A geometria das ruas (relação entre a largura da rua e a altura dos edifícios) terá importância nos ganhos de radiação solar, definindo o grau de exposição das ruas e dos edifícios a tal radiação, e de sua capacidade de dispersar, para a atmosfera, a radiação infravermelha acumulada. Esse atributo é nomeado por alguns autores (OKE, 1978; SAKAMOTO, 2001; entre outros) com o termo fator de visão de céu (*sky view factor*), tendo maior influência nos espaços submetidos a um percentual elevado de calmaria, portanto, com velocidade de vento quase nula.

Há que se observar, ainda, o regime de vento local, a fim de verificar se há variação sazonal (dia-noite, meses, estações etc.) da incidência dos ventos locais, de maneira que a orientação da malha urbana possa, quando possível, permitir o melhor escoamento para as condições de maior frequência de ocorrência. Esta mesma preocupação se estende à implantação dos edifícios e à orientação de suas aberturas.

#### **f) Permeabilidade do solo**

Das alterações causadas pela urbanização na superfície terrestre, a impermeabilização do solo possivelmente seja uma das mais graves, principalmente para as regiões mais úmidas, visto que impedem a absorção das águas da chuva, obstruindo a realimentação dos lençóis freáticos, e aceleram o processo de escoamento, contribuindo para o ressecamento do ar, diminuindo, conseqüentemente, as perdas de calor pelo processo evaporativo.

Além disso, – e também devido às falhas dos projetos de drenagem urbana – a impermeabilização excessiva da superfície urbana contribui significativa para as enchentes, causando diversos transtornos à sociedade, como danos materiais e mortes.

A permeabilidade do solo é controlada pelo tipo de material que reveste a superfície e pela taxa de área permeável, normalmente previstas nos códigos e normas de construção.

**g) Propriedades termodinâmicas dos materiais e das superfícies**

A energia radiante emitida pelo Sol só se transforma em energia calorífica após absorvida pela Terra e pelas construções. A quantidade de energia absorvida dependerá do coeficiente de absorção das superfícies (ligada ao albedo) que compõem o ambiente construído e natural do espaço urbano; e a emissão de energia dependerá de maior emissividade. Além da reflexão, outras propriedades dos materiais, como massa específica, condutividade, calor específico, difusividade e efusividade, terão importância significativa para as trocas térmicas entre a terra e o ar.

**h) Localização (em relação a corpos d'água e ao relevo)**

A distância em relação a corpos d'água significativos, a altitude e a posição de uma cidade ou parte dela em relação às fâceis de morros, montanhas ou colinas, são outros elementos que podem significar diferenças substanciais de temperatura e de exposição à contaminação do ar e a impactos pluviais mais (ou menos) nocivos.

Os estudos indicam que a proximidade de corpos d'água favorecem a manutenção de temperaturas mais estáveis, ou seja, com menor amplitude diária.

Setores urbanos com alto índice de produção de poluentes não devem ser implantados em vales, visto que tal situação dificulta a dispersão de tal produto pelo vento, contribuindo, assim, para o acometimento de doenças respiratórias, para a formação de ilha de calor e para o aumento do volume de chuvas no local, entre outros problemas já comentados.

---

O entendimento dos fenômenos típicos do sistema clima urbano, especialmente o dos relacionados ao subsistema termodinâmico – que terá maior atenção neste trabalho –, depende do conhecimento dos processos físicos de trocas térmicas entre o ambiente construído e a atmosfera que o envolve. Este conhecimento é tema do próximo capítulo.

# **Capítulo 3**

## **Trocas Térmicas, Efeitos Físicos do Vento e Repercussões sobre o Conforto Térmico**

---

### 3.1 Trocas térmicas no ambiente urbano

Faz-se necessário conhecer como ocorrem as trocas térmicas entre a cidade e a atmosfera acima dela, e entre os usuários e o ambiente urbano que o circunda. Existem dois tipos de trocas térmicas: as secas e as úmidas. As primeiras envolvem variações de temperatura, ocorrendo através dos fenômenos físicos conhecidos por radiação, condução e convecção. As segundas ocorrem basicamente pelos processos de evaporação e condensação.

A taxa de ganhos ou perdas de calor pelo ambiente urbano depende de um conjunto de fatores, quais sejam:

- características climáticas (latitude, altitude, regime de ventos, radiação solar, orografia, continentalidade etc.);
- diferença de temperatura entre as camadas inferior e superior da atmosfera;
- diferença de temperatura entre o ar exterior, os elementos urbanos e as pessoas;
- forma urbana (geometria, localização, orientação – ao sol e aos ventos –, rugosidade, porosidade e densidade construída);
- características óticas das superfícies;
- uso e ocupação do solo;
- atividades cotidianas.

A *radiação* é o mecanismo de troca de calor entre dois corpos – que guardem entre si qualquer distância – através da sua capacidade de emitir e de absorver energia radiante.

Enquanto a condução e a convecção necessitam de um meio material para ocorrerem, a radiação não exige matéria; por isso pode ocorrer no vácuo. Este é o processo pelo qual o Sol aquece a Terra.

Quando a energia radiante incide sobre um corpo, uma parte dela é refletida, outra é absorvida e uma terceira é transmitida (se o corpo for transparente). A parcela de energia que aumenta a temperatura do corpo é a absorvida.

As propriedades óticas que caracterizam as superfícies dos materiais são:

- absorvância ( $\alpha$ ): capacidade de absorver a radiação incidente;
- refletividade ( $\rho$ ): capacidade de refletir a radiação incidente;
- transmissividade ( $\tau$ ): capacidade de deixar passar através de si a radiação incidente.

Estas três propriedades estão relacionadas através do seguinte balanço de energia radiante:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad \text{Eq.3}$$

Note-se que se a superfície é opaca ( $\tau = 0$ ) ter-se-á:

$$\tau = 1 \quad \text{Eq. 4}$$

deixando, assim, passar toda a energia recebida. Já as opacas ( $\tau = 0$ ) têm valores simétricos:

$$\alpha = 1 - \rho \quad \text{Eq. 5}$$

A capacidade de refletir ou de absorver energia está, portanto, condicionada pelas características óticas da superfície do sólido. As superfícies mais polidas e/ou claras têm maior capacidade de reflexão, ao passo que as superfícies rugosas e/ou escuras absorvem mais radiação.

A quantidade de calor absorvida por uma superfície real pode ser dada em função da radiação global incidente (H) e da absorvidade da superfície ( $\alpha$ ), em função do comprimento de onda:

$$Q_r = \alpha H \quad \text{Eq. 6}$$

Esta energia absorvida aumenta a temperatura do corpo, cuja superfície emitirá mais radiação, pois

$$E \text{ (emitido)} = \varepsilon \sigma T^4 \quad \text{Eq. 7}$$

sendo:

$\sigma$  - constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ );

$\varepsilon$  - emissividade da superfície considerada;

T – temperatura absoluta da superfície ( $K = ^\circ\text{C} + 273$ ).

A emissividade é a propriedade que mostra quão eficiente uma superfície emite radiação em comparação com uma superfície ideal (superfície negra).

Por outro lado, o saldo da troca de calor radiante entre dois corpos pode ser representado, grosso modo, por

$$Q_r = \sigma F (\varepsilon_1 A_1 T_1^4 - \varepsilon_2 A_2 T_2^4) \quad \text{Eq. 8}$$

Onde F é o fator de forma, que leva em conta a distância e a posição relativa das superfícies consideradas.

As trocas térmicas por *condução* são o processo pelo qual a energia se propaga através da matéria, de lugares de temperatura maior para lugares de temperatura menor, sem o movimento de partículas ao longo do corpo.

Esse processo é representado pela equação:

$$Q_R = \frac{\lambda A (t_1 - t_2)}{l} \quad \text{Eq. 9}$$

sendo:

A = área transversal através da qual o calor flui, tomada perpendicularmente à direção do fluxo, em m<sup>2</sup>;

l = espessura, ou seja, o comprimento da propagação de calor, em m;

$\lambda$  = condutividade, propriedade do material, medida como o fluxo de calor através de uma unidade de área com uma diferença de temperatura unitária entre dois pontos afastados de uma distância unitária;

t<sub>1</sub> = temperatura exterior, temperatura superficial exterior;

t<sub>2</sub> = temperatura interior, temperatura superficial interna.

A condutividade do material depende de outras propriedades:

- densidade – a matéria é sempre muito mais condutora que o ar contido nos poros;
- natureza química – os materiais amorfos são geralmente menos condutores que os cristalinos;
- umidade – a água é mais condutora que o ar;

A *convecção* ocorre através da troca de calor entre dois corpos, sendo um deles sólido e o outro, fluido (líquido ou gás). Assim, a energia é transportada nos fluidos dos lugares de temperatura maior para os lugares de temperatura menor, estabelecendo-se correntes de ar, que, na cidade e em suas edificações, ocorrem através da ação do vento (convecção forçada) ou por diferença de

densidade do ar, retirando ou cedendo calor (energia térmica) às superfícies. Essas trocas por convecção geram taxas de calor, cuja intensidade, em *watt*, é:

$$Q_c = A \cdot h_c(t-\theta) \quad \text{Eq. 10}$$

Esse processo é condicionado por três aspectos:

- a)  $A$  = área de contato ( $m^2$ ) entre o fluido e uma superfície;
- b)  $t-\theta$  = diferença de temperatura, em graus Celsius, entre o fluido e a superfície, podendo a temperatura do fluido ( $t$ ) ser maior ou menor do que a temperatura da superfície do corpo ( $\theta$ );
- c)  $h_c$  = coeficiente de trocas térmicas por convecção, expresso em  $W/m^2\text{°C}$ , que depende, principalmente, da velocidade da massa de ar.

As trocas térmicas nos trópicos que acontecem nas superfícies, para cálculos práticos, consideram uma resistência térmica superficial que engloba as transferências de calor por radiação e convecção (em  $W/m^2$ ) em conjunto, utilizando-se um coeficiente que representa a resistência das superfícies, tomando em consideração, tanto a radiação, quanto a convecção, dependendo do sentido do fluxo de energia (vertical ou horizontal) e da emissividade da superfície (alta ou baixa).

Este cálculo pode ser feito através de uma fórmula simples, dividindo-se a diferença de temperatura entre os corpos pela resistência térmica superficial.

As trocas térmicas por evaporação dependem muito da umidade relativa do ar e da velocidade do vento, através da convecção. A evaporação ocorre quando o calor latente transforma em vapor a água contida no ar ou em um corpo. Ao evaporar, esse vapor carrega consigo parte do calor contido no corpo. Tal processo poderá ser potencializado com o aumento da convecção, especialmente em locais muito úmidos.

O fenômeno da condensação, embora pouco comum nas regiões com clima quente-seco, deve ser considerado, pois a sua ocorrência pode trazer danos à qualidade do ar no interior das edificações, originando o bolor. Quando se diminui a temperatura do ar, progressivamente, a umidade absoluta permanece constante, ao passo que a umidade relativa do ar se eleva até que uma certa quantidade de vapor passa ao estado líquido. A temperatura a partir da qual ocorre esse fenômeno é chamada de temperatura de orvalho.

No ambiente urbano essas trocas térmicas ocorrem de maneira complexa, requerendo a

compreensão de outras propriedades físicas dos materiais, como a inércia, explicada pelos conceitos de difusividade e efusividade.

A *inércia* refere-se à capacidade de um corpo permanecer no estado em que se encontra. Um ambiente com forte inércia térmica tem a capacidade de permanecer com temperatura estável por uma maior quantidade de tempo. Se a média da temperatura estiver com pequenas variações (amplitude) e numa determinada zona de conforto, o ambiente estará confortável termicamente.

A difusividade explica como os materiais difundem a energia térmica e a efusividade o quanto estes a acumulam. Ambas dependem da condutividade térmica ( $\lambda$ ) (definida anteriormente, neste capítulo), da massa específica ( $m$ ) e do calor específico ( $c$ ) do material considerado (CORBELLA & YANNAS, 2003).

Interessam a condutividade e o calor específico volumétrico ( $\mu = m.c$ ) – calor que, fornecido a um volume unitário de um material, aumenta a sua temperatura em 1°C. Combinando-se essas variáveis obtém-se a difusividade como quociente da condutividade pelo calor específico volumétrico ( $a = \lambda/\mu$ ) e a efusividade como a raiz quadrada do produto entre a condutividade e calor específico volumétrico ( $b = \sqrt{\lambda.\mu}$ ).

A difusividade mostra como se difunde o calor, sendo proporcional à velocidade de propagação de uma onda de calor dentro de um corpo. Assim, quanto maior a difusividade, maior será a velocidade de propagação da onda térmica. No ambiente urbano, quando as fachadas dos edifícios, o piso e outros elementos urbanos possuem difusividade grande, a radiação térmica absorvida é transportada rapidamente para o interior dos edifícios. Porém, a difusividade não diz o quanto de energia térmica é acumulado pelo material (CORBELLA & YANNAS, 2003).

Um ambiente urbano, cuja estrutura tenha grande efusividade, em caso de elevação da temperatura do ar, roubará muita energia desse ar. Como consequência, a temperatura ambiente não aumentará tanto. Ao contrário, quando a temperatura do ar diminui, a energia térmica acumulada é devolvida para o ar, aquecendo-o.

Isso explica, em parte, o fenômeno ilha de calor, a ser discutido no próximo capítulo. Durante a noite, naqueles ambientes urbanos pouco ventilados e com pequeno fator de visão do céu, a energia devolvida pelas edificações ao ambiente permanecerá aquecendo o ar por um período mais longo. Ao contrário, as áreas ventiladas e menos densas dissipam essa energia para a atmosfera com maior rapidez. Assim, um ambiente externo com grande efusividade nos materiais que o limitam, situados em cidades de clima quente, poderá aumentar o consumo de energia pelos edifícios para resfriá-los e aumentar a temperatura de uma ilha de calor.



Com base nesses fenômenos e propriedades físicas, pode-se verificar o quanto as características das superfícies influenciam nas trocas térmicas da cidade com a atmosfera acima dela e, conseqüentemente, como pode influenciar também no consumo de energia, seja para o resfriamento ou aquecimento do ar no interior das edificações.

Deve-se ter em mente, ainda, que a cidade também produz calor, dissipado pelos equipamentos instalados nos edifícios, veículos motorizados, sistema de iluminação artificial e pelo metabolismo e atividade dos usuários. Este calor pode ser absorvido pela estrutura da cidade, caso a temperatura do ar esteja maior do que a da estrutura, ou somado à radiação térmica emitida pela estrutura urbana, caso a temperatura do ar esteja mais baixa. A velocidade com que essas trocas acontecem depende, fundamentalmente, das características físicas do edifício e das condições climáticas do local. O comportamento da cidade frente a essas condições é o que configurará o seu desempenho térmico.

### **3.2 Movimento do ar (vento)**

Os ventos são regidos pelas diferenças de temperatura da superfície da Terra, gerando diferenças de pressão que provocam o deslocamento das massas de ar. Esses movimentos de ar podem ocorrer horizontal e verticalmente. No sentido horizontal, o movimento se deve às diferenças de temperatura ao longo da superfície da terra, condicionada às condições de exposição à radiação solar e ao acúmulo de energia térmica ao longo do dia: vale/montanha, cidade/campo, mar/continente.

Na vertical, o movimento ocorre em função das diferenças de temperatura em altura dentro da camada inferior da atmosfera (troposfera) produzida pelo aquecimento do ar em contato com a superfície do solo (como já se faz notar, a atmosfera aquece de baixo para cima). Está associado à circulação geral da atmosfera, em que o ar é aquecido no equador, subindo e se deslocando em direção aos pólos, neste trajeto o ar é resfriado, tendendo a descer e retornar ao equador, onde é novamente aquecido, tornando a subir.

Para o entendimento da circulação do ar nos níveis mais baixos da atmosfera, faz-se necessário compreender o conceito de camada limite, como ela está dividida e de que maneiras as circulações de ar ocorrem dentro de seus limites.

Vianello & Alves (2000) consideram pelo menos duas camadas distintas, onde os escoamentos possuem características próprias. A primeira – camada limite planetária (ou camada limite atmosférica) – estende-se da superfície do solo até, no máximo, 2 a 3 quilômetros de altura, possuindo em torno de 10% da massa da atmosfera. Essa altura, no entanto, é discutível, pois depende das condições de

escoamento do vento geostrófico e, principalmente, da rugosidade do solo. Acima dela inicia-se a camada conhecida como atmosfera livre, onde as forças viscosas se anulam e o escoamento não sofre os efeitos do atrito provocado pela rugosidade do solo.

A este trabalho interessa a compreensão do comportamento dos escoamentos na camada limite atmosférica (CLA), por ser nela onde se desenvolvem as atividades humanas, cujas características, especialmente no âmbito urbano, estão condicionadas à morfologia da cidade.

Na CLA, devido à força de atrito, a velocidade do ar diminui ao se aproximar da superfície da Terra, onde o perfil de velocidade inicia-se com velocidade igual a zero e se acelera exponencialmente ao se distanciar dessa superfície. Esse perfil de velocidade depende, além da rugosidade do solo, do gradiente de temperatura em relação à superfície, do módulo da velocidade do ar, da umidade relativa do ar e da pressão atmosférica.

Gandemer & Guyot (1981) apresentam um modelo logarítmico que descreve a variação da velocidade média do vento com a altura e a rugosidade do solo, caso essa persista por alguns quilômetros consecutivos, assim descrito:

$$U_z = k \times U_{ref} \times \ln Z/Z_0 = C_z \times U_{ref} \quad \text{Eq. 11}$$

sendo:

$U_z$  = velocidade média à altura  $z$ , em m/s;

$U_{ref}$  = Velocidade média de referência (normalmente medida a 10m de altura em estações climatológicas);

$k$  = coeficiente em função da rugosidade da superfície (TAB. 3.1);

$Z$  = altura requerida, em m;

$Z_0$  = parâmetro de rugosidade segundo a classe de rugosidade (TAB. 3.1);

$C_z$  = coeficiente de altura e rugosidade ( $C_z = k \times \ln Z / Z_0$ )

A rugosidade da superfície é classificada em cinco classes (TAB. 3.1), a partir das quais são definidas as variáveis  $k$  e  $Z_0$ , apresentadas no modelo:

- Classe 1: oceano, grande lago;
- Classe 2: campo plano e sem obstrução (onde normalmente estão instaladas as estações meteorológicas);
- Classe 3: periferias e subúrbios;

- Classe 4: zona urbana com adensamento médio;
- Classe 5: centro de grandes cidades muito adensados.

Tabela 3.1: Valores de k e  $Z_0$ .

| CLASSE DE RUGOSIDADE | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| k                    | 0,005 | 0,07  | 0,03  | 1     | 2,5   |
| $Z_0$                | 0,166 | 0,202 | 0,234 | 0,266 | 0,292 |

Fonte: Gandemer & Guyot (1981).

No caso de vento com baixas velocidades, são mais importantes as circulações verticais das massas de ar, induzidas por efeitos térmicos localizados. É nesse contexto, dentro da estrutura de aquecimento e resfriamento em seu ciclo diário, que surge o fenômeno de inversão, importante, especialmente, para o conhecimento dos processos de dispersão de poluentes e da conservação (ou dispersão) da ilha de calor urbana.

Por fim, apresenta-se a classificação de Beaufort (TAB. 3.2) para os tipos de vento baseada na sua velocidade de deslocamento. Essa classificação também descreve os fenômenos observados quando os ventos sopram em determinadas velocidades.

Tabela 3.2: Classificação Beaufort dos tipos de vento baseada em sua velocidade de deslocamento.

| ESCALA | VENTO               | VELOCIDADE (m/s) | VELOCIDADE (Km/h) | FENÔMENOS OBSERVADOS   |
|--------|---------------------|------------------|-------------------|--|
| 0      | Calmaria            | 0 a 0,2          | 0 a 0,7           | A fumaça (chaminé, cigarro) sobe de forma vertical.  |
| 1      | Aragem leve         | 0,3 a 1,5        | 0,1 a 5,4         | O vento faz a fumaça se inclinar, mas ainda não consegue girar um cata-vento.  |
| 2      | Brisa leve          | 1,6 a 3,3        | 5,7 a 11,9        | A pessoa percebe o vento no rosto, as folhas das árvores e o cata-vento começam a se mexer.                                |
| 3      | Vento suave         | 3,4 a 5,4        | 12,2 a 19,4       | As folhas e os pequenos ramos das árvores se mexem de forma contínua e o vento faz as bandeiras se mexerem.                |
| 4      | Vento moderado      | 5,5 a 7,9        | 19,8 a 28,4       | O vento tira a poeira do chão e levanta as folhas de papel.  |
| 5      | Vento médio         | 8,0 a 10,7       | 28,8 a 38,5       | As pequenas árvores começam a se mexer e a formar espuma nas ondinhas dos lagos.   |
| 6      | Vento forte         | 10,8 a 13,8      | 38,8 a 49,7       | Os fios elétricos começam a se mexer e fica muito difícil usar um guarda-chuva.  |
| 7      | Vento fortíssimo    | 13,9 a 17,1      | 50,0 a 61,5       | As árvores ficam completamente agitadas e fica muito difícil andar de frente para o vento.                                 |
| 8      | Ventania forte      | 17,2 a 20,7      | 61,9 a 74,5       | Os pequenos ramos das árvores se quebram e não se pode andar normalmente, sem um esforço terrível, de frente para o vento. |
| 9      | Ventania fortíssima | 20,8 a 24,4      | 74,8 a 87,8       | As telhas dos telhados começam a ser arrancadas, bem como outros pequenos danos com relação à casa.                        |
| 10     | Furacão             | 24,5 a 28,4      | 88,2 a 102,2      | Normalmente só acontece no mar. Quando ocorre na terra, pode arrancar árvores pela raiz.                                   |

Fonte: Gandemer & Guyot (1981).

### 3.3 Escoamentos em torno de edifícios

O escoamento do vento em torno dos edifícios é ditado, essencialmente, pelas características do vento incidente (perfil de velocidade), pela direção de incidência e pela geometria do edifício. Sendo assim, pode apresentar algumas particularidades dependendo do caso em observação, significando que podem apresentar características diferentes quando alguma das condições mencionadas acima for modificada.

Para efeitos de entendimento, será descrito de maneira simplificada o escoamento em torno de uma forma prismática, apoiada no solo, imersa numa camada limite que se aproxima perpendicularmente a sua maior face (FIG. 3.1). Neste exemplo, podem-se observar os dois mecanismos básicos que podem induzir velocidades elevadas ao nível do chão.

Segundo Blassmann (1983),

O primeiro mecanismo está relacionado ao forte escoamento descendente que se verifica na fachada a barlavento devido aos significativos gradientes de pressão estática sobre a superfície (pressão positiva), diretamente associada à pressão dinâmica do escoamento não perturbado aos níveis correspondentes, e que apresenta o máximo no ponto de estagnação, tipicamente localizado a cerca de 2/3 da altura do corpo. Este escoamento forma um vórtice intenso junto ao solo, sendo chamado de vórtice de pé de fachada, que vai contornar as arestas e ser estirado para jusante pelo escoamento médio, dando, por sua vez, origem a dois efeitos significativos: uma clara aceleração do escoamento nos cantos e um agravamento da chamada pressão de base, pressão sensivelmente uniforme e negativa que se distribui de forma aproximadamente constante sobre toda a face de sotavento, devido ao aumento de vorticidade verificada.

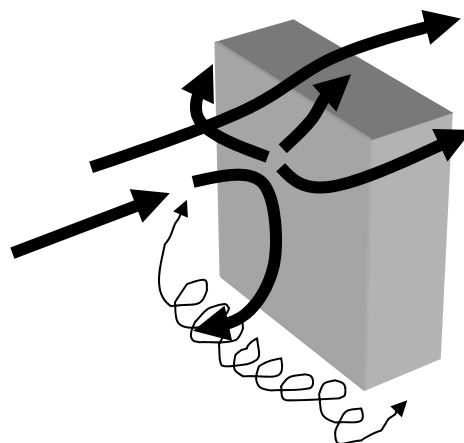


Figura 3.1: Escoamento em torno de uma forma prismática.  
Fonte: Blassmann (1983).

Note-se que no caso de edifícios de formas arredondadas a capacidade do escoamento os contornar sem separação nítida, como acontece no caso de existência de arestas (formas prismáticas), leva a que este tipo de estrutura do escoamento tenha uma importância mais reduzida, podendo

mesmo não se manifestar. Por outro lado, a existência de edifícios a montante, com alturas menores, pode agravar drasticamente este tipo de fenômeno.

O segundo mecanismo tem origem no diferencial de pressões entre as faces a sotavento e a barlavento ou mesmo laterais (sucção), que podem promover – dadas as reduzidas distâncias (eventuais significativos gradientes de pressão) – escoamentos de elevada velocidade em arcadas e comunicações abertas.

### **3.4 Efeitos físicos do vento**

A interação entre o vento e a forma da cidade gera alguns efeitos que devem ser controlados a fim de se evitarem possíveis desconfortos e insegurança, especialmente, aos pedestres. Estes efeitos dependem, portanto, da velocidade e direção dos ventos incidentes, da geometria da malha urbana e da forma e orientação dos edifícios.

Gandemer & Guyot (1976) classificam e demonstram diversos tipos de efeitos aerodinâmicos provocados pela interação edifícios/vento.

Por ter sido desenvolvido na Europa, o estudo realizado pelos referidos autores teve uma maior preocupação em evitar excessos de velocidade dos ventos fortes e frios europeus. No entanto, para a realidade dos trópicos úmidos, a preocupação deve ser em favorecer a ventilação, acelerando-a quando possível, objetivando o resfriamento do ambiente, através da intensificação dos processos convectivos e de evaporação. Essa aceleração, obviamente, deve se limitar em níveis que não causem perturbações excessivas, a ponto de provocar a insegurança e desconforto dos pedestres e possíveis acidentes.

Dos efeitos demonstrados pelos autores, os mais freqüentes são: barreira, de união de pressão diferente, de pilotis, de canto, de canalização e de turbilhão na base dos edifícios. Na maioria dos casos, em climas quente-úmidos, os efeitos de canalização e de pilotis devem ser privilegiados, enquanto os demais evitados, embora o efeito de canto possa ser provocado de maneira moderada, desde que colabore na aceleração e na propagação da ventilação numa determinada área urbana.

A seguir descreve-se com maior detalhe o comportamento desses efeitos:

#### **a) Efeito barreira**

Pode ocorrer quando há um edifício laminar, paralelepipedal, de espessura relativamente estreita (10m), de altura homogênea, não excedente a 25m, e de comprimento mínimo igual a oito vezes a altura (FIG. 3.2).

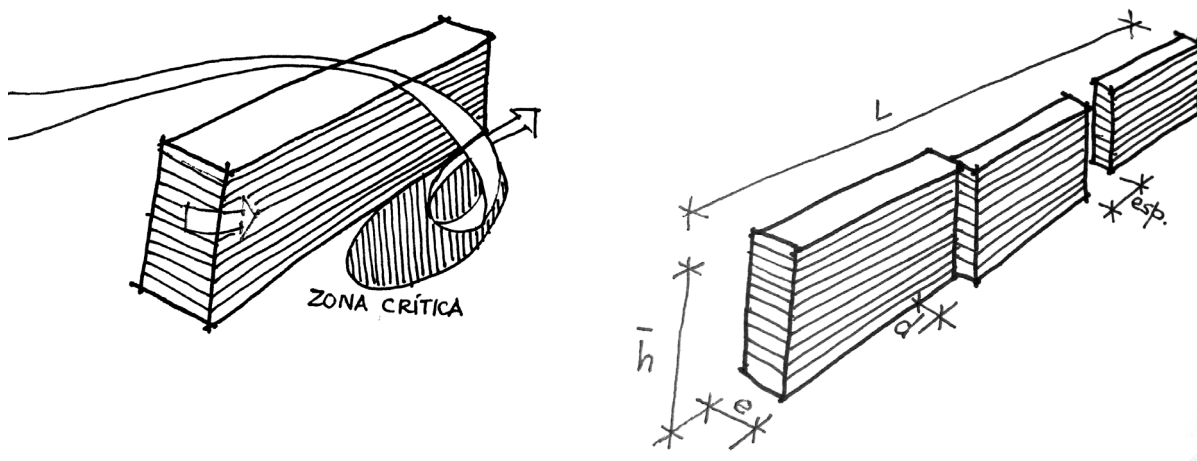


Figura 3.2: Efeito barreira.  
 Fonte: Adaptado de Gandemer & Guyot (1976).

Ocorre quando o vento incide sobre tal edificação a aproximadamente  $45^\circ$ , escoando em forma de espiral na parte posterior do edifício. Segundo Gandemer & Guyot (1976), este efeito pode ser evitado se a construção tiver comprimento menor que oito vezes a sua altura. Quando não for possível, o comprimento do edifício deve ser dividido em quantas partes forem necessárias. Essas partes devem ser afastadas a uma distância mínima de duas vezes a altura da edificação.

**b) Efeito união de zonas com pressões diferentes**

O efeito de união de pressões diferentes ocorre quando os edifícios estão dispostos ortogonalmente à direção dos ventos e, a quincunce, as massas de ar de pressões diferentes se interligam transversalmente, surgindo então os fluxos de ar no sentido das pressões decrescentes (FIG. 3.3).

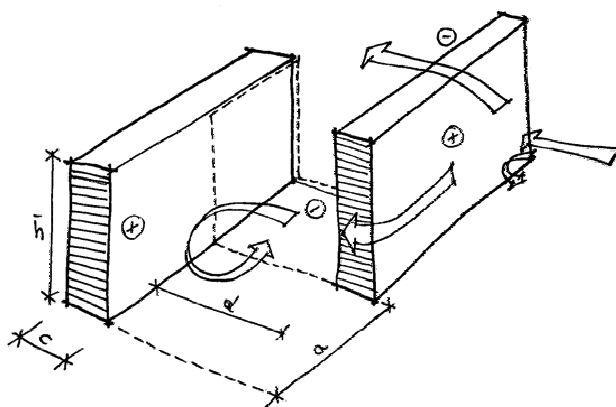


Figura 3.3: Efeito de união de pressões diferentes.  
 Fonte: Adaptado de Gandemer & Guyot (1976).

Para que este efeito ocorra são necessárias algumas condições:

- a altura ( $h$ ) do edifício deve ser menor ou igual a 15m;
- ter a distância entre os edifícios ( $d$ ) menor ou igual à altura dos edifícios ( $d \leq h$ );
- deslocamento ( $a$ ) do alinhamento dos edifícios maior ou igual à altura deles ( $a \geq h$ );
- para edifícios com altura superior a 100m, a distância entre eles deverá ser igual a um quarto da largura ( $c$ ) do edifício ( $d = h/4$ ).

Para evitar este tipo de efeito deve-se:

- limitar o escoamento nos corredores de ligação, através de obstáculos;
- evitar recortes na construção virada ao vento, adotando espaçamentos no mínimo iguais à altura dos edifícios;
- adotar edificações menores do que 15m de altura;
- aumentar o afastamento entre os edifícios para no mínimo a altura deles, evitando-se os corredores estreitos.

### c) Efeito das aberturas sob as edificações ou efeito pilotis

Caracteriza-se pelo escoamento através de passagens sob as edificações, interligando as áreas de pressão positiva e negativa (FIG. 3.4). Para que este efeito ocorra, é necessário que a altura do edifício seja superior a 15m.

Os pilotis de forma plena funcionam como guias ao vento, já as passagens sob a edificação são mais sensíveis à direção do vento incidente.

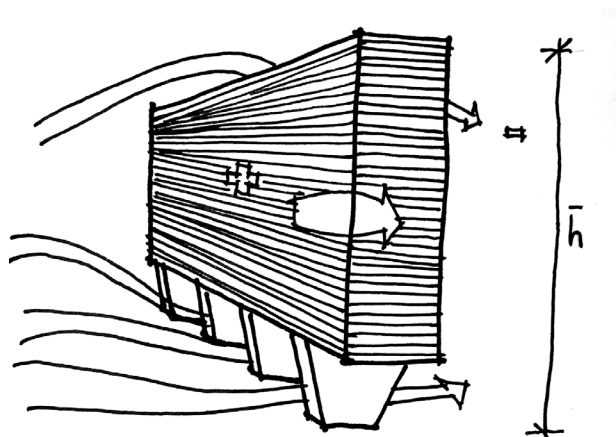


Figura 3.4: Efeito das aberturas sob as edificações ou efeito pilotis.

Fonte: Adaptado de Gandemer & Guyot (1976).

Quanto maior a altura da edificação, maior será a velocidade do escoamento sobre ele. A entrada do ar é difusa, mas a saída é localizada, e a zona de turbulência se estende por uma área equivalente à largura do edifício.

Quando se desejar evitar este efeito, deve-se orientar as aberturas ou pilotis paralelamente à direção do vento incidente. No caso da necessidade de apenas reduzir a velocidade, podem-se criar barreiras com vegetação na base da edificação.

#### d) Efeito de canto

Esse efeito resulta da união dos ângulos do edifício formado por fachadas em pressão e sucção (FIG. 3.5). O efeito aumenta com a altura do edifício e no caso de conjunto compacto de edificações.

Para que isso ocorra, os edifícios isolados devem ter uma altura superior a 15m, ou no caso de um conjunto de edifícios, altura superior a 30m.

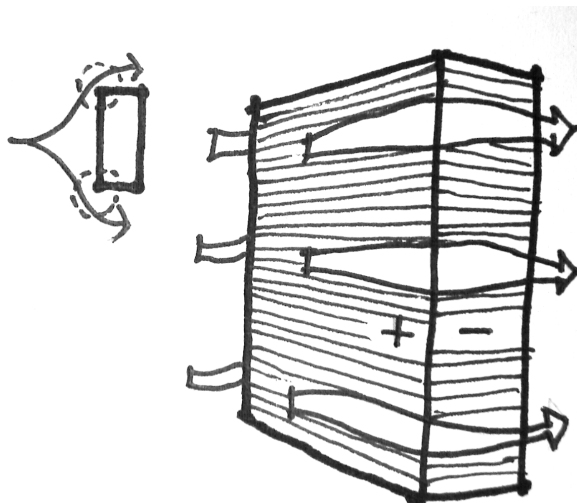


Figura 3.5: Efeito de canto.  
Fonte: Adaptado de Gandemer & Guyot (1976).

A aceleração do vento provocada por este efeito na base do edifício pode se tornar bastante desconfortável e perigosa aos pedestres, podendo provocar o tombo de pessoas mais frágeis.

Para evitá-lo, deve-se:

- diminuir progressivamente as alturas dos edifícios;
- provocar ângulos arredondados nas arestas dos edifícios;
- colocar elementos porosos nas esquinas;
- densificar, com vegetação ou construções mais baixas, a região junto às esquinas.



### e) Efeito de canalização

O fenômeno de canalização do vento é produzido de maneira significativa quando o corredor formado por edifícios ou árvores enfileiradas é bem definido e relativamente estreito (FIG. 3.6). Neste caso, a largura do corredor deve ser menor do que duas vezes a altura dos edifícios ( $d < 2h$ ), o espaçamento lateral entre os edifícios deve ser menor ou igual à largura deles e a altura, maior ou igual a 6m.

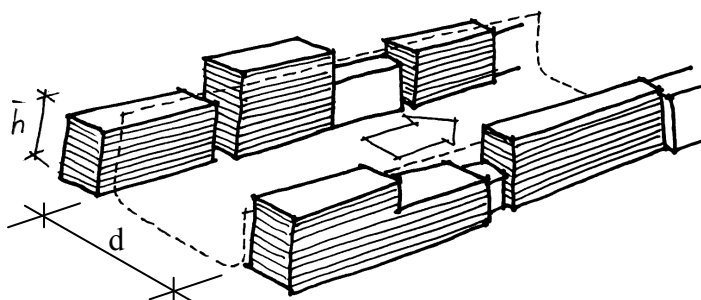


Figura 3.6: Efeito de canalização.  
Fonte: Adaptado de Gandemer & Guyot (1976).

Na maioria das vezes esse efeito não é nocivo ao ambiente urbano, a não ser quando associado ao efeito Venturi, causando o afunilamento do escoamento, provocando excessivamente o seu aceleração ao final do canal. Caso seja necessário, para evitá-lo, deve-se orientar as ruas numa direção sob a incidência dos ventos na direção compreendida entre  $90^\circ$  e  $45^\circ$ , mantendo os afastamentos laterais entre os edifícios e o afastamento frontal com dimensões duas vezes maior do que a altura dos edifícios.

### f) Efeito de turbilhão na base dos edifícios – efeito Wise

Em edifícios de mais de 05 andares, o vento que incide frontalmente na fachada exposta produz uma divisão de ação de alta pressão, provocando a formação de um rolo turbulento ao pé do edifício (FIG. 3.1).

O escoamento é condicionado pelo gradiente vertical da velocidade média do vento e o efeito é reforçado quando existe uma edificação mais baixa ( $10m < h < 15m$ ) na frente, chamado de efeito *Wise*.

Para evitar o efeito de turbilhão devem-se adensar as vizinhanças, introduzir alpendres ou marquises deflectoras, introduzir porosidade acima do nível do pedestre e evitar o efeito *Wise* (FIG. 3.7).

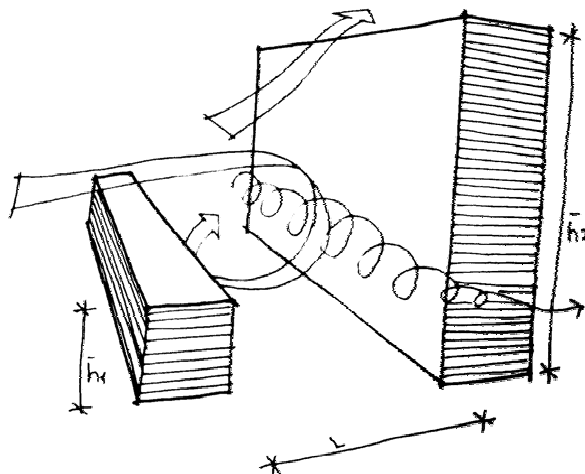


Figura 3.7: Efeito de turbilhão na base dos edifícios – efeito Wise.  
Fonte: Adaptado de Gandemer & Guyot (1976).

No âmbito do espaço urbano, com a distribuição espacial dos edifícios, esses efeitos podem ocorrer de maneira combinada ou potencializados pela morfologia adotada. Por exemplo, o efeito barreira pode ser agravado se as ruas orientadas perpendicularmente à incidência dos ventos forem estreitas, formando *canyons*, pois impedirá que o vento retire os poluentes e o calor acumulado naquele recinto (FIG. 3.8). Ao contrário, se conjugado com ruas largas, há a possibilidade de os espirais de vento formados pelo efeito retirarem as partículas depositadas nas camadas inferiores entre os edifícios (FIG. 3.9).

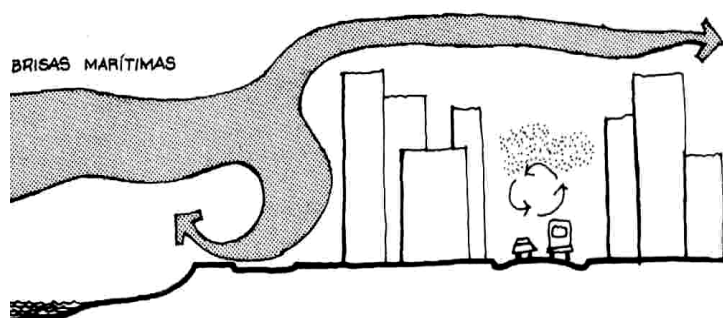


Figura 3.8: Efeito barreira conjugado com rua estreita.  
Fonte: Adaptado de Romero (2000).

É importante considerar que a distribuição das edificações não deve ter em consideração apenas a sua relação com os escoamentos do vento. A incidência da radiação solar é outro fator tão (ou mais) importante quanto à ventilação, quando se trata de conforto térmico no ambiente urbano e nas edificações, especialmente em cidades com clima quente-úmido.

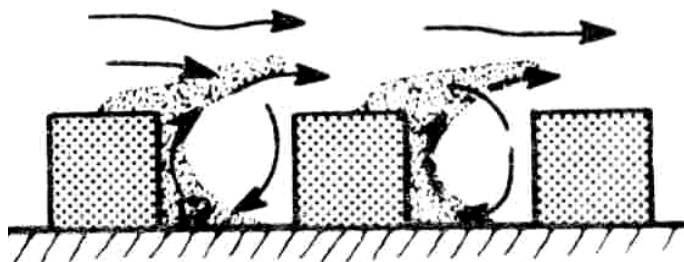


Figura 3.9: Efeito barreira conjugado com ruas largas.  
Fonte: Oke (1978).

Desta maneira, o modelo ideal de geometria da malha urbana, especialmente no que se refere à relação entre a largura e a altura dos edifícios, ainda está por ser estudada. Entretanto, com base nos estudos apresentados neste trabalho, tudo indica que em cidades de clima quente-úmido essa relação deve proporcionar a menor exposição à radiação solar e, ao mesmo tempo, uma ventilação abundante, sem, claro, provocar grandes perdas de iluminação natural no interior das edificações, nem perturbações provocadas por efeitos aerodinâmicos que causam desconforto e insegurança.

### 3.5 Conforto térmico no espaço urbano

O desempenho térmico das cidades está condicionado ao conforto térmico dos usuários da cidade, haja visto que se deve buscar, através do projeto urbano, garantir a manutenção de um certo intervalo de temperatura ambiente, admitindo-se pequenas amplitudes, propiciando, assim, conforto aos seus usuários.

Conforto térmico é, assim, um estado em que o indivíduo nem sente frio, nem calor, refletindo a satisfação com o ambiente térmico que o envolve. Se o balanço de todas as trocas a que é submetido o corpo humano for nulo e a temperatura da pele e a secreção do suor estiverem dentro de certos limites, pode-se dizer que o usuário estará termicamente confortável. Esse balanço dependerá de diversos fatores, sejam estes físicos (temperatura e velocidade do ar, temperatura radiante, umidade relativa do ar) ou de comportamento (aclimatação, hábito alimentar, altura, peso, vestimenta, idade e sexo dos indivíduos).

A preocupação em relacionar as condições climáticas com o conforto térmico iniciou-se de maneira mais sistemática em 1950 com os irmãos Victor e Aladar Olgay. Logo em seguida, Victor Olgay publica o livro *Design with climate* (1963). Neste mesmo momento, os referidos irmãos criaram a primeira carta bioclimática – um diagrama termo-higrotérmico –, que apresentava as necessidades de conforto para habitantes dos EUA, com vestuário caseiro e atividade ligeiramente sedentária, em locais com altitudes inferiores a 300m e latitudes de 40°. Para situações de menor latitude, necessitava-

se corrigir os valores de temperatura à medida que a latitude diminuía à proporção de 0,5°C para cada 4° de latitude (OLGYAY, 1963).

A carta de Olgay indica também a necessidade de ventilação, sombreamento e radiação solar que permitem alcançar a situação de conforto térmico (OLGYAY, 1963).

De lá para cá, inúmeras pesquisas vêm sendo desenvolvidas e as mais marcantes, que se transformaram em teorias, são até hoje reverenciadas e utilizadas. Algumas delas são objeto de estudo para novas reformulações e adequações às novas realidades científicas.

Um desses estudos corresponde ao aperfeiçoamento da carta de Olgay, realizado por Givoni (1969), que percebeu a possibilidade de haver diferenças significativas entre as temperaturas interiores e exteriores devido à inércia térmica da envolvente do edifício. Desta maneira, Givoni, com o auxílio de Milne, determinou os limites de eficácia das diversas medidas arquitetônicas e construtivas em que se traduzem as estratégias bioclimáticas que, até então, tinham sido apenas identificadas. Essas definições permitiram analisar de que forma a envolvente do edifício, dadas as suas características físicas, interfere na temperatura interior. Para isso, Givoni utilizou a carta psicrométrica, cujo modelo hoje é utilizado pela ASHRAE (1977).

Outro estudo muito importante para a área de conforto ambiental refere-se à criação da equação de conforto por Fanger em 1973, que calcula a combinação das variáveis: temperatura do ar, temperatura média radiante, velocidade do ar, umidade relativa, nível de atividade e resistência térmica do vestuário. O princípio do modelo proposto por Fanger é o de que, quando qualquer combinação dessas seis variáveis atender às condições de conforto térmico, a maioria das pessoas estará em situação de neutralidade térmica, portanto, com a sensação térmica confortável.

A quantificação do conforto necessária para se estabelecerem os índices representados nas cartas bioclimáticas foi, inicialmente, realizada em câmaras climáticas, onde uma amostra superior a 1300 pessoas era exposta a diversas situações de temperatura, umidade e velocidade do ar, desenvolvendo uma atividade sedentária e com vestimenta leve. A quantificação foi feita através do voto médio estimado – PMV (do inglês, *Predicted Mean Vote*) – que representa a sensação térmica média declarada pelas pessoas em determinado ambiente, podendo ser representativa para o grupo, desde que não haja diferenças significativas. Após determinado, o PMV serve para calcular o PPD – percentagem de pessoas insatisfeitas (do inglês, *Predicted Percentage of Dissatisfied*).

Como os estudos de conforto em câmaras climatizadas consideravam o regime permanente, em que as variáveis climáticas não variavam, alguns pesquisadores começaram a questionar os índices obtidos dessas pesquisas, alegando que os resultados não representavam a realidade, que possuía um regime variável, em que os parâmetros ambientais estavam constantemente em mutação.

Desta maneira, o corpo humano reage diferentemente de uma situação para outra, de maneira que a sensibilidade do corpo numa situação de clima estacionária e uniforme se comporta de maneira diferente numa situação de regime variável (PATRÍCIO *et al.*, 1997).

Neste sentido, destacaram-se os estudos de Humphreys & Nicol (*apud* PATRÍCIO *et al.*, 1997), por criarem um modelo adaptado, o qual considera que “o indivíduo não reage passivamente ao ambiente térmico em que se insere, mas são agentes ativos que, com base na sua sensação térmica, tentam interagir com o ambiente, modificando-o ou alterando os seus próprios hábitos (vestuário, atividade)”.

Além dessas limitações identificadas por Humphreys e Nicol, como já foi mencionado anteriormente, deve-se ressaltar o fato de que os índices térmicos só podem ser adotados para os locais para os quais foram definidos. Isto pôde ser comprovado por Araújo (1996) que, após definir os índices de conforto térmico para usuários de edificações escolares na cidade de Natal – RN, comparou-os com outros índices mais utilizados no Brasil, quais sejam: *índice de temperatura efetiva*, *diagrama de conforto térmico de Olgyay*, *Carta Bioclimática de Givoni*, *diagrama de conforto de Fanger* e o *índice da temperatura efetiva padrão*<sup>3</sup>. A pesquisa constatou, à exceção do índice de temperatura efetiva, a inadequação dos demais índices para o caso estudado. As principais diferenças entre o índice definido pela autora e os demais tiveram como influência significativa a umidade relativa do ar e a ventilação.

Os índices de conforto até então propostos são muito restritivos; representam um universo bastante específico, cujas variáveis envolvidas são em pequena quantidade e relativamente mais fáceis de serem controladas, de maneira que uma enquete aplicada a uma amostra possa ser representativa. Dessa maneira, é mais fácil obter um índice de conforto para ambientes internos e climatizados onde as pessoas que o habitam possuem características semelhantes em termos de idade, atividade, regime alimentar e vestimenta, como é o caso de escritórios.

No edifício também é possível prever a possibilidade de intervenção do usuário no sentido de alterar alguns elementos da construção, objetivando um melhor condicionamento térmico, como o controle do funcionamento do aparelho de ar condicionado e o posicionamento de brises e cortinas que protegem as aberturas da radiação solar direta.

Em relação aos espaços abertos, apesar dos inúmeros trabalhos que buscaram quantificar e compreender a intensidade das ilhas de calor e da poluição do ar, ainda não há estudos mais aprimorados no sentido de se mensurar o conforto térmico dos usuários que ali transitam. As dificuldades são tanto ou maiores do que as percebidas no interior dos edifícios, sendo as principais a

---

<sup>3</sup> Para se obterem mais detalhes sobre os índices de conforto mencionados devem-se consultar as referências indicadas, visto que uma síntese de cada uma, por mais extensa, seria incompleta.

mobilidade dos usuários, a grande quantidade de variáveis envolvidas, a carência de instrumentos, a imaturidade metodológica, a carência de ferramentas eficientes para aquisição de dados, a dificuldade de controle das variáveis, entre outros.

Além disso, a única possibilidade (e bastante limitada) que o usuário possui de adequar o espaço às condições ideais de conforto é se proteger, utilizando guarda-sol ou chapéu, alterando o tipo de roupa, utilizando óculos escuros ou abanando-se, o que na maioria das vezes não é suficiente.

Estudos mais avançados têm se dedicado em compreender o campo da ação do vento sobre o pedestre e a influência desta sobre o seu conforto e segurança. Auxiliados por ensaios em túnel de vento, estes estudos revelaram como a ocupação do solo urbano pelos edifícios influenciam o escoamento das correntes de ar no interior da cidade, alterando a sua velocidade, temperatura, fluxo (turbulento ou laminar) e camada limite, podendo, dependendo das circunstâncias, criar algumas zonas críticas onde se podem formar ilhas de calor e concentrações de poluentes, e aceleração excessiva da velocidade do vento em outras.

O excesso ou a carência de velocidade do vento pode acarretar diversos e graves problemas no âmbito da cidade, ocasionando desconforto térmico, concentração ou dispersão inadequada de poluentes, rajadas que desloquem as pessoas (desconforto físico), além de afetar, em alguns casos, a estabilidade das construções e de árvores.

Segundo Spirn (1995),

rajadas de vento e calma, redemoinhos e pés-de-vento podem ocorrer simultaneamente dentro de algumas dezenas de metros um do outro ou de um segundo para o outro no mesmo lugar, como resultado da interação das mudanças nas direções e velocidades do vento regional com a superfície topográfica, da aerodinâmica das formas dos edifícios, do tamanho e forma dos espaços livres em seu entorno e da forma da cidade acima.

Neste item trata-se com mais atenção dos efeitos negativos do vento, principalmente, sobre o conforto e a segurança dos pedestres, já que os efeitos sobre a formação da ilha de calor e a poluição do ar já foram comentados anteriormente.

O conforto humano associado ao vento pode ser tomado sob dois aspectos distintos: o concernente ao conforto/desconforto causado pelo vento (principalmente térmico) e o relativo ao perigo potencial que este pode representar para as pessoas, dependendo das circunstâncias.

A preocupação com o aspecto de segurança de pedestres submetidos a rajadas de vento ocorreu a partir da década de 1970, por meio de observações de situações de desconforto e acidente verificadas em espaços urbanos, especialmente em locais próximos de edifícios altos. Inicialmente verificaram que rajadas (U) na ordem de 20m/s a dois metros de altura podiam fazer tombar uma

peessoa. Essa velocidade não é constante, trata-se de uma rajada que toma o pedestre de surpresa, sem que o mesmo tenha tempo para reagir e se proteger.

A primeira aproximação de critérios de conforto chegou a seguinte escala de valores:

- para  $U = 5\text{m/s}$  – início de desconforto
- para  $U = 10\text{m/s}$  – claramente desconfortável
- para  $U = 20\text{m/s}$  – perigoso

A partir daí outros estudos chegaram a fazer uma adaptação da escala de Beaufort (TAB. 3.2, p.46), por esta se tratar de uma escala linear de “forças do vento”, basicamente pressões dinâmicas do escoamento médio. Ela também oferece uma descrição dos efeitos do vento sobre as pessoas (SARAIVA, 1994).

Um outro critério, desenvolvido por Davenport e Ysyumov (1975 *apud* SARAIVA, 1994), leva em consideração a atividade humana a ser desenvolvida, o local, a frequência dos ventos mais fortes e a cota altimétrica de cálculo ou medições. Esse critério é válido para temperaturas superiores a  $10^{\circ}\text{C}$ , e o estudo a partir do qual se obtiveram tais resultados foi feito no Canadá, podendo não ser representativo para outras condições. A utilização desse critério consiste em tomar a frequência de uma determinada velocidade do vento e deduzir, considerados o local e a atividade desenvolvida, se as condições de conforto relativo ao vento são perceptíveis, toleráveis, desagradáveis e/ou perigosas (TAB. 3.3). Os valores indicados na tabela referem-se à escala de Beaufort.

Tabela 3.3: Tentativa de critério de conforto para ação do vento.

| ATIVIDADE                                   | ÁREA DE APLICAÇÃO                     | CONFORTO RELATIVO |                             |                          |                      |
|---|---------------------------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------|----------------------|
|   |                                       | PERCEPTÍVEL       | TOLERÁVEL                   | DESAGRADÁVEL             | PERIGOSO             |
| Caminhando rápido                           | Calçadas, passeios                    | 5                 | 6                           | 7                        | 8                    |
| Passeando, patinando                        | Parques, entradas, pista de patinação | 4                 | 5                           | 6                        | 8                    |
| De pé, sentado – com pouca exposição        | Parques e praças                      | 3                 | 4                           | 5                        | 8                    |
| De pé, sentado – com muita exposição        | Restaurantes abertos, anfiteatro      | 2                 | 3                           | 4                        | 8                    |
| Critério representativo para aceitabilidade |                                       |                   | <1<br>ocorrência/<br>Semana | <1<br>ocorrência/<br>mês | <1<br>ocorrência/ano |

Obs: Os números indicados referem-se à escala de Beaufort, que tem os valores de velocidade do vento relacionados na TAB. 3.2, p.46.

Fonte: DAVENPORT & YSYUMOV, 1975 *apud* SARAIVA, 1994 (Adaptado).

Na TAB. 3.4 apresenta-se uma outra adaptação com os limites de velocidade e suas respectivas freqüências de ocorrência e critérios de julgamento.

Tabela 3.4: Critério de conforto.

| $U_e$ | Critério de conforto          |
|-------|-------------------------------|
| 5m/s  | Limite de conforto            |
| 10m/s | Desempenho afetado            |
| 15m/s | Controle do caminhar afetado  |
| 20m/s | Perigoso para pessoas frágeis |

Fonte: GONÇALVES DA SILVA (1999).

GONÇALVES DA SILVA (1999) afirma que os estudos se ampliaram envolvendo centenas de pessoas submetidas a diferentes condições de vento em túneis aerodinâmicos, dos quais se obtiveram demonstrações da importância da velocidade média do vento e das rajadas, de maneira que critérios mais recentes são baseados numa velocidade efetiva ( $U_e$ ), que, simultaneamente, combina o efeito das velocidades médias com o das rajadas, conforme demonstra a equação:

$$U_e = U^* \left( 1 + k \frac{\sigma}{U} \right) \quad \text{Eq. 12}$$

onde:

$U_e$  = velocidade efetiva

$U^*$  = velocidade média de referência;

$\sigma$  = desvio padrão das flutuações da velocidade

$k$  = constante que mede a importância das flutuações.

A maioria dos autores aponta para  $k = 3$ , significando, basicamente, que são valores máximos de rajada que controlam as condições de conforto e de segurança, mas que, em vez do valor de pico ( $k = 3,5$ ), pode-se tomar um valor médio dos máximos de rajada em dez minutos ou, equivalentemente, uma velocidade média em 2 ou 3 segundos.

O critério mais correntemente referido na bibliografia considera os dados descritos da TAB. 3.5. Tais dados indicam a freqüência máxima aceitável para as velocidades de rajada em cada modalidade de ambiente, considerando as atividades e/ou a permanência em cada modalidade.



Tabela 3.5: Relação entre a velocidade de rajadas de vento e sua ação sobre as pessoas.

| Velocidade de rajada | Frequência ultrapassada | Crítérios de julgamento  |
|----------------------|-------------------------|--|
| < 6m/s               | -                       | Inexistem problemas de conforto do vento   |
| > 6m/s               | Máx. 5%                 | Admitidos em parques, lugares de espera, cafés de rua e em parques de recreio                            |
| > 6m/s<br>> 15m/s    | Máx. 20%<br>Máx. 0,05%  | Admitidos em áreas de curta permanência (critério menos forte), ou seja, que são transpostas com rapidez |
| > 8m/s               | Máx. 1%                 | Permitido em áreas com lugares para sentar e esperar   |
| > 10m/s              | Máx. 1%                 | Permitido em áreas para outro tempo de permanência (critério severo)                                     |
| > 13m/s              | Máx. 1%                 | Admitido em esquinas de edifícios<br>Admitido para caminhar sem problemas                                |
| > 13m/s              | > 1%                    | Desagradável e incômodo abrigo de proteção contra o vento  |
| > 18m/s              | > 1%                    | Perigo   |

Fonte: Lohmeyer *et al.* (1992) *apud* WIRTSCHAFTSMINISTERIUM Baden-Württemberg, 1998.

Por fim, considera-se o critério térmico (FIG. 3.10 e 3.11), que intervém, essencialmente, na sensação de desagradado, baseando-se na noção de uma temperatura equivalente do ar, resultante da temperatura, sem vento, combinada com a velocidade do vento (GONÇALVES DA SILVA, 1999).

Esse critério, por ter sido desenvolvido na Europa, não pode ser aplicado nas condições que se verificam em climas quente-úmidos, dadas as condições de temperatura e umidade relativa do ar e da exposição à radiação solar. Assim, as temperaturas às quais os habitantes de locais de clima quente-úmido estão expostos podem atingir patamares mais elevados com velocidades de vento menores.

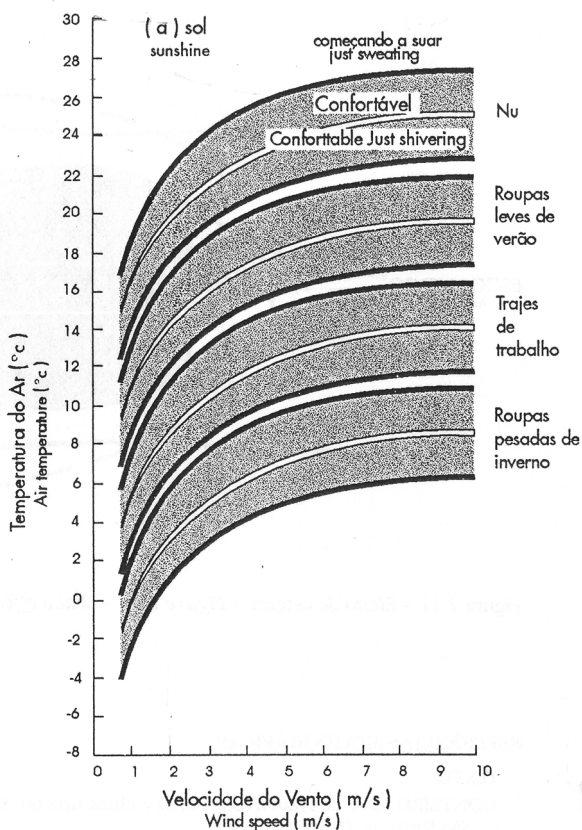


Figura 3.10: Gráfico de conforto – ao Sol.  
Fonte: Penwarden (1973 *apud* MASCARÓ, 1996)

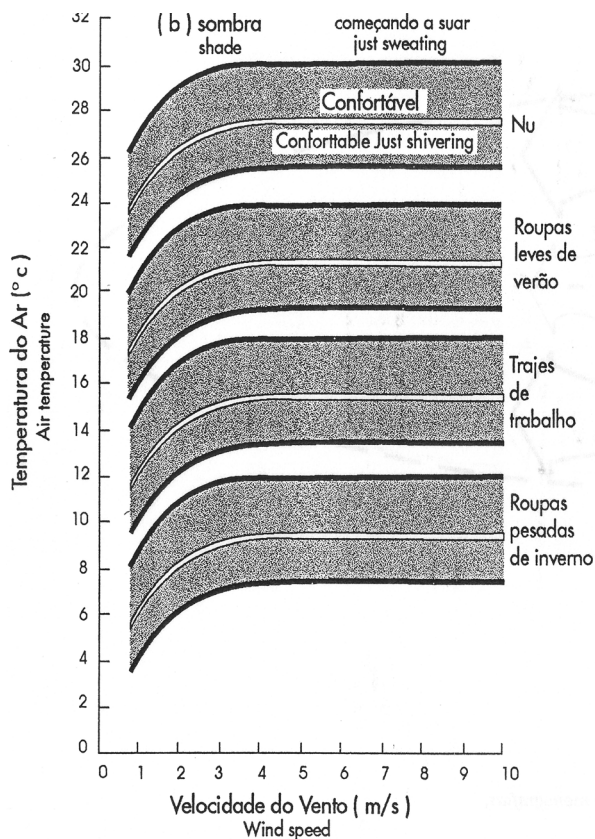


Figura 3.11: Gráfico de conforto – à sombra.  
Fonte: Penwarden (1973 *apud* MASCARÓ, 1996)

# **Capítulo 4**

## **Metodologia para a Análise das Interações entre a Forma Urbana e o Clima**

---

A teoria do SCU de Monteiro (1975), a metodologia de avaliação das ações do vento no planejamento da ocupação do solo (GONÇALVES DA SILVA, 1999) e as análises estatísticas de correlação e regressão constituem a base conceitual que orientou a construção da metodologia desenvolvida nesta pesquisa, sendo específica para a abordagem do clima urbano a partir da fragmentação da cidade em partes homogêneas ou não.

Na primeira parte deste capítulo foi descrita a estrutura da metodologia. Na seqüência, são descritos e discutidos os métodos e técnicas utilizados na metodologia.

#### **4.1 Estrutura metodológica**

A metodologia desenvolvida nesta tese está estruturada em oito etapas de trabalho, conforme roteiro apresentado na Figura 4.1, passando a ser descritas a seguir:

##### **4.1.1 Primeira etapa – definição do subsistema a ser focado**

O sistema clima urbano (SCU) pressupõe um nível de resolução geral, que é o próprio clima da cidade, mas admite também níveis intermediários de resolução que caracterizam os subsistemas nele contidos (MONTEIRO, 1975, p. 41). Assim, esta etapa consiste na definição do subsistema (do SCU) a ser focado (termodinâmico, físico-químico ou hidrometeorológico), envolvendo o conhecimento geográfico prévio da cidade. Uma cidade poderá apresentar problemas relacionados a um, dois ou aos três subsistemas referidos.

Como mencionado anteriormente, para ser validada, a metodologia apresentada neste trabalho foi aplicada à cidade de João Pessoa, situada no litoral nordestino brasileiro, onde foi focado apenas o subsistema termodinâmico.

##### **4.1.2 Segunda etapa – caracterização do local geográfico**

Esta etapa consiste em realizar o tratamento de dados para a produção do mapa de orografia, do mapa de rugosidade, dos mapas de índices urbanísticos e de parâmetros climatológicos para a área trabalhada.

Como a metodologia foi aplicada à cidade de João Pessoa, esses produtos foram aproveitados de estudos antecedentes e atualizados conforme a necessidade. O mapa de orografia e o Atlas de vento foram obtidos de Gonçalves da Silva (1999). Os parâmetros climatológicos (normais climatológicas, ano climático de referência e dias típicos) foram obtidos de Carvalho (2001). Estes trabalhos descrevem detalhadamente os procedimentos para a produção dessas informações.



Os mapas de rugosidade foram produzidos a partir do cruzamento do mapa de orografia com os mapas de índices urbanísticos obtidos junto à Prefeitura Municipal de João Pessoa e atualizados através de levantamentos em campo.

Por fim, foram confeccionados mapas de uso do solo, de taxa de ocupação e de índice de aproveitamento, constituindo-se a cartografia do local geográfico.

#### **4.1.3 Terceira etapa – Delimitação da área de estudo**

Esta etapa destina-se à delimitação e descrição da área estudada, que pode ser a cidade inteira ou uma porção dela. Neste caso, optou-se por estudar uma porção da cidade de João Pessoa, que compreende parte dos bairros de Cabo Branco e Tambaú, descrita detalhadamente no próximo capítulo.

Resultaram desta delimitação, a produção, na escala 1:5000, das plantas de gabarito em altura, de uso do solo, de taxa de ocupação e de índice de aproveitamento, específicos para a área delimitada (ver Apêndice A). Todas as plantas foram plotadas em cores sobre folhas de acetato transparente, de maneira que fosse possível a sua sobreposição durante o processo de análise.

Para as plantas de taxa de ocupação e índice de aproveitamento, os cálculos foram feitos por quadra, para o que foi elaborada uma escala numérica e cromática para melhor visualização, expressa numa legenda posicionada ao lado de cada planta. Para a planta de gabarito em altura foi atribuída uma cor para cada unidade de pavimento que o edifício possui.

Para a planta de uso do solo, cada edificação foi pintada com uma cor legendada, correspondente ao tipo de uso que abrigava, assim classificados: residencial, comercial, entidades sem fins lucrativos, industrial, área verde e praças, uso misto, serviços, templos religiosos, órgãos públicos e lotes desocupados.

#### **4.1.4 Quarta etapa – Experimentos em túnel aerodinâmico**

Esta etapa destinou-se à confecção de maquetes da área de estudo (com base no mapa de orografia e de gabarito) e aos ensaios em túnel aerodinâmico de camada limite atmosférica, e subdividiu-se em quatro fases:

##### **Fase 1: Confecção das maquetes**

Para a aplicação da metodologia à cidade de João Pessoa as maquetes necessárias à realização dos ensaios no túnel aerodinâmico foram confeccionadas sob uma base de madeira (compensado) com 4mm de espessura correspondente à primeira cota do relevo do local (5m). O

relevo, nas demais cotas, foi modelado em placas de poliuretano revestidas, em seguida, com massa acrílica. Os edifícios foram confeccionados em madeira (compensado MDF) e colados à base.

A escala utilizada para a maquete foi a de 1:750, atingindo as dimensões de aproximadamente 1,20m x 2,20m, compatível com a veia do túnel aerodinâmico utilizado, considerando aí uma distância mínima de 30cm da maquete em relação à parede do túnel, espaço necessário para que o escoamento sob o qual a maquete ficaria imersa tivesse velocidade uniforme.

## **Fase 2: Ensaios de erosão de areia**

Para a realização dos experimentos no túnel aerodinâmico utilizou-se a técnica de erosão de areia (JANEIRO BORGES & SARAIVA, 1980).

Foram realizados oito ensaios de erosão de areia e oito de camada limite atmosférica, dos quais apenas os representativos da ocupação do solo existente no local à época desta pesquisa interessou aos propósitos deste trabalho. Os outros ensaios se destinaram aos objetivos de outros trabalhos (PEREGRINO, 2005; QUEIROGA, 2005; GUERRA, 2005).

Os ensaios de erosão de areia foram realizados considerando um modelo físico representativo da ocupação do solo existente na área estudada em maio de 2004. Eles foram realizados para duas direções de vento incidente, 150° e 90°. Neste trabalho, as figuras de erosão produzidas com o vento a 150° – dominante no local, segundo o Atlas de Vento produzido por GONÇALVES DA SILVA (1999) – foram utilizadas para a seleção dos pontos que compuseram o transecto percorrido para as medições das variáveis climáticas, e para que, junto com as figuras produzidas com escoamento a 90°, auxiliassem na análise do comportamento térmico da área em estudo.

Em cada ensaio a maquete foi coberta por uma camada fina de areia (granulometria 50 – peneira da série ASTM –, equivalente a 0,3mm de diâmetro) e submetida a diversas velocidades de escoamento, que variaram de 8,0 m/s (quando se iniciava a saltação da areia) a 16,0 (limite de segurança do túnel utilizado)<sup>4</sup>.

O tempo médio entre o início da saltação da areia e a sua estagnação a uma determinada velocidade era de aproximadamente 4 minutos. Logo após a estagnação da areia, o ventilador do túnel era desligado e a maquete passava a ser fotografada, utilizando-se uma câmera digital. Dadas as grandes dimensões da maquete, foram necessárias aproximadamente trinta fotografias para cada velocidade do vento. Após o registro fotográfico o ventilador era novamente acionado numa rotação superior a anterior, reiniciando a saltação de areia até que esta novamente estagnasse. E assim se repetia até a última velocidade.

### **Fase 3: Perfis de camada limite atmosférica**

Após os experimentos de figura de erosão de areia, são feitas medições para a obtenção do perfil de velocidade do tipo camada limite atmosférica, com tomadas de velocidades em diversas cotas altimétricas sobre a maquete.

As primeiras medições devem ser feitas considerando apenas a orografia local (sem qualquer edificação), para a obtenção do perfil de camada limite atmosférica de campo aberto sob esta condição. Em seguida, são medidos os perfis em quantos pontos da maquete se julgarem necessários. Devem ser consideradas as direções predominantes de vento.

### **Fase 4: Digitalização de fotografias e desenho das figuras de erosão**

As fotografias produzidas durante os experimentos eram imediatamente transferidas para um computador portátil para posterior digitalização e desenho (em duas e três dimensões) das figuras de erosão de areia em um *software* de CAD.

#### **4.1.5 Quinta etapa – seleção de pontos representativos**

Na quinta etapa procedeu-se à análise sistemática da base cartográfica e das figuras de erosão e ao reconhecimento de campo, a partir do que foram eleitos os pontos onde foram feitas as medições.

A quantidade de pontos dependeu das características do local e da disponibilidade de equipamento e pessoal para fazer as medições.

Para testar a hipótese de que duas porções urbanas fisicamente semelhantes possuem comportamentos térmicos distintos, caso uma seja mais ventilada do que a outra, optou-se por selecionar pares de pontos que atendessem aos seguintes critérios:

- características físicas e de uso do solo comuns entre os dois pontos que os compunham, diferenciando-se apenas pelo comportamento da ventilação identificado na figura de erosão de areia para a o rumo 150°. Assim, cada par possuía um ponto ventilado e outro situado numa área de estagnação do vento;
- todos os pontos deveriam estar expostos ao Sol durante as medições diurnas;
- os pares selecionados deveriam estar situados em distintas condições de ocupação, considerando o seu entorno em termos de tipo do pavimento da via, taxa de ocupação, índice de aproveitamento e distância em relação ao mar.

---

<sup>4</sup> Essas velocidades são de referência, medidas no interior do túnel, que estão melhor explicadas no item 4.2.1.2.



A eleição dos pontos se deu através da sobreposição da cartografia às figuras de erosão e da observação do desenho em três dimensões da área estudada.

Devido à heterogeneidade da forma urbana e às más condições de ventilação na área estudada, somente foi possível identificar esses pares de pontos utilizando a figura de erosão correspondente ao ensaio com a maior rotação do ventilador do túnel, 16,0 m/s.

Para garantir que todos os pontos estivessem expostos à radiação solar foi importante o uso das máscaras do fator de visão do céu. Como não se dispunha de câmera fotográfica dotada de lente olho de peixe, tais máscaras foram desenhadas para cada ponto, visto que a semelhança entre os pontos neste aspecto também era importante para o teste da hipótese. Conseguiu-se formar pares com diferença de no máximo 5% de obstrução entre os pontos.

A confirmação de cada ponto foi feita através de visita *in loco*, onde foram observados outros detalhes não constantes das plantas, como fluxo de veículos e de pedestres, arborização, cores e materiais das superfícies das construções. Assim, foram selecionados quatro pares de pontos, cujas características foram anotadas em uma ficha-padrão elaborada para este fim e para facilitar a análise posterior (Apêndice B).

#### **4.1.6 Sexta etapa – medições**

As variáveis a serem medidas em campo dependerão do subsistema do clima urbano a ser enfocado, que, na aplicação realizada por este trabalho, correspondem ao subsistema termodinâmico.

Nesta etapa foram realizados a preparação dos instrumentos de medição, o treinamento da equipe de campo, a definição do período de medição, as medições em campo e a tabulação dos dados registrados.

##### **a) Instrumentos de medição**

Dispôs-se de dois aparelhos registradores para a medição de temperatura e umidade relativa do ar, dois anemômetros portáteis para a medição de velocidade do vento, dois cata-ventos, fabricados artesanalmente, para a medição da direção do vento, um piranômetro para a medição da insolação (TAB. 4.1) e dois rádios de comunicação portáteis.

Para a instalação dos instrumentos foi necessário confeccionar artesanalmente um mastro com 1,5m de altura, com tubo de PVC e base em alumínio tri-apoiada (FIG. 4.2).

Como os registradores não eram adequados para medições em ambiente externo, exposto à radiação solar direta, fez-se necessário confeccionar um abrigo para protegê-los. Foram utilizadas

caixas plásticas de sorvete na cor branca, nas quais foram abertas algumas aletas para favorecer a ventilação no seu interior (FIG. 4.3).

Tabela 4.1: Especificações dos equipamentos utilizados.

| EQUIPAMENTO  | ESPECIFICAÇÕES   |
|--|--|
| Sensor de umidade relativa do ar com <i>datalogger</i> , marca HOBO, modelo RH/Temp (H08-003-02) | Faixa: 25% a 95% a 25 °C<br>Precisão de $\pm 5\%$<br>Temperatura de operação do sensor: + 5°C a + 50°C.  |
| Sensor de temperatura com <i>datalogger</i> , marca HOBO, modelo RH/Temp (H08-03-02)             | Faixa: - 40°C a + 75°C<br>Precisão: $\pm 0,7$ °C a 20 °C<br>Resolução: 0,4 °C a 20 °C<br>Tempo de resposta no ar: <15min com sensor dentro da caixa e 1min com sensor fora da caixa.   |
| Piranômetro digital  | Sensor fotovoltaico, escala de 0 a 1500 W/m <sup>2</sup> , resolução 1W/m <sup>2</sup>   |
| Anemômetro digital portátil, marca Kestrel, modelo 1000.   | Modos: velocidade instantânea (média nos últimos 3 segundos), rajada máxima e velocidade média desde acionamento;<br>Unidades: nós (KT), metros por segundo (M/S), quilômetros por hora (KM/H), milhas por hora (MPH), pés por minutos (FPM) e escala Beaufort ("F");<br>Velocidade mínima/máxima: 0.3 a 40 m/s. |



Figura 4.2: Estação climatológica experimental.



Figura 4.3: Detalhe da instalação dos instrumentos.

As caixas e os anemômetros foram fixados na parte superior do mastro para que se tivessem as medições realizadas à altura de 1,5m em relação ao piso, altura normalmente adotada para medições microclimáticas. Em seguida, foram feitas as aferições dos instrumentos. Os registradores de temperatura e umidade foram aferidos através de medições simultâneas com um termômetro de mercúrio expostos às mesmas condições ambientais. Os demais instrumentos foram aferidos e calibrados pelos fabricantes.

#### **b) Treinamento da equipe de campo**

A equipe responsável pelas medições em campo foi formada por cinco alunos do curso de graduação em Arquitetura da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, que se revezaram ao longo do período de medição. Tal equipe já possuía habilidade neste tipo de atividade, adquirida em outras pesquisas antecedentes. O treinamento da equipe, com duração de aproximadamente 1 hora, serviu para a aprendizagem do manuseio e leitura dos instrumentos e para o conhecimento do trajeto e dos pontos de medição.

#### **c) Definição do período de medição**

A escolha do período de medição ocorreu a partir dos resultados dos trabalhos de Gonçalves da Silva (1999) e Carvalho (2001). Desses estudos pôde-se verificar que o clima da cidade de João Pessoa tem pequena amplitude térmica, destacam-se os períodos chuvosos dos secos e o aumento da incidência dos ventos de nordeste no verão.

Carvalho (2001), a partir de uma base de dados medidos no aeroporto local no período de 1985 a 1994, identificou os meses de inverno e verão, assim como o comportamento de todas as variáveis climáticas mês a mês. O Atlas de vento elaborado por Gonçalves da Silva (1999) indica que os ventos predominantes incidem do quadrante sudeste.

Optou-se por fazer as medições durante o mês de novembro, por estar no período de verão, pela pequena incidência de chuvas, pela maior frequência das velocidades mais altas dos ventos de sudeste e pela menor frequência de calmaria (ventos com menos de 1,2 m/s).

#### **d) Medições microclimáticas na área estudada**

As medições microclimáticas foram feitas durante 28 dias ininterruptos, de 8h às 9h, 14h às 15h e 20h e 21h, à exceção de dois momentos (na manhã dos dias 12/11 e 14/11), quando as medições foram canceladas devido à ocorrência de chuva forte, que poderia danificar os equipamentos e o dados não serviriam para os propósitos da pesquisa.

Como havia somente um par de instrumentos, as medições foram feitas em transecto móvel, utilizando-se um automóvel. Foram destinados 10 minutos para as medições em cada par de pontos e o percurso entre estes pares durou em média 6 minutos, somando aproximadamente 60 minutos para a realização de todo o transecto.

Em cada ponto foram medidas e registradas a velocidade média e a direção predominante do vento em 10 minutos, a temperatura, a umidade relativa do ar e a insolação a cada minuto (dez registros) e as condições do céu de acordo com a seguinte escala: claro, predominante claro, parcialmente nublado, predominante nublado, nublado e nublado com chuva fina.

Como havia apenas um solarímetro, a insolação foi medida em apenas um dos pontos de cada par, o que não deve causar prejuízo aos resultados, dada a proximidade entre os pontos e a semelhança dos respectivos fatores de visão do céu.

Os dados referentes à insolação, direção do vento e condição do céu foram anotados numa caderneta elaborada para este fim. Os dados de temperatura e umidade relativa do ar foram armazenados pelo *datalogger* HOBO (modelo RH/Temp - H08-003-02) e transferidos para um computador ao final de cada dia de medição. Desses dados, foram calculadas as médias de ambas as variáveis para os 10 minutos de medição em cada ponto.

A direção do vento foi observada visualmente, sendo o cata-vento alinhado ao meio fio da rua, já que uma instalação mais precisa (com uso de bússola, por exemplo) demandaria um tempo maior, podendo inviabilizar as medições. As direções anotadas foram posteriormente corrigidas a partir da orientação das ruas e do norte verdadeiro indicados na planta da área.

#### **g) Medições na estação de referência e dados sinópticos**

Simultaneamente às medições nos pontos selecionados na área de estudo, foram tomados os registros dos dados medidos na estação de referência, que no caso da cidade de João Pessoa se situa no Aeroporto Internacional Castro Pinto, disponíveis na página eletrônica do Infotempo (<http://infotempo.uol.com.br>). Também foram obtidos os mapas sinópticos diários disponíveis na página eletrônica do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (<http://www.inmet.gov.br>).

#### **f) Tabulação dos dados**

Todos os dados foram computados em uma planilha eletrônica formulada no *software* Excel (versão 2000) da Microsoft, formando um banco de dados para o tratamento estatístico. Desse tratamento foram extraídos os valores médios, máximos, mínimos, a moda, desvio padrão, coeficiente

de variação de cada variável climática, a partir dos quais foram elaborados gráficos para melhor visualização dos dados.

Em seguida, o banco de dados foi acrescido dos valores correspondentes às variáveis de uso e ocupação do solo em cada ponto e transpostos para o *software* SPSS (versão 11.5), a fim de se realizarem as análises estatísticas e diagnósticos.

#### **4.1.7 Sétima etapa - análise dos registros e diagnóstico**

Os dados registrados durante as medições em campo e os obtidos da cartografia da área estudada foram tratados através de métodos estatísticos, dividido em três fases:

##### **Fase 1: Tratamento estatístico**

O tratamento estatísticos dos dados registrados foi realizado em três subfases:

- a) na primeira foram analisados os dados obtidos da estação de referência e os dados sinóticos, objetivando a verificação de possíveis alterações da circulação atmosférica que pudessem provocar modificações significativas no ritmo climático (mudanças de tempo climático). Com isso, os dados foram separados em estratos conforme os tipos de tempo identificados durante o período de medição.
- b) na segunda foram calculados, para cada ponto do transecto, os valores máximos, mínimo e médios mensais de cada variável climática para cada horário de medição (manhã, tarde e noite);
- c) na terceira foram feitas as análises de correlação e de regressão. Para a análise de correlação utilizou-se o método de Pearson e para a regressão, o método *stepwise*;

##### **Fase 2: Comparação com a cartografia**

Na quarta etapa, os resultados das análises estatísticas foram comparados à cartografia da área estudada, objetivando a construção dos argumentos explicativos dos fenômenos climáticos identificados.

##### **Fase 3: Modelagem**

Por fim, na quinta etapa, foram elaborados os modelos explicativos (numéricos e gráficos) do clima da área estudada, que orientaram o diagnóstico do problema estudado.

#### **4.1.8 Oitava etapa – ações**

Com base no diagnóstico obtido na sétima etapa são concebidas ações intervencionistas para a área estuda, que podem ser de caráter preventivo, corretivo ou adaptativo, objetivando a melhoria da qualidade de vida e a segurança da comunidade que habita a área em questão.

No caso da aplicação apresentada por este trabalho, as ações propostas estão correlacionadas ao subsistema enfocado, o termodinâmico.

#### **4.2 Métodos e técnicas utilizados**

A metodologia proposta é composta por diferentes técnicas e métodos científicos já validados e amplamente divulgados na literatura. Dada a quantidade de variáveis a serem observadas e a complexidade das relações entre elas, foram utilizados experimentos em laboratório com modelos físicos, observações e medições em campo e métodos estatísticos-matemáticos, que estão apresentados a seguir.

##### **4.2.1 Experimentos físicos tridimensionais em túnel aerodinâmico de camada limite atmosférica**

Os métodos experimentais em modelos físicos possibilitam a simulação e a descrição mais aproximada dos fenômenos da realidade, inclusive com maior precisão em relação a modelos matemáticos e de simulação computacional.

Embora restritivo, por considerar parte das variáveis envolvidas no sistema, os experimentos em túnel aerodinâmico são utilizados em diversas áreas de estudo, como projeto de edificações e estruturas, qualidade e proteção ambiental, proteção e conforto humanos, poluição do ar, caracterização da circulação atmosférica, produção energética e produção agrícola.

O túnel utilizado nesta pesquisa pertence ao Instituto de Pesquisa Tecnológica de São Paulo (IPT) e está instalado no Laboratório de Vazão, situado na sede desta instituição, no campus da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo – SP.

O túnel do IPT é do tipo aerodinâmico de camada limite atmosférica, que simula as condições de escoamento na camada limite atmosférica mais próxima da superfície terrestre. O sistema é de circuito aberto, com uma seção retangular que mede 28,30m de comprimento, por 3m de largura e 2m de altura (FIG. 4.4 e 4.5). A velocidade máxima do vento no interior do túnel é de 25 m/s, produzida por um ventilador com 200cv de potência. Está dotado de duas mesas de ensaio giratórias, sendo uma situada no início da câmara de ensaios (próxima à entrada do ar), onde são realizados experimentos de aerodinâmica de corpos, e outra no final, próxima ao ventilador, destinada aos experimentos de camada limite atmosférica como os realizados nesta tese. Ambas medem 2m de diâmetro (FIG. 4.5).



Figura 4.4: Vista externa do túnel aerodinâmico do IPT.



Figura 4.5: Vista da mesa de ensaio e do ventilador ao fundo.

O ventilador, situado em uma das extremidades do túnel, é movido por um motor de potência de 1 cavalo, que faz as hélices do ventilador girarem de 45 a 400rpm. O ventilador suga o ar que entra no túnel através de um sistema de colméias e aletas instaladas na outra extremidade do túnel, que servem para uniformizar o escoamento, reduzindo as turbulências.

#### 4.2.1.1 Critérios de semelhança: geometria, cinemática e dinâmica

Segundo Blassmann (1983), para o estudo em modelos físicos “torna-se necessário determinar quais as condições que devem ser satisfeitas para que os escoamentos em torno de corpos geometricamente semelhantes sejam também semelhantes”. De acordo com o autor, estas condições são conhecidas como *condições de semelhança* (FIG. 4.6), sendo necessário, portanto, que se tenha para os estudos com modelos:

a) Semelhança geométrica (semelhança dos corpos).

Fisicamente: formas semelhantes, dispostas com a mesma orientação em relação aos dois escoamentos. A semelhança de formas inclui também a semelhança de detalhes e de rugosidade das superfícies dos sólidos (detalhes e rugosidades devem estar na mesma escala geométrica dos corpos).

Matematicamente: é constante a relação entre os comprimentos em todos os pares de linhas homólogas nos dois escoamentos:  $L1/L2 = \text{constante}$ .

Desta maneira, as maquetes utilizadas nos experimentos devem ser confeccionadas em escala, assegurando a proporcionalidade com a área que representa em todas as dimensões. A escala da maquete também deve ser compatível com a veia do túnel a ser utilizado, visto que os efeitos de atrito e turbulência próximos das paredes do túnel podem interferir sobre o escoamento no qual a maquete será imersa, que deverá ser uniforme na horizontal.

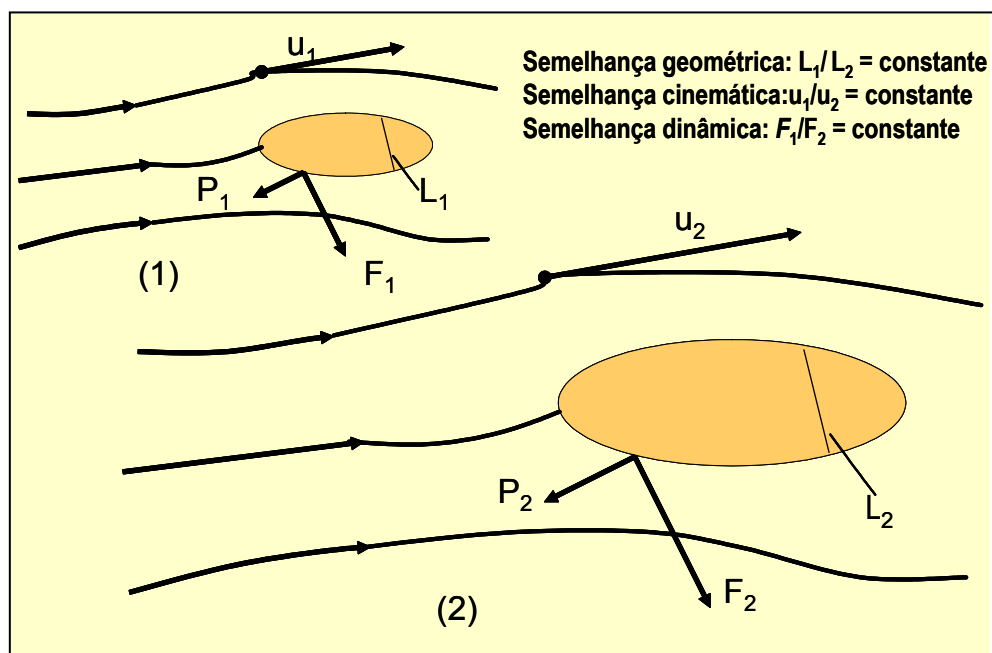


Figura 4.6: Critérios de semelhança.  
 Fonte: Adaptado de Blassman (1983).

Escalas superiores a 1:1000 não são recomendadas, pois não gera um número de Reynolds satisfatório e dificulta, e às vezes torna impossível, a visualização da ventilação entre os edifícios e a instalação dos sensores para medição das pressões de vento (GONÇALVES DA SILVA, 1999; MORENO, 2000).

Sobre a semelhança cinemática, extrai-se do texto do aludido autor:

- b) Semelhança cinemática (semelhança dos escoamentos).  
 Fisicamente: pode ser encarada como uma semelhança geométrica dos escoamentos. A distribuição de velocidades médias e as características de turbulência devem ser análogas nos dois escoamentos.  
 Matematicamente: é constante a relação entre os módulos das velocidades em todos os pares de pontos correspondentes nos dois escoamentos:  $u_1/u_2 = \text{constante}$ .

Por fim, o autor define assim a semelhança dinâmica:

- c) Semelhança dinâmica (semelhança das forças).  
 Fisicamente: pode ser encarada como uma semelhança geométrica das forças. As forças idênticas (forças de pressão, viscosidade, de inércia, etc.) em dois pontos correspondentes nos dois escoamentos são paralelas e guardam uma proporção constante.  
 Matematicamente: é constante a relação entre os módulos das forças em todos os pares de pontos correspondentes nos dois escoamentos:  $F_1/F_2 = \text{constante}$ .

Essa semelhança se obtém igualando o número de Reynolds nas duas situações (realidade e experimento). Entretanto, alguns especialistas afirmam que isso só se faz necessário em estudos de



esforços mecânicos, como é o caso da estabilidade das edificações. Para o caso da presente pesquisa essa igualdade é dispensável.

#### 4.2.1.2 Técnica de erosão de areia

Na técnica de erosão de areia o modelo físico (maquete) é coberto por uma fina camada de grãos de areia de tamanho uniforme. Quando o vento sopra sobre esta, é necessária uma velocidade do escoamento no interior do túnel aerodinâmico (velocidade de referência -  $U$ ) suficientemente elevada para se verificar o arrasto ou a saltação dos grãos e observar que, mantendo-se  $U$  constante por um certo intervalo de tempo, forma-se uma zona erodida, cuja fronteira é bem definida.

Dar-se o nome de velocidade de atrito ( $r$ ) à velocidade que imprime uma força suficiente para romper o atrito entre os grãos de areia e a superfície da maquete, deslocando-os. Ao elevar a velocidade de referência ( $U$ ), obtém-se uma nova figura de erosão, cujo limite corresponde também a uma nova velocidade de atrito  $r$ . O limite de cada figura de erosão constitui um conjunto de isolinhas de módulo de velocidade adimensionalizada, que permite visualizar, numa determinada área construída, as porções críticas, onde a velocidade do vento permanece próxima de zero, ou onde ocorre velocidades extremas, que possam provocar insegurança ou desconforto, principalmente a pedestres.

Nestas condições, verifica-se que a relação entre as velocidades de atrito ( $\gamma = u_1/u_2$ ) no limite de duas figuras de erosão que se formam, pode ser medida diretamente pela relação entre as velocidades de referência correspondentes ( $U_1$  e  $U_2$ ), medidas a mesma cota ( $x_3$ ).

$$\frac{u_{r1}}{u_{r2}} = \frac{U1(x_3)}{U2(x_3)} = \gamma$$

Quanto à relação entre  $F$  (número de Fround para saltação) (força resultante) e  $Re$  (número de Reynolds), esta pode ser estabelecida recorrendo-se a resultados experimentais, como os obtidos por Janeiro Borges & Saraiva (1980), utilizando grãos de areia de seis granulometrias diferentes ( $0,15 \text{ mm} < d < 0,60 \text{ mm}$ ), espalhadas em concentrações muito baixas (inferior a uma camada de grãos de areia de espessura  $5 \text{ a } 9 \text{ mg/mm}^2$ ) numa superfície de madeira compensada.

#### 4.2.2 Configuração do céu

Para determinar a quantidade de horas de sol diárias em cada ponto do transecto, foi utilizado o método gráfico para o cálculo do fator de visão do céu.

Como não se dispunha de uma câmara fotográfica dotada de lente do tipo olho de peixe,

baseou-se no desenho da área de estudo (plantas e elevações) para traçar a máscara de obstrução (da visão do céu), representada pelos edifícios do entorno de cada ponto do transecto. Entre os gráficos auxiliares para o traçado destas máscaras, optou-se pelo representado pela Figura 4.7, por proporcionar maior precisão e agilidade no traçado em 360°.

As máscaras foram desenhadas manualmente sobre o gráfico e posteriormente digitalizadas, a partir do que foram feitos os cálculos da área referente à obstrução e do fator de visão do céu<sup>5</sup>.

Os desenhos das máscaras foram sobrepostos à carta solar referente à cidade de João Pessoa, a partir do que se pôde verificar a quantidade de horas que cada ponto de medição estaria exposto no período de medição e no restante do ano (ver Anexo 2).

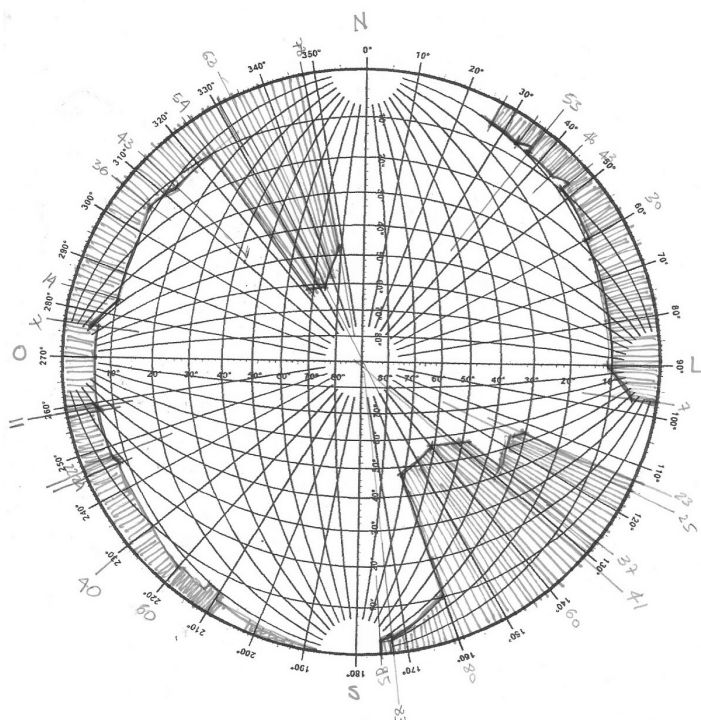


Figura 4.7: Gráfico auxiliar para traçado de máscaras (360°), com demonstração para um ponto da área de estudo.

Os desenhos geram imagens semelhantes às da fotografia, mas com menor precisão e com maior dificuldade de execução. Neste caso, alguns detalhes e, principalmente, a vegetação possivelmente existentes poderão não ser fielmente representados. No entanto, é esta a técnica mais acessível à maioria dos pesquisadores, já que a lente de olho de peixe tem custo elevado.

<sup>5</sup> Para mais informações sobre os procedimentos para o traçado das máscaras, inclusive utilizando outros métodos, consultar Corbella & Yannas (2003), Souza e Silva (2003) e Frota (2004).

O fator de visão do céu indica que quanto maior a área de céu visível na imagem (da fotografia ou do desenho), maior a capacidade daquele ambiente de dispersar a energia térmica para a atmosfera. Será maior, também, a exposição deste ambiente à radiação solar direta.

#### **4.2.3 Medidas móveis**

O método de medidas móveis é utilizado principalmente quando se dispõem de poucos equipamentos e não há estações climatológicas distribuídas pela cidade. Com esse método é possível fazer, com um único conjunto de equipamentos, um transecto pela estrutura da cidade realizando medições instantâneas das diversas variáveis climáticas em pontos pré-definidos.

Para a sua utilização é importante considerar alguns aspectos:

a) o tempo necessário para percorrer todo o transecto deve ser o menor possível, tendo sido adotado em vários estudos o limite de 1 hora, visto que as alterações do tempo (climático) podem ocorrer rapidamente, dependendo do local;

b) no caso de medidas instantâneas, devem ser evitados aparelhos que necessitem de longo tempo para estabilização. Aparelhos de leitura rápida são mais indicados;

c) os aparelhos devem ser leves, portáteis e de fácil manuseio e leitura dos dados;

d) o transporte dos aparelhos pode ser feito a pé, ou em algum veículo adaptado, como bicicleta, automóvel ou outro;

e) deve-se ter em mãos uma caderneta de anotações devidamente elaborada para os fins das medições, com fácil leitura e preenchimento;

f) a equipe responsável pelas medições deve estar devidamente treinada antes de ir para campo, sabendo operar os instrumentos e, claro, observar as variáveis que não dependem exclusivamente de instrumentos para a observação, como a condição do céu e a direção do vento.

#### **4.2.4 Análise de correlação linear de Pearson**

Como um sistema complexo, a análise do clima urbano não pode ser feita a partir da observação de um único elemento. O próprio clima é caracterizado pela relação de todas as variáveis que o compõem, e o clima urbano ainda é acrescido das variáveis relacionadas à forma da cidade, tornando a análise ainda mais complexa.

Assim, a análise de correlações tem sido utilizada com bastante sucesso em vários estudos sobre clima urbano (SAMPAIO, 1981; DUARTE, 2000, ASSIS, 2000, entre outros). Esse tipo de análise

estatística objetiva verificar quantitativamente se existe, de fato, associação entre as variáveis consideradas, especialmente quanto ao seu grau de significância.

Deste modo, do ponto de vista metodológico, o sentido de dependência entre as variáveis não é matemático, mas teórico-explicativo, à medida que o uso deste método exige uma “lógica” demonstrativa que se possa comprovar teoricamente, caso contrário, estar-se-iam estabelecendo “correlações espúrias”, ou seja, correlacionando variáveis que nada têm a ver umas com as outras.

As relações entre as variáveis explicativas dos fenômenos são classificáveis qualitativa e quantitativamente quanto ao número de variáveis, à qualidade da relação escolhida e à direção da relação entre as variáveis.

Quanto ao número de variáveis, as relações podem ser simples quando descrevem fenômenos tipificados por (ou redutíveis a) uma variável independente significativa, e múltiplas, quando caracterizam fenômenos retratáveis por mais de uma variável independente e não adequadamente redutíveis a uma só variável significativa. No caso do clima urbano, as relações são múltiplas.

Quanto à qualidade da relação, esta pode ser linear e não-linear. A correlação linear tipifica fenômenos razoavelmente bem explicados por funções do primeiro grau (retas); nela a taxa de crescimento da variável dependente é constante. As não-lineares acusam fenômenos que, mal explicados por funções do primeiro grau, exigem outras mais complexas ou de ordem superior; nelas, a taxa de crescimento da variável dependente muda ponto a ponto.

Quanto à direção, as relações podem ser diretas (positivas) ou inversas (negativas) (FIG. 4.8). A correlação direta indica que, ao aumentar o valor da variável independente (X), o valor da variável dependente (Y) também se eleva; assim, o coeficiente de correlação será positivo. Ao contrário, na correlação inversa, ao elevar-se o valor da variável independente, o valor da variável dependente diminui, e o coeficiente de correlação será negativo.

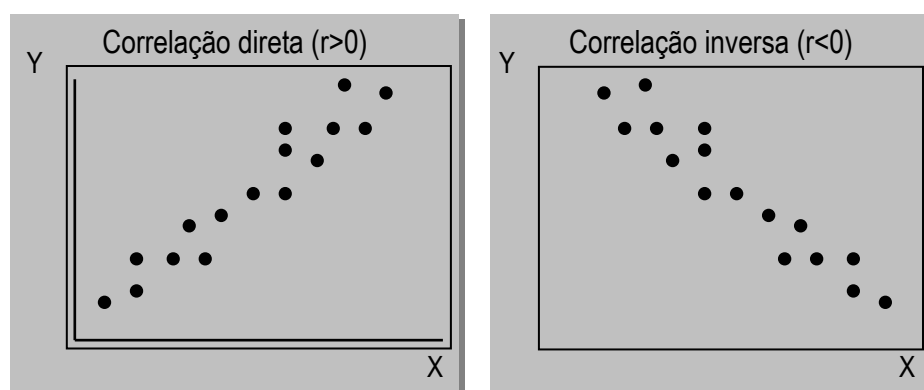


Figura 4.8: Correlações diretas e inversas.

A relação entre duas variáveis independentes é chamada de colinearidade, e a relação entre muitas variáveis independentes, de multicolinearidade. Uma de suas aplicações é na determinação das variáveis que mais significativamente afetam a previsão da variável dependente. O parâmetro de referência é o de quanto maior o grau de correlação parcial, mais significativa é a variável.

O coeficiente de correlação (linear) pode variar de **-1 a +1**. Quanto mais próxima de **-1** ou de **+1**, maior será a correlação. A correlação será nula (ou inexistente) quando o coeficiente for igual a zero.

Alguns autores (MILONE, 2004 e LEVIN, 1977) recomendam uma escala de módulos dos coeficientes de correlação, cujos valores ainda são controversos (TAB. 4.2 e 4.3).

Tabela 4.2: Qualidade do ajustamento das correlações.

| <b>Coefficiente de correlação*</b> | <b>Qualidade da Correlação</b> |
|------------------------------------|--------------------------------|
| 0,9<r≤ 1,0                         | Ótima                          |
| 0,8<r≤ 0,9                         | Boa                            |
| 0,7<r≤ 0,8                         | Razoável                       |
| 0,6<r≤ 0,7                         | Medíocre                       |
| 0,5<r≤ 0,6                         | Péssima                        |
| r≤ 0,5                             | Imprópria                      |

Fonte: Milone (2004).

\* Os valores apresentados são em módulo, valendo tanto para correlações diretas quanto inversas.

Tabela 4.3: Qualidade do ajustamento das correlações.

| <b>Coefficiente de correlação*</b> | <b>Qualidade da Correlação</b> |
|------------------------------------|--------------------------------|
| 1,00                               | Correlação perfeita            |
| 0,95                               | Correlação forte               |
| 0,50                               | Correlação moderada            |
| 0,10                               | Correlação fraca               |
| 0,00                               | Ausência de correlação         |

Fonte: Levin (1977).

\* Os valores apresentados são em módulo, valendo tanto para correlações diretas quanto inversas.

No caso do clima urbano, como ainda são poucos os estudos que utilizaram esse método, não há uma discussão a esse respeito, portanto, como a quantidade de variáveis envolvidas no sistema clima urbano é muito grande, considerou-se conveniente, nesta pesquisa, tomar como referência a escala proposta por Levin (1977), utilizada em estudos na área de ciências humanas, em que a quantidade de variáveis envolvidas também é elevada. As Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 exemplificam três coeficientes de correlação obtidos nesta tese, forte, moderada e fraca, segundo a escala proposta pelo referido autor.

Dadas as características das variáveis e a forma de sua mensuração, nas análises de correlação desta pesquisa adotou-se o modelo de Pearson, que calcula os coeficientes de correlações lineares simbolizados pela letra “r”.

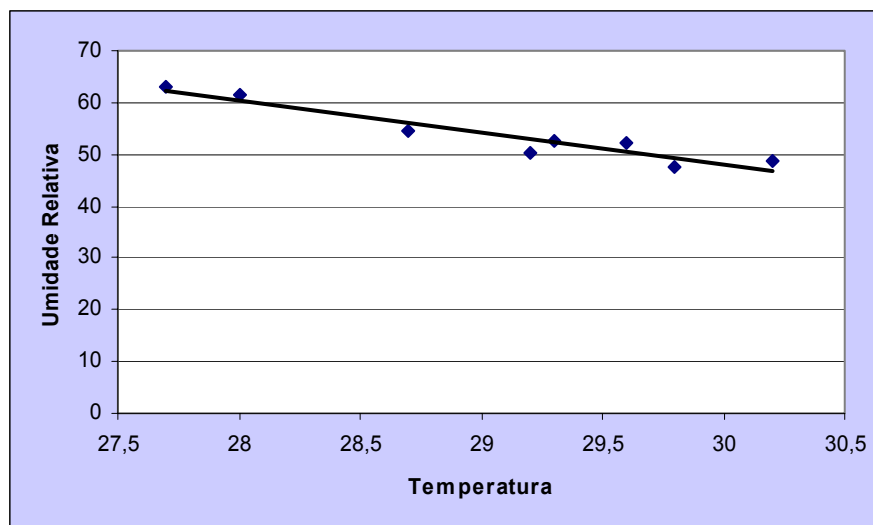


Figura 4.9: Correlação inversa forte entre a temperatura e a umidade relativa do ar ( $r = -0,96$ ).

O coeficiente de correlação de Pearson dá uma medida precisa da intensidade e do sentido da correlação. Entretanto, é importante verificar se a associação obtida entre a variável dependente e cada variável independente existe de fato, ou se resulta apenas de erro amostral. Para isso, faz-se necessário testar a significância do coeficiente de correlação. Nesta tese são aceitas as correlações que se comprovem aos níveis de significância  $p = 0,01$  e  $p = 0,05$ <sup>6</sup>.

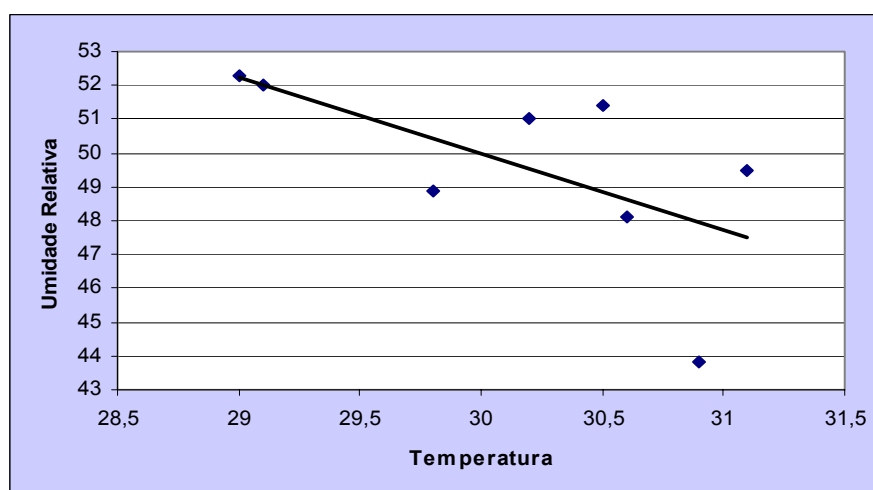


Figura 4.10: Correlação inversa moderada entre a temperatura e a umidade relativa do ar ( $r = -0,64$ ).

<sup>6</sup> O nível de significância depende do rigor com que o pesquisador deseja trabalhar. Nesta pesquisa utilizaram-se os valores normalmente utilizados e indicados na bibliografia (ver detalhes em LEVIN, 1977 e MILONE, 2004).

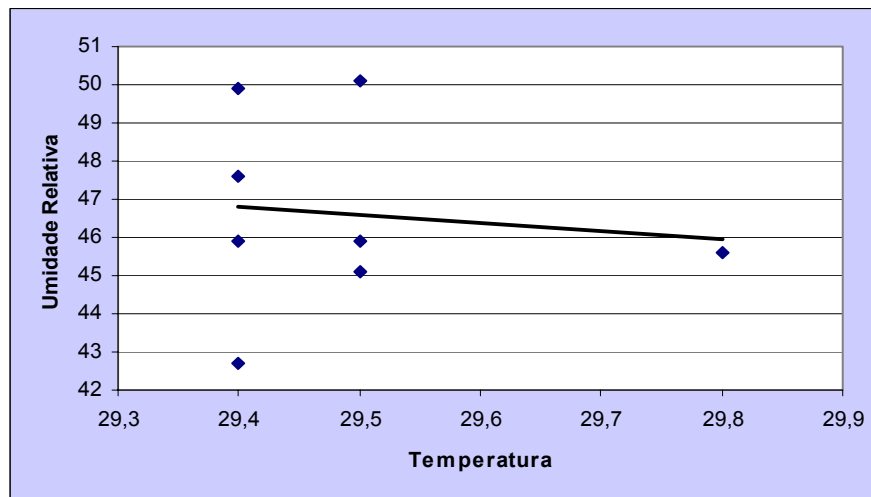


Figura 4.11: Correlação inversa fraca entre a temperatura e a umidade relativa do ar ( $r = -0,11$ ).

A significância estatística de um resultado é uma medida estimada do grau em que este resultado é "verdadeiro" (ou seja, de que realmente é representativo do conjunto de dados mensurados). Mais tecnicamente, o valor do nível-p representa um índice decrescente da confiabilidade de um resultado. Quanto mais alto o nível-p, menos se pode acreditar que a relação observada entre as variáveis na amostra é um indicador confiável da relação entre as respectivas variáveis na população. Especificamente, o nível-p representa a probabilidade de erro envolvida em aceitar o resultado observado como válido, isto é, como "representativo da população". Por exemplo, um nível-p de 0,05 (1/20) indica que há 5% de probabilidade de que a relação entre as variáveis, encontrada na amostra, seja um "acaso feliz". Em outras palavras, assumindo que não haja relação entre aquelas variáveis na população, e o experimento de interesse seja repetido várias vezes, poderia-se esperar que em aproximadamente 20 realizações do experimento haveria apenas uma em que a relação entre as variáveis em questão seria igual ou mais forte do que a que foi observada naquela amostra anterior. Em muitas áreas de pesquisa, o nível-p de 0,05 é costumeiramente tratado como um "limite aceitável" de erro.

Não há meio de evitar arbitrariedade na decisão final de qual nível de significância será tratado como realmente "significante". Ou seja, a seleção de um nível de significância acima do qual os resultados serão rejeitados como inválidos é arbitrária. Na prática, a decisão final depende usualmente de: se o resultado foi previsto a priori ou apenas a posteriori no curso de muitas análises e comparações efetuadas no conjunto de dados; no total de evidências consistentes do conjunto de dados; e nas "tradições" existentes na área particular de pesquisa. Tipicamente, em muitas ciências resultados que atingem nível-p 0,05 são considerados estatisticamente significantes, mas este nível ainda envolve uma probabilidade de erro razoável (5%). Resultados com um nível-p 0,01 são comumente considerados

estatisticamente significantes, e com nível-p 0,005 ou nível-p 0,001 são freqüentemente chamados "altamente" significantes. Estas classificações, porém, são convenções arbitrárias e apenas informalmente baseadas em experiência geral de pesquisa. Uma consequência óbvia é que um resultado considerado significativo a 0,05, por exemplo, pode não sê-lo a 0,01. (FONTE: arquivo de ajuda do software STATISTICA (StatSoft Inc.))

Na hipótese (sugerida por esta pesquisa) de que, comparando duas porções urbanas com características morfológicas semelhantes, verifica-se que a situada numa área de estagnação do vento permanecerá mais aquecida do que a situada numa área ventilada, a correlação entre a velocidade do vento e a temperatura do ar deverá ser do tipo inversa. Assim, haverá três formas de refutar esta hipótese: a primeira é se  $r > 0$  (correlação direta ou positiva), a segunda, se  $r = 0$  (correlação inexistente), e a terceira, se a correlação, mesmo inversa, tiver o nível de significância superior a 0,05.

#### 4.2.5 Análise de correlação (R) e de regressão (R<sup>2</sup>) lineares múltiplas – método *Stepwise*

As análises de correlação de Pearson se limitam ao estudo das relações simples entre pares de variáveis, não sendo suficiente para explicar o comportamento de uma determinada variável dependente, que sofre influência de mais de uma variável independente, como é o caso da temperatura do ar. Por isso, também foram feitas análises de regressão linear múltipla, a partir das quais extraíram-se modelos explicativos do comportamento da temperatura do ar nos pontos e horários em que foram feitas as medições. Para tanto, utilizou-se o procedimento **STEPWISE**.

O procedimento *stepwise* permite selecionar as variáveis que significativamente explicam as variações da variável dependente, compondo assim modelos explicativos (equações), que também podem servir para a previsão do comportamento da variável dependente em outro momento, desde que em condições semelhantes.

A escolha de variáveis se baseia num procedimento heurístico que, apesar de intuitivamente razoável, não garante que a regressão encontrada possui o maior coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) e de correlação múltipla (R), nem que o modelo encontrado é o melhor, do ponto de vista prático. Portanto, cabe ao pesquisador utilizar o maior número de variáveis possíveis para explicar o fenômeno (variação da temperatura) e excluir aquelas cuja correlação é espúria.

O R<sup>2</sup> - coeficiente de determinação múltipla – mede a porcentagem da variação da variável dependente, que pode ser explicada pela regressão.

É importante salientar que o coeficiente de correlação múltipla (R), por integrar mais de uma variável independente, não possui direção, como os de correlação simples (r de Pearson), portanto, o sinal será sempre positivo.



A análise de regressão pelo método *stepwise* permite, ainda, a identificação de possíveis efeitos de colinearidade e multicolinearidade nas relações. Esses efeitos indicam que duas ou mais variáveis independentes com correlações semelhantes com a variável dependente têm forte correlação entre si, indicando que o efeito de uma sobre a(s) outra(s) é que está influenciando na relação dessas com a variável dependente. Neste caso, os modelos propostos pelo método *stepwise* contemplam apenas a variável que obtiver a maior correlação com a variável dependente.

A aplicação de métodos matemático-estatísticos só é válida quando a análise de seus resultados pode ser pautada numa base teórica sólida, pois os números por si só não são suficientes para explicar quaisquer que sejam os mecanismos que geram os fenômenos da realidade.

A quantidade de dados envolvidos na análise do clima urbano requer a utilização de programas especializados de estatística, sem os quais é praticamente impossível fazer as análises de correlação e de regressão. Assim, nesta tese utilizou-se o *software* SPSS, versão 11.5 (Copyright©SPSS, Inc. 1989-2002).

# **Capítulo 5**

## **Universo de Análise**

---

### 5.1 A cidade de João Pessoa – PB

A cidade de João Pessoa, capital do Estado da Paraíba, está situada na porção oriental do Estado a 7° 08'S e 34° 53'W. Fundada em 05 de agosto de 1585, é a terceira cidade mais antiga do país e uma das capitais menos populosas, com 597.934 habitantes (Censo 2000 – IBGE), distribuídos em 210 km². É conhecida pela predominância do verde de suas árvores, representado, principalmente, pelos parques Solon de Lucena e Arruda Câmara e pela reserva florestal Mata do Buraquinho, recém-transformada em Jardim Botânico.

### 5.2 Descrição do clima de João Pessoa

Devido a sua localização geográfica, o clima de João Pessoa se caracteriza por temperaturas médias anuais elevadas, sem estações térmicas, mas com estação úmida definida. Com índice pluviométrico acentuado, concentrado nos meses de maio, junho e julho, possui umidade relativa do ar elevada, com apenas dois meses secos. Segundo a Classificação Bioclimática de Köppen (1884, atualizada para os dias atuais), o clima de João Pessoa é do tipo nordestino sub-seco, com temperatura média anual em torno de 25°C e umidade relativa do ar média anual de 80% (FIG. 5.1, TAB. 5.1 e TAB. 5.2).

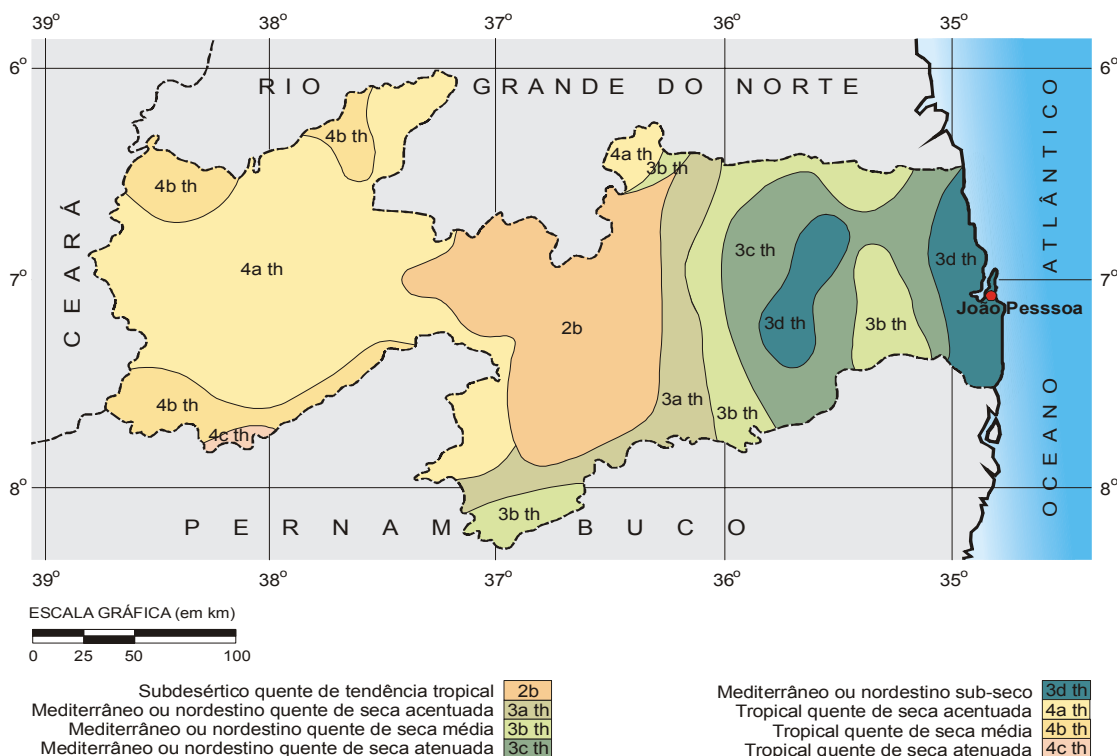


Figura 5.1: Classificação climática de Köppen para o Estado da Paraíba.

Fonte: Atlas do Estado da Paraíba (1985).

A proximidade da cidade de João Pessoa em relação ao Equador faz com que não haja variações significativas de tempo ao longo do ano, incluindo-se o regime de ventos predominantemente diário, característico de zonas costeiras. Dessa maneira, permanece durante todo o ano dentro da faixa correspondente aos ventos alísios de sudeste, que sopram, caracteristicamente, nos meses menos quentes com maior frequência e velocidade, tendo, somente com a chegada dos meses mais quentes, sua frequência alterada através dos ventos de leste e de nordeste, vindos das áreas equatoriais na corrente de deslocamento, em direção sul da Zona de Convergência Tropical Interna.

Tabela 5.1: Características do bioclima mediterrâneo ou nordestino sub-seco.

| Bioclima | Característica do Bioclima  | Denominação no Brasil               | Temp. Média Anual | Altitude | Latitude | Longitude |
|----------|---|-------------------------------------|-------------------|----------|----------|-----------|
| 3dth     | <p>Apresenta médias térmicas anuais em torno de 25°C</p> <p>Totais pluviométricos anuais de 1000 a 2000mm na área do brejo e 1500 a 1700 no litoral</p> <p>Umidade relativa do ar em torno de 80%</p> <p>A estação seca dura de 01 a 03 meses</p> | Mediterrâneo ou Nordestino Sub-seco | 25°C              | 5m       | 7°8'S    | 34°53'    |

Fonte: Atlas do Estado da Paraíba (1985).

Tabela 5.2: Normais climatológicas para a cidade de João Pessoa – 1985 a 1994.

| MÊS | MÉDIA | MÁX ABS | MÍN ABS | AMPL ABS | MED MÁX | MED MÍN | AMPL MED | UMID REL | NEB MED | DIR VEN | VEL VEN |
|-----|-------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|----------|---------|---------|---------|
| JAN | 27,00 | 33,2    | 19,4    | 13,8     | 30,6    | 23,3    | 7,3      | 76,54    | 3,91    | 150     | 3,53    |
| FEV | 26,99 | 33,2    | 20,7    | 12,5     | 30,6    | 23,4    | 7,2      | 77,92    | 4,16    | 150     | 3,36    |
| MAR | 26,93 | 33,4    | 20,4    | 13,0     | 30,6    | 23,5    | 7,1      | 80,44    | 4,43    | 150     | 3,17    |
| ABR | 26,45 | 32,4    | 20,4    | 12,0     | 30,0    | 23,4    | 6,6      | 83,13    | 4,72    | 150     | 3,3     |
| MAI | 25,80 | 31,7    | 20,0    | 11,7     | 29,5    | 22,6    | 6,9      | 84,33    | 4,57    | 150     | 3,45    |
| JUN | 24,82 | 32,6    | 18,6    | 14,0     | 28,6    | 21,7    | 6,9      | 86,03    | 4,85    | 210     | 3,85    |
| JUL | 24,13 | 32,6    | 18,5    | 14,1     | 27,9    | 21,0    | 6,9      | 85,61    | 5,03    | 180     | 4,05    |
| AGO | 24,23 | 30,4    | 16,5    | 13,9     | 28,2    | 20,7    | 7,5      | 82,82    | 4,34    | 180     | 4,21    |
| SET | 24,94 | 31,2    | 18,0    | 13,2     | 28,8    | 21,3    | 7,5      | 80,22    | 3,86    | 180     | 4,13    |
| OUT | 25,71 | 31,4    | 18,6    | 12,8     | 29,4    | 22,0    | 7,4      | 78,09    | 3,75    | 150     | 3,93    |
| NOV | 26,28 | 31,8    | 20,4    | 11,4     | 29,9    | 22,8    | 7,1      | 77,51    | 3,93    | 150     | 4,01    |
| DEZ | 26,72 | 31,8    | 18,8    | 13,0     | 30,3    | 23,1    | 7,2      | 76,18    | 3,84    | 150     | 3,73    |
| ANO | 25,81 | 33,4    | 16,5    | 16,9     | 29,5    | 22,4    | 7,1      | 80,85    | 4,3     | 150     | 3,73    |

Fonte: Carvalho (2001).

Legenda: MÉDIA – Média das temperaturas; MÁX ABS – Temperatura máxima do período; MÍN ABS – Temperatura mínima do período; AMPL ABS – Amplitude entre as temperaturas máxima e mínima absolutas; MED MÁX – Média das temperaturas máximas diárias; MED MÍN – Média das temperaturas mínimas diárias; AMPL MED – Amplitude entre as médias das temperaturas máxima e mínima; UMID REL – Média das umidades relativas do ar; NEB MED – Média das nebulosidades; DIR VEN – Direção do vento mais freqüente; VEL VEN – Velocidade média do vento.

### 5.3 Delimitação e caracterização da área de estudo

A cidade de João Pessoa ainda guarda alguns acidentes geográficos que devem ser urgentemente preservados, que podem servir como referência para orientar o planejamento da ocupação da cidade. Esses elementos são: a orla marítima, por onde os alísios penetram na cidade; a Barreira do Cabo Branco, que além do valor histórico, exerce importante influência no escoamento dos ventos; a Mata do Buraquinho (Jardim Botânico), reserva da Mata Atlântica inscrita no núcleo da cidade, o Parque Arruda Câmara (Bica), O Parque Solon de Lucena (Lagoa), o vale do Rio Jaguaribe, por cortar grande parte da cidade e servir como importante canal de ventilação, permitindo que as áreas centrais da cidade possam receber uma ventilação renovada e; por fim, o Rio Sanhauá, afluente do Rio Paraíba, que limita a cidade ao Oeste, além de outros rios e reservas que fazem parte da cidade (FIG. 5.2).

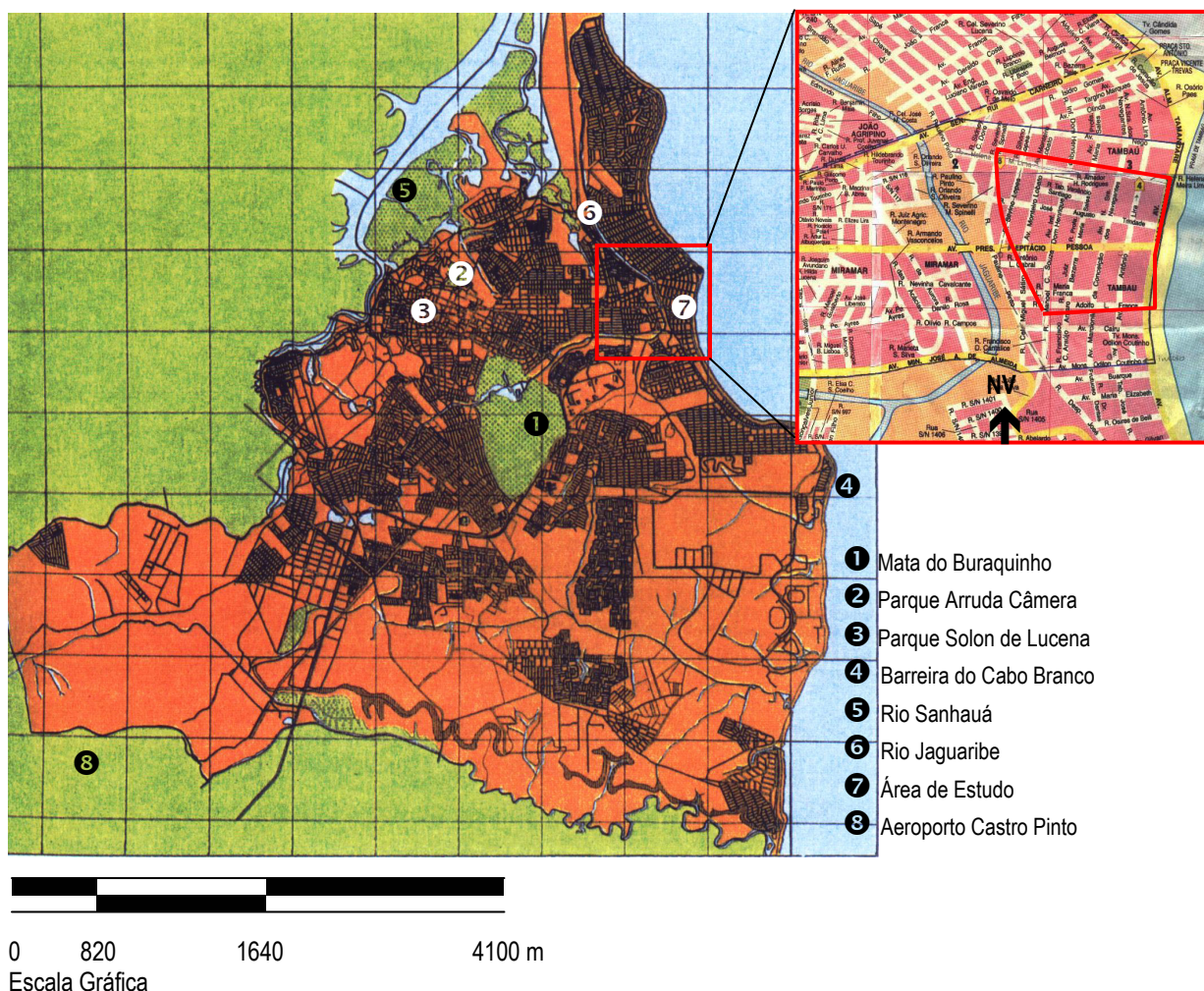


FIGURA 5.2: Planta da cidade de João Pessoa com destaque para a área de estudo  
 Fonte: Plano Diretor da cidade de João Pessoa (1992); Lista Telefônica Listel.

Esses acidentes naturais podem estar contribuindo para a manutenção da temperatura no interior da cidade em patamares ainda próximos da verificada na sua periferia, cerca de 2°C mais elevada, ainda satisfatório se comparado com a cidade de São Paulo, que pode chegar a 10°C (LOMBARDO, 1984).

Optou-se por aplicar a metodologia em uma porção da cidade de João Pessoa – PB, limitada a leste pelo Oceano Atlântico, a oeste pelo Rio Juagaribe, a norte pela Av. Sen. Rui Carneiro e R. Helena Maria Lima e a sul pela Av. José Américo de Almeida (FIG. 5.2 e 5.3), englobando parte dos bairros de Tambaú e Cabo Branco. Corresponde a uma área de aproximadamente 563.000m<sup>2</sup>, dividida (excluindo-se as vias) em 758 lotes distribuídos em 49 quadras, todos praticamente ocupados.



Figura 5.3: Vista aérea da área de estudo, a partir do Norte.  
Foto: Dirceu Tortorelo.

A opção por essa área pautou-se, em parte, em estudos antecedentes (GONÇALVES DA SILVA, 1999; FERRAZ, 2003; PEREGRINO, 2005 e QUEIROGA, 2005) sobre as condições de ventilação intra-urbana na orla marítima do Estado da Paraíba, que, em acordo com a Constituição do

Estado da Paraíba (Art. 229) e a Lei Orgânica para o Município de João Pessoa (Art. 175), o Plano Diretor de João Pessoa (Art. 25), tem sua ocupação controlada em termos de gabarito em altura dos edifícios. A porção denominada Orla Marítima corresponde a uma faixa linear de 500m medidos a partir da preamar de sizígia em direção ao interior do continente (FIG. 5.3). Nesta faixa, o gabarito é escalonado, iniciando-se a 12,90m na primeira linha de lotes à beira-mar, estendendo-se até aproximadamente 35m na última linha.

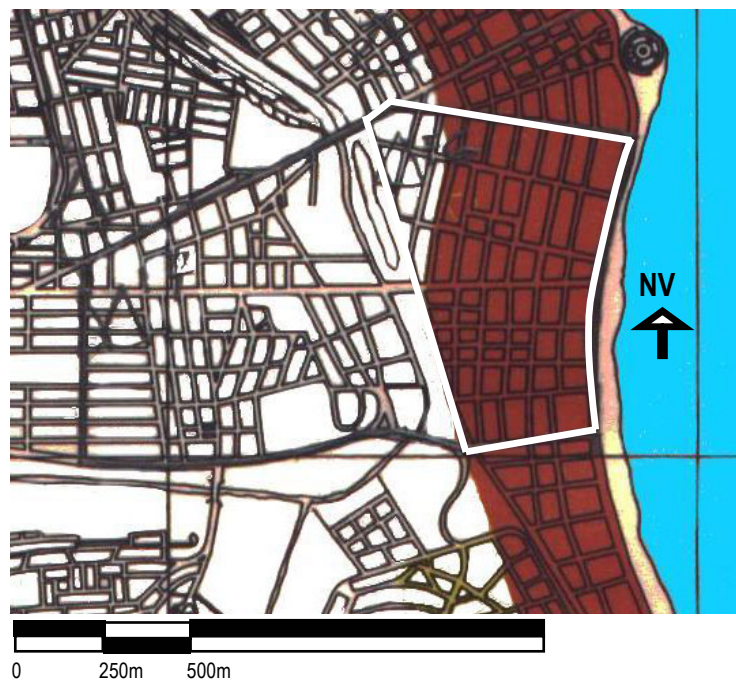


Figura 5.3: A faixa escura indica a delimitação da orla marítima com controle de gabarito.

Fonte: Plano Diretor de João Pessoa (1992).

Os referidos estudos chegaram à conclusão de que o escalonamento das edificações seria prejudicial à ventilação intra-urbana, podendo prejudicar a dispersão de calor e de poluentes. Neste sentido, a aplicação da metodologia desenvolvida por esta tese visa a verificar que proporções esse escalonamento tem repercutido no campo térmico local.

A opção também foi motivada por questões operacionais, já que também havia sido escolhida por outros pesquisadores<sup>7</sup> para a realização de estudos sobre ventilação através, também, de ensaios

<sup>7</sup> Os ensaios em túnel aerodinâmicos foram realizados em conjunto com três mestrandos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, da Universidade Federal da Paraíba, o Prof. Arq. Paulo Peregrino, a Prof. Arq. Silvana Chaves e a Arq. Viviane Guerra, todos orientados pelo Prof. Francisco de Assis Gonçalves da Silva. Ver Peregrino (2005), Queiroga (2005) e Guerra (2005).

em túnel aerodinâmico. A decisão sobre os ensaios em parceria possibilitou a redução dos custos de confecção e transporte da maquete, além da análise e resultados mais detalhados para a área escolhida.

Além do gabarito escalonado para a orla marítima e do índice de aproveitamento máximo, a altura máxima dos edifícios também é, de certa maneira, controlada pelas dimensões do lote, já que as construções acima de quatro pavimentos devem garantir recuos mínimos laterais e de fundo a partir de um coeficiente baseado na altura do edifício, calculado através da fórmula  $r = 3 + h/10$ , em que  $h$  é a altura do edifício.

No zoneamento determinado pelo Plano Diretor de João Pessoa (1992), a área selecionada está situada na Zona Adensável Prioritária<sup>8</sup> (ZAP), por já possuir toda a infra-estrutura instalada (água, energia, telefonia, drenagem, esgotamento sanitário e pavimentação). O adensamento populacional previsto para esta área é de até 150 hab/ha, sendo o índice de aproveitamento construtivo máximo de 4,0.

O índice de aproveitamento ainda está aquém do previsto em lei, dada a predominância de edificações de um e dois pavimentos.

Em termos de uso e ocupação do solo, nos bairros Tambaú e Cabo Branco, apesar da predominância do uso residencial, já se percebe um crescimento considerável do setor de serviços (hotelaria, restaurantes, comércio, diversão, educação, entre outros), concentrado nas vias asfaltadas e de maior tráfego, dado o crescimento da população e do turismo local. Nestes bairros estão as duas praias (de mesmo nome dos bairros) mais visitadas pelos turistas que chegam à cidade.

Na área estudada já se verifica um acentuado processo de verticalização dos edifícios, especialmente os residenciais. Nela o adensamento construtivo crescente nos últimos anos tem ocupado um pequeno estoque de lotes vazios, e muitas edificações de um e de dois pavimentos estão dando lugar a edifícios habitacionais multifamiliar, *flats* e hotéis com mais de quatro pavimentos. Em alguns casos, lotes vizinhos estão sendo lembrados para possibilitar a construção de edifícios mais altos, com maior área construída e número de unidades habitacionais.

A cobertura vegetal, mesmo nos espaços livres, já está bastante reduzida pela urbanização, concentrando-se às margens do rio Jaguaribe.

A presença de corpos d'água é marcada apenas pelo mar, já que o trecho do rio Jaguaribe situado nesta área é considerado morto pelo IBAMA devido ao extenso processo de assoreamento e

---

<sup>8</sup> "Zona Adensável Prioritária é aquela onde a disponibilidade de infra-estrutura básica, a rede viária e o meio ambiente permitem a intensificação do uso e ocupação do solo e na qual o índice de aproveitamento é 4,0, e nos termos desta lei" (Lei Complementar nº 3, de dezembro de 1992, atualizada até a Lei Complementar nº 4, de abril de 1993 – Plano Diretor da Cidade de João Pessoa).



poluição.

A maioria das ruas é pavimentada com pedras graníticas (paralelepípedos), sendo asfaltadas apenas as vias coletoras, de maior tráfego.

O fluxo de veículos automotores é mais intenso nas avenidas asfaltadas (Cabo Branco, Tamandaré, N.Sr<sup>a</sup> dos Navegantes, Antônio Lira, Maria Sales, José Américo, Epitácio Pessoa e Rui Carneiro), especialmente nos horários de 7h às 8h30min, 11h30min às 14h e 17h30min às 19h30min, momentos de transição entre casa e trabalho. Vale salientar que uma grande parte da população ainda preserva o hábito de almoçar em casa nos dias úteis.

O traçado urbano é do tipo regular, com as ruas orientadas praticamente sobre os eixos norte-sul e leste-oeste. A relação entre a largura das vias e altura dos edifícios é baixa, dando a impressão de que o fator de visão do céu não causa influência significativa na retenção de calor na área. Esta baixa relação é ainda favorecida pelos afastamentos laterais dos edifícios, que, entre aqueles com mais de quatro pavimentos, é de no mínimo 6m.

# **Capítulo 6**

## **Experimentos em Túnel Aerodinâmico**

---

### 6.1 Resultados dos ensaios de erosão de areia

A adoção da técnica de erosão de areia permitiu ser traçado, para a área estudada, um conjunto de figuras compostas por isolinhas de módulo de velocidade adimensionalizada, que possibilitaram visualizar em duas dimensões horizontais – para as condições de escoamento adotadas – os espaços vazios da estrutura urbana que estão sendo ventilados (ou não) e possíveis efeitos aerodinâmicos provocados pelo arranjo espacial dos edifícios.

Dos ensaios realizados resultaram sete figuras para cada direção de vento, que mostram a evolução do escoamento ao longo da área, conforme se elevou a sua velocidade. Estas figuras (FIG. 6.1 a FIG. 6.27) trazem indicados os pontos onde foram feitas as medições microclimáticas em campo. As Figuras 6.1 e 6.15 representam a maquete ainda totalmente coberta por uma camada fina de areia antes do início dos ensaios, respectivamente para 150° e 90°.

Com o vento incidindo sobre a maquete do rumo 150°, a saltação da areia iniciou-se com o ventilador do túnel acionado a 8,0m/s (FIG. 6.3 e 6.4), quando se observaram pequenas porções erodidas (em branco na figura), especialmente nas bordas leste e norte da área, e erosões com maior intensidade em torno dos edifícios mais altos (com três ou quatro pavimentos) situados à beira-mar. Nas áreas mais centrais, percebeu-se a erosão em torno de alguns edifícios com mais de oito pavimentos.

As áreas erodidas se ampliaram à medida que se elevou a velocidade do vento, ocorrendo com maior intensidade em torno dos edifícios mais altos, principalmente com mais de quinze pavimentos, onde os efeitos de canto e de esteira são mais evidentes.

Devido à heterogeneidade das alturas dos edifícios, pelos afastamentos entre eles e principalmente pela orientação da malha urbana em relação à direção do vento, percebe-se que a ventilação ali é bem diluída, com porções de estagnação distribuídas por toda a área, o que dificulta, de certa maneira, a dispersão de poluentes e de calor.

Embora a seleção dos pontos onde foram realizadas medições microclimáticas não coincida com a etapa de trabalho destinada à realização dos experimentos em túnel aerodinâmico, optou-se por logo indicar tais pontos nas figuras de erosão apresentadas a seguir, tendo em vista que tal procedimento facilitará a compreensão dos capítulos subseqüentes.

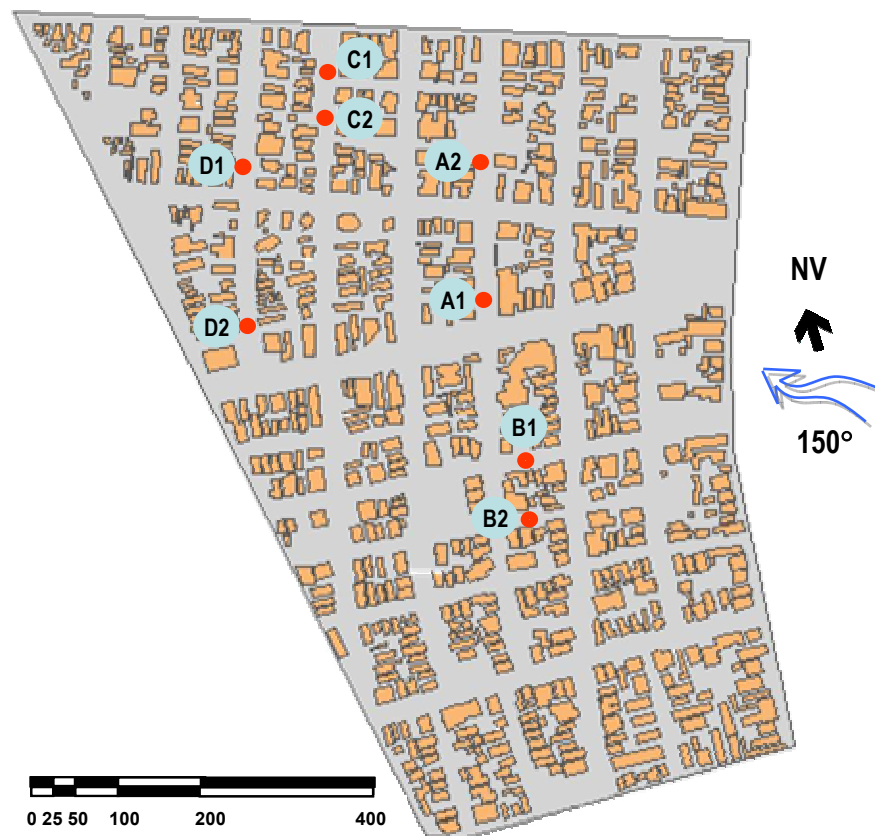


Figura 6.1: Figura de erosão para a direção do vento 150° - início.

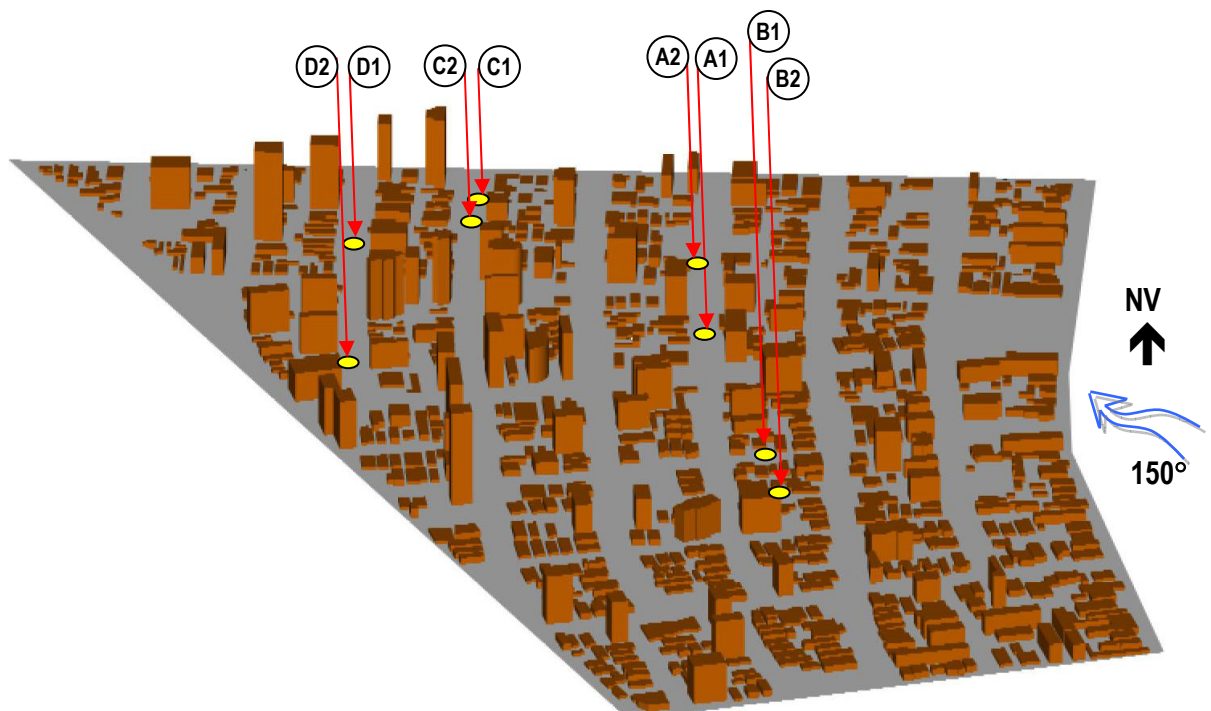


Figura 6.2: Figura de erosão, em 3 dimensões, para a direção do vento 150° - início.

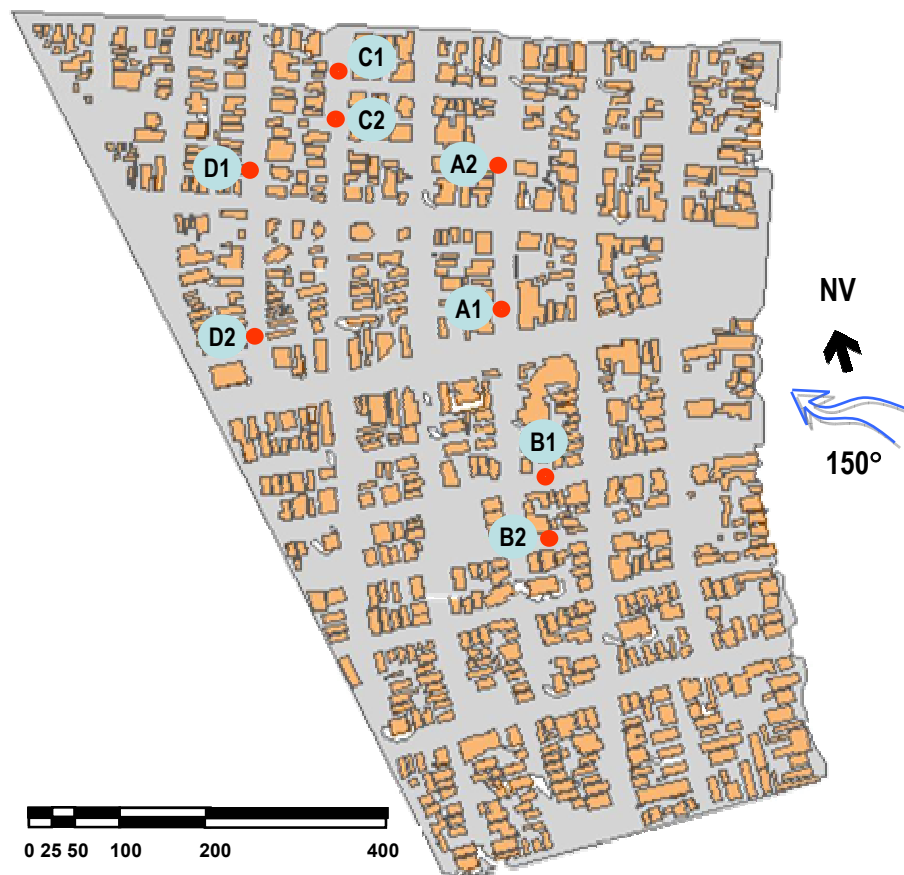


Figura 6.3: Figura de erosão para a direção do vento  $150^\circ$  -  $U_{ref} = 8,0\text{m/s}$ .

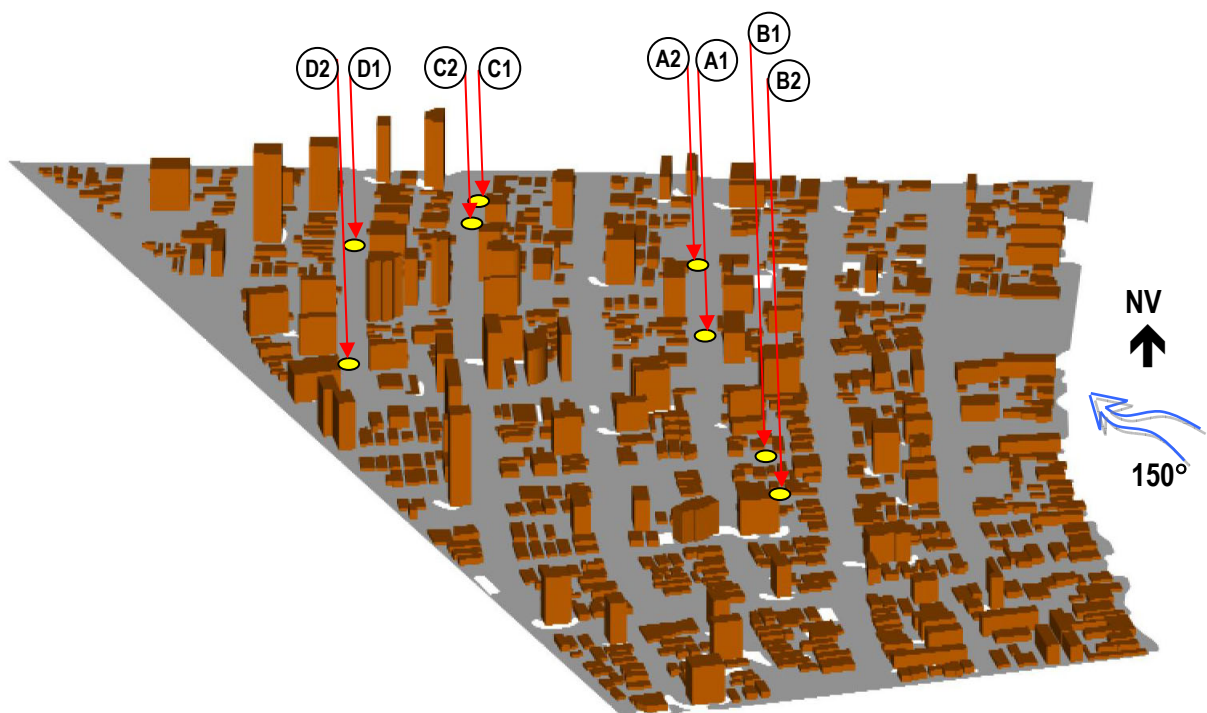


Figura 6.4: Figura de erosão, em 3 dimensões, para a direção do vento  $150^\circ$  -  $U_{ref} = 8,0\text{m/s}$ .



Figura 6.5: Figura de erosão para a direção do vento 150° -  $U_{ref} = 9,4\text{m/s}$ .

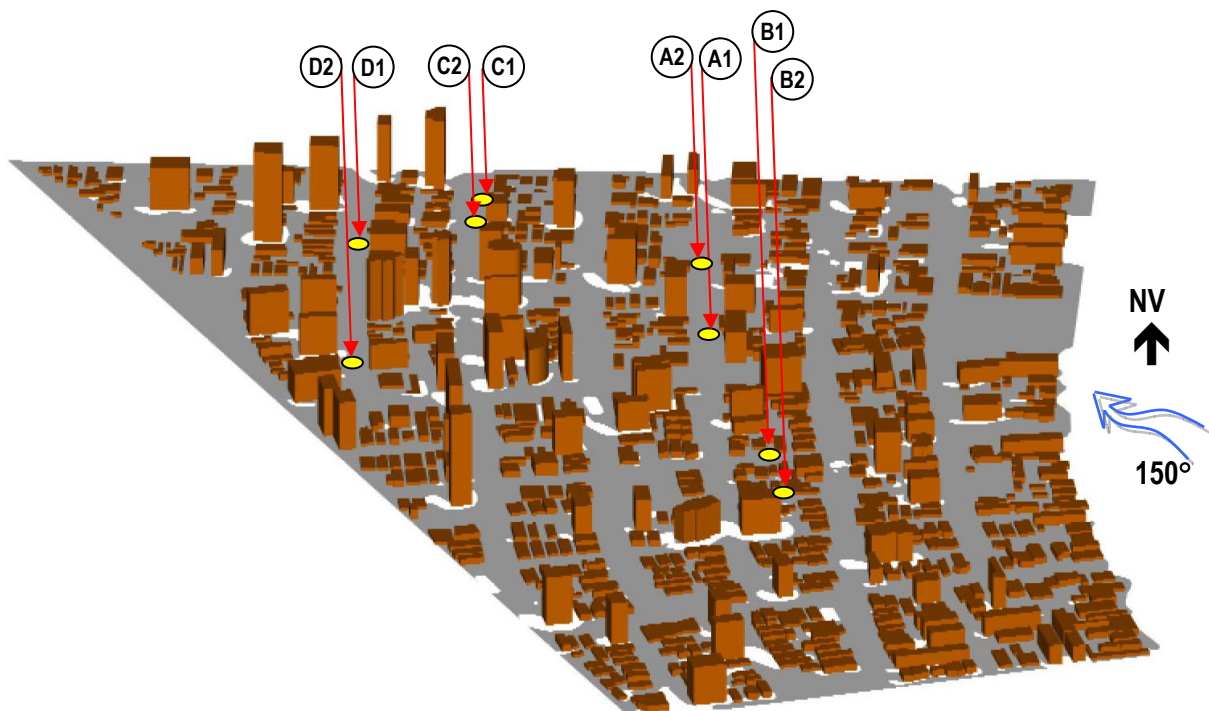


Figura 6.6: Figura de erosão, em 3 dimensões, para a direção do vento 150° -  $U_{ref} = 9,4\text{m/s}$ .



Figura 6.7: Figura de erosão para a direção do vento 150° -  $U_{ref} = 10,7\text{m/s}$ .

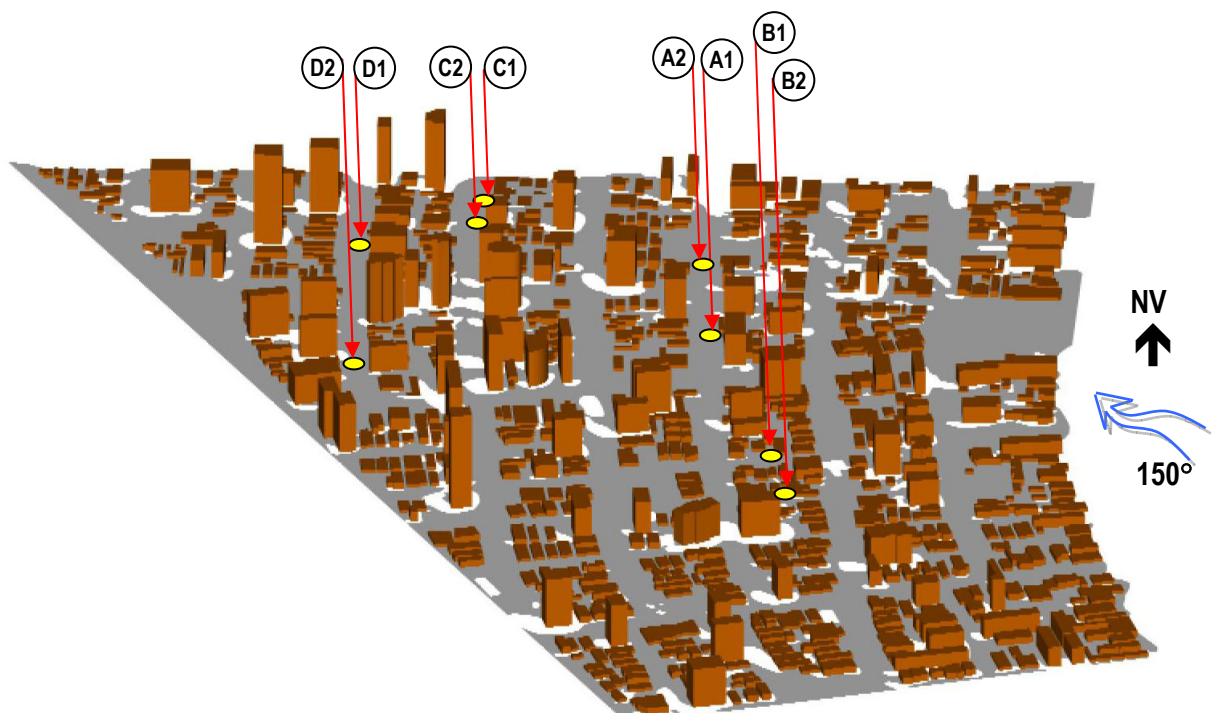


Figura 6.8: Figura de erosão, em 3 dimensões, para a direção do vento 150° -  $U_{ref} = 10,7\text{m/s}$ .



Figura 6.9: Figura de erosão para a direção do vento 150° -  $U_{ref} = 12,1\text{m/s}$ .

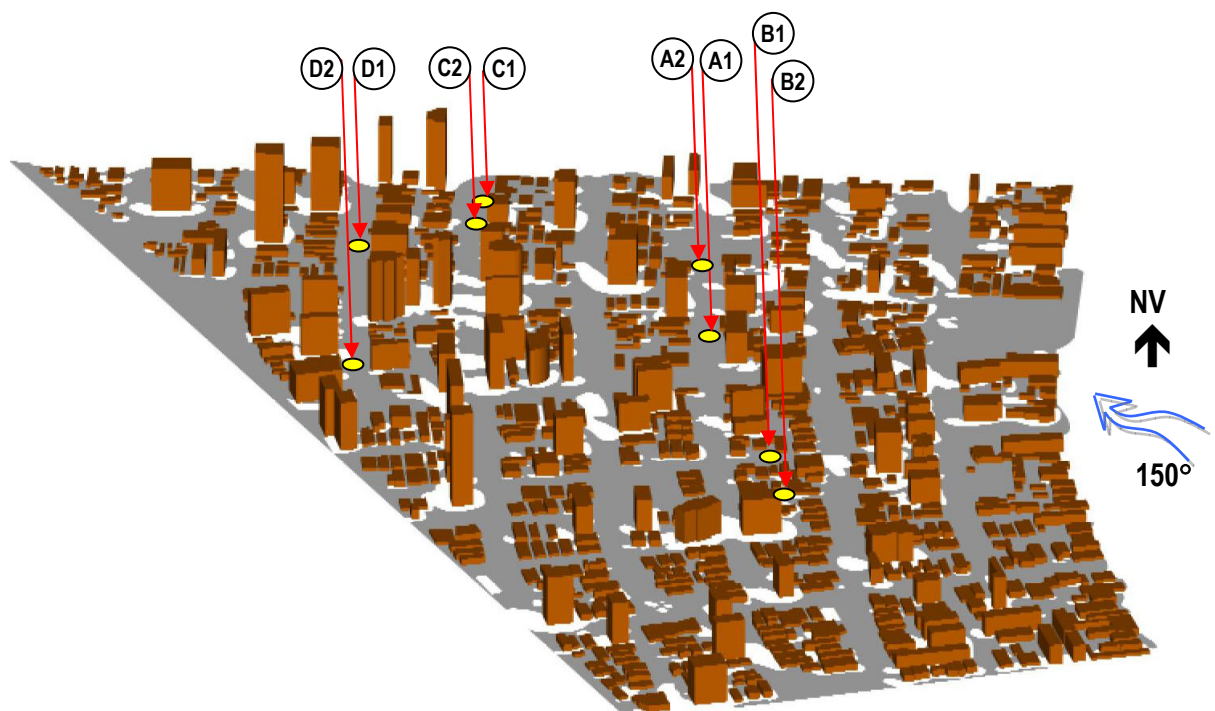


Figura 6.10: Figura de erosão, em 3 dimensões, para a direção do vento 150° -  $U_{ref} = 12,1\text{m/s}$ .





Figura 6.11: Figura de erosão para a direção do vento 150° -  $U_{ref} = 13,4\text{m/s}$ .

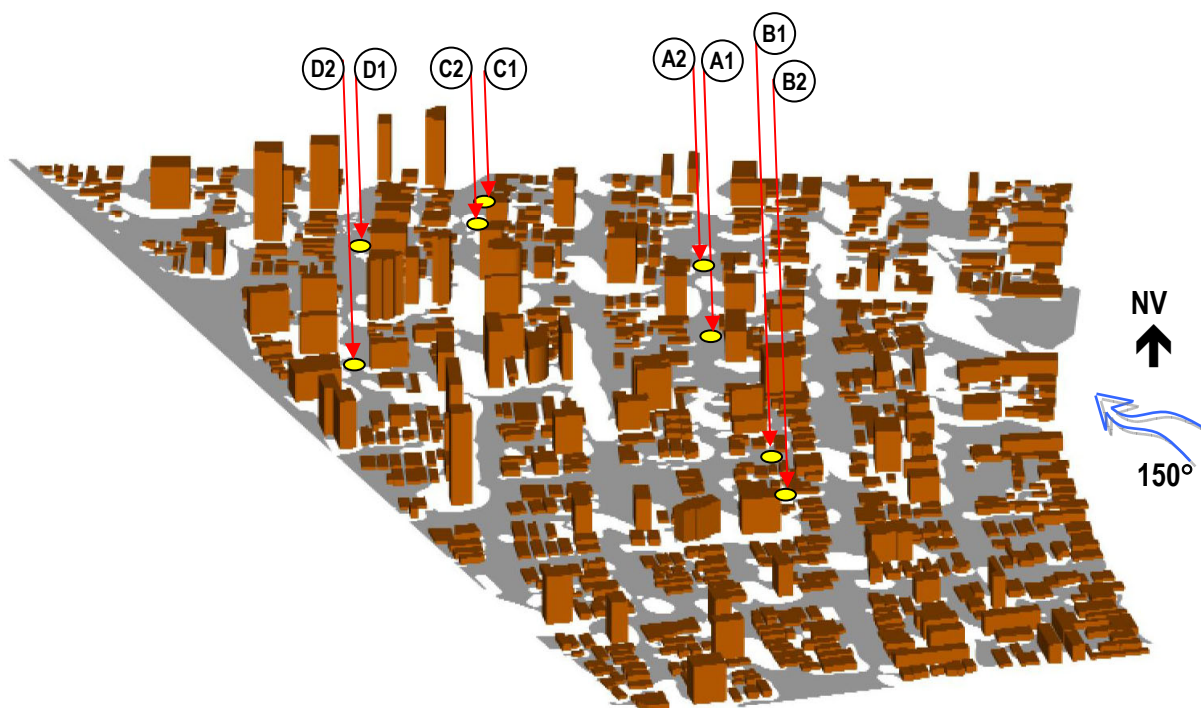


Figura 6.12: Figura de erosão, em 3 dimensões, para a direção do vento 150° -  $U_{ref} = 13,4\text{m/s}$ .



Figura 6.13: Figura de erosão para a direção do vento 150° -  $U_{ref} = 14,7\text{m/s}$ .

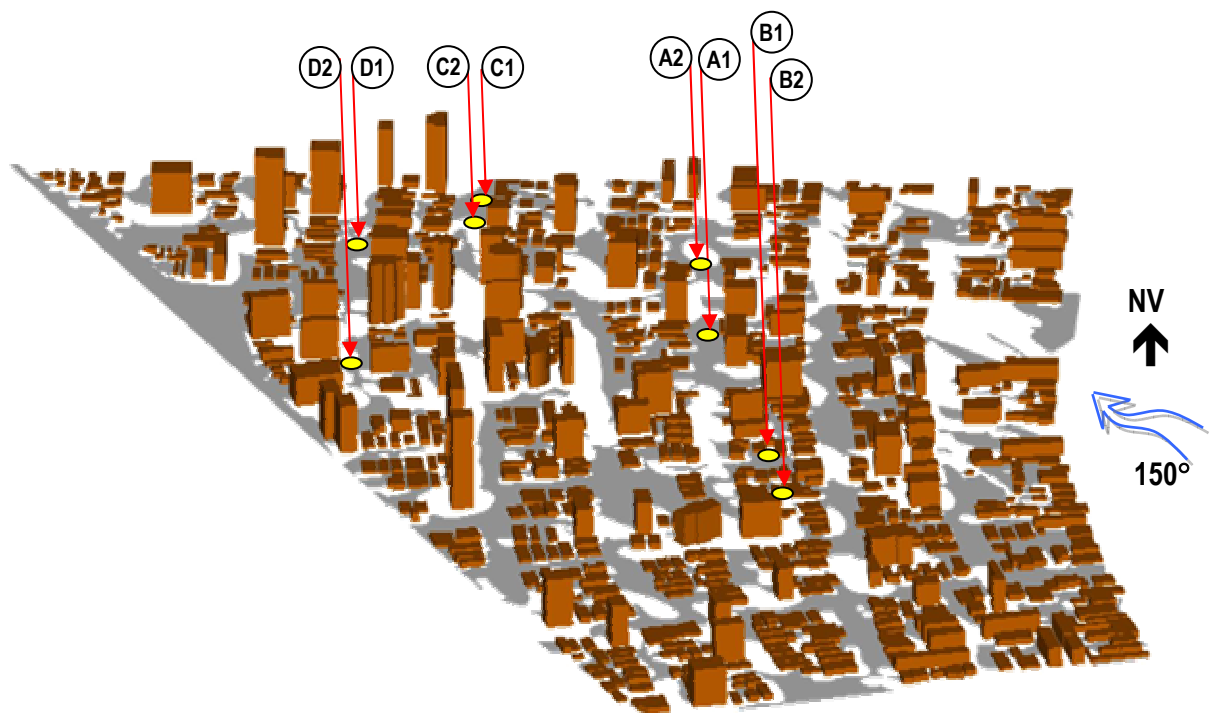


Figura 6.14: Figura de erosão, em 3 dimensões, para a direção do vento 150° -  $U_{ref} = 14,7\text{m/s}$ .

Com o vento incidindo a  $90^\circ$  e a 180rpm (FIG. 6.16 e 6.17), inicia-se a erosão nas bordas leste e norte da maquete e em torno de alguns edifícios com mais de quatro pavimentos, especialmente aqueles cuja maior face está orientada perpendicularmente à incidência do escoamento.

Essas erosões se intensificaram com o aumento da velocidade do vento, concentrando-se principalmente em torno dos edifícios mais altos. Mas só a partir da velocidade 300rpm (FIG. 6.25 e 6.26) é que se percebe o início do efeito de canalização nas avenidas Epitácio Pessoa e Mons. Odilon Coutinho, que também passa a ser percebido na R. José Augusto Trindade a partir da velocidade 330rpm (FIG. 6.26 e 6.27).

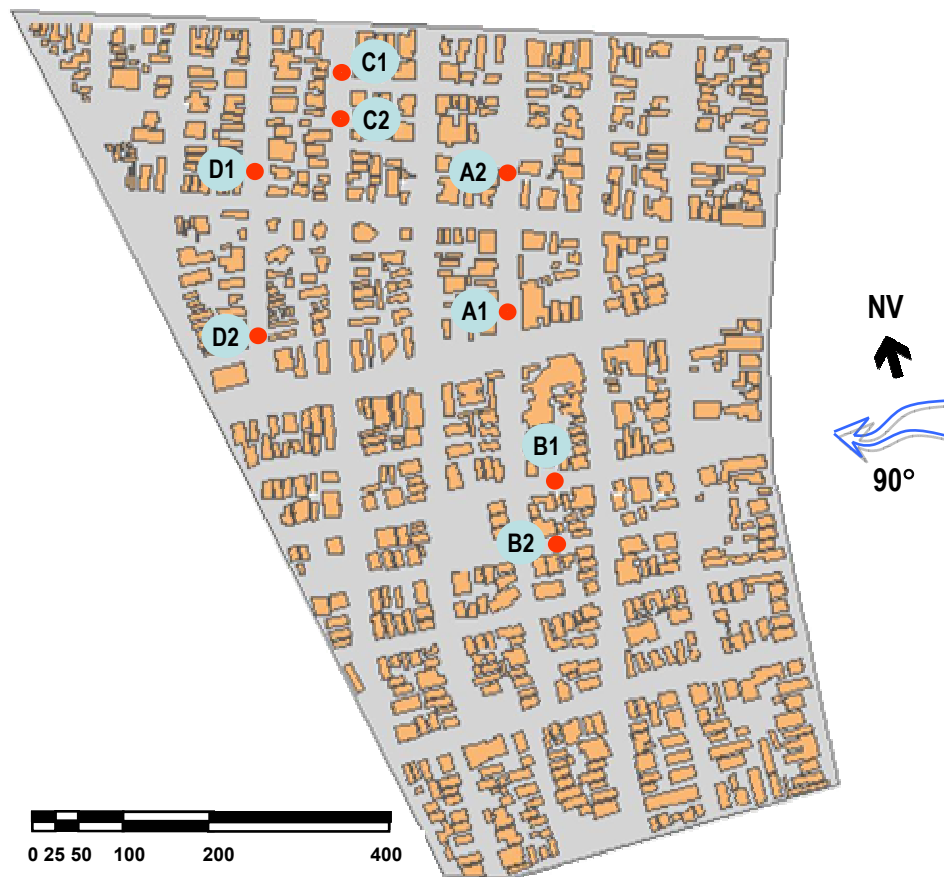


Figura 6.15: Figura de erosão para a direção do vento  $90^\circ$  - início.



Figura 6.16: Figura de erosão para a direção do vento 90° -  $U_{ref} = 8,0\text{m/s}$ .

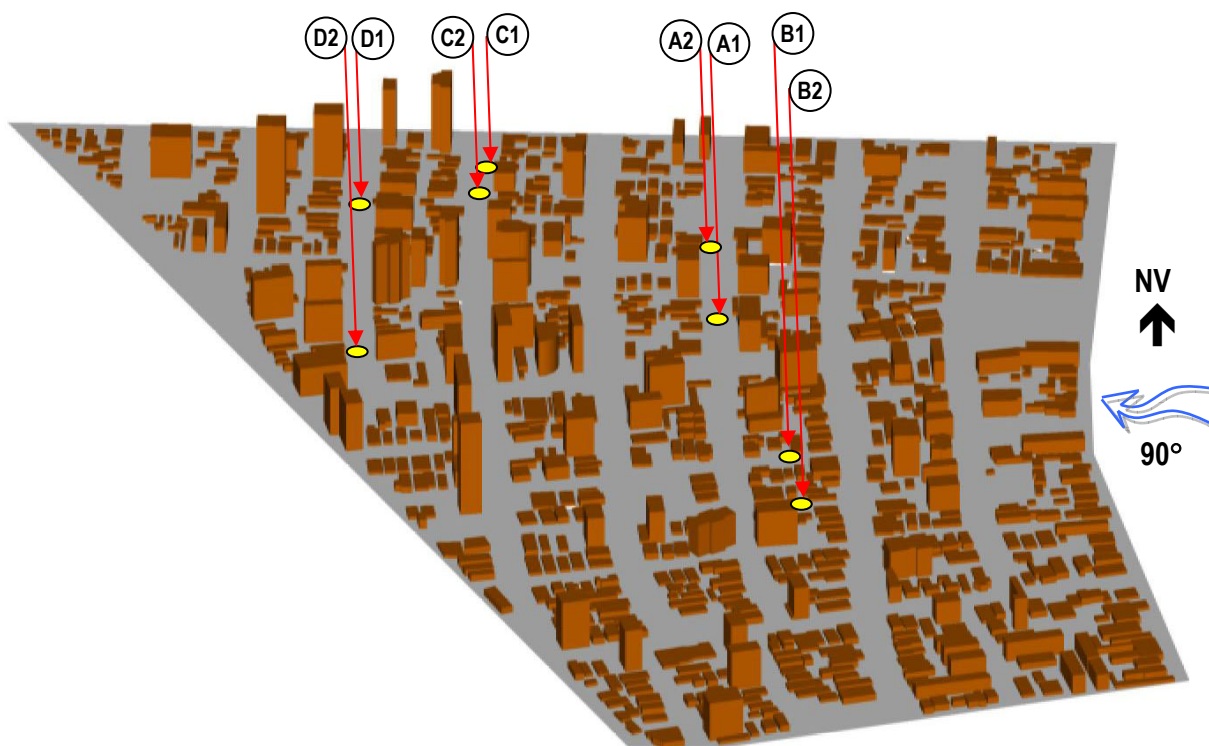


Figura 6.17: Figura de erosão, em 3 dimensões, para a direção do vento 90° -  $U_{ref} = 8,0\text{m/s}$ .

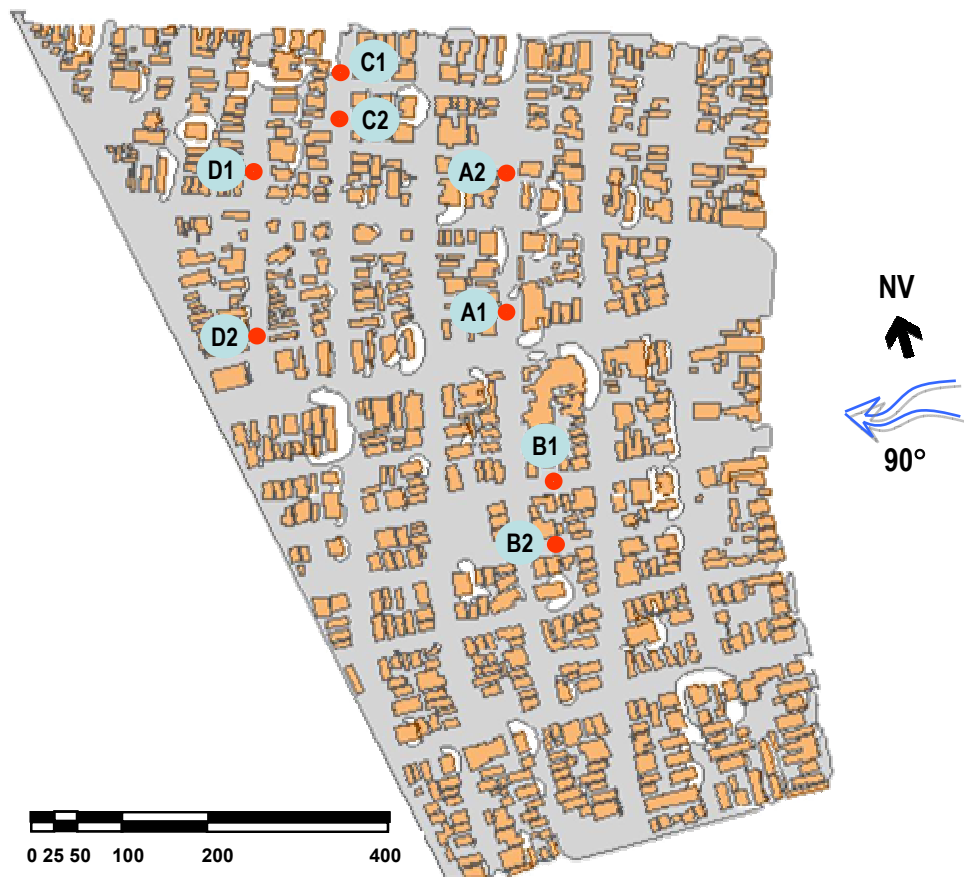


Figura 6.18: Figura de erosão para a direção do vento  $90^\circ$  -  $U_{ref} = 9,4\text{m/s}$ .

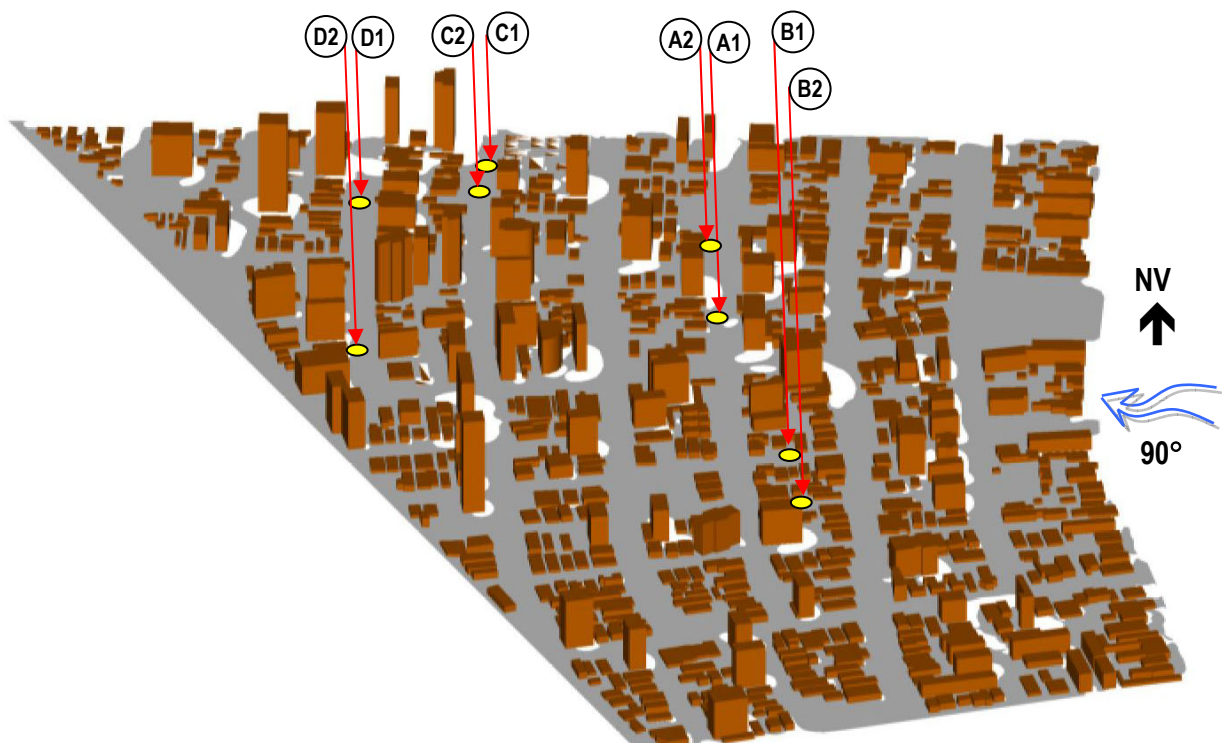


Figura 6.19: Figura de erosão, em 3 dimensões, para a direção do vento  $90^\circ$  -  $U_{ref} = 9,4\text{m/s}$ .



Figura 6.20: Figura de erosão para a direção do vento  $90^\circ$  -  $U_{ref} = 10,7\text{m/s}$ .

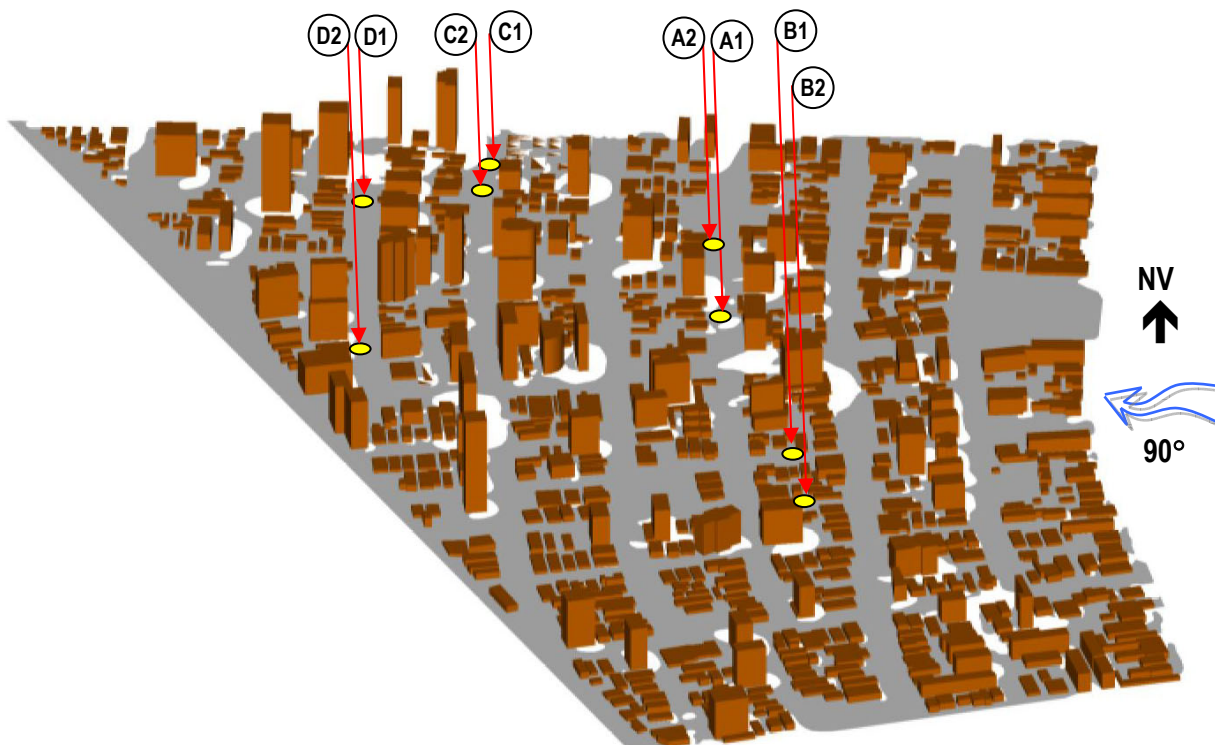


Figura 6.21: Figura de erosão, em 3 dimensões, para a direção do vento  $90^\circ$  -  $U_{ref} = 10,7\text{m/s}$ .



Figura 6.22: Figura de erosão para a direção do vento 90° -  $U_{ref} = 12,1\text{m/s}$ .

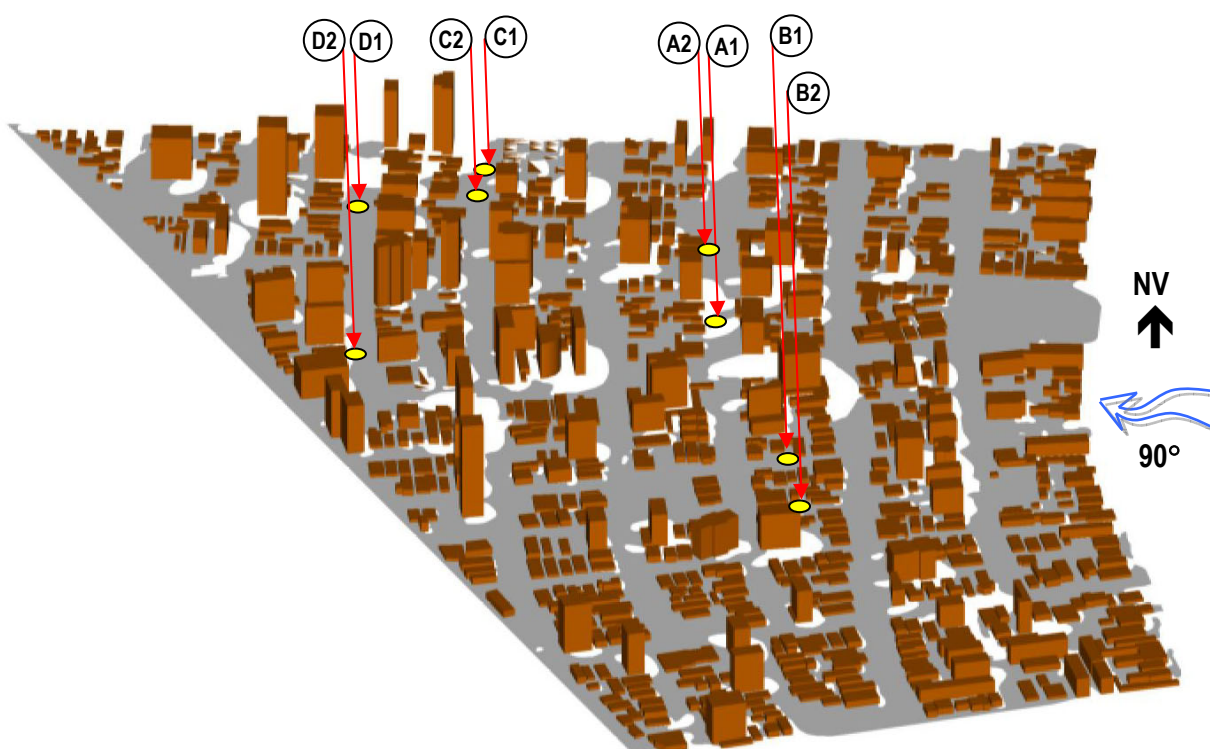


Figura 6.23: Figura de erosão, em 3 dimensões, para a direção do vento 90° -  $U_{ref} = 12,1\text{m/s}$ .

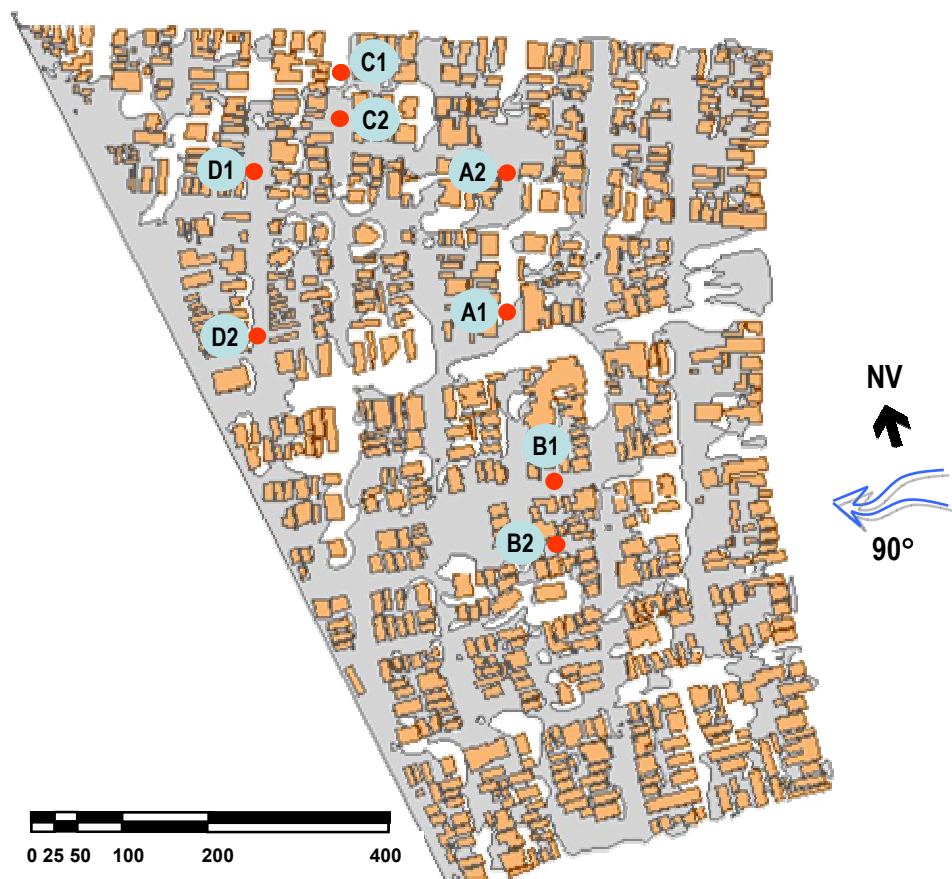


Figura 6.24: Figura de erosão para a direção do vento 90° -  $U_{ref} = 13,4\text{m/s}$ .

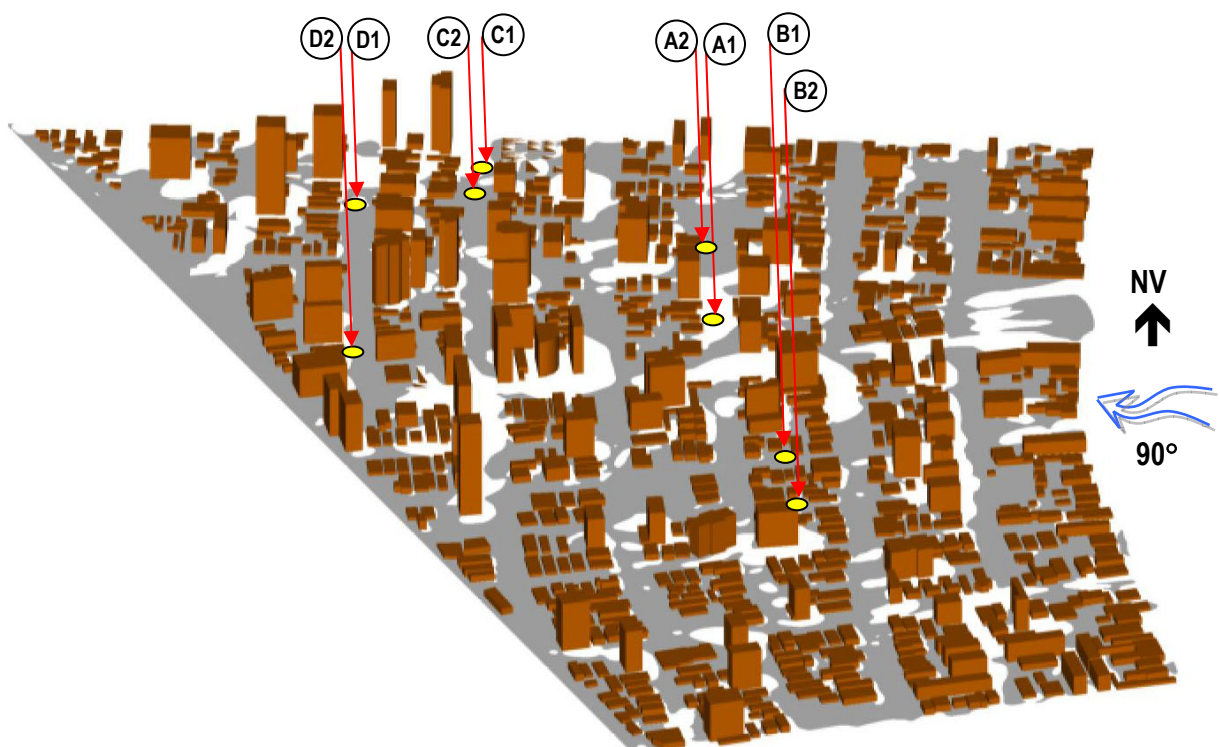


Figura 6.25: Figura de erosão, em 3 dimensões, para a direção do vento 90° -  $U_{ref} = 13,4\text{m/s}$ .





Figura 6.26: Figura de erosão para a direção do vento  $90^\circ$  -  $U_{ref} = 14,7\text{m/s}$ .

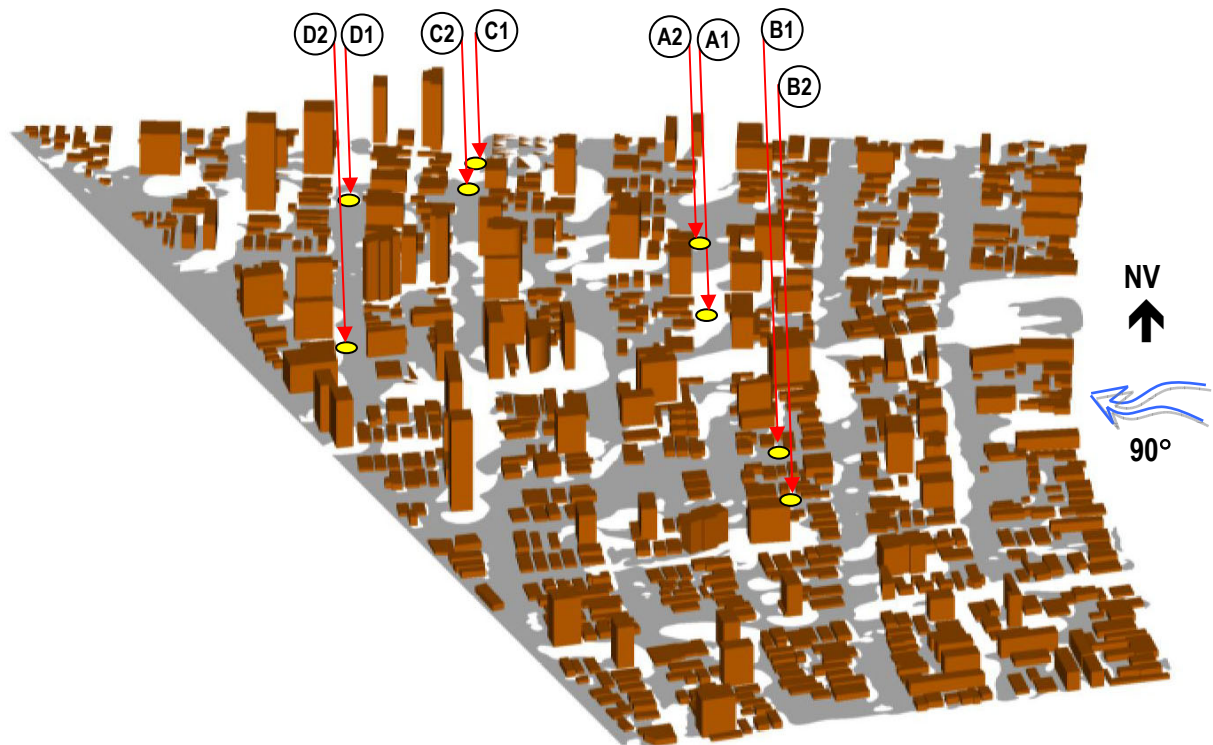


Figura 6.27: Figura de erosão, em 3 dimensões, para a direção do vento  $90^\circ$  -  $U_{ref} = 14,7\text{m/s}$ .

As áreas erodidas com ventos incidentes a 150° apresentaram-se mais dispersas do que quando o vento soprou a 90°. Observa-se que, para as velocidades mais baixas (de 8,0 e 9,4m/s), o percentual de área erodida foi superior para os ventos de 90°, passando a ser menor a partir de 10,7m/s, quando o desempenho da ventilação tornou-se melhor com os ventos incidentes a 150° (TAB. 6.1).

Tabela 6.1: Percentual de área erodida.

| Velocidade do vento (m/s) | Área erodida (%) |       |
|---------------------------|------------------|-------|
|                           | 90°              | 150°  |
| 8,0                       | 5,22             | 3,25  |
| 9,4                       | 12,47            | 10,35 |
| 10,7                      | 15,56            | 16,78 |
| 12,1                      | 22,75            | 24,39 |
| 13,4                      | 35,58            | 42,44 |
| 14,7                      | 43,64            | 52,18 |

A compreensão das diferenças de desempenho da porção urbana estudada quanto à ventilação repercutirá decisivamente para as condições de concentração e dispersão de calor e de poluentes. Quanto ao calor, os efeitos das diferentes condições de ventilação podem ser observados a partir das análises dos dados medidos em campo, apresentados no próximo capítulo, de maneira que será necessário reportar-se às figuras de erosão apresentadas neste capítulo para um melhor entendimento dos resultados verificados.

## 6.2 Perfis de camada limite atmosférica

A medição dos perfis de camada limite atmosférica no interior da malha urbana se destina à compreensão das alterações do escoamento do vento provocado pela rugosidade da superfície da cidade, onde a altura e o afastamento entre as edificações são determinantes.

Na área estuda nesta pesquisa foram feitas medições em quatro pontos ao longo da Av. Pres. Epitácio Pessoa (FIG. 6.28), que divide a área ao meio no sentido leste-oeste, considerando o vento incidente a 90°.



Figura 6.28: Indicação dos pontos de medição dos perfis de camada limite atmosférica.

Comparando os perfis de CLA medidos em cada ponto com o perfil de CLA para o terreno sem ocupação, percebe-se o quanto a ocupação existente reduz a velocidade do vento, principalmente nos níveis mais baixos (FIG. 6.29). No ponto P1 uma aceleração acentuada a partir da altura de dois pavimentos, restabelecendo um desenvolvimento mais uniforme a partir do 5º pavimento. No ponto P2 o perfil permanece estável até o 6º pavimento, sofrendo aceleração até o 8º pavimento, quando sofre nova transição, com aceleração acentuada até o 13º pavimento, retomando o desenvolvimento uniforme. No ponto P3 a velocidade é nula até o 2º pavimento e é acelerado acentuadamente até atingir a altura de cinco pavimentos, retomando o perfil normal. No ponto P4 o perfil de velocidade obteve comportamento uniforme até o 5º pavimento, a partir de quando o escoamento passou a ser acelerado. Em síntese, nas camadas mais baixas as velocidades formam maiores nos pontos P1 e P2, mas próximos do mar (origem dos ventos) e mais lentos nos pontos P3 e P4, que tiveram aceleração acentuada dos que os primeiros pontos a partir, aproximadamente, do 5º pavimento.

Os perfis verificados estão coerentes com o padrão de ocupação verificado, indicando que o vento sofre redução acentuada da velocidade nas porções inferiores, até o topo dos edifícios, quando passa por uma transição, aumentando a sua velocidade alguns metros acima das edificações.

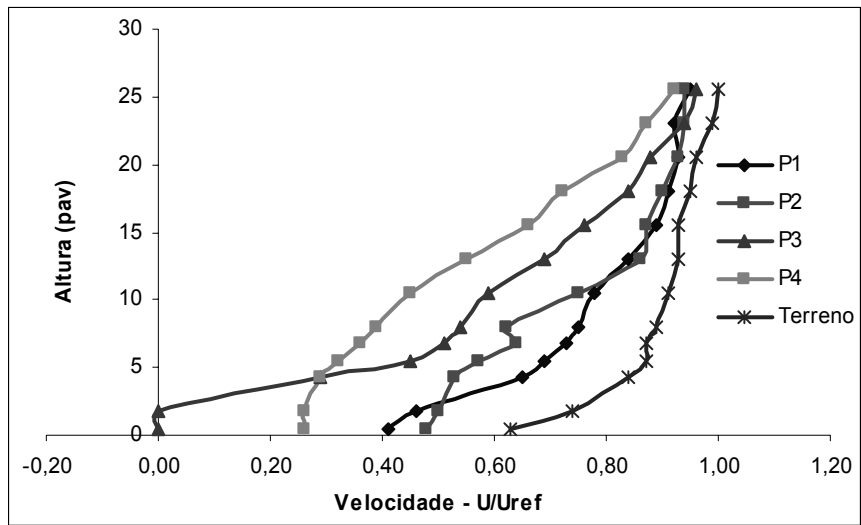


Figura 6.29: Perfil de camada limite atmosférica com vento a 90°.

# **Capítulo 7**

## **Análise de Dados e Discussão dos Resultados da Pesquisa de Campo**

---

Este capítulo destina-se à descrição dos pontos representativos da área estudada, onde foram realizadas as medições microclimáticas, à descrição e à discussão dos resultados das análises estatísticas dos dados medidos em campo.

## 7.1 Caracterização dos pontos de medição

### a) Pontos representativos da área observada

As medições microclimáticas foram realizadas em quatro pares de pontos (FIG. 7.1), cujas características foram anotadas em uma ficha-padrão elaborada para este fim e para facilitar a análise posterior (Apêndice A).

Os pontos A1 e A2 estão situados a 350m do mar, numa via asfaltada, com trânsito de veículos de média intensidade. O uso é diversificado, com a presença de restaurante, salão de beleza, pousada e academia de ginástica, além das habitações. A taxa de ocupação é de 42,7% e 43,8%, o índice de aproveitamento de 1,5 e 1,7 e o coeficiente de visão do céu de 60,2% e 61,1%.

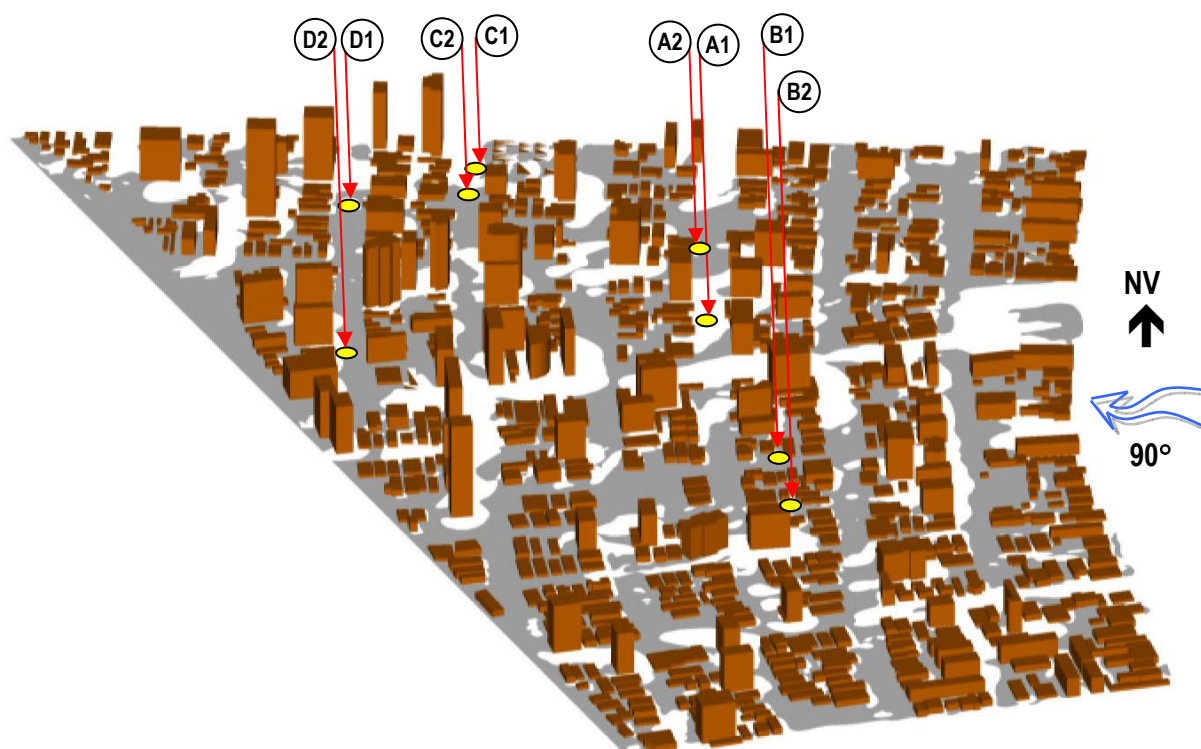


Figura 7.1: Vista aérea da área com a indicação dos pontos de medição.

Os pontos B1 e B2 estão situados numa porção próxima do mar, (aproximadamente 290m), em uma área com elevada taxa de ocupação (54,3% e 51,5%), baixo índice de aproveitamento (1,3 e 0,7) e fator de visão de céu alto (71,24% e 66,94%), configurando uma área de ocupação mais horizontalizada. As vias são pavimentadas com pedras de paralelepípedos, com pequeno fluxo de veículos e de pedestres. O uso no entorno é predominantemente residencial, com a presença de alguns estabelecimentos comerciais e instituições públicas, como uma delegacia e um edifício comercial.

Os pontos C1 e C2 estão situados em uma via asfaltada, com trânsito leve de veículos e pequeno de pedestre. Ficam a cerca de 550m do mar, numa área residencial, com índice de aproveitamento 1,0 e 1,1, taxa de ocupação de 46,9% e 46,3% e fator de visão do céu alto (70,02% e 69,36%).

Os pontos D1 e D2 estão situados a uma distância de aproximadamente 650m em relação ao mar, numa área com taxa de ocupação um pouco mais baixa (42,1% e 37,9%), índice de aproveitamento mais elevado (1,6 e 1,9) e com fator de visão do céu mais baixo do que no primeiro par (62,04% e 59,16%), indicando uma área mais verticalizada. A via onde se situam esses dois pontos também é pavimentada com paralelepípedos, sendo trafegada por pequenos fluxos de veículos e pedestres. O uso é residencial, observando-se apenas a presença de uma escola de nível básico.

#### **b) Estação de referência**

O monitoramento das condições ambientais dos pontos observados foi feito a partir da comparação dos dados ali medidos com os registrados numa estação meteorológica de referência situada no Aeroporto Internacional Castro Pinto, fora da zona urbana da cidade (Figura 4.3).

Como as medições em campo tiveram a duração de 1hora em cada turno, na estação de referência foram tomados os dados registrados às 8h e 9h (manhã), 14h e 15h (tarde) e 20h e 21h (noite). Para o cálculo da ilha de calor foi considerado o valor médio dos dois registros de temperatura do ar de cada turno.

### **7.2 Análise climática para o período de medição segundo o INPE/CPTEC**

De acordo com o Boletim de Monitoramento e Análise Climática para o mês de novembro de 2004 produzido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, quanto aos aspectos de grande escala na atmosfera global e nos oceanos tropicais, verificou-se que no campo da Radiação de Onda Longa (ROL), destacaram-se as anomalias positivas sobre o Nordeste da América do Sul, indicando

que a convecção esteve abaixo da média nessa região. Também notou-se a ocorrência de anomalia anticiclônica no leste da América do Sul, consistente com a atuação do jato em baixos níveis.

No campo do vento 850hPa, destacaram-se os ventos alísios menos intensos que a média entre 90°W até aproximadamente 150°W, o que é característico de anos de El Niño. No Atlântico, próximo à costa norte do Nordeste do Brasil, os alísios estiveram mais fracos, o que foi consistente com os desvios positivos de ROL.

Quanto aos aspectos climáticos e sinóticos, em novembro ainda chove muito pouco na maior parte da região Nordeste. Por esta razão, os baixos valores, observados desde o norte do Maranhão até Sergipe e o norte da Bahia, estiveram próximos da climatologia.

Em termos de perturbações atmosféricas percebeu-se pouca influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre a atividade convectiva na região, por esta ainda manter-se em posições ao norte, entre 5°N e 10°N.

### **7.3 Descrição e análise dos dados medidos em campo**

Para a análise climática urbana baseada no ritmo das variações do tempo, é necessário tomar como referência os fenômenos atmosféricos (em escala global e local) ocorridos no período do levantamento de dados, a fim de se identificar possíveis alterações rítmicas que possam modificar as relações entre as variáveis envolvidas no estudo em desenvolvimento. Para este fim, tomaram-se como referência mapas sinóticos de temperatura do ar e umidade relativa do ar<sup>9</sup> e registros horários de pressão atmosférica e de velocidade e direção do vento medidos no aeroporto local, e do boletim de monitoramento e análise climática para o período de medição.

Embora o período para a realização das medições (3 a 30 de novembro de 2004) tenha sido selecionado a partir de registros anteriores, tratados na forma de normais climatológicas, verificou-se que houve uma mudança significativa da direção e da velocidade do vento incidente na cidade de João Pessoa, medidos na estação meteorológica do Aeroporto Castro Pinto. Na primeira parte do período de medições, aproximadamente de 3/11 a 18/11, predominou a incidência dos ventos do quadrante sudeste, enquanto que na segunda parte predominaram os ventos de leste e nordeste.

A mudança de direção do vento predominante se refletiu no comportamento da velocidade do vento e na temperatura do ar. Percebeu-se que a velocidade do vento permaneceu mais elevada

---

<sup>9</sup> Os mapas sinóticos foram obtidos através do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, publicados no site [www.inmet.gov.br](http://www.inmet.gov.br) e [www.inpe.br](http://www.inpe.br).



quando o vento soprou de sudeste e a temperatura do ar se elevou quando os ventos passaram a soprar de leste e nordeste. Essas modificações têm a ver com o que foi dito no item 7.2.

Devido a essas condições, optou-se por apresentar a descrição e análises dos dados obtidos na aplicação da metodologia em quatro partes:

- a primeira parte foi destinada à realização de análises de correlação e de regressão linear múltipla diárias e por turno entre variáveis climáticas e elementos da morfologia urbana. Com o objetivo de identificar estratos de dias em que as correlações se diferenciaram em função da mudança de direção dos ventos incidentes na cidade, as correlações foram comparadas aos dados de velocidade e direção do vento, condição de céu e pressão atmosférica medidos no aeroporto local;
- na segunda parte foram apresentadas as análises de correlação e de regressão para cada ponto do transecto, separando-as em função dos estratos selecionados de acordo com as direções de vento predominantes no período de medição. As análises de correlações consideraram apenas as variáveis climáticas (temperatura e umidade relativa do ar, insolação, condição do céu e velocidade do vento), sendo feitas por turno (manhã, tarde e noite);
- a terceira parte apresentará as análises de correlação considerando, ao mesmo tempo, os dados medidos em todos os pontos do transecto em três turnos e em função dos estratos selecionados de acordo com as direções de vento verificadas. Neste caso, são acrescentados os elementos da morfologia urbana (taxa de ocupação, índice de aproveitamento, fator de visão do céu, distância em relação ao mar e tipo de pavimento das vias). Estas correlações servirão para as análises comparativas entre os pontos do transecto, objeto da quarta parte das análises;
- a última parte faz uma comparação entre os dados medidos na área estudada com os medidos na estação meteorológica de referência, a fim de se observarem modificações do clima local provocadas pela urbanização, e assim, identificar possíveis formações de ilha de calor e/ou de frio.

### **7.3.1 Análise de correlação diária considerando os dados medidos em todos os pontos e a direção do vento predominante**

As relações entre as variáveis climáticas, e entre estas e os elementos da forma urbana, ocorrem de maneira dinâmica e diferenciada ao longo do tempo. Este fato se explica pelas variações

do comportamento atmosférico, observadas na escala macroclimática, que determina o ritmo das variações do tempo.

Como o período de medição adotado nesta pesquisa foi relativamente extenso (28 dias), puderam-se identificar, através das análises diárias de correlação, mudanças significativas no comportamento das relações entre as variáveis envolvidas ao longo do período observado, influenciadas pelas variações no comportamento da atmosfera, e refletidas pela mudança da direção dos ventos dominantes.

As Tabelas 7.1, 7.2 e 7.3 comparam as correlações entre a temperatura do ar e todas as variáveis consideradas no estudo com os dados climáticos medidos na estação de referência. Nelas estão destacadas com linhas mais grossas as células correspondentes aos dias quando predominaram os ventos de sudeste. As demais células indicam os dias quando predominaram os ventos de leste e de nordeste, compondo, assim, os duas cadeias de tipos de tempo consideradas nas análises apresentadas nos itens seguintes.

#### **7.3.1.1 Manhã**

Durante o turno da manhã, a umidade relativa do ar foi a variável que mais freqüentemente se correlacionou (inversamente e significativamente) com a temperatura, em 11 dos 28 dias de medição (TAB. 7.1).

A temperatura também obteve correlação com a insolação (direta em 7 dias e inversa em 1 dia) e com a condição de céu (inversa em 9 dias).

Com os elementos da forma urbana, a temperatura do ar se relacionou mais freqüentemente com a taxa de ocupação, a distância do ponto de medição em relação ao mar e o fator de visão do céu. Nessas relações ficaram mais nítidas as influências provocadas pelas alterações na atmosfera, em especial, na incidência dos ventos. Verificou-se que na primeira metade do período de medição, quando os ventos incidiram com maior freqüência entre os rumos leste-sudeste e sudeste, as correlações entre a temperatura e as variáveis taxa de ocupação e distância em relação ao mar foram diretas. Quando a direção dos ventos mudou para os rumos entre leste e nordeste (entre 10/11 e 30/11), as correlações passaram a ser inversas.

Observando a Tabela 7.2 com mais atenção, verifica-se que neste mesmo período os valores dos índices das correlações entre a temperatura do ar e a velocidade do vento se elevaram (acima de  $r = 0,60$ ), embora a níveis baixos de significância, pelo menos para as bases estabelecidas neste trabalho ( $\text{sig.} \leq 0,05$ ).

Não houve correlação significativa entre a temperatura do ar e a pressão atmosférica registradas no período.

### **7.3.1.2 Tarde**

Alguns dos fenômenos observados pela manhã se intensificaram à tarde, especialmente o resfriamento da temperatura pela incidência dos ventos provenientes do quadrante nordeste (TAB. 7.2). Neste turno, a velocidade do vento e a umidade relativa do ar foram as variáveis que mais se correlacionaram com a temperatura do ar (9 e 8 vezes, respectivamente). No caso da velocidade do vento, essas correlações se intensificaram, como dito anteriormente, com a mudança da direção dos ventos incidentes (entre 18/11 e 30/11), mesmo com a redução das velocidades.

O elemento da forma urbana que mais se correlacionou com a temperatura neste turno foi o tipo de pavimento (15 vezes), indicando que o piso de asfalto tende a favorecer a elevação da temperatura do ar. No entanto, observa-se que, no período mencionado em que os ventos mudaram de direção, as correlações entre o tipo de pavimento e a temperatura não foram significativas e o fator de visão do céu passa a exercer maior influência no comportamento térmico do ambiente.

É importante notar que os dias em que ocorreram as correlações significativas entre o fator de visão do céu e a temperatura são os mesmos em que se verificaram as correlações com a velocidade do vento, ratificando a importância da orientação da forma urbana em relação aos ventos dominantes.

### **7.3.1.3 Noite**

As correlações diminuíram de intensidade à noite, sendo mais freqüentes entre a temperatura do ar e a velocidade do vento (TAB. 7.3), também no período em que os ventos incidiram predominantemente nos rumos entre leste e leste-nordeste (19, 21, 23, 27, 28 e 30/11).

Os resultados das correlações diárias aqui apresentados mostram bem o quanto a forma urbana – principalmente no que se refere à orientação da sua malha e das edificações – interfere nos padrões de escoamento de vento, e, em conseqüência, no comportamento térmico do ambiente urbano. À noite, no primeiro período de medições, ocorreu uma elevada freqüência de calmaria. Dessa maneira, a ventilação exerceu maior influência nas variações da temperatura do ar no segundo período, observada pelo aumento dos valores dos índices de correlação.



Tabela 7.2: Índices de correlação entre a temperatura do ar e variáveis climáticas e urbanas comparados com dados climáticos medidos no aeroporto local à tarde.

| DIA        | CORRELAÇÕES COM A TEMPERATURA DO AR |          |         |          |        |          |          |         |        |       | VARIÁVEIS MEDIDAS NA ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA |       |           |      |  |  |  |
|------------|-------------------------------------|----------|---------|----------|--------|----------|----------|---------|--------|-------|--|-------|-----------|------|--|--|--|
|            | UR                                  | VV       | INSOL   | CEU      | TO     | IA       | FVC      | PAVIM   | DISMAR | TEMP  | VV (Km/h)                                  | DV    | CÉU       | PA   |  |  |  |
| 03/11/2004 | -0,636                              | -0,683   | 0,514   | -0,334   | -0,047 | -0,060   | 0,030    | 0,927** | -0,374 | ND    | ND   | ND    | ND        | ND   |  |  |  |
| 04/11/2004 | -0,734*                             | -0,873** | 0,797*  | -0,573   | 0,085  | -0,269   | -0,090   | 0,892** | -0,435 | ND    | SE   | 26    | P. Nubl.  | 1012 |  |  |  |
| 05/11/2004 | 0,236                               | -0,545   | 0,522   | (a)      | -0,243 | 0,109    | -0,184   | 0,867** | 0,256  | ND    | SE   | 20    | Claro     | 1012 |  |  |  |
| 06/11/2004 | -0,706                              | -0,497   | 0,510   | (a)      | -0,266 | -0,069   | -0,018   | 0,973** | 0,089  | ND    | E-SE                                       | 22    | Claro     | 1011 |  |  |  |
| 07/11/2004 | -0,392                              | -0,136   | -0,564  | 0,827*   | -0,055 | -0,072   | -0,085   | 0,827*  | -0,214 | ND    | ESE  | 30-24 | P. Nubl.  | 1011 |  |  |  |
| 08/11/2004 | -0,355                              | -0,407   | 0,353   | (a)      | 0,093  | -0,470   | -0,441   | 0,779*  | 0,044  | 31-30 | SE-SE                                      | 33-33 | Pr. Nubl. | 1011 |  |  |  |
| 09/11/2004 | -0,584                              | -0,741*  | 0,200   | -0,499   | -0,246 | -0,247   | -0,195   | 0,784*  | 0,366  | 30-29 | SSE-SSE                                    | 24-28 | Pr. Nubl. | 1011 |  |  |  |
| 10/11/2004 | -0,953**                            | -0,335   | 0,422   | -0,622   | 0,009  | -0,126   | -0,231   | 0,936** | -0,175 | 30-30 | SE-SE                                      | 32-22 | P. Nubl.  | 1011 |  |  |  |
| 11/11/2004 | -0,557                              | -0,500   | 0,468   | -0,732*  | -0,179 | -0,186   | -0,126   | 0,910** | 0,080  | 31-31 | ESSE-ESE                                   | 24-24 | Pr. Claro | 1010 |  |  |  |
| 12/11/2004 | -0,108                              | -0,379   | 0,182   | -0,610   | 0,567  | -0,780*  | -0,856** | 0,401   | -0,086 | 26-28 | SE-E                                       | 15-19 | Pr. Nubl. | 1010 |  |  |  |
| 13/11/2004 | -0,046                              | -0,478   | 0,221   | -0,048   | 0,078  | -0,177   | -0,315   | 0,811*  | -0,049 | 30-30 | E-E  | 19-19 | P. Nubl.  | 1010 |  |  |  |
| 14/11/2004 | -0,268                              | -0,026   | 0,493   | -0,503   | -0,231 | -0,046   | 0,193    | 0,826*  | -0,195 | 31-30 | ESE-ESE                                    | 20-22 | P. Nubl.  | 1011 |  |  |  |
| 15/11/2004 | -0,856**                            | -0,495   | 0,448   | -0,596   | 0,293  | -0,639   | -0,618   | 0,614   | -0,003 | 31-30 | SSE-SE                                     | 24-30 | P. Nubl.  | 1012 |  |  |  |
| 16/11/2004 | -0,743*                             | -0,602   | 0,276   | (a)      | -0,280 | -0,190   | -0,025   | 0,896** | 0,172  | 30-30 | ESE-ESE                                    | 22-19 | P. Nubl.  | 1013 |  |  |  |
| 17/11/2004 | -0,235                              | -0,653   | -0,014  | -0,530   | 0,004  | -0,158   | -0,517   | 0,567   | 0,355  | 31-30 | E-ESE                                      | 13-17 | P. Nubl.  | 1013 |  |  |  |
| 18/11/2004 | -0,471                              | -0,763*  | 0,061   | 0,128    | 0,525  | -0,302   | -0,810*  | 0,185   | -0,065 | 30-29 | E-ESE                                      | 17-16 | P. Nubl.  | 1012 |  |  |  |
| 19/11/2004 | -0,751*                             | -0,798*  | 0,175   | (a)      | 0,296  | -0,590   | -0,724*  | 0,519   | 0,193  | 32-31 | ENE-ENE                                    | 15-15 | P. Nubl.  | 1011 |  |  |  |
| 20/11/2004 | -0,662                              | -0,811*  | 0,261   | (a)      | 0,579  | -0,932** | -0,739*  | 0,143   | -0,115 | 30-30 | E-ENE                                      | 15-13 | P. Nubl.  | 1011 |  |  |  |
| 21/11/2004 | -0,395                              | -0,818*  | 0,755*  | (a)      | 0,801* | -0,638   | -0,983** | -0,023  | -0,203 | 31-30 | NE-NE                                      | 13-17 | P. Nubl.  | 1012 |  |  |  |
| 22/11/2004 | -0,716*                             | -0,678   | 0,228   | -0,446   | 0,239  | -0,516   | -0,683   | 0,545   | 0,205  | 30-30 | E-E  | 15-17 | P. Nubl.  | 1011 |  |  |  |
| 23/11/2004 | -0,637                              | -0,909** | -0,197  | -0,412   | 0,511  | -0,665   | -0,890** | 0,229   | 0,158  | 30-30 | E-E  | 17-19 | P. Nubl.  | 1012 |  |  |  |
| 24/11/2004 | 0,112                               | -0,495   | -0,141  | (a)      | -0,220 | -0,072   | -0,255   | 0,810*  | 0,341  | 30-29 | ESE-SE                                     | 24-26 | Pr. Nubl. | 1011 |  |  |  |
| 25/11/2004 | -0,929**                            | -0,581   | 0,904** | -0,880** | 0,222  | -0,294   | -0,521   | 0,821*  | -0,122 | 30-29 | SE-SE                                      | 19-19 | Pr. Nubl. | 1012 |  |  |  |
| 26/11/2004 | 0,236                               | -0,703   | -0,286  | (a)      | 0,377  | -0,413   | -0,819*  | 0,394   | 0,161  | 30-29 | E-E  | 19-19 | P. Nubl.  | 1011 |  |  |  |
| 27/11/2004 | -0,732*                             | -0,822*  | 0,505   | -0,265   | 0,446  | -0,818*  | -0,673   | 0,293   | 0,039  | 31-30 | ENE-ENE                                    | 13-17 | P. Nubl.  | 1010 |  |  |  |
| 28/11/2004 | -0,706                              | -0,767*  | 0,284   | 0,090    | 0,650  | -0,484   | -0,896** | 0,194   | -0,128 | 31-30 | E-ENE                                      | 20-17 | P. Nubl.  | 1010 |  |  |  |
| 29/11/2004 | -0,143                              | -0,273   | 0,893** | -0,796*  | 0,291  | -0,604   | -0,708*  | 0,544   | 0,181  | 30-30 | E-E  | 19-20 | Pr. Nubl. | 1012 |  |  |  |
| 30/11/2004 | -0,288                              | -0,649   | 0,259   | -0,240   | 0,262  | -0,419   | -0,605   | 0,719*  | 0,019  | 30-29 | ENE-ENE                                    | 19-15 | Pr. Nubl. | 1010 |  |  |  |

\* Correlação significativa ao nível de 0,05; \*\* Correlação significativa ao nível de 0,01

UR – Umidade relativa do ar; VV – Velocidade do vento; INSOL – Insolação; CÉU – Condição do céu; TO – Taxa de ocupação; IA – Índice de aproveitamento; FVC – Obstrução do céu; PAVIM – Tipo de pavimento; DISMAR – Distância em relação ao mar; VVref – Velocidade do vento medida na estação de referência às 14h e às 15h; DV – Direção do vento medida na estação de referência às 14h e às 15h; PA – Pressão atmosférica.

(a) – No período observado não houve variação da variável que permitisse identificar alguma correlação com a temperatura do ar; ND – Dado não disponível.

As células destacadas com a cor cinza identificam as correlações mais fortes relacionadas, também, com a direção do vento predominante.

Tabela 7.3: Índices de correlação entre a temperatura do ar e variáveis climáticas e urbanas comparados com dados climáticos medidos no aeroporto local à noite.

| DIA        | CORRELAÇÕES COM A TEMPERATURA DO AR |          |        |        |        |        |         |        |         |       | VARIÁVEIS MEDIDAS NA ESTAÇÃO REFERÊNCIA |             |           |       |  |  |
|------------|-------------------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|-------|---|-------------|-----------|-------|--|--|
|            | UR                                  | VV       | CEU    | DENSID | TO     | IA     | FVC     | PAVIM  | DISMAR  | TEMP  | VV (Km/h)                               | DV          | CÉU       | PA    |  |  |
| 03/11/2004 | 0,080                               | -0,323   | (a)    | -0,117 | -0,105 | -0,140 | 0,148   | 0,222  | -0,106  | ND    | SE                                      | ND          | ND        | ND    |  |  |
| 04/11/2004 | -0,599                              | -0,337   | (a)    | 0,046  | -0,238 | 0,033  | -0,288  | 0,447  | 0,552   | ND    | S                                       | 10          | Claro     | 10/14 |  |  |
| 05/11/2004 | 0,130                               | -0,510   | (a)    | -0,220 | 0,047  | -0,250 | -0,375  | 0,378  | 0,233   | ND    | ND                                      | Calmo       | ND        | 10/13 |  |  |
| 06/11/2004 | -0,694                              | 0,088    | 0,061  | -0,384 | -0,140 | -0,409 | -0,045  | 0,000  | 0,316   | ND    | SE                                      | 18          | P. Nubl.  | 10/12 |  |  |
| 07/11/2004 | 0,057                               | 0,076    | 0,159  | -0,304 | 0,591  | -0,291 | -0,378  | 0,092  | -0,747* | ND    | ESE                                     | 22-15       | P. Nubl.  | 10/14 |  |  |
| 08/11/2004 | -0,361                              | 0,157    | (a)    | -0,309 | -0,001 | -0,285 | -0,045  | 0,732* | -0,039  | 25-25 | S                                       | 7-Calmo     | Estável   | 10/14 |  |  |
| 09/11/2004 | -0,253                              | 0,626    | (a)    | -0,402 | 0,046  | -0,411 | 0,084   | 0,201  | -0,262  | 24-24 | ESE                                     | 4--Calmo    | Pr. Claro | 10/15 |  |  |
| 10/11/2004 | 0,228                               | -0,167   | (a)    | 0,353  | -0,535 | 0,346  | 0,114   | 0,338  | 0,672   | 26-25 | SE-SSE                                  | 15-9        | P. Nubl.  | 10/14 |  |  |
| 11/11/2004 | -0,838**                            | -0,298   | (a)    | 0,350  | -0,657 | 0,336  | 0,171   | 0,000  | 0,958** | 25-24 | ESE-ESE                                 | 19-9        | Pr. Nubl. | 10/13 |  |  |
| 12/11/2004 | -0,954**                            | -0,054   | (a)    | -0,427 | 0,535  | -0,406 | -0,354  | 0,611  | -0,806* | 25-25 | ND                                      | Calmo-Calmo | P. Nubl.  | 10/13 |  |  |
| 13/11/2004 | -0,330                              | -0,248   | -0,154 | -0,600 | 0,745* | -0,588 | -0,788* | 0,266  | -0,492  | 26-26 | ESE                                     | Calmo-9     | Estável   | 10/12 |  |  |
| 14/11/2004 | 0,847**                             | 0,172    | 0,000  | 0,196  | -0,275 | 0,175  | 0,322   | 0,000  | 0,038   | 26-26 | SE-SE                                   | 17-15       | Pr. Claro | 10/14 |  |  |
| 15/11/2004 | 0,092                               | -0,131   | 0,088  | 0,064  | -0,213 | 0,034  | 0,288   | 0,066  | -0,050  | 25-25 | SE                                      | Calmo-7     | Pr. Claro | 10/15 |  |  |
| 16/11/2004 | 0,629                               | -0,321   | 0,281  | -0,012 | 0,050  | -0,029 | -0,055  | 0,209  | -0,271  | 25-25 | ND                                      | Calmo-Calmo | Pr. Claro | 10/15 |  |  |
| 17/11/2004 | 0,217                               | -0,677   | (a)    | -0,261 | 0,129  | -0,250 | -0,221  | 0,076  | -0,036  | 25-25 | SE                                      | 14-Calmo    | Estável   | 10/14 |  |  |
| 18/11/2004 | 0,203                               | -0,614   | 0,338  | -0,581 | 0,484  | -0,572 | -0,606  | -0,084 | -0,120  | 27-26 | ESE                                     | 9-Calmo     | Pr. Claro | 10/15 |  |  |
| 19/11/2004 | 0,522                               | -0,715*  | 0,298  | -0,592 | 0,548  | -0,622 | -0,452  | -0,258 | -0,283  | 26-26 | ENE-ENE                                 | 7-7         | Estável   | 10/13 |  |  |
| 20/11/2004 | 0,155                               | -0,668   | 0,265  | -0,395 | 0,543  | -0,406 | -0,728* | 0,229  | -0,204  | 26-26 | NE-ENE                                  | 6-7         | Estável   | 10/14 |  |  |
| 21/11/2004 | 0,553                               | -0,882** | (a)    | -0,467 | 0,440  | -0,469 | -0,523  | 0,000  | -0,183  | 27-26 | ENE-ENE                                 | 9-11        | Pr. Claro | 10/14 |  |  |
| 22/11/2004 | 0,059                               | -0,415   | 0,385  | -0,454 | 0,489  | -0,441 | -0,466  | 0,385  | -0,554  | 27-26 | E-E                                     | 9-7         | P. Nubl.  | 10/14 |  |  |
| 23/11/2004 | 0,049                               | -0,766*  | (a)    | -0,222 | -0,015 | -0,225 | -0,525  | 0,338  | 0,486   | 26-26 | E                                       | 6-Calmo     | Estável   | 10/15 |  |  |
| 24/11/2004 | 0,667                               | 0,197    | (a)    | -0,173 | 0,456  | -0,178 | -0,271  | -0,227 | -0,451  | 26-25 | SE                                      | Calmo-7     | Estável   | 10/14 |  |  |
| 25/11/2004 | 0,357                               | 0,037    | 0,086  | -0,074 | 0,047  | -0,080 | -0,074  | 0,086  | -0,159  | 26-ND | SE                                      | 15-ND       | P. Nubl.  | 10/11 |  |  |
| 26/11/2004 | -0,009                              | 0,151    | (a)    | 0,007  | -0,114 | -0,017 | 0,021   | 0,000  | 0,108   | ND    | ND                                      | ND          | ND        | ND    |  |  |
| 27/11/2004 | 0,293                               | -0,741*  | -0,320 | -0,278 | 0,360  | -0,281 | -0,455  | 0,000  | -0,152  | 27-27 | E-E                                     | 13-9        | P. Nubl.  | 10/13 |  |  |
| 28/11/2004 | 0,522                               | -0,794*  | 0,778* | -0,682 | 0,451  | -0,692 | -0,702  | 0,385  | -0,053  | 27-27 | ESE-E                                   | 13-15       | P. Nubl.  | 10/12 |  |  |
| 29/11/2004 | 0,261                               | -0,638   | (a)    | -0,306 | 0,412  | -0,324 | -0,465  | 0,077  | -0,228  | 27-27 | E-E                                     | 7-11        | P. Nubl.  | 10/12 |  |  |
| 30/11/2004 | -0,265                              | -0,855** | (a)    | -0,379 | 0,536  | -0,386 | -0,517  | -0,158 | -0,314  | 26-25 | E                                       | Calmo-4     | Estável   | 10/12 |  |  |

\* Correlação significativa ao nível de 0,05; \*\* Correlação significativa ao nível de 0,01

UR – Umidade relativa do ar; VV – Velocidade do vento; INSOL – Insolação; CÉU – Condição do céu; TO – Taxa de ocupação; IA – Índice de aproveitamento; FVC – Obstrução do céu; PAVIM – Tipo de pavimento; DISMAR – Distância em relação ao mar; VVref – Velocidade do vento medida na estação de referência às 20h e às 21h; DV – Direção do vento medida na estação de referência às 20h e às 21h; PA – Pressão atmosférica.

(a) – No período observado não houve variação da variável que permitisse identificar alguma correlação com a temperatura do ar.

ND – Dado não disponível.

### 7.3.2 Análise de correlação e regressão em cada ponto

Nas análises de correlação e de regressão feitas para cada ponto observado só foram consideradas as variáveis que se modificam ao longo do tempo de medição. Assim, as variáveis relativas à forma urbana – índice de aproveitamento, taxa de ocupação, fator de visão do céu, distância em relação ao mar e tipo de pavimento da rua – só foram consideradas para efeito de discussão teórica dos resultados e nas análises comparativas dos pontos, já que neste caso elas se modificam no espaço, ou seja, em cada ponto elas têm características específicas. Em todos os casos, a temperatura do ar foi considerada a variável dependente e as demais, independentes.

Para melhor compreensão, os resultados dessas análises estão apresentados por turno, de maneira a possibilitar a observação das mudanças verificadas ao longo do tempo e em função da mudança de direção do vento. Os resultados estão reunidos nas Tabelas 7.4, 7.5, 7.6, 7.7, 7.8 e 7.9, referentes aos três turnos de medição. Recomenda-se, também, que as descrições dos resultados sejam lidas em simultâneo com as Figuras C.1, C.2, C.3, C.4, C.5 e C.6, que constam do Apêndice C.

#### 7.3.2.1 Manhã (Observar as figuras C1 e C2 do Apêndice C)

##### a) Ponto A1

No ponto A1, quando o vento soprou de sudeste, a umidade relativa do ar (UR) manteve a correlação mais forte com a temperatura ( $r = -0,661$  e  $p = 0,014$ ). Neste caso, a UR explica 43,7% das variações da temperatura (TAB. 7.4).

Tabela 7.4: Modelos explicativos das variações de temperatura do ar medida nos diversos pontos, no turno da manhã e com vento sudeste.

| PONTO | VARIÁVEIS | r        | Sig.  | r <sup>2</sup> | R <sup>2</sup> Total | R    |
|-------|-----------|----------|-------|----------------|----------------------|------|
| A1    | UR        | -0,661*  | 0,014 | 43,7%          | 43,7%                | 0,64 |
| A2    | UR        | -0,791** | 0,001 | 62,6%          | 62,6%                | 0,79 |
| B1    | V. Vento  | -0,596*  | 0,032 | 35,5%          | 60,4%                | 0,78 |
|       | UR        | -0,581*  | 0,037 | 24,9%          |                      |      |
| B2    | Céu       | -0,718** | 0,006 | 51,5%          | 51,5%                | 0,72 |
| C1    | Não houve |          |       |                |                      |      |
| C2    | Céu       | -0,587*  | 0,035 | 34,4%          | 34,4%                | 0,59 |
| D1    | Não houve |          |       |                |                      |      |
| D2    | Céu       | -0,572*  | 0,041 | 32,7%          | 32,7%                | 0,57 |

Legenda:

\* Correlação significativa ao nível de 0,05

\*\* Correlação significativa ao nível de 0,01

r – Índice de correlação de Pearson

Sig. - Nível de significância da correlação;

r<sup>2</sup> – Coeficiente de determinação simples;

R<sup>2</sup> – Coeficiente de determinação múltiplo;

R – Coeficiente de correlação múltiplo.

Quando o vento soprou de leste e de nordeste (TAB. 7.5), relacionaram-se significativamente com a temperatura a umidade relativa do ar ( $r = -0,802$ ) e a insolação ( $r = 0,796$ ) e a condição do céu ( $r = -0,603$ ). Entretanto, na análise de regressão, a insolação e a condição do céu foram excluídas do modelo explicativo da variação da temperatura por terem provocado o efeito de multicolinearidade com umidade. A umidade relativa do ar explica, portanto, 64,4% das variações da temperatura.

Tabela 7.5: Modelos explicativos das variações de temperatura do ar medida nos diversos pontos, no turno da manhã e com ventos leste e nordeste.

| PONTO | VARIÁVEIS | r        | Sig.  | r <sup>2</sup> | R <sup>2</sup> | R    |
|-------|-----------|----------|-------|----------------|----------------|------|
| A1    | UR        | -0,802** | 0,002 | 64,4%          | 64,4%          | 0,80 |
| A2    | Insolação | 0,641*   | 0,025 | 41,0%          | 41,0%          | 0,64 |
| B1    | UR        | -0,866** | 0,000 | 66,8%          | 66,8%          | 0,82 |
| B2    | UR        | -0,736** | 0,001 | 89,2%          | 89,2%          | 0,94 |
| C1    | Não houve |          |       |                |                |      |
| C2    | Não houve |          |       |                |                |      |
| D1    | Insolação | 0,845**  | 0,001 | 71,4%          | 83,8%          | 0,92 |
|       | UR        | -0,802** | 0,002 | 12,4%          |                |      |
| D2    | Insolação | 0,671*   | 0,024 | 10,3%          | 85,2%          | 0,92 |
|       | UR        | -0,652*  | 0,022 | 74,9%          |                |      |

Legenda: *Idem* Tabela 7.4.

### b) Ponto A2

Em A2, com vento sudeste, a umidade relativa do ar obteve correlação  $r = -0,791$  com a temperatura do ar, explicando 62,6% da sua variação (TAB. 7.4). Com ventos leste e nordeste, a temperatura do ar se correlacionou significativamente com a insolação ( $r = 0,641$ ), explicando 41% das variações da temperatura do ar.

### c) Ponto B1

No ponto B1, com vento sudeste, a variável que obteve a maior correlação com a temperatura do ar foi a velocidade do vento, com  $r = -0,596$ , indicando que, naquele ponto e naquele horário, a temperatura tende a diminuir à medida que a velocidade do vento se eleva (TAB. 7.4). Neste caso, através da análise de regressão, verificou-se que a velocidade do vento e a umidade relativa do ar (com  $r = -0,581$ ) explicam 60,4% das variações da temperatura registrada no período, com coeficiente de correlação múltipla  $R = 0,78$ .

Com ventos leste e nordeste (TAB. 7.5), as variáveis que se correlacionaram significativamente com a temperatura foram a umidade relativa do ar ( $r = -0,866$ ), a insolação ( $r = 0,795$ ) e a condição do



céu ( $r = -0,706$ ). Devido aos efeitos de colinearidade, apenas a umidade relativa do ar compôs o modelo explicativo da variação da temperatura do ar, com  $R^2 = 66,8\%$  e  $R = 0,82$ .

#### **d) Ponto B2**

No ponto B2, com vento sudeste, apenas a condição do céu se correlacionou significativamente com a temperatura do ar, com  $r = -0,718$ , explicando 51,5% das suas variações.

Com ventos leste e nordeste, além da condição do céu ( $r = -0,77$ ), a UR ( $r = -0,736$ ) e a insolação ( $r = 0,859$ ) se correlacionaram significativamente com a temperatura do ar, entretanto, devido aos efeitos de colinearidade, apenas a umidade relativa do ar integra o modelo explicativo das variações da temperatura, com  $R^2 = 89,2\%$  e  $R = 0,94$ .

#### **e) Pontos C1**

Em C1 não houve correlação significativa entre a temperatura e as demais variáveis nas direções de vento consideradas.

#### **f) Ponto C2**

No ponto C2, com vento sudeste, só houve correlação significativa entre a temperatura e a condição do céu ( $r = -0,587$ ), explicando 34,4% das variações da temperatura do ar. Com ventos leste e nordeste não houve correlações significativas.

#### **g) Ponto D1**

Em D1 só se verificaram correlações significativas quando o vento soprou de leste e de nordeste (TAB. 7.5). Neste caso, a insolação assumiu a maior correlação com a temperatura ( $r = 0,845$ ), seguida da umidade relativa do ar ( $r = -0,802$ ) e da condição do céu ( $r = -0,669$ ). Compõem o modelo explicativo das variações da temperatura do ar a insolação e a UR, com  $R^2 = 83,8\%$  e  $R = 0,92$ .

#### **h) Ponto D2**

A condição do céu foi a variável que mais fortemente se correlacionou com a temperatura do ar no ponto D2 ( $r = -0,57$ ) quando o vento soprou de sudeste, explicando 32,7% das variações da temperatura (TAB. 7.5). Com ventos leste e de nordeste, a insolação ( $r = 0,67$ ) e a umidade relativa do ar ( $r = -0,65$ ) assumiram as maiores correlações com a temperatura do ar. Ambas compõem o modelo que explica 85,2% das variações da temperatura, com coeficiente de correlação múltipla  $R = 0,92$ .

### 7.3.2.2 Tarde (Observar as figuras C3 e C4 do Apêndice C)

#### a) Ponto A1

No ponto A1 houve o efeito de colinearidade provocado pelas variáveis insolação e umidade relativa do ar, quando o vento soprou de sudeste (TAB. 7.6). Deste modo, na análise de regressão apenas a variável condição do céu ( $r = -0,833$  e  $p = 0,000$ ) foi considerada para explicar as variações da temperatura, com  $R^2 = 69,3\%$ .

Com os ventos leste e nordeste, as variáveis que se correlacionaram com a temperatura foram a velocidade do vento ( $r = -0,761$  e  $p = 0,002$ ), a insolação ( $r = 0,799$  e  $p = 0,001$ ) e a condição do céu ( $-0,580$  e  $p = 0,030$ ). Juntas, a velocidade do vento e a insolação explicam 78,3% das variações da temperatura do ar no ponto A1, com  $R = 0,88$  (TAB. 7.7). A condição do céu não integrou o modelo devido a efeitos de colinearidade.

#### b) Ponto A2

Quando o vento soprou de sudeste, a velocidade do vento foi a única variável que se correlacionou significativamente com a temperatura do ar no ponto A2 ( $r = -0,621$  e  $p = 0,018$ ), explicando 38,5% das variações da temperatura (TAB. 7.6).

Com ventos leste e nordeste, a insolação, com  $R = 0,65$  e  $R^2 = 42,8\%$ , explica as variações da temperatura do ar.

#### c) Ponto B1

Em B1, a correlação entre a velocidade do vento e a temperatura foi  $r = -0,715$  e  $p = 0,004$ . Além desta variável, compõe o modelo explicativo das variações da temperatura a condição do céu, mesmo não obtendo correlação significativa com a temperatura<sup>10</sup>. O coeficiente de determinação obtido pelo modelo foi de  $R^2 = 70,8\%$  e coeficiente de correlação múltipla  $R = 0,84$  (TAB. 7.6).

Com os ventos leste e nordeste, a velocidade do vento obteve uma correlação de  $r = -0,674$  e  $p = 0,008$  com a temperatura do ar, explicando 45,5% das suas variações (TAB. 7.7).

#### d) Ponto B2

Em B2, com vento sudeste (TAB. 7.6), a condição do céu obteve correlação de  $r = -0,681$  e  $p = 0,007$  com a temperatura do ar, explicando 46,4% das suas variações. A umidade relativa do ar foi excluída pelo efeito de colinearidade.

---

<sup>10</sup> Neste caso, cabe ao pesquisador decidir sobre a manutenção dessa variável no modelo. Tal decisão é subjetiva e pode ser ratificada (ou não) com novos testes do modelo.

Com os ventos leste e nordeste não houve correlação significativa.

Tabela 7.6: Modelos explicativos das variações de temperatura do ar medida nos diversos pontos, no turno da tarde e com vento sudeste.

| PONTO | VARIÁVEIS | r        | Sig.  | r <sup>2</sup> | R <sup>2</sup> | R    |
|-------|-----------|----------|-------|----------------|----------------|------|
| A1    | Céu       | -0,833** | 0,000 | 69,3%          | 69,3%          | 0,83 |
| A2    | V. Vento  | -0,621*  | 0,018 | 38,5%          | 38,5%          | 0,62 |
| B1    | V. Vento  | -0,715** | 0,004 | 51,2%          | 70,8%          | 0,84 |
|       | Céu       | -0,198   | 0,498 | 19,6%          |                |      |
| B2    | Céu       | -0,681** | 0,007 | 46,4%          | 46,4%          | 0,68 |
| C1    | UR        | -0,734** | 0,003 | 53,9%          | 53,9%          | 0,73 |
| C2    | Céu       | -0,748** | 0,002 | 55,9%          | 55,9%          | 0,75 |
| D1    | Céu       | -0,822** | 0,000 | 67,6%          | 79,6%          | 0,89 |
|       | V. Vento  | -0,422   | 0,133 | 12,0%          |                |      |
| D2    | Céu       | -0,698** | 0,006 | 48,0%          | 48,0%          | 0,69 |

Legenda: *Idem* Tabela 7.4.

Tabela 7.7: Modelos explicativos das variações de temperatura do ar medida nos diversos pontos, no turno da tarde e com ventos leste e nordeste.

| PONTO | VARIÁVEIS | r        | Sig.  | r <sup>2</sup> | R <sup>2</sup> | R    |
|-------|-----------|----------|-------|----------------|----------------|------|
| A1    | Insolação | 0,799**  | 0,001 | 51,1%          | 78,3%          | 0,88 |
|       | V. Vento  | -0,761** | 0,002 | 15,8%          |                |      |
| A2    | Insolação | 0,654*   | 0,011 | 42,8%          | 42,8%          | 0,65 |
| B1    | V. Vento  | -0,674** | 0,008 | 45,5           | 45,5           | 0,67 |
| B2    | Não houve |          |       |                |                |      |
| C1    | Não houve |          |       |                |                |      |
| C2    | Não houve |          |       |                |                |      |
| D1    | Céu       | -0,664** | 0,010 | 45,6%          | 71,4%          | 0,84 |
|       | V. Vento  | -0,439   | 0,117 | 25,8%          |                |      |
| D2    | Insolação | 0,788**  | 0,001 | 62,1%          | 62,1%          | 0,79 |

Legenda: *Idem* Tabela 7.4.

#### e) Ponto C1

No ponto C1, com vento sudeste, houve o efeito de colinearidade provocado pelas variáveis umidade relativa do ar ( $r = -0,703$  e  $p = 0,007$ ) e condição do céu ( $r = -0,669$  e  $p = 0,012$ ). Neste caso, a UR explica 53,9% das variações da temperatura do ar (TAB. 7.6).

No período em que a direção do vento incidente passou para os rumos leste e nordeste, não houve correlação significativa.

#### f) Ponto C2

Em C2 ocorreu o efeito de colinearidade provocado pela umidade relativa do ar e a condição do céu, quando o vento soprou de sudeste (TAB. 7.6), de maneira que a UR explicou as variações de temperatura do ar com  $R^2 = 69,4\%$  e  $R = 0,83$ . A velocidade do vento, mesmo com uma correlação

significativa com a temperatura do ar ( $r = -0,556$  e  $p = 0,039$ ), não foi incluída no modelo por elevar o seu erro padrão.

Com ventos leste e nordeste não houve correlações significativas.

#### **g) Ponto D1**

No ponto D1, para as duas direções de vento consideradas, houve o efeito de multicolinearidade provocado pela umidade relativa do ar, insolação e condição do céu, de maneira que o modelo explicativo fosse formado pela condição do céu e pela velocidade do vento em ambas os estratos de dados.

Com vento sudeste, a condição de céu e a velocidade do vento explicam 79,6% das variações da temperatura do ar, com  $R = 0,89$  (TAB. 7.6). Já com ventos leste e nordeste, a condição céu e a velocidade do vento explicaram 71,4%, com  $R = 0,84$  (TAB. 7.7).

#### **h) Ponto D2**

Os efeitos de colinearidade e de multicolinearidade se repetiram em D2. Com vento sudeste esses efeitos ocorreram entre a insolação e a condição do céu. Desta forma, a condição de céu explicou 48,0% das variações da temperatura, com  $R = 0,69$  (TAB. 7.6).

Com ventos leste e nordeste (TAB. 7.7) o efeito de multicolinearidade ocorreu entre a UR, a insolação e a condição de céu, fazendo com que apenas a insolação compusesse o modelo explicativo das variações da temperatura de ar ( $R^2 = 66,4\%$  e  $R = 0,79$ ).

#### **7.3.2.3 Noite** (Observar as figuras C5 e C6 do Apêndice C)

À noite, com vento sudeste (TAB. 7.8), com a pequena variação da temperatura ao longo do período de medição e com a pouca diferença de temperatura entre os pontos observados, não houve correlação significativa entre a temperatura e as demais variáveis em quatro dos oito pontos observados (A1, B1, B2 e C2). Quando os ventos sopraram de leste e nordeste (TAB. 7.9), não houve correlações nos pontos A1, A2, B2 e C2. Portanto, a seguir, são feitos comentários apenas sobre os pontos e direções de vento em que houve correlações significativas.

#### **a) Ponto A2**

Com vento sudeste, a velocidade do vento foi a única variável que se correlacionou significativamente com a temperatura do ar ( $r = -0,448$  e  $p = 0,047$ ), explicando 20,1% das suas variações (TAB. 7.8).

**b) Ponto B1**

No ponto B1, a única variável que se correlacionou significativamente com a temperatura foi a condição de céu quando os ventos sopraram de leste e nordeste, com  $r = 0,778$  e  $p = 0,023$ , explicando, segundo a análise de regressão, 60,5% das variações da temperatura neste ponto (TAB. 7.9). Neste caso, observou-se que, quanto maior a nebulosidade, maior a temperatura do ar.

**c) Ponto C1**

Em C1, com vento sudeste, a velocidade do vento, com  $r = -0,550$  e  $p = 0,012$ , explicou 30,3% das variações da temperatura do ar (TAB. 7.8). Com ventos leste e nordeste, a UR explicou 51,5%, tendo se correlacionado diretamente com a temperatura do ar com  $r = 0,718$  e  $p = 0,045$ , portanto, a temperatura tendeu a se elevar à medida que a umidade se elevou neste ponto (TAB. 7.9).

Tabela 7.8: Modelos explicativos das variações de temperatura do ar medida nos diversos pontos, no turno da noite e com vento sudeste.

| PONTO | VARIÁVEIS | r       | Sig.  | r <sup>2</sup> | R <sup>2</sup> | R     |
|-------|-----------|---------|-------|----------------|----------------|-------|
| A1    | Não houve |         |       |                |                |       |
| A2    | V. Vento  | -0,448* | 0,047 | 20,1%          | 20,1%          | 0,448 |
| B1    | Não houve |         |       |                |                |       |
| B2    | Não houve |         |       |                |                |       |
| C1    | V. Vento  | -0,550* | 0,012 | 30,3%          | 30,3%          | 0,550 |
| C2    | Não houve |         |       |                |                |       |
| D1    | UR        | 0,492*  | 0,028 | 24,2%          | 24,2%          | 0,492 |
| D2    | UR        | 0,472*  | 0,035 | 22,3%          | 22,3%          | 0,472 |

Legenda: *Idem* Tabela 7.4.

Tabela 7.9: Modelos explicativos das variações de temperatura do ar medida nos diversos pontos, no turno da noite e com ventos leste e nordeste.

| PONTO | VARIÁVEIS | r       | Sig.  | r <sup>2</sup> | R <sup>2</sup> | R     |
|-------|-----------|---------|-------|----------------|----------------|-------|
| A1    | Não houve |         |       |                |                |       |
| A2    | Não houve |         |       |                |                |       |
| B1    | Céu       | 0,778*  | 0,023 | 60,5%          | 60,5%          | 0,778 |
| B2    | Não houve |         |       |                |                |       |
| C1    | UR        | 0,718*  | 0,045 | 51,5%          | 51,5%          | 0,718 |
| C2    | Não houve |         |       |                |                |       |
| D1    | Céu       | 0,714*  | 0,047 | 50,9%          | 50,9%          | 0,714 |
| D2    | Céu       | 0,944** | 0,000 | 89,2%          | 95,7%          | 0,978 |
|       | V. Vento  | 0,242   | 0,564 | 6,5%           |                |       |

Legenda: *Idem* Tabela 7.4.

#### **d) Ponto D1**

Com uma correlação direta de  $r = 0,714$  e  $p = 0,047$ , a condição de céu foi a única variável que se relacionou com a temperatura no ponto D1 quando o vento soprou de leste e nordeste (TAB. 7.9), explicando 50,9% das suas variações. Com vento sudeste, a UR foi a que se correlacionou mais significativamente com a temperatura, também diretamente ( $r = 0,492$  e  $p = 0,028$ ), explicando 24,2% das variações da temperatura (TAB. 7.8).

#### **e) Ponto D2**

Em D2, com vento sudeste (TAB. 7.8), também se verificou correlação direta entre a temperatura do ar e a UR ( $r = 0,472$ ,  $p = 0,035$ ), indicando que a temperatura tendeu a se elevar com a elevação da umidade relativa do ar. A UR explicou 22,3% das variações da temperatura.

Com ventos leste e nordeste (TAB. 7.9), verificou-se uma correlação muito forte entre a condição do céu e temperatura do ar ( $r = 0,944$  e  $p = 0,000$ ). Também neste caso a correlação foi direta, indicando que neste ponto a temperatura do ar tendeu a se elevar à medida que o céu esteve mais nublado na condição de ventilação considerada. Neste caso, a condição do céu e a velocidade do vento compõem o modelo explicativo das variações de temperatura,  $R^2 = 95,7\%$ , com  $R = 0,98$ .

### **7.3.3 Análise de correlação e regressão total – considerando todos os pontos**

Nesta análise foram considerados os dados medidos em todos os pontos de medição, de maneira que fosse possível acrescentar ao grupo das variáveis independentes as variáveis relacionadas à morfologia urbana (distância em relação ao mar, taxa de ocupação, índice de aproveitamento, tipo de pavimento<sup>11</sup> e fator de visão do céu). Da mesma maneira que as análises ponto a ponto, estas foram feitas por turno e para os estratos de dias diferenciados pela direção dos ventos incidentes.

As figuras 7.2 e 7.4 mostram a complexidade das relações entre as variáveis climáticas e as variáveis da forma urbana quando o vento soprou de sudeste, e as figuras 7.3, 7.5 e 7.6 mostram as relações verificadas quando os ventos sopraram de leste e nordeste nos três turnos considerados. Essas figuras apresentam apenas as correlações significativas existentes entre as variáveis consideradas na análise. Para simplificar as figuras e facilitar a sua interpretação, não são apresentadas as correlações entre os elementos da morfologia.

---

<sup>11</sup> Para os cálculos de correlações de regressão entre a temperatura do ar e o tipo de pavimento foram atribuídos os valores 1 para pedras graníticas (paralelepípedo) e 2 para asfalto.

### 7.3.3.1 Manhã

Durante a manhã, com vento sudeste, a temperatura do ar tendeu a se elevar à medida que se afastava do mar ( $r = 0,48$  e  $p = 0,000$ ) e diminuir nas porções com maior taxa de ocupação ( $r = -0,41$  e  $p = 0,000$ ) (FIG. 7.2).

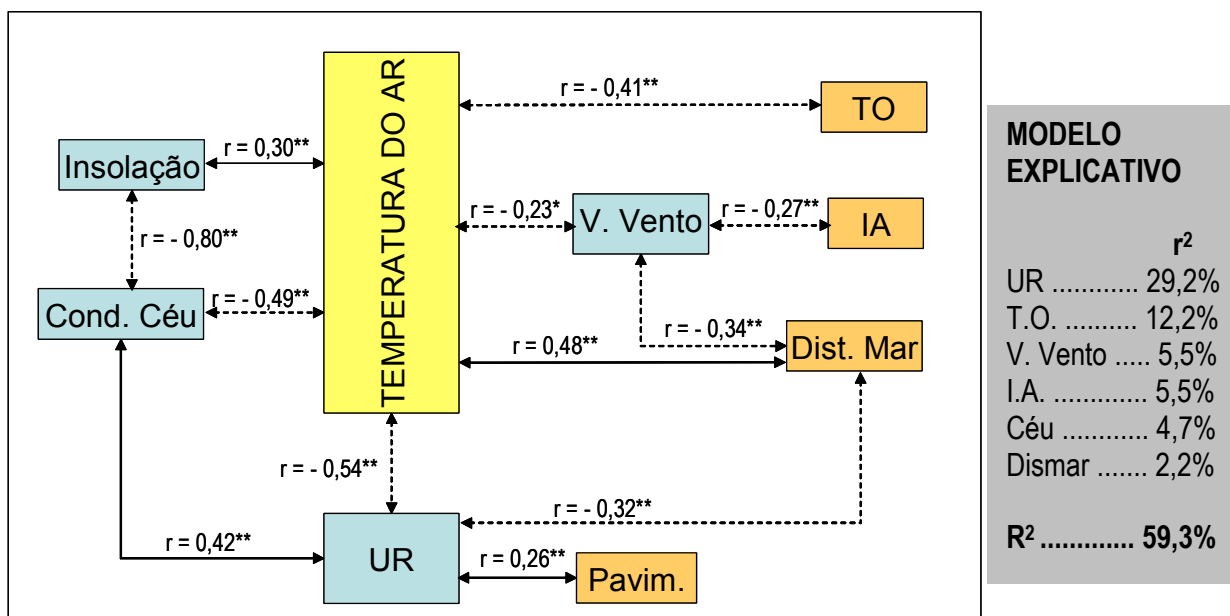


Figura 7.2: Sistema de correlações entre as variáveis climáticas e da forma urbana no turno da manhã com vento sudeste.

LEGENDA:  $r$  – Correlação de Pearson

\* Correlação significativa ao nível de 0,05

\*\* Correlação significativa ao nível de 0,01

UR – Umidade relativa do ar; V. Vento – Velocidade do vento; Cond. Céu – Condição do céu; T.O. – Taxa de ocupação; I.A. – Índice de aproveitamento; FVC – Obstrução do céu; Pavim. – Tipo de pavimento; Dist. Mar – Distância em relação ao mar.

Houve também correlação com a velocidade do vento ( $r = -0,23$  e  $p = 0,017$ ), com a umidade relativa do ar ( $r = -0,54$  e  $p = 0,000$ ), com a insolação ( $r = 0,30$  e  $p = 0,002$ ) e com a condição do céu ( $r = -0,49$  e  $p = 0,000$ ). Estas duas últimas provocaram o efeito de colinearidade, de maneira que a insolação foi excluída do modelo explicativo das variações da temperatura do ar, formado pelas variáveis umidade relativa do ar, taxa de ocupação, velocidade do vento, índice de aproveitamento, condição do céu e distância em relação ao mar, com coeficiente de determinação  $R^2 = 59,3\%$  e coeficiente de correlação múltipla  $R = 0,77$ .

Nota-se, para esta direção de vento, a baixa correlação entre as demais variáveis climáticas e os elementos da forma urbana. A velocidade do vento tendeu a elevar-se nas porções com maior fator

de visão do céu e a diminuir nas porções de maior índice de aproveitamento, especialmente nos pontos situados mais distantes do mar. A umidade relativa do ar também diminuiu nessa direção.

Com ventos leste e nordeste, uma maior quantidade de variáveis se correlacionou significativamente com a temperatura do ar (FIG. 7.3), sendo a correlação mais forte com a insolação ( $r = 0,674$ ), seguida das correlações com a umidade relativa do ar ( $r = -0,634$ ) e com a condição do céu ( $r = -0,524$ ).

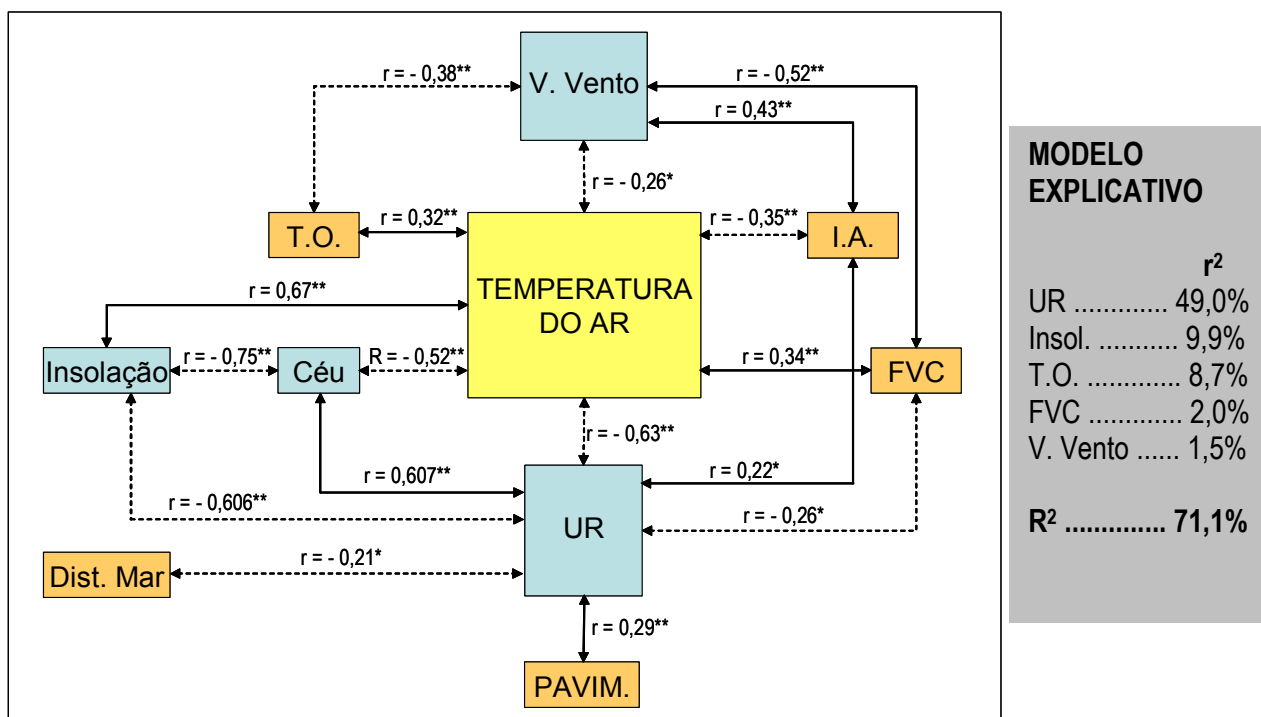


Figura 7.3: Sistema de correlações entre as variáveis climáticas e da forma urbana no turno da manhã com ventos leste e nordeste.  
 LEGENDA: *Idem* Figura 7.2.

As correlações entre a temperatura do ar e as demais variáveis foram fracas, no entanto, os valores de significância indicam que essas variáveis devam ser consideradas co-responsáveis pela alteração do comportamento da temperatura.

Da análise de regressão *stepwise* obteve-se o modelo explicativo das variações da temperatura do ar composto pelas variáveis umidade relativa do ar, insolação, taxa de ocupação, fator de visão do céu e velocidade do vento. Juntas, essas variáveis explicaram 71,1% das variações da temperatura do ar, compondo um modelo que se correlacionou com a temperatura do ar com  $R = 0,84$ .

É importante notar, ao analisar as relações entre as diversas variáveis envolvidas, que a temperatura tendeu a se elevar nos pontos mais expostos à radiação solar (maior fator de visão do



céu), onde houve, como consequência a tendência de redução da umidade relativa, ao contrário dos pontos mais protegidos (maior índice de aproveitamento).

### 7.3.3.2 Tarde

À tarde, com vento sudeste, a variável velocidade do vento passou a manter uma correlação mais forte com a temperatura do ar, com  $r = -0,446$  e  $p = 0,000$ , indicando que a temperatura tende a diminuir à medida que a velocidade do vento aumenta (FIG. 7.4). Entretanto, o tipo de pavimento foi a variável que mais fortemente se correlacionou com a temperatura ( $r = 0,721$ ), indicando que a temperatura tendeu a permanecer mais elevada nos pontos situados nas vias pavimentadas com asfalto.

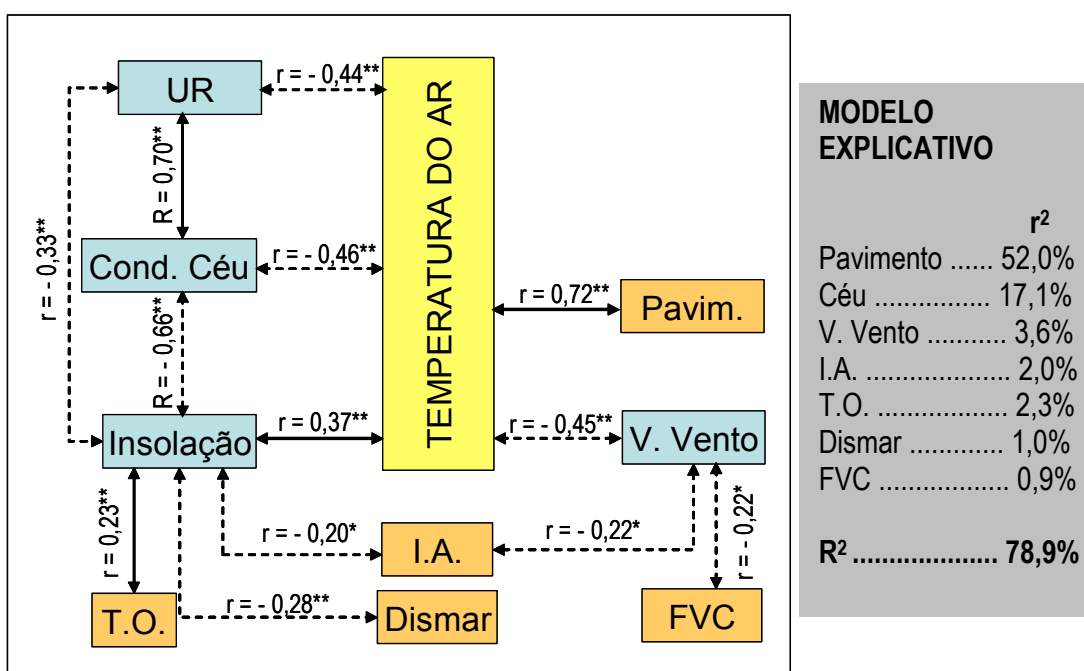


Figura 7.4: Sistema de correlações entre as variáveis climáticas e da forma urbana no turno da tarde com vento sudeste.  
 LEGENDA: *Idem* Figura 7.2.

O modelo explicativo das variações da temperatura foi formado por sete das nove variáveis consideradas, excluindo-se apenas a insolação e a umidade relativa do ar, que provocaram o efeito de multicolinearidade junto com a condição de céu. O tipo de pavimento, a condição do céu, a velocidade do vento, o índice de aproveitamento, a taxa de ocupação, a distância em relação ao mar e o fator de visão do céu compõem o modelo explicativo das variações da temperatura com  $R^2 = 78,9\%$  e  $R = 0,89$ .

Com ventos de leste e nordeste, o fator de visão do céu ( $r = 0,540$ ) e a velocidade do vento ( $r = -0,517$ ), seguidos do índice de aproveitamento ( $r = -0,415$ ), foram as variáveis que mais fortemente se correlacionaram com a temperatura do ar (FIG. 7.5). As demais mantiveram uma correlação fraca, no entanto, os níveis de significância indicam que estas contribuem, em alguma medida, para as variações de comportamento da temperatura.

Neste caso, o modelo explicativo das variações da temperatura foi composto pelo fator de visão do céu, pela velocidade do vento, pelo tipo de pavimento e pela condição do céu, com  $R^2 = 67,3\%$  e  $R = 0,45$ .

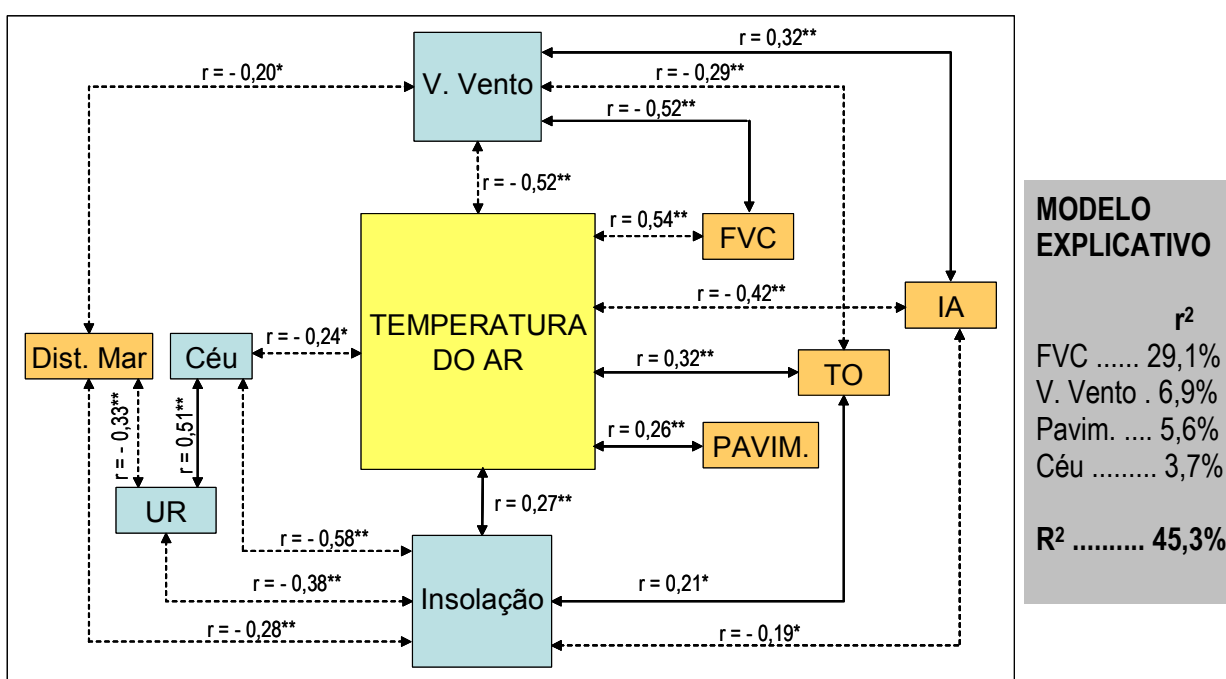


Figura 7.5: Sistema de correlações entre as variáveis climáticas e da forma urbana no turno da tarde com ventos leste e nordeste.

LEGENDA: *Idem* Figura 7.2.

### 7.3.3.3 Noite

À noite não foram verificadas correlações significativas com a temperatura do ar quando o vento soprou de sudeste, possivelmente pela pequena variação de temperatura entre os pontos medidos, verificada ao longo de todo o período de medição.

Com ventos leste e nordeste as correlações verificadas foram fracas, porém significativas (FIG. 7.6). A condição de céu ( $r=0,494$  e  $p=0,000$ ), a velocidade do vento ( $r= -0,464$  e  $p=0,000$ ) e o fator de visão do céu ( $r=0,443$  e  $p=0,000$ ) foram as variáveis que mais fortemente se correlacionaram com a temperatura do ar.

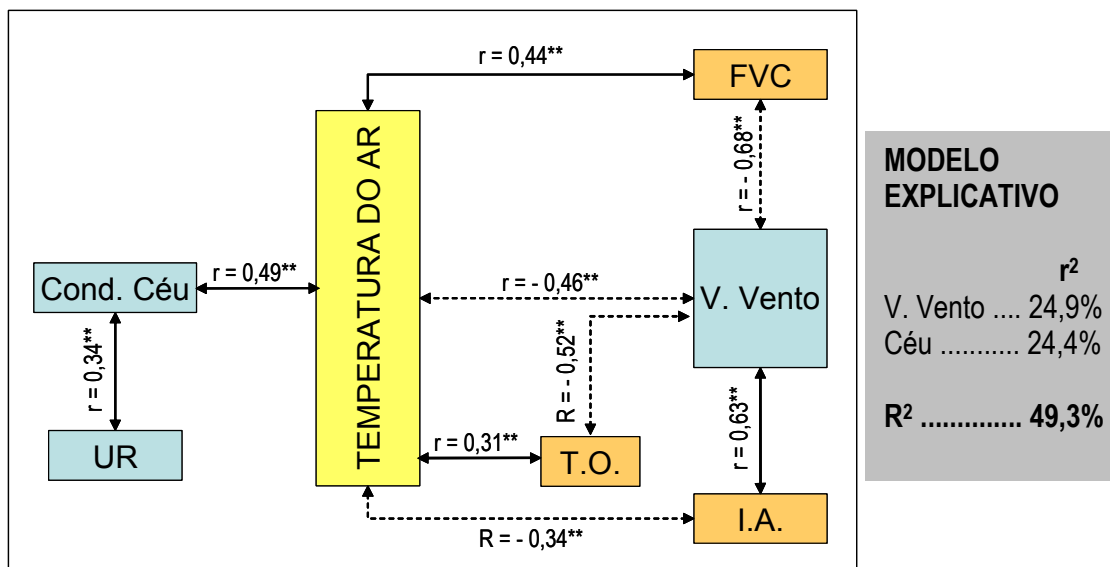


Figura 7.6: Sistema de correlações entre as variáveis climáticas e da forma urbana no turno da noite com ventos leste e nordeste.

LEGENDA: *Idem* Figura 7.2.

Como ocorreu o efeito de colinearidade provocado pela velocidade do vento e o fator de visão do céu, apenas a condição de céu e a velocidade do vento compuseram o modelo explicativo das variações da temperatura do ar, com R<sup>2</sup>=49,3% e R = 0,70.

### 7.3.4 Análise comparativa entre os pontos: discussão teórica dos resultados

As correlações foram mais nítidas com os ventos mais lentos de leste e nordeste. A moderada correlação entre a temperatura do ar e a forma urbana, através das variáveis taxa de ocupação, índice de aproveitamento e fator de visão do céu, indica um alto grau de homogeneidade na ocupação da área estudada, notando-se um leve adensamento da porção oeste com edifícios mais altos e maior espaçamento entre eles, e uma ocupação mais horizontal na porção leste, com a predominância de edificações com até dois pavimentos.

Também se deve ao grande número de variáveis envolvidas, muitas delas se relacionando fortemente e causando efeitos de colinearidade e multicolinearidade. Entretanto, pelos níveis de significância e coeficientes de determinação (r<sup>2</sup>) verificados, os índices de correlação parecem ser satisfatórios para o campo da climatologia urbana.

O comportamento climático do ambiente observado ao longo do dia se explica através da compreensão dos processos físicos de trocas térmicas, condicionados pela interação clima-estrutura urbana, que devem ser esclarecidos nos próximos itens, sempre separando as análises por turno e pela direção dos ventos.

### 7.3.4.1 Manhã (Observar os Apêndices C1 e C2)

O Gráfico 7.1 mostra o quanto a temperatura do ar se elevou quando os ventos incidentes mudaram da direção sudeste para as leste e nordeste durante o período de medição, sendo mais marcante nos pontos B1 e B2. Por um lado, essa condição pode ser explicada pela elevação natural das temperaturas devida às mudanças atmosféricas referidas no item 7.2. Por outro, as figuras de erosão obtidas dos experimentos no túnel aerodinâmico revelaram que as alterações do comportamento térmico nos pontos observados também estão associadas à alteração dos escoamentos no interior da malha urbana com a mudança de direção do vento (FIG. 7.7). Note-se que o percentual de áreas de estagnação é maior com ventos soprando a 90° (leste). Também é possível perceber que com ventos a 90° há um aumento significativo da zona de estagnação em torno dos pontos B1 e B2 em relação aos ventos incidentes de 150°.

Observando as médias das temperaturas registradas no período de medição no turno da manhã, verifica-se que quando o vento soprou de sudeste os pontos que permaneceram mais aquecidos foram D2 e C1, seguidos de C2 e D1, enquanto que B1, B2, A2 e A1, nesta ordem, permaneceram menos aquecidos (GRAF. 7.1).

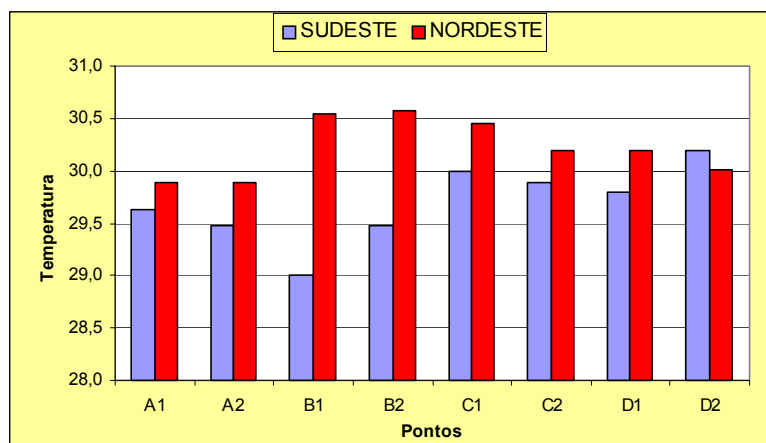


Gráfico 7.1: Média da temperatura no turno da manhã para as direções de vento sudeste e leste e nordeste.

Essa diferença pode ser atribuída, em parte, ao horário de medição, visto que as medições sempre se iniciaram nos pontos A1 e A2, das 8h às 8h10min, e concluídas nos pontos D1 e D2 às 9h, tempo suficiente para haver um aumento significativo da radiação solar, e, conseqüentemente, do aquecimento do ambiente. Mas também está associada à umidade relativa do ar, que permaneceu mais elevada nos pontos A2, A1 e B1 (GRAF. 7.2), resultados coerentes com as análises de

correlação, que indicaram que os pontos mais úmidos tendem a permanecer com a temperatura mais baixa neste turno e com o vento sudeste.

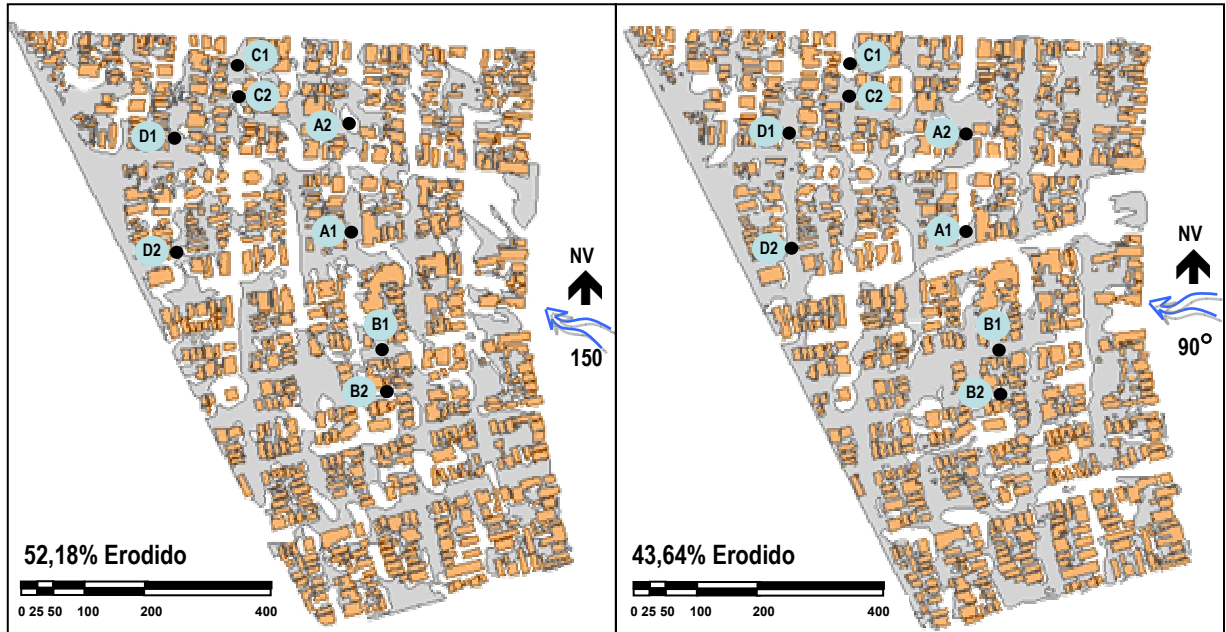


Figura 7.7: Comparação entre as figuras de erosão para as direções de vento 150° e 90°, com  $U_{ref} = 14,7\text{m/s}$ .

Essas afirmações podem ser reforçadas, ainda, pelas correlações entre a umidade relativa do ar e a distância em relação ao mar e entre esta variável e a temperatura do ar (FIG. 7.2). Pela manhã a temperatura tende a elevar-se e a umidade a diminuir nos pontos mais afastados do mar, exatamente os pontos C1, C2, D1 e D2. Verificou-se, também, que os pontos mais ventilados tenderam a permanecer menos aquecidos, principalmente A1, A2 e B2. (GRAF. 7.3).

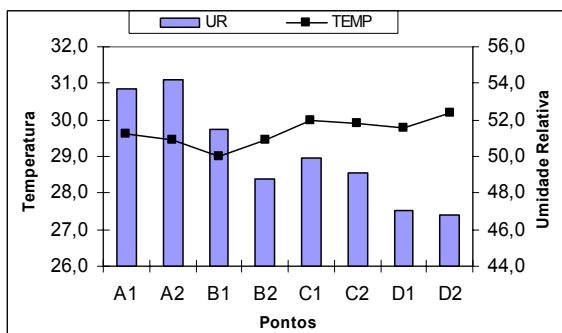


Gráfico 7.2: Comparativo entre as médias de temperatura e umidade relativa do ar com vento sudeste, pela manhã.

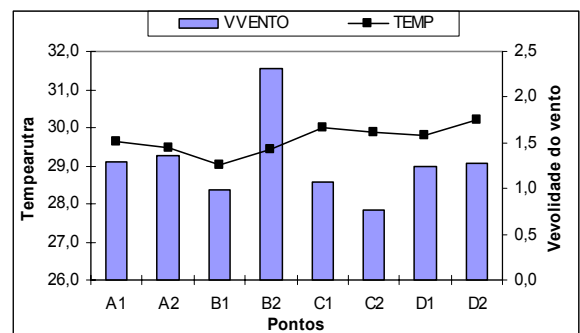


Gráfico 7.3: Comparativo entre as médias de temperatura e velocidade do vento com vento sudeste, pela manhã.

Com ventos de leste e nordeste o comportamento da temperatura em relação à umidade relativa do ar é semelhante ao período de vento sudeste, assim, os pontos mais úmidos tenderam a permanecer menos quentes (GRAF. 7.4). Neste período, os pontos mais aquecidos foram B2, B1 e C1, e os menos quentes, A1 e A2.

Mesmo com correlações não significantes, percebe-se que os pontos mais ventilados permaneceram com temperaturas mais baixas quando os ventos sopraram de leste e de nordeste, especialmente nos pontos A1, A2 e D2, os mais ventilados (GRAF. 7.5).

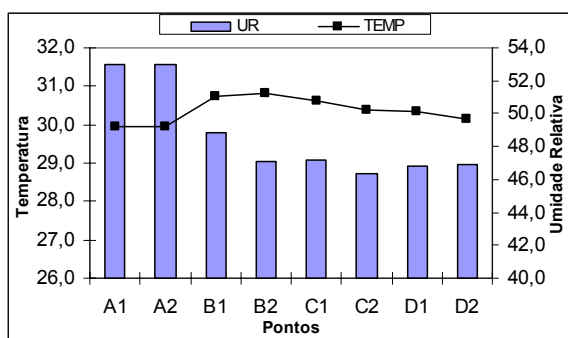


Gráfico 7.4: Comparativo entre as médias de temperatura e umidade relativa do ar com ventos leste e nordeste, pela manhã.

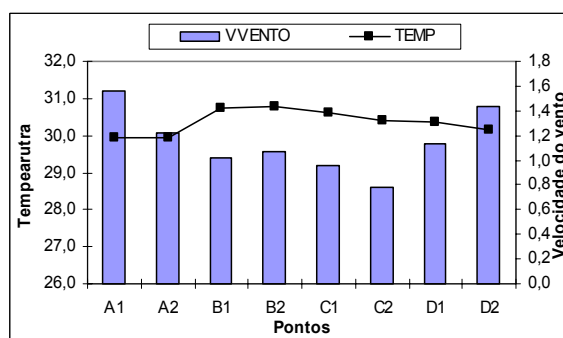


Gráfico 7.5: Comparativo entre as médias de temperatura e velocidade do vento com ventos leste e nordeste, pela manhã.

Com a mudança de direção do vento e a redução da sua velocidade, as correlações entre a temperatura do ar e os elementos da forma urbana se mostraram mais evidentes. Percebeu-se o quanto os pontos situados em porções com taxas de ocupação mais elevadas tenderam a permanecer mais aquecidos (GRAF. 7.6). Essa tendência está, em parte, relacionada à correlação inversa entre a taxa de ocupação e a velocidade do vento (FIG. 7.3), indicando que a velocidade do vento tende a diminuir nas porções com taxa de ocupação mais elevada. Isso se deve à menor porosidade da malha urbana, visto que nessas áreas os afastamentos entre os edifícios são menores.

Por fim, verificou-se que a temperatura tendeu a permanecer mais elevada naqueles pontos situados em porções com menor índice de aproveitamento (GRAF. 7.7) e maior fator de visão do céu (GRAF. 7.8), portanto, mais expostos à radiação solar direta, e, conseqüentemente, a maior insolação e menor ventilação, segundo as análises de correlação.

A influência da umidade relativa do ar no comportamento da temperatura nos dois períodos de direção do vento é típica das primeiras horas da manhã, quando os valores de umidade ainda estão elevados. Isso significa que, neste horário, há uma grande quantidade de partículas de água em

suspensão no ar, que funciona como uma barreira à radiação solar, atingindo a estrutura urbana e retardando o seu aquecimento.

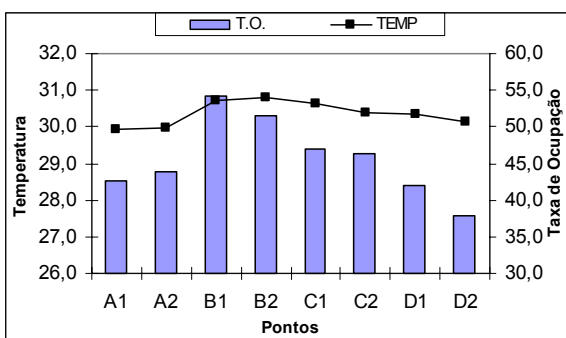


Gráfico 7.6: Comparativo entre as médias de temperatura e taxa de ocupação com ventos leste e nordeste, pela manhã.

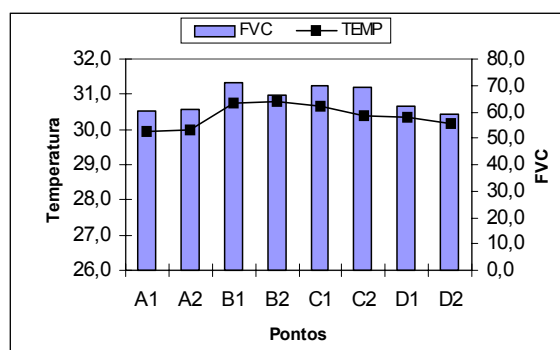


Gráfico 7.8: Comparativo entre as médias de temperatura e fator de visão do céu com ventos leste e nordeste, pela manhã.

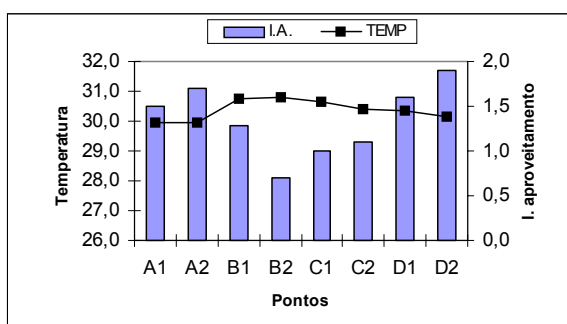


Gráfico 7.7: Comparativo entre as médias de temperatura e índice de aproveitamento com ventos leste e nordeste, pela manhã.

É verdade que essas partículas também se aquecem com a incidência da radiação solar, entretanto, esse aquecimento é mais lento devido ao alto calor específico da água (ou pelo calor latente necessário para evaporar as gotículas).

Essa condição proporciona um campo térmico mais homogêneo, com diferenças menores de temperatura entre os pontos, especialmente com ventos mais brandos, como os de leste e nordeste. Pela manhã, com vento sudeste, a diferença média de temperatura foi de 1,2°C, entre os pontos D2 e B1 (30,2°C e 29,0°C, respectivamente). Com ventos leste e nordeste essa diferença caiu para 0,7°C, entre os pontos B2 (30,6°C) e A1 e A2 (29,9°C).

### 7.3.4.2 Tarde (Observar os Apêndices C3 e C4)

À tarde, há a tendência natural de aumento das velocidades de vento, que, associado à redução da radiação solar incidente (das 14h às 15h), tornam mais evidentes as trocas térmicas

através dos processos radiativos, evaporativos e convectivos, ou seja, a estrutura urbana, mais aquecida, cede calor ao ar em movimento e com temperatura mais baixa, resfriando-se.

No caso de João Pessoa, essas trocas começam a repercutir na redução da temperatura do ar exterior, geralmente, após as 14h, quando os valores de temperatura e de umidade relativa atingem seus extremos diários (máximos e mínimos, respectivamente).

Com exceção do ponto A1, os demais pontos se tornaram mais quentes quando os ventos passaram a soprar de leste e nordeste, sendo maior a elevação da temperatura nos pontos B1, B2, C1, C2 e D1 (GRAF. 7.9), que tiveram a ventilação reduzida neste período.

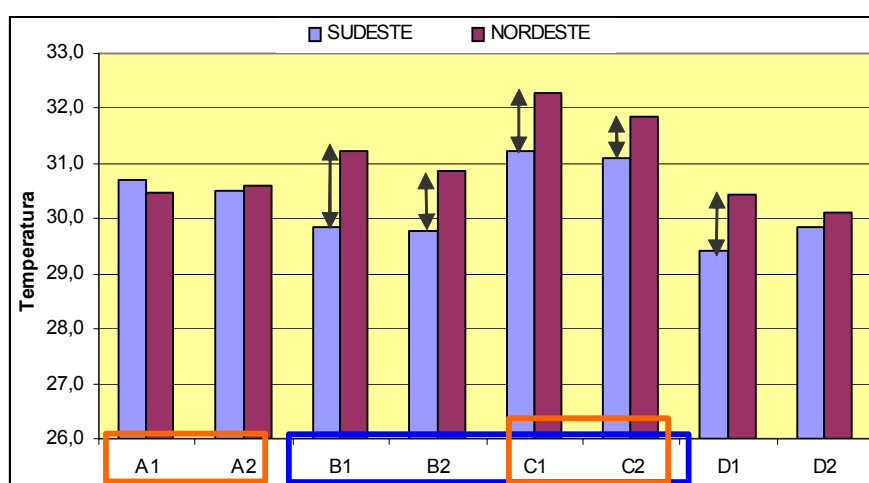


Gráfico 7.9: Média da temperatura no turno da tarde para as direções de vento consideradas.

Note-se que com vento sudeste os pontos mais aquecidos foram aqueles situados em vias pavimentadas com asfalto (A1, A2, C1 e C2), e a ocorrência das menores temperaturas foi registrada nos pontos mais ventilados (GRAF. 7.10).

Com ventos leste e nordeste, os pontos mais quentes foram C1, C2, B1 e B2, exatamente os situados em porções com menor índice de aproveitamento (GRAF. 7.11), maior fator de visão do céu (GRAF. 7.12) e menos ventiladas (GRAF. 7.13). A diferença entre os pares C1-C2 e B1-B2 se deve ao fator de visão de céu, que é maior no primeiro par, o que proporciona uma maior exposição à radiação solar direta.

O pavimento asfáltico e a maior exposição à radiação solar direta são o motivo pelo qual os pares C1-C2 e A1-A2 se aquecem mais rapidamente da manhã para a tarde, com valores entre 1,0°C e 1,2°C, enquanto os pontos D1 e D2 tiveram a sua temperatura reduzida da manhã para a tarde, com



valores entre 0,3°C e 0,4°C a menos. Com ventos leste e nordeste os pontos C1 e C2 têm, respectivamente, um aumento de 1,7°C e 1,8°C da manhã para a tarde, enquanto que os pontos D1 e D2 aquecem-se apenas em 0,2°C e 0,1°C.

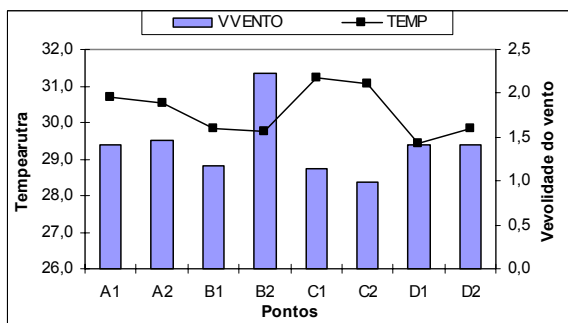


Gráfico 7.10: Comparativo entre as médias de temperatura e velocidade do vento, à tarde e com vento sudeste, à tarde.

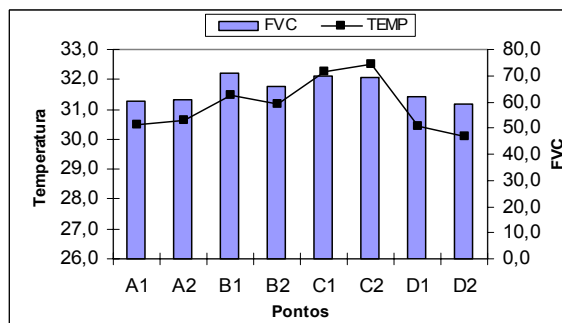


Gráfico 7.12: Comparativo entre as médias de temperatura e fator de visão do céu, à tarde e com ventos leste e nordeste, à tarde.

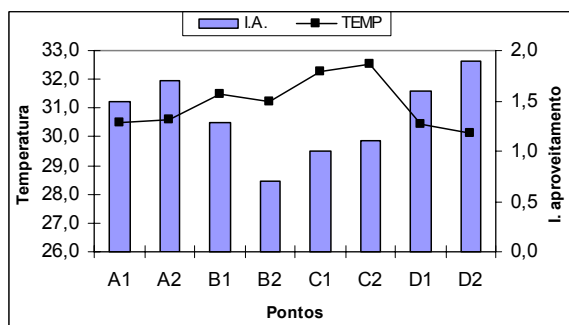


Gráfico 7.11: Comparativo entre as médias de temperatura e índice de aproveitamento, à tarde e com ventos leste e nordeste, à tarde.

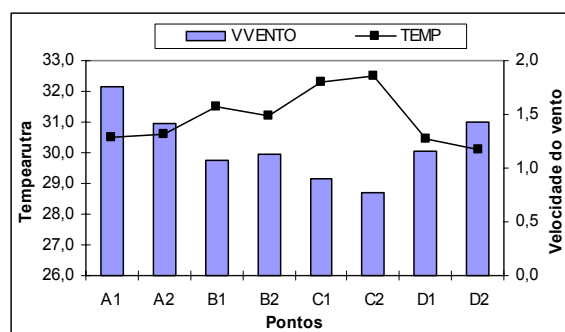


Gráfico 7.13: Comparativo entre as médias de temperatura e velocidade do vento, à tarde e com ventos leste e nordeste, à tarde.

Esses valores médios confirmam os índices de correlação obtidos. Pelas análises de correlação com dados medidos no período de vento sudeste, percebe-se que o tipo de pavimento influenciou mais significativamente o comportamento da temperatura, enquanto que, com ventos leste e nordeste, passaram a ter maior influência (FIG. 7.4 e 7.5) a velocidade do vento, o fator de visão do céu e o índice de aproveitamento.

Como os índices de correlação mostraram, a ventilação exerce maior influência no comportamento térmico à tarde, de maneira que ao observar as figuras de erosão (FIG. 7.7, p. 164) percebe-se que com ventos a 90° ocorre uma maior concentração de zonas de estagnação em torno

dos pontos de medição, a exceção do ponto A1, onde ocorreu a redução da temperatura com ventos leste e nordeste.

A influência significativa dessas variáveis no comportamento térmico do ambiente estudado à tarde se revela, ainda, pelo aumento da diferença de temperatura entre os pontos observados. Quando o vento soprou de sudeste, essa diferença chegou, em média, a 1,8°C entre C1 (31,2°C) e D1 (29,4°C), e atingiu 2,2°C entre os pontos C1 (32,3°C) e D2 (30,1°C), com ventos leste e nordeste.

Em síntese, verificou-se que o melhor desempenho térmico ocorreu nos pontos B1 e B2, situados em via pavimentada com pedras e com menor fator de visão do céu. O pior desempenho (à tarde) foi o dos pontos C1 e C2, situados em via asfaltada e com maior fator de visão do céu.

### 7.3.4.3 Noite (Observar os Apêndices C5 e C6)

Se, por um lado, o maior fator de visão do céu e o pavimento asfáltico contribuem para o ganho mais elevado de calor durante o dia, à noite essas variáveis possibilitam a dispersão mais rápida do calor acumulado, principalmente se houver uma boa ventilação. No caso do pavimento asfáltico, a perda de calor é mais rápida porque tal material tem grande efusividade. E quanto ao fator de visão do céu, os resultados corroboram com outros estudos já realizados, os quais afirmam que ambientes com grande obstrução do céu tendem a reter o calor acumulado por mais tempo.

Para se ter uma idéia, entre a tarde e a noite, percebeu-se no ponto C1 – situado em via asfaltada e com elevado fator de visão do céu – a redução da temperatura, em média, 4,6°C com vento sudeste e 5,5°C com ventos leste e nordeste, enquanto que no ponto D1 essa redução foi de apenas 2,9°C com vento sudeste, e em D2, 3,3°C com ventos leste e nordeste (GRAF. 7.14).

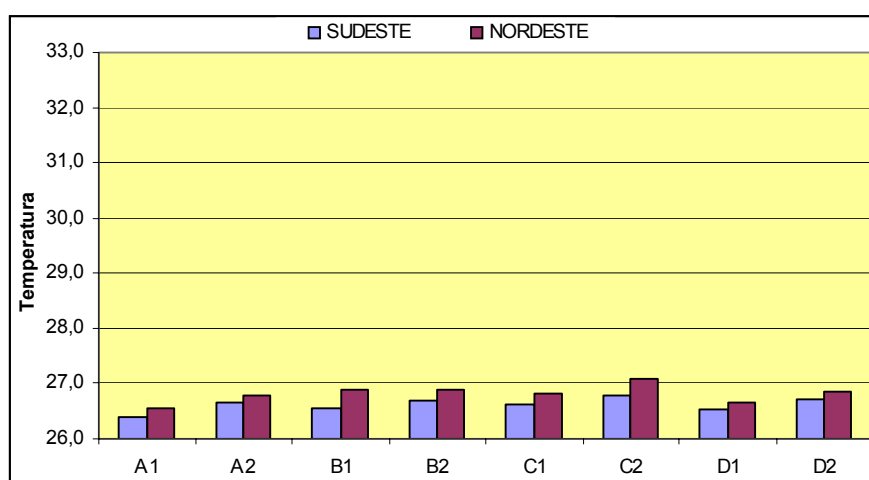


Gráfico 7.14: Média da temperatura no turno da noite para as direções de vento consideradas.

Com vento sudeste, os pontos mais quentes foram A2, B2, C2 e D2, todos com 26,7°C em média. O menos quente foi A1, com 26,4°C. Com vento leste e nordeste, C2 continuou sendo o ponto mais quente e A1 e D1 permaneceram, em média, mais frios.

De acordo com os coeficientes de correlação encontrados, apenas quando os ventos sopram de leste e nordeste é que se percebe a influência mais significativa das variáveis climáticas e urbanas no comportamento térmico do ambiente estudado. Neste caso, a nebulosidade e a umidade relativa do ar tenderam a dificultar a dispersão do calor, enquanto a ventilação tendeu a favorecê-la (FIG. 7.6).

Com relação à umidade e a nebulosidade, ao contrário do que ocorre pela manhã, as partículas de água suspensas no ar e as nuvens criam, durante a noite, uma barreira que dificulta a dispersão da radiação térmica acumulada pela estrutura urbana, mantendo o ar aquecido por mais tempo.

As pequenas diferenças de temperatura entre os pontos se devem, em parte, à baixa velocidade dos ventos noturnos e à baixa densidade construída da área, o que torna o campo térmico mais homogêneo.

### **7.3.5 A formação de ilhas de calor**

Mesmo não sendo o objetivo deste trabalho estudar o fenômeno da ilha de calor, a comparação entre os dados medidos no interior da estrutura da cidade e os medidos na sua periferia faz-se necessária para averiguar o quanto o padrão de urbanização adotado na área estudada tem modificado o ambiente natural, em especial, a temperatura, a umidade relativa do ar e a velocidade do vento.

Os resultados apresentados a seguir explicitam essa modificação, indicando a existência de ilha de calor, pelo menos, para os horários em que foram feitas as medições. Mostram, também, que em alguns momentos, durante o período de medição, alguns pontos permaneceram com a temperatura abaixo da verificada no aeroporto (ilha de frio). Vale salientar que os dados climáticos do aeroporto são medidos a 10m de altura e o próprio aeroporto está a aproximadamente 30m acima da área onde foi realizado este trabalho.

Pela manhã e à tarde, a ilha de calor foi mais crítica com ventos leste e nordeste (GRAF. 7.15 a 7.18), atingindo 2,7°C no ponto B2 pela manhã (em 20/11/04) e 3,8°C em C1 à tarde (em 18/11/04). À noite, com vento sudeste, atingiu 3,3°C (em 12/11/04).

A ilha de calor máxima ocorreu com vento sudeste à tarde (GRAF. 7.18), no ponto B1, atingindo 3,8°C, revelando a preocupante condição de *stress* térmico diurno, que mesmo os ventos

mais fortes de sudeste incidentes na cidade não foram suficientes para dissipar a ilha de calor. Assim, a ilha de calor diurna está associada às baixas velocidades do vento nas no interior da malha urbana.

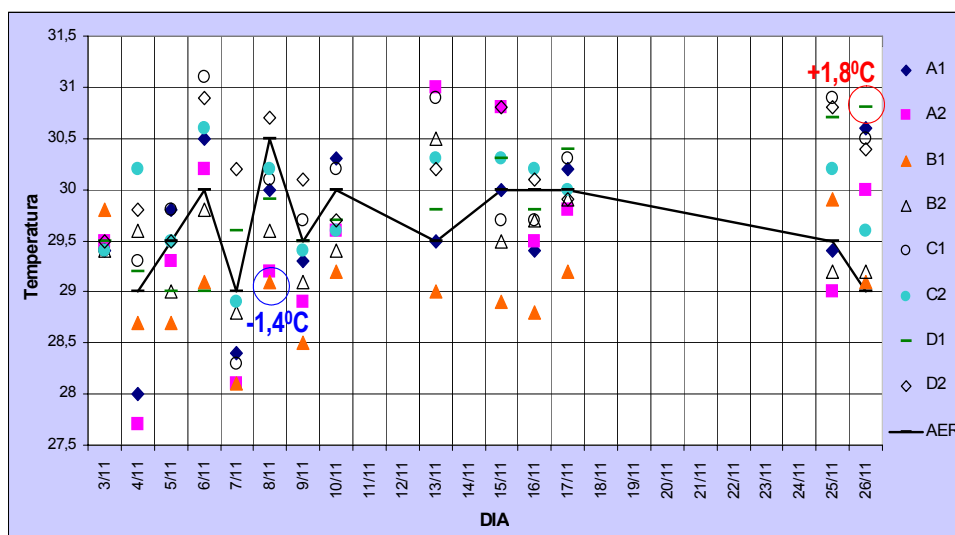


Gráfico 7.15: Comparação entre as temperaturas registradas em campo e no aeroporto local, pela manhã, com vento sudeste.

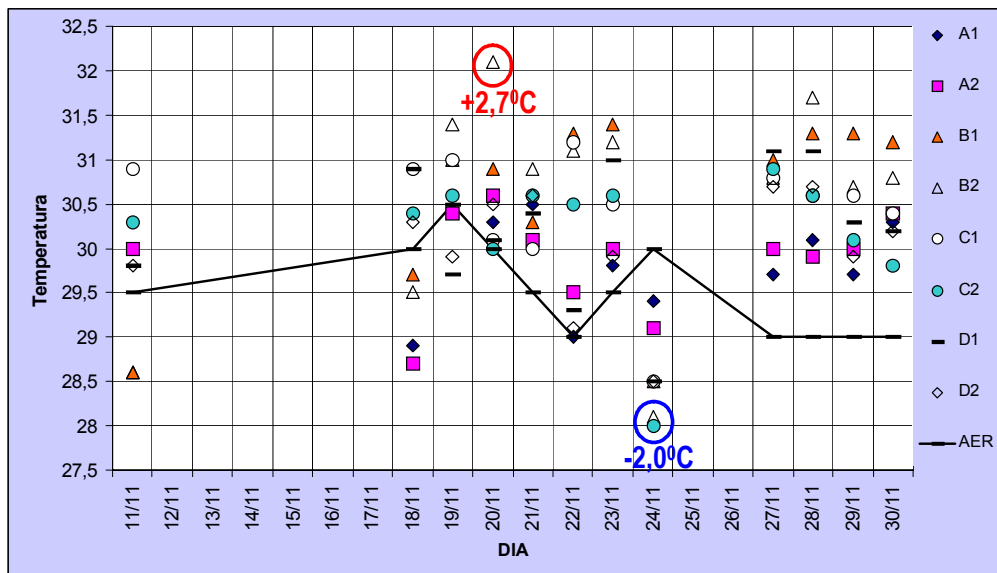


Gráfico 7.16: Comparação entre as temperaturas registradas em campo e no aeroporto local, pela manhã, com ventos leste e nordeste.

Para se ter uma idéia, na tarde do dia 18/11/2004, o vento sudeste atingiu, em média, 5,8m/s na estação de referência e apenas 0,6m/s no ponto B1, onde a ilha foi mais forte. A menor ilha de calor neste dia foi verificada no ponto B2, exatamente o mais ventilado (2,2m/s). No dia 26/11/2004, o vento

leste atingiu 6,9m/s na estação de referência e 0,8m/s no ponto C1, em média. Neste dia, a menor ilha de calor ocorreu no ponto B2, o segundo mais ventilado, com 1,5m/s.

Durante o período de vento sudeste, à exceção do ponto B2, os demais pontos foram atingidos por ventos de calmo a aragem leve (0 a 1,5m/s), segundo a classificação Beaufort. O ponto B2 permaneceu ventilado na maior parte do tempo por uma brisa leve (1,6 a 3,3m/s), mesmo assim, pouco eficiente durante o dia em termos de resfriamento convectivo.

Durante as manhãs, e com vento sudeste, a ilha de calor foi mais intensa nos pontos C1, C2, D1 e D2 (GRAF. 7.16), os últimos medidos na seqüência. Neste mesmo horário, em alguns pontos foram verificadas ilhas de frio, explicável pelo fato de a estação de referência estar mais exposta à radiação solar direta, aquecendo-se mais rapidamente em relação ao interior da cidade. O maior valor de ilha de frio foi verificado no ponto C2 (-2,0°C), em 24/11/04, quando os ventos sopraram de leste e de nordeste (GRAF. 7.16). Com vento sudeste, a maior ilha de frio ocorreu no ponto B1 (-1,4°C), em 08/11/04 (GRAF. 7.15). A maior ilha de frio em B2 deveu-se, principalmente, ao menor fator de visão do céu, que lhe proporciona uma menor exposição à radiação solar.

À tarde, com vento sudeste, a ilha de calor foi mais forte nos pontos situados em vias asfaltadas, A1, A2, C1 e C2 (GRAF. 7.17), sendo C1 o ponto menos ventilado neste período. Com ventos de leste e nordeste, a ilha de calor foi mais intensa nos pontos mais expostos à radiação solar (B1, B2, C1 e C2), especialmente nos pontos C1 e C2, que além de terem alto índice de exposição ao sol, estão situados em uma via asfaltada (GRAF. 7.18). O ponto D1 foi o que se manteve com temperaturas mais próximas das da estação de referência neste período.

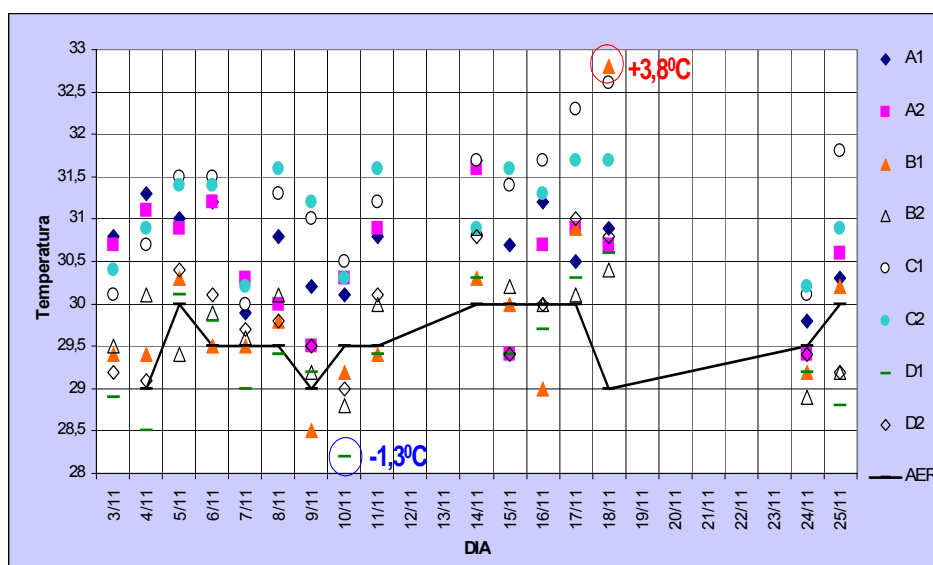


Gráfico 7.17: Comparação entre as temperaturas registradas em campo e no aeroporto local, à tarde, com vento sudeste.

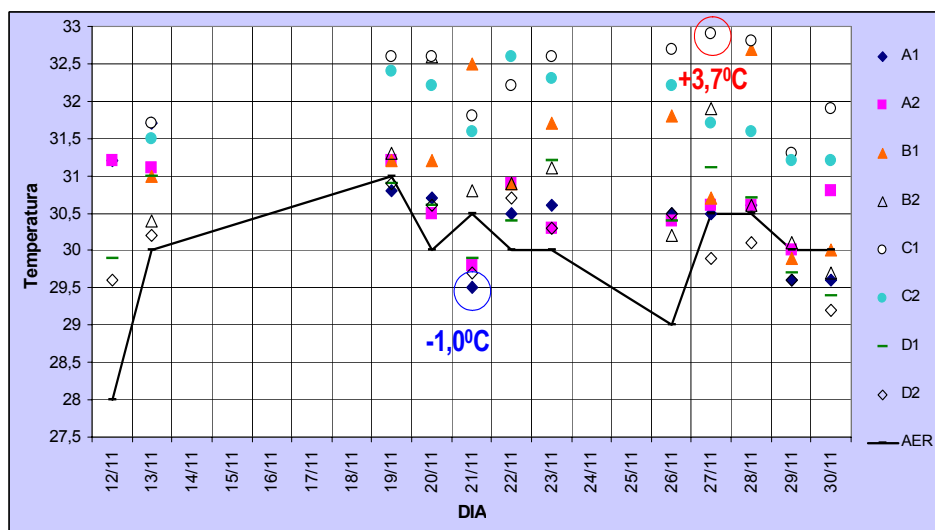


Gráfico 7.18: Comparação entre as temperaturas registradas em campo e no aeroporto local, à tarde, com ventos leste e nordeste.

À noite, as diferenças de temperatura entre os pontos foi muito pequena, não sendo evidente a relação da ilha de calor com qualquer dos elementos da forma urbana. A ilha de calor noturna foi mais intensa no período em que o vento sudeste predominou (GRAF. 7.19 e 7.20). Neste período, a ilha de calor máxima atingiu 3,3°C, valor bem próximo do verificado à tarde, demonstrando o quanto a porção observada é capaz de acumular calor durante à noite, permanecendo com temperaturas elevadas.

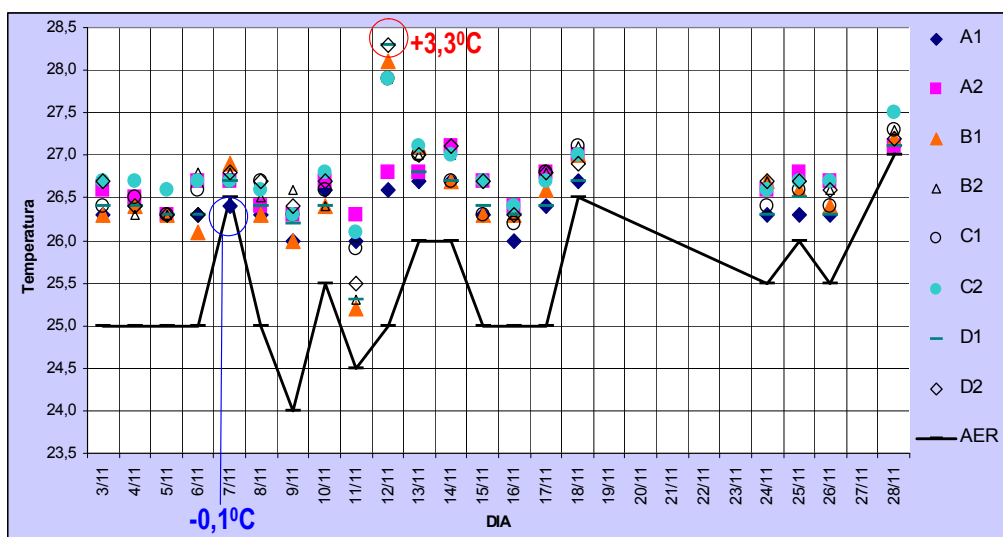


Gráfico 7.19: Comparação entre as temperaturas registradas em campo e no aeroporto local, à noite, com vento sudeste.

Esse fenômeno se justificada pela maior ocorrência de calmarias, corroborando com o verificado em outros estudos antecedentes, a exemplo de OKE (1981), LOMBARDO (1984), ASSIS (1990b), BRANDÃO (1996), cujos resultados demonstraram que a ilha de calor é mais nítida com céu claro e com ventos calmos.

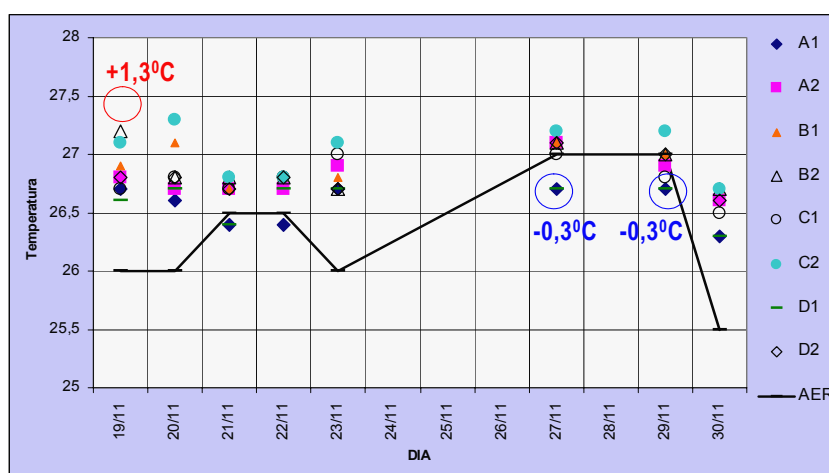


Gráfico 7.20: Comparação entre as temperaturas registradas em campo e no aeroporto local, à noite, com ventos leste e nordeste.

Em síntese, a ilha de calor foi mais intensa com os ventos mais lentos de leste e de nordeste. Por um lado, porque esses ventos já chegam à cidade mais aquecidos do que os de sudeste, dada as mudanças dos movimentos das massas de ar na região no período de verão, conforme explicação feita no início deste capítulo. Por outro lado, a configuração urbana existente é mais permeável aos ventos sudestes, fato observado através das figuras de erosão obtidas dos experimentos realizados em um túnel aerodinâmico. Note-se que o percentual de área ventilada (áreas em branco) para o vento de sudeste é superior, indicando que, com esta direção de vento a porção estudada está menos sujeita às concentrações de calor e de poluição do ar;

Pode-se, por fim, afirmar que os pontos D1 e D2 obtiveram um desempenho térmico mais satisfatório e os pontos C1 e C2, mais crítico, o que, dependendo do desempenho térmico das edificações próximas a estes pontos, pode estar provocando um maior desconforto aos seus usuários e maior consumo de energia para o resfriamento do ar interior.

## 7.4 Relações entre os ensaios de erosão de areia e os dados medidos em campo

A verificação das hipóteses enunciadas por esta tese depende ainda da análise comparativa entre os dados medidos em campo e as figuras de erosão de areia obtidas a partir dos experimentos em túnel aerodinâmico. Essa análise é necessária, essencialmente, para discutir a hipótese de que porções mais ventiladas (zonas erodidas) da cidade permanecerão com temperaturas mais baixas do que porções menos ventiladas (zonas estagnadas).

Primeiramente, foi verificado se a velocidade média do vento, medida em campo, nos pontos situados em áreas de estagnação - segundo as figuras de erosão e selecionados a partir da cartografia – é inferior à dos seus pares situados em áreas erodidas. Em seguida, foi avaliado se a temperatura média do ar nos pontos situados em áreas de estagnação do vento é superior à dos seus pares situados em áreas mais ventiladas (erodidas).

### 7.4.1 Comparação entre as condições de ventilação medidas no túnel aerodinâmico e em campo

Nas figuras de erosão, para ventos de sudeste, os pontos A2, B2, C2 e D2 permaneceram mais ventilados do que os seus respectivos pares, situados em zonas de estagnação. Já para ventos de leste e de nordeste, os pontos A1, B2, C1 e D2 permaneceram mais ventilados.

Analisando as médias das velocidades dos ventos de sudeste registradas em campo nos períodos da manhã e da tarde, verificou-se que os pontos A2, B2 e D2, situados em áreas de erodidas na figura de erosão, obtiveram uma média de velocidade do vento superior aos seus pares (pontos A2, B2 e D2), situados em áreas estagnação, corroborando com os experimentos realizados no túnel aerodinâmico. À noite, essa condição só se repetiu nos pares A1/A2 e B1/B2 (GRAF. 7.21).

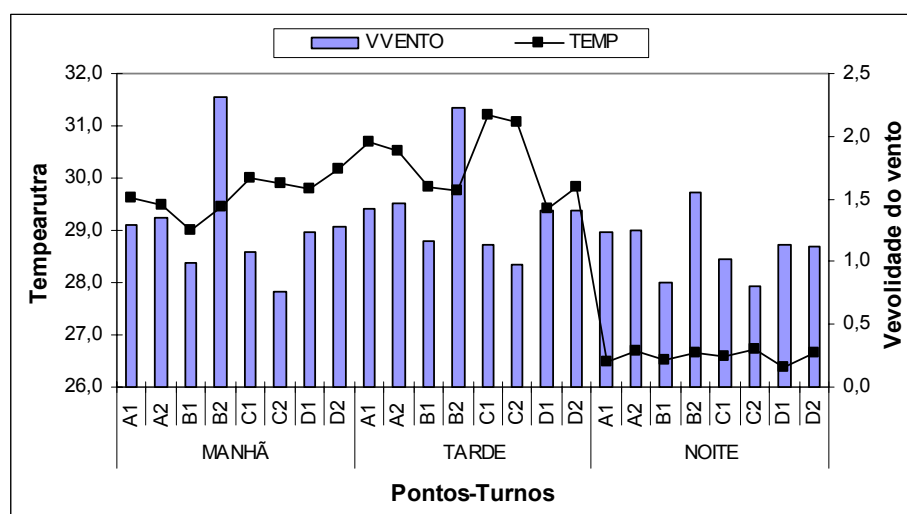


Gráfico 7.21: Relação entre as médias de temperatura do ar e de velocidade do vento nos pares de pontos para os três turnos de medição com vento sudeste.



As diferenças entre as velocidades médias de A1 e A2, C1 e C2 e D1 e D2 foram insignificantes (TAB. 7.10), visto que esses pontos começaram a ser ventilados a uma velocidade de rotação do ventilador do túnel aerodinâmico muito elevada (TAB. 7.12), enquanto que as velocidades medidas em campo foram, em geral, baixas (GRAF. 7.21).

Através das figuras de erosão percebe-se que a maior diferença de velocidade do vento verificada no par B1/B2 se deve ao fato de que o ponto B2 começou a ser ventilado a partir da velocidade de referência 10,7m/s, e em B1, após 16,0m/s (TAB. 7.12). Nos outros pares, os pontos considerados em áreas ventiladas só começaram a ser ventilados a uma velocidade de 13,4m/s em C2, e 14,7m/s em A2 e 16,0m/s em D2<sup>12</sup>.

Tabela 7.10: Diferença de velocidade de vento entre os pontos dos pares observados, considerando vento sudeste.

| PAR   | MANHÃ     | TARDE     | NOITE     |
|-------|-----------|-----------|-----------|
| A1/A2 | 0,06 m/s  | 0,05 m/s  | 0,02 m/s  |
| B1/B2 | 1,32 m/s  | 1,06 m/s  | 0,73 m/s  |
| C1/C2 | -0,31 m/s | -0,16 m/s | -0,21 m/s |
| D1/D2 | 0,04 m/s  | 0,00 m/s  | -0,01 m/s |

Tabela 7.11: Diferença de velocidade de vento entre os pontos dos pares observados, considerando ventos leste e nordeste.

| PAR   | MANHÃ    | TARDE    | NOITE     |
|-------|----------|----------|-----------|
| A1/A2 | 0,33m/s  | 0,34 m/s | 0,65 m/s  |
| B1/B2 | 0,05 m/s | 0,06 m/s | -0,25 m/s |
| C1/C2 | 0,17 m/s | 0,13 m/s | 0,24 m/s  |
| D1/D2 | 0,31 m/s | 0,27 m/s | -0,16 m/s |

Com ventos leste e nordeste, a correlação entre os ensaios de erosão de areia e os dados medidos em campo foi mais nítida. Pela manhã e à tarde, todos os pontos situados em zonas erodidas nas figuras de erosão permaneceram, em campo, com a velocidade média superior aos seus pares situados em zonas de estagnação (TAB. 7.11). À noite essa condição foi verificada nos pares A1-A2 e C1-C2 (GRAF. 7.22).

<sup>12</sup> As velocidades indicadas são de referência no interior do túnel, não correspondendo à velocidade verificada no ambiente urbano. Conforme explicado no capítulo 4, estas velocidades são as necessárias para provocar a saltação dos grãos de areia sobre a maquete.

Tabela 7.12: Velocidade do vento no interior do túnel quando se iniciou a ventilação dos pontos.

| PONTOS | DIREÇÃO DO VENTO |            |
|--------|------------------|------------|
|        | 90°              | 150°       |
| A1     | 13,4m/s          | Estagnação |
| A2     | Estagnação       | 14,7m/s    |
| B1     | Estagnação       | Estagnação |
| B2     | 16,0m/s          | 12,1m/s    |
| C1     | 12,1m/s          | Estagnação |
| C2     | Estagnação       | 13,4m/s    |
| D1     | Estagnação       | Estagnação |
| D2     | 16,0m/s          | 16,0m/s    |

(-) Zona de estagnação.

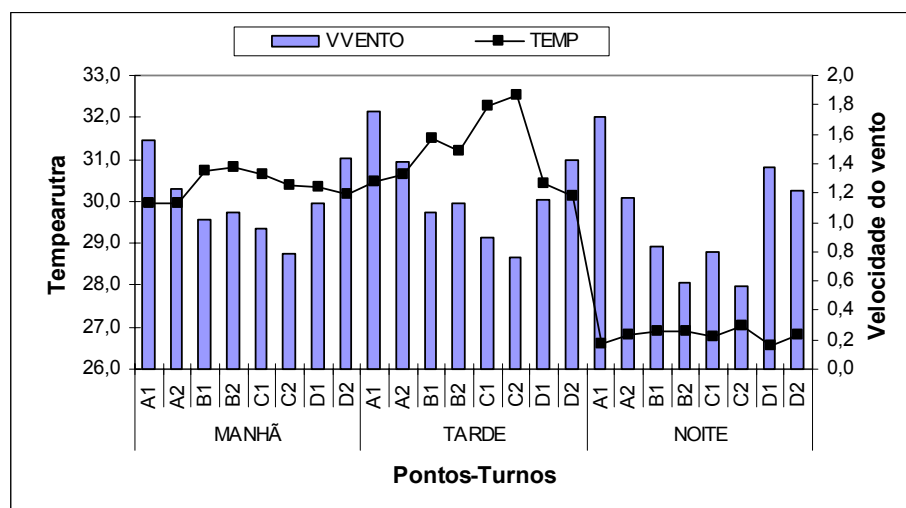


Gráfico 5.22: Relação entre as médias de temperatura do ar e de velocidade do vento nos pares de pontos para os três turnos de medição com ventos leste e nordeste.

Para essa direção de vento as maiores diferenças de velocidade ocorreram entre os pontos A1 e A2, pelo mesmo motivo que proporcionou diferença significativa entre os pontos B1 e B2 com vento sudeste. Com ventos leste e nordeste, o ponto A1 começou a ser ventilado com a rotação 13,4m/s, enquanto o seu par, A2, só passou a ser ventilado com velocidades superiores a 16,0m/s (TAB. 7.12).

A relação entre os resultados dos experimentos em túnel aerodinâmico e os dados medidos em campo fica mais clara ao calcular a frequência dos dias em que os pontos mais ventilados, segundo as figuras de erosão, também o foram em campo. Pela manhã, nos 14 dias em que o vento sudeste predominou, isso ocorreu em todos os dias com o par B1-B2, em seis dias com o par A1-A2, cinco dias

com D1-D2 e apenas três dias com C1-C2. Essa frequência, percentualmente, permaneceu semelhante nos outros turnos (TAB. 7.13).

Com ventos leste e nordeste, as maiores frequências ocorreram com os pares A1-A2, D1-D2 e C1-C2 pela manhã, A1-A2 e D1-D2 à tarde e A1-A2 e C1-C2 à noite (TAB. 7.13).

Tabela 7.13: Frequência da coincidência entre a figura de erosão e os dados medidos em campo.

| PAR   | SUDESTE   |           |           | LESTE-NORDESTE |           |           |
|-------|-----------|-----------|-----------|----------------|-----------|-----------|
|       | MANHÃ (%) | TARDE (%) | NOITE (%) | MANHÃ (%)      | TARDE (%) | NOITE (%) |
| A1/A2 | 42,8      | 37,5      | 40,0      | 75             | 83,3      | 75,0      |
| B1/B2 | 100,0     | 93,8      | 100,0     | 33,3           | 41,7      | 12,5      |
| C1/C2 | 21,4      | 18,8      | 25,0      | 58,3           | 41,7      | 100,0     |
| D1/D2 | 35,7      | 62,5      | 35,0      | 75             | 58,3      | 0,0       |

Obs: Em alguns dias, a diferença de velocidade do vento em alguns pares foi nula.

#### 7.4.2 Relação entre a velocidade do vento e a temperatura do ar medidas em campo

Esperava-se com a hipótese apresentada nesta tese, que os pontos mais ventilados permanecem com a temperatura menor do que naqueles situados em áreas de estagnação do vento. Procurando verificar essa relação, verificou-se que, pela manhã, com vento sudeste, a temperatura no ponto menos ventilado esteve mais elevada apenas no par A1/A2. À tarde isso ocorreu nos pares A1/A2 e B1/B2, estando igual no par D1/D2. À noite essa condição se repetiu nos pares C1/C2 e D1/D2, estando igual em A1/A2 (GRÁFICO 7.21).

Com ventos leste e nordeste a relação entre a velocidade do vento e a temperatura do ar foi mais evidente. Pela manhã, os pontos A2 e D1 (menos ventilados), obtiveram temperatura média do ar superior a dos seus pares, A1 e D2. À tarde e à noite essa condição se repetiu em todos os pares (GRÁFICO 7.22).

Tomando, agora, a frequência dos dias em que os pontos mais ventilados permaneceram com a temperatura do ar mais baixa do que os seus pares, percebe-se que, com vento sudeste, a maior frequência ocorreu com o par A1/A2 (71,4%), seguido de D1/D2 (50,0%) e C1-C2 (42,8%). À tarde, os pares se comportaram de maneira semelhante e à noite a maior frequência ocorreu com o par C1/C2 (60,0%), seguido de A1/A2 (50,0%) e D1/D2 (40,0%) (TAB. 7.14).

Tabela 7.14: Freqüência de dias em que os pontos mais ventilados permaneceram com a temperatura do ar mais baixa do que seus pares.

| PAR          | SUDESTE   |           |           | LESTE-NORDESTE |           |           |
|--------------|-----------|-----------|-----------|----------------|-----------|-----------|
|              | MANHÃ (%) | TARDE (%) | NOITE (%) | MANHÃ (%)      | TARDE (%) | NOITE (%) |
| <b>A1/A2</b> | 71,4      | 50,0      | 50,0      | 58,3           | 50,0      | 75,0      |
| <b>B1/B2</b> | 14,3      | 43,8      | 20,0      | 50,0           | 66,7      | 37,5      |
| <b>C1/C2</b> | 42,8      | 43,8      | 60,0      | 50,0           | 50,0      | 87,5      |
| <b>D1/D2</b> | 50,0      | 37,5      | 40,0      | 75,0           | 58,3      | 75,0      |

Obs: Em alguns dias a diferença de velocidade do vento e de temperatura do ar em alguns pares foi nula.

Com ventos leste e nordeste as freqüências foram mais elevadas, destacando-se o par D1/D2 pela manhã, o B1/B2 à tarde e C1/C2 à noite (TAB. 7.14).

Os resultados obtidos das análises descritas neste capítulo validam a metodologia desenvolvida, possibilitando a resposta às questões e a discussão das hipóteses norteadoras da tese. Também remetem à discussão de alguns conceitos e resultados de pesquisas referenciadas nos capítulos teóricos desta tese, a partir do que foram feitas diversas conclusões acerca das contribuições deste trabalho ao campo teórico da climatologia urbana e do urbanismo, acerca dos procedimentos metodológicos das pesquisas em climatologia urbana e acerca do comportamento climático da área estuda e sua repercussão na concepção da legislação urbana e de projetos urbanos para a cidade de João Pessoa, que são objeto do próximo capítulo.

# **Capítulo 8**

## **Conclusões**

---

Cabe neste momento responder as questões que nortearam esta tese e discutir a pertinência das hipóteses inicialmente elaboradas, para, então, concluir sobre as repercussões dos resultados do trabalho na teoria, nos procedimentos metodológicos atualmente utilizados na climatologia urbana, na revisão da legislação urbana e na concepção de projetos urbanos.

A análise de correlação mais detalhada, feita para cada dia de medição, em três horários, indicou o quão complexa é a relação entre o clima e a forma urbana. Ao comparar essas correlações com dados climáticos obtidos da estação climatológica do aeroporto local e de mapas sinóticos, demonstrou-se como essas relações se modificam no tempo, diminuindo ou aumentando de intensidade, especialmente com a mudança da direção dos ventos predominantes.

Embora a aplicação da metodologia não tenha tido a intenção de estudar o clima urbano de João Pessoa em sua totalidade, nem tampouco chegar a qualquer conclusão sobre o comportamento climático naquela cidade, os resultados obtidos trouxeram à tona questões que indicam algumas falhas na generalização de conceitos amplamente aceitos e nos procedimentos metodológicos empregados até então, e apontam algumas sugestões aplicáveis na definição de parâmetros para o projeto urbano, em particular, de possíveis intervenções na área de estudo ou em outras semelhantes na cidade de João Pessoa.

### **8.1 Conclusões acerca das implicações dos resultados da tese na teoria do SCU**

Do ponto de vista teórico, observa-se que fazer generalizações é arriscado, quando a quantidade de variáveis e as relações entre elas são infinitas no estudo do clima urbano, reforçando a idéia de que os casos devem ser analisados individualmente, e os resultados de estudos realizados em outros locais, mesmo em clima semelhante, somente podem ser tomados para se fazer deduções, nunca como conclusivo e representativo do novo objeto de estudo.

Conclui-se então que

- a metodologia apresentada por esta tese está coerente com a teoria do SCU (MONTEIRO, 1975), pois possibilita sua compreensão do clima urbano, identificando seu núcleo, mensurando sua produção e apontando suas causas. Por fim, produz subsídios para a ação planejada de auto-regulação;
- os resultados obtidos na aplicação à cidade de João Pessoa, mesmo não sendo suficientes para definir o ritmo das variações de tempo para o local estudado – como sugerem Sorre (1934) e Monteiro (1975) -, confirmam a teoria do SCU ao diagnosticar a complexidade do

clima urbano em João Pessoa em termos de variedade e intensidade das relações que se estabelecem e ao constatar a sua evolução, dado o dinamismo do fato urbano e climático observados no período quando foram feitas as medições;

- os resultados deste trabalho confirmam a tese de que, à noite, a ilha de calor é melhor percebida com ventos mais lentos, e no caso da área estudada, a ilha de calor diurna é mais intensa do que a noturna;
- não é possível estabelecer como regra que o aumento da densidade construída (e assim, a verticalização das construções) provoque a elevação da temperatura. Os resultados apresentados aqui indicaram exatamente o contrário, o que remete à hipótese de que até um certo limite, e com afastamentos adequados, a verticalização das edificações contribui para a redução da temperatura, pois aumenta o sombreamento das ruas e, em alguns casos, provoca a aceleração dos ventos, como ocorreu na área estudada;
- deve-se, no caso dos climas tropicais úmidos, buscar uma forma urbana que proporcione ambientes com uma menor quantidade de horas de exposição ao sol e ventilação abundante, com velocidades dentro dos limites de conforto e segurança aos pedestres;
- ASSIS (2000), através de experimentos realizados para a cidade de Belo Horizonte, mostrou que nos *canyons* urbanos, com uma obstrução de até 15% da hemisfera celeste local, não há um aumento relevante da capacidade do recinto urbano reter calor, fato observado apenas quando essa obstrução excede os 40%. Com os resultados obtidos em João Pessoa percebe-se que a relação proposta pela autora é relativa, visto que as análises de correlação indicaram que a relação entre a temperatura do ar e o fator de visão do céu depende da direção e da velocidade do vento incidente. E ao contrário do que demonstraram os estudos antecedentes, no caso de João Pessoa o menor coeficiente de fator de visão do céu proporcionou menores temperaturas do ar;
- embora para o caso estudado os índices de correlação entre a temperatura do ar e o fator de visão do céu tenham sido baixos, os resultados indicaram que essa relação pode ser diferente da proposta por Assis (2000) e que ainda não pode ser definida sem que se tenha considerado as outras variáveis envolvidas, principalmente a velocidade e a direção do vento, a umidade relativa do ar e as propriedades térmicas dos materiais do recinto;
- o estabelecimento de uma altura média dos edifícios para se ter um fator de visão do céu ideal deve considerar a existência de afastamentos laterais entre os edifícios, condição comum em grande parte das cidades brasileiras;

- a análise do clima urbano tomando como referência apenas as relações entre a temperatura do ar e as variáveis da forma urbana é muito limitada, podendo gerar informações incompletas e incorretas. Os resultados apresentados aqui mostraram o quanto a velocidade do vento, a umidade relativa do ar, a condição de céu e a radiação solar interferem na temperatura, estando essas variáveis também condicionadas pela forma urbana, cuja função no sistema é, em parte, controlar os escoamentos e a incidência da radiação solar no ambiente;
- é equivocado atribuir à maior incidência de ventos mais fortes e constantes nas cidades litorâneas, a fraca correlação entre a forma urbana e a temperatura do ar, como afirmam Assis (2000) e Serra (1984). Em primeiro lugar, há que ser considerada a temperatura do vento incidente. Em segundo lugar, se a forma urbana não for permeável à ventilação predominante no local, essa (mesmo com temperatura inferior à estrutura urbana) não será capaz de retirar o calor armazenado no interior da cidade, a exemplo de Copacabana (CORBELLA & YANNAS, 2003). Em João Pessoa, as maiores correlações entre a temperatura do ar e a forma urbana ocorreram exatamente quando estas também foram boas com a velocidade do vento, principalmente quando os ventos sopraram de leste e de nordeste à tarde. Daí a importância dos experimentos em túnel aerodinâmico para o conhecimento mais aprofundado do comportamento desta variável;
- a correlação entre a temperatura do ar e a velocidade do vento nem sempre é inversa, ou seja, nem sempre a temperatura tende a diminuir quando a velocidade do vento se eleva, pois, como no caso anterior, essa relação depende da origem do escoamento, e se este possui uma temperatura maior ou menor do que o local onde está sendo feita a medição;
- o mesmo ocorre na correlação entre a temperatura do ar e as variáveis condição do céu (nebulosidade) e umidade relativa do ar. Os resultados obtidos nesta pesquisa indicam que essas correlações tendem a ser inversas, pela manhã e à tarde, e diretas à noite. Possivelmente, à noite a evaporação e os ventos fracos contribuíram para a elevação da nebulosidade e da umidade relativa do ar, como consequência o ar úmido e as nuvens formam uma barreira à passagem da radiação, da atmosfera para a cidade durante o dia, e da cidade para a atmosfera durante a noite.



## **8.2 Conclusões acerca das implicações dos resultados nos procedimentos metodológicos utilizados nos estudos de climatologia urbana**

Em termos metodológicos, este trabalho traz alguns avanços para as práticas de observação e interpretação dos fenômenos climáticos urbanos. Entretanto, as suas limitações e as necessidades de avanço nesse campo, que ainda perduram, exigem a reflexão sobre algumas questões pendentes e sobre o encaminhamento de novos passos a serem dados neste campo de pesquisa. Observa-se, portanto, que:

- análises de correlação feitas a partir de dados coletados em apenas um dia, mesmo que este seja típico, podem ser insuficientes, em parte pela pequena quantidade de dados, em parte pela variação do comportamento das relações ao longo do tempo e do espaço, fato observado nas correlações calculadas para cada turno e dia do período de medição realizado nesta pesquisa (ver Tabelas 7.1, 7.2 e 7.3 e Apêndice C) e em Duarte (2000). Este talvez seja o motivo pelo qual Sampaio (1981) não identificou correlação significativa entre a intensidade de uso do solo e as diferenças de temperatura interna no espaço urbano de Salvador-BA. Neste sentido, o período mínimo de uma semana, com três medições ao longo do dia (manhã, tarde e noite), parece ser mais adequado, podendo ser melhorado se as medições forem horárias;
- a escolha do período de medição ainda pode estar baseado em previsões climáticas de possíveis movimentos de massas de ar e/ou de estações climáticas típicas do local em estudo;
- da mesma forma, a interpretação dos dados medidos em campo deve estar baseada na análise de dados sinóticos referentes ao mesmo período de medição, tendo em vista possíveis mudanças nos movimentos de massas de ar que repercutiram, especialmente, na direção e velocidade do vento, na umidade relativa e temperatura do ar;
- as correlações devem ser calculadas e apresentadas, segundo critérios de significância, que indicam possíveis erros estatísticos e a veracidade da correlação verificada. O nível de significância adequado ao estudo do clima urbano ainda precisa ser estabelecido. Nesta pesquisa, houve uma variação de 8 a 20 elementos por variável (climáticas e urbanas) para as análises de correlação ponto a ponto, e de 256 a 560 elementos para as correlações que consideraram os dados de todos os pontos (dependendo da direção do vento e do turno). Essa condição tornou adequados os níveis de significância 1% e 5%. Para uma quantidade de dados menor, especialmente para pesquisas realizadas num

período menor, talvez seja possível admitir um rigor menor, adotando um nível de significância de 10%. Isso pode ser observado através das correlações calculadas para cada turno e dia de medição desta pesquisa (ver Tabelas 7.1, 7.2 e 7.3, no capítulo 7), através das quais se observou que em vários dias o índice de correlação foi moderado – entre 0,6 e 0,7 –, mas com nível de significância entre 5% e 10%;

- os modelos explicativos da variação da temperatura do ar, obtidos através das análises de regressão que não considerarem as variáveis climáticas envolvidas nas trocas térmicas, são incompletos, e podem elevar a margem de erro das previsões realizadas com eles;
- além das correlações (diárias e para todo o período de medição) que congregam as variáveis da forma urbana e servem para comparar o comportamento térmico de diferentes estruturas, os resultados desta pesquisa mostraram a conveniência de se fazer análises de correlação em cada ponto do transecto, considerando as variáveis climáticas ali medidas. Tais análises clarificaram melhor a relação entre cada tipo de estrutura e o clima, sem perder, evidentemente, a influência do entorno;
- é importante, quando possível, considerar a temperatura das superfícies e a temperatura radiante. As imagens de satélite têm sido utilizadas com boa eficiência, não estando, no entanto, disponíveis para todas as localidades devido à nebulosidade elevada, além de ter alto custo de aquisição. Outra limitação desse recurso é o fato de medir a temperatura apenas das superfícies horizontais. O termômetro de superfície, outro equipamento utilizado em alguns trabalhos, limita-se a medições pontuais, o que remete a uma maior dificuldade na análise do fenômeno em superfícies heterogêneas. A temperatura radiante normalmente é medida com termômetros de globo, que custam muito caro e são de difícil transporte;
- a sobreposição das figuras de erosão às imagens termais produzidas a partir de satélites, aliada às medições de temperatura e de velocidade e direção do vento, pode oferecer uma interpretação mais precisa dos processos de trocas horizontais de calor no ambiente urbano;
- as medições simultâneas, feitas com estações fixas, podem ser mais precisas do que as realizadas em transecto móvel. Entretanto, a carência de equipamento e de pessoal de apoio, na maioria das vezes, impedem esse tipo de procedimento. Portanto, é importante que o tempo entre a medição no primeiro ponto do transecto e o último não exceda 60 minutos;

- a medição instantânea tem sido a mais utilizada para as medições de temperatura do ar, temperatura superficial e umidade relativa do ar, entretanto, para a medição de velocidade e direção do vento, esse procedimento ainda não é consensual. Em alguns países essa medição é instantânea, em outros, é feita durante 10 minutos, extraído-se daí uma média aritmética para a velocidade e a moda para a direção do vento. Este trabalho adotou, como já foi dito na metodologia, a segunda possibilidade, o que pareceu adequado;
- a realização de ensaios em túnel aerodinâmico durante o processo de concepção de projetos de intervenção urbana poderá auxiliar na definição da relação adequada e viável entre a altura e os afastamentos entre os edifícios, necessário à obtenção da ventilação e do sombreamento necessários à qualidade ambiental das cidades.

### **8.3 Conclusões acerca do comportamento climático da área e sua implicação na concepção da legislação e de projetos urbanos para a cidade de João Pessoa**

Os resultados desta pesquisa reforçam o que já vem sendo dito em outros estudos e em seminários realizados na cidade de João Pessoa sobre a necessidade de uma reformulação urgente da legislação urbana daquela cidade, tendo em vista os danos causados pelo modelo atual de ocupação poderem se agravar se o adensamento construtivo atingir a sua plenitude, conforme as possibilidades definidas na legislação vigente.

Essa reformulação, claro, deverá ser embasada em estudos científicos mais amplos e profundos, que orientem as discussões sobre o teor da nova legislação e os projetos urbanos futuros.

Dos resultados apresentados neste estudo, extraem-se as seguintes conclusões:

- no que se refere ao subsistema termodinâmico, os dados medidos não foram suficientes para o cálculo do balanço energético na área estudada, mas pôde-se identificar que os principais insumos na cidade de João Pessoa são a radiação solar e os ventos Alísios de sudeste e em alguns períodos, de nordeste;
- a partir de uma medição realizada às 5 horas da manhã em dois dos quatro pares de pontos observados nesta pesquisa e na estação de referência, verificou-se que enquanto na estação de referência a temperatura do ar caiu 1,5°C, na porção urbana observada a queda foi de apenas 0,5°C, mostrando o quanto o ambiente urbano armazena calor durante a noite, sem que a convecção pelo vento e a radiação térmica para a atmosfera

sejam suficientes para resfriar a cidade até, pelo menos, os níveis verificados no seu entorno;

- os principais produtos identificados no subsistema termodinâmico de João Pessoa foram a alteração da ventilação horizontal e a formação de ilha de calor, revelando como o processo de urbanização daquela cidade tem modificado o clima local;
- a ilha de calor diurna verificada no local apresenta uma magnitude de 2,3°C em média e máxima de 3,7°C com ventos leste e nordeste no período observado, valores preocupantes, já que a área estudada ainda é pouco adensada e se encontra no primeiro plano em relação à incidência dos ventos dominantes, o que leva a crer que as porções mais centrais da cidade podem estar ainda mais aquecidas;
- o comportamento verificado nos pontos D1 e D2, à tarde, com temperatura do ar variando, em média, de -0,18°C a +0,48°C em relação à estação de referência, reforça a necessidade de se elaborar uma forma urbana para a cidade de João Pessoa que privilegie o sombreamento através de elementos naturais e a ventilação adequada das ruas;
- os coeficientes de correlação entre a velocidade do vento e a distância em relação ao mar indicam uma leve tendência para a redução de velocidade na medida em que o vento penetra a malha urbana. Essa tendência é atribuída à rugosidade da superfície, mas que, segundo Peregrino (2005), é acentuada pelo escalonamento do gabarito em altura das edificações;
- é possível propor uma ocupação verticalizada sem que haja danos à ventilação, desde que seja fundamentada em bases técnico-científicas, ao contrário do que foi feito na legislação urbana em vigor;
- o crescimento da urbanização da área estudada tem provocado a redução da cobertura vegetal e das áreas de solo permeável, agravado pela inexistência de áreas verde no local. Assim, devem ser revistos os valores das taxas de permeabilidade do solo a ser reservada em cada empreendimento (estabelecido na legislação urbana); e o poder público municipal, por sua vez, deve desenvolver um programa de arborização, contribuindo assim para o sombreamento dos passeios públicos e praças e, conseqüentemente, para redução dos ganhos de calor pela estrutura urbana;

#### **8.4 Resposta às questões norteadoras, discussão sobre as hipóteses iniciais e validação da metodologia**

Com base nos resultados apresentados anteriormente, cabe neste momento responder as questões norteadoras da tese, necessário à comprovação das hipóteses apresentadas e à validação da metodologia desenvolvida.

Embora as relações entre os ensaios de erosão de areia e os dados medidos em campo não terem sido evidenciadas em todos os pares de pontos durante todo o período de medição – dada a variabilidade da velocidade e da direção do vento em campo –, os resultados obtidos fazem constatar que os experimentos em túnel aerodinâmico são representativos das condições de ventilação para as quais foram desenvolvidos, ratificando a sua eficácia nos estudos de ventilação urbana.

As figuras de erosão auxiliam na observação das velocidades e das direções do vento, fato importantíssimo na análise das trocas térmicas horizontais no ambiente urbano, fenômeno que até então vinha sendo feito por outros pesquisadores baseados apenas em suposições ou em medições em campo, o que demanda uma grande quantidade de tempo e de estações climatológicas.

A seleção dos pontos para medições microclimáticas baseada nas figuras de erosão auxilia a comparação dos comportamentos térmicos de duas (ou mais) porções urbanas morfologicamente semelhantes (ou não), mas com condições de ventilação diferentes, mostrando que, por isso, elas podem ter qualidades ambientais distintas.

Por fim, em relação ao projeto urbano, seja este destinado à intervenção em um ambiente já construído ou na criação de um novo, a figura de erosão pode auxiliar no dimensionamento e na locação das edificações, na orientação da malha urbana, tornando-se uma base de informação importante para se evitarem efeitos negativos da relação forma urbana – ventilação.

É fato que a forma urbana condiciona os escoamentos de vento, alterando a sua velocidade e a sua direção.

Ao comparar as figuras de erosão com as plantas de taxa de ocupação, índice de aproveitamento e gabarito em altura dos edifícios da área estudada, percebeu-se que, como a área estudada é predominantemente ocupada por edificações com até dois pavimentos, há uma maior aceleração do vento em torno de edifícios mais altos, acima de oito pavimentos, fazendo com que as porções mais próximas a esses edifícios permaneçam por mais tempo ventiladas.

Isso ocorre, em parte, pelos efeitos aerodinâmicos causados pelos edifícios – que se intensificam à medida que se elevam a sua altura –, e pelo aumento progressivo dos afastamentos entre os edifícios, assegurado pela legislação local, como já foi comentado no capítulo anterior.

As análises de correlação também indiciam que esse fenômeno ocorre, mas depende da direção do vento predominante e da sua velocidade. Com vento sudeste a velocidade do vento se correlacionou inversamente com a distância em relação ao mar e com o índice de aproveitamento, e diretamente, com o fator de visão do céu, pela manhã. À tarde, esta variável se correlacionou inversamente com o índice de aproveitamento. À noite não foram verificadas correlações significativas.

Com ventos leste e nordeste, a velocidade do vento se correlacionou inversamente com a taxa de ocupação nos três turnos, com a distância em relação ao mar à tarde, e com o fator de visão do céu, à noite. Esta variável também se correlacionou diretamente com o índice de aproveitamento nos três turnos e com o fator de visão do céu pela manhã e à tarde.

Sobre essas correlações, salienta-se que os fatores de visão do céu verificados nos pontos de medição foram relativamente altos, e a geometria das ruas não as caracteriza como uma rua tipo “desfiladeiro”, dada a alternância das alturas dos edifícios e os afastamentos laterais. Portanto, em outras situações, como o caso de Copacabana no Rio de Janeiro – onde os fatores de visão do céu são menores e os edifícios têm praticamente a mesma altura e sem afastamentos laterais (SOUZA E SILVA, 2003) – essa relação pode não existir.

Os resultados apresentados anteriormente confirmam o conceito de clima sugerido por Sorre (1934), mostrando a dinamicidade do clima urbano provocada pelas interações entre a cidade (forma e o uso) e a atmosfera acima dela, com suas peculiaridades em termos de circulação e perturbações típicas e anomalias.

Em João Pessoa, no período da realização desta pesquisa, as anomalias positivas no campo da Radiação Solar de Onda Longa foi determinante, reduzindo as atividades convectivas, nítidas no período quando predominou a incidência dos ventos de leste e de nordeste, mais lento e aquecidos.

No caso específico da área estudada, verificou-se que durante o período da manhã a umidade relativa do ar é a variável que mais se relaciona (inversamente) com a temperatura do ar, formando uma barreira à incidência da radiação solar na estrutura urbana. À tarde, com o aumento da radiação solar e da velocidade média do vento e a conseqüente redução da umidade, as correlações se diferenciam em função da direção do vento incidente na cidade. Com vento sudeste, a velocidade do vento, a umidade relativa e a condição do céu obtiveram índices de correlação (negativos) semelhantes com a temperatura do ar, enquanto que com ventos leste e nordeste a velocidade do vento se correlacionou (inversamente) mais fortemente.

À noite somente foram verificadas correlações significativas quando o vento soprou de leste e de nordeste. Neste turno a velocidade do vento e a condição do céu foram mais determinantes, só que esta última, ao contrário do que ocorreu pela manhã, se correlacionou diretamente com a temperatura

do ar, indicando que as nuvens tendem a criar uma barreira à dispersão do calor acumulado pela estrutura urbana.

Com vento sudeste, o pavimento de asfalto foi a variável da morfologia urbana que mais contribuiu para a elevação da temperatura do ar, fato ocorrido no período da tarde, quando o asfalto atinge sua temperatura máxima. Com os ventos mais lentos de leste e de nordeste, o fator de visão do céu, a taxa de ocupação e o índice de aproveitamento é que passaram a influenciar mais significativamente o comportamento da temperatura.

Com as respostas a essas questões pode-se, então, confirmar a hipótese de que **o comportamento da temperatura do ar no ambiente urbano está condicionado à variação dos demais elementos climáticos – especialmente a condição do céu, a radiação solar, a umidade relativa do ar e o vento –, que, ao interagirem entre si e com a forma urbana, se modificam ao longo do tempo, definindo o ritmo das variações da temperatura.**

Em acordo com a hipótese anterior, pode-se confirmar **parcialmente** a hipótese de que, **comparando duas porções urbanas com características morfológicas semelhantes, verifica-se que a situada numa área de estagnação do vento permanecerá mais aquecida do que a situada numa área ventilada**, visto que essa condição não foi verificada em todos os pontos e em todos os momentos da medição.

Por fim, os resultados desta pesquisa, obtidos com a validação da metodologia desenvolvida, se ajustam aos propósitos do campo da morfologia urbana, pois mostram como o processo de urbanização altera o clima local, gerando distintos ambientes, com qualidades ambientais também distintas, cuja influência no comportamento e na qualidade de vida das pessoas que os habitam pode ser determinante. Mostra, portanto, a necessidade de se planejar e projetar a cidade de maneira adequada ao clima local, extraindo dele o que há de bom e controlando e amenizando as suas adversidades.

### **8.5 Dificuldades encontradas**

As dificuldades verificadas nesta pesquisa foram semelhantes às percebidas em outros trabalhos neste campo de pesquisa: limitações de recursos financeiros, carência de equipamentos (quantidade e qualidade) e acesso à base de dados meteorológicos medidos nas estações meteorológicas estatais, que mesmo para pesquisas realizadas em instituições públicas, são comercializados a preços longe do alcance dos fomentos oferecidos pelos órgãos de pesquisa. Os

disponibilizados ao público em geral, através da rede mundial de Internet, são insuficientes, e nem sempre são divulgados com regularidade.

### **8.6 Indicações para novos estudos**

Antes de trazer respostas aos problemas identificados no campo da climatologia urbana e do projeto urbano, este trabalho levanta questões que remetem à necessidade do aprofundamento dos estudos nestas áreas do conhecimento.

O desdobramento deste estudo, ampliando-o para o restante da cidade de João Pessoa, poderá ser um recurso fundamental no processo decisório da reformulação do Plano Diretor daquela cidade.

Novas aplicações da metodologia apresentada, em João Pessoa e em outras cidades, podem ser feitas no sentido de verificar novas correlações entre a temperatura do ar e as temperaturas radiante e superficial, objetivando a melhoria dos coeficientes de determinação, e assim, os modelos explicativos do comportamento da temperatura do ar.

A metodologia ainda deve ser validada para os subsistemas físico-químico e hidrometeorológico, de acordo com as necessidades das cidades onde for adotada.

O comportamento climático verificado no espaço urbano deve ser avaliado quanto ao seu reflexo no interior das edificações, tendo em vista o conforto térmico dos usuários e o consumo de energia para climatização dos edifícios.

Percebe-se, também, a importância de se ter nas cidades de médio e grande portes uma rede de estações climatológicas para monitorar o ambiente em termos de temperatura, ventos, regime de chuvas e qualidade do ar. Esse monitoramento regular possibilita a definição mais eficiente de estratégias para adequar corretamente a urbanização ao clima local, evitando-se assim vários transtornos, como a ilha de calor, a poluição do ar e as enchentes, além de suas conseqüências nocivas à vida humana.

### **8.7 Considerações finais**

Os avanços na área do conhecimento referente à climatologia urbana ainda são muito lentos. Porém, há pouquíssima utilização dos conhecimentos obtidos nessa área na concepção dos planejamentos e projetos de cidades, de maneira que as pesquisas têm se concentrado no estudo de experiências de planejamentos mal sucedidos de cidades que não levaram em consideração a relação clima-urbanização.



De fato, ainda há muito a se fazer em etapas anteriores ao planejamento e ao projeto. Necessita-se sensibilizar e convencer as pessoas que comandam o poder público de que a adequação da urbanização ao clima local é imprescindível para um desenvolvimento sustentado da cidade, incluindo-se aí o conforto e a saúde de seus habitantes e a conservação de energia. Necessita-se, ainda, melhorar a formação dos profissionais de arquitetura e urbanismo para que saibam lidar com esta questão.

A melhoria da competência técnica e a conscientização dos administradores e legisladores da cidade repercutirão na formulação de uma legislação urbana mais eficiente, que atenda não apenas aos interesses do mercado imobiliário ou de qualquer outro setor, mas principalmente a qualidade ambiente da cidade e de vida de seus habitantes.

Uma legislação adequada deverá fomentar o desenvolvimento de recursos tecnológicos adequados ao planejamento e ao projeto da cidade, possibilitando o aperfeiçoamento das técnicas existente e ampliando o grau de certeza dos diagnósticos e proposições.

Neste sentido, a metodologia desenvolvida nesta tese poderá contribuir significativamente para estes propósitos, ajudando na compreensão dos fenômenos provenientes das relações clima-forma urbana e fornecendo informações necessárias à fundamentação teórica de prescrições legais e de soluções técnicas de projeto.

## **Referências Bibliográficas**

---

ARAÚJO, Virgínia Maria Dantas de. *Parâmetros de conforto térmico para usuários de edificações escolares no litoral nordestino brasileiro*. São Paulo: FAUUSP, 1996. (Tese, Doutorado em Arquitetura).

ALVES FILHO, 2001. As enchentes. In: TARIFA, José Roberto; AZEVEDO, Tarik Rezende. *Os climas na cidade de São Paulo; teoria e prática*. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2001. Cap. 5, p. 94-111.

**ASHRAE Hand Book**. New York: Fundamentals, 1977.

ASSIS, Eleonora Sad de. Bases teóricas para a aplicação da climatologia ao planejamento urbano. In ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1, 1990, Gramado. Anais... Gramado: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 1990a.

\_\_\_\_\_. *Mecanismos de desenho urbano apropriados à atenuação da ilha de calor urbana; análise de desempenho de áreas verdes em clima tropical*. Rio de Janeiro: FAU/UFRJ, 1990b. (Dissertação, Mestrado em Arquitetura).

\_\_\_\_\_. *Impactos da forma urbana na mudança climática; método para previsão do comportamento térmico e melhoria de desempenho do ambiente urbano*. São Paulo: FAUUSP, 2000. (Tese, Doutorado em Arquitetura e Urbanismo).

\_\_\_\_\_. A abordagem do clima urbano e aplicação no planejamento da cidade: reflexões sobre uma trajetória. In ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7 e ENCONTRO LATINO AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4, 2005, Maceió. Anais... Maceió: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2005.

**ATLAS DO ESTADO DA PARAÍBA**, 1985.

AYNSLEY, A. D., MELBOUNE, W., VICKERY, B. J. *Architectural Aerodinamics*. Applied Science Publishers, London, 1977.

AZEVEDO, Tarik Rezende. O Fluxo de calor gerado pelas atividades humanas. In: TARIFA, José Roberto; AZEVEDO, Tarik Rezende. *Os climas na cidade de São Paulo; teoria e prática*. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2001. Cap. 4, p. 71-93.

BARBIRATO, G. M. O uso da modelagem climática no planejamento dos espaços urbanos. In ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5, 1999, Fortaleza. Anais... Fortaleza: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 1999.

BLASSMANN, Joaquim. *Aerodinâmica das construções*. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1983.

BRANDÃO, Ana Maria P. M. *O clima urbano da cidade do Rio de Janeiro*. São Paulo: FFLCH/USP, 1996. (Tese, Doutorado em Geografia).

\_\_\_\_\_. Clima urbano e enchentes na cidade do Rio de Janeiro. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, Sandra B. da. (Orgs). *Impactos ambientais urbanos no Brasil*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001. Cap. 2, p. 47-102.

**BRASIL**. Estatuto da cidade. (2002). Estatuto da cidade: guia para implementação pelos municípios e

cidadãos: Lei n. 10.257, de 10 de julho de 2001, que estabelece diretrizes gerais da política urbana. – 2. ed. – Brasília: Câmara dos Deputados, Coordenação de Publicações, 2002. p. 273.

CARVALHO, Homero Jorge Matos de. *Parâmetros climatológicos para o estudo do balanço termo-energético de edificações da cidade de João Pessoa – PB*. Natal: UFRN, 2001. (Dissertação, Mestrado em Arquitetura e Urbanismo).

CASTRO, Maria G. da Silva. A chuva ácida. . In: TARIFA, José Roberto; AZEVEDO, Tarik Rezende. *Os climas na cidade de São Paulo; teoria e prática*. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2001. Cap. 7, p. 127-135.

CHANDLER, T. J. *Urban climatology and its relevance to urban design*. WMO – Nº 438, Geneva: 1976.

**Constituição Estadual da Paraíba**. Capítulo IV – Da proteção do meio ambiente e do solo, Art. 229. Promulgada em 1989.

CORBELLA, Oscar Daniel e YANNAS, Simos. *Posto 3 Copacabana Rio de Janeiro*. Salvador, BA, Anais do IV ENCAC, FAU/UFBA - ANTAC, pág. 118-123, 1997.

CORBELLA, Oscar D.; YANNAS, Simos. *Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos*. Rio de Janeiro: Revan, 2003.

DANNI-OLIVEIRA, Inês M. A cidade de Curitiba e a poluição do ar - implicações de seus atributos urbanos e geoecológicos na dispersão de poluentes em período de inverno. In: MONTEIRO, C. A. de F.; MENDONÇA, F. (Orgs.). *Clima Urbano*. São Paulo: Contexto, 2003. Cap. 6, p. 155-173.

DEL RIO, Vicente. *Introdução ao desenho urbano no processo de planejamento*. São Paulo: Pini, 1990.

DINES, Milton. *Climatologia urbana e o desenho das cidades; insumos para o planejamento da metrópole paulistana*. São Paulo, FAUUSP, 1991. (Dissertação, Mestrado em Arquitetura e Urbanismo).

DRAPPER, N. R.; SMITH, H. *Applied regression analysis*. New York: John Wiley, 1981.

DUARTE, D.; MAITELLI, G. Clima urbano e planejamento em regiões tropicais continentais. In ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5, 1999, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 1999.

DUARTE, D. Helena Silva. *Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima tropical continental*. São Paulo: FAUUSP, 2000. (Tese, Doutorado em Arquitetura e Urbanismo).

Microsoft Excel, versão 2000, para Windows.

FERRAZ, Aline Paiva Montenegro. *Estudo da repercussão das variáveis climáticas decorrentes da ocupação do solo em intermares*. João Pessoa: PRODEMA/UFPB, 2003. (Dissertação, Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente).

FONTES, Maria Solange G. de Castro. Análise da correlação entre temperatura do ar e elementos da estrutura urbana, na cidade de São Carlos - SP. In ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE

CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5, 1999, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 1999.

FROTA, Anésia B. *Geometria da insolação*. São Paulo: Geros, 2004.

GANDEMER, J. & GUYOT, A. *Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti*. Paris: Ministère de la Qualité de la Vie, 1976.

GIVONI, B. *Man, climate and architecture*. London: Applied Science Publishers, 1969.

GONÇALVES, Neyde M. S. Impactos pluviiais e desorganização do espaço urbano de Salvador. In: MONTEIRO, C. A. de F.; MENDONÇA, F. (Orgs.). *Clima Urbano*. São Paulo: Contexto, 2003. Cap. 3, p. 136-144.

GONÇALVES DA SILVA, Francisco A.. *O vento como ferramenta no desenho do ambiente construído; uma aplicação ao Nordeste do Brasil*. São Paulo: FAUUSP, 1999. (Tese, Doutorado em Arquitetura).

GONÇALVES DA SILVA, Francisco de A.; SARAIVA, Jorge G.; MARQUES, Fernando V.. Metodologia de avaliação das ações do vento no planejamento da ocupação do solo. In ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7 e ENCONTRO LATINO AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4, 2005, Maceió. *Anais...* Maceió: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2005.

GOUVÊA, Luiz Alberto. *Biocidade; conceitos e critérios para um desenho ambiental urbano, em localidades de clima tropical de planalto*. São Paulo: Nobel, 2002.

GUERRA, V. *Verificação da influência do padrão de ocupação do solo urbano no topo de parte da falésia do Cabo Branco, em João Pessoa - PB, na variável climática vento*. João Pessoa: UFPB, 2005. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Urbana).

IMAMURA-BORNSTEIN, I. R. *Observational studies of urban heat island characteristics in different climate zones*. Japão: University of Tsukuba, 1991. (Tese, Doutorado em Geociência).

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Dados meteorológicos para a cidade de João Pessoa. <http://www.inmet.gov.br>. Novembro de 2004.

JANEIRO BORGES, A. R. e SARAIVA, J. A. G., *Erosion technique for assessing ground level winds*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1981.

KATZSCHNER, L.; FREIRE, T.; ANDRADE, T.; CARVALHO, L. Urban Climate of Salvador: thermal confort pattern. In ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5, 1999, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 1999a.

KATZSCHNER, L.; REINHOLD, M.; LOURENCO, L.D. Urban climate in the context of a sustainable development. In ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5, 1999, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 1999b.

LANDSBERG, H. E. *The urban climate*. New York: Maryland Academic Press, 1981.

**JOÃO PESSOA**. Lei Orgânica do Município. Art. 175, 1990.

LEVIN, Jack. *Estatística aplicada a ciências humanas*. São Paulo: Habra, 1977.

LOMBARDO, M. A. *A ilha de calor na Metrópole Paulistana*. São Paulo: FFLCH-USP, 1984. (Tese, Doutorado em Geografia).

\_\_\_\_\_. *Qualidade ambiental e planejamento urbano: considerações de método*. São Paulo: FFLCH-USP, 1995. (Tese, Livre-Docência em Geografia).

MASCARÓ, L. R. de. *Ambiência urbana*. Porto Alegre: Sagra: D.C. Luzzatto, 1996.

MENDES NETO, Armando de O. *Mapeamento das patologias em estruturas prediais de concreto armado no município do Rio de Janeiro*. Niterói: UFF, 2003. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Civil).

MILONE, Giuseppe. *Estatística geral e aplicada*. São Paulo: Pioneira Thomson Learnig, 2004.

MONTEIRO, C. A. de F. *Teoria e clima urbano*. São Paulo: FFLCH-USP, 1975. (Tese, Livre-Docência em Geografia).

\_\_\_\_\_. *Clima e excepcionalismo; conjecturas sobre o desenvolvimento da atmosfera como fenômeno geográfico*. Florianópolis: Editora da UFSC, 1991.

MORENO, Manuel F. N.. *Qualidade ambiental nos espaços livres em áreas verticalizadas da cidade de São Paulo*. São Paulo: FAU/USP, 2001. (Tese, Doutorado em Arquitetura e Urbanismo).

MORRIS, A. E. J. *História de la forma urbana: desde sus orígenes hasta la Revolución Industrial*. Barcelona: Gustavo Gili, 1984.

OKE, T. R. *Boundary layer climates*. London: Methuen, 1978.

\_\_\_\_\_. *Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations*. In: Journal of Climatology, 1981.

\_\_\_\_\_. *The energetic basis of the urban heat island*. In: Quat. J. R. Met. Soc. V. 108, nº 455, p. 1-24, 1982.

OLGYAY, V. *Design with climate*. New Jersey, Princeton University, 1963.

PATRICIO, Anita Marques; NUNES, J.M.; RITA, J. P. *Conforto térmico no interior de edifícios*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1997. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica).

PEREGRINO, P. *Inter-relações existentes entre os escoamentos de ventos e os padrões de ocupação do solo nos bairros do Cabo Branco e Tambaú/João Pessoa – PB*. João Pessoa: UFPB, 2005. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Urbana).

**PLANO DIRETOR DE JOÃO PESSOA.** Prefeitura Municipal de João Pessoa, 1992.

QUEIROGA, Silvana C. C. de. *Verificação da eficiência do dimensionamento de aberturas para a ventilação natural nos bairros do Cabo Branco e Tambaú - João Pessoa/PB.* João Pessoa: UFPB, 2005. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Urbana).

RIBEIRO, Helena. Poluição do ar e doenças respiratórias. In: TARIFA, José Roberto; AZEVEDO, Tarik Rezende. *Os climas na cidade de São Paulo; teoria e prática.* São Paulo: Universidade de São Paulo, 2001. Cap. 8, p. 136-144.

ROMERO, Marta Adriane Bustos. *Princípios bioclimáticos para o desenho urbano.* São Paulo: Projeto, 1988.

SAKAMOTO, Luiza L. S. *Relações entre a temperatura do ar e a configuração do céu na área central da metrópole paulistana: análise de dois episódios diários.* São Paulo: FFLCH/USP, 1994. (Dissertação, Mestrado em Geografia).

\_\_\_\_\_. Os microclimas e a “configuração do céu” na área central. In: TARIFA, José Roberto; AZEVEDO, Tarik Rezende. *Os climas na cidade de São Paulo; teoria e prática.* São Paulo: Universidade de São Paulo, 2001. Cap. 11, p. 165-187.

SAMPAIO, A. H. L. *Correlações entre uso do solo ilhas de calor no ambiente urbano: o caso de Salvador.* São Paulo: FFLCH/USP, 1981. (Dissertação, Mestrado em Geografia).

SAMPAIO SILVA, Renata. O monitoramento da qualidade do ar. In: TARIFA, José Roberto; AZEVEDO, Tarik Rezende. *Os climas na cidade de São Paulo; teoria e prática.* São Paulo: Universidade de São Paulo, 2001. Cap. 9, p. 145-154.

SAMUELS, Ivor. *Urban morphology in developed countries.* Oxford: Joint Centre for urban Design, Oxford Polytechnic, 1979. (Mimeografado).

SANTAMOURIS, M. Energy and indoor climat in urban environments – recent trends. In ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1, 1990, Gramado. Anais... Gramado: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 1990a.

SARAIVA, J. A. G. *Aerodinâmica dos edifícios altos: características do escoamento e resposta à turbulência de formas prismáticas.* Lisboa: LENEC, 1983 (Tese para o Concurso para Especialista do Laboratório Nacional de Engenharia Civil).

\_\_\_\_\_. Acção do vento e nível de conforto em espaços urbanos. ENCONTRO DE PROFESSORES DE CONFORTO AMBIENTAL, 2, 1994, João Pessoa. Anais... João Pessoa: UFPB/Centro de Tecnologia/Departamento de Arquitetura e Urbanismo, 1994. p. 23-31.

SERRA, Geraldo Gomes. *O espaço natural e a forma urbana.* São Paulo: Nobel, 1984.

SORRE, M. Introduction - Livre Premier: Climatophysique et Climolochimie. In: PIERRY (Org.), *Traité de Climatologie Biologique et Médicale*, 1934. Tome I. p. 1-9.

SOUZA E SILVA, C. A. de. *Critérios para aquisição e análise de dados bioclimáticos urbanos em espaços abertos visando o conforto ambiental*. Rio de Janeiro: PROURB/ FAU/UFRJ, 2003. (Dissertação, Mestrado em Urbanismo).

SPIRN, Anne W. *O jardim de granito*. São Paulo: USP, 1995.

SPSS, versão 11.5 (Copyright©SPSS, Inc. 1989-2002).

TARIFA, José Roberto. O ritmo e a prática do estudo dos climas de São Paulo (1970-2000). In: TARIFA, José Roberto; AZEVEDO, Tarik Rezende. *Os climas na cidade de São Paulo*; teoria e prática. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2001. Cap. 1, p. 11-33.

TARIFA, José Roberto; ARMANI, Gustavo. Os climas “naturais”. In: TARIFA, José Roberto; AZEVEDO, Tarik Rezende. *Os climas na cidade de São Paulo*; teoria e prática. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2001a. Cap. 2, p. 34-46.

TARIFA, José Roberto; ARMANI, Gustavo. Os climas urbanos. In: TARIFA, José Roberto; AZEVEDO, Tarik Rezende. *Os climas na cidade de São Paulo*; teoria e prática. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2001b. Cap. 3, p. 47-70.

VECCHIA, Francisco. *Clima e ambiente construído: a abordagem dinâmica aplicada ao conforto humano*. São Paulo: FFLCH/USP, 1997. (Tese, Doutorado em Geografia).

VIANELLO, Rubens Leite; ALVES, Adil Rainier. *Meteorologia básica e aplicações*. Viçosa: UFV, 2000.

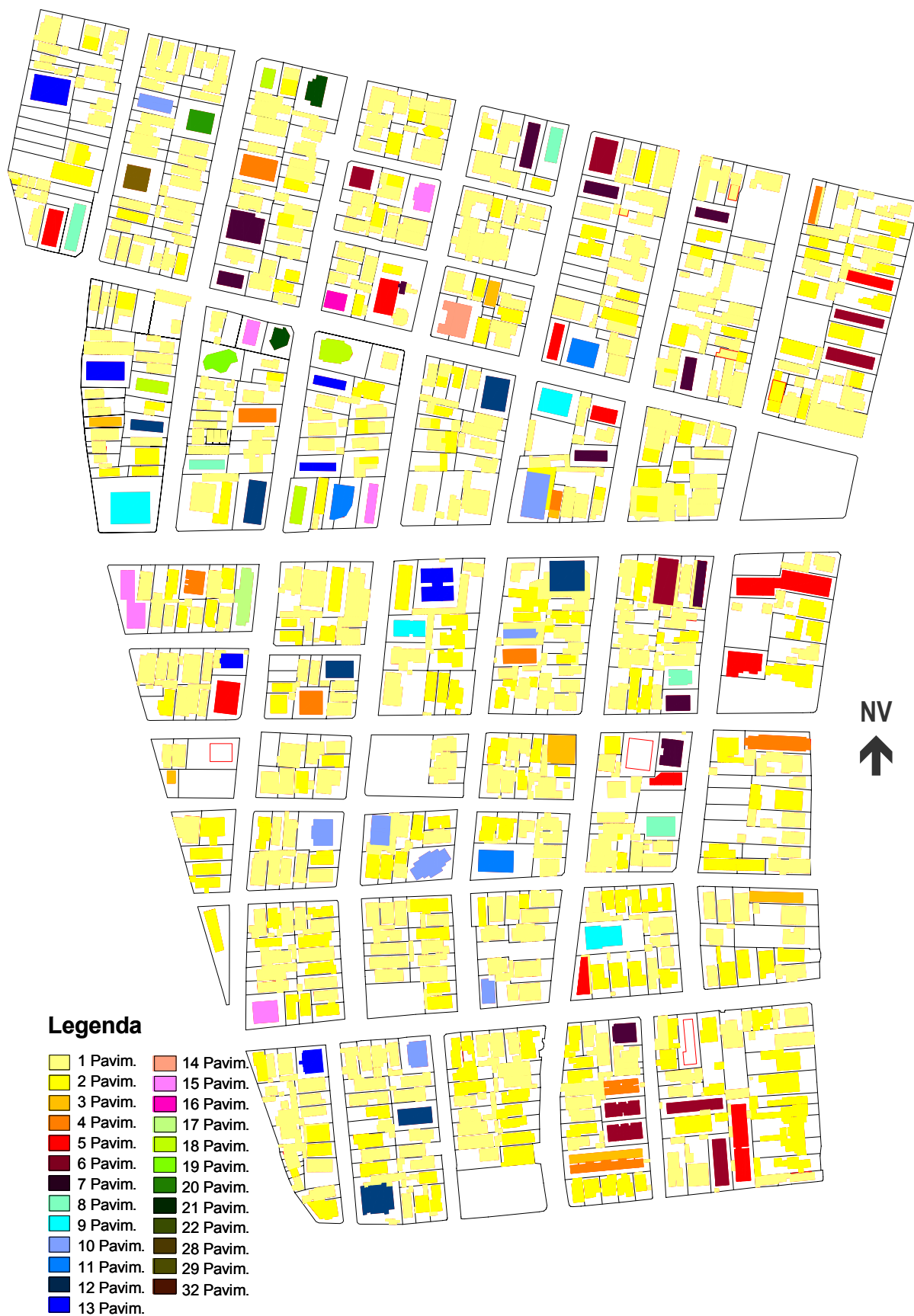
WIRTSCHAFTSMINISTERIUM Baden-Württemberg, Stuttgart. *Cartilha urbanística do clima – Indicações para o plano diretor – seqüência 2*. Tradução por Francisco de Assis Gonçalves da Silva. São Paulo, Trabalho Programado 3, 1998. 194p. Título Original: Städtebauliche Klimafibel Hinweise für die Bauleitplanung Folge 2.



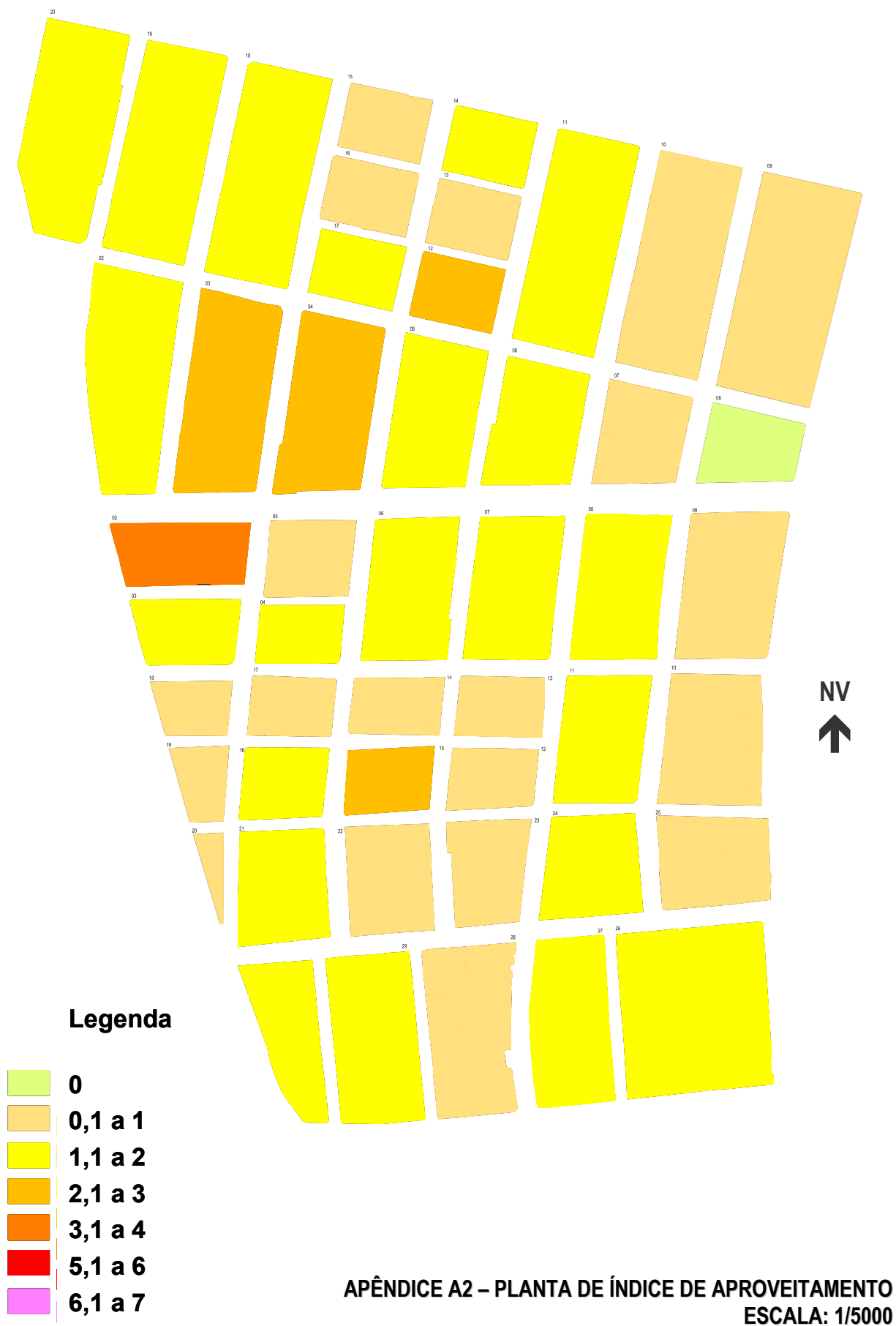
# **Apêndice A**

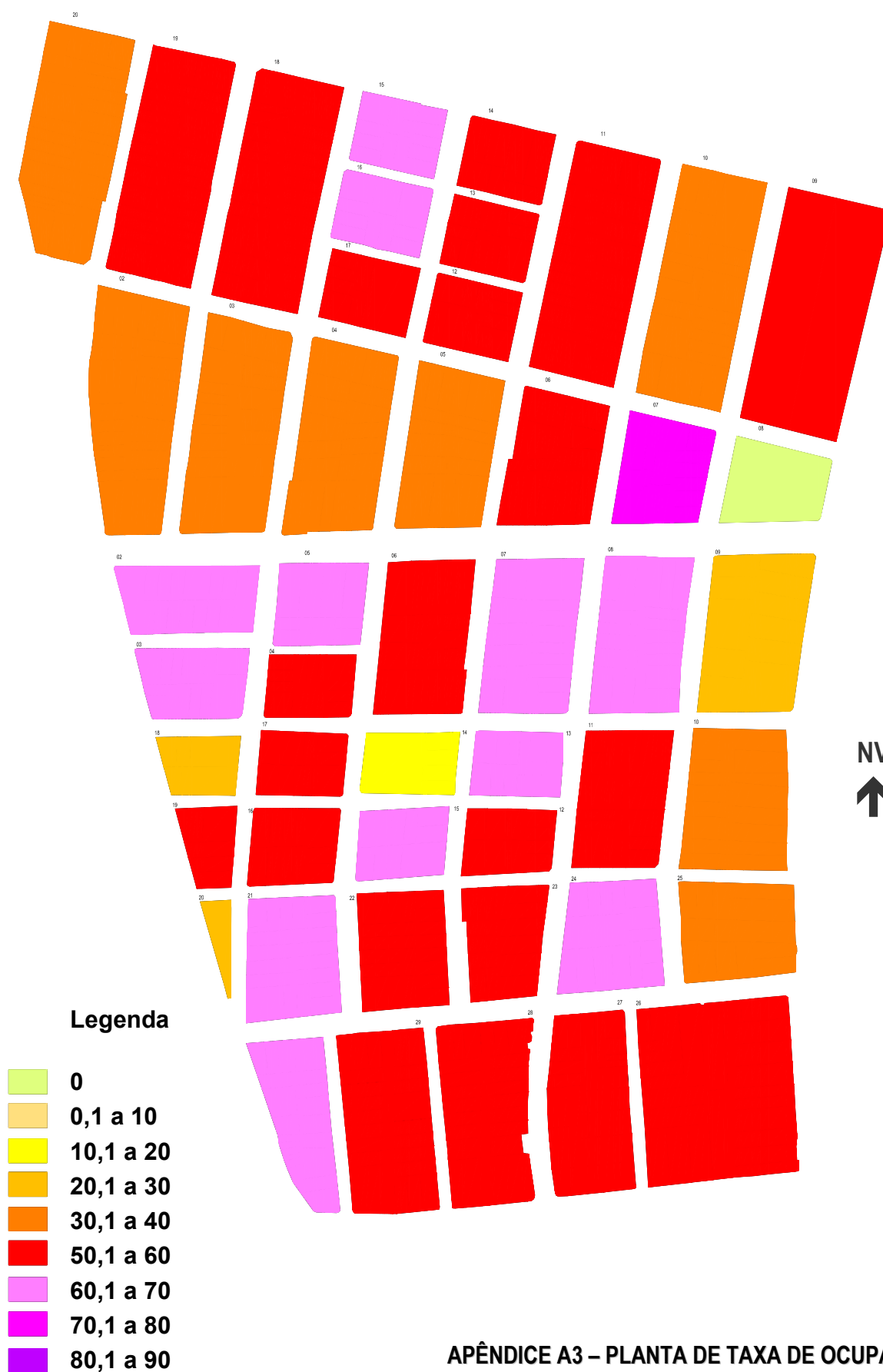
## **Cartografia**

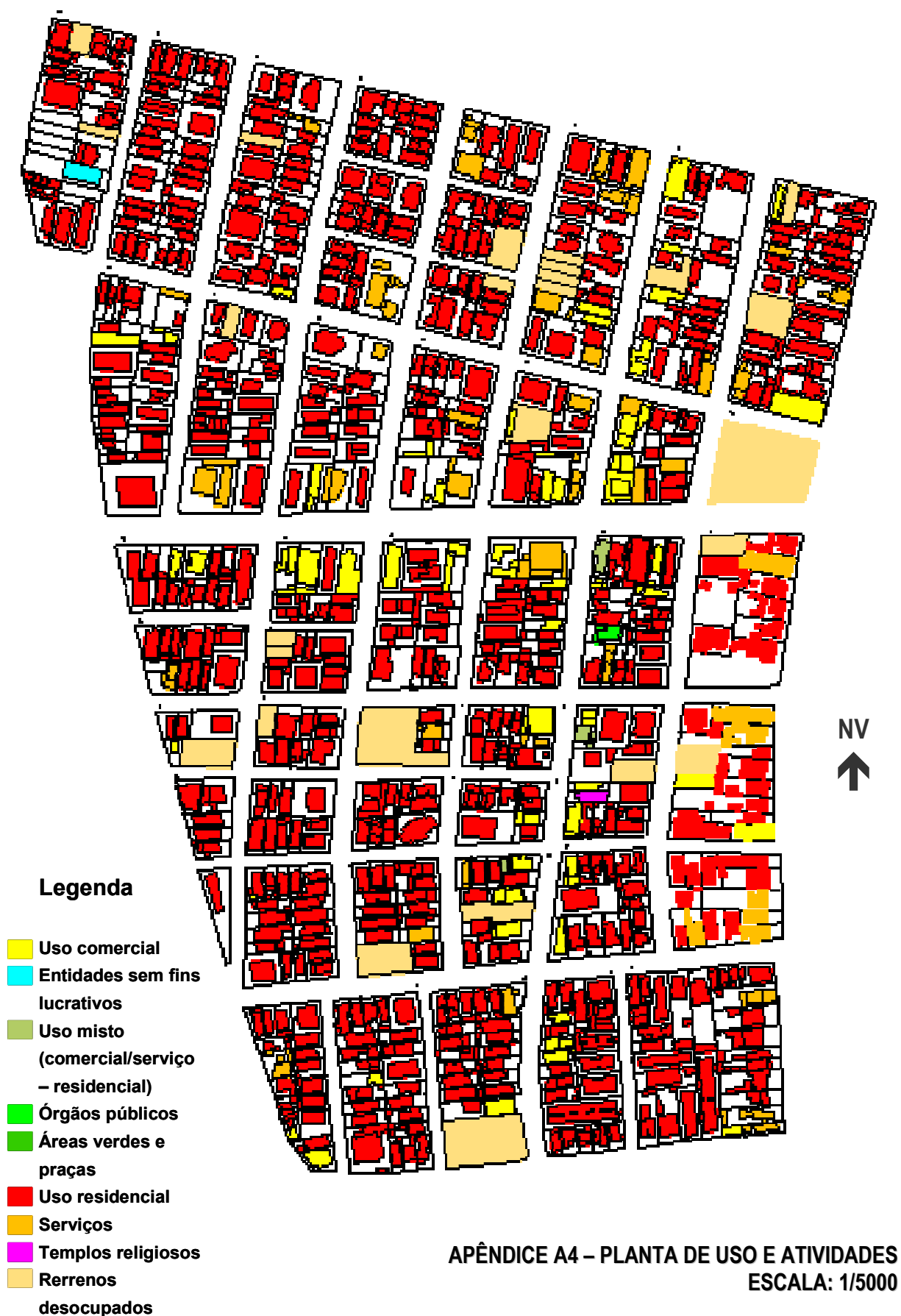
---



**APÊNDICE A1 – PLANTA DE GABARITO EM ALTURA  
ESCALA: 1/5000**





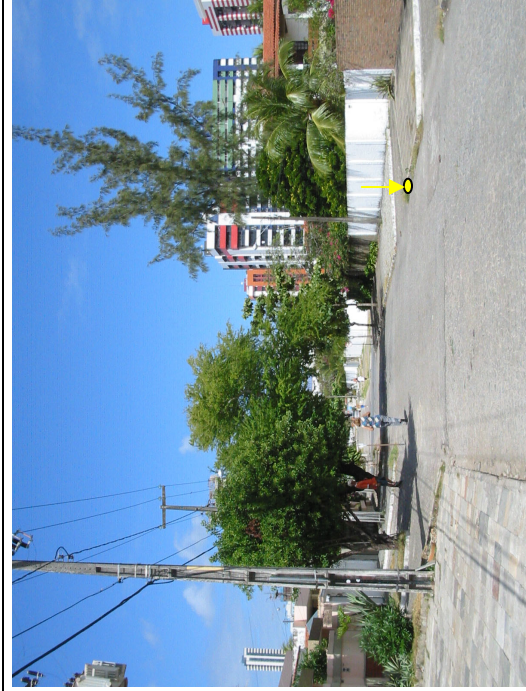


# **Apêndice B**

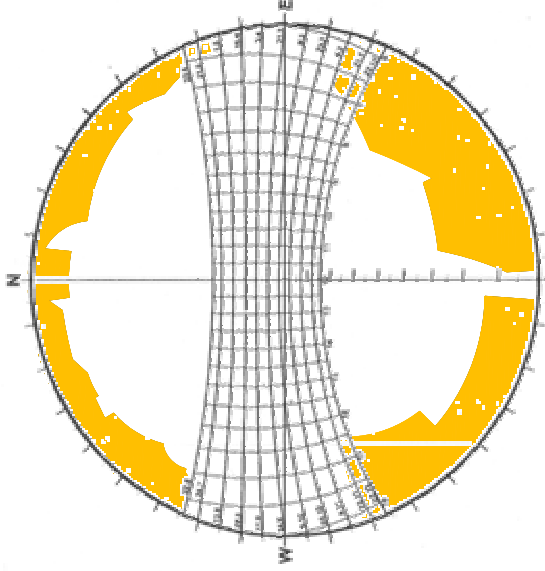
## **Caracterização dos pontos de medição**

---

**CARACTERIZAÇÃO DO PONTO B1 EM RELAÇÃO AO ESPAÇO URBANO**

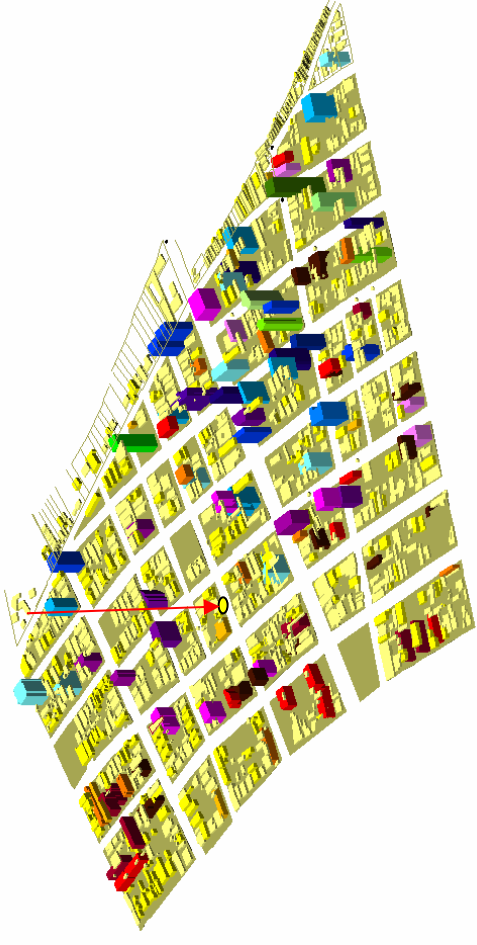


Fotografia do Ponto B1



**B1 – 71,24%**  
Máscara formada pelas edificações

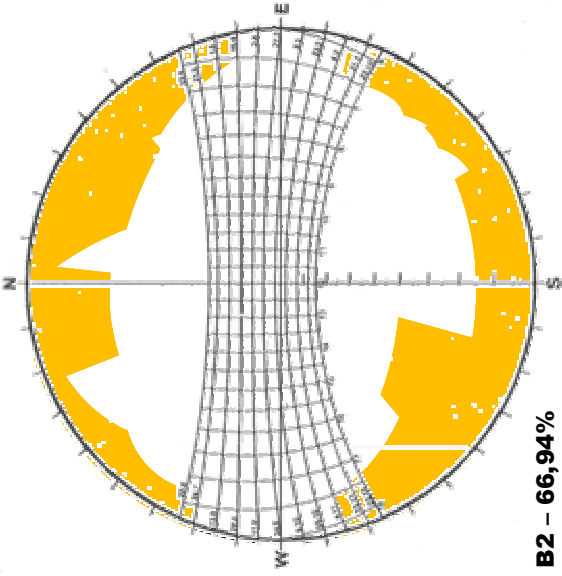
|  |   |
|--|---|
| <b>Espaço urbano</b>   |   |
| Cabo Branco - R. Adolfo L. Franca (entre a Av. Marcolina da Conceição e R. Juiz Amaro Bezerra) |   |
| <b>Localização</b>   |   |
| ( ) Cruzamento   | ( X ) Centro de Quadra ( ) Esquina aberta ( ) Esquina em canto      |
| <b>Continuidade da massa construída</b>  |   |
| ( ) Barreira contínua  | ( X ) Alternância de gabarito ( ) Livre                             |
| <b>Uso do solo</b>   |   |
| ( ) Comercial  | ( ) Residencial ( X ) Misto ( ) Público                             |
| <b>Fluxos de Pedestre</b>  |   |
| ( ) Intenso  | ( ) Médio ( X ) Fraco   |
| <b>Fluxos de Veículos</b>  |   |
| ( ) Intenso  | ( ) Médio ( X ) Fraco   |
| <b>Vegetação</b>   |   |
| ( ) Densa  | ( ) Média ( X ) Rala ( ) Inexistente                                |
| <b>Presença de água</b>  |   |
| ( ) Fonte  | ( ) Espelho d'água ( ) Chafariz ( ) Corpos d'Água ( X ) Inexistente |
| <b>Pavimentação da Rua</b>   |   |
| ( ) Asfalto  | ( X ) Calçamento  |



**CARACTERIZAÇÃO DO PONTO B2 EM RELAÇÃO AO ESPAÇO URBANO**



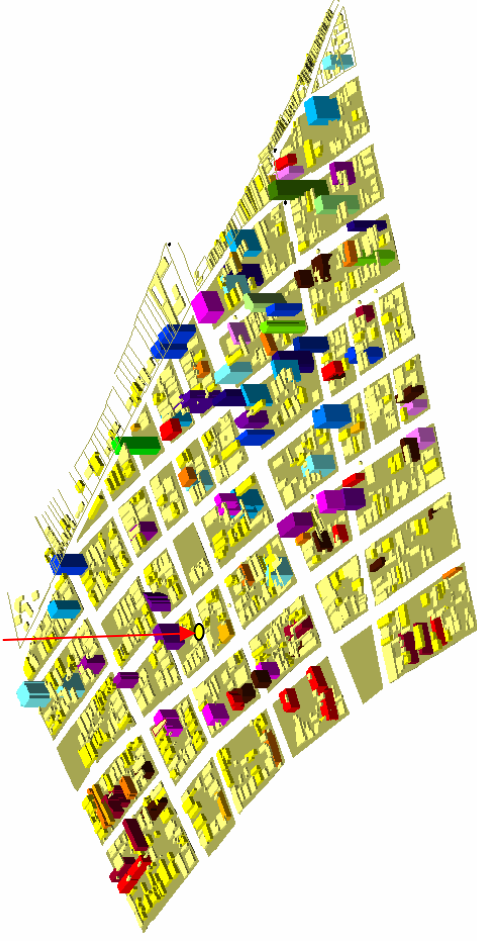
Fotografia do Ponto B2



**B2 – 66,94%**

Máscara formada pelas edificações

**Espaço urbano**



Cabo Branco - R. Adolfo L. Franca (entre a Av. Marcolina da Conceição e R. Juiz Amaro Bezerra)

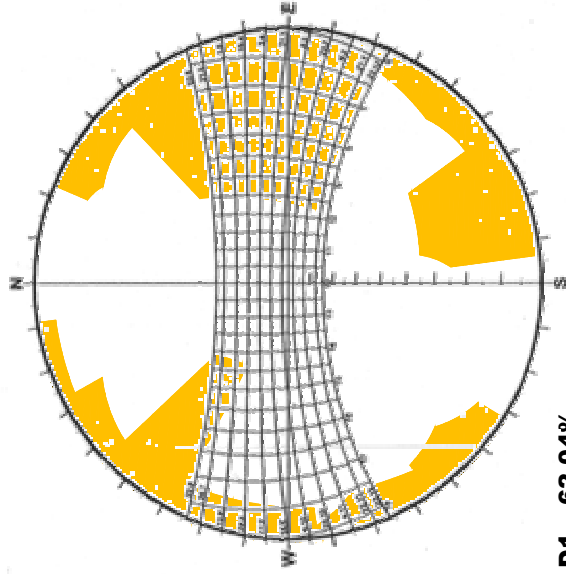
|  |  |
|--|--|
| <b>Localização</b>                         |  |
| <input type="checkbox"/> Cruzamento        | <input checked="" type="checkbox"/> Centro de Quadra <input type="checkbox"/> Esquina aberta <input type="checkbox"/> Esquina em canto                           |
| <b>Continuidade da massa construída</b>    |  |
| <input type="checkbox"/> Barreira contínua | <input checked="" type="checkbox"/> Alternância de gabarito <input type="checkbox"/> Livre   |
| <b>Uso do solo</b>                         |  |
| <input type="checkbox"/> Comercial         | <input checked="" type="checkbox"/> Residencial <input type="checkbox"/> Misto <input type="checkbox"/> Público  |
| <b>Fluxos de Pedestre</b>                  |  |
| <input type="checkbox"/> Intenso           | <input type="checkbox"/> Médio <input checked="" type="checkbox"/> Fraco   |
| <b>Fluxos de Veículos</b>                  |  |
| <input type="checkbox"/> Intenso           | <input type="checkbox"/> Médio <input checked="" type="checkbox"/> Fraco   |
| <b>Vegetação</b>                           |  |
| <input type="checkbox"/> Densa             | <input type="checkbox"/> Média <input checked="" type="checkbox"/> Rala <input type="checkbox"/> Inexistente   |
| <b>Presença de água</b>                    |  |
| <input type="checkbox"/> Fonte             | <input type="checkbox"/> Espelho d'água <input type="checkbox"/> Chafariz <input type="checkbox"/> Corpos d'Água <input checked="" type="checkbox"/> Inexistente |
| <b>Pavimentação da Rua</b>                 |  |
| <input type="checkbox"/> Asfalto           | <input type="checkbox"/> Calçamento  |



**CARACTERIZAÇÃO DO PONTO D1 EM RELAÇÃO AO ESPAÇO URBANO**

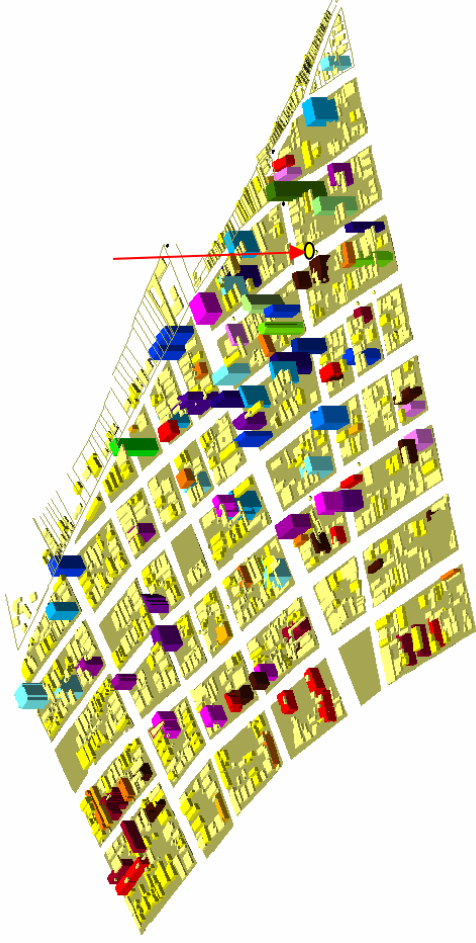


Fotografia do Ponto D1



**D1 – 62,04%**  
Máscara formada pelas edificações

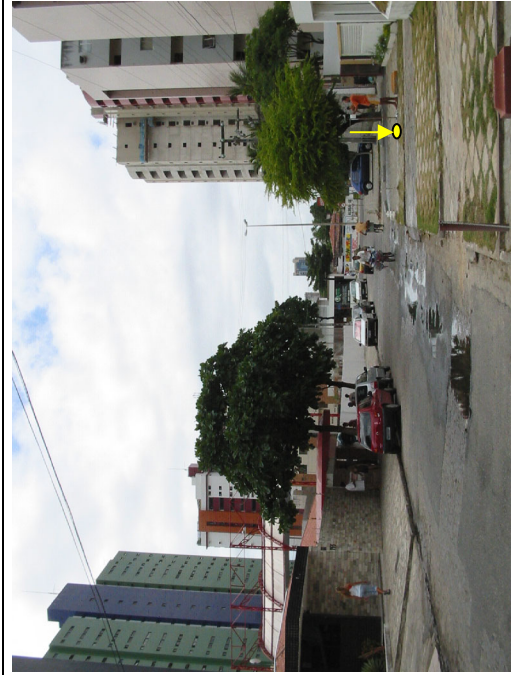
**Espaço urbano**



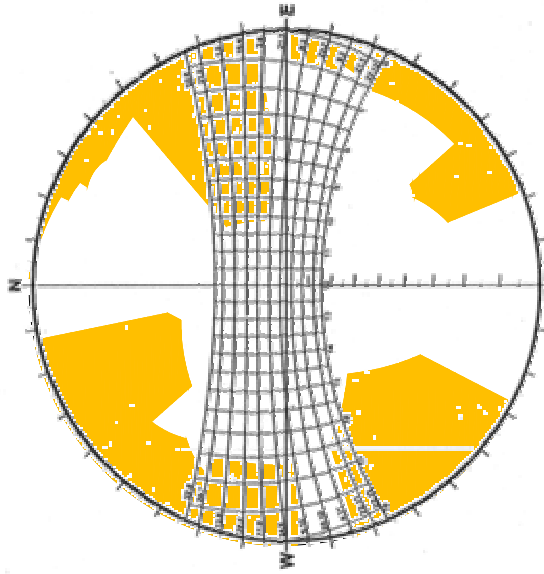
Tambaú - Av. Silvino Lopes (entre a Av. José Augusto Trindade e Av. Helena Meira Lins)

|  |  |
|--|--|
| <b>Localização</b>                         |  |
| <input type="checkbox"/> Cruzamento        | <input checked="" type="checkbox"/> Centro de Quadra <input type="checkbox"/> Esquina aberta <input type="checkbox"/> Esquina em canto                           |
| <b>Continuidade da massa construída</b>    |  |
| <input type="checkbox"/> Barreira contínua | <input checked="" type="checkbox"/> Alternância de gabarito <input type="checkbox"/> Livre   |
| <b>Uso do solo</b>                         |  |
| <input type="checkbox"/> Comercial         | <input checked="" type="checkbox"/> Residencial <input type="checkbox"/> Misto <input type="checkbox"/> Público  |
| <b>Fluxos de Pedestre</b>                  |  |
| <input type="checkbox"/> Intenso           | <input type="checkbox"/> Médio <input checked="" type="checkbox"/> Fraco   |
| <b>Fluxos de Veículos</b>                  |  |
| <input type="checkbox"/> Intenso           | <input checked="" type="checkbox"/> Médio <input type="checkbox"/> Fraco   |
| <b>Vegetação</b>                           |  |
| <input type="checkbox"/> Densa             | <input type="checkbox"/> Média <input checked="" type="checkbox"/> Rala <input type="checkbox"/> Inexistente   |
| <b>Presença de água</b>                    |  |
| <input type="checkbox"/> Fonte             | <input type="checkbox"/> Espelho d'água <input type="checkbox"/> Chafariz <input type="checkbox"/> Corpos d'Água <input checked="" type="checkbox"/> Inexistente |
| <b>Pavimentação da Rua</b>                 |  |
| <input type="checkbox"/> Asfalto           | <input type="checkbox"/> Calçamento  |

**CARACTERIZAÇÃO DO PONTO D2 EM RELAÇÃO AO ESPAÇO URBANO**

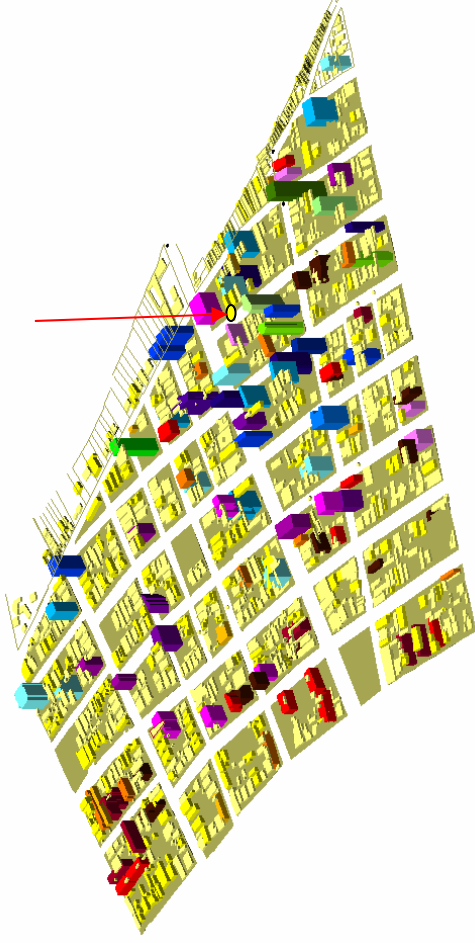


Fotografia do Ponto D2



**D2 – 59,16%**  
Máscara formada pelas edificações

**Espaço urbano**



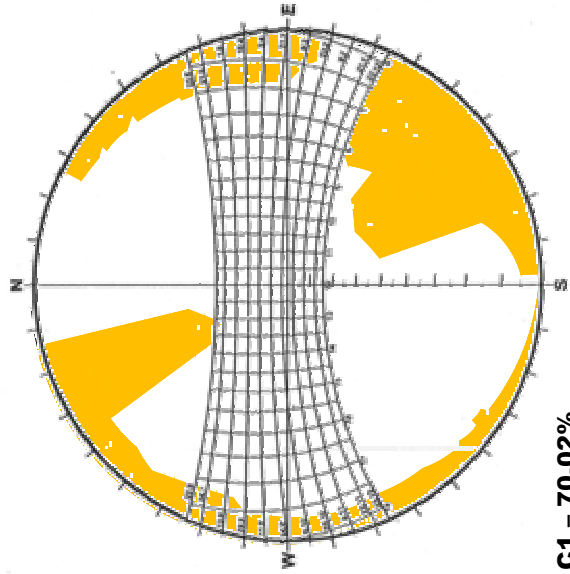
Tambaú - Av. Silvino Lopes (entre a Av. Epitácio Pessoa e Av. José Augusto Trindade)

|   |   |
|---|---|
| <b>Localização</b>                      |   |
| ( ) Cruzamento                          | ( X ) Centro de Quadra ( ) Esquina aberta ( ) Esquina em canto      |
| <b>Continuidade da massa construída</b> |   |
| ( ) Barreira contínua                   | ( X ) Alternância de gabarito ( ) Livre                             |
| <b>Uso do solo</b>                      |   |
| ( ) Comercial                           | ( ) Residencial ( X ) Misto ( ) Público                             |
| <b>Fluxos de Pedestre</b>               |   |
| ( ) Intenso                             | ( ) Médio ( X ) Fraco   |
| <b>Fluxos de Veículos</b>               |   |
| ( ) Intenso                             | ( X ) Médio ( ) Fraco   |
| <b>Vegetação</b>                        |   |
| ( ) Densa                               | ( ) Média ( X ) Rala ( ) Inexistente                                |
| <b>Presença de água</b>                 |   |
| ( ) Fonte                               | ( ) Espelho d'água ( ) Chafariz ( ) Corpos d'Água ( X ) Inexistente |
| <b>Pavimentação da Rua</b>              |   |
| ( ) Asfalto                             | ( ) Calçamento  |

## CARACTERIZAÇÃO DO PONTO C1 EM RELAÇÃO AO ESPAÇO URBANO

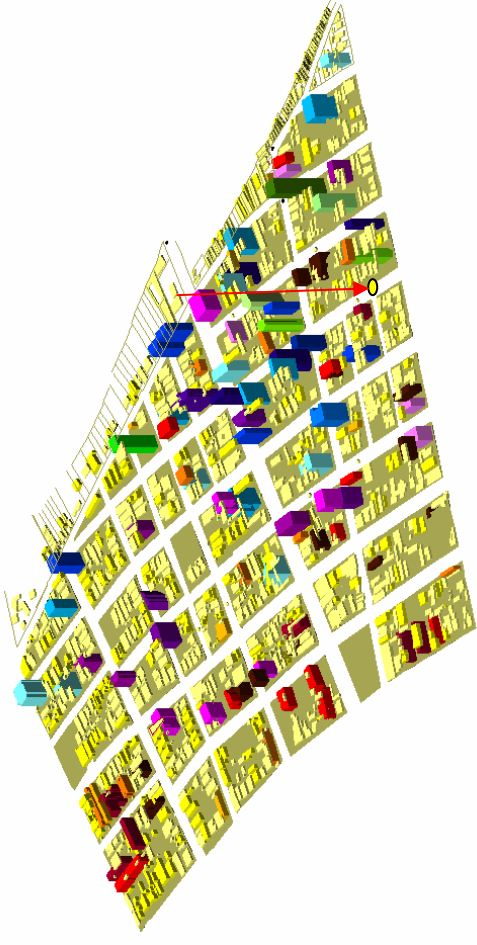


Fotografia do Ponto C1



**C1 – 70,02%**  
Máscara formada pelas edificações

### Espaço urbano



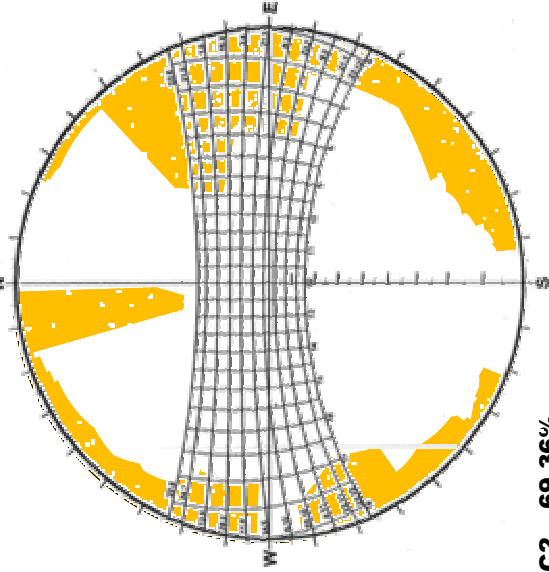
Tambaú - Av. Monteiro Lobato (entre a Av. José Augusto Trindade e Av. Helena Meira Lins)

|  |  |
|--|--|
| <b>Localização</b>                         |  |
| <input type="checkbox"/> Cruzamento        | <input checked="" type="checkbox"/> Centro de Quadra <input type="checkbox"/> Esquina aberta <input type="checkbox"/> Esquina em canto                           |
| <b>Continuidade da massa construída</b>    |  |
| <input type="checkbox"/> Barreira contínua | <input checked="" type="checkbox"/> Alternância de gabarito <input type="checkbox"/> Livre   |
| <b>Uso do solo</b>                         |  |
| <input type="checkbox"/> Comercial         | <input checked="" type="checkbox"/> Residencial <input type="checkbox"/> Misto <input type="checkbox"/> Público  |
| <b>Fluxos de Pedestre</b>                  |  |
| <input type="checkbox"/> Intenso           | <input type="checkbox"/> Médio <input checked="" type="checkbox"/> Fraco   |
| <b>Fluxos de Veículos</b>                  |  |
| <input type="checkbox"/> Intenso           | <input checked="" type="checkbox"/> Médio <input type="checkbox"/> Fraco   |
| <b>Vegetação</b>                           |  |
| <input type="checkbox"/> Densa             | <input type="checkbox"/> Média <input checked="" type="checkbox"/> Rala <input type="checkbox"/> Inexistente   |
| <b>Presença de água</b>                    |  |
| <input type="checkbox"/> Fonte             | <input type="checkbox"/> Espelho d'água <input type="checkbox"/> Chafariz <input type="checkbox"/> Corpos d'Água <input checked="" type="checkbox"/> Inexistente |
| <b>Pavimentação da Rua</b>                 |  |
| <input type="checkbox"/> Asfalto           | <input type="checkbox"/> Calçamento  |

**CARACTERIZAÇÃO DO PONTO C2 EM RELAÇÃO AO ESPAÇO URBANO**

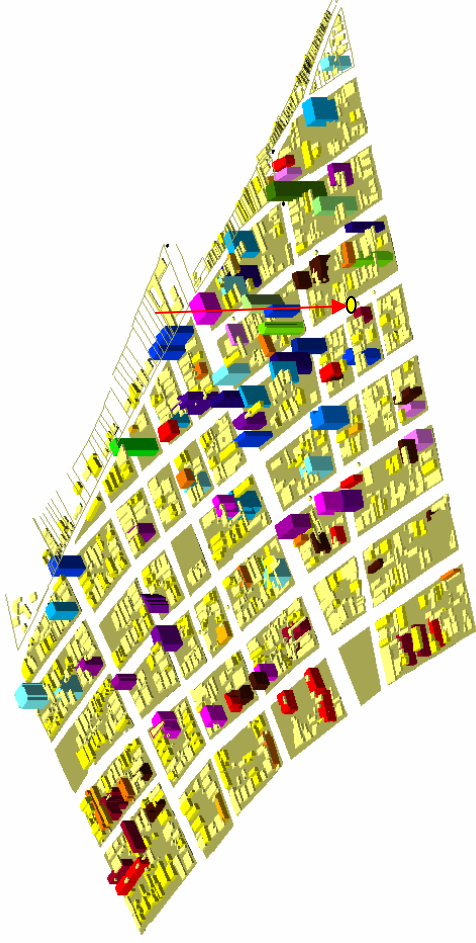


Fotografia do Ponto C2



**C2 – 69,36%**  
Máscara formada pelas edificações


**Espaço urbano**



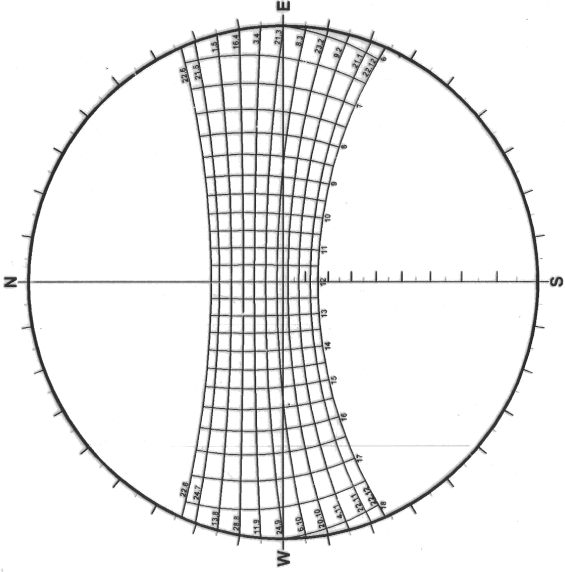
Tambaú - Av. Monteiro Lobato (entre a Av. José Augusto Trindade e Av. Helena Meira Lins)

|  |  |
|--|--|
| <b>Localização</b>                         |  |
| <input type="checkbox"/> Cruzamento        | <input checked="" type="checkbox"/> Centro de Quadra <input type="checkbox"/> Esquina aberta <input type="checkbox"/> Esquina em canto                           |
| <b>Continuidade da massa construída</b>    |  |
| <input type="checkbox"/> Barreira contínua | <input checked="" type="checkbox"/> Alternância de gabarito <input type="checkbox"/> Livre   |
| <b>Uso do solo</b>                         |  |
| <input type="checkbox"/> Comercial         | <input checked="" type="checkbox"/> Residencial <input type="checkbox"/> Misto <input type="checkbox"/> Público  |
| <b>Fluxos de Pedestre</b>                  |  |
| <input type="checkbox"/> Intenso           | <input type="checkbox"/> Médio <input checked="" type="checkbox"/> Fraco   |
| <b>Fluxos de Veículos</b>                  |  |
| <input type="checkbox"/> Intenso           | <input checked="" type="checkbox"/> Médio <input type="checkbox"/> Fraco   |
| <b>Vegetação</b>                           |  |
| <input type="checkbox"/> Densa             | <input type="checkbox"/> Média <input checked="" type="checkbox"/> Rala <input type="checkbox"/> Inexistente   |
| <b>Presença de água</b>                    |  |
| <input type="checkbox"/> Fonte             | <input type="checkbox"/> Espelho d'água <input type="checkbox"/> Chafariz <input type="checkbox"/> Corpos d'Água <input checked="" type="checkbox"/> Inexistente |
| <b>Pavimentação da Rua</b>                 |  |
| <input type="checkbox"/> Asfalto           | <input type="checkbox"/> Calçamento  |

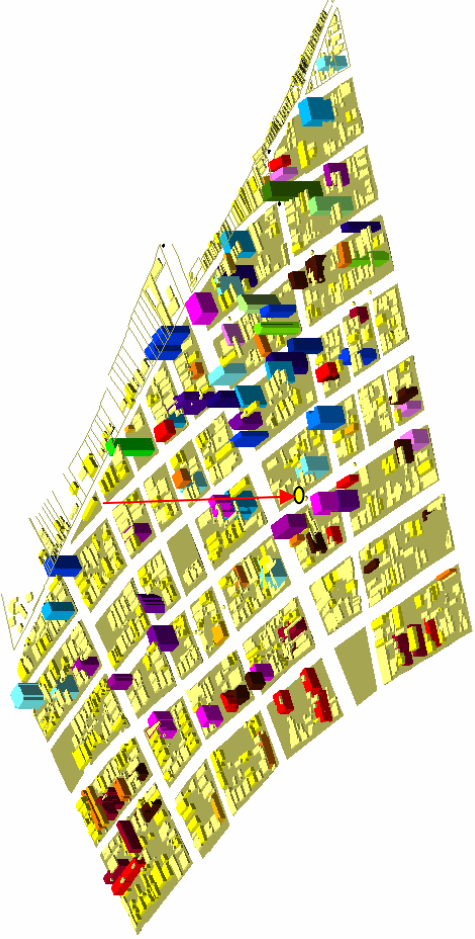
**CARACTERIZAÇÃO DO PONTO A1 EM RELAÇÃO AO ESPAÇO URBANO**



Fotografia do Ponto A1



Máscara formada pelas edificações



Tambáú - Av.Profa. Maria Sales (entre a Av. Epiácio Pessoa e Av. José Augusto Trindade)

**Localização**

( ) Cruzamento (X) Centro de Quadra ( ) Esquina aberta ( ) Esquina em canto

**Continuidade da massa construída**

( ) Barreira contínua (X) Alternância de gabarito ( ) Livre

**Uso do solo**

( ) Comercial ( ) Residencial (X) Misto ( ) Público

**Fluxos de Pedestre**

( ) Intenso ( ) Médio (X) Fraco

**Fluxos de Veículos**

(X) Intenso ( ) Médio ( ) Fraco

**Vegetação**

( ) Densa ( ) Média (X) Rala ( ) Inexistente

**Pavimentação da Rua**


( ) Asfalto ( ) Calçamento

**Presença de água**

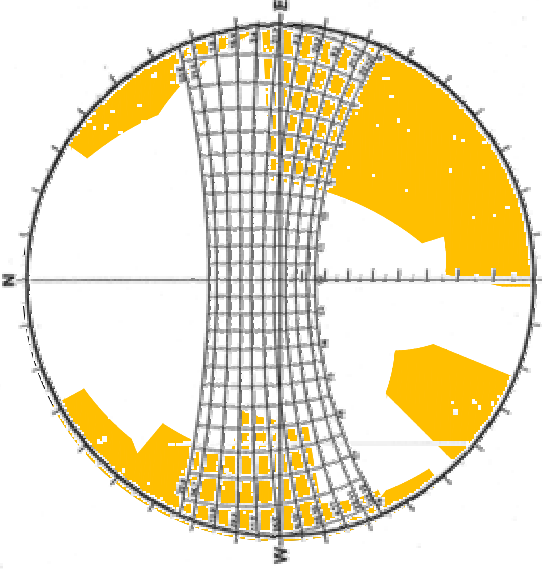
( ) Fonte ( ) Espelho d'água ( ) Chafariz ( ) Corpos d'Água (X) Inexistente

**Espaço urbano**

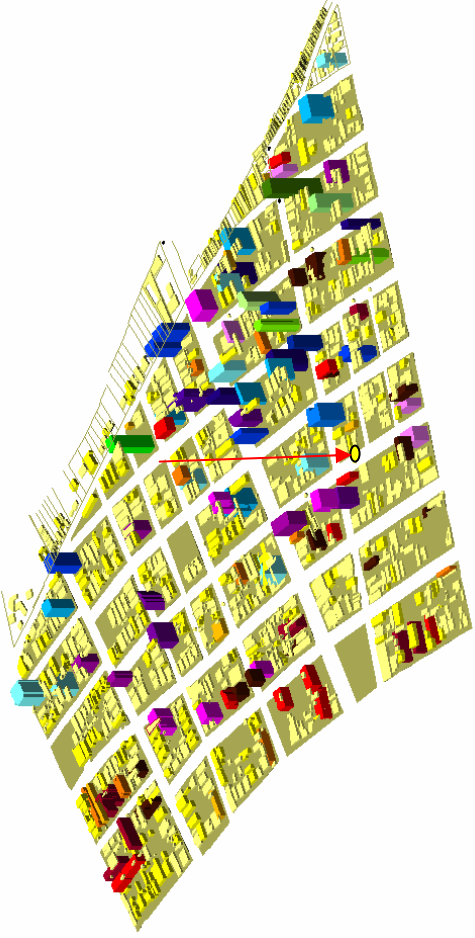
**CARACTERIZAÇÃO DO PONTO A2 EM RELAÇÃO AO ESPAÇO URBANO**



Fotografia do Ponto A2



**A2 – 61,13%**  
Máscara formada pelas edificações



Tambaú - Av.Profa. Maria Sales (entre a Av. José Augusto Trindade e Av. Helena Meira Lins)

|   |  |
|---|--|
| <b>Localização</b>                          |  |
| <input type="checkbox"/> Cruzamento         | <input checked="" type="checkbox"/> Centro de Quadra <input type="checkbox"/> Esquina aberta <input type="checkbox"/> Esquina em canto                           |
| <b>Continuidade da massa construída</b>     |  |
| <input type="checkbox"/> Barreira contínua  | <input checked="" type="checkbox"/> Alternância de gabarito <input type="checkbox"/> Livre   |
| <b>Uso do solo</b>                          |  |
| <input type="checkbox"/> Comercial          | <input type="checkbox"/> Residencial <input checked="" type="checkbox"/> Misto <input type="checkbox"/> Público  |
| <b>Fluxos de Pedestre</b>                   |  |
| <input type="checkbox"/> Intenso            | <input type="checkbox"/> Médio <input checked="" type="checkbox"/> Fraco   |
| <b>Fluxos de Veículos</b>                   |  |
| <input checked="" type="checkbox"/> Intenso | <input type="checkbox"/> Médio <input type="checkbox"/> Fraco  |
| <b>Vegetação</b>                            |  |
| <input type="checkbox"/> Densa              | <input type="checkbox"/> Média <input checked="" type="checkbox"/> Rala <input type="checkbox"/> Inexistente   |
| <b>Presença de água</b>                     |  |
| <input type="checkbox"/> Fonte              | <input type="checkbox"/> Espelho d'água <input type="checkbox"/> Chafariz <input type="checkbox"/> Corpos d'Água <input checked="" type="checkbox"/> Inexistente |

**Espaço urbano**

# **Apêndice C**

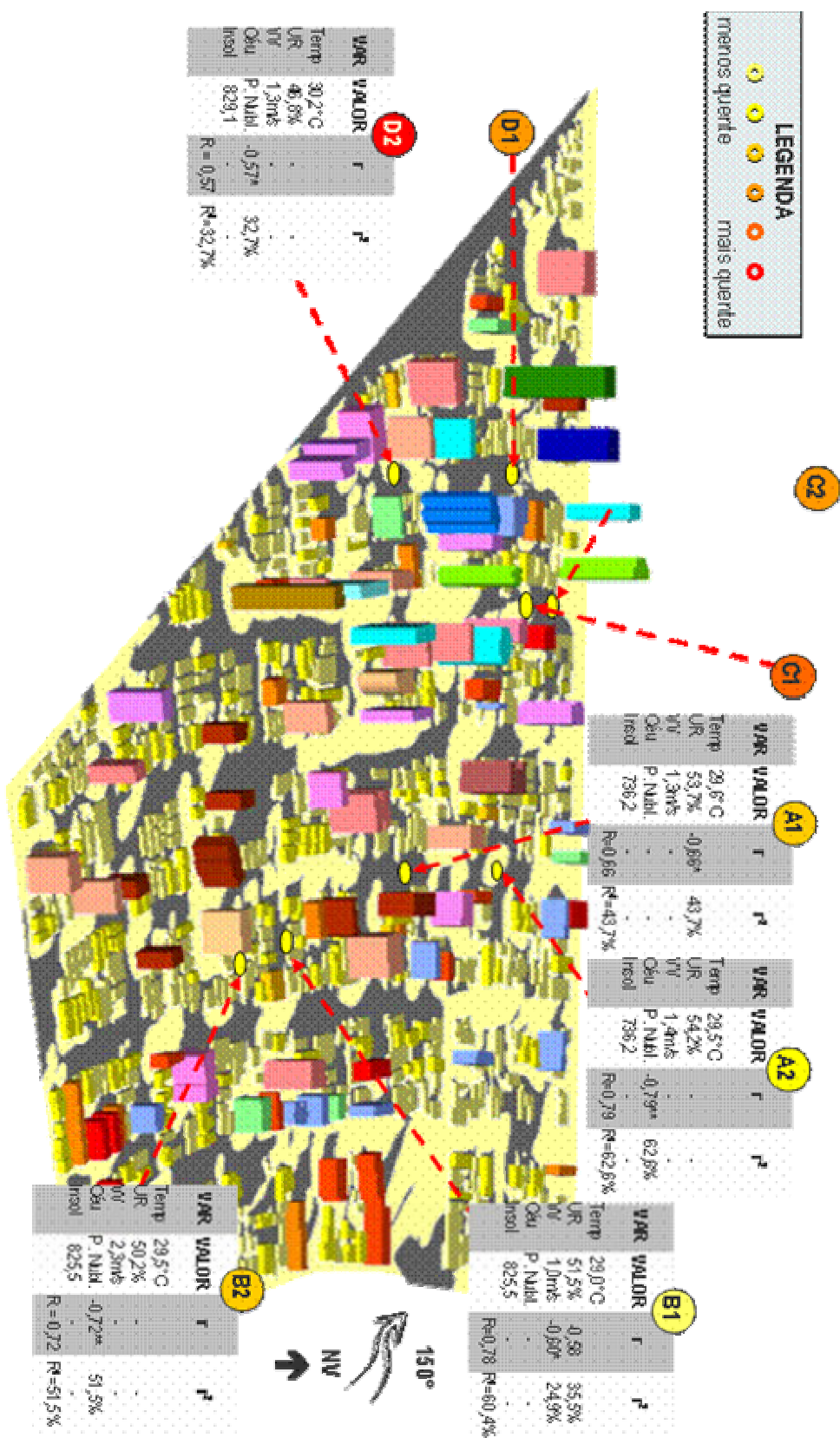
## **Figuras de correlação**

---

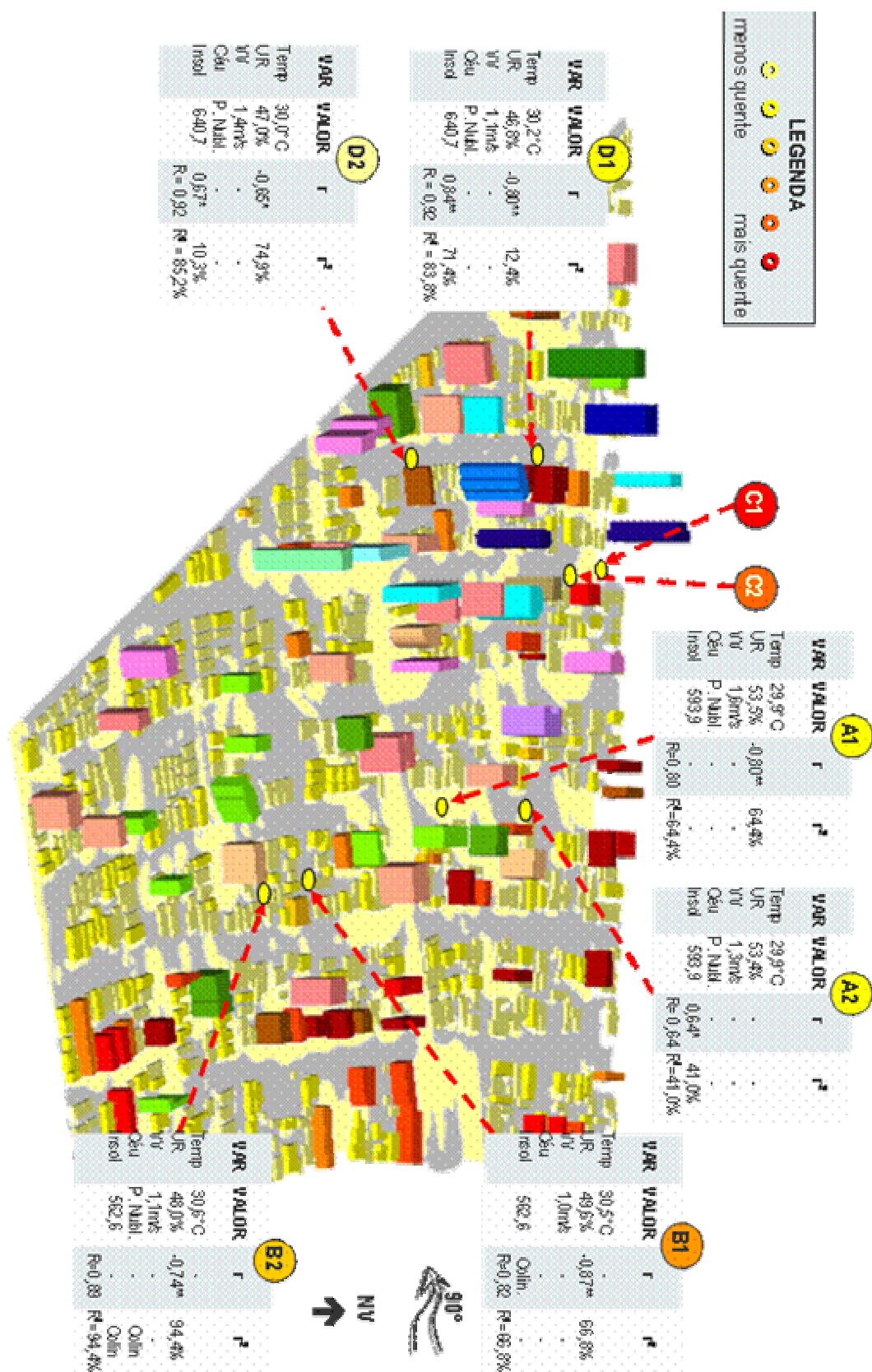
Observação: Não estão indicados os dados referentes aos

pontos onde não foram verificadas correlações significantes



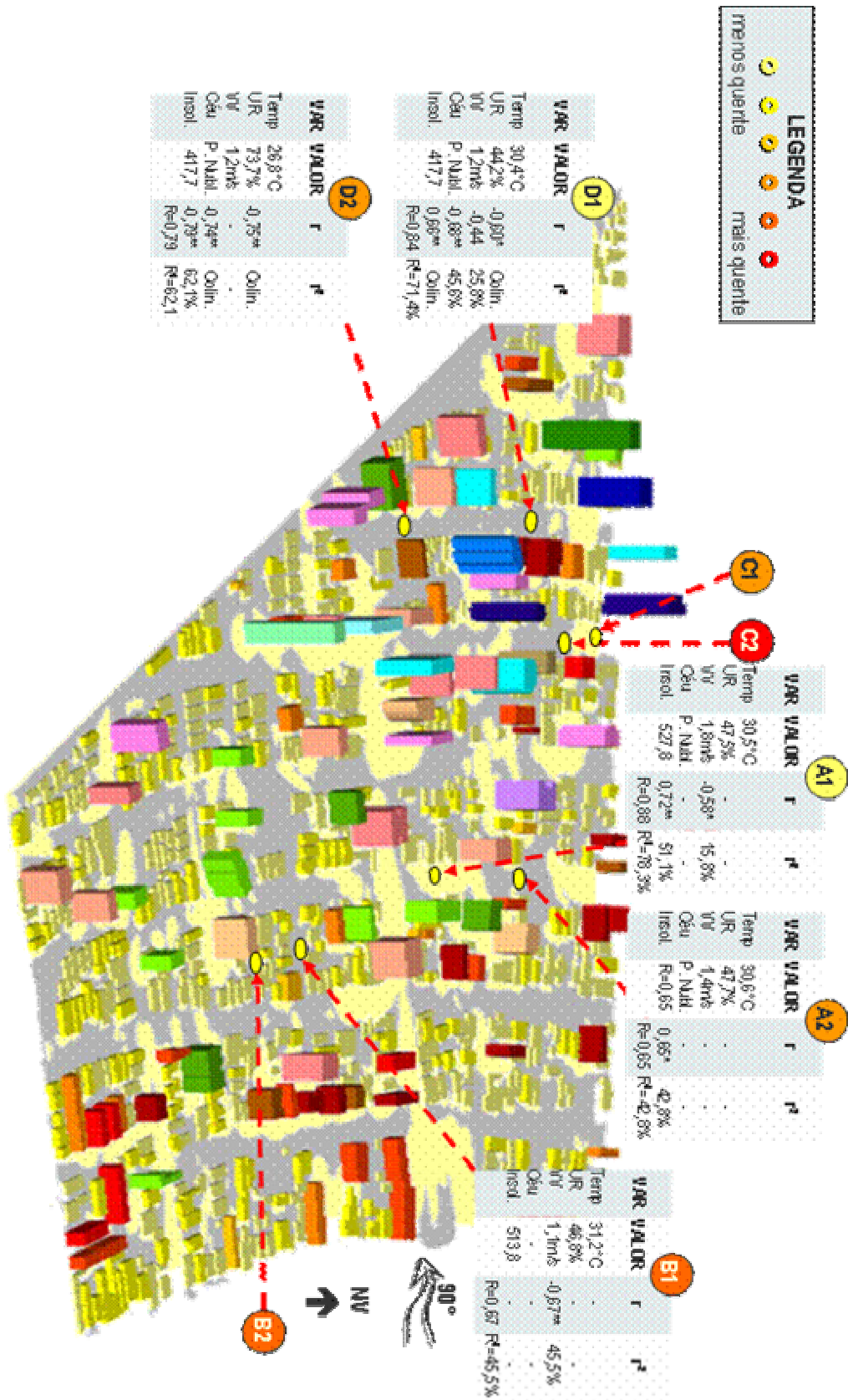


APÊNDICE C1  
CORRELAÇÕES POR PONTO, PARA O VENTO SUDESTE, PELA MANHÃ

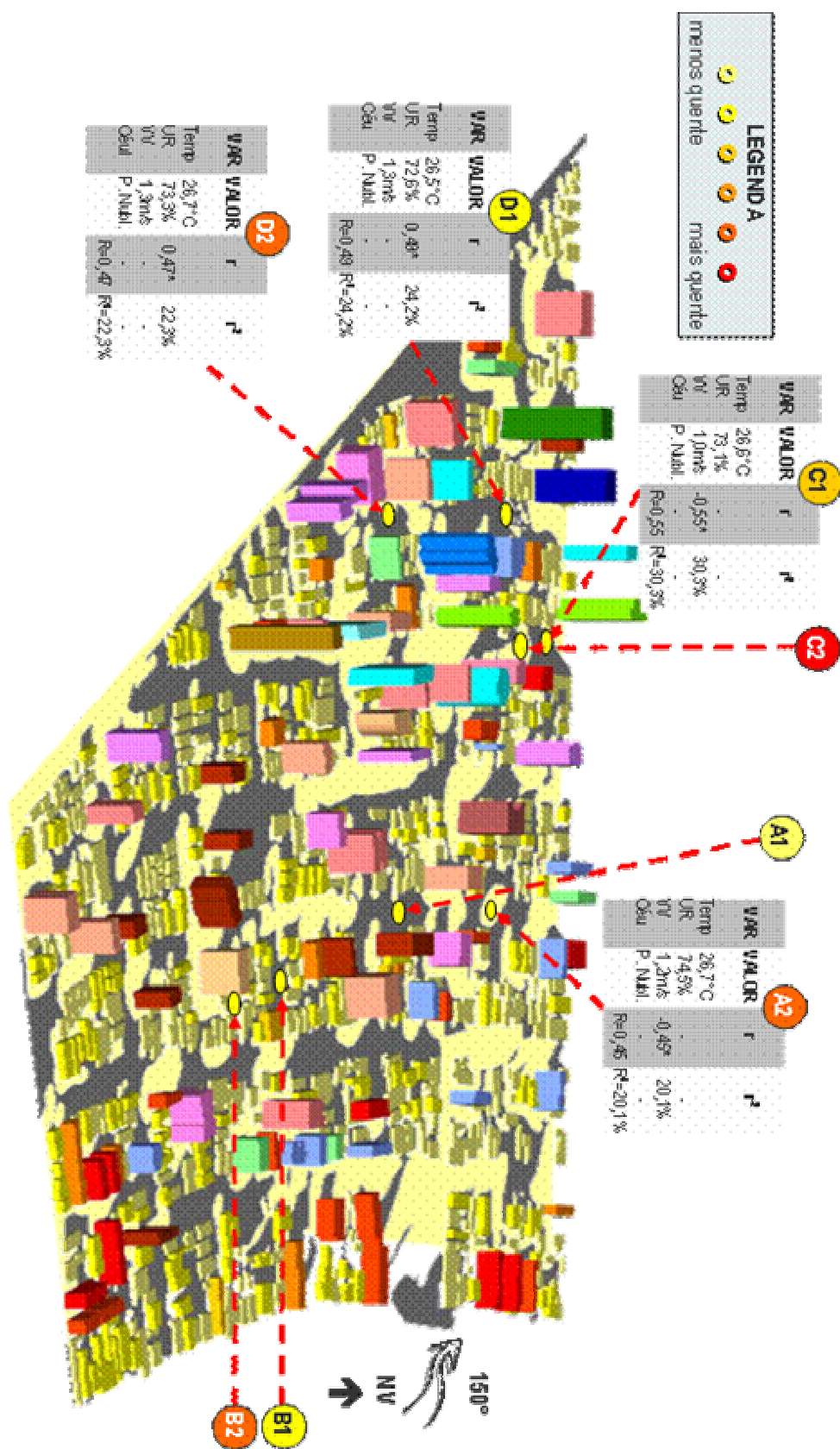


APÊNDICE C2  
CORRELAÇÕES POR PONTO, PARA OS VENTOS LESTE E NORDESTE, PELA MANHÃ

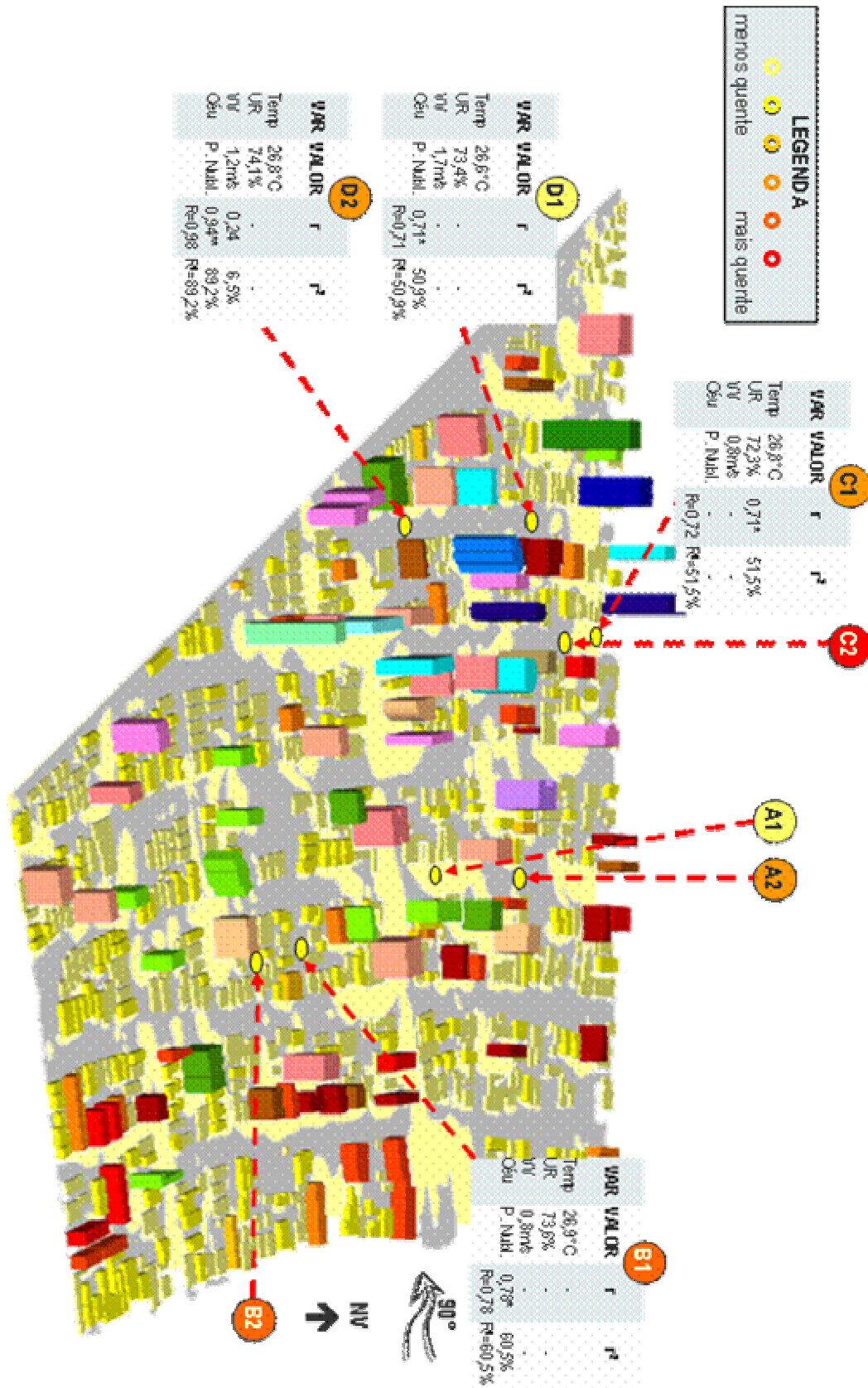




APÊNDICE C4  
CORRELAÇÕES POR PONTO, PARA OS VENTOS LESTE E NORDESTE, À TARDE



**APÊNDICE C5**  
**CORRELAÇÕES POR PONTO, PARA OS VENTOS SUDESTE, À NOITE**



**APÊNDICE C6**  
**CORRELAÇÕES POR PONTO, PARA OS VENTOS LESTE E NORDESTE, À NOITE**